

Atti

Advisory Committee

Salvatore Esposito

INFN Napoli

Lucio Fregonese

Università degli studi di Pavia

Mauro Gargano

Osservatorio Astron. Capodimonte, Napoli

Marco Grassi

(Direttore INFN Pisa)

Stavros Katsanevas

EGO

Roberto Lalli

Max Planck Inst. History of Science, Berlin

Adele La Rana

Centro *Enrico Fermi*, Roma

Roberto Mantovani

Università degli studi di Urbino

Marisa Michelini

Università degli studi di Udine

Angelo Pagano

INFN Catania

Paolo Rossi

Università di Pisa

Ettore Vicari

Direttore Dipartimento di Fisica di Pisa

XXXIX Congresso Nazionale della Società Italiana degli Storici della Fisica e dell'Astronomia



Pisa 9-12 Settembre 2019

Dipartimento di Fisica Enrico Fermi

Largo Bruno Pontecorvo 3 - Pisa

European Gravitational Observatory

Via Edoardo Amaldi 5 - Cascina

Local Organizing Committee

Carlo Bemporad

Università di Pisa

Rino Castaldi

INFN Pisa

Vincenzo Cavasinni

Università di Pisa

Sergio Giudici

Università di Pisa

Giuseppe Grosso

Università di Pisa

Adele La Rana

Centro *Enrico Fermi*, Roma

Claudio Luperini

Università di Pisa

Marco Massai

Università di Pisa

Paolo Rossi

Università di Pisa

Gloria Spandre

INFN Pisa

Giuseppe Terreni

INFN Pisa

Main Topics

- **Riccardo Felici (1819-1902) and the birth of Electrodynamics**
- **Leonardo da Vinci as a scientist**
- **Experimental tests of General Relativity: 100 years after Arthur Eddington's measurements**
- **Science Education and History of Physics and Astronomy: connections and perspectives**
- **Physics and Physicists in Venezuela: historical perspectives**

www.sisfa.org/convegni/pisa-2019





Società Italiana degli Storici
della Fisica e dell'Astronomia

Atti del XXXIX Convegno annuale
Proceedings of the 39th Annual Conference
Pisa, 9-12 Settembre 2019

a cura di / *edited by*
Adele La Rana, Paolo Rossi

Comitato editoriale
Fabrizio Bònoli, Danilo Capecchi, Pasquale Tucci

P I S A
UNIVERSITY
PRESS

Società italiana degli storici della fisica e dell'astronomia
Atti del XXXIX Convegno annuale = Proceedings of the 39th Annual conference : Pisa, 9-12 settembre 2019 / Società italiana degli storici della fisica e dell'astronomia ; a cura di = edited by Adele La Rana, Paolo Rossi ; comitato editoriale: Fabrizio Bònoli, Danilo Capecchi, Pasquale Tucci. - Pisa : Pisa university press, 2020. - 1 testo elettronico (PDF)

530.09 (WD)

I. La Rana, Adele II. Rossi, Paolo (1952-) III. Bònoli, Fabrizio IV. Capecchi, Danilo V. Tucci, Pasquale (1943-) 1. Fisica - Storia - Congressi

CIP a cura del Sistema bibliotecario dell'Università di Pisa

UPI
UNIVERSITY
PRESS ITALIANE

Membro Coordinamento
University Press Italiane

© Copyright 2020 by Pisa University Press srl
Società con socio unico Università di Pisa
Capitale Sociale € 20.000,00 i.v. - Partita IVA 02047370503
Sede legale: Lungarno Pacinotti 43/44 - 56126 Pisa
Tel. + 39 050 2212056 - Fax + 39 050 2212945
press@unipi.it
www.pisauniversitypress.it

ISBN 978-88-3339-402-2

L'Editore resta a disposizione degli aventi diritto con i quali non è stato possibile comunicare, per le eventuali omissioni o richieste di soggetti o enti che possano vantare dimostrati diritti sulle immagini riprodotte. Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da CLEARedi - Centro Licenze e Autorizzazione per le Riproduzioni Editoriali - Corso di Porta Romana, 108 - 20122 Milano - Tel. (+39) 02 89280804 - E-mail: info@clearedi.org - Sito web: www.clearedi.org.

Sommario*

Introductory remarks.....	XI
Programme of the Conference.....	XIII
FIVE HUNDREDTH ANNIVERSARY OF LEONARDO DA VINCI'S DEATH	
Leonardo da Vinci, artist and scientist, from the last supper to the moon. <i>Abstract</i> Mario Taddei.....	3
Leonardo's and Galileo's drawings of the Moon Pasquale Tucci.....	5
Celebrations for the 500th anniversary since Leonardo Da Vinci's death Fausto Casi.....	13
RICCARDO FELICI (1819-1902), A PISAN CONTRIBUTOR TO THE BIRTH OF ELECTRODYNAMICS	
Early Electrodynamics, the induction effect, and the place of Felici. <i>Abstract</i> Friedrich Steinle.....	19
The figure and the work of Riccardo Felici in the 200th anniversary of his birth Paolo Rossi.....	21
Riccardo Felici and the discussion about electric screens Lucia De Frenza.....	29
Mariano Pierucci Claudio Luperini.....	39
RELEVANT FIGURES AND INSTITUTIONS IN ITALIAN HISTORY OF PHYSICS AND ASTRONOMY BETWEEN ITALY'S UNIFICATION AND WORLD WAR II	
Cornelia Fabri Mathematician Miriam Focaccia.....	49
A case study in a top-down recruitment system: Pisa-Pavia 1860-1942 <u>Fabio Bevilacqua, Lidia Falomo Bernarduzzi</u>	55
Handling with Pontremoli's memory at the Institute of Physics in Milan during the Fascist regime Leonardo Gariboldi.....	63

* Si precisa che per uniformità nel sommario i titoli dei contributi sono riportati tutti in inglese.

People, Places and Scientific Instruments:	
Physics in Rome in the First Half of the Nineteenth Century. <i>Abstract</i>	
Roberto Mantovani	69
And if Marconi... impossible stories	
<u>Mario Calamia</u> , Monica Gherardelli, Giovanni Manneschi.....	71
THE FAR ROOTS OF SCIENTIFIC THOUGHT	
Does Archimedes, in his <i>Sandreckoner</i>, criticize Aristarchus and show that the potential infinite of Aristotle is true? The Italic school in astronomy between the 5th, 4th and 3rd centuries b.C. and the Platonic-Aristotelian reaction	
Giuseppe Boscarino	81
From Euclid to Ptolemy: representation and explanation of phenomena. <i>Abstract</i>	
Renato Migliorato	89
The Mechanics of Hero in Persian manuscripts between translation and innovation. <i>Abstract</i>	
Giuseppina Ferriello.....	91
Hellenistic sources of Ptolemy's <i>Almagest</i>.	
<i>Special mention in the SISFA Award 2019 for the best graduation thesis in History of Physics and Astronomy</i>	
<u>Alessandro Amabile</u> , Giovanni Covone.....	93
THE DAWN OF MODERN SCIENTIFIC THOUGHT	
Galileo and the origin of the cosmos.	
<i>SISFA Award 2019 for the best graduation thesis in History of Physics and Astronomy</i>	
Ivan Giuseppe Malara	103
Guidobaldo, Galileo and the launch of the ink-dyed ball on the sloping canopy	
Pietro Cerreta	109
Nature of Science Experiments: Exploring Galilean Physics of Motion	
Raffaele Pisano, <u>Vincenzo Cioci</u>	117
Preparing for the experimental research on 'Newton's prisms' in Italy compared to those in Britain. <i>Abstract</i>	
Yoshimi Takuwa.....	125
Newton's Geneva Edition (1822): the <i>Notes on Integral Calculus</i>	
Raffaele Pisano, <u>Paolo Bussotti</u>	127
The vis viva (living force) controversy in the first Kantian work [1746 (1749)]	
Stefano Veneroni	135
Some incongruences in Coulomb's memoirs on electricity 1785-1788	
Danilo Capecci.....	147

EXPERIMENTAL TESTS OF GENERAL RELATIVITY: ONE HUNDRED YEARS AFTER ARTHUR EDDINGTON'S ECLIPSE EXPEDITION

No Shadow of Doubt: The Eclipse Expeditions of 1919 in detail. <i>Abstract</i>	
Daniel Kennefick	157
How relativistic astrophysics bubbled up from post-WWII science. A preliminary survey	
Luisa Bonolis	159
A Singular Problem: Conceptual development of black holes. <i>Abstract</i>	
Steve Shore	171
A historical perspective on the 3rd generation GW detectors: the early attempts for a joint European effort (1986-1989)	
Adele La Rana.....	173

PHYSICS IN THE 20TH CENTURY

Ninety years of X-ray spectroscopy in Italy 1896-1986	
Vanda Bouché, Antonio Bianconi.....	187
Aldo Romano and the 50 years of CSATA (1969-2019)	
Benedetta Campanile	195
Small fluctuations of the velocity of light: a guiding principle from Michelson-Morley to modern optical interferometry. <i>Abstract</i>	
Maurizio Consoli	203
Relativity at first order and gravitational deflection of light - An interplay between history and didactics	
Christian Bracco, Jean-Pierre Provost	205
Joseph Weber and the first experiments in the detection of gravitational waves	
Laura Franchini.....	213
Einstein's Mantle, Bohr's Shadow: Glimpses from Wheeler's Relativity Notebook III	
Stefano Furlan.....	221
The debate on quantum mechanics and constructive mathematics: a review	
Antonino Drago	229
An unpublished approach to electrodynamics by Richard Feynman	
Roberto De Luca, <u>Marco Di Mauro</u> , Salvatore Esposito, Adele Naddeo	237
Prolegomena to a study on analogy in modern physics: the case of spontaneous symmetry breaking	
Rocco Gaudenzi	245
Toward a computational history of science: The dynamics of socio-epistemic networks and the renaissance of general relativity	
Roberto Lalli, Dirk Wintergrün.....	253
Physicists, engineers and soldiers at the origins of the "Istituto Centrale Aeronautico Italiano" (Italian Central Aeronautic Institute)	
Sandra Linguerri	267

“Life belts” around the cities: MIT scientists’ voice in political and social life of the ’50s Eleonora Loiodice.....	273
The Charm of Theoretical Physics (1958-1993). Abstract <u>Luciano Maiani</u> , Luisa Bonolis.....	279
The history of technology transfer of the Casimir effect and van der Waals forces: From exotic, weak, and undesirable to enabling, emerging, and irresistible Fabrizio Pinto.....	281
Franco Selleri and his contribution to the starting of debate on Foundations of Quantum Mechanics: 1969-1971 <u>Luigi Romano</u> , Augusto Garuccio.....	289
Franco Selleri and his research on Particle Physics 1958-1970: Peripheral model and One Pion Exchange model Luigi Romano, Augusto Garuccio.....	299

MUSEUMS AND SCIENTIFIC INSTRUMENTS

Disclosure publications in the astronomy of late nineteenth century between popular science and science “for lady” <u>Giancarlo Albertini</u> , Anna Siculo.....	309
Museum System of Irpinia Gaetano Abate.....	315
Two 16th century Florentine topographic compasses found in the collection of scientific instruments of the Ursino Castle (Catania) <u>Fausto Casi</u> , Andrea Orlando.....	319
The Catoptrico-Gnomonicum Astrolabium designed by Emanuele Maignan for the Palazzo Spada of Rome Maria Luisa Tuscano.....	327
The improvement in lens grinding techniques for early refracting telescopes in XVII century Lucia Lanfiuti.....	335
Paolo Anania de Luca and the sound system through the study of a cordometer and a tonometer Rosanna Del Monte, Azzurra Auteri.....	343

HISTORY OF ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS

The discovery of atmospheric neutrino oscillations Paolo Lipari.....	351
Reading the Discoveries of Gravitational Waves as New History of Physics Research Programme. Part Two <u>Raffaele Pisano</u> , <u>Philippe Vincent</u>	359
Time signal in Florence Simone Bianchi.....	367

Antonio Colla (1806-1857): an astro-meteorological observer of the University of Parma	
Emanuela Colombi.....	373
Proving the false. Method and logic of Giovanni Battista Riccioli. <i>Abstract</i>	
Flavia Marcacci.....	383
A virtual archive of the correspondence of Annibale de Gasparis	
<u>Paolo Palma</u> , <u>Mauro Gargano</u>	385
The scientific and cultural heritage of Giuseppe Toaldo, 300 years after his birth	
Valeria Zanini.....	395

VENEZUELA: HISTORICAL PERSPECTIVES ON PHYSICS AND PHYSICISTS

The advances of the investigation of the History of Physics in Venezuela since the 18th century: Tracking physics in Venezuela (1827-1961). <i>Abstract</i>	
Yajaira Freitas	405
Alba of violations, twilight of rights in the convulsed Venezuela. <i>Abstract</i>	
Alberto Sotillo.....	407
The Evolution of Nuclear Science Research in Venezuela	
Rafael Martín-Landrove, Delfín Moronta, David Verrilli.....	409
Agustín de la Torre and the beginning of Physics in Venezuela: a historical approach to the beginnings of technical and scientific thought in Venezuela	
Ruth Castillo Ochoa.....	417

EDUCATIONAL AND OUTREACH ACTIVITIES IN HISTORY OF PHYSICS AND ASTRONOMY

The role of place in engagement with science: the new seat of “Enrico Fermi Historical Museum of Physics and Study and Research Centre”	
Miriam Focaccia	425
The Frascati National Laboratory Visitor Centre: a journey through the history of particle physics	
<u>Susanna Bertelli</u> , Danilo Domenici, Emiliano Danè, Vincenzo Napolano	433
Educational paths dedicated to Physics organized in the portal of the Network of Italian University Museums	
Elena Corradini	439
A novel approach to physics teaching exploiting new technologies in conjunction with historically relevant artefacts	
Giovanni Organtini	447
The LAB2GO project. <i>Abstract</i>	
<u>Valentina Scotti</u> , Donatella Campana, Stefano Mastroianni, Giuseppe Osteria, Beatrice Panico, Francesco Perfetto	453

The history of the cosmic ray discovery and their current role in the outreach activities. <i>Abstract</i>	
Carla Aramo	455
To the Moon and beyond-HYPE Space Matters. <i>Abstract</i>	
<u>Mattia Ivaldi</u> , Martina Bocconi.....	457
CONNECTIONS BETWEEN HISTORY AND DIDACTICS OF PHYSICS. PLENARY SESSION OF THE SISFA CONGRESS WITH THE SISFA WORKSHOP FOR SCHOOL TEACHERS	
The new kilogram	
Enrico Massa.....	461
The role of effective mass in electrical conduction	
Giuseppe Fera	473
Roland Eötvös: a key figure in modern physics, but also in geology and education	
Vera Montalbano.....	483
The history of science in pre-university training curricula	
Carla Romagnino	491
A Logical analysis of the Newtonian concept of mass and modern applications	
<u>Angelo Pagano</u> , Emanuele Pagano	503
Secondary school students study gravity using mobile apps	
Daniele Buongiorno, <u>Marisa Michelini</u>	515
ROUNDTABLE: THE CONTRIBUTION OF HISTORY TO THE TEACHING OF PHYSICS AND ASTRONOMY	
A project for “excellences”	
Salvatore Esposito.....	523
The contribution of the history of physics to research	
Marisa Michelini.....	529
The contribution of history in the teaching of physics and astronomy: the museums of astronomical observatories and the Paduan experience	
Valeria Zanini.....	543

Introductory remarks

Il XXXIX Congresso Nazionale della Società Italiana degli Storici della Fisica e dell'Astronomia ha ospitato un considerevole numero di interventi e iniziative collaterali, ben guidato da diverse sessioni tematiche intese a valorizzare le ricorrenze del centenario della misura della deflessione gravitazionale della luce, del bicentenario della nascita di Riccardo Felici (1819-1902) e del cinquecentenario della morte di Leonardo da Vinci. Se, infatti, l'apertura del congresso ha visto "rivivere" il genio leonardiano nell'arte e nella scienza, non meno vive sono state le presentazioni dell'opera di un "padre" pisano – spesso dimenticato – dell'elettrodinamica. E non meno avvincente è stato ripercorrere la storia della Relatività Generale, e in particolare delle ricerche sperimentali volte a con-fermare la teoria di Albert Einstein, nella suggestiva cornice dello European Gravitational Observatory nel sito del rivelatore interferometrico di onde gravitazionali Virgo, a Cascina, che ha ospitato pure la *Lezione Zanichelli* di Daniel Kennefick, dando origine ad una stimolante collaborazione con la prestigiosa Casa Editrice italiana. Una ricorrenza meno nota sono stati i 150 anni dalla nascita della matematica Cornelia Fabri (9 settembre 1869-24 maggio 1915), che cadevano esattamente il giorno dell'inaugurazione del convegno e che sono stati ricordati in una specifica relazione.

Come da tradizione, tali momenti "forti" si sono avvicinati con le usuali sessioni congressuali, in cui sono state presentate le diverse attività di ricerca in storia della fisica e dell'astronomia. Portate avanti sia da accademici che da cultori della materia, esse costituiscono la struttura portante del Congresso SISFA, in cui si rafforzano le collaborazioni e si instaurano nuovi legami tra i diversi studiosi. Il ricco programma sociale collaterale al Congresso, con le sue numerose visite culturali e scientifiche, non ha fatto altro che contribuire maggiormente a tali opportunità di crescita culturale e intellettuale. Non meno significativa ed emozionante è stata la Cerimonia di conferimento del Premio SISFA per la miglior tesi di Laurea in Storia della Fisica e dell'Astronomia a un giovane studioso, che ha quindi potuto presentare ai congressisti le sue ricerche svolte durante il proprio lavoro di tesi.

Alle nuove e rinnovate iniziative messe in campo dalla Società nel corso del Congresso 2019, evidenziate sopra, va aggiunta poi una significativa novità fortemente voluta dal Consiglio Direttivo della Società, intesa a favorire il dialogo e la fruttuosa collaborazione tra storici e didattici della Fisica: il Workshop su "Il concetto di massa tra storia e didattica della fisica e dell'astronomia". Promosso dalla SISFA unitamente con l'Università di Udine, URDF - MIUR - PNLIS, e in collaborazione con l'AIF e i Dipartimenti di Fisica delle Università di Pavia, Pisa e Siena, esso si è sviluppato come Modulo formativo di 20 ore con accreditamento MIUR rivolto ad insegnanti di scuola superiore, interessati ad esplorare il ruolo della storia della fisica e dell'astronomia nell'insegnamento attuale delle discipline. Particolarmente significativa e stimolante – sia per i corsisti che per i congressisti (e gli organizzatori!) – è risultata la sessione congiunta Congresso-Workshop, in cui gli insegnanti hanno potuto partecipare a relazioni, comuni-cazioni ed eventi congressuali incentrati sul rapporto e uso dello sviluppo storico-scientifico nell'insegnamento e nella divulgazione della fisica e dell'astronomia, temati-

che dibattute infine in una Tavola Rotonda appositamente dedicata, che ha chiuso il XXXIX Congresso SISFA.

Un ringraziamento particolarmente sentito da parte della Società va a tutti coloro che si sono adoperati con abnegazione per la buona riuscita del Congresso. In particolare è doveroso ringraziare qui l'Università di Pisa, rappresentata dal suo Rettore, non solo per l'ospitalità accordataci, ma anche per i generosi contributi messi a disposizione della SISFA sia per l'organizzazione del Congresso che per la pubblicazione dei presenti Atti, come pure il Dipartimento di Fisica dell'Ateneo Pisano, rappresentato dal suo Direttore, per l'ospitalità e l'organizzazione dell'evento, cui hanno collaborato attivamente e particolarmente i membri del Centro Dipartimentale "B. Pontecorvo". Con altrettanta riconoscenza la SISFA è debitrice nei confronti dello European Gravitational Observatory nel sito VIRGO a Cascina, rappresentato dal suo direttore, non solo per l'ospitalità e la disponibilità di suoi ricercatori per le visite guidate dei congressisti, ma anche per un generoso contributo economico che, insieme a quello fornito dalla Casa Editrice Zanichelli, ha reso possibile con successo la *Lezione Zanichelli* inaugurata nel congresso pisano. Un doveroso ringraziamento va anche all'Opera della Primaziale Pisana per l'organizzazione di una visita riservata e guidata al Camposanto Monumentale, accompagnata da un graditissimo intermezzo musicale, e al Museo degli Strumenti di Fisica dell'Università di Pisa che, anche grazie al contributo della Fondazione "G. Galilei", ha curato l'allestimento estemporaneo di una notevole mostra di strumenti antichi.

Salvatore Esposito
Presidente SISFA



MUSEO
STORICO DELLA FISICA
E
CENTRO
STUDI E RICERCHE
ENRICO FERMI



EUROPEAN
GRAVITATIONAL
OBSERVATORY



XXXIX SISFA CONFERENCE

Pisa, 9-12 September 2019

PROGRAMME^{1,2}

9 SEPTEMBER 2019 - MONDAY

- 9:00-18:10 *Department of Physics, Largo Pontecorvo 3 - Pisa*
- 9:00-9:30 *Registration*
- 9:30 *Opening of the Congress and Institutional greetings*
- 10:00 *Keynote Lecture*
Mario Taddei
Leonardo da Vinci, artista e scienziato, dal cenacolo alla luna
- 10:50 **Pasquale Tucci**
From Leonardo's Moon to Galilei's Moon
- 11:10-11:25 *Coffee break*
- 11:25 *Invited Talk*
Miriam Focaccia
Cornelia Fabri Mathematician (Ravenna, 9 settembre 1869 – Firenze, 24 maggio 1915)

¹ Keynote Lecture: 40 + 10 min, Invited talk: 25+5 min, Contribution: 15+5 min.

² Please notice that the timetable below shows only the names of the speakers, while the complete list of the authors of the presented research activities is available in the booklet of abstracts.

-
- 11:55 *Invited Talk*
Roberto Lalli
 Towards a computational history of science: The dynamics of socio-epistemic networks in the renaissance of general relativity
- 12:25 **Fabio Bevilacqua**
 Pavia Physics Professors (1860-1942)
- 12:45 **Fabrizio Pinto**
 The history of technology transfer of the Casimir effect and van der Waals forces: From exotic, weak, and undesirable to enabling, emerging, and irresistible
- 13:05-14:30 **Lunch**
- 14:30-17:00 *Session: Riccardo Felici (1819-1902), a Pisan contributor to the birth of Electrodynamics*
- 14:30 *Keynote Lecture*
Friedrich Steinle
 Early Electrodynamics, the induction effect, and the place of Felici
- 15:20 **Paolo Rossi**
 The figure and the work of Riccardo Felici in the 200th anniversary of his birth
- 15:40 **Lucia De Frenza**
 Riccardo Felici and the discussion about electric screens
- 16:00 **Claudio Luperini**
 Mariano Pierucci
- 16:20-16:40 *Coffee break*
- 16:40 **Roberto Mantovani**
 People, Places and Scientific Instruments: Physics in Rome in the First Half of the Nineteenth Century
- 17:00 *End of the session*
- 17:00-18:10 *Parallel Sessions*
From Electric Fluid to Synchrotron Radiation The Far Roots of Scientific Thought
- 17:10 **Danilo Capecchi**
 Some incongruences in Coulomb's memoirs on electricity 1785-1788
- Boscarino Giuseppe**
 Does Archimedes, in his Sandreckoner, criticize Aristarchus and shows that the potential infinite of Aristotle is true? The Italic school in astronomy between the 5th, 4th and 3rd centuries b.C. and the Platonic-Aristotelian reaction.

- 17:30 **Mario Calamia** **Renato Migliorato**
 And if Marconi... impossible stories From Euclid to Ptolemy: representation and explanation of phenomena
- 17:50 **Antonio Bianconi** **Giuseppina Ferriello**
 X-ray spectroscopy in Italy 1895-1985: from early works of Brunetti, Fermi, Gentile, Majorana, Fano, Pincherle to the first european experiments using Frascati Synchrotron radiation La Meccanica di Erone nei manoscritti persiani fra traduzione e innovazione
- 18:10 *End of the parallel sessions*
- 18:30-20:00 *Aula magna del Polo Didattico G. Carmignani, Piazza Cavalieri 6 - Pisa*
Documentary Film “La scelta. Edoardo Amaldi e la scienza senza confini”, written by Adele La Rana, directed by Enrico Agapito and carried out under the moral patronage of SISFA. On the occasion of the 30th Anniversary since Amaldi’s death.
 The film is a production of Zanichelli Editore, TERA Foundation and Agapito Realizzazioni Audiovisive, supported by INFN, with the contribution of the Department of Physics of Sapienza University of Rome and the patronage of SISFA and of Edoardo Amaldi Foundation – Hypatia Consortium – ASI.

10 SEPTEMBER 2019 - TUESDAY

- 8:45-13:15 *European Gravitational Observatory (Main Building) - Virgo, Via Edoardo Amaldi - Cascina*
- 8:45-13:15 *Session: Experimental Tests of General Relativity*
- 8:45 **Ettore Majorana**
 Presentation of the Virgo experiment
- 9:10 *Visit to the Virgo Laboratories*
- 10:40-10:55 **Coffee break**
- 10:55 *Keynote Lecture and “Zanichelli Lecture”, supported by EGO*
Daniel Kennefick
 No Shadow of Doubt: The Eclipse Expeditions of 1919 in detail
- 11:45 *Invited Talk*
Luisa Bonolis
 The lead-up to first Texas Symposium and the emergence of relativistic astrophysics

- 12:15 *Invited Talk*
Steve Shore
A Singular Problem: Conceptual development of black holes
- 12:45 **Adele La Rana**
A historical perspective on the 3rd generation GW detectors: the early attempts for a joint European effort (1986-1989)
- 13:15 *End of the session*
- 14:00-18:00 *Department of Physics, Largo Pontecorvo 3 - Pisa*
- 14:00-15:15 **Lunch – Buffet at the Department of Physics in Pisa**
- 15:15 *Keynote Lecture*
Luciano Maiani
The Charm of Theoretical Physics (1958-1993)
- 16:05 *Ceremony for SISFA’s Prize for the Best Thesis in History of Physics and Astronomy*
- 16:20 **Ivan Giuseppe Malara**
Galileo Galilei e il tema cosmogonico della creazione del mondo. *Winner of SISFA Prize 2019*
- 16:40 **Rocco Gaudenzi**
The pre-history of spontaneous symmetry breaking: an *interdisciplinary* intrigue
- 17:00-17:20 **Coffee break**
- 17:20 **Stefano Furlan**
The *Wheeler* of Time: from Geons to Monads
- 17:40 **Maurizio Consoli**
Small fluctuations of the velocity of light: a guiding principle from Michelson-Morley to modern optical interferometry
- 18:00 *End of the session*
- 18:00-20:00 *Guided tour of the Monumental Cemetery of Pisa and of Buonamico Buffalmacco’s affresco “Il trionfo della morte”. Reading of passages from Galileo’s writings.*

11 SEPTEMBER 2019 - WEDNESDAY

8:40-18:30 *Department of Physics, Largo Pontecorvo 3 - Pisa*

8:40-11:20 *Parallel Sessions*

	<i>Museums and Scientific Instruments</i>	<i>Developments in XX Century Physics</i>
8:40	Giancarlo Albertini Disclosure publications in the astronomy of late nineteenth century between popular science and science “for lady”	Benedetta Campanile Aldo Romano and the 50 years of CSATA
9:00	Fausto Casi Leonardo Da Vinci in De Divina Proportione	Antonino Drago Quantum mechanics and constructive mathematics: a review and a suggestion for a new formulation
9:20	Gaetano Abate Sistema Museale Irpino	Luigi Romano Franco Selleri and His Contribution to the Starting of Debate on Foundations of Quantum Mechanics: 1969-1979
9:40	Fausto Casi Two 16th century Florentine topographic compasses found in the collection of scientific instruments of the Ursino Castle (Catania)	Marco Di Mauro An unpublished approach to electrodynamics by Richard Feynman
10:00-10:20	Coffee break	
	<i>Museums and Scientific Instruments</i>	<i>Dawn of Modern Scientific Thought</i>
10:20	Maria Luisa Tuscano The Catoptrico-Gnomonicum Astrolabium designed by Emanuele Maignan for the Palazzo Spada of Rome	Pietro Cerreta Guidobaldo, Galileo e il lancio della pallina tinta d’inchiostro sulla tettoia inclinata
10:40	Lucia Lanfiuti The development of early refracting telescopes in XVII century: from Galileo Galilei to Giuseppe Campani	Yoshimi Takuwa Preparing for the experimental research on ‘Newton’s prisms’ in Italy compared to those in Britain
11:00	Azzurra Auteri P.A. de Luca and the sound system through the study of a cordometer and a tonometer	Stefano Veneroni The vis viva (living force) controversy in the first Kantian work [1746 (1749)]
11:20	<i>End of parallel sessions</i>	
11:20-12:40	<i>Plenary session</i>	
11:20	Christian Bracco Relativity at first order and deflection of light	
11:40	Leonardo Gariboldi Handling with Pontremoli’s memory at the Institute of Physics in Milan during the Fascist regime	

-
- 12:00 **Sandra Lingueri**
Physicists, engineers and soldiers at the origins of the Italian Istituto centrale aeronautico
- 12:20 **Eleonora Loiodice**
“Life belts” around the cities: MIT scientists’ voice in political and social life of the ’50s
- 12:40 *End of plenary session*
- 12:40-14:00 **Lunch**
- 14:00-14:50 *OPENING OF THE SISFA WORKSHOP IN PLENARY SESSION WITH THE SISFA CONGRESS*
- 14:00 *Keynote Lecture:*
Enrico Massa
Il nuovo kilogrammo
- 14:50 *End of the shared plenary session Congress + Workshop*
- 15:00-17:15 *Session: Venezuela: Historical perspectives on physics and physicists*
- 15:00 Opening speech introducing the special session
- 15:05 **Enrique Planchart**
Academic Situation of Simón Bolívar University. Economic situation of the academic staff of Simón Bolívar University
(Video contribution)
- 15:15 **Yajaira Freites**
The advances of the investigation of the History of Physics in Venezuela since the 18th century: Tracking physics in Venezuela (1827-1961)
(Video contribution)
- 15:25 **Claudio Bifano**
Science in Venezuela: Institutionalization and decline, Physics as an example
(Video contribution)
- 15:40 *Coffee break*
- 15:55 *Panel Discussion*
Arturo Sanchez
Physics in Venezuela: How this science and its scientists keep producing the next generation with the help of the rest of the World
Alberto Sotillo
Alba of violations, twilight of rights in the convulsed Venezuela
David Verrilli
The Evolution of Nuclear Science Research in Venezuela
Ruth Castillo
Agustín de la Torre and the beginning of Physics in Venezuela: a historical approach to the beginnings of technical and scientific thought in Venezuela
- 17:15 *End of the session*

- 17:15-18:30 *PLENARY MEETING OF THE SISFA MEMBERS*
 18:30-20:00 *Visit to the Museum of Physics Instruments of Pisa*
 20:30 *SOCIAL DINNER. Chiostro del Carmine - Pisa Center*

12 SEPTEMBER 2019 - THURSDAY

9:00-18:50 *Department of Physics, Largo Pontecorvo 3 - Pisa*

SHARED SESSIONS CONGRESS + WORKSHOP

- 9:00-10:00 *Plenary Session*
- 9:00 **Miriam Focaccia**
The role of place in engagement with science: the new seat of “Enrico Fermi Historical Museum of Physics and Study and Research Centre”
- 9:20 **Susanna Bertelli**
The Frascati National Laboratory Visitor Centre: a journey through the history of particle physics
- 9:40 **Elena Corradini**
Educational paths dedicated to Physics organized in the portal of the Network of Italian University Museums
- 10:00-10:20 *Coffee break*
- 10:20-12:40 *Parallel Sessions*
- | | |
|---|--|
| <i>History of Astronomy</i> | <i>History, Didactics and Epistemology</i> |
| 10:20 Paolo Lipari
The discovery of Atmospheric Neutrino Oscillations | Giuseppe Fera
The role of effective mass in electrical conduction |
| 10:40 Raffaele Pisano
Reading the Discoveries of Gravitational Waves as New History of Physics Research Programme. Part Two | Vera Montalbano
Roland Eötvös: a key figure in modern physics, but also in geology and education |
| 11:00 Simone Bianchi
Time signal in Florence | Laura Franchini
Joseph Weber and the first experiments in the detection of gravitational waves |
| 11:20 Emanuela Colombi
Antonio Colla (1806-1857): osservatore astro-meteorologico dell’Università di Parma | Mattia Ivaldi
To the Moon and beyond-HYPE Space Matters |

11:40	Flavia Marcacci Proving the false. Method and logic of Giovanni Battista Riccioli	Alessandro Amabile Le fonti ellenistiche dell'Almagesto di Tolomeo. Special Mention at the SISFA Prize 2019.
12:00	Paolo Palma Mauro Gargano, Un archivio virtuale della corrispondenza di Annibale de Gasparis	Vincenzo Cioci Nature of Science Experiments: Exploring the Galilean Physics of Motion
12:20	Valeria Zanini The scientific and cultural heritage of Giuseppe Toaldo, 300 years after his birth	Paolo Bussotti Newton's Geneva Edition: Some Considerations on the Integral Calculus
12:40	<i>End of parallel sessions</i>	
12:40-14:00	Lunch	
14:00-18:50	<i>Session: Connections between History and Didactics of Physics</i>	
14:00	<i>Invited talk</i>	
	Carla Romagnino La storia della scienza nei curricula formativi preuniversitari	
14:30	<i>Invited Talk</i>	
	Angelo Pagano On the Newtonian concept of mass as "quantitas materiae"	
15:00	Giovanni Organtini A novel approach to physics teaching exploiting new technologies in conjunction with historically relevant artefacts	
15:20	Marisa Michelini Studenti di scuola secondaria studiano la gravità usando app su mobile	
15:40-16:00	Coffee break	
16:00	Valentina Scotti The LAB2GO project	
16:20	Carla Aramo The history of the cosmic ray discovery and their current role in the outreach activities	
16:40-18:40	<i>Roundtable "The contribution of history to the teaching of physics and astronomy"</i>	
	Carla Aramo (INFN)	
	Salvatore Esposito (Presidente SISFA)	
	Alberto Meroni (Presidente AIF)	
	Marisa Michelini (Uniud-URDF)	
	Fabiano Minni (GSdF, AIF)	
	Valeria Zanini (INAF)	
18:40-18:50	<i>Final remarks of the Congress and acknowledgments</i>	

FIVE HUNDREDTH ANNIVERSARY OF LEONARDO DA VINCI'S DEATH

Leonardo da Vinci, artista e scienziato, dal cenacolo alla luna

Mario Taddei – Centro studi Leonardo3 – mario@leonardo3.net

Abstract: Leonardo è considerato il più grande artista di tutti i tempi, ma è soprattutto nei suoi codici che si copre l'ingegnere e lo scienziato che arriva persino a ipotizzare teorie astronomiche e planetarie curiose e sorprendenti. Dove finisce l'artista e inizia lo scienziato? Da decenni sono state ricostruite, esaltate ed esposte le sue "invenzioni più famose", il carro armato, la mitragliatrice, la catapulte, il paracadute e addirittura una bicicletta. Ma tutto questo, non solo è sbagliato e a volte falso ma rischia di distogliere lo studio sul vero Leonardo e sulle sue vere ricerche a carattere scientifico. Il vero Leonardo è nascosto in oltre seimila manoscritti dove scopriremo l'artista che si trasforma in scienziato e viceversa. Tra le centinaia di pagine dei suoi codici si è occupato anche dell'astronomia e dei corpi celesti, ipotizzando macchine astronomiche e studiando i movimenti dei pianeti, del sole e della luna. Scopriremo alcuni suoi fogli dove ci svela una fantastica scoperta che riguarda la Luna, vedremo i suoi disegni delle eclissi e scopriremo alcuni progetti per realizzare macchine planetarie e orologi che anticipano i sistemi di Galileo e ci mostreranno un Leonardo "astronomo" come mai visto prima. Sul manoscritto B scopriremo una macchina del tempo che va a "modo d'orologio", vedremo i manoscritti dove disegna la Luna, le eclissi e i sistemi astronomici meccanici. Infine, scopriremo strane, affascinanti e misteriose domande che Leonardo si pone e a cui dà risposte incredibili che ci sorprenderanno ancora, 500 anni dopo.

Leonardo's and Galileo's drawings of the Moon

Pasquale Tucci – Università degli Studi di Milano (f.) – pasquale.tucci@unimi.it;
pasquale.tucci@fastwebnet.it

Abstract: Between 1505 and 1508 Leonardo da Vinci drew three images of the surface of the Moon, the first for astronomical reasons. Almost a century later, Galileo, beginning on November 30th, 1609, drew seven telescopic images of the Moon, the first ones ever printed.

The difference between Leonardo's and Galileo's drawings is remarkable and not just because Galileo used a telescope. Leonardo left several considerations on the Moon, scattered among the extant Codes of his drawings and manuscripts, where he questioned the assumption that the Moon is a perfect translucent sphere and described her roughness. Leonardo argued that a) the Moon is constituted by the same elements of the Earth; b) the centre of the Universe doesn't coincide with the centre of the Earth, c) the constituent parts of the Moon tend to the centre of the Moon and not to that of the Earth which, in that period, was thought to be the centre of the Universe.

Galileo stated that the surface of the Moon is full of big ridges, deep hollows and ravines, and interpreted his observations in a Copernican context.

In my contribution I'll show how, in the course of the sixteenth century, the theoretical framework of reference changes, not only in Astronomy with the publication of Copernicus' *De Revolutionibus*, but also in Geometry with the publication of various Treatises on Perspective and with studies on the geometry of chiaroscuro, widely used by Galileo in his drawings of the Moon.

Keywords: Leonardo, Galileo, Moon.

1. The first map of the Moon

William Gilbert (1544-1603) drew some time before 1603 the first pre-telescopic map of the Moon, sketched for cosmological, astronomical and topographical purposes. The map is included in his *De Mundo Nostro Sublunari* published posthumously in Amsterdam in 1651 (Whitaker 1999).

After Gilbert's death the manuscript was kept in the Royal Library in Whitehall. Few scholars saw it, although it was certainly inspected by Thomas Harriot (1560-1621) who, probably, was influenced by it when he drew his lunar map (Kopal 1969; Montgomery 1999; Pumfrey 2009; Pumfrey 2011; Whitaker 1999; Włodarczyk 2019). It was also studied by Francis Bacon, who read *De Mundo* closely and made specific mention of it¹ (Bacon F. ~1611/1612, p. 232). Gilbert's drawing and his treatise are

¹ Thomas Harriot mentioned some chapters of Gilbert's *De Mundo* in a letter to Johann Kepler. In July 1608 he informed the astronomer "... of some chapters he had read, including those in which Gilbert argued for an interstellar vacuum, a belief that Harriot shared and Kepler opposed." (Pumfrey 2009, p. 167).

important for several reasons, but in the present context it's important to stress a technical aspect of the drawing, namely the sharp edge of the identified areas, that makes the drawing look more like a cartographic map than a topographical map. In the cited paper (Montgomery 1999) Gilbert was investigating whether the Moon shows libration, a phenomenon due to the eccentricity of its orbit, to the inclination of its axis on the orbital plane and to the Earth's rotation. Libration allows us to see more than half (59%) of the Moon. Gilbert was interested in the Moon libration as the phenomenon gave him observational evidence against the cosmology of solid spheres, and in favour of his cosmology of planets, moved by attractive forces through a vacuum. These were cosmological ideas that Kepler used as he developed his elliptical astronomy (Montgomery 1999). It is usually accepted that libration was discovered by Galileo. There is no evidence, however, that Galileo knew Gilbert's work.

2. The “discovery” of Leonardo’s first map of the Moon

In 1969 Leonardo’s maps of the Moon were still unknown.² In 1987 a paper published in the JHA drew the attention of historians of astronomy on three drawings of the Moon made by Leonardo (Reaves, Pedretti 1987).³ While the first two were known to Leonardo’s scholars, the third drawing came to light only after the restoration of the Code.⁴ Leonardo’s drawings weren’t accompanied by any consideration or comment. Although Leonardo, unlike the map drawn by Gilbert a century later, did not name the spots (*maculae*), he nevertheless realized that they were stable and could not be vapours standing between the Earth and the Moon. However, before Reaves and Pedretti, Marinoni had speculated that Leonardo’s sketch could represent the Moon and its *maculae*.⁵ Anyway, the first two drawings of Leonardo’s Moon went unnoticed although they were inscribed in the context of “a Man in the Moon”, a well-known and ancient tradition dating back to Plutarch (Whitaker 1999).

In addition to the three drawings, Leonardo’s manuscripts contain a large amount of speculations on the Moon, characterized by

- geometric studies of the relations among Earth, Sun, and Moon

² “Occasional references to Renaissance drawings of the Moon by Leonardo da Vinci remain likewise unsubstantiated by published documents; and a more specific evidence - if any - is yet to come to light.” (Kopal 1969, p. 59.)

³ “The drawings in CA 310 recto (Figure 1) are two pen-and-ink outline sketches, made between 1505 and 1508 when Leonardo was either in Florence or in Milan. They are small, about 1/4 inch (2 cm) across. [...] The drawing in CA 674 verso (Figure 2) is in black-and-white chalk and shows the western half of the Moon. It is about 7 inches (18.5 cm) in diameter and was drawn about 1513 or 1514 when Leonardo was in Milan or in Rome.” (Reaves, Pedretti 1987, p. 56-57). For Fig. 1 see <https://codex-atlanticus.it/#/Detail?detail=310> and for Fig. 2 <https://codex-atlanticus.it/#/Detail?detail=674>.

⁴ Restoration of the Codex Atlanticus was completed between 1962 and 1972 and divided in 12 volumes (Barbieri 1982). Another intervention on the Code was completed in 2009 when the nuns of the Viboldone Abbey disassembled the Code into single sheets to make it easier to consult.

⁵ “Invisibile prima del restauro. Grande emisfera a carboncino (parte rimasta di un disegno tracciato sul foglio prima della sua divisione a metà). Probabile figura della luna colle sue macchie.” (Marinoni 1973-1982, vol. 12, p. 189). Translation: Invisible before restoration. Large charcoal hemisphere (part left of a drawing traced on the sheet before its division in half). Probable figure of the moon with its spots.

- hypotheses on the constitution of the lunar land deduced from observations compared with similar observations of the Earth's surface

They help us to understand the importance of Galileo and what had happened in the century after Leonardo's death.

3. Leonardo's Moon

Although living when movable type printing was in full bloom, Leonardo (1452-1519) did not publish anything in print. The first printed book (The Bible) was published in 1453. At the end of the 15th century, over 30.000 titles had been printed for a total of 12 million copies. The pages written and drawn by Leonardo are about 6000, and they probably represent only 1/3 or 1/4 of his entire production. The others have been lost.

Leonardo was trained in the arts in the studio of Andrea del Verrocchio, in Florence, between 1469/70 and 1482. His companions were Leon Battista Alberti, Paolo Toscanelli, Giovanni Agiropulo. In Milan, between 1492 and 1499 he was in contact with Luca Pacioli, Fazio Cardano, father of the mathematician Gerolamo Cardano, Bramante. And again, in Florence he met Andrea Sansovino.

Until Leonardo's drawings and considerations, the lunar surface had never been drawn in cosmological and astronomical literature. From the various statements that Leonardo wrote around the Moon we can summarize his thoughts as follows:

- The Moon does not shine with its own light
- The Moon is a solid and opaque body; if it were transparent, it would not reflect Sun rays
- The Moon is swept by winds which create waves that reflect the light of the Sun in all directions
- The surface of the Moon is not perfectly spherical but is similar to the fruit of the mulberry tree
- According to Leonardo if the Moon were perfectly spherical, each observer would see a different Sun ray as when looking at a sphere at the top of buildings. Both crests and cavities of sea waves reflect the sunlight but only rays reflected by crests reach the observers
- Soil and water of the Moon do not fall towards the centre of the Universe but towards the centre of the Moon
- The Earth is neither in the centre of the Sun's orbit nor at the centre of the Universe.

Moreover, Leonardo is considered the first to have ascribed the ashen light of the Moon to solar light reflected by the Earth's seas on the Moon.⁶ The Moon and the Earth are ultimately made of the same elements and their activities are quite similar. And this actually broke some Ptolemaic and Aristotelian assumptions of cosmology, astronomy and physics, although Leonardo never stated that this was the result of his observations

⁶ According to modern theories the phenomenon depends on Earthshine, as Leonardo had claimed. But, differently from him, the primary source of Earthshine aren't the seas but the clouds.

and deductions. His discoveries were not included in a general theoretical and experimental context.

Is there discontinuity between Leonardo the artist and Leonardo who describes the relationships among Moon, Sun and Earth and their geometry? To paraphrase Kemp, we can say that the Last Supper and the drawing of the Moon were the same thing for Leonardo: an artificial remake of the visual experience (Kemp 2011).

Or, to quote Cassirer,

[To Leonardo] Science is a second creation of nature, brought about by reason; Art, a second creation of nature, brought about by the imagination. (Cassirer 1963, p. 67)

3. Galileo's Moon

In *Sidereus Nuncius* Galileo destroyed the Aristotelean dichotomy between celestial and terrestrial phenomena (Galileo 1610). He was not the first to deduce that the Moon was completely similar to Earth. Leonardo, too, maintained the same thesis, but he didn't derive from it a critique of the Ptolemaic-Aristotelian system. Galileo, thanks to his Copernican views, his mechanical and mathematical background, his drawing abilities, announced:

- the proof of the fallacy of the Ptolemaic system
- the truth of the Copernican system

As regards to the second point – the truth of the Copernican system - Jupiter's satellites would have been a much more convincing test. But the splendid and elaborate drawings of the Moon were the Trojan horse through which Galileo affirmed his Copernican view and his primacy in the use of the telescope as an astronomical instrument.

The seven original drawings of the telescopic observations of the Moon⁷ show clearly that Galileo was an expert in watercolor technique and, in particular, in *chiaroscuro* technique.

With the deft brushstrokes of a practiced watercolourist, Galileo laid on the least a half-dozen different grades of washes, imparting to his images an attractive soft and luminescent quality. (Edgerton 1984, p. 229)

For Galileo, *disegno* was a tool to exercise his sight and hands and not just a means of making beautiful figures. The skills of the astronomer had to be combined with those of the painter (Camerota F. 2006, p. 211). Galileo aimed to prove that the lunar surface was very similar to the Earth's one:

We noticed, moreover, that all these small spots just mentioned always agree in this, that they have a dark part on the side toward the Sun while on the side opposite the Sun they are crowned with brighter borders like shining ridges. And we have an almost entirely similar sight on Earth, around sunrise, when the valleys are not yet

⁷ Original manuscript and drawings of the *Sidereus Nuncius* are in Biblioteca Nazionale Centrale Firenze, Ms. Gal. 48, c. 28r e 29v. They can be consulted in Biblioteca digitale del Museo Galileo: <https://bibdig.museogalileo.it/Teca/Viewer?an=976455>.

bathed in light but the surrounding mountains facing the Sun are already seen shining with light. And just as the shadows of the earthly valleys are diminished as the Sun climbs higher, so those lunar spots lose their darkness as the luminous part grows. (Galileo 1610; English translation, Van Helden 1989, p. 8R)

Galileo's drawings of the Moon were not a pure converting into an image what his eyes had seen with the help of the telescope. He interpreted the observational data in the light of a theoretical context (Camerota M. 2004). His drawings are “heavily theory-laden” (Gingerich 1975, quoted in (Camerota M. 2004)). In the *Sidereus Nuncius* Galileo gave a quite long description of the phenomenon of the ashen light of the Moon. It is probable that Galileo knew Leonardo’s hypothesis. Kepler and Maestlin came to the same conclusion starting from the Copernican assumption that the Earth was a planet and could therefore reflect light as the Moon did (Reeves 1997; Elizabeth, Van Helden 2001).

Why did Galileo *see* and correctly interpret what Leonardo and others (artists, natural philosophers, laymen) had seen but were unable to interpret?

- Galileo was convinced that the Ptolemaic-Aristotelian system was inadequate to explain celestial phenomena.⁸
- In the drawings of the Moon Galileo had been able to take advantage of studies on *disegno* and perspective.
- It’s probable that Galileo knew Leonardo’s arguments on the cinerary light. Galileo, a scholar of both science and perspective, surely appreciated Leonardo’s explanation which strengthened his Copernican views.
- Galileo as a “paradigm observer” created the first research program in a “telescope astronomy” (Pumfrey 2009, p. 164). The topographical task of establishing a lunar surface in its three-dimensional roughness is an effort to refute the distinction between the heavenly and terrestrial realms (Camerota F. 2006, p. 211).

In terms of pattern of visualization Leonardo’s and Galileo’s drawings are similar. But, in factual terms, the Galileian *aspera et sinuosa* rocky Moon had nothing to do with Leonardo’s Moon, wrapped and rippled with water and waves (Maffei 2013, p. 337).

Leonardo, 500 years ago, had noticed contradictions in the Ptolemaic system but didn’t have an alternative theoretical framework for his observations and considerations. The publication in 1543 of the *De Revolutionibus* by Copernicus, finds in Galileo an innovative interpreter. Another story starts.

References

- Bacon F. (~1611/1612). *Manuscript of Descriptio Globi Intellectualis*, in *The Works of Francis Bacon* London: W. Baynes and son, Vols. X, Vol. IX, pp. 200-241.
- Barbieri F. (1982). “The restoration of the Atlantic Code by Leonardo da Vinci”. *Academies and Libraries of Italy* L(2), pp. 98-111.

⁸ He came definitively to this conclusion before 1604 ([Galileo] 1605).

- Camerota, M. (2004). *Galileo Galilei e la cultura scientifica nell'età della controriforma*. Roma: Salerno Editrice.
- Camerota F. (2006). *La prospettiva del Rinascimento. Arte, architettura, scienza*. Milano: Electa.
- Cassirer E. (1963). *The Individual and Cosmos in Renaissance Philosophy*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Edgerton S. Y. Jr. (1984). "Galileo, Florentine «Disegno», and the «Strange Spottedness» of the Moon". *Art Journal* 44(3), pp. 225-232.
- Elizabeth S.B., Van Helden A. (2001) "The virgin and the telescope: The Moons of Cigoli and Galileo" in Renn J. (ed.) (2001). *Galileo in context*. Cambridge: Cambridge University Press pp. 193-218.
- [Galileo G.] (1605). *Dialogo de Cecco di Ronchitti by Bruzene. In Perpuosito de la Stella Nuova. ... With some octaves of Uncertain, for the same Stella, against Aristotle*. Padova: Appresso Pietro Paolo Tozzi.
- Galileo G. (1610). *Sidereus Nuncius*. Venetiis: Apud Thomam Bagliorum. English translation Val Helden A. (ed.) (1989), Chicago: University of Chicago Press.
- Gingerich O. (1975). "Dissertatio cum Professor Righini et Sidereo Nuncio", in Bonelli Righini, Maria Luisa and Shea, William R. (eds.) (1975). *Reason, Experiment, and Mysticism in the Scientific Revolution*. New York: Science History Publications.
- Kemp M. (2011). *Leonardo*. Oxford: Oxford University Press.
- Kopal Z. (1969). "The earliest maps of the Moon". *The Moon* 1, pp. 59-66.
- Maffei, R. (2013). "«Quasi dentatae rotae»: Leonardo disegna la Luna", in Frosini F., Nova A. (eds.) (2013). *Leonardo da Vinci on Nature. Knowledge and Representation*. Venezia: Marsilio, pp. 303-337.
- Marinoni A. (ed.) (1973-1982). *Leonardo da Vinci. Il Codice Atlantico della Biblioteca Ambrosiana di Milano*. Firenze: Giunti-Barbèra, 12+12 vols.
- Marinoni A. (1979). "Book review of The Literary Works of Leonardo da Vinci. Commentary, by Carlo Pedretti (National Gallery of Art: Kress Foundation Studies in the History of Art, v), 2 vols., University of California Press, Berkeley/Los Angeles, 1977". *The Art Bulletin* 61(4), pp. 642-650.
- Montgomery S.L. (1999). *The Moon and the Western imagination*. Tucson: The University of Arizona Press.
- Pumfrey S. (2009). "Harriot's maps of the Moon: new interpretations". *Notes and Records of the Royal Society*, 63(2), pp. 163-168.
- Pumfrey S. (2011). "The Selenographia of William Gilbert: his pretelescopic map of the Moon and his discovery of lunar libration". *Journal for the History of Astronomy*, XLII, pp. 1-11.
- Reaves G., Pedretti C. (1987). "Leonardo da Vinci's drawings of the surface features of the moon". *Journal for the History of Astronomy*, 18, pp. 55-58.
- Reeves E. (1997). *Painting the Heavens: Art and Science in the Age of Galileo*. Princeton: Princeton University Press.
- Richter J.P. (1883) (ed.). *The Literary works of Leonardo da Vinci*. London: Sampson Low, Marston, Searle & Rivington. 2 Vols.
- Whitaker E.A. (1999). *Mapping and naming the Moon*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Włodarczyk, J. (2019). "The pre-telescopic observations of the Moon in early seventeenth-century London: the case of Edward Gresham (1565-1613)". *Notes and*

Records of the Royal Society [online]. URL:
< <https://doi.org/10.1098/rsnr.2019.0009> > [access date: 02/06/2020].

Celebrazioni del cinquecentenario della morte di Leonardo da Vinci

Fausto Casi – MUMEC, Museo dei Mezzi di Comunicazione di Arezzo -
faustocasi@tiscali.it

Abstract: Il MUMEC-Museo dei Mezzi di Comunicazione, in accordo con Regione Toscana, ha sviluppato per il 2019 un denso anno di programmazioni attinenti alla celebrazione dei 500 anni dalla morte di Leonardo Da Vinci, con la rassegna “Leonardo da Vinci in *De Divina Proportione*”.

Keywords: Leonardo, MUMEC, Pacioli.

1. Introduzione

Le “Celebrazioni Leonardiane 2019” organizzate presso il MUMEC - Museo dei Mezzi di Comunicazione di Arezzo, sono state stimulate dal bando di concorso indetto dal settore Musei ed Ecomusei di Regione Toscana - Celebrazioni e Ricorrenze nell’anno 2018. Come MUMEC, abbiamo colto questa interessante occasione per proporre una mostra che mettesse in luce alcuni aspetti culturali leonardeschi connessi al nostro territorio aretino. Il progetto da noi proposto, dal titolo “Leonardo da Vinci in *De Divina Proportione*”, fu così inserito dalla preposta Commissione regionale nella lista di iniziative riconosciute valide e in grado di presentare tematiche interessanti in vari luoghi della Toscana. Il progetto del MUMEC non ha usufruito di finanziamenti regionali, ma è stato promosso dalla Regione Toscana attraverso la campagna pubblicitaria messa in atto per le celebrazioni leonardiane 2019.

2. Il progetto del MUMEC

Per la messa a punto della realizzazione espositiva di materiali attinenti all’opera famosissima *De Divina Porportione*, realizzata da Luca Pacioli di Sansepolcro (Arezzo) nel 1498, ci siamo basati sulla disponibilità del Prof. Bruno Bruni a realizzare un certo numero di solidi geometrici, ricavati dai disegni riportati nell’opera di Pacioli e disegnati, all’epoca della stesura del manoscritto, proprio da Leonardo da Vinci. In rapporto di amicizia, i due si sono trovati presenti alla Corte di Ludovico il Moro, rispettivamente nel ruolo di matematico Pacioli e come artista e ingegnere Leonardo. Questi 60 disegni leonardiani che completano la *De Divina Proportione* sono da considerarsi vere e proprie opere d’arte, in quanto ciascuno presenta il carattere della precisione geometrica solida, accompagnata da supporti e sfumature tali da renderli incredibilmente belli.

Da queste figure è stato possibile attualmente procedere ad uno studio sistematico su una serie di 25 solidi, scelti tra i 60 disegnati da Leonardo e riportati sul manoscritto del 1498; ogni figura è stata ricalcolata in modo che fosse possibile la lavorazione alle macchine dei componenti (lati in legno di ciliegio) per poi essere montati fino alla realizzazione dei 25 solidi. L'intento del progetto è stato quello di mettere in mostra presso il MUMEC di Arezzo, dal 6 aprile al 3 di novembre 2019, questi oggetti che danno l'incredibile illusione di appartenere all'arte contemporanea, pur riferendosi a disegni di cinque secoli fa. L'esposizione si completa affiancando ciascun solido con la figura corrispondente, disegnata da Leonardo nell'opera pacioliiana della *De Divina Proportione*, e per l'occasione riprodotta in forma di gigantografia.



Fig. 1. In foto un particolare della sezione della mostra del MUMEC “Leonardo Da Vinci in De Divina Proportione”.

La seconda tematica che abbiamo sviluppato come MUMEC in collaborazione con l'Accademia Petrarca di Arezzo è la riproduzione e la presentazione, presso la sede accademica, di un moderno modello di “Prospettografo” o “Macchina Prospettografica”, progetto che abbiamo ritrovato in uno dei fogli scritti e disegnati da Leonardo. Sembra che egli stesso abbia infatti usato questo strumento prospettico per disegnare i 60 solidi, richiesti dall'amico Pacioli per la sua opera manoscritta, altrimenti difficilmente riproducibili a mano (anche a partire dai veri che Pacioli aveva già fatto costruire). Tale macchina, riprogettata in base al disegno Leonardiano da chi scrive e da Bruno Bruni esecutore materiale, è posta in mostra nell'ingresso dell'Accademia Petrarca di Arezzo, affiancata dalla gigantografia del disegno di Leonardo, a dimostrazione dell'autenticità storica del messaggio progettuale.



Fig. 2. Nella terza sezione è stato esposto in particolare un documento, mostrato in figura, che descrive la “Vite aerea” o “Elicottero”, del quale abbiamo anche un esemplare pratico, proveniente dalla “Collezione Fausto Casi” e realizzato nel 1952, in occasione delle celebrazioni del “Cinquecentenario della nascita di Leonardo da Vinci -1452 – 1952”, a Milano.

Una terza sezione - che ci è apparsa importante quanto le prime due - è costituita dalla mostra di alcuni “Codici di Leonardo” e di alcuni fogli dalla “Collezione Luciano Chiari di Arezzo”, che sono stati resi disponibili in facsimile.

La quarta sezione ci è stata suggerita direttamente dalle opere di Leonardo relative alla “Cartografia”: Leonardo cartografo ha i suoi riscontri di reale capacità a rappresentare nelle varie carte geografiche dell’Italia, della Toscana, ma anche, in particolare, del territorio aretino. È recentissima la scoperta di un “Mappamondo” attribuito a Leonardo, costruito nel 1504 utilizzando 2 semi-uova di struzzo incollate. Sulla superficie dello “sferoide” è stata poi dipinta, disegnata e descritta la geografia terrestre, con le ultimissime scoperte indicate dai cartografi più aggiornati del momento.

Da queste opere cartografiche e dai disegni e descrizioni di oggetti riscontrati nei *codici e fogli di Leonardo*, si evince la conoscenza e l’uso di strumenti scientifici vari che, al tempo, egli usò per le misure in geodesia e per osservazioni astronomiche.

All’interno delle vetrine del MUMEC sono inoltre stati esposti vari strumenti scientifici antichi, provenienti dalle “Collezioni Fausto Casi di Arezzo”, e confrontabili con i disegni riportati nei vari codici facenti parte della mostra.

Concludono questa parte dell’esposizione disegni e macchine meccaniche connesse in particolare all’orologeria monumentale rinascimentale. Alcuni progetti di Leonardo relativi a singoli movimenti o agglomerati di ingranaggi, risalenti a fine 1400 - inizio 1500, sono riconoscibili, nella stessa forma, nell’Orologio Monumentale del Palazzo di Fraternita di Arezzo, che data 1552. A soli 50 anni di distanza, infatti, tra i disegni e la costruzione del meccanismo astronomico aretino, non sono rilevabili modifiche di alcun genere alle applicazioni meccaniche per la misura del tempo. Possiamo quindi sostenere che ad Arezzo è conservato e perfettamente funzionante, un documento storico dimostrativo di alcuni meccanismi riportati nei codici originali di Leonardo.



Fig. 3. La IV sezione della mostra è quella relativa alla tematica più scientifica ed è intitolata: “La strumentazione scientifica al tempo di Leonardo”. Particolare attenzione è dedicata ai disegni, ritrovati nei vari codici, dei *meccanismi relativi alla misura del tempo*, confrontati e confrontabili anche con le macchine di altri orologi Rinascimentali, portatili e da tavolo, della “Collezione Fausto Casi di Arezzo”, visibili nelle vetrine dell’esposizione.

Questa quarta sezione si conclude con la presentazione di alcuni testi antichi dai quali è stato possibile ricavare progetti, descrizioni e modalità d’uso di strumenti scientifici che, all’epoca di Leonardo, venivano utilizzati dagli architetti e dagli ingegneri. Erano i testi di riferimento per effettuare misure, ricavare piante di luoghi e carte di territori, come per realizzare modelli di palazzi, castelli. Sono stati gli strumenti scientifici che hanno permesso anche a Leonardo di proporre e lasciare in eredità all’Umanità intera il suo prezioso ed unico tesoro di idee che, a distanza di 500 anni, ancora meravigliano per la loro attualità e modernità!

Bibliografia

- Camerota F. (1996). *Giorgio Vasari il giovane*. Firenze: Giunti edizioni.
 Cantile A. (2003). *Leonardo genio e cartografo*. Firenze: Istituto geografico militare.
 Ciocci A. (2009). *Luca Pacioli tra Piero della Francesca e Leonardo*. Perugia: Aboca Museum edizioni.
 Casi F. (2009). *La scuola di scienza e tecnica*. Perugia: Aboca Museum edizioni.
 Casi F. (2019). *Leonardo da Vinci in “De Divina Proportione” di Luca Pacioli*, MUMEC – Museo dei mezzi di comunicazione. Arezzo: 3emmegrafica snc.

RICCARDO FELICI (1819-1902),
A PISAN CONTRIBUTOR TO THE BIRTH OF ELECTRODYNAMICS

Early Electrodynamics, the induction effect, and the place of Felici

Friedrich Steinle – Technische Universität Berlin – friedrich.steinle@tu-berlin.de

Abstract: The history of electromagnetism and electrodynamics is significantly marked by a unusually deep dichotomy. Founded by Ørsted in 1820, electromagnetism developed in different strands: one of them, essentially shaped in Paris, aimed at mathematization and was quickly widened into electrodynamics. The other, pursued in London and some German places, focused on the variety of phenomena in their spatial complexity. A particular challenge was posed by Faraday's 1831 discovery of the induction effect: the fundamental importance of the effect was obvious, plus it was quickly turned into successful technical devices. At the same time, the core concept by which Faraday had formulated his induction law – 'magnetic curves', later turned into 'lines of force' – was neither accessible to, nor acceptable by existing mathematical approaches. It took one and a half decades for mathematical efforts to start, and again they came in fundamentally different approaches. On the continent, Weber attempted to explain induction by a law of central forces, and Neumann and Felici aimed at mathematisation without such physical assumptions. At the very same period, Maxwell in Cambridge took a diametrically opposed approach: not by avoiding the concept of lines of force, but by embracing it and developing a mathematical formulation with completely new notions. For decades to come, electrodynamics would be shaped by the dichotomy between British and continental approaches. In my talk, I shall sketch that development, situate Felici's work in it, and discuss the question of how such a parallel existence of two 'paradigms' (Kuhn) or 'styles of thought' (Fleck) could originate in the first place.

The figure and work of Riccardo Felici in the 200th anniversary of his birth

Paolo Rossi – Dipartimento di Fisica dell’Università di Pisa, Pisa, Italy; Centro Fermi – Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche “E. Fermi”, Rome, Italy – paolo.rossi@unipi.it

Abstract: Riccardo Felici (1819-1902) was Professor of Experimental Physics at the University of Pisa from 1859 to 1893. His main scientific contributions go back to the Fifties of the XIX century, when he studied the electromagnetic induction phenomena both from an experimental and a theoretical point of view. His formulation was very rigorous, probably the best of his time, and it was quite appreciated also by J.C. Maxwell. His school of physics was the most important and influential in Italy for the best part of the XIX century, and he gave also a substantial contribution to the formation of the post-unitary Italian Physics community, especially through his direction of the journal *Il Nuovo Cimento* and his participation in founding the Italian Physics Society.

Keywords: Riccardo Felici, Pisa school, electromagnetic induction

1. A short biography

In the many biographical notes Riccardo Felici appears to have been born in Parma on June 11, 1819, but the circumstances of his birth are somewhat uncertain, since there is no trace of his birth in original Parmesan documents, while there is an act of baptism, requested from Felici himself, attesting the birth in Pisa, on that same date, of “Rinaldo Felice”, son of unknown parents. Some circumstances lead us to believe that Felici was the illegitimate son of the Pisan noblewoman Isabella Roncioni, whose stormy biography would make the hypothesis plausible. Certainly, there is a *fraternal*, albeit cautious, correspondence of Felici with Enrichetta Bartolommei, Isabella’s daughter, and the choice of Isabella’s name for Felici’s only daughter does not seem casual either (Ferrero 2014).

Certainly, however, he spent his apparently uneasy childhood and adolescence in Parma, and he enrolled first, on November 30, 1838, at the local University, where he followed, among others, the teachings of Elementary Mathematics, Sublime Mathematics and Elements of Astronomy, Mechanics applied to Architecture, Statics and Hydrodynamics, Theoretical and Practical Physics, Experimental Physics, until the day when Professor Michele Leoni (1776-1858), who had been a lover of Roncioni in the past, prompted him to move, the following year, to the degree course in Mathematical Sciences at the Faculty of Sciences of the University of Pisa, as a pupil of Filippo Corridi, Vincenzo Amici, Luigi Pacinotti, Ottaviano Fabrizio Mossotti and Carlo Matteucci.

In Felici's articulated study plan both Physics and Mathematics teachings appeared, together with various other technical and scientific subjects, up to his degree on July 12th 1843, achieved in just three years instead of the usual four of the ordinary course of studies.

In 1846, having already published some scientific works, Felici was appointed as assistant to the Chair of Experimental Physics held by Matteucci, as well as an examiner and preparer for the exams. From 1848 to 1849, he participated, with the rank of lieutenant, in the First War of Independence, fighting valiantly in Curtatone. On his return to Pisa, due to his political ideas, he was opposed by the Church in resuming his post as assistant at the university, and it was only through the intercession of Professor Silvestro Centofanti, with whom he shared many political ideas and maintained friendly relations, that he soon succeeded in recovering his previous academic role.

In 1852, he held both courses and seminars at the *Scuola Normale Superiore* in Pisa, and in 1853 he was appointed repeater. In 1854 he became adjunct professor and married Elisa Frullini, from Pisa; their only daughter, Isabella, was born in 1856. In 1859, due to the increasing political commitments of Matteucci, Felici became a full Professor and took over the Chair of Experimental Physics - also holding the annexed Cabinet.

In 1870/71 and in 1882/83, Felici was also Rector of the University of Pisa, taking on various other organizational and managerial positions, including the presidency of the Faculty of Mathematical, Physical and Natural Sciences and the position of councilor of the *Scuola Normale Superiore*, that brought him to abandon active physical research. Officially he left university teaching in 1893, and in 1894 he was appointed professor emeritus of the University of Pisa.

He held friendly relationships and collaborations with several contemporary Italian scientists, as well as with scientists from other European countries. In 1897, together with several other university professors (including Battelli, Ròiti, Blaserna, Righi and Beltrami) he proposed the establishment of the Italian Physical Society and was the director of its main magazine *Il Cimento* (founded in 1844, and later renamed *Il Nuovo Cimento*).

Many were also the acknowledgments for his career: he was a member of various other Italian and foreign scientific societies and academies, including the *Accademia Nazionale di Scienze, Lettere e Arti* of Modena (1861), the *Physical Society* of London (1868), the *Accademia delle Scienze* of Bologna (1873), the *Physicalisch-Medicinische Gesellschaft* of Wurzburg (1874), the *Accademia dei Lincei* (1875), the *Istituto Veneto* (1875), the *Accademia delle Scienze* of Turin (1881), the *Istituto Lombardo di Scienze e Lettere* (1882), the *Accademia di Scienze, Lettere e Arti* of Lucca (1883), as well as various honors by chivalry orders and official invitations by Italian and foreign associations among which, in 1899, the *Royal Institution of Great Britain*.

He died in the locality of Sant'Alessio di Lucca, on July 20, 1902. His body was then buried at the monumental *Camposanto* of Pisa.

2. Riccardo Felici's scientific work

Felici was one of the best Italian researchers and professors of experimental physics in the second half of the nineteenth century, educated in Pisa at the first Italian school of physics

in the nineteenth century, which had as its main masters Mossotti, Luigi Pacinotti and especially Matteucci, who was the first to give an experimental character to the school, also by his pioneering research work.

There is often a certain continuity of methods and views within a school of thought, even more so in the scientific field, but this cannot be said of Felici with respect to his teacher Matteucci. In fact the peculiarities of Matteucci's character were undoubtedly at the origin of this many and rapid initiatives taken both in the political, organizational and institutional context as well as in the practice of research, where his trend was often towards the immediate experimental discovery, while he showed much less interest in the theoretical and mathematical formalization. Quite different was Felici's temper, described by Pochettino as

[...] of a calm, modest, constant character; methodical spirit, crystalline, ingeniously sharp and disciplined, cautious, balanced, sometimes even skeptical, and balancing the experimental and the mathematical element in his research. A man of reasoning, Felici did not tie his name to a phenomenon he discovered; but his fundamental researches on the induction currents were conducted with such perfection of method that they deserved the honor of being included in the *Klassiker der exakten Wissenschaften* collection published by Ostwald. (Pochettino 1930)

His first physics works date back to the years immediately following his graduation, with a first memoir, dated 1844, in which he expressed his critical considerations, basically on theoretical grounds, regarding research conducted by the French physician, biologist and physiologist Henri Dutrochet on some hydrodynamic phenomena that he explained by introducing *ad hoc* a new force, while Felici brought them back to the action of capillary forces.

Appointed as Matteucci's assistant in 1846, Felici was immediately able to make use of direct experimentation, supported by the precious work of the laboratory technician Mariano Pierucci, in support of his theoretical considerations. He could then publish in 1846 a more experimental work on some thermoelectricity phenomena in mercury, showing that electrolytic conductivity could be established, not necessarily in the presence of a thermal gradient, but in any case in conjunction with phenomena of ionization of the conductive substance.

In 1847, carrying on his studies and research on electrochemical phenomena, he published a third work on electrical circuits formed by galvanic elements, while, in 1850, he produced a work on the propagation of electric current inside a spherical conductor. In 1851, in continuation of what he had already been done in the previous papers, he published another work on electrochemistry in which he studied also the effect of thermal phenomena on electrical conduction in liquids, coming to determine, for the first time, the mode of variation of the polarization EMF with the temperature. These were purely experimental works, with the addition of non-formal theoretical considerations.

In the same year 1851 he published also a first essay, focusing on the explanation of electrodynamic induction phenomena, that was later translated into French and republished in 1852 in the famous *Annales de chimie et de physique*. This work was also known to

Maxwell. This publication marked the beginning of the main sequence of works on electrodynamic induction, which would end in the early 1860s, consecrating Felici among the great masters of the discipline.

In the early Fifties Felici undertook a study of electromagnetic phenomena according to an experimental approach similar to that used in the 1920s by André-Marie Ampère in studying the phenomena of attraction and repulsion between linear elements of electrical circuits. Felici began his research with a series of experiences in which he systematically investigated the possible variations in the intensity of inducing and induced currents with the variation of nature, dimensions, relative position and shape of inducing and induced electric circuits, thus reaching a new theory of electromagnetic induction that contributed much to complete the theoretical framework for electromagnetic induction, that had been studied mainly by M. Faraday, F.E. Neumann, W.E. Weber and H.F. Lenz, in addition to many others.

What most distinguishes Felici's work from the certainly noticeable contributions of other authors, is the method by which he came to the formulation of his theory. Indeed, the theories of Neumann, Lenz and Weber were based on particular *ad hoc* hypotheses, having more an *a priori* nature and justification than a reasonable physical motivation. Instead Felici, on the preliminary basis of simple and elementary but crucial physical experiments, following Ampère's method arrived at the construction of a general theory of electromagnetic induction, avoiding recourse to artificial and not experimentally proven assumptions. His main experimental results are the following (Agastra, Selleri 2012):

1. The induced electromotive force is proportional to the inducing current intensity;
2. The induction caused by n currents of intensity I/n is the same as that caused by a single current of intensity I ;
3. A conductor's effects is the same as the summation of the effects of the elementary currents into which it can be decomposed;
4. The induced electromotive force is proportional both to the number of coils of the inductor and to the number of the induced circuits;
5. The currents originated in a moving closed circuit is equal to the difference of the currents that would be induced in that circuit if, being open, it were closed in its original or final position;
6. The mutual induction of two identical, coaxial, circular circuits is proportional to their diameter,
7. The current induced in a closed circuit from a solenoid (or a magnet) depends only on the relative position of the circuit and of the solenoid (or magnet) extremities;
8. If the axis of a solenoid (or a magnet) forms a closed loop, then its induction is zero unless the circuit is concatenated with the axis.

Felici's law, according to which «it is possible to calculate the total charge that passes in a circuit subject to an induced current as the difference between the final flux of the magnetic field and the initial one divided by the electrical resistance of the circuit», was resumed by J.C. Maxwell in constructing his general theory of electromagnetism, and also by A. Roiti, L. Puccianti and G. Polvani, who further confirmed many aspects of Felici's work. Thanks to these important results, Felici became, in 1859, full professor of experimental physics.

Precisely during the period in which these pioneering researches on the induction currents were conducted, Felici published works in which he explained, through the delay of electromagnetic induction, the presence of certain lack of symmetry in mechanical actions intervening between a given rotating conductive sphere and a magnet placed perpendicular to the axis of rotation of this solid conductor, in the case where the angular velocity increased considerably. And it is precisely from these studies, even admitting hypotheses not directly linked to experimental facts - and this was the only case of a mathematical rather than theoretical treatment of an empirical problem by Felici - he came also to an ingenious theory of diamagnetism.

From the early Sixties onwards, he directed his interests towards other questions of electromagnetism, acoustics and optics. In the years between 1862 and 1866, Felici prepared, on the basis of previous work on the subject, laboratory experiments for estimating the speed of electric current, succeeding, at the same time, in describing some details of the phenomenology of electric sparks, their nature and duration, through appropriate experimental apparatuses prepared by himself.

In the same years, on the basis of what his teacher Carlo Matteucci had already done, he published some works concerning some laboratory experiences - building, for this purpose, his own special electromechanical system based on a torsion balance - on the physical behavior of dielectrics in the presence of other electrified bodies, with special attention to the case of an insulating material inserted between the two conductors of a capacitor.

He published also other remarkable works on the possibility of having dielectric polarization phenomena, an hypothesis already advanced by Avogadro, and taken up and further developed by G. Belli, M. Faraday and above all by Mossotti, however from a more theoretical than empirical point of view, thus leaving many open questions to which Felici's experimental work, which lasted until the final years of his research activity, responded with acumen and originality, thus bringing the polarization of dielectrics from a simple *ad hoc* hypothesis to an experimentally assessable physical reality, confirming however many theoretical aspects of Mossotti's mathematical theory. One must also recall some memories, published between the Sixties and the early Seventies, on the determination of the geometric shape of some surfaces of liquids modeled by the action of capillary forces.

In the mid-Seventies for the purpose of studying the demagnetization law of certain ferromagnetic materials (a more complicated case than that of diamagnetic and paramagnetic substances), Felici conceived and realized, with the help of the laboratory technician Mariano Pierucci, a special switch that produced rapid intermission (at intervals of $1 / 20,000$ seconds) in the currents induced between two concentric solenoids in which an iron cylinder was inserted. One of the solenoids was connected to a battery, and the other to a galvanometer, so that, by closing the circuit of the battery, the iron would magnetize, thus inducing an electric current in the solenoid connected to the galvanometer. The switch prepared by Felici, with the technical support of Pierucci, made it possible to adjust specifically the opening and closing times of these two circuits, so as to be able to estimate and adjust the magnetization and demagnetization times of the iron rod, and then to evaluate the intensity of the various currents in play, which obeyed laws having the form $A \exp(-\alpha t)$, where A and α are numerical constants. These experiences, which were also taken up and extended by some of Felici's students, can be considered historically as forerunners of

subsequent research and theories on the demagnetization of ferromagnetic materials, which were mainly based on the use of alternating magnetic fields of decreasing intensity, made necessary by the occurrence of magnetic hysteresis phenomena.

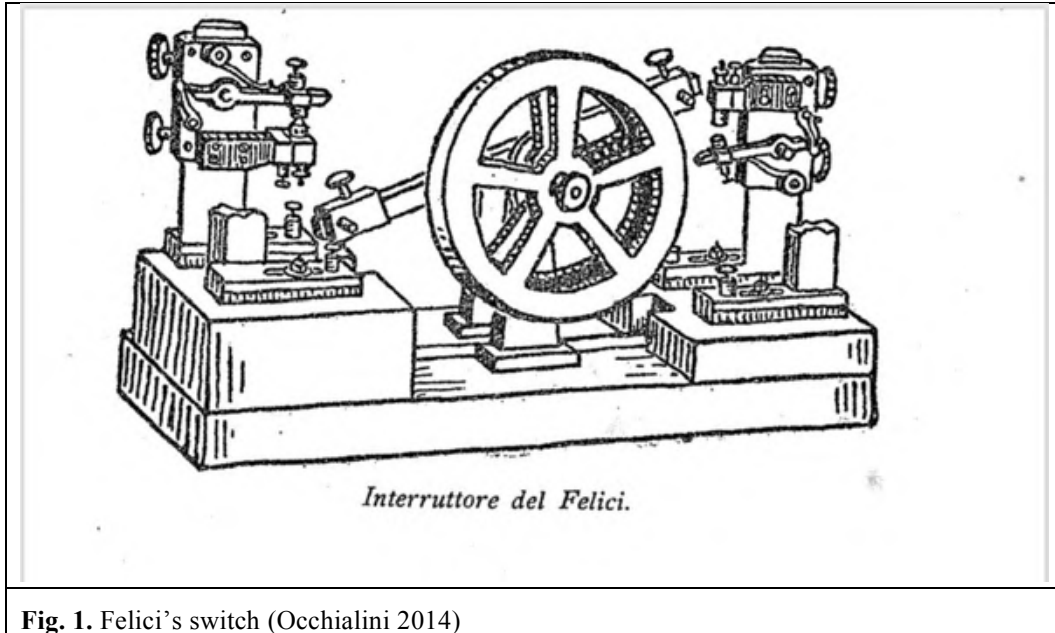


Fig. 1. Felici's switch (Occhialini 2014)

Finally we may recall some minor works, carried out between the Seventies and the Eighties, and related to laboratory experiences:

- i) the study of the potential of a moving conductor under the influence of a magnetic field;
- ii) the theory of the propagation of electricity in a homogeneous conductive sphere when the electrodes are placed on its surface;
- iii) the investigation of phenomenological aspects of electromagnetic induction;
- iv) the study of electromagnetic phenomena in moving fluids;
- v) the "Amperian forces";
- vi) the study of string vibrations;
- vii) memoirs on thermodynamics, acoustics and optics, many of which constituted the thesis topic of his students.

3. Felici's view of physics and its impact

From a retrospective examination of the list of his works, we note that special attention was paid by Felici to the particular and indissoluble relationship between mathematics and physics, not seen from the axiomatic perspective typical of mathematical physics, such as it was taken for example by Neumann, Weber and Lenz in their research on electrodynamic induction, but rather from a theoretical physics point of view, starting from hypotheses having a clear and precise experimental basis and not being assumed a priori.

This epistemological position of Felici probably arose from a fruitful combination of the teachings received from Mossotti and Matteucci, from which he matured a sure, firm and profound conviction on the necessary union between mathematics and physics, nearer to Galileo's prescriptions than to the typical attitude of mathematical physicists.

Felici renewed the Galilean tradition in its most typical methodological aspects of study, research and experimentation, starting above all from the work on electromagnetic induction, and with this he gave birth to a true school of Pisan Physics alongside the contemporary birth of an equally important school of mathematical physics - that of Enrico Betti and Vito Volterra, who were very much affected by Felici's influence.

Faced with the limited number of publications by Felici (almost all of them, however, having a character of completeness), one cannot certainly forget, alongside the figure of the researcher, that of a teacher: indeed for many years, as Pochettino wrote, in Italy

[...] there was only one physical Institute, that of Pisa, directed by Felici, and the school could not have been better because from him, equally eminent both from the mathematical point of view and from the experimental point of view, the youth could come to know well the true way of working in the field of physics; that is, to balance the theoretical element with the experimental one in a proper measure, so that the inappropriate over-dominance of one over the other does not lead to either abstruse metaphysics or disordered empiricism. (Pochettino 1930)

Despite this, Felici's pioneering work did not have a direct academic following in Pisa, partly due to Felici's own motives and dispositions, which led to a sort of diaspora of his students in many parts of the country. A complete list would be very long. Let's just recall here those who became full professors of Experimental Physics: E. Villari (in Bologna and Naples), A. Roiti (in Florence), L. Donati (in Bologna), G. Poloni (in Modena), A. Bartoli (in Catania and Pavia), G. Bongiovanni (in Ferrara), O. Murani (in Milan), not to mention mathematical physicists like E. Padova, G. Ricci Curbastro, C. Somigliana and V. Volterra.

This migration produced in the Pisa school of physics some discontinuity, that was in some way rectified only in 1917 with the call of Luigi Puccianti, who always held in great esteem the teaching of Felici, his studies and his researches. He explicitly attests that, with Felici, the school of Physics in Pisa reached the highest level of scientific research, thus renewing the great Galilean tradition. Recalling the famous maxim of Saggiatore ["philosophy is written in this great book ..."], Puccianti wrote that

[...] perhaps no other modern physicist has ever conformed like him to the famous Galileo maxim with equal severity. [...] But if it is easy to admire the profound truth contained in this maxim, and to see in it a general and invariable norm of the method, it is very difficult to follow it rigorously, without being discouraged by the logical abstractness of those pure mathematical entities, or allowing oneself to be led to transform them with fantasy (as too often happened in the history of science) into fictitious physical entities, attributing to them an imaginary concreteness, which gives them the comforting illusion of handling real things by treating them: from which precisely repelled the mentality of R Felici, who [...] while sitting in the chair of experimental physics was no less a mathematician than an experimenter. (Puccianti 1939)

References

- Agastra E., Selleri S. (2012). "J.C.Maxwell's Forerunners: Riccardo Felici". *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 54 (3), pp. 250-257.
- Battelli A. (1902). "Riccardo Felici". *Il Nuovo Cimento*, 4, pp. 233-246.
- Ferrero G. (2014). *Riccardo Felici. Un enigma nella vita dello scienziato*. Pisa: ETS.
- Maiocchi R. (1996). *Felici, Riccardo*, in *Dizionario Biografico degli Italiani*, Vol. 46. Roma: Istituto dell'Enciclopedia Italiana.
- Occhialini R.A. (1914). *Notizie sull'Istituto di Fisica dello Studio pisano*. Pisa: Mariotti.
- Pochettino A. (1930). "Riccardo Felici". *L'Elettrotecnica*, XVII, pp. 487-488.
- Puccianti L. (1939). *Il contributo della scuola di Pisa alla fisica italiana*. Roma: SIPS.
- Reeves Buck B (1980). *Italian Physicists and their Institutions* (PhD thesis in History of Science), pp. 288-320. Harvard University.
- Roiti A. (1902). "Commemorazione del socio prof. Riccardo Felici". *Atti della R. Accademia dei Lincei*, XI (II), pp. 285-295.
- Rossi P., Iurato G. (2018). *La Scuola pisana di Fisica (1840-1950)*. Pisa: Pisa University Press, pp. 61-96.

Archival sources

Pisa - Sistema Bibliotecario di Ateneo, Università di Pisa - Archivio Riccardo Felici.

Riccardo Felici e la discussione sugli schermi elettrici

Lucia De Frenza - Seminario di Storia della Scienza - Università degli studi di Bari
“Aldo Moro” – lucia.defrenza@uniba.it

Abstract: Since 1856, Riccardo Felici conducted experiments to determine how the electrostatic influence varied by inserting screens of non-insulated conductive material or insulating material in the space between the charge and the neutral body. Felici described Faraday's results concerning the specific inductive power of dielectrics, using the theorems of classical electrostatics. He repeated Riess' experiments, carried out between 1855 and 1856, and resumed the research activity of Carlo Matteucci and other Italian physicists.

Keywords: Riccardo Felici, Electrostatics, Faraday, Macedonio Melloni.

1. Gli schermi nella teoria elettrostatica

La discussione sull'uso degli schermi negli apparati per l'analisi dell'influenza elettrica, condotta nella seconda metà dell'Ottocento, scaturiva da un interesse teorico generale, cioè dall'esigenza di definire la natura e il comportamento dell'elettricità nei corpi. Sostenere che alcune sostanze, in particolari condizioni, potessero arrestare l'azione elettrica significava mettere in dubbio l'equivalenza alla base dell'elettrostatica classica, quella tra forza elettrica e gravitazionale, perché quest'ultima non era bloccata dall'interposizione di altri corpi. Dichiarare che l'influsso elettrico potesse trasmettersi anche per linee curve, aggirando gli angoli ed interessando parti sottratte all'azione diretta, faceva cadere un altro principio di quella eguaglianza, quello secondo cui la forza si esplica nella direzione che unisce i centri dei corpi. Dietro le diverse soluzioni adottate dalla maggior parte dei fisici della seconda metà dell'Ottocento si nota la preoccupazione di garantire la teoria classica, tentando di spiegare i risultati degli esperimenti, anche quelli recentemente proposti, con le vecchie argomentazioni. Pochi ricercatori condivisero con Faraday l'idea che l'elettricità potesse trasmettersi per linee di forza curve e in forma mediata nello spazio.

In questa discussione l'interesse per le questioni teoriche lasciò in secondo piano quello propriamente sperimentale. È vero che non sarebbe stato un dato o una misura quantitativa a decidere quale delle diverse interpretazioni fosse da preferire. Se il campo di ricerca era ancora così insidioso, se mancava un accordo proprio sui concetti di fondo, difficile era riuscire a stabilire quale risultato osservativo fosse chiaro e corretto (Fleck 1980, p. 155). Si può dire che senza una teoria di riferimento condivisa dai fisici venivano meno criteri ed argomenti efficaci per decidere su problemi di misura o sul significato da dare all'esperimento. Quindi, anche il fatto sperimentale, nei suoi riscontri concettuali, finiva al centro della controversia.

2. Il dibattito sugli schermi elettrici nella seconda metà dell'Ottocento

Nel 1854 Macedonio Melloni effettuò alcune osservazioni sul comportamento dei conduttori non isolati posti tra una carica e un corpo neutro. Queste esperienze rientravano nella ricerca appena avviata per verificare le ipotesi sull'elettricità statica formulate da Faraday. Lo scopo era di capire se l'induzione agisse in forma mediata nei corpi, ossia modificando la materia strato per strato, e se questo effetto si propagasse in ogni direzione intorno alla carica, cioè non soltanto partendo dal suo centro (Melloni 1994, pp. 475-476). A questo scopo Melloni realizzò un apparato che utilizzava uno schermo forato, dalla cui apertura si affacciava l'oggetto da elettrizzare per induzione. Posto il corpo carico davanti allo schermo forato, con un elettroscopio saggiava lo stato di elettrizzazione dell'indotto. Il risultato era che su ogni parte di questo la carica aveva lo stesso segno di quella dell'inducente. Questo esperimento non solo dimostrava che l'elettricità si irraggiava nella materia, a partire dalla zona che era direttamente raggiunta dall'azione d'influenza, ma anche, secondo Melloni, che non c'era in questo processo uno spostamento reale di fluido, bensì solo una diversa disposizione delle cariche. Una conferma veniva da un altro esperimento. Congiunte due piccole sfere con un filo conduttore, la prima si piazzava davanti all'apertura dello schermo forato, l'altra era nascosta; un elettrometro fornito di una carica stabilita, mostrava nelle due sfere la presenza di elettricità dello stesso segno. Per Melloni questo comportamento provava che la carica eteronima era dissimulata, ossia incapace di agire attraverso lame interposte o nello stesso corpo sottoposto ad induzione.

La prima critica alle ipotesi di Melloni venne da Faraday (Melloni 1994, pp. 500-506). Il fisico inglese considerava gli schermi come parti che entravano nel sistema e influivano a loro volta sul comportamento elettrico. Secondo Faraday, poiché l'azione induttiva era in grado di passare intorno agli angoli di lamine verticali, nella zona retrostante si manifestava un influsso di grado variabile, dipendente dal numero di linee di forza che aveva raggiunto i singoli punti. Se, come aveva fatto Melloni, si decideva di valutare l'entità dell'effetto induttivo, disponendo dei pendolini in posizione schermata sulle facce interne delle lastre, era chiaro che la carica acquisita dagli strumenti rilevatori esprimeva globalmente l'azione induttiva del sistema (Melloni 1994, pp. 504-505).

La discussione sul ruolo degli schermi negli esperimenti sull'induzione elettrostatica emerse già nei primi commenti alla teoria di Melloni. I fisici concordavano sul fatto che lamine conduttrici sistemate tra la carica e il corpo neutro potessero modificare gli equilibri di forze, per effetto dei quali il fluido elettrico era scomposto e si distribuiva sull'indotto; il nodo della controversia, invece, era quello d'interpretare tale influenza.

Su questo tema si soffermò nel 1855 Peter Theophil Riess (1804-1883), prendendo le distanze sia da Faraday che da Melloni e confermando l'interpretazione derivata dalla teoria di Coulomb e Poisson. Le anomalie descritte nell'esperienza dell'induzione elettrostatica con l'interposizione di lastre schermanti erano risolte da Riess nei termini di un gioco di variazioni degli equilibri di forze tra particelle elettriche distribuite in vario modo sulle superfici dei corpi. Riess dimostrava con una serie di misurazioni che non era solo la natura del materiale che costituiva la lastra interposta ad influire sulla variazione dell'entità dell'influsso elettrico, ma anche la sua forma e le dimensioni. Piastre condut-

trici o isolanti potevano ridurre o aumentare l'azione d'influenza a seconda dell'equilibrio di forze che si creava tra la carica distribuita sulla superficie del corpo inducente e quella sull'elemento interposto. I risultati sperimentali dimostravano che non era certa l'ipotesi di Faraday della dipendenza dell'azione d'influenza dalla capacità induttiva specifica del mezzo o, per meglio dire, che non c'erano prove evidenti che quell'azione fosse collegata alla natura della sostanza più che ad altre caratteristiche esteriori, come dimensioni, forma, capacità igrometrica, ecc. Il giudizio di Faraday era stato fuorviato da un errore di valutazione, poiché esso presupponeva che, durante il processo induttivo, “of the three quantities of electricity, present whenever an electrified body acts upon a neutral one, two quantities being completely occupied with one another have no further action” (Riess 1855, pp. 402-403). In sostanza, Riess sosteneva che Faraday fosse caduto nello stesso equivoco di quei fisici contemporanei, i quali avevano ammesso che la carica del corpo inducente fosse dissimulata da quella di segno opposto dell'indotto. Questo malinteso aveva portato Faraday a valutare l'effetto di un'unica azione, quando, invece, in gioco ce n'erano tre.

Le obiezioni rivolte a Faraday esprimevano innanzitutto un giudizio negativo sulle sue capacità sperimentali. Riess in questo modo tentava di tutelare il sistema dei metodi e delle deduzioni che Coulomb e Poisson avevano fornito alla scienza elettrica, al di là di tutti i progressi successivi.

3. Il contributo di Felici alla discussione sulle esperienze con gli schermi elettrici

Riccardo Felici (1819-1902) studiò a lungo il comportamento degli schermi nelle esperienze d'induzione e ne fornì un'interpretazione coerente con i principi dell'elettrostatica classica. Attraverso indagini sperimentali rigorose riuscì a raccogliere nuovi dati, grazie ai quali, peraltro, poté discutere sulle idee emergenti allora nella scienza elettrica.

La biografia intellettuale di Riccardo Felici è abbastanza semplice. Dopo aver condotto gli studi superiori a Parma, si laureò a Pisa, seguendo i corsi di Ottaviano Fabrizio Mossotti, Luigi Pacinotti e Carlo Matteucci. Quest'ultimo nel 1846 lo fece nominare aiuto alla cattedra di fisica. Dieci anni dopo divenne professore aggregato di Scienze naturali, mentre gli fu confermata la supplenza al corso di Matteucci, che per incarichi esterni era dispensato quasi interamente dalle lezioni. Questa situazione si risolse nel 1859, quando Felici ebbe finalmente la nomina a professore effettivo di Fisica e direttore del Gabinetto. I suoi primi interessi furono rivolti all'analisi delle proprietà delle correnti elettriche. Tra il 1851 e il '59 s'impegnò in una ricerca che gli fornì una notevole notorietà, soprattutto in Germania: questa mirava a stabilire sperimentalmente la natura delle leggi generali dell'induzione elettrodinamica (Agastra, Selleri 2012). I risultati da lui ottenuti dettero conferma della correttezza, con definite limitazioni, della legge di Neumann e servirono come base alla successiva riformulazione nella teoria generale di Helmholtz (Iurato, Rossi 2018, pp. 61-71).

Tra il 1862 ed il 1866 Felici si occupò di determinare la velocità di propagazione della corrente e di chiarire il comportamento della scintilla, servendosi di un approccio sperimentale anziché ipotetico-deduttivo. Studiò nel 1874 l'andamento delle correnti indotte in

una spirale, durante il tempo in cui il nucleo interno di ferro dolce va rapidamente perdendo il magnetismo, dimostrando che la velocità di magnetizzazione è minimamente influenzata dalla corrente indotta nel ferro (Battelli 1902; Occhialini 1914, pp. 59-73).

Le capacità intuitive che lo studioso rivelò nelle indagini di elettrodinamica lo rendono uno degli esponenti più autorevoli della scuola fisica pisana, alla crescita della quale contribuì non solo con l'apertura alle suggestioni della scienza tedesca, ma anche con la proposta di un metodo rigoroso che coniugava sperimentalismo e sintesi matematica (Puciantoni 1939, pp. 328-334; Maiocchi 1980, pp. 874-876; Dragoni 1989, pp. 322-323).

Le sue ricerche sul comportamento dei coibenti sottoposti all'azione di una carica inducente ripresero gli studi sui dielettrici che a Pisa aveva già condotto Mossotti, ma vi apportarono risultati originali, frutto di un metodo, che a partire dalle esperienze deduceva matematicamente relazioni generali. Queste indagini non raggiunsero la stessa acutezza di vedute di quelle sull'elettrodinamica, perché nel trattare quei temi Felici restò legato alla teoria dell'azione elettrica a distanza e, quindi, non seppe apprezzare a pieno alcune proposte più recenti. Egli riconobbe, da un lato, che le leggi sull'azione delle cariche statiche stabilite dalla fisica matematica vacillavano di fronte alle ipotesi di Faraday, ma, dall'altra, dichiarò che queste ultime mancavano dell'apporto del calcolo e di esperienze ben condotte per essere più convincenti delle altre.

Uno dei concetti che non si accordava con le leggi dell'elettrostatica classica era quello della trasmissione dell'influenza per linee curve: questo presupposto, a parere di Felici, non era stato dimostrato efficacemente da Faraday. Come scrisse Antonio Roiti nella commemorazione di Felici all'Accademia dei Lincei, il fisico inglese, privo "del fine magistero del calcolo, arrivò a surrogarlo con vivide pitture", ipotizzando che l'elettricità non si trasmettesse a distanza, ma, "punto a punto", attraverso il mezzo. Prima che Maxwell riscrisse quei concetti in equazioni, Felici li aveva analizzati, ma "sempre in sospetto d'ogni creazione soggettiva" aveva preferito accantonarli e sostenere, invece, le acquisizioni della fisica classica "incontestabilmente stabilita" (Roiti 1902, p. 290).

In una memoria pubblicata nel 1856, Felici si soffermò sul problema degli schermi conduttori posti nello spazio compreso tra un corpo elettrizzato ed uno neutro. Nella spiegazione di Faraday l'influsso, non potendo attraversare i conduttori non isolati, si canalizzava intorno allo schermo, curvandosi agli angoli, oltrepassandoli e raggiungendo con una certa intensità l'oggetto nascosto. Invece Felici, allo scopo di ribadire i meccanismi dell'azione inducente che si esplica secondo direzioni rettilinee anche su oggetti del tutto o in parte schermati, aveva definito una funzione che rappresentava l'intensità della forza elettrica nello spazio compreso tra due corpi, la quale poteva azzerarsi in un punto, determinando un "campo di minima azione", cioè un'area dove la forza si riduceva al minimo, mentre sullo stesso asse aveva un'efficacia che cresceva o decresceva in maniera progressiva.

L'esistenza di uno spazio in cui l'azione elettrica era nulla determinava, secondo Felici, la condizione che da Melloni era stata descritta con l'ipotesi della dissimulazione:

È noto che un'esperienza, nella quale i conduttori sono disposti in un modo simile al qui sopra descritto, si deve a Melloni. Se questo fisico ne diede una spiegazione affatto

differente dalla nostra, fu perché egli ragionò secondo i principi di Faraday (Felici 1856, p. 274).

Secondo il suo giudizio, l'idea di uno stato di latenza dell'elettricità eteronima, così come era ribadito dai sostenitori della proposta di Melloni, non poteva essere accettata, poiché una carica priva temporaneamente delle sue proprietà inficiava la rigorosità del calcolo. A seconda della forma, delle dimensioni e delle distanze tra i corpi, la dislocazione nello spazio di quel campo di minima azione risultava differente. Di conseguenza, variava anche la natura della carica rilevata sull'indotto. Non era difficile che la parte del corpo riparata dall'azione diretta d'influenza potesse assumere lo stesso stato elettrico di quella che si trovava diametralmente opposta: in questo modo potevano essere spiegati i risultati ottenuti da Melloni. Seguendo, invece, il punto di vista di quest'ultimo, occorreva accettare la possibilità che l'influenza fosse intercettata dagli schermi e che raggiungesse solo quei punti posti nella direzione delle linee di forza curve, originate dal corpo elettrizzato. Al limite, nel caso in cui gli schermi coprivano interamente il conduttore, l'azione d'influenza, anziché essere bloccata, secondo Felici, si esplicava ancora in base ai rapporti tra le distanze, l'intensità delle cariche e la forma degli oggetti. Solo la risultante delle forze, che in ogni situazione poteva essere ricavata dal calcolo, era responsabile del modo in cui la carica si distribuiva sui corpi. Gli schermi non intercettavano l'influenza, ma condizionavano la dislocazione delle forze nello spazio compreso tra i corpi.

4. Le successive ricerche di Felici sui *coibenti*

Felici effettuò per diversi anni accurate indagini con lo scopo di stabilire quali variazioni producesse l'interposizione di materiali isolanti nella trasmissione dell'influenza (Felici 1863-4; 1864-65; 1865-66). Per questo ideò un apparato sperimentale costituito da una scatola di vetro contenente due palline allineate e appese a dei fili di seta: una riceveva la carica dall'esterno ed era collegata ad un indice elettrometrico, l'altra veniva elettrizzata per induzione e faceva deviare la foglia d'oro di un elettroscopio a pile a secco. Tra le due palline c'erano tre lamine metalliche non isolate normali all'asse di congiunzione delle palline, di cui quella centrale era sollevabile, consentendo all'azione induttiva di passare la barriera. Le lamine avevano la funzione di schermo per l'indotto e l'elettroscopio. Tra le lamine e l'indotto, Felici collocava la lastra isolante da esaminare. L'indagine aveva lo scopo di acquisire misure precise della variazione della carica indotta in relazione allo strato coibente interposto. Dietro questo tipo di investigazioni vi era l'idea che si potessero reinterpretare i risultati di Faraday sul potere induttivo specifico dei dielettrici con i teoremi della fisica *poissoniana*. Felici confermava i risultati del tedesco Riess, secondo il quale la differenza tra l'azione di un elemento conduttore o di un isolante, nello spazio in cui si trasmette l'influsso elettrico, non dipendeva dalla natura del materiale, ma dalla forma, dimensioni e disposizione degli schermi (Riess 1855; 1856). I risultati sperimentali erano coerenti con quanto stabilivano i teoremi classici. Come secondo obiettivo, le esperienze di Felici fornivano dati utili a confutare l'ipotesi che fosse lo strato di umidità superficiale a far reagire elettricamente i materiali coibenti: al contrario, si dimostrava che l'azione era

esercitata per tutto lo spessore. Le differenze di comportamento tra un materiale e l'altro non esistevano. L'unica concessione fatta a Faraday era quella di considerare l'azione di un coibente "azione di massa, perché su tale azione non sembra influisca lo stato fisico o chimico della superficie" (Felici 1865-66, p. 395).

Esperienze in cui si utilizzavano lastre metalliche, barriere in tela cerata o altri materiali isolanti, tramezzi mantenuti fissi o fatti ruotare appositamente davanti ai corpi elettrizzati, furono ripetute in varie disposizioni dal pisano; i dati ottenuti consentivano di determinare chiaramente il comportamento dei dielettrici sotto l'azione induttiva.

Un'ulteriore analisi delle idee esposte da Faraday sul ruolo dei dielettrici nelle esperienze sull'influenza elettrica si ritrova in una memoria di Felici di qualche anno dopo (1871). Messo da parte il problema di come avviene la trasmissione dell'influenza, si trattava di chiarire più in generale quali modificazioni subissero i coibenti soggetti all'azione di un corpo elettrizzato e se il loro comportamento fosse in qualche modo collegato alle caratteristiche proprie dei materiali. In altri termini, Felici s'interrogava su due concetti esposti da Faraday: 1) sulla polarizzazione molecolare dei dielettrici e 2) sul potere induttivo specifico. Come in precedenza, Felici era propenso a credere che le esperienze descritte dal fisico inglese fossero solo un modo per illustrare ipotesi già concepite e, quindi, che non avessero un rigore sufficiente per dimostrare fatti in opposizione alla legge di Coulomb e ai teoremi di Poisson. C'era evidentemente una carenza di metodo, perché non erano state valutate tutte le condizioni e considerate le interpretazioni alternative. Per generalizzare dei risultati occorreva "sperimentare con un metodo, con delle masse, con degli apparecchi capaci di misure" (Felici 1871, p. 13).

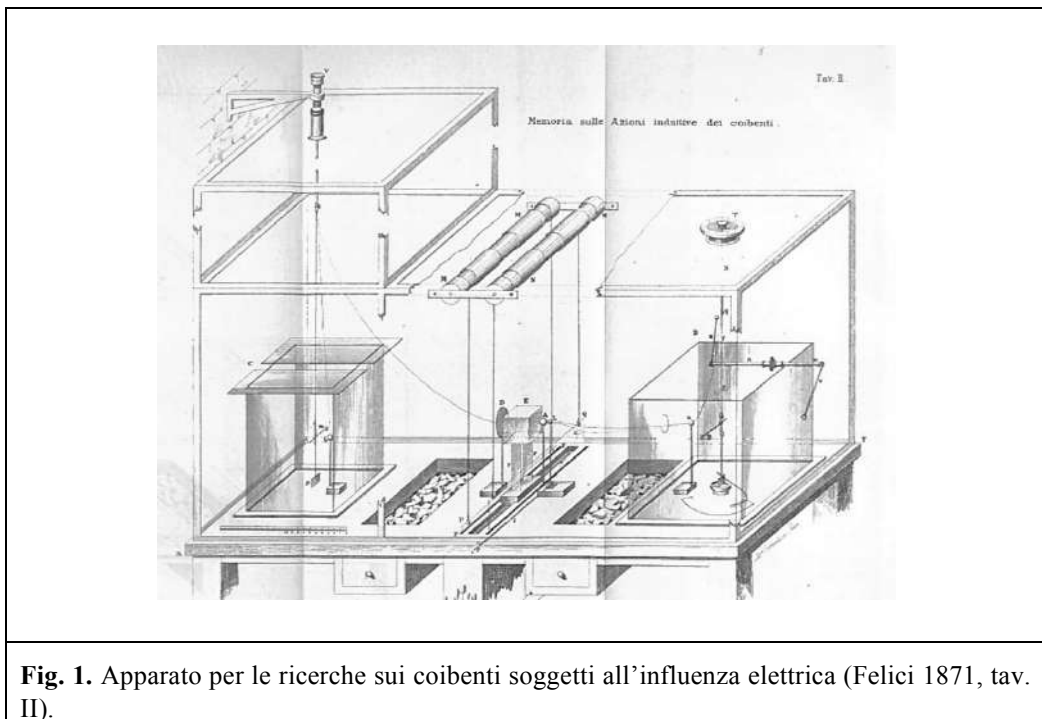


Fig. 1. Apparato per le ricerche sui coibenti soggetti all'influenza elettrica (Felici 1871, tav. II).

L'apparato ideato da Felici era una variazione di quello precedente, ma molto più delicato. Era costituito da tre parti: una pallina di legno dorato, che fungeva da induttore, la cui carica era misurata da una bilancia di torsione; un disco di metallo che riceveva l'azione inducente, la cui carica era misurata da un'altra bilancia di torsione più sensibile, e da un cubo coibente interposto (vuoto o massiccio, a seconda dei casi, e interscambiabile), per cui si dimostrava che la variazione della carica dell'indotto era effetto, non solo di quella inducente, ma anche dalla forma, posizione e natura della sostanza coibente. Inoltre, vi erano due grandi lamine metalliche non isolate, che all'occorrenza potevano essere sollevate tra coibente e indotto oppure tra inducente e coibente. Queste strutture servivano a schermare l'azione inducente, perché la prima si elettrizzava con carica eteronima sulla faccia prospiciente la pallina, ma nel centro della faccia opposta e dietro quell'area non si manifestava elettricità, mentre l'altra separava il disco, una volta ottenuto l'effetto inducente. Il loro comportamento era dedotto dalle leggi dell'elettrostatica classica.

Le esperienze di Felici si concentrarono sulla modificazione dello stato elettrico del coibente, considerata in relazione all'entità della carica del disco indotto. In tutte le osservazioni Felici verificò che i coibenti interposti, rispetto alla semplice presenza dello strato d'aria, aumentavano la carica dell'indotto. Per quanto riguardava il comportamento del coibente, riscontrava che l'azione elettrica interessava tutti i punti della sua massa e non solo la superficie; era indipendente dallo stato fisico o chimico di essa (questi due risultati erano già emersi nelle indagini del 1866); era un'azione che si sviluppava rapidamente e cessava con l'azione inducente (quindi, la scomposizione dell'elettricità avveniva a livello molecolare ed ognuno di questi elementi era talmente conduttore, che, esaurita l'azione inducente, ritornava allo stato naturale istantaneamente, come succede con il magnetismo); dipendeva dalla natura del coibente che si polarizzava (ma non nel senso indicato da Faraday, bensì in un modo simile al magnetismo) ed era proporzionale all'azione inducente (Felici 1871, p. 13). I dati sperimentali ottenuti da Felici sul potere induttivo specifico dei singoli coibenti non si accordavano con quelli di Faraday (ad es. per quest'ultimo il potere del vetro era più basso di quello dello zolfo; per il fisico italiano era vero il contrario). Felici concludeva che si poteva interpretare la polarizzazione dei coibenti, che determinava la loro capacità induttiva, con le formule del magnetismo, come già proposto dal Mossotti nel 1846, servendosi dei teoremi di Poisson per la distribuzione dell'elettricità sui conduttori e per il magnetismo. Quest'ipotesi non era ben chiara e l'autore si proponeva di ritornare sull'argomento. In effetti, due anni dopo descrisse nuove esperienze eseguite con un apparato modificato, che consentivano di precisare la velocità di depolarizzazione dei dielettrici, stabilendo una più stretta relazione tra questi fatti e quelli prodotti dal magnetismo (Felici 1873). In quest'ultimo apparato erano sparite le lastre schermanti e per interrompere l'azione inducente sul coibente o sul disco neutro erano state utilizzate delle leve azionate dalla caduta di un peso. Si riusciva in questo modo a misurare l'azione induttiva per intervalli piccoli fino ad un millesimo di secondo.

Nel 1876 Felici riprese le argomentazioni trattate vent'anni prima a proposito del campo di minima azione, che si creava dietro gli schermi non isolati, ridefinendo l'azione elettrica prodotta dalla carica induttiva (Felici 1876). Felici intendeva riattualizzare il contenuto della memoria precedente e, coerentemente con il percorso di ricerca sviluppato fino ad allora, ribadiva la sua adesione ai teoremi della distribuzione della carica di Poisson.

Le indagini di Felici, in sintesi, si confrontarono con alcune indicazioni più recenti, come quelle di Faraday e Matteucci, ma restarono ancorate ai fondamenti dell'elettrostatica classica.

Bibliografia

- Agastra E., Selleri S. (2012). "C. Maxwell's Forerunners: Riccardo Felici". *IEEE Antennas & propagation magazine*, 54 (3), pp. 250-257.
- Battelli A. (1902). "Riccardo Felici. Commemorazione letta nella VI riunione della Società Italiana di Fisica". *Il Nuovo Cimento*, 4, pp. 233-246.
- Dragoni G. (1989). *Per una storia della fisica italiana tra la seconda metà dell'Ottocento e la Prima guerra mondiale*, in Maccagni C., Freguglia P. (a cura di), *La cultura filosofica e scientifica*, II, *La storia delle scienze*. Busto Arsizio: Bramante, pp. 306-353.
- Felici R. (1856). "Osservazioni sopra l'interpretazione di alcune esperienze moderne di elettro-statica", *Il Nuovo Cimento*, 4, pp. 266-275.
- Felici R. (1863-4; 1864-65; 1865-66). "Cenni di alcune esperienze di elettricità". *Il Nuovo Cimento*, 19, pp. 345-352; 20, pp. 73-79; 21-22, pp. 380-395.
- Felici R. (1871). "Sulle azioni elettriche dei corpi non conduttori soggetti alla influenza di un corpo elettrizzato". *Il Nuovo Cimento*, 6, pp. 5-33; 73-93.
- Felici R. (1873). "Esperienze sul tempo impiegato da un coibente per ritornare allo stato naturale, cessata che sia l'azione inducente". *Il Nuovo Cimento*, 10, pp. 84-97.
- Felici R. (1876). "Alcune avvertenze sopra una nota pubblicata nell'anno 1856 nel Nuovo Cimento, relativamente all'induzione elettrostatica". *Il Nuovo Cimento*, 15, pp. 255-256.
- Fleck L. (1980). *Genesi e sviluppo di un fatto scientifico. Per una teoria dello stile e del collettivo di pensiero*. Bologna: Il Mulino.
- Iurato G., Rossi P. (2018). *La scuola pisana di Fisica (1840-1950)*. Pisa: University Press.
- Luperini C., Rossi P. (2010). "La fisica pisana dal 1861 al 1982". *Annali di Storia delle Università Italiane*, 14, pp. 163-175.
- Maiocchi R. (1980). *Il ruolo delle scienze nello sviluppo industriale italiano*, in *Storia d'Italia, Annali 3. Scienza e tecnica*. Torino: Einaudi, pp. 874-76.
- Melloni M. (1994). *Carteggio (1819-1854)*, Schettino E. (a cura di). Firenze: Olschki.
- Occhialini A. (1914). *Notizie dell'istituto di fisica sperimentale dello Studio pisano*. Pisa: Mariotti.
- Puccianti L. (1939). *Il contributo della scuola di Pisa alla fisica italiana*, in *Relazioni della Società italiana per il progresso delle scienze*, vol. 1. Roma: SIPS, pp. 321-338.
- Riess P.T. (1855). "On the action of non-conducting bodies in electric induction". *Philosophical Magazine*, 9, pp. 401-413.
- Riess P.T. (1856). "Letter to Faraday on the action of non-conducting bodies in electric induction". *Philosophical Magazine*, 11, pp. 10-17.
- Roiti A. (1902). "Commemorazione del socio prof. Riccardo Felici". *Rendiconti della Reale Accademia dei Lincei*, 11 (2), pp. 285-295.

Volpicelli P. (1883). *Trattato completo sulla elettrostatica induzione od elettrica influenza, Terza edizione corretta e grandemente accresciuta*. Roma: Tip. fratelli Centenari.

Mariano Pierucci

Claudio Luperini - Dipartimento di Fisica – Università di Pisa

claudio.luperini@unipi.it

Abstract: Mariano Pierucci from Pistoia, an excellent builder of scientific instruments, worked as a mechanic for the Physics Laboratory of the University of Pisa at the time when Carlo Matteucci and Riccardo Felici were directors.

Many of his instruments are still preserved today in Pisa, Prato, Pistoia, Florence, Bologna and Rome. His activity as a builder is also witnessed by various publications and by his participations in national and international exhibitions of his time.

Keywords: Pierucci, Mechanics, Instruments, Physics labs.

1. Il lavoro all'Università e le partecipazioni alle esposizioni nazionali e internazionali

Riguardo alla vita di Mariano Pierucci¹ sono riuscito a trovare solamente la data e i luoghi di nascita e di morte, leggendo gli articoli di Roberto Vergara Caffarelli (1990, 2000, 2015), l'unico di mia conoscenza che abbia scritto su questo “meccanico” che lavorò presso l'Università di Pisa nella seconda metà dell'Ottocento. Definire Mariano Pierucci “meccanico” però, forse, è riduttivo. Come tutti i tecnici che lavoravano per le Università nell'Ottocento e che per esse costruivano strumenti, il Pierucci sapeva di meccanica, di elettromagnetismo, di termodinamica, di idrostatica, di pneumatica, di acustica e di ottica ma, oltre a ciò, Pierucci si occupava anche di apparecchiature telegrafiche, di installazione di parafulmini, di impianti di illuminazione e di strumenti per uso medico, oltre alla lavorazione di porcellane e legni intarsiati. In una lettera presente nell'Archivio di Pisa, egli parla di una famiglia numerosa: forse nella sua ditta aveva molti dipendenti? Forse era aiutato dai figli? Sappiamo solo, sempre grazie agli scritti di Vergara Caffarelli, che un altro meccanico che lavorava per l'Università di Pisa, Luigi Pierucci, era uno di questi suoi figli.

In questo mio intervento prenderò in considerazione i testi delle mostre a cui Pierucci partecipò (Brenni, Misiti 1986), le notizie che lo riguardano provenienti dai documenti del periodo presenti nell'Archivio di Pisa e nell'Archivio Pacinotti e gli strumenti che ancora esistono all'interno di alcuni Enti italiani.

Nella pubblicazione sull'esposizione, edita in Toscana nel settembre 1844, nella sezione “Mobili ed oggetti di lusso” si legge:

Si è inoltre meritato la Medaglia di bronzo il sig. Mariano Pierucci di Pistoia per due graziosi quadretti di legno intarsiati a mosaico, ad imitazione dei comuni mosaici in

¹ A Pisa esiste una «casa Pierucci» situata tra piazza San Frediano e via Curtatone e Montanara. Qui, fino a poco tempo fa, abitavano i discendenti di Pierucci.

pietra o in smalto, che sogliono con tanta lode eseguirsi a Roma, e che si maestrevolmente si facevano nei primi tempi dell'era cristiana, come ne fanno fede gli avanzi di Ercolano e di Pompeja (*Rapporto* 1844, p. 57).

e a p. 80 è scritto «Pierucci Mariano di Pistoja». È in questo anno, il 1844, che Mariano Pierucci inizia a lavorare come macchinista nel Gabinetto di Fisica dell'Università di Pisa diretto da Carlo Matteucci, come si legge in una lettera della Soprintendenza agli Studi del Granducato di Toscana all'Università di Pisa, datata 8 ottobre 1845:

[...] Che per quanto riguarda il Macchinista per servizio del Gabinetto di Fisica Sperimentale, per quello di Fisica tecnologica, e del contiguo Laboratorio Chimico, si seguiti anche nel futuro anno accademico a fare esperimenti del servizio che presta nell'accennata qualità Mariano Pierucci, con che debba essere remunerato per mezzo di gratificazione come per l'anno già decorso [...] (ASP, Uni II, Sez G, n 58, f 2).

Il nome di Pierucci si ritrova ancora in una lettera della Soprintendenza agli Studi del Granducato, datata 24 ottobre 1846:

[...] Che venga permesso al Prof. Cav. Carlo Matteucci di nominarsi un Aiuto di sua fiducia nella persona del D:^r Riccardo Felici [...] e che sia altresì permesso al Professore medesimo di valersi come Macchinista di Mariano Pierucci [...]. Inoltre S.A.I. e Re^{le} si è degnata concedere le seguenti gratificazioni [...]. Di zecchini trenta a Mariano Pierucci Macchinista provvisorio del Gabinetto di Fisica [...]. (ASP, Uni II, Sez G, n 59, f 89).

Nel 1850 Pierucci partecipò ad un'altra esposizione della Toscana e nella pubblicazione relativa (*Rapporto* 1851) si possono trovare suoi riferimenti nelle pp. 284, 287, 312 e CXCIII. Come si può leggere anche in questa pubblicazione, nei primi tempi (e non sappiamo con precisione fino a quando) la fabbrica di Pierucci a Pisa fu una fabbrica di “Macchine Telegrafiche” (almeno nel nome, perché ovviamente vi si realizzavano anche altri strumenti scientifici) mentre in seguito si chiamerà “Fabbrica di strumenti fisici chimici e matematici”.

In una lettera del ministro dell'Istruzione Pubblica al Provveditore del Pubblico Studio di Pisa del 22 marzo 1854 si legge:

Il Cav. Direttore del R^o Istituto Tecnico di questa capitale commise al Macchinista Mariano Pierucci la costruzione della Macchina di Atwood da servire ai bisogni di quello stabilimento. Avendo il Pierucci condotto a termine tal lavoro, il mentovato Direttore desidera che sia veduta ed esaminata, prima di farla trasportare a Firenze da persone competenti, onde esser certo che la Macchina agisca nel modo conveniente; che sia uguale per la dimensione e per la esecuzione a quella costruita a Parigi nella officina del signor Deluil (la quale si possiede da codesto gabinetto fisico); e che sia fornita del necessario apparecchio per effettuare il distacco del peso col mezzo di una calamita temporaria (ASP, Uni II, Sez G, n 67, f 45).

Questa macchina di Atwood si può ancora ammirare presso la Fondazione Scienza e tecnica di Firenze completamente restaurata e pure quella di Pisa, citata nella lettera, è presente

nella collezione del Museo degli Strumenti di Fisica² dell'Università di Pisa, anche se in cattive condizioni. Nel 1854 Pierucci partecipò di nuovo all'esposizione della Toscana e infatti nel Rapporto generale della mostra (*Rapporto* 1854) si parla di lui nelle pp. 107 e 108. Particolarmente interessante risulta una comunicazione (ASP, Uni II, Sez G, n 68, f 62) del ministero della Pubblica Istruzione al Provveditorato del Pubblico Studio di Pisa, datata 19 giugno 1855, in cui si autorizza Mariano Pierucci «ad assentarsi per circa un mese per andare a Venezia dove è stato richiesto per un impianto di illuminazione di cui vorrebbe dotarsi la città». Probabilmente si trattava di un impianto a gas³ ma, a prescindere, questo episodio è un'ulteriore conferma delle molteplici capacità operative di Mariano Pierucci. Nel 1855 Pierucci partecipò all'esposizione universale di Parigi con la sua “Bussola dei seni” e l'Istituto Tecnico Toscano presentò una macchina a vapore a disco di Bishop da lui costruita (*Esposizione* 1855). In una comunicazione del Ministero della Pubblica Istruzione al Provveditore del Pubblico Studio di Pisa, datata 16 gennaio 1856, si legge:

Ho l'onore di significare a V. Illma che S.A.I. e R. il Granduca, si è degnato autorizzare il cav. Professore Carlo Matteucci a permettere che il Macchinista Mariano Pierucci e sua famiglia abitino precariamente nel quartiere di cui allo stesso cav. Matteucci appartiene l'uso, come Direttore del Gabinetto di Fisica [...] (ASP, Uni II, Sez G, n 69, f 8).

È dell'8 marzo 1860 l'unica lettera (ASP, Uni II, Sez G, n 73, f 114) che rimane di Pierucci in cui egli chiede al provveditore un aumento di stipendio per poter dedicare più tempo alla costruzione delle macchine per l'Università. Questa lettera, con parere favorevole di Riccardo Felici e dello stesso Provveditore, fu inoltrata al Ministro della Pubblica Istruzione. Il Ministero rispose che per quell'anno il bilancio era già chiuso e quindi la richiesta non poteva essere accolta per quell'anno ma poteva essere ripresentata l'anno successivo.

Pierucci partecipò anche all'Esposizione italiana tenuta a Firenze nel 1861 e nel secondo volume delle relazioni dei giurati (*Esposizione* 1864) si legge di lui a p. 390 e a p. 409.

Nel 1865 Pierucci pubblicò il *Catalogo degli strumenti di Fisica* (Pierucci 1865) in cui 279 voci, ciascuna delle quali indicava uno strumento, erano suddivise in Meccanica, Pneumatica, Idrostatica, Acustica, Calorico, Elettricità, Elettro-dinamica, Magnetismo, Elettro-magnetismo ad induzione, Telegrafi elettrici, Orologi elettrici, Meteorologia, Termometri, Igrometri, Pluviometri. Da segnalare a p. 16: «Il nostro Laboratorio s'incarica della costruzione di parafulmini sopra gli edifici».

Nel 1870 Pierucci pubblicò un supplemento (Pierucci 1870) a questo catalogo in cui tra le altre cose presentava un nuovo modello di una macchina elettro-magnetica per uso medico che

² Il Museo degli Strumenti di Fisica è stato istituito dall'Università di Pisa alla fine del 2017, prima le sue collezioni di strumenti di fisica, i suoi archivi (Fermi-Persico e Felici) e il Fondo Pacinotti (prototipi di Antonio, biblioteca e archivio Pacinotti) erano gestiti sempre dall'Università di Pisa ma attraverso il Centro per la Conservazione e lo Studio degli Strumenti Scientifici (istituito nel 1989), il Museo degli Strumenti per il Calcolo (istituito nel 1993) e la Fondazione Galileo Galilei (fondazione del 1934, riattivata intorno al 1999).

³ In quel periodo a Venezia l'illuminazione era fatta principalmente con lampade ad olio e iniziavano ad essere utilizzate anche le lampade a gas (introdotte a Venezia nel 1843). Di illuminazione elettrica a Venezia se ne comincerà a parlare nel 1886.

ancora è presente nella collezione del Museo degli Strumenti di Fisica. Come scrive Vergara Caffarelli (2015), nel 1887 venne pubblicata anche la brochure «Apparecchi elettrici a corrente continua per uso medico che si costruiscono nel laboratorio dell'Ing. Mariano Pierucci».

Nell'elenco dei premiati con medaglia all'Esposizione delle province di Pisa e Livorno (*Elenco* 1868) del 1868 risulta «Pierucci Mariano. Pisa. Per l'officina di apparati di Fisica» ed è probabilmente in questo periodo che il nome della fabbrica del Pierucci sostituisce «macchine telegrafiche» con «strumenti di fisica».

Le ultime due esposizioni a cui partecipò Pierucci furono l'esposizione universale di Vienna del 1873 e l'esposizione generale italiana di Torino del 1884. Il suo nome si ritrova negli Atti ufficiali della prima (*Atti* 1873) a p. 145 e in una pubblicazione (*L'esposizione* 1884) sulla seconda, a p. 44. In quest'ultima Pierucci si cominciò a presentare come «Ingegner».

2. Gli strumenti

Nel Museo degli strumenti scientifici dell'Istituto «Crescenzi-Pacinotti» di Bologna a firma di Mariano Pierucci si trovano un Galvanometro astatico differenziale e un Galvanometro astatico ambedue di Nobili, un Cannocchiale per letture a riflessione e una Macchina da dividere di Perreaux. Alla Fondazione Scienza e Tecnica di Firenze gli strumenti di Pierucci sono in numero consistente: un Set di apparecchi telegrafici, un Apparecchio per le correnti di Foucault, un Elettrometro a quadranti di Branly, un Interruttore di Foucault, una Bussola dei seni e delle tangenti, un Tubo sonoro con tre capsule manometriche, un Tubo sonoro con cinque otturatori, un Tubo sonoro con paratia scorrevole, alcuni Tubi sonori, alcuni Tubi sonori con due fori, un Apparecchio per le fiamme cantanti, un Piano inclinato, un Elettrometro di Branly e la Macchina di Atwood di cui già abbiamo parlato.

Anche l'Istituto Cicognini-Rodari di Prato possiede alcuni strumenti realizzati da Pierucci: una Sirena di Cagniard de la Tour con contagiri, un Contagiri per sirena, una Camera di distribuzione per soffiare aria in più tubi sonori e una Serie di tubi sonori di varia forma. Infine, troviamo anche un Apparato telegrafico tipo «Breguet» a quadrante presso il Museo Storico della Comunicazione di Roma, un Galvanometro e magnetometro di Weber all'Università di Siena e un Galvanometro astatico di Nobili presso l'Osservatorio Valerio di Pesaro.

E all'Università di Pisa cosa è rimasto?

Nell'inventario del Museo degli Strumenti di Fisica risulta un Apparato d'uso medico per le scosse elettriche, sistema Pierucci (quello presentato nel catalogo del 1865), un Modello di motore elettromagnetico sistema Froment (Riccardo Felici lo prestò ad Antonio Pacinotti per i suoi primi esperimenti con la «macchinetta»), un Tubo sonoro, il Commutatore di Matteucci e la Macchina per lo studio delle correnti indotte (ideata anche questa dal Matteucci).

Degli strumenti di Pierucci ne abbiamo testimonianza anche dai documenti d'archivio, infatti, se andiamo a leggere l'inventario del 1880 (*Inventario* 1880), troviamo molti strumenti a nome di Pierucci e anche a nome del «laboratorio del Gabinetto» che, probabilmente, costituiscono anch'essi produzioni di Pierucci; forse quando c'è scritto «laboratorio» significa che Pierucci li realizzava all'interno del suo orario di lavoro presso

l'Università e con materiali dell'Università, mentre quando c'è scritto "Pierucci" significa che l'Università li acquistava dalla sua fabbrica.

Così nell'inventario alla dicitura "laboratorio del Gabinetto" troviamo 23 apparecchiature tra cui la Macchina di Morin, l'apparecchio per l'esperienza del Foucault sul pendolo, un Galvanometro a specchio Magnus, un Galvanometro a specchio con castello massiccio di rame ad un sol pezzo,⁴ un apparecchio Peltier per le variazioni di temperatura nella saldatura di due metalli, un tubo di Quincke in metallo per l'interferenza dei suoni, risuonatori di Helmholtz in cristallo e un Elettrometro Thompson Brandly modificato.

A nome di "Pierucci", invece, ci sono 11 strumenti fra cui: una piccola macchina elettrica, un modello di punta per parafulmine, l'apparato a induzione ad uso medico, un Fonografo Edison e un Elettroscopio Bohnenberger.

In realtà, Pierucci all'interno dell'Università di Pisa non aveva a che fare solo con il Gabinetto di Fisica Sperimentale, e quindi con Carlo Matteucci prima e Riccardo Felici poi, ma anche con il Gabinetto di Fisica Tecnologica annesso alla Cattedra relativa istituita nel 1840 e affidata a Luigi Pacinotti e poi, dal 1882, al figlio Antonio. Così nell'Archivio Pacinotti (Luperini Paladini 2007) si trovano due lettere scritte da Antonio Pacinotti: la prima (AP, Sez. I, n. 180(2)), del 1864 indirizzata al prof. Tito Martini, parla di un cronografo elettromagnetico ideato da Antonio e realizzato dal Pierucci; nella seconda (AP, Sez. I, n. 197), del 1869, Antonio scrive a Mariano Pierucci in relazione ad una macchina elettromagnetica del Pierucci per cui Antonio ha pensato una modifica.

Nel libro mastro (*Entrata, e uscita*) del Gabinetto di Fisica Tecnologica di Luigi Pacinotti si legge:

anno 1844 - [...] Mariano Pierucci realizza un modello di sega ad acqua.

anno 1847 - [...] il Pierucci costruisce una macchina rappresentante una sega circolare.

anno 1848 - il Pierucci costruisce un modello di macchina per la realizzazione della carta.

Inoltre, vi si trova anche l'elenco dei nomi degli artigiani che collaborarono con Luigi Pacinotti nella gestione dei Gabinetti di Fisica e di Fisica Tecnologica per un periodo superiore ad un anno, esclusi i custodi e gli aiuto-custodi dei Gabinetti; in questo elenco si legge: «Pierucci Mariano, macchinista, dal 1844 al 1878».

Infine, nell'inventario del Gabinetto di Fisica Tecnologica del 1855 (AP, Sez. V, n. 5) c'è l'elenco degli strumenti realizzati dal personale dei Gabinetti di Fisica Tecnologica e Fisica e all'interno di questo inventario: «458 Un modello di sega circolare eseguito in legno dal Pierucci, 487 Pressa idraulica eseguita in ottone da Mariano Pierucci, 549 Una macchina telegrafica a quadrante costruita da Mariano Pierucci».

Bibliografia

Brenni P., Misiti M. (1986). "Costruttori italiani di strumenti scientifici del XIX secolo", *Nuncius*, 1 (141), pp. 141-184.

⁴ Nelle colonna "Osservazioni" è scritto: «È un Galvanometro a sistema astatico, montatura in ottone, con vite di richiamo, campana etc. Prestato alla Scuola Tecnica di Pisa».

- Luperini C., Paladini T. (2007), *Ho costruito il seguente apparecchietto - Antonio Pacinotti - manoscritti e strumenti*, Pisa: ETS.
- Pierucci M. (1865). *Catalogo degli strumenti di Fisica che si costruiscono nel laboratorio di Mariano Pierucci meccanico del R. Stabilimento di Fisica - via S. Maria n. 887 a Pisa*, Pisa: tipografia Vannucchi.
- Pierucci M. (1870). *Supplemento al catalogo dell'anno 1865 e prezzi dei Cristallami, Porcellane, Terre refrattarie, Strumenti e utensili per l'uso dei Laboratori di Chimica e Fisica che si trovano nel magazzino della fabbrica di Mariano Pierucci*, Pisa: Tipografia Vannucchi.
- Vergara Caffarelli R. (1990). *Alcune notizie sugli strumenti del Gabinetto di Fisica Sperimentale a Pisa dalla istituzione alla cattedra al 1900*, in Segnini C.A., Vergara Caffarelli R., *Antichi strumenti scientifici a Pisa (sec. XVII-XX)*, Pisa: Giardini editori e stampatori in Pisa.
- Vergara Caffarelli R. (2000). *Le scienze: fisica, chimica, matematica*, in Commissione rettorale per la storia dell'Università di Pisa (a cura di), *Storia dell'Università di Pisa n.2 (terzo tomo) 1737-1861*, Pisa: PLUS, pp. 759-822.
- Vergara Caffarelli R. (2015). *Pierucci Mariano*, in Dizionario Biografico degli Italiani, vol. 83, Roma: ed. Treccani.

Fonti archivistiche

- ASP (Archivio di Stato di Pisa), Uni (Università) II (versamento) Sez (Sezione) n (numero) f (foglio).
- AP (Archivio Pacinotti), Sez. (Sezione) I, n. (numero) 180(2).

Casi particolari

- Rapporto della pubblica esposizione dei prodotti di arti e manifatture toscane eseguita in Firenze nel Settembre 1844* (1844), Firenze: Ed. Stamperia Piatti.
- Rapporto generale della Pubblica Esposizione dei prodotti naturali e industriali della Toscana fatta in Firenze nel Novembre MDCCCL nell'I. e R. Palazzo della Crocetta* (1851), Firenze: Ed. Tipografia della casa di correzione.
- Rapporto generale della pubblica esposizione dei prodotti naturali e industriali della Toscana fatta in Firenze nell'I. e R. Istituto Tecnico Toscana nel MDCCCLIV* (1854), Firenze: Tipografia Barbera, Bianchi e Comp.
- Exposition des produits de l'industrie de toutes les nations 1855 - Catalogue officiel* (1855), Paris: E. Panis editeur.
- Esposizione italiana tenuta in Firenze nel 1861 - Volume secondo - Relazioni dei giurati - classi I e XII* (1864), Firenze: Tipografia di G. Barbera.
- Elenco dei premiati alla esposizione industriale e agraria delle province di Pisa e Livorno nell'anno 1868* (1868), Pisa: Tipografia Nistri.
- Atti ufficiali della Esposizione Universale di Vienna del 1873 - Catalogo generale degli espositori italiani* (1873), Roma: Tipografia Barbera. *Curiosità*: nell'indice di questo

volume il Pierucci non compare perché, per un errore di stampa, è stato scritto Pietrucci Mariano.

L'Esposizione Generale Italiana in Torino del 1884, Catalogo ufficiale della Meccanica Agraria elettricità e meccanica di precisione (1884), Torino: Unione tipografico-editrice.

Inventario delle proprietà mobili dello Stato esistenti al 31 Dicembre 1880 nel Gabinetto di Fisica sperimentale della R. Università di Pisa compilato a termini dell'articolo 23 e seguenti del Regolamento Generale per l'amministrazione del Patrimonio dello Stato e per la contabilità generale, annesso al Regio Decreto 4 maggio 1885, N. 3074 (serie 3^a), inventario presente nell'Archivio Pacinotti.

Entrata, e uscita del Gabinetto Fisico dell'Università dal primo Novembre 1817 al 31 dicembre 1840. Del Gabinetto di Fisica Tecnologica dal primo Gennaio 1841; AP, Sez. V, n. 6.

RELEVANT FIGURES AND INSTITUTIONS IN ITALIAN HISTORY OF PHYSICS
AND ASTRONOMY BETWEEN ITALY'S UNIFICATION AND WORLD WAR II

Cornelia Fabri Mathematician

Miriam Focaccia – Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche ‘Enrico Fermi’, Roma – miriam.focaccia@cref.it

Abstract: Cornelia Fabri (1869-1915) was the first woman to graduate in Mathematics at Pisa University, on 30 June 1891. She was driven into her studies by two teachers: her father Ruggero and the brilliant scientist Vito Volterra. Her talent initially emerged in the field of mathematical analysis; then, at the suggestion of Volterra, she began to address questions of hydraulics, leading to the publication of what are considered her most important works. A fundamental proof of her scientific talents is the correspondence with Volterra, written between 1891 and 1914. After the death of her father, she interrupted her studies and career and the last period of her life was characterised by an extreme spirituality and saw her entirely absorbed in charitable works and prayers.

Keywords: Women, Mathematics, Volterra.

1. Women and Science

I retain a very clear memory of Signorina Cornelia Fabri, my pupil at the University of Pisa around 1880, the first, and perhaps the best among the many women students that I would subsequently teach in Turin and Rome (Mesini 1925, p. 9).

These were the words with which Vito Volterra, ‘Mr Italian Science’, opened his recollection of Cornelia Fabri, the mathematician from Ravenna.¹

She was born on September 9, 1869, in one of the city’s most cultured and established families and she inherited from her father and grandfather the passion for science. Cornelia’s education was far from traditional: instead of enrolling her in the “scuola normale”, the school that trained young women as school mistresses, her father was aware of her aptitude for the studies of scientific disciplines and opted for a path generally reserved for boys. He enrolled her at the city’s Technical Institute. Here, the young girl was the only one in a school attended exclusively by male.

She went on to attend the Faculty of Physical, Mathematical and Natural Sciences at the University of Pisa, where she graduated on June 30, 1891. She was the first woman to graduate in Mathematics at Pisa University, after sitting twelve special examinations, two of which she passed with the maximum score (30/30), obtaining full marks and distinctions in all the others.

¹ This paper is based on Focaccia (2007).

At this point, it is necessary to remember that it was only in 1874 that new rules had been approved in Italy, for which women could enroll in the Universities only if in possession of valid documentation. In 1902, the list of the first 224 women graduates in the Kingdom of Italy was published in the Official Bulletin of the Italian Ministry of Public Education. Among these, 72 achieved a degree in Science or Medicine.

The history of Italian women scientists after Unity is often a story of difficulty and efforts, of exceptional skills carried out by these “beautiful minds” who were real protagonists of Italian science. A fundamental element was certainly to find a favorable attitude in their family: a father, a husband or a brother who supported them. These scientists were able to reach such goals also thanks to the support, starting from the 1870s, of many heated debates - not only Italian - focused on women's rights. These debates were fundamental in underlining the need for autonomy and independence of women, now reaching out to gain a higher level of education and, therefore, an equally satisfying and qualified activity or job. In this respect, the discussions carried out by some of the first “feminine” period magazines - such as *La Donna*, directed by Gualberta Alaide Beccari, a leading figure in the rising Italian emancipation movement - played a prominent role (Focaccia 2012).

These aims have been achieved also thanks to a favorable attitude by some societies, intellectual circles, universities and academies: the Italian Society for the Progress of Sciences (SIPS), the Mathematical Circle of Palermo, the Physical Circle of Rome and the Italian Physical Society (SIF), admitted women among their members since their foundation.

This feeling was not widely shared, indeed strongly opposed by others, such as Paolo Mantegazza or Gino Loria, who placed strong reservations about women's intellectual capacities, actual physical and physiological limits. Among those who had no reservations to welcome female students (and luckily there were), it is enough to mention the mathematicians Vito Volterra and Giuseppe Peano, the physicists Pietro Blaserna and Orso Mario Corbino, the naturalist Giovanni Battista Grassi, the Nobel Prize for Medicine Camillo Golgi, the anatomist Giuseppe Levi. Teachers who encouraged and supported their students, following their successes and sponsoring their careers (Linguerrì 2012).

In Italy, women's access to higher education coincided with the success of the so-called “science for all”, a phenomenon - economic, political and cultural - that was important in Italy as in other European countries. Moreover, in the three decades that followed the Unity of Italy, publishers and scientists involved, through a varied production of popular books and journals, non-expert audiences in a new educational process that also involved the women of the small and middle class.

The challenge of women in universities thus began in a climate of great expectation and confidence in sciences and was supported by all these stimuli (Govoni 2009).

2. The two teachers of Cornelia

In the case of Cornelia, the main architect of her success was, definitely, her father Ruggero. He was aware of his daughter's uncommon ability, supervising and guiding her and, in some way, shaping her during her course of study.

A scholar of physical-mathematical science, Ruggero's enduring passion was 'electrical science' and all its possible applications. As well as writing a number of articles on the subject, it appears he performed experimental tests in a laboratory that he had set up at home. One of those - which was also frequented by his daughter, Cornelia. Ruggero Fabri, who was a keen observer of his times, was totally immersed in the positivistic ethos of the late nineteenth century, sharing its ideals and hopes. It is sufficient to read his *Impressioni della Esposizione di Elettricità a Parigi* of 1882, to perceive the genuine enthusiasm with which he describes the new technical developments made possible by electrical science, clearly convinced of the crucial role it was to play in the civil life of a modern country. (Focaccia 2007)

His relationship with Volterra began precisely around 1889, the epoch in which the great mathematician was supervising the studies of Cornelia, subsequent to the young woman's enrolment at the University of Pisa.

The "Archivio Volterra" preserves some thirty letters from Ruggero Fabri: the main subject of the letters is Cornelia and her progress, particularly in writing her degree thesis. It is this correspondence that unveils the key role of Fabri, "the teacher", in the study curriculum of his daughter. An ever-present figure, he became a mediator for his "young girl", weaving around her a web of relationships and contacts with important scientific and academic figures, many of whom were his friends.²

Cornelia, therefore, was driven and spurred forward by another teacher in the course of her studies: Vito Volterra, the latter of whom, in a letter of July 4, 1890, did not hesitate to sing her praises. He wrote, in fact, to Ruggero: «I must tell you that she has inverted the roles, because it is not she who should be grateful to me, but all of the professors who should be grateful to your clever daughter, for studying with so much diligence and such great progress as to achieve these really splendid results. They cannot fail to bring credit to the school that has the pleasure to count her among its students». (A.V., I, 1.1, busta 19, 498)

Meaningful words indeed, coming from the illustrious Volterra who, in 1887, published a series of works on functions dependent on other functions and on lines, for which he is now considered one of the founders of functional analysis. He turned his attention to such issues in 1883.

In her works and researches, Cornelia, whose talent initially emerged in the field of mathematical analysis, was able to extend Volterra's results using highly complex formulas and demonstrations, whose resolution by the author throws light upon her complete command of analytical tools, such as series expansion, equations of partial derivatives, and multiple integration, as well as possessing a rare expertise in calculus. Volterra referred to these efforts, in terms of great affection:

² The correspondence between the Fabri and Volterra, preserved in the Archivio Volterra (hereafter A.V.) consists of some eighty letters written between February 3, 1891, and December 27, 1914, a few months before Cornelia's death. Three of the letters outdate her: one written by her brother-in-law, Ulrico Farini, announcing her death, and two from Giovanni Mesini, asking Volterra for a brief written recollection of her. The correspondence is of exceptional interest since it provides the only first-hand testimony of this woman, who destroyed all correspondence in her possession, throwing light upon a private, hitherto unknown Cornelia.

In 1887, I published my first works on functions dependent on other functions and linear functions. By 1890 they had attracted attention, but had not yet been followed up with original studies by other mathematicians. Cornelia Fabri was the first to show confidence in those ideas and their importance to scientific progress [...]. After 30 years, now that those ideas have penetrated the field of Mathematics, I look back with deep feeling and heart-felt gratitude to the one who first had faith in them, and shared with me the anxiety for their successful outcome. (Mesini 1925, p.10)

In a July 1890 letter from Ruggero Fabri to Volterra, we learn that some time previously Volterra had suggested to Cornelia the subject of her dissertation: the theory of vortical motion in incompressible fluids.

So, it was at the suggestion of her teacher that Fabri began to address questions of hydraulics, leading to the publication of what are considered her most important works. It is hardly surprising that Volterra should make this suggestion: he had graduated in physics in 1882, presenting a thesis on hydrodynamics. Cornelia devoted four articles to the theory of vortical motion, more precisely to the extension of what is commonly referred to as vortex theory.³

Volterra provides a direct account of Cornelia's graduation examination, recalling the event with enthusiasm:

I remember how her degree examination was a great event for the University of Pisa, not only because it marked the first time a woman had graduated there, but also because the candidate performed admirably, receiving the maximum score 'summa cum laude'. On that occasion, the eminent director of the Faculty of Science, Professor Antonio Pacinotti, spoke with suitably lofty words, drawing attention to the importance of the event, and announcing the advent of a new era marked by the entrance of brilliant female figures into the field of science. During her previous university career, Cornelia Fabri had always shone out among her fellow students, some of whom were destined to make their names in mathematics (Mesini 1925, p.9).

The collaboration between teacher and pupil was very close: the former devoted a great deal of attention to her, giving or lending her texts to study, fully aware of the young woman's capacities, while the latter rewarded his attention with a total devotion to study. A model student, she was rigorous in the extreme, almost obstinate in her determination to reach the set results:

³ Cornelia Fabri's publications: (1890), *Sopra alcune proprietà generali delle funzioni che dipendono da altre funzioni e da linee. Nota di Cornelia Fabri*. Torino: Claudio Clausen; (1892), *Brevi considerazioni intorno alle nuove discipline per la chiusa sul fiume Montone*. Ravenna: Calderini; (1892), *Sui moti vorticosi nei fluidi perfetti. Memoria di Cornelia Fabri*, Bologna: Gamberini e Parmeggiani; (1892), *Sulla teorica dei moti vorticosi nei fluidi incomprimibili*. Pisa: Mistri & C; (1893), *Cloche-signal électrique installée par l'abbé Ravaglia dans le port de Ravenne*. Paris: A. Durand et Pedauue-Lauriel; (1893), *Sopra le funzioni di iperspazio. Nota di Cornelia Fabri*. Venezia: Ferrari; (1894), *I moti vorticosi di ordine superiore al primo in relazione alle equazioni pel movimento dei fluidi viscosi*. Bologna: Gamberini; (1895), "I moti vorticosi di ordine superiore in relazione alle equazioni pel movimento dei fluidi viscosi compressibili". *Il Nuovo Cimento*, 1 (1), pp. 281-291.

I was truly fortunate to have you as my teacher, and, more than any other, it is to you that I owe a debt of gratitude for the constant help that you so kindly gave me during my studies (A.V., I, 1.1, busta 19, 497).

3. The last years

Why then, did Cornelia «return forever to Ravenna to resume family life»?

It is my belief that there was a hurdle that prevented Cornelia from pursuing the academic career so brilliantly begun.

The version of the authorised biographer, tends to split Cornelia's life into two distinct periods: the first was taken up by her studies and passion for the exact sciences, under the guidance of her two teachers; the second period, more emphasised by the biographer, was characterised by an extreme, almost maniacal spirituality, and saw her entirely absorbed in charitable works and prayer, and increasingly enraptured by intensely moving spiritual retreats.

This portrait is largely misleading, since it stresses personality traits that became predominant only from a certain time on, dating from her father's death in 1904, which led into a new phase of her life.

In 1902, her mother Lucrezia died, and from that time on, Cornelia assumed the role of 'angel' to her father and two sisters. Two years later also Ruggero died: it was up to Cornelia to support the household and administering to family affairs.

Thus, perhaps, the choice to abandon her university career on the part of this brilliant mathematician sprang from her awareness of having to attend to other matters linked to the needs of her family, of which she felt herself to be the central pivot. This decision, taken rationally and consciously, therefore depended on specific real circumstances. The study of mathematics had sharpened and strengthened her mind, while her participation in university and public life had in some way emancipated her, making her more autonomous and skilled in dealing with the family administrative and financial matters that were, despite herself, destined to become her chief concern up to her death.

The return to Ravenna, a provincial city, far removed from important scientific centres, and a cultural backwater, served to intensify Fabri's isolation. Few among her fellow townspeople knew of her intellectual pursuits, which she tended to maintain a secret.

The exchange of letters with Volterra on matters of study continued until 1902; they then met for the last time in 1905. In his written recollection of Cornelia, Volterra also mentions her poor health as one of the reasons she suspended her studies.

However, it was above all Volterra's departure from Pisa to Turin in 1893, followed by his move to Rome to take up the professorship in Mathematical Physics, that intensified Cornelia's sense of detachment from the circle of scholars who had supervised her work and had been able to appreciate and encourage her intellectual gifts and talent for mathematics.

Anyway, the Volterra correspondence highlights the originality of Fabri's scientific production and her importance from the scientific point of view, as well as emphasising the insight of the author, reliably vouched for by her teacher. Also in evidence is Cornelia's

spirit of initiative and self-confidence in bringing her studies and works to the attention of her teacher. It throws into relief her tenacity, and finally sweeping away the lowly image conveyed by traditional biography, of an isolated and aloof Cornelia: it is an image that, even if it were true, fails to do her justice!

Indeed, the mathematical soul that resided in Cornelia was never completely stifled: in December 1914, a few months before her death (she will die on May 24 of the following year), when speaking to her confessor of her wish to become a nun, she expressed herself by adopting a metaphor lifted from the language of mathematics:

My heart has always been suspended between two equal and opposing forces, which balance each other and keep me in perfect blindness as to what my future will be (Mesini, 1925, p. 39).

References

- Focaccia M. (2007). *Cornelia Fabri mathematician: two teachers*, in Babini V.P., Simili R. (eds), *More than Pupils. Italian Women in Science at the Turn of the XXth Century*. Firenze: Olschki, pp. 51-74.
- Focaccia M. (2012). *Introduzione*, in Focaccia M. (ed), *Dizionario biografico delle scienziate italiane (secoli XVIII-XX)*, Vol. I, *Architette, chimiche, fisiche, dottoresse*. Bologna: Pendragon, pp. 11-22.
- Govoni P. (2009). ««Donne in un mondo senza donne». Le studentesse delle facoltà scientifiche in Italia, 1877-2005». *Quaderni Storici*, 130 (1), pp. 213-248.
- Linguerrri S. (2012). *Introduzione*, in Linguerrri S. (ed), *Dizionario biografico delle scienziate italiane (secoli XVIII-XX)*, Vol. II, *Matematiche, astronome, naturaliste*. Bologna: Pendragon, pp. 11-24.
- Mesini G. (1925). *In memoria di Cornelia Fabri*. Ravenna: Arti Grafiche.

Archival sources

Roma, Biblioteca Corsiniana e dell'Accademia Nazionale dei Lincei, Archivio Volterra (A.V.), I, 1.1 - Corrispondenza con persone, busta 19, 497. Fabri Cornelia; e 498. Fabri Ruggero.

A case study in a top-down recruitment system: Pisa-Pavia 1860-1942

Fabio Bevilacqua – Department of Physics, Pavia University –
fabio.bevilacqua@unipv.it

Lidia Falomo Bernarduzzi – Department of Physics, Pavia University –
lidia.falomobernarduzzi@unipv.it

Abstract: We analyse the recruitment at Pavia University of seven directors of the Physics Institute and of the related Physics Cabinet active between 1860 and 1942, in the context of Italian unification. Attention is paid to the recruitment by national selections and through the “transfer” system, usually from “B” to “A” Universities. The relevance of the Pisa-Florence “school” for the careers of the majority of the seven directors is outlined, as well as the role of influential members of the High Council of Education. Examiners and candidates of the 1897, 1920 and 1926 national selections are dealt with. The complicated Italian top-down recruitment system produced extraordinary results but also had very serious flaws.

Keywords: Recruitment, Physics Institute, Pavia University.

1. Introduction

We analyse the recruitment at Pavia University of the seven directors of the Physics Institute and of the related Physics Cabinet active between 1860 (Giovanni Cantoni (1818-1897) held the chair from 1860 to 1893), and 1942, the year of Rita Brunetti’s untimely death. Brunetti (1890-1942) held the chair from 1936.

This stretch of time almost coincides with the period between the Unification Italy (1861) under the leadership of Piedmont and its royal dynasty (Savoia) and the proclamation of the Republic in 1946 and includes most of the fascist regime (1923-1943). During this period Italy had three kings, one dictator and 61 prime ministers. The young country was almost constantly at war: until 1947 the name of the Ministry of Defence was Ministry of War and up to 1920 almost all Ministers of war belonged to a military corps. Unification, sometimes seen as annexation, was a difficult task. Despite constitutional freedoms the electorate, especially at the beginning, was kept very small (only in 1946 was the vote extended to all males and females); the economic conditions of the population were severe, even if not desperate, and inequality as well as illiteracy was high. The fight against the papal state had internal political consequences and the civil war (brigantaggio) in the Centre South at a certain moment required the deployment of half the army.

2. The Italian University system

In this difficult context the unification of the Italian University system was not an easy project, and was carried forward with a restricted budget. It proceeded through the application of the Piedmont university rule (Casati law, 1859, and successive modifications) all over the peninsula. The system was of French and not German derivation, was centralised and tended towards uniformity, despite enlightened criticisms. The main players were the Ministers of Education, (of the 62 Ministers of Education 45 were University Professors), and the High Council of Education (Consiglio Superiore della Pubblica Istruzione), closely connected not only with the Ministry of Education but also with the Chamber of Deputies and the Senate: between 1847 and 1928 it had 354 members, 96 of whom were deputies (elected) and 146 senators (nominated). Between 1881 and 1923 of the 255 members of the High Council, 206 were University Professors. As we will see a small number of these members played an important role in the recruitment of the Professors of Physics.

The number of Universities was excessive: every state of the Peninsula prior to Unification had at least one University, often a historically relevant one. In the failed attempt to close down some of them in 1863, the numerous Universities were divided into two groups (A and B) which implied two levels of salaries and facilities. Pavia, the oldest (founded 1361) University in Lombardy, was in Group A. Other Universities belonging to the first (A) group were: Bologna, Napoli, Palermo, Pisa, and Turin. The second (B) group included: Genova, Catania, Messina, Cagliari, Modena, Parma and Siena. The number of professors of a specific University who became members of the High Council is an indication of the relevance of that University: 38 Naples, 34 Rome, 23 Turin, 20 Pisa, 17 Pavia, 16 Bologna, 15 Florence, 10 Genoa, 10 Padua, 8 Milan, 7 Palermo, 2 Parma and Siena, 1 Messina, Sassari, Modena and Venice.

3. The recruitment system

The recruitment system, also outlined in the 1859 Casati law was (and in large part still is) based on national, not local, selections usually held in Rome; the examiners were five, suggested by the High Council of Education and nominated by the Minister of Education; each chair selection provided three winners. The first was appointed, and had to stay for a while in the University that had obtained the chair, the other two were allowed the title of professor but had to find a position elsewhere. The minutes of the evaluations of every candidate and the final votes of the examiners were published in the remarkable *Bollettino del Ministero della Pubblica Istruzione*. A second form of recruitment for the Universities was the so-called “transfer”: appointing a professor who had the title but did not have a position or who wanted to shift from one University to another, usually from a “B” to an “A” University.

There was a series of influential physicists in the High Council. Enrico Betti (between 1867 and 1892), deputy in the VIII, IX, XII legislative assemblies, was nominated senator on the 26th of November 1884 and acted as general secretary of the Ministry of

Education from the 14th of October 1874 to the 31st of March 1876. Giovanni Cantoni (between 1866 and 1883), member of the Committee for University Education from the 27th of December 1866 to September 1867; Cantoni was nominated extraordinary member the 13th of November 1870 and ordinary the 23rd of September 1871. He kept the position until elected on the 12th of May 1881. Member of the executive committee from the 13th of May 1881 to the 10th of May 1883. He was Rector of Pavia University, where he held the chair of Physics from 1860 until retirement in 1893. Deputy in the X and XI legislative assemblies, he was nominated senator on the 6th of March 1879, general secretary of the Ministry of Education from the 17th of March 1870 to the 17th of May 1872. Pietro Blaserna (between 1866 and 1890) was in Florence in 1862, Palermo 1863, and Professor of Experimental Physics in Rome from 1872. First president of the Italian Physical Society (SIF 1897) and president of the Lincei Academy, vice-president of the Senate, Dean of Faculty and Rector, he was nominated to the High Council by the Ministry of Education on the 20th of May 1886, and from the 27th of May was on the executive committee. He stopped serving on the High Council on the 31st of May 1890 and was nominated senator on the 4th of December of the same year. Antonio Ròiti (between 1892 and 1915) was in Pisa in 1868, in Florence in 1871, in Palermo in 1878, again in Florence in 1880. He was almost permanently a member of the High Council and director of the Istituto di Studi Superiori of Florence, the only Italian institute for graduate studies; he was president of the SIF and a member of the Lincei Academy.

Influential examiners were Garbasso, successor of Ròiti at Florence, founder of the physics institute of Arcetri and of the national optical institute, president of the physics, astronomy, and mathematics committee of the newly founded (1923) National research council (CNR), Mayor of Florence and then Podestà (a fascist denomination) and president of the science section of the Lincei Academy, he was president of the SIF and a senator. Corbino was successor to Blaserna in Rome, president of the SIF, senator, minister of public education (while Bonomi was premier) and then of the National Economy. As we are about to see he was the promoter of the first chair of theoretical physics. Cantone, professor at Pavia and then Naples, was president of the SIF, member of the Lincei Academy, president of the pure and applied science committee of the CNR. Somigliana, professor of mathematical physics at Pavia and then Torino, member of the Lincei Academy, of the Pontifical Academy, was in the high council from 1911 to 1915. Righi, professor in Bologna, was senator, president of SIF, member of the Lincei Academy and a Nobel candidate; Q. Majorana was president of the SIF from 1925 to 1947.

4. Pavia physics professors

Now to consider the Pavia physics professors from 1860 to 1942. Giovanni Cantoni (1818-1897) held the chair for thirty-three years. Among his many contributions, of particular value is his interpretation of Brownian motion in the framework of corpuscular theory. Adolfo Bartoli (1851-1896) one of the first Italian theoretical physicists, fa-

mous for an early paper on the thermodynamic derivation of radiation pressure, in Pavia worked mainly on the specific heats of water. Due to his untimely death he held the chair for only three years. Michele Cantone (1857-1932) was in Pavia from 1898 to 1904 and then in Naples. His main works were on magnetic hysteresis. Enrico Salvioni (1863-1936) held the chair from 1904 to 1923. Unfortunately after a very promising start - he invented the fluoroscope - in Pavia he did not publish much and his teaching duties were wanting. Alessandro Amerio (1876-1965) was in Pavia from 1924 to 1928 and then at Milan Polytechnic. He was an expert in solar radiation. Adolfo (after 1936 Giovanni) Campetti (1866-1947) held the chair from 1929 to 1936. He pioneered mass spectroscopy in Italy. Rita Brunetti (1890-1942) was the first woman to hold a physics chair and to be director of a physics institute in Italy. She was also one of the first Italian experts in quantum mechanics and was praised by Fermi and Sommerfeld. Despite her short time as chair, tragically cut short due to illness, she planned and started assembling a Cockroft Walton accelerator, restructured the Institute and founded a school of physics that played a relevant role in the aftermath of the second world war.

What follows is an analysis of the recruitment of these seven professors. Cantoni held the chair in 1860 a few months before Italian unification but after the second independence war, when Lombardy was annexed to Piedmont. We can consider his selection “local”. Bartoli, in agreement with a retired but still influential Cantoni, was appointed in 1893 through the “transfer” system from Catania. Cantone was the winner of a selection for the Pavia chair in 1897 and started teaching in 1898. Salvioni came second in the same selection and shifted from Messina to Pavia in 1904 after Cantone’s transfer to Naples. Amerio followed the same path, came first in a Messina selection in 1920 and shifted from Messina to Pavia in 1924 after Salvioni was obliged to retire. Campetti was second in the same 1920 selection and replaced Amerio transferring from Catania in 1929. Brunetti in 1926 came second in a competition for the newly-established University of Bari and shifted to Pavia from Cagliari in 1936.

Thus of the seven professors appointed at Pavia University five were selected from those already teaching in “B” group universities. All came from the islands: four from Sicily, two from Catania and two from Messina, and one from Sardinia, Cagliari. The “transfer” was the only way for the Pavia Science Faculty to have a say, given the practical impossibility, after Giovanni Cantoni, of having a representative in the selection committees for Physics.

For a clearer understanding of the workings of the recruitment system it is useful to have a look at these seven professors’ backgrounds: Cantoni took his degree in Pavia in 1840 and studied with Bordoni and Belli; Bartoli graduated from Pisa in 1874 and studied with Betti and Felici and in 1880 was in Florence with Ròiti. Cantone took his degree in Rome in 1881 with Blaserna and in 1884 was in Florence with Ròiti. Salvioni graduated in 1886 from Pavia with Cantoni and in 1886 he too was in Florence with Ròiti. Amerio took his degree in 1897 in Turin with Naccari, and in 1898 was in Florence with Ròiti. Campetti graduated in 1888 in Pisa with Betti. Brunetti took her degree in 1914 in Pisa studying with Battelli and A. Occhialini and from 1915 was for a long time vice-director of the Florence institute directed by Garbasso. In conclusion six

out of seven of the Pavia professors had a background based on the Pisa-Florence school (Ròiti himself had his roots in Pisa).

Why were Pisa and Florence so relevant? In Pisa in the 1840s a scientific “school” was established; it included: Mossotti (1791-1863), who graduated from Pavia in 1811 under Brunacci, for mathematical physics and celestial mathematics, Matteucci (1811-1868) for experimental physics and Piria (1813-1865) for chemistry. Cannizzaro was a student of Piria. Matteucci and Piria started publishing in 1843 *Il Cimento* which in 1855 became *Il Nuovo Cimento*. A student and successor of Matteucci was Riccardo Felici (1819-1902); a student of Mossotti was Enrico Betti (1824-1892) whom we have already seen as an influential member of the High Council of Education; Adolfo Bartoli was a student of Felici and Betti. The latter two became editors of *Il Nuovo Cimento* after Piria’s and Matteucci’s deaths (1865, 1868).

Antonio Ròiti (1843-1921) was in Pisa from 1864 to 1868, and became Felici’s vice from 1868 to 1871; after a short stay in Palermo (1878 -1880), he was at the Istituto di Studi Superiori di Firenze for a very long time (1880-1913). We have already noted that for a long time he was an influential member of the High Council. Remarkably, of his 14 assistants, 8 gain a university chair. Antonio Garbasso (1871-1933) (with Hertz in Bonn and Helmholtz in Berlin), professor of mathematical physics at Pisa (1895-1899) and Torino (1899-1903), of experimental physics at Genoa from 1903, in 1913 became the successor of Ròiti at Florence.

We are now better equipped to understand the physics selections (concorsi) that determined the careers of the Pavia professors. In 1897 the examiners of the selection for a chair of experimental physics in Pavia were: Blaserna (president), Ròiti, Villari, Cardani and Naccari. We can see that two of the prominent members of the High Council were examiners. The winners were: Cantone (who got the chair), Salvioni, and third ex aequo Garbasso and Sella (a young, promising theoretical physicist, son of the mineralogist and premier Quintino Sella). Interestingly the uncle of Ettore Majorana, Quirino Majorana, who later played a prominent role, was declared ineligible.

Twenty three years later, in 1920, the selection for a chair of experimental physics at Messina University saw two of the 1897 candidates as examiners, Garbasso and Cantone. The other three were Righi (president), Corbino, minister and later sponsor of the Fermi group, and Somigliana. The winners were Amerio, Campetti, A. Occhialini (the father of G. Occhialini). Interestingly Righi, the president, wrote a minority report in favour of his assistant Amaduzzi and died a few months later. In 1924 the winners had to go through a confirmation evaluation: the examiners were again Garbasso, Cantone, Somigliana, and also Quirino Majorana (who had replaced Righi at the chair in Bologna) and the mathematical physicist and collaborator of Einstein Levi Civita.

In 1926 the selection for a chair of mathematical physics at Cagliari saw a battle between the supporters of the mature and well known Giorgi, who gave the name to the system of units, and the young and extremely brilliant Fermi. Giorgi got the chair with a three to two vote. The other winners were Fermi and Serini. Of the five examiners, Volterra, Levi Civita, Somigliana, Marcolongo, Guglielmo, the first two supposedly preferred Fermi. It is well known that Fermi’s defeat produced a turning-point in Italian physics because it led to the establishment of the first chair in theoretical physics, pro-

moted by Corbino at the University of Rome and obviously won by Fermi, followed by Persico and Pontremoli. The examiners were Corbino himself, Cantone, Garbasso, Quirino Majorana and Maggi. This is a well-known and widely discussed event. What is not at all well known but recently discovered by one of us (LFB) in the Pavia University archives, is that the Science Faculty of Pavia University between the two selections (mathematical physics at Cagliari and theoretical physics at Rome) offered Fermi, the second winner at the Cagliari selection, a chair in mathematical physics. Fermi declined after the results of the Rome selection and the chair went to the third winner, Serini.

In 1926 there was another selection relevant for our purposes: the one for the chair of experimental physics at the newly-born Bari University. The examiners were the by now well-known Garbasso (president), Corbino, Q. Majorana plus Ciusa and Pochettino. The first winner was Polvani, and then Brunetti and Pacini.

Generational changes played an important role in the development of Italian Physics. In the 1860s a group of relevant researchers died: Belli (1860), Mossotti (1863), Matteucci (1868), Piria (1865). At the turn of the century the beginnings of theoretical physics were seriously hit by the deaths of: Betti (1892), Basso (1895), Bartoli (1896), Cantoni (1897), Felici (1902), Sella (1907). Some of them were particularly young. Between 1916 and 1926: Battelli (1916) Pisa; Blaserna (1918) Roma; Righi (1920) Bologna; Ròiti (1921) Firenze; Naccari (1926) Torino. In the 1930s: Cantone (1932); Garbasso (1933); Salvioni (1936); Corbino (1937); Brunetti (1942). After this last generational change modern 20th century physics got the upper hand.

What can we say of the candidates who were not selected? Not much, because it is not possible to know what they would have produced if they had won a university chair. In any case, for the record:

- Pavia 1897, eligible: Silvio Lussana (Padova), (prof. Riccardo Malagoli), prof. Domenico Mazzotto (Bologna), prof. Oreste Murani (Pisa), (prof. Costantino Rovelli); ineligible: Quirino Majorana (Bologna);
- Messina 1920, all eligible: Lavoro Amaduzzi (Bologna), Carlo Del Lungo (Pisa), Ernesto Drago (Catania), Tullio Gnesotto (Padua), Paolo Rossi (Pavia), Giulio Cesare Trabacchi (Rome, who got a very positive evaluation and later played a main role in medical physics in Rome).
- Bari 1926, all eligible: Emilio Adinolfi (Naples), Arciero Bernini (Bologna), Washington Del Regno (Naples), Tullio Gnesotto (Padua), Marya Kahanowicz (Naples).

5. Conclusions

Was it a good recruitment system? Not really, but...

- There were too many universities for the budget (e.g. the renewal of Volta's physics cabinet in Pavia had to wait till 1936).

- Shifting from B to A universities was unfair to B (and sometimes to candidates: see Nalli's case in Pavia - despite coming first in the selection, the Science Faculty appointed another winner) and Croce's pamphlet criticising the discretionary nature of the "transfer" system. Croce was defending his friend and collaborator Gentile, who later became an adversary).
- Selection power was in very few hands, but the selection of candidates was not unfair. (Ludovico Geymonat used to stress the long term merits of this "baronial" approach).
- There were too many professors in important political roles (45 out of 62 Ministers of Education were academics): this was a loss for research (Matteucci, Cantoni, Q. Sella, Garbasso, Corbino...).
- Systemic updates were very slow, which led to the delay of theoretical physics!
- The strict, centralised political dominance, which could lead to abuse, as tragically demonstrated in the case of the request to swear fidelity to the fascist regime and in the application of the racial laws (1938).

Reading the remarkably detailed Bollettino del Ministero della Pubblica Istruzione we can admire the unification efforts but also realise that the system intended for unity and stability also implied homogeneity and not innovation!

6. A personal recollection: History of Physics and Pisa-Pavia (FB)

- Polvani and his successor Tagliaferri played an important role in the development of History of Physics in Italian Physics Departments.
- The Domus Galileana, Pisa, also played an important role in the early seventies. In November 1972 there was a selection for a number of scholarships. The examiners were Geymonat (Milano), Derenzini (Pisa), Maccagni (Genova), Cappelletti (Roma), and others. Among the winners: Besana, Bevilacqua, Giordano, Guidetti, Maiocchi, Petruccioli, Robotti, Rossi, Tarsitani, Tucci... Also active in that context: Bellone, Carazza, Pancaldi.

References

- Bevilacqua F., Falomo Bernarduzzi L. (2017). *La Facoltà di Scienze: Fisica*, in Mantovani D. (a cura di), *Almum Studium Papiensis. Storia dell'Università di Pavia. Dall'età austriaca alla nuova Italia*, Vol. 2, tomo II. Milano: Cisalpino, pp. 1347-62.
- Bevilacqua F., Falomo Bernarduzzi L. (in corso di stampa). *La Facoltà di Scienze: Fisica, 1922/1942 Venti anni di svolta*, in Mantovani D. (a cura di), *Almum Studium Papiensis. Storia dell'Università di Pavia*. Milano: Cisalpino, pp. 1-22.
- Ciampi G., Santangeli C. (a cura di) (1994). *Il Consiglio superiore della pubblica istruzione, 1847-1928*. Roma: Ministero per i Beni Culturali e Ambientali.

Handling with Pontremoli's memory at the Institute of Physics in Milan during the Fascist regime

Leonardo Gariboldi – Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Fisica
“Aldo Pontremoli” – leonardo.gariboldi@unimi.it

Abstract. After his disappearing in the Barents Sea on May 25th, 1928 during the polar expedition aboard the *Italia* airship and the subsequent declaration of his death, Aldo Pontremoli was the object of commemorations and other actions in favour of the preservation of his memory at the Royal University of Milan: the dedication of a bust and a plaque in his memory in 1930, the establishment of a scholarship named after him in 1931, and the dedication of the Institute of Physics in 1932. The Institute of Physics founded by Pontremoli in 1924, under the new direction of Giovanni Polvani (who was particularly active in the abovementioned actions), underwent considerable changes that led to a substantial transformation of the teaching and research activities. The shipwreck and the subsequent controversies related to the rescue operations of the survivors had, instead, the effect of a mostly unwanted fading of Pontremoli's name from the written memoirs in the context of an embarrassing event for the Fascist regime. The suspension of the scholarship named after Pontremoli because of the racial laws in 1938 led to a further fading of the memory of Pontremoli in a climate of acquiescence towards the Fascist regime also implemented in the Institute of Physics.

Keywords: Palestine, Financial sector, CGE models.

1. Aldo Pontremoli

Aldo Pontremoli¹ was the founder of the first Institute of Physics at the Royal University of Milan in 1924. He was born in Milan on January 19th, 1896 in a prominent Jewish family. His maternal grandfather was the economist and politician Luigi Luzzatti; this fact favored Pontremoli's connections with the financial and industrial players in Milan in his plans to carry out cutting-edge projects in the field of applied physics.

He studied first at the Royal Technical High School in Milan and, after fighting as a volunteer in the first World War, he graduated in Physics at Rome University with Orso Mario Corbino. He later went to the Cavendish laboratory in Cambridge to train in atomic and nuclear physics in Ernest Rutherford's team. Back in Rome, he studied

¹ A biography of Aldo Pontremoli can be found in (Gariboldi 2015) and (Gariboldi 2018).

problems concerning electrodynamics and the structure of matter in an old quantum theoretical context.

In 1924, consulted for an opinion, Corbino proposed Pontremoli as a professor of Complementary Physics² in the newly established Royal University of Milan where he established in a short time the Institute of Complementary Physics (R. Università degli Studi di Milano 1927) with a well-equipped radiology laboratory. In 1926, Enrico Fermi, Enrico Persico and Pontremoli succeeded in the first public competition in Italy for a chair of Theoretical Physics.

In 1927, Umberto Nobile invited Pontremoli to join him next year in the polar expedition on board the *Italia* airship³ and to take care of the scientific experiments together with other two scientists: František Běhounek and Finn Malmgren. Besides the undeniable political aspects of Italy as a leading country in the exploration of the Arctic and the competition between the supporters of the use of airships (such as Nobile) and those of planes, it must be highlighted the importance of the wide range of scientific phenomena to be studied in a mostly unknown environment: exploration and mapping of unexplored territories, Earth's magnetic and gravitational fields, atmospheric electricity, penetrating radiation, transmission of radio-waves in the arctic atmosphere, meteorology and oceanography (Nobile 1929). The expedition left from the outskirts of Milan on April 15th, 1928 and started his explorations from the Italian base in the Svalbard islands on May 11th. On May 25th, during the third exploration the airship suddenly lost altitude and hit the pack. Ten people were thrown onto the pack while the other six ones, including Pontremoli, disappeared with the airship that had quickly regained altitude. The airship most probably sank into the Sea of Barents and was never found.

2. Pontremoli's memory in the "red tent" memorialistic literature

If the accident on the pack was a tragic fact in itself, the international rescue operations gave birth to the epic narrations of the "red tent" and caused many controversies, mainly on Nobile's attitude, both in Italy and abroad, in particular in Norway where the negative reactions were supported by Roald Amundsen who had a deep personal dislike for Nobile.

The rescue operations lasted until September 1928. Even if the six people disappeared on board the airship were most reasonably dead before or during the hostile arctic winter, two other attempts to find any possible survivor were made in 1929. Pontremoli was officially declared dead in 1929.

The memorialistic literature on the expedition flourished with more than ten books entirely devoted to it written by the survivors (Běhounek 1929, Biagi 1929, Nobile 1930, Nobile 1945, Nobile 1969, Nobile 1987, Trojani 1964), (Viglieri 1929) or by the

² Milan, Centro APICE, Archivio Storico dell'Università degli Studi di Milano (ASUSM), series 7, title 9, personnel file n. 2497 (Pontremoli): rector's decree n. 57, September 22nd, 1924.

³ ASUSM, s. 7, t. 9, personnel file n. 2497 (Pontremoli): letter from Umberto Nobile to Baldo Rossi, January 17th, 1928; letter from Baldo Rossi to Aldo Pontremoli, February 28th, 1928.

rescuers (Albertini 1929, Giudici 1928, Samoilowitsch 1929, Tomaselli 1929), with a particular attention towards the “red tent” epic events and the rescue operations.

The role played by Pontremoli in the expedition, in particular as for his scientific activity, is mostly ignored. Since he was not among the survivors his name could not benefit from the media exposure due to the “red tent” episode. Pontremoli’s name therefore did not fit in the people’s memory and he was easily forgotten, if ever known, by the Italian population at large. To our knowledge, no monument was raised in his memory in Italy and only two streets are named after him, in Andria and in Gela, that is in two cities which had moreover no connection at all with his personal history.

3. Pontremoli’s memory at the University of Milan

With the official statement of Pontremoli’s death, the Royal University of Milan was authorised to replace him with another professor. The Faculty of Sciences voted to call Giovanni Polvani from the University of Bari as professor of Experimental Physics.⁴ Polvani became the new director of the Institute of Physics up to 1966.

To commemorate Pontremoli’s memory in the most appropriate way, the University established a special committee,⁵ with the rector Baldo Rossi, Livio Cambi, Polvani, Enzo Pugno Vanoni, Emilio Bianchi (Brera Astronomical Observatory), and Federico Jarach. Besides various commemorative ceremonies, the committee planned to make build a plaque and a bust and to name the radiology laboratory after Pontremoli.

A marble plaque in memory of Pontremoli was inaugurated on June 7th, 1930 by the rector with a commemorative speech given by the dean of the Faculty of Sciences, Gian Antonio Maggi.

A bronze bust was inaugurated in the university’s aula magna during the rector’s inaugural speech of the 1930-31 academic year. Both the plaque and the bust are now on exhibition in the hall of the Department of Physics “Aldo Pontremoli”.

To our knowledge no document testifies that the naming of the radiology laboratory after Pontremoli ever happened. The Institute of Physics was instead named after Pontremoli in 1932.⁶ In 1980, with the transformation of university institutes into departments due to a reform of the structure of Italian universities, the naming went forgotten. In view of the ninetieth anniversary of the polar expedition, in 2017 the Department of Physics voted in favour of being named after Pontremoli. This decision became official with the rector’s decree on December 13th, 2017.

⁴ ASUSM: s. 1.4.4., u. 2: Minutes of the meetings of the Faculty of Sciences Council, October 29th, 1929.

⁵ ASUSM: s. 7, t. 14, a.u. 40: Onoranze al prof. Aldo Pontremoli.

⁶ ASUSM: s. 1.4.4., u. 2: Minutes of the meetings of the Faculty of Sciences Council, August 2nd, 1932.

4. The “Aldo Pontremoli” scholarship

In 1931, Pontremoli’s mother, Lucia Luzzatti, decided to honour her son’s memory with a donation to financially support a scholarship⁷ for one student of the Institute of Physics. Polvani and the dean of the Faculty of Sciences cooperated with Mrs Luzzatti in drafting of the donation agreement which was signed in Rome on April 29th, 1931.⁸ After some bureaucratic steps, the king Vittorio Emanuele III signed the royal decree on August 14th, 1931.⁹ The rector was therefore authorized to accept the donation¹⁰: a yearly scholarship of 2,500 lire was established and financed by the donation of government bonds, for a total of 50,000 lire, with coupons with an annual interest of 5%.

In 1932, the first commission awarded the “Aldo Pontremoli” scholarship to Olga Bertoli who would have been the first woman graduating in Physics in Milan. A second commission was named in 1933 but a lack of documents does not allow us to know if the scholarship was ever awarded that year. The same commission was named in late 1933 and awarded the scholarship in 1934 to a student whose name is unknown. No documents concerning the scholarship, nor the awarding commission are known for 1935. In 1936 the scholarship was temporarily “suspended in accordance with the general provisions in force”,¹¹ which were but not explicitly specified. In 1937 the scholarship was restored and awarded, for the last time, to Vanna Tongiorgi.

The 1938 Italian racial laws were of no immediate concern for the Institute of Physics since it did not host any Jewish member nor student, whereas it caused instead the expulsion from the Royal University of Milan of nine professors and five assistants, not to mention new discriminatory regulations against the Jewish students.

Even if the Italian racial laws only concerned the living Jews, they had also the result of suspend the payment of the “Aldo Pontremoli” scholarship. Since the Italian racial laws included a number of *disorganica* exceptions, their actual application in the universities raised a series of problems whose solution was demanded to the Ministry of National Education. In the case under consideration, the Ministry was asked if a university could be authorized to accept a donation from a Jew or meant to support a scholarship named after a Jew. The minister Giuseppe Bottai send a confidential circular¹² to the rectors of all the Italian universities. He ordered to accept no more any such donation from a Jew and to suspend the already existing institutions. He reserved the right to take appropriate measures on a case-by-case basis.

There was no public reaction by the Institute of Physics or the Faculty of Sciences as for the suspension of the “Aldo Pontremoli” scholarship. It is possible that it was meant to be just a temporary fact since even the Italian Jewish community was not immediately and completely aware of the consequences of the racial laws. We must how-

⁷ For more details on the Pontremoli scholarship see (Gariboldi 2019).

⁸ Rome, Archivio Centrale dello Stato, MPI DGIS Div. IV, 122, “Milano R. Università. Borsa di studio Pontremoli Aldo”: donation act.

⁹ Royal decree n. 1201, August 14th, 1931, published on Gazzetta Ufficiale n. 287, October 1st, 1931.

¹⁰ ASUSM: s. 1.4.4., a.u. 2: Minutes of the meetings of the Board of directors, July 12th, 1932.

¹¹ ASUSM: s. 1.4.4., a.u. 3: Minutes of the meetings of the Faculty of Sciences Council, February 3rd, 1936.

¹² ASUSM: s. 7, a.u. 439: “Difesa della razza”: Ministry of National Education, confidential circular, November 12th, 1938.

ever highlight the fact that no other action was moved against Pontremoli's memory: the Institute of Physics continued to be named after him, and neither the plaque nor the bust were damaged or needed to be hidden.

The suspension was but not a temporary fact. On October 24th 1939, Mrs. Luzzatti wrote the Minister of National Education a plea asking to restart the award.¹³ She and her other son, Giorgio, had obtained a discrimination decree (that is, the racial laws were not applied to them) as Luigi Luzzatti's daughter resp. grandson. For the same reason, she thought, Aldo too would have been obtained a discrimination decree, not to mention his merits as a fighter during the First World War and his participation to the heroic polar expedition. In such a case, a scholarship named after him should have not been suspended. The minister replied to the rector that he could not take any action on this until Mussolini had made his decision on the institutions named after a Jew.¹⁴

Eventually neither Bottai nor Mussolini take any decision at all, as it is testified by a dozen of minutes concerning the postponement of the decision.¹⁵ The stricter alliance with Germany during these years, in particular during the Italian Social Republic, might have contributed to the lack of a decision while the living conditions of the Italian Jews continued to worsen. Pontremoli's family succeeded to flee to Switzerland on September 12th, 1943 and escaped the tragic fate of many Italian Jews deported to extermination camps.

After the end of the Second World War, the "Aldo Pontremoli" scholarship was not restored. The rapid depreciation of the Italian lira, from 1943 onwards, had transformed the donated government bonds into wastepaper.

In 2018, on occasion of the ninetieth anniversary of Pontremoli's disappearance, the rector Gianluca Vago announced the decision to name a degree prize again after Pontremoli. From 2019 on, the prize will be awarded to the best thesis of students of the Master's degree Course in Physics at the University of Milan. This prize will continue to honour Pontremoli's memory in the institution he founded in 1924.

References

- Albertini G. (1929). *Alla ricerca dei naufraghi dell'«Italia». 1000 chilometri sulla banchisa*. Milano: Libreria d'Italia.
- Běhounek F. (1929). *Sieben Wochen auf der Eisscholle. Der Untergang der Nobile-expedition*. Leipzig: Brockhaus.

¹³ ACS: MPI DGIS Div. IV, 122, "Milano R. Università. Borsa di studio Pontremoli Aldo", letter from Lucia Luzzatti to the Minister of National Education, October 24th, 1939.

¹⁴ ACS: MPI DGIS Div. IV, 122, "Milano R. Università. Borsa di studio Pontremoli Aldo", letter from the Minister of National Education to Alberto Pepere, April 11th, 1940.

¹⁵ ACS: MPI DGIS Div. IV, 122, "Milano R. Università. Borsa di studio Pontremoli Aldo". Minutes on date August 28th (1940?), February 3rd, 1941, April 4th, 1941, May 6th, 1941, October 4th, 1941, November 8th 1941, February 4th 1942, March 1943. Minutes of postponements to March 30th, 1943, May 31st, (1943?), August 30th, 1943, June 30th, 1944.

- Biagi G. (1929). *Biagi racconta. I miracoli della radio nella tragedia polare*. Milano: Mondadori 1929.
- Gariboldi L. (2015). *Pontremoli, Aldo* [online]. URL: <http://www.treccani.it/enciclopedia/aldo-pontremoli_%28Dizionario-Biografico%29/> [access date: 05/11/2019].
- Gariboldi L. (2018). *The Founder of the First Institute of Physics of the Milan University: Aldo Pontremoli, a Physicist's Life Between Adventure and Institutions*, in Bortignon P.F. et al. (eds.), *Toward a Science Campus in Milan*. Berlin: Springer, pp. 105-125.
- Gariboldi L. (2019). "L'impatto del Fascismo sull'Istituto di Fisica di Milano: il caso della borsa di studio «Aldo Pontremoli»". *Quaderni di Storia della Fisica*, accepted for publication.
- Giudici D. (1928). *Col Krassin alla tenda rossa*. Milano: Moneta.
- Nobile U. (ed.) (1929). "Petermanns Mitteilungen". *Ergänzungsheft*, 205, pp. 14-45.
- Nobile U. (1930). *L'«Italia» al Polo Nord*. Milano: Mondadori.
- Nobile U. (1945). *Posso dire la verità. Storia inedita della spedizione polare dell'«Italia»*. Roma: Mondadori.
- Nobile U. (1969). *La tenda rossa. Memorie di neve e di fuoco*. Milano: Mondadori.
- Nobile U. (1987). *L'«Italia» al Polo Nord. 1928 l'ultima epopea del dirigibile*. Venezia: Marsilio.
- R. Università degli Studi di Milano (1927). *Istituto di Fisica Complementare*, in *Annuario Anno Accademico 1926-27*. Milano: Società Anonima Stabilimento Grafico Stucchi-Ceretti, pp. 180-201.
- Samoilowitsch R. (1929). *S-O-S- in der Arktis. Die Rettungsexpedition des Krassin*. Berlin: Deutsche Verlagsgesellschaft.
- Tomaselli C. (1929). *L'inferno bianco. Racconto della spedizione Nobile*. Milano: Unitas.
- Trojani F. (1964). *La coda di Minosse. Vita di un uomo, storia di un'impresa*. Milano: Mursia.
- Viglieri A. (1929). *48 giorni sul «Pack»*. Milano: Mondadori.

People, Places and Scientific Instruments: Physics in Rome in the First Half of the Nineteenth Century.

Roberto Mantovani – University of Urbino Carlo Bo - Department of Pure and Applied Sciences (DiSPeA). *Physics Laboratory: Urbino Museum of Science and Technology* – roberto.mantovani@uniurb.it

Abstract: In 1972, in a bibliographic essay, F. Bartoccini explicitly considered the History of Sciences in Rome and its Provinces as "still unexplored". Since then, several other studies have followed one another without, however, providing an exhaustive overview of the teachings and scientific and technical research that developed in Rome in the first half of the Nineteenth century. The scientist who received the most attention (even recently) was Father Angelo Secchi, but little attention was paid to his scientific environment. The talk will present an analysis of the Roman scientific context trying to highlight the places, research and educational practices related to experimental physics. Since the Napoleonic period in Rome, a Physical-Mathematical Academy was already active at the Collegio Umbro-Fuccioli, where scientific subjects were discussed, and public experiments in Experimental Physics were carried out. In this College worked the abbot Feliciano Scarpellini considered until 1840 among the greatest disseminators of the Physical Sciences in Rome. In 1816, Pius VII assigned the famous chair of Sacred Physics to Scarpellini himself at the Roman "Archiginnasio della Sapienza". The period of restoration in Rome was characterised by an apologetic and concordist program that, against the materialistic philosophies of French origin, aimed to establish a positive correspondence between the conclusions of the physical and natural sciences and the Biblical narration. Some physicists, such as Saverio Barlocchi, merely modified their teachings according to the rigid rules of *Quod Divina Sapientia* (1824), others, such as Pianciani e Secchi, supported the concordist programme with original works, but they rejected the theses of the Neotomists. In this environment, the practice of experimental physics developed thanks to the presence of excellent machinists and instrument makers. Among these makers, some members of the Luswergh family were outstanding for their skill. This exceptional family of instrument makers settled in Rome in the second half of the seventeenth century and until the first half of the nineteenth century handed down from father to son the noble art of repairing, designing and building excellent scientific instruments.

References

- Renazzi, F. M. (1806). Storia dell'Università degli Studi di Roma detta comunemente la Sapienza che contiene anche un saggio storico della letteratura romana dal principio del secolo XIII sino al declinare del secolo XVIII. Vol. IV. Roma: Nella Stamperia Paglierini.
- Moroni, G. (1840-1861). Dizionario di Erudizione Storico-Ecclesiastica da S. Pietro sino ai nostri giorni. 103 Voll. Venezia: Tip. Emiliana.
- Volpicelli, P. (1851). Sull'accademia de' lincei, dal terzo suo risorgimento del 1795, sino alla governativa sua istituzione del 1847. Ragionamento storico del prof. Paolo Volpicelli. *Atti dell'Accademia Pontificia de' Nuovi Lincei*. Tomo 1, Anno 1 (1847-1848). Roma: Tipografia delle Belle Arti, pp. 10-81.
- Sommervogel, C. (1890-1900). Bibliothèque de la Compagnie de Jésus. 9 voll. Bruxelles-Paris: Schepens & Picard.
- AA.VV. (1924). L'Università Gregoriana del Collegio Romano nel primo secolo della restituzione 1824-1924. Roma: Cuggiani.
- Filograssi G. (1954). Teologia e filosofia nel Collegio Romano dal 1824 ad oggi (note e ricordi). *Gregorianum*, XXXV, pp. 513-540.
- Bartoccini, F. (1972). Lo Stato Pontificio. *Bibliografia dell'età del Risorgimento in onore di Alberto M. Ghisalberti*, Vol. II. Firenze: Olschki.
- Battimelli, G., Ianniello, M.G. (2013). Fermi e dintorni. Due secoli di fisica a Roma (1748-1960). Milano: Mondadori educational.
- Mantovani, R. (2015). Giambattista Pianciani. *Dizionario Biografico degli Italiani*, Vol. 83 (Piacentini-Pio V), pp. 44-47. Roma: Istituto della Enciclopedia Italiana fondata da G. Treccani.

E se Marconi... la storia mancata

Mario Calamia – Università degli Studi di Firenze – mario.calamia@unifi.it

Monica Gherardelli – Università degli Studi di Firenze –
monica.gherardelli@unifi.it

Giovanni Manneschi – C.E.I.A. S.p.A. Arezzo – gmanneschi@ceia-spa.com

Abstract: Guglielmo Marconi used the *coherer* in his first experiments for detecting electrical discharges from thunderstorms (Livorno 1892-93) and for realizing remote communications (Pontecchio Marconi 1895). The *coherer* was invented by Temistocle Calzecchi Onesti, as recognized after years and years of disputes. In 1884 his communication to the “Accademia del Cimento” about his device, called *cannellino*, removes any possibility of misunderstanding. The Calzecchi Onesti’s *cannellino* is a *coherer* equipped with a crank, that aimed to restore the insulation conditions after the conduction conditions triggered by the radiofrequency signal. The crank was much more practical and functional than the hammer described by Branly and Lodge and used by Guglielmo Marconi in his experiments.

We believe that Marconi was not aware of the experiments by Calzecchi Onesti. In a previous communication, the authors of this paper illustrated the personality and the work of Temistocle Calzecchi Onesti and described the reconstruction of the *cannellino*, operated according to the instructions of its inventor. Recent measurements have been carried out on the realized instrument with the aim to highlight the different behaviour of the two systems. These measurements confirm the better performance of the *cannellino*. We wonder why Marconi did not use the *cannellino* in his experiments. The authors of this paper formulate some hypotheses and try to figure out the evolution of the electric signal revelation in the case Marconi had known Calzecchi Onesti and his *cannellino*.

Keywords: *Coherer*, Calzecchi Onesti, Guglielmo Marconi, signal detection.

1. Introduzione

I primi collegamenti radio, ovvero le prime trasmissioni senza fili (*wireless*), per il trasferimento a distanza di informazioni con segnali a radiofrequenza, ebbero come elemento centrale il *coherer* o coesore.

Il *coherer* è un dispositivo che permette di rivelare la presenza di un segnale a radiofrequenza. Per raggiungere tale scopo, una polvere metallica è inserita, in posizione caotica e casuale, entro un tubo isolante, tra due elettrodi.

In assenza del segnale a radiofrequenza, il dispositivo presenta un'alta resistenza elettrica. L'arrivo di un segnale radio, di adeguate caratteristiche elettriche e intensità, genera nei granuli di polvere lievemente ossidati, una scarica disruptiva che stabilisce un collegamento tra i due elettrodi, abbassando considerevolmente la resistenza del dispositivo.

Per far ritornare il dispositivo alla condizione di non conduzione, è necessaria un'azione meccanica che scuota la limatura, riportando a valori elevati la resistenza del sistema.

Guglielmo Marconi (1874 - 1937) usò il *coherer* nei suoi primi esperimenti, inizialmente a Livorno (1892-93) per la percezione delle scariche temporalesche e successivamente a Pontecchio Marconi (1895) per realizzare il primo collegamento a distanza.

Abbiamo detto dell'azione meccanica necessaria per riportare il *coherer* alla condizione di non conduzione. Per questo scopo Marconi usò il cosiddetto martelletto, un sistema ideato sulla base degli esperimenti suoi, di Branly e Lodge (1890).

L'impiego del *coherer*, utilizzato nei primi esperimenti, fu superato con l'impiego, dal 1912, del diodo di Fleming (1904) e del triodo di De Forest (1906), che portarono, con la modulazione di onde persistenti e la loro rivelazione, alla Radiofonia.

Ma già nel 1884 Temistocle Calzecchi-Onesti aveva proposto, con una comunicazione all'Accademia del Cimento una sua invenzione, il *cannellino*, in tutto simile al *coherer*, salvo che l'azione meccanica per riportare il dispositivo nella condizione di non conduzione era compiuta mediante una manovella.

In questo articolo si riportano i risultati del confronto delle prestazioni di due ricevitori, recentemente restaurati, che seguono, uno lo schema di Calzecchi-Onesti, e l'altro lo schema di Marconi, con risultati sorprendenti.

2. Il *cannellino*

Temistocle Calzecchi-Onesti (1853 - 1920) laureatosi in Fisica, nel 1878, presso l'Università di Pisa, fu assistente del prof. Felici a Pisa, dove effettuò esperienze nel campo dell'induzione elettromagnetica sulle macchine elettriche in un periodo di grande fermento per il settore. Successivamente, da professore di Scuola secondaria a Fermo (I), si dedicò a studi ed esperimenti che lo portarono, già nel 1884, a presentare, con una comunicazione alla "Accademia del Cimento", uno strumento che chiamò il *cannellino*.

Il *cannellino* di Calzecchi-Onesti è un trasduttore bipolare che sotto l'azione di un impulso di corrente ad alta frequenza, generato da un campo elettromagnetico, modifica lo stato delle polveri metalliche in esso contenute portandole dallo stato di isolamento allo stato di conduzione. L'intenzione di Calzecchi-Onesti era stata certamente quella di sviluppare uno strumento sicuro ed efficace, da utilizzarsi per la premonizione di temporali e di eventi sismici, tema allora attualissimo in molti Atenei e presso alcuni avanzati Istituti scientifici (esempio, l'Osservatorio Ximeniano di Firenze).

Temistocle Calzecchi-Onesti studiò sistematicamente il fenomeno delle polveri metalliche disperse, capaci di divenire conduttrici sotto l'effetto di una scarica elettrica; il fenomeno era stato già osservato da numerosi fisici fin dal 1835.

L'altro aspetto del *cannellino* era legato all'azione meccanica necessaria per riportare in isolamento il dispositivo; già nella prima comunicazione del 1884 (Calzecchi-Onesti 1884), e in quelle successive del 1885 (Calzecchi-Onesti 1885) e del 1886 (Auerbach, Calzecchi-Onesti, 1886), il dispositivo presentato da Calzecchi-Onesti era dotato di una manovella la quale serviva a ruotare il tubetto contenenti le polveri per ripristinare la situazione di non conduzione del dispositivo. L'uso della manovella era certamente molto più pratico e consentiva di percepire l'arrivo di una scarica elettrica mediante un telefono che è parte integrante del ricevitore descritto dallo stesso Calzecchi-Onesti.

3. Il *coherer*

Uno strumento analogo al *cannellino* sarà proposto, sei anni dopo, nel 1890, da Branly col nome di *radio-detector*, e sarà chiamato *coherer* da Sir Oliver Lodge nel 1893.

Lo studio delle polveri più adatte è comune anche alle ricerche sul *coherer*, ma l'azione meccanica per il ripristino delle condizioni di isolamento del dispositivo è risolto mediante l'uso di un martelletto, che, percuotendo il tubetto, rompe la continuità delle polveri.

Confermata dalle date, la priorità di Calzecchi-Onesti è riconosciuta dallo stesso Guglielmo Marconi, che il 2 marzo 1899 a Londra, in una riunione della "Institution of the Electrical Engineers", così si espresse:

Uno degli elementi principali del mio ricevitore è il tubo sensibile o coesore, scoperto, credo di aver ragione nell'asserirlo, dal Prof. Calzecchi-Onesti di Fermo, perfezionato da Branly e modificato da Lodge e da altri (Marconi 1899, p. 1).

Oggi, è universalmente accettato che l'invenzione del *coherer* o *coesore*, chiamato originariamente *cannellino*, sia dovuta a Temistocle Calzecchi-Onesti (Calamia, Maneschi 2016).

Marconi conosceva Calzecchi-Onesti, il professore di Fermo, poiché, come abbiamo detto, lo citò nel corso della sua conferenza nel 1899; ma è lecito chiedersi se fosse a conoscenza dei suoi esperimenti.

Marconi, infatti, era molto sensibile agli studi condotti nei vari laboratori sulla nuova scienza che andava affermandosi. Testimonianza ne è il fatto che manifestò un così grande interesse, per esempio, per gli studi di Padre Guido Alfani, impegnato ad applicare la nuova tecnica di trasmissione in campo sismologico; c'è una fitta corrispondenza tra i due, con scambio di consigli e risultati e Marconi andò a Firenze più di una volta a trovarlo per osservare e conoscere la sua attività (Calamia, Gherardelli 2017).

I punti nevralgici del *coherer* erano certamente le polveri inserite nel cilindretto e il sistema (manovella o martelletto) per ripristinare la condizione di isolamento tra gli elettrodi.

Gli studi sul *coherer* si concentrarono principalmente sulla natura e composizione delle polveri, perché condizionavano fortemente il passaggio dalla condizione di isolamento a quella di conduzione. Esistono importanti pagine, non solo di Calzecchi-Onesti, ma anche di Branly, di Lodge e di Marconi sui risultati ottenuti variando la composizione di tali polveri.

Minore attenzione ebbe l'altro aspetto, quello del come riportare il dispositivo dallo stato di conduzione a quello di isolamento. Successivamente, nel 1912, la valvola di Fleming dette una svolta definitiva al problema, anche se ancora negli anni '20 il *coherer* a martelletto era ampiamente utilizzato.

4. Esperimenti e risultati

Nella comunicazione precedentemente citata, era stata presentata un'analisi critica sul lavoro di Calzecchi-Onesti (Calamia, Manneschi 2016), compiuta recuperando o ricostruendo alcuni apparati specifici.

Infatti, da alcuni depositi dell'Osservatorio Ximeniano di Firenze, custodito dagli Scolopi, erano emerse apparecchiature, in precario stato di conservazione, che facevano parte del Laboratorio di Radiotecnica che Padre Guido Alfani aveva costituito tra il 1904 e il 1940 e che avevano portato alla realizzazione, nel 1912, di un primo ricevitore radio col quale nella notte fra il 16 e il 17 marzo, egli riuscì a ricevere l'ora esatta dall'Osservatorio astronomico di Parigi.

Questi componenti recuperati sono stati restaurati, in parte ricostruiti, e resi funzionanti. In particolare, su due di questi ricevitori, uno (1923) col *coherer* a martelletto, secondo lo schema di Marconi e l'altro secondo lo schema di Calzecchi-Onesti (1884-85-86), sono state condotte misure sistematiche con strumentazione moderna, in grado certamente di rilevare differenze che la strumentazione dell'epoca non poteva consentire. Nelle figure 1 e 2 sono mostrati i due ricevitori.



Fig. 1. Ricostruzione, su tavola, del Ricevitore di Calzecchi-Onesti, secondo la descrizione riportata nel "Nuovo Cimento", 1885 (Calzecchi-Onesti 1885, p. 39).



Fig. 2. Radiorecettore di Padre Alfani (restaurato). Questo ricevitore seguiva lo schema elettrico del ricevitore di Marconi. È stato ricostruito il relativo trasmettitore con Rocchetto di Ruhmkorff (1923) (Calamia, Manneschi 2011, p. 29).

Le misure effettuate e i dati disponibili sono numerosi e sono raccolti in comunicazioni interne; non sembra utile riportarli in questa sede, ma sono comunque disponibili. Riassumiamo di seguito i risultati essenziali.

- a. Marconi rilevò che il comportamento del *coherer* si adattava molto bene al funzionamento sequenziale del telegrafo Morse e inserì nel suo trasmettitore a rocchetto di Ruhmkorff un tasto per trasmettere un segnale telegrafico. Il suo obiettivo era la trasmissione a distanza e il rocchetto di Ruhmkorff, la cui scarica emette oscillazioni libere, gli dette la possibilità di ricevere bene con il *coherer* a martelletto un segnale di tale tipologia. Però, il risultato verificato con le misure menzionate mette in evidenza che:
 - il tempo complessivo necessario per l'azionamento telegrafico nella scrittura è mediamente 200 millisecondi per carattere,
 - il tempo complessivo necessario per il suo ripristino è 180 millisecondi.

- b. Calzecchi-Onesti aveva un obiettivo diverso: la percezione di scariche elettrostatiche naturali o prodotte da una macchina elettrostatica. Non disponeva di un rocchetto di Ruhmkorff. Il fruscio della scarica, generato dalla variazione della corrente della pila nella fase di reset, poteva essere ascoltato in cuffia e per questo inserì, già nel 1884, un telefono nel proprio ricevitore e quindi poté udire il suono prodotto dal *coherer* nella fase di ripristino. Le prove effettuate confermano il fatto e il *coherer* a manovella, di cui è parte integrante il telefono, mette in evidenza che:
 - il tempo necessario complessivo per ottenere la conduzione è 200 nanosecondi,
 - il tempo di ripristino dell'isolamento è pari a 20 millisecondi.

I tempi rilevati sono stati ottenuti con una velocità di rotazione della manovella pari a due giri al secondo, velocità idonea per una rotazione manuale. Tuttavia è lecito pensare che motorizzando la rotazione della manovella si potrebbe aumentare tale velocità e quindi ridurre i tempi di isolamento, mantenendo la stessa fluidità funzionale. Le due situazioni sono completamente diverse e diversamente finalizzate. Tuttavia è utile rilevare che Calzecchi-Onesti nel proporre il suo dispositivo di rilevamento di scariche elettrostatiche, costruì un ricevitore molto versatile; non poté provarlo sotto questo aspetto, perché non disponeva di un generatore di onde elettromagnetiche concomitanti, ma misure effettuate con un rocchetto di Ruhmkorff di piccola potenza ne hanno evidenziato anche l'ottimo comportamento nella distanza di 100 metri, rispetto ai dieci metri ottenibili con la macchina di Wimshurst (Calamia, Manneschi 2016).

5. Conclusioni

È naturale chiedersi perché Marconi non abbia usato il *coherer* a manovella di Calzecchi-Onesti, da lui comunque riconosciuto come l'inventore del *coherer*.

Dei due elementi fondamentali del *coherer*, le polveri metalliche e il metodo per ripristinare le condizioni di isolamento del dispositivo, forse più utile, ai fini delle esperienze di Marconi, sarebbe stato il secondo.

Possiamo affermare con certezza che se Marconi avesse usato il *coherer* a manovella e ricevuto il segnale in cuffia, avrebbe almeno triplicato la velocità di trasmissione e di ricezione; il limite a tale velocità sarebbe stato determinato solo dall'abilità del telegrafista e non dall'inerzia dei relè e dell'equipaggio scrivente del telegrafo.

Altro aspetto, forse casuale ma non secondario, è che Calzecchi-Onesti inserendo nel suo ricevitore il telefono (e il galvanometro), otteneva un'ottimizzazione sintonica dell'antenna rispetto all'onda trasmessa e la possibilità di valutare la migliore sensibilità delle limature e quindi la loro scelta. Situazioni che un genio come Marconi avrebbe certamente saputo utilizzare al meglio.

Bibliografia

- Auerbach F., Calzecchi-Onesti T. (1886). "Sulla conduttività elettrica delle polveri metalliche". *Il Nuovo Cimento (1877-1894)*, 20 (1), pp.72-80.
- Calamia M., Gherardelli M. (2017). *Ora esatta: la prima applicazione scientifica dei collegamenti a distanza*, in Campanile B., De Frenza L., Garuccio A. (eds), *Atti del XXXVII Convegno annuale SISFA* (Bari, 2017 September 26-29). Pavia: Pavia University Press.
- Calamia M., Manneschi G. (2011). "Il recupero degli apparati radio dell'Osservatorio Ximeniano: più che un restauro". *Kermes: la rivista del restauro*, 83, pp. 25-34.
- Calamia M., Manneschi G. (2016). *Temistocle Calzecchi-Onesti e le sue invenzioni: una storia da rileggere*, in S. D'Agostino (ed), *Proceedings of VI International*

- Conference of History of Engineering* (Naples, 2016 April 22 - 23). Napoli: Cuzzolin Ed., pp. 647-654.
- Calzecchi-Onesti T. (1884). “Sulla conduttività elettrica delle limature metalliche”. *Il Nuovo Cimento (1877-1894)*, 16 (1), pp. 58-64. <https://doi.org/10.1007/BF02737267>.
- Calzecchi-Onesti T. (1885). “Sulla conduttività elettrica delle limature metalliche”. *Il Nuovo Cimento (1877-1894)*, 17 (1), pp. 38-42. <https://doi.org/10.1007/BF02817774>.
- Marconi G. (1899). *La Telegrafia senza Fili*, in *Scritti di Guglielmo Marconi*, Roma: R. Accademia d'Italia, 1941, pp. 1-24. [Conferenza pronunciata da Guglielmo Marconi il 2 marzo 1899 ad una riunione della *Institution of the Electrical Engineers* di Londra.]

THE FAR ROOTS OF SCIENTIFIC THOUGHT

Davvero Archimede, nel suo *Arenario*, critica Aristarco e mostra che l'infinito potenziale di Aristotele è vero? La scuola Italic in astronomia tra il quinto, quarto e terzo secolo a.C. e la reazione platonico-aristotelica

Giuseppe Boscarino – Cultural Association “S. Notarrigo”, The Italic School Sor-tino, Italy – gpp.bos@libero.it

Abstract: The aim of my contribution on the historical level is to be able to remove, on the one hand, a historical-epistemological prejudice, on the meaning of an alleged criticism of Archimedes to Aristarchus, in his *Sandreckoner*, when Archimedes gives us an interesting testimony, on the presence in ancient Greek thought, of a heliocentric system; on the other hand, to get rid of a historical-philosophical prejudice, of an alleged influence of Platonic-Aristotelian thought concerning the nature of number and potential infinite, on Archimedes, an astronomer, mathematician and philosopher.

Keywords: λόγος, ἀναλογία, μονὰς, ἄπειρον, mathematical idealization, physical interpretation.

1. Introduzione

In tanti miei scritti come di contributi a congressi ho avuto modo di soffermarmi sul pensiero di Archimede, matematico, fisico, filosofo, come pure sul suo *Arenario*, sul complesso significato di quest'opera nella storia della scienza e del pensiero (altro che opera curiosa, bizzarra, mero gioco linguistico!), nel momento in cui ci offre interessanti notizie su Archimede e la cosiddetta scienza greca, smentendo inveterati e mistificanti luoghi comuni su di essi, primo tra tutti quello di una scienza greca autoctona ed univoca, rispetto alla quale invece si è preferito scrivere di tradizioni di pensiero dell'area del Mediterraneo centro-orientale tra V, IV e III sec. a. C., su cui ritorno a conclusione del mio contributo. Si è parlato di una presunta influenza di Aristotele su Archimede a proposito del suo *Arenario*:

C'est in effect dans la conception aristotelique du nombre que nous croyons pouver trouver cette matrice philosophique de la recherche qu'Archimède effectue dans l'Arénaire et qui la conduit, nous l'avons vu, à affirmer l'infinité du systeme numérique. L'*Arenario* “répond à la nécessité d'adapter la notation numérique à l'idée de l'infinité potentielle de l'ensamble des nombres naturelles” (Delsedime 1970, pp. 345-359).

Ma soprattutto in tutti gli interpreti di una presunta critica di Archimede ad Aristarco, in relazione ad una *impossibile proporzione* da questi stabilita, con ciò contravvenendo alle regole della matematica del tempo, ci è sembrato opportuno, in particolare, soffermarci su questi due aspetti, dando una nostra interpretazione in merito, dopo aver prima però dato una nostra attenta traduzione dei brani archimedei, oggetto di superficiale e non rigorosa attenzione filologica. ed epistemologica da parte dei tanti traduttori e studiosi. Tutto questo sarà esaminato, tenendo in parte presenti i complessi rapporti come erano concepiti nelle scuole filosofiche del V, IV e III sec. a. C. tra fisica, astronomia e matematica, per interpretare la presunta critica di Archimede ad Aristarco, come pure brani del libro II,13, del *De caelo*, di Aristotele, 1973, mentre per quanto riguarda il presunto inveramento dell'infinito potenziale nella costruzione numerica archimedeica dell'Arenario saranno tenuti presenti i brani aristotelici del libro III,7 della *Fisica*.

2. Testimonianze di Archimede su Aristarco e di una sua presunta critica matematica a quest'ultimo, astronomo (Boscarino 2010, nostra traduzione)

Aristarco di Samo, pubblicò *raffigurazioni* (=γραφάς) di certe ipotesi, le cui premesse portano ad ammettere che il cosmo è molto più esteso di quello che ora abbiamo chiamato così. Infatti egli suppone che le stelle fisse e il sole se ne stanno immobili, che la terra sulla circonferenza di un circolo giri intorno al sole, il quale sta nel mezzo dell'orbita, e infine che la sfera delle stelle fisse, situata attorno allo stesso centro del sole, è così grande che hanno la stessa *corrispondenza* (ἀναλογία) il cerchio, sul quale egli suppone che la terra giri, con la distanza delle stelle fisse e il centro di una sfera con la sua superficie. Ma è evidente che *questo è impossibile*; infatti non si può ammettere che il centro di una sfera, non avendo alcuna grandezza abbia alcun *rapporto* (λόγος) con la superficie di questa sfera. Si può tuttavia *ritenere che Aristarco voglia intendere* che, se si considera la terra come il centro del mondo, il rapporto (λόγος) della terra con ciò che noi "chiamiamo mondo" è lo stesso di quello della sfera, che contiene il circolo attorno al quale si suppone che la terra giri, con la sfera delle stelle fisse; *in verità egli adatta le dimostrazioni dei fenomeni ad una ipotesi di questo tipo*, e sembra in particolare supporre che la grandezza della sfera, sopra la quale egli suppone che la terra si muova, sia uguale a quella che noi chiamiamo *mondo*.

3. Traduzioni ed interpretazioni della critica di Archimede ad Aristarco

Traduttori e interpreti (Frajese 1974; Ver Eecke 1921; Dreyer 1970; Dijksterhuis 1956; Schiaparelli 1998) sembrano concordare sulla tesi di una critica, nei brani da noi riportati, soprattutto di natura matematica ad Aristarco circa quella che Archimede chiama, ἀναλογία, ovvero il rapporto di un centro, equiparato ad un punto, e la sua superficie sferica *proporzionale(!?) o corrispondente*, come noi invece preferiamo tradurre, al

rapporto mondo-sfera stelle fisse (che è quanto proprio voglia intendere Aristarco, precisa Archimede nel seguito del suo scritto). Ma intanto citiamo qualcuna di queste traduzioni-interpretazioni. Per Frajese:

[...] circa la proporzione che Aristarco stabilisce il senso matematico di Archimede si ribella: un punto non ha un rapporto con una superficie. Esso è in contrasto con il postulato di Archimede come con la definizione IV del libro V degli Elementi di Euclide. Archimede rimetterebbe le cose a posto dal punto di vista matematico reinterpretando il pensiero di Aristarco (Frajese 1974, pp. 448).

Questi traduce *proporzione e rapporto*, come lo Heath nella sua opera (Heath p. 222). Per P. Ver Eecke:

Archimede nella sua proporzione non rispetterebbe la definizione di punto di Euclide (Libro, I, def.1, Gli Elementi), per cui è portato a rigettarla (Ver Eecke 1917, pp. 355).

Per Dreyer:

Archimede non cerca di produrre argomenti pro o contro quest'ipotesi, ma si limita ad obiettare contro l'idea non matematica che possa sussistere un qualche rapporto tra un punto, che non ha grandezza, e la superficie di una sfera (Dreyer 1970, pp. 34-35).

Dijksterhuis, volendo salvaguardare il linguaggio di Aristarco, riportato da Archimede, attraverso quello usato in altre sue opere pervenuteci, per esempio che la terra starebbe in relazione ($\lambda\acute{o}\gamma\omicron\varsigma$) alla luna come un punto, scrive:

[...] *l'espressione punto è da interpretare, come se fosse un punto, like a point, il centro del mondo rispetto alla superficie della sfera delle stelle fisse*. Per Schiaparelli 5. *Il modo con cui egli esprimeva l'immensa distanza delle stelle incontrò la critica di Archimede... L'interpretazione di Archimede è qui interamente arbitraria e coniata apposta per il suo bisogno* (Dijksterhuis 1956, tomo I, pp. 431-433).

Essa insomma è per Schiaparelli solo una *sofisticheria*.

4. Matematica, fisica ed astronomia nel III sec. a. C. Archimede interprete e non critico di Aristarco, ma critico di Aristotele

Nell'Aristarco dell'Arenario vediamo riflettersi una critica di natura matematica, epistemologica e filosofica ad Aristotele, per quanto Aristotele afferma nel suo *De caelo*, sostenendo l'impossibilità per la terra di un suo qualsiasi movimento e della sua necessità di stare al centro, a cui poi egli aggiunge a conferma: E una prova a sostegno di questo ce lo danno anche le enunciazioni dei matematici in materia astronomica: i fenomeni infatti che noi osserviamo negli spostamenti delle figure secondo cui è determi-

nata la disposizione degli astri, si verificano in *accordo con l'ipotesi che la terra posa nel centro dell'universo*. (*De caelo*, II,14, 297a). In che cosa possiamo individuare un indizio per questa nostra interpretazione intanto dal punto di vista storico-biografico? Dal fatto biografico circa Aristarco, frequentatore in età giovanile del Liceo di Aristotele in Atene. Scrive Schiaparelli, 1926: *Aristarco di Samo è soprattutto celebre come astronomo e come matematico; ma è poco divulgato aver egli nei suoi anni giovanili atteso alla filosofia peripatetica sotto Stratone di Lampsaco, che succedette nel Liceo a Teofrasto successore di Aristotele, che trattò con predilezione le cose naturali, onde ebbe il nome di fisico*. Poi, a nostro parere, a ben interpretare il testo archimedeo non vi è nessuna espressa critica ad Aristarco. *Il questo è impossibile*, non si riferisce tanto all'espressione dal punto di vista della sua *interpretazione matematico-idealizzazionale, o figurativa*, se si vuole *linguistica*, degli enti geometrici, quanto al punto di vista della loro *interpretazione fisica, delle grandezze e delle loro misure*. La critica, dal punto di vista delle osservazioni o delle apparenze, a nostro parere, è rivolta, proprio usando il punto di vista matematico, da Aristarco, invece ad Aristotele e a quanti chi per lui pensano di poter salvare le apparenze ponendo al centro del cosmo la terra immobile, sol perché non sono osservate negli astri spostamenti, in ciò appoggiandosi, proprio al punto di vista dei cosiddetti matematici del proprio tempo, come da noi prima citato. Per spiegare ciò, leggiamo come veniva concepito il rapporto fisica- astronomia-matematica, nel III sec. a. C., al tempo di Aristarco, quale ci viene tramandato da una importante testimonianza riportata da Simplicio nel suo commento alla *Fisica* di Aristotele, citando a sua volta Gemino, I sec. d.C. che commenta a sua volta *la Meteorologia* di Posidonio:

Non è compito dell'astronomo stabilire che cosa sia immobile per natura e di che genere siano le cose mosse, ma elaborando ipotesi nelle quali alcune cose sono in moto e altre sono in quiete egli considera quali ipotesi siano in accordo con i fenomeni osservati nei cieli.

Ad Aristotele, e a chi come lui si appoggia ai matematici per sostenere la immobilità della Terra, sembra pertanto rispondere Aristarco, da matematico, proprio usando da matematico il campo delle osservazioni e di come salvarle, spiegarle. Infatti Aristarco sembra osservare che, se noi poniamo, come ci testimonia Archimede nel brano citato, la terra in movimento attorno al sole e le stelle molto lontane, non osserveremo nel movimento degli astri alcun spostamento, perché la terra ci sembrerebbe essere un punto rispetto alla superficie della sfera del cielo, non diversamente da come immagina, descrive, pensa la sfera il matematico rispetto al suo centro, che lo considera come se fosse un punto, non mettendoli in rapporto quali grandezze, ma quali semplici figure geometriche ideali (raffigurazioni). E in questo Aristarco non si comporta diversamente dal matematico Euclide, quando nei suoi *Elementi* usa spiegazioni, termini, o raffigurazioni ideali (non *definizioni*, come solitamente si traducono i suoi ὄροι) per descrivere il suo cerchio in corrispondenza ad un punto, che chiama centro. (vedi Libro, I, XV e XVI in *Elementi*). Se in parte in questo senso Aristarco resta un matematico, nel senso euclideo, dall'altra in contrasto ad Aristotele, da astronomo, osserva come la sua ipotesi di un cosmo (distanza terra-sole)

ridotto ad un punto, essa stessa salva i fenomeni, poiché il non movimento degli astri è anch'esso compatibile con la sua ipotesi, perché essi, considerata la loro grandissima distanza, non possono mostrare in termini di movimenti alcuna irregolarità. I vecchi aristotelici e i moderni aristotelici, i traduttori, nel loro cieco empirismo, poiché si attengono alle sole apparenze, non sapendo distinguere nelle costruzioni scientifiche il piano idealizzazionale o teorico dal piano della loro interpretazione fisica e della misura, leggono gli uni Aristarco, gli altri Archimede in chiave antiAristarco, per cui Archimede deve spiegare, già agli aristotelici del suo tempo, che per Aristarco il punto non è un ente metafisico, assoluto, come per Aristotele, ma un ente che è definito entro una teoria, per cui già Democrito poteva scrivere che esistono atomi grandi quanto un mondo, ovvero che ci sono enti che dentro un contesto teorico si comportano come se fossero un punto o elemento o atomo, poiché questi sono concetti relativi. L'ipotesi di Aristarco insomma non viola nessuna teoria delle grandezze né di Euclide né di Archimede, si muove solo dentro una diversa concezione di teoria scientifica.

5. Il senso antiaristotelico della teoria dei grandi numeri di Archimede

Per cogliere questo senso, intanto, è giusto riportare, non solo il testo di Aristotele, ma anche le due tesi che Archimede, con la sua teoria dei grandi numeri, a nostro parere a forte impronta filosofica, matematica e soprattutto epistemologica, intende confutare.

Tesi 1. Non è possibile limitare con un numero la molteplicità dei granelli di sabbia.

Tesi 2. Anche ammesso che essa fosse limitabile con un numero, non sapremmo costruire il nome di quel numero. Archimede dimostra invece che non solo 1'. è possibile limitare con un numero quella molteplicità (anche nel caso che riempisse il tutto fisico, che si ritiene sferico, compreso dal cielo delle stelle fisse, che ne sono il suo limite), ma anche 2'. di poter costruire numeri ancora molto più grandi. (e sempre più grandi, di ogni numero dato, compreso quello indicante la molteplicità dei granelli di sabbia, compresi dal tutto fisico sferico finito, limitato dal cielo delle stelle fisse, preso in tutto il suo volume o grandezza.) Se si legge Aristotele, Fisica, III,7, si nota come la confutazione di 1.e 2. sia una sfida, dal punto di vista fisico, filosofico, matematico ed epistemologico, ai divieti e alle concezioni aristoteliche circa la natura del numero, dell'infinito potenziale, vuoi in senso ideale, vuoi in senso fisico, come della parola uno che Aristotele chiama *to en*, ma che Archimede chiama *monàs*. Per Aristotele il numero è una molteplicità di unità, le quali in quanto tali sono indivisibili (*adiaireton*). Sicché per Aristotele non può esistere o non ha senso concepire un numero in quanto mero ente ideale o nome, ma solo come numero di unità, né esso può stare separato dalla molteplicità, se non esiste a suo fondamento intanto una molteplicità fisica data, né è separabile ($\chi\omega\rho\iota\sigma\tau\acute{o}\varsigma$ =essere altro) da essa, per cui non si può dare un infinito potenziale numerico, se non è data a sua volta come fondamento una molteplicità che cresce incessantemente, come è il caso del tempo e il numero del tempo. Per Aristotele poi non è possibile che ogni grandezza determinata venga pensata come superata: perché, allora, esisterebbe qualcosa più grande del cielo. (ibidem) E questo perché ancora scrive: Quanto grande infatti si ammette che una cosa sia in potenza, altrettanto si deve ammet-

tere che essa sia in atto. (ibidem). Nel momento in cui Archimede, col suo sistema numerico, delle misure, come delle grandezze, confuta le tesi 1.e 2., da noi richiamate, non solo sfida e rimuove il divieto aristotelico che non possa essere data o pensata una grandezza più grande, come scrive, del cielo, che rappresenta il divino, il sovrannaturale, dando numeri più grandi, di quello che lo limita, ma ancora costruisce numeri a cui non sono sottesi unità fisiche, come pensa che debba avvenire Aristotele, ma solo ideali, per cui, se per Aristotele un infinito numerico potenziale può esistere, questo è possibile solo se già la realtà fisica lo permetta, come nel caso del tempo e de numero del tempo. La costruzione di un infinito potenziale numerico puramente ideale non solo allora non è possibile, ma se lo si volesse costruire o sarebbe una pura follia nominalistica o ancora una sfida al divino, al sovrannaturale, perché ciò che è pensabile in potenza, deve poi dover essere in atto, scrive ancora Aristotele. Nel qual caso di un infinito potenziale possibile si aprirebbe la strada alla possibilità della sua esistenza, stando al suo assioma logico-ontologico, di cui sopra, di un universo fisico aperto, non-finito, certamente senza più un centro ed omogeneo, senza distinzione di natura tra cielo e terra. Che è quanto Aristotele non vuole ammettere, che sarebbe quello atomistico di Democrito. A questi Archimede si riferisce nelle sue dimostrazioni geometriche e meccaniche. La costruzione numerica archimedea è costruita su una concezione epistemologia, delle teorie scientifiche, assolutamente diversa da quella aristotelica. Come abbiamo visto per Aristotele il numero è formato da tanti uno, *to en*, che sono indivisibili. Ebbene questi termini, uno, indivisibile, in Aristotele assumono un significato assoluto, diciamo, metafisico, che identifica col termine in quanto tale. Il termine non ha un significato convenzionale, relativo al suo contesto teorico in cui è definito. In Archimede la *monàs*, l'uno, è tale solo dentro un contesto teorico, come lo sarà quello di indivisibile, in altri contesti teorici, a proposito del suo metodo o *tropos* geometrico-meccanico.

6. La scuola italiana in astronomia tra V, IV e III sec. a. C. e la reazione platonico-aristotelica

Da quanto detto, emerge chiaramente come lo scritto di Archimede sia da collocare dentro quella che noi già in nostri scritti abbiamo chiamato tradizione di pensiero italiana della scienza. Indicazioni in tal senso ancora ci vengono vuoi da scritti di Aristotele, dal suo *De caelo*, già da noi citato, come da scritti di valenti studiosi dell'astronomia greco antica. Scrive Schiaparelli, 1926: Questa grande scoperta della sfericità della Terra, che certamente non deve stimarsi meno di quella della gravità, rimase per lungo tempo confinata presso le scuole italiane, perché nella Grecia propria Anassagora l'ignorava ancora un secolo dopo, Socrate ne dubitava, Platone medesimo non l'accettò che in uno stadio avanzato delle sue riflessioni sulla costituzione dell'universo. Ora se è vero quanto scrive lo Schiaparelli, è altrettanto vero quanto da noi si ritiene, ovvero che né in Atene né in una presunta Grecia, mai esistita né sul piano politico, né sul piano linguistico, né sul piano culturale si è costruita una tradizione di pensiero univoca, mono-centrica, detta greca. È vero invece che soprattutto nell'area del Mediterraneo centro orientale, tra il V, IV e III secolo a. C. si sono costruite condizioni storiche particolari, nate dalla fu-

sione di diverse etnie, che hanno dato luogo a tradizioni di pensiero in forte contrasto tra loro, che noi chiamiamo tradizione italica e ionica, sulla indicazione di Diogene Laerzio.

Se si pensa che già i siracusani Ecfanto e Iceta parlavano di movimenti della terra nel V sec. a. C, e Archimede, III sc. A. C. ci lascia l'importante testimonianza su Aristarco, mentre in questi stessi secoli nella grande Atene si bruciano le opere di Protagora, e Anassagora è costretto a fuggire, mentre nelle scuole delle terre italiche si respira tanta libertà di pensiero, di conoscenze, di modi di concepire il linguaggio, le teorie, allora bisogna dire che fu nel Mediterraneo centro-orientale che nacquero e si scontrarono tradizioni di pensiero al di là di mere ristrette appartenenze geografiche o etniche.

7. Conclusione

I siracusani Ecfanto ed Iceta condividono con Democrito, di Abdera, idee atomistiche; dentro la tradizione italica si concepiscono movimenti della Terra, teorie alternative circa la sua posizione, vedi *Filolao, di Crotone*, ma anche *Eraclide Pontico*; dentro di essa ancora si concepisce l'idea di un universo aperto, acentrico, omogeneo, quale quello atomistico. Ebbene queste concezioni furono fortemente avversate da un'altra tradizione di pensiero, che noi chiamiamo *ionica*, che Schiaparelli individua in *Platonici ed Aristotelici*, nel nome della difesa di arcaiche tradizioni fatte di miti, pregiudizi, presunte entità sovranaturali, ingenua visioni epistemologiche e filosofiche (ma si veda su tutto questo Boscarino, 2010,2014, 2015, 2016).

Bibliografia

- Aristotele (1973). *Opere, Fisica, Del cielo*. Russo A. (a cura di). Bari: Laterza.
- Boscarino G. (2016). *Tradizioni di pensiero. La tradizione filosofica italica della scienza e della realtà*. Aracne: Roma.
- Boscarino G. (2010). *Un mondo di sabbia. L'Arenario di Archimede e la tradizione di pensiero italica della scienza*. Padova: Altro Mondo editore.
- Boscarino G. (2015). "Archimedes' Psammmites and the Tradition of Italic Thought of Science". *Advances in Historical Studies*, 4(1), pp. 8-16.
- Boscarino G. (2014). "The Italic School in Astronomy: From Pythagoras to Archimedes". *Journal of Physical Science and Application*, 4 (6), pp.385-392.
- Delsedime P. (1970). "L'infini numérique dans l'Arénaire d'Archimède". *Archive for History of Exact Sciences*, I (5), pp. 345-359.
- Dijksterhuis E.J. (1956). *Archimedes*. Copenhagen: Einar Munksgaard.
- Dreyer J.L.E. (1970). *Storia dell'astronomia da Talete a Keplero*. Milano: Feltrinelli, pp. 34-35.
- Frajese A. (a cura di) (1974). *Opere di Archimede*. Torino: Utet.
- Heath T. L. (ed) (2002). *The Works of Archimedes. The Sand Reckoner*. New York: Dover Publications.

Schiaparelli G.V. (1998). *Scritti sulla storia della astronomia antica*. 3 Tomi. Milano: Mimesis.

Ver Eecke P. (ed.) (1921). *L'arénaire*, in *Les oeuvres complètes d'Archimède*. Paris, Bruxelles: Desclée, De Brouwer et Cie.

From Euclid to Ptolemy: representation and explanation of phenomena

Renato Migliorato – Retired from University of Messina – renato.migliorato@gmail.com

Abstract: In the *Almagest*, if we consider the structural complexity of the system, it's hard to deny the extraordinary qualities of Ptolemy. Concepts as *eccentric* and *equant* appear there as ingenious solutions, able to represent celestial motions with very great precision for that time. So, it is difficult to not suppose in his work the awareness that the same results, in terms of correspondence with observational data, could be had with different and simpler modeling. In similar cases, Archimedes, that Ptolemy certainly had to know, choose the simplest or more convenient modeling. The same we can say on Euclid and other coeval scholars. We can retain, so, that Ptolemy makes knowingly his choice for the reasons explained in its philosophical and metaphysical premises. Here we want to analyze the though transformations that can have determined the abandonment of the scientific paradigms of the Hellenistic age for a line characterized by dogmatic and metaphysical presuppositions. We consider, also, what of that historical passage can today still suggest.

References

- Acerbi, F. (2007), *Euclide, Tutte le opere*, R.c.S., Milano.
- Ashemand, J.M. (1822), *Ptolemys Tetrabiblos*, London.
- Giardina, G. R. (2003), *Erone di Alessandria. Le radici filosofico-matematiche della tecnologia applicata*, CUECM, Catania.
- Marcacci, F. (2009), *Alle origini dell'assiomatica. Gli Eleati, Aristotele, Euclide*. Pitagora Ed., Roma.
- Migliorato, R. (2017), *Sulle origini di un paradigma scientifico*, Atti del XXXVII Convegno annuale SISFA, Bari 2017.
- Migliorato, R. (2013), *La ragione e il fenomeno*, Pitagora, Roma.
- Migliorato, R. (2013), *Archimede. Alle radici della modernità tra storia scienza e mito*, pubblicazione digitale, Dip. Mat- Univ., Messina.

The Mechanics of Hero in Persian manuscripts between translation and innovation

Giuseppina Ferriello – Istituto Tecnico Nautico Nino Bixio – Piano di Sorrento –
giuseppina.ferriello@virgilio.it

Abstract: The chance discovery, in the in the early nineties, of the Persian version of the 2nd Book of the Mechanics of Heron reached France during the reign of Louis XIV gave rise to a new line of research on the transmission of mechanics between Antiquity and the Renaissance. Nowadays, this topic is of great interest for the Historians of Science who want to recognize significant sources to tell innovative things about ancient texts. The availability of a fair number of Persian texts allow deepening the critical knowledge of Heron's work, putting forward hypotheses on the topicalities and differences of the different versions, as well as identifying additions elaborated in the form of paraphrases and exercises that combine simple machines. The *katir al-rafa* (poly-lifters) are the closest witnesses of the Renaissance and of Leonardo's machines.

Some manuscripts refer to the Arab tradition of Qusṭā b. Lūqā, others, however, deviate from each other, all offer ideas for further study on the transmission of Mechanics; all are interesting for a deeper understanding of the history of mechanics.

References

- AA.VV., «Miras-e Elmi-ye Eslam va Iran, Scientific Heritage of Islam & Iran», n° 9, Spring & Summer 2016, pp. 6-34
- Abattouy M., al-Hassani S., *The corpus of al-Isfizārī in the Sciences of Weights and Mechanical Devices*, London, Al-Furqān, 2015
- Ferriello G., Gatto M., Gatto R., *The Baroullkos and the Mechanics of Heron*, Firenze, Olschki, 2016
- Ferriello G., *La diffusione della Meccanica di Erone in ambito iranico*, in P. Caye, R. Nanni, P.D. Napolitani (eds), *Scienze e Rappresentazioni*, Leo S. Olschki, 2016, pp. 69-87
- G. Ferriello R. Gatto, *Apollonius Mechanicus, Isfizārī's persian version of the treatise on the pulleys and two other anonymous Persian texts*, In *Bollettino di Storia delle Scienze Matematiche*, in uscita.

Le Fonti Ellenistiche dell'*Almagesto* di Tolomeo

Alessandro Amabile – Università degli Studi di Napoli Federico II –
alessandro.amabile@unina.it

Giovanni Covone – Università degli Studi di Napoli Federico II –
giovanni.covone@unina.it

Abstract: Given the serious doubts concerning the origin of Ptolemy's astronomical models, we argue that the *Almagest* could be understood as a distorted version of an older heliocentric astronomical theory. This theory, that we identify with Lucio Russo's tentative reconstruction of Hipparchos' latest astronomical theory, was embedded in some mechanical *planetaria* still available to Ptolemy, who based his astronomical models on a study of these devices informed by his own Aristotelian philosophical views. We anticipate some elements of a different interpretation of the *Antikythera Mechanism* that hopefully will shed light on some historically relevant unanswered questions.

Keywords: Ancient Mathematical Astronomy, *Almagest*, *Antikythera Mechanism*.

1. Introduzione

Il *Trattato Matematico*, noto ai più sotto il nome di *Almagesto*, è la monumentale opera che da sola ha permesso al suo autore, Claudio Tolomeo (II sec. d.C), di entrare nell'Olimpo dell'astronomia occidentale. Nei tredici libri di cui si compone l'*Almagesto*, Tolomeo affronta tutti gli argomenti tradizionali dell'astronomia greca, mettendo a punto alcuni modelli geometrici atti a descrivere i movimenti di stelle, Sole, Luna e dei cinque pianeti osservabili ad occhio nudo, e a prevederne le posizioni apparenti future per un tempo indefinito. È difficile sovrastimare l'importanza che l'astronomia tolemaica e la cosmologia ad essa sottesa hanno avuto nella storia del pensiero occidentale: tramandato dagli arabi e tornato in circolazione in Europa nel XIII secolo, l'*Almagesto* è divenuto rapidamente il testo di riferimento dell'astronomia medievale e rinascimentale. La dottrina cristiana, integrando efficacemente il geocentrismo tolemaico, contribuì a imporre l'indiscutibile autorità di Tolomeo fino al XVII secolo, quando l'ipotesi eliocentrica, riportata in vita da Niccolò Copernico, tornò ad essere prediletta da chi si proponeva di descrivere geometricamente i moti celesti.

Lo stesso Copernico dichiarò infatti nella prefazione al *De Revolutionibus* di aver tratto l'idea del moto terrestre dalla lettura di antichi testi, che riportavano idee risalenti ai pitagorici. Altre testimonianze, la più autorevole delle quali è senza dubbio quella di Archimede di Siracusa, indicano in effetti che l'ipotesi eliocentrica era già stata utilizzata da Aristarco di Samo nel III sec. a.C. per spiegare le retrogradazioni planetarie. Russo

(2010, pp. 324-356) ha sostenuto sulla base di un'approfondita analisi di fonti pretolemaiche che circa un secolo dopo, intorno alla metà del II sec. a.C., Ipparco di Nicea era giunto a sviluppare l'ipotesi di Aristarco in una teoria planetaria eliocentrica quantitativa. Mettendo insieme i diversi elementi evidenziati da Russo, il quadro risultante è quello di una teoria astronomica eliocentrica completa, frutto maturo di una lunga tradizione scientifica ed esposta probabilmente negli ultimi scritti di Ipparco. Tale teoria includeva, secondo Russo, una forma di principio d'inerzia e l'idea che le interazioni tra i corpi celesti siano reciprocamente attrattive e connesse alle variazioni di velocità dei corpi piuttosto che alle velocità stesse.

Si tratta, evidentemente, di idee di stampo *newtoniano* del tutto estranee a Tolomeo, che riprende in toto la teoria dei moti naturali di Aristotele e, coerentemente, considera «assurda» l'idea del moto terrestre (Toomer 1984, p. 45). Tale circostanza non può stupire, laddove si tenga conto del fatto che Tolomeo è, molto limpidamente, un tardo seguace di Aristotele. Più in generale, numerosi elementi impediscono di porre l'astronomia tolemaica in semplice continuità con la tradizione scientifica ellenistica, nella quale, ad esempio, la teoria aristotelica dei moti era stata destituita di fondamento, insieme all'esistenza di un qualsivoglia moto *vero* o, che è lo stesso, *assoluto* (Russo 2006, pp. 106-115).

La ricostruzione di Russo sembra essere smentita dalla testimonianza di Tolomeo, che nell'*Almagesto* rivendica il proprio primato affermando di essere il primo a riuscire laddove anche il grande Ipparco aveva fallito, cioè nel descrivere i moti planetari utilizzando solo moti circolari uniformi (Toomer 1984, p. 421). Le parole di Tolomeo, peraltro poco chiare, sembrano suggerire che sul finire del II sec. a.C. si fosse giunti a elaborare dei modelli ad *eccentrici/epicicli semplici*, capaci di spiegare solo qualitativamente le retrogradazioni dei pianeti. Il principale contributo di Tolomeo all'astronomia matematica sarebbe dunque l'introduzione di quello che nel Medioevo sarà chiamato *punto equante*, un contorto espediente che *a posteriori* si riconosce efficace in quanto mima, all'insaputa del suo inventore, il fuoco vuoto di un'ellisse kepleriana. La maggioranza degli studiosi ha ritenuto attendibile la testimonianza di Tolomeo ed è sostanzialmente concorde con questi nel considerare l'*Almagesto* l'*opera summa* di tutta l'astronomia antica.

2. Tolomeo e la *Sphairopoia*

Che sul finire dell'età aurea della scienza ellenistica si avesse a disposizione una teoria planetaria quantitativa è tuttavia provato, con buona pace di Tolomeo, dall'esistenza della *Macchina di Anticitera* (MdA), planetario meccanico risalente alla metà del II sec. a.C. e unico esemplare pervenutoci dell'antica pratica della *sphairopoia*. Tolomeo del resto compose le *Ipotesi Planetarie* rivolgendosi idealmente a costruttori di planetari, a conferma del fatto che tali congegni gli erano ben noti. Notiamo tuttavia che nel II sec. d.C. si erano probabilmente perse già da tempo le conoscenze tecniche necessarie alla costruzione di una macchina come quella di Anticitera. Non a caso le indicazioni fornite nelle *Ipotesi Planetarie* sono così vaghe da risultare inutilizzabili (Hamm 2011, p. 417), sicché nasce il sospetto che lo stesso Tolomeo non fosse in grado di realizzare i congegni di cui

parla; sono tuttavia molto significative le considerazioni svolte a proposito della *sphairopoiia* nell'introduzione dell'opera. Tolomeo descrive due modi possibili di rappresentare dei modelli astronomici mediante un congegno: un primo approccio, *più nudo*, in cui le varie parti sono mosse a mano dall'utente indipendentemente le une dalle altre, e un secondo approccio, *meccanico*, in cui i modelli sono tutti connessi l'uno all'altro e al moto complessivo del congegno. Tolomeo sceglie di seguire l'approccio più elementare, poiché a suo avviso l'approccio meccanico «oltre a fallire nel rappresentare l'*ipotesi*, mostra solo il *fenomeno*, e non *ciò che vi sta sotto*, sicché non è l'*ipotesi* ad essere esibita, bensì l'abilità del costruttore (riportato in Hamm 2011, p. 416)». Siamo dunque portati a supporre che i congegni noti a Tolomeo non fossero troppo dissimili dalla MdA, il cui principio di funzionamento corrisponde esattamente tanto a questa descrizione quanto a quella, ben più nota, fatta due secoli prima da Cicerone e riferita a un presunto planetario di Archimede (Russo 2006). Dati i criteri di selezione adottati nella trasmissione delle antiche conoscenze (Russo 2006), non è difficile in effetti immaginare come dei planetari meccanici sarebbero potuti sopravvivere più agevolmente, ad esempio, di un testo di carattere tecnico in cui era esposta una teoria astronomica. Tuttavia, a quanto pare, Tolomeo non considerava simili congegni la prova dell'esistenza di una teoria planetaria soddisfacente, punto rispetto al quale ha affermato nell'*Almagesto* il proprio primato. I congegni da lui descritti costituivano in effetti, proprio come la MdA, la realizzazione più piena del programma della matematica ellenistica, riassunto sovente nell'espressione *salvare i fenomeni*. D'altra parte, se si tiene conto dell'impostazione metodologica ed epistemologica dell'astronomia tolemaica (Amabile 2020), appare chiaro perché per Tolomeo un congegno che si limitasse a mostrare i moti *apparenti* non poteva essere considerato una rappresentazione dei *veri* moti celesti, identificati da Tolomeo con i moti circolari uniformi di cui si compongono i modelli dell'*Almagesto*. La critica di Tolomeo alla *sphairopoiia* costituisce in questo senso una dichiarazione epistemologica difficilmente equivocabile, che denota nel modo più chiaro possibile il profondo regresso metodologico che lo separa dai suoi predecessori ellenistici.

Chiaramente l'origine del successo dei modelli tolemaici risiede nella loro capacità di prevedere, seppur con qualche sbavatura, le future posizioni apparenti dei corpi celesti. Come si spiega l'efficacia predittiva dei modelli tolemaici, a fronte delle concezioni essenzialmente prescientifiche del loro ideatore? A questo proposito ci sembra opportuno ricordare i dubbi, sollevati per la prima volta da Jean-Baptiste Delambre agli inizi del XIX secolo, circa la genuinità delle osservazioni astronomiche riportate da Tolomeo nell'*Almagesto*, utilizzate tanto nella costruzione quanto nella validazione dei suoi modelli. Negli anni Settanta del secolo scorso Robert Newton (1977) ha esteso e approfondito l'analisi di Delambre, giungendo sistematicamente alla sua stessa conclusione: le osservazioni riportate da Tolomeo sembrano essere state fabbricate a partire dai medesimi modelli che le osservazioni avrebbero dovuto corroborare. Nonostante la maggioranza degli studiosi abbia accolto con scetticismo le tesi di Newton, forse anche a causa della *vis polemica* che le caratterizza, ci sembra che gli elementi di dubbio sollevati dalla sua analisi siano difficilmente eludibili. Siffatti dubbi, alla luce della concezione tolemaica dell'astronomia, suggeriscono la possibilità che Tolomeo sia in qualche modo *partito dalla fine*, ovvero che abbia costruito a tavolino dei modelli geometrici conformi al

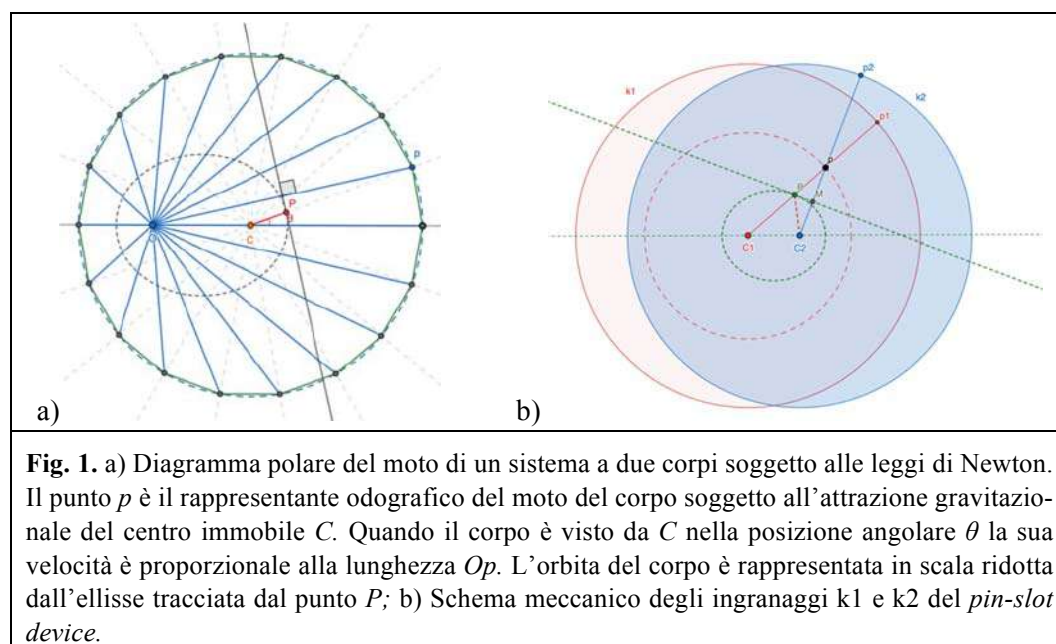
principio aristotelico dei moti circolari uniformi, utilizzando dei parametri *quasi* corretti e *limando* poi le osservazioni per confermare brillantemente i modelli stessi. Quella che agli occhi di Newton appare un'imperdonabile frode, ci sembra piuttosto da interpretare come una deliberata scelta teorica, coerente sul piano filosofico con la concezione tolemaica del rapporto tra struttura matematica della realtà e percezioni sensibili. Un'analisi di passi tratti da vari luoghi del *corpus* tolemaico mostra in effetti come per Tolomeo l'esistenza di una struttura matematica sottostante le apparenze, costituita nel caso dei corpi celesti dall'*ipotesi* dei moti circolari uniformi, fosse da considerarsi più *vera* di qualunque osservazione sperimentale (Amabile 2020).

Si pone dunque il problema di rintracciare le fonti a cui ha attinto Tolomeo nella stesura dell'*Almagesto*. È opinione condivisa che per quanto riguarda i moti di Sole, Luna e stelle Tolomeo abbia ripreso, esplicitamente o tacitamente, il lavoro di Ipparco, e non ci stupiremmo se lo stesso valesse anche per i moti planetari. Notiamo a tal proposito che proprio sull'origine del controverso *punto equante*, l'ingrediente essenziale aggiunto da Tolomeo ai presunti modelli già esistenti, i dubbi sono più forti che mai: sorvolando sui sofismi filosofici adottati per giustificare un espediente a dir poco curioso (Toomer 1984, p. 422), basti pensare che la bisezione dell'eccentricità del moto dell'epiciclo di Venere viene dedotta da osservazioni di massima elongazione compiute *a 37 giorni di distanza*. Tale risultato viene poi esteso a tutti gli altri pianeti senza addurre a sostegno di ciò nessun'altra osservazione astronomica.

Le considerazioni precedenti, insieme a molte altre su cui in questa sintesi non possiamo dilungarci, pongono a nostro avviso la seguente domanda: *è possibile che Tolomeo abbia tratto le caratteristiche generali dei suoi modelli dallo studio di antiche macchine, simili alla Macchina di Anticitera, all'interno delle quali era incorporata, invisibile, la teoria eliocentrica esposta secondo Russo negli scritti perduti di Ipparco?* La datazione della MdA e i diversi elementi che la collegano all'isola di Rodi rendono inverosimile che la teoria ad essa sottesa non fosse nota a Ipparco, consegnato alla tradizione come l'ultimo grande astronomo ellenistico e, come si è detto, principale fonte astronomica di Tolomeo. Per quanto riguarda il possibile eliocentrismo della teoria parzialmente ricostruita da Russo, ci sembra sufficiente notare che la MdA era a tutti gli effetti un *calcolatore di posizioni angolari*, che non poteva non basarsi su una *teoria* che associ alla posizione apparente del Sole, il cui moto è fornito a mano dall'utente, le posizioni apparenti di tutti gli altri corpi celesti, che rappresentano l'*output* del meccanismo. Al contrario, quella esposta da Tolomeo nell'*Almagesto* non può a rigore considerarsi una teoria astronomica, trattandosi di una semplice *collezione di modelli*. D'altra parte, è facile convincersi che se, come nel caso della MdA, ci si propone di rappresentare su un'unica scala zodiacale i moti angolari *osservati dalla Terra*, cioè i *phainomena*, l'unica strada percorribile è offerta da modelli geocentrici "ad epicicli" posti sullo stesso "deferente", dello stesso genere di quelli tolemaici. In altri termini, l'eventuale eliocentrismo della teoria sottostante un congegno come la MdA risulta inevitabilmente *nascosto*, forse inferibile da un'analisi della struttura interna degli ingranaggi ma del tutto invisibile a chi interpreti *realisticamente* i moti mostrati sul quadrante esterno. Si spiegherebbe così la presenza nell'*Almagesto* di quelle che altrove abbiamo chiamato *tracce di eliocentrismo* (Amabile 2020), che nella nostra ricostruzione possono essere riguardati come residui

dell'antica teoria di Ipparco, pervenuta a Tolomeo nella forma, per lui indecifrabile, della *sphairopoia*.

Riteniamo che un'interpretazione della MdA scvera da assunzioni derivanti dall'inattendibile testimonianza di Tolomeo possa fornire elementi preziosi per chiarire due punti di grande importanza, tra loro indipendenti ma, nella nostra ricostruzione, strettamente connessi l'uno all'altro:



1. Qual era la teoria astronomica sottesa alla progettazione della MdA?
2. Qual è l'origine del *punto equante*?

Indizi per rispondere alla prima domanda si possono trovare in un articolo di Sir William Hamilton (1847), intitolato *The Hodograph, or a new method of expressing in symbolical language the Newtonian law of attraction*, in cui viene presentato un metodo puramente geometrico di descrivere un moto qualsivoglia soggetto alle leggi di Newton.

Il *symbolical language* non è altro che la geometria euclidea, mentre l'*odografa* di un moto è, in termini più moderni, la curva tracciata dai punti estremali del vettore velocità del corpo. Studiando le proprietà di curvatura dell'odografa di un corpo soggetto all'attrazione gravitazionale di un centro immobile Hamilton perviene a un risultato che denomina *legge dell'odografa circolare*: assumendo le ipotesi newtoniane sul moto e sulla gravità, il raggio di curvatura dell'odografa è *costante*, «so that the Newtonian law may be characterized as being the *Law of the Circular Hodograph* (Hamilton 1847, p. 345)». La *legge dell'odografa circolare* è a tutti gli effetti una formulazione geometrica della legge di gravitazione di Newton, che ha il pregio di aggirare la necessità di introdurre i concetti squisitamente newtoniani di spazio, tempo e moto *assoluti*. L'aspetto essenziale è che quella dell'inverso del quadrato della distanza è l'*unica* proporzione tra le *accelerazioni* che conduce alla circolarità dell'odografa, una circostanza senza dubbio peculiare

e degna di nota per chi, come gli ellenistici, basi la propria geometria sull'uso del compasso e, coerentemente, la propria *meccanica celeste*, o dovremmo dire *sphairopoia*, sull'uso di ingranaggi *circolari*. In particolare, come dimostra Hamilton (1847, p. 347), dall'*ipotesi* dell'odografa circolare deriva che le uniche traiettorie possibili sono le *sezioni coniche*, che risultano determinate dall'odografa secondo un'opportuna costruzione geometrica. Poco più di un secolo dopo Richard Feynman utilizzò il metodo dell'odografa in una lezione dedicata al moto dei pianeti intorno al Sole, ove si propose di dimostrare in modo *elementare* la prima legge di Keplero a partire dalle ipotesi newtoniane sul moto (Goodstein, Goodstein 1996, pp. 210-211). In Figura 1a è mostrata la costruzione cui pervenne Feynman alla fine della sua lezione, che è essenzialmente un diagramma polare di velocità: l'odografa di Hamilton si identifica con la circonferenza direttrice dell'ellisse costruita sul diametro passante per il centro delle forze C e il polo delle velocità O . Tale ellisse risulta essere una rappresentazione *in scala* dell'orbita percorsa realmente dal corpo, cioè vale una cruciale proprietà dei moti odografici circolari già notata a suo tempo da Hamilton: «with the law of Newton, the angular motion of a body in its orbit is exactly represented, with all its variations, by the circular motion on the hodograph» (Hamilton 1847, p. 346). Ci proponiamo di mostrare in futuri lavori come la costruzione di Feynman fornisca la chiave per decifrare il funzionamento del *pin-slot device* della MdA (Figura 1b)¹. Qui ci limitiamo a notare che la circonferenza tracciata dal perno p può essere riguardata come la circonferenza direttrice di un'ellisse di fuochi C_1 e C_2 ed eccentricità data da $e = C_1C_2/C_1p$. Come si può intuire, modulando opportunamente le distanze C_1C_2 e C_1p si possono ottenere ellissi di forma qualsivoglia.

Per quanto concerne la seconda domanda, altrove abbiamo notato come il punto C_1 del *pin-slot device* funga a tutti gli effetti da *equante* per il moto del perno p , che rispetto a C_2 ha velocità apparente *non* uniforme (Amabile 2020). Come si vedrà, è proprio tale circostanza, che descrive verbalmente il cuore del funzionamento *pin-slot*, a porre dei precisi *vincoli* ai rapporti che legano le posizioni angolari di k_2 e la sua velocità di rotazione. Notiamo tuttavia che da un punto di vista *fenomenologico* il *pin-slot device* realizza meccanicamente il disaccoppiamento tra geometria e cinematica del moto che si ritrova nel modello *equante* di Tolomeo, in cui il moto del centro dell'epiciclo è uniforme rispetto a un punto diverso dal suo centro geometrico. Tale circostanza suggerisce la possibilità che all'origine del punto equante vi sia nient'altro che uno studio fenomenologico di meccanismi *pin-slot*.

Bibliografia

- Amabile A. (2020). “Le Fonti Ellenistiche dell'Almagesto di Tolomeo”. *Quaderni di Storia della Fisica*, 23 (in stampa).
- Goodstein D., Goodstein J., (1996). *Feynman's Lost Lecture. The Motion of the Planets Around the Sun*. New York: W. W. Norton & Company.

¹ Il *pin-slot device* è la configurazione di ingranaggi che nella MdA aveva l'obiettivo di generare l'anomalia lunare, cioè di indurre una velocità di rotazione non uniforme al puntatore associato al moto della Luna intorno alla Terra (Carman et al. 2012).

- Hamilton, W. (1847). “The hodograph, or a new method of expressing in symbolical language the Newtonian law of attraction”, in *Proceedings of the Royal Irish Academy*, 3, pp. 344-353.
- Hamm, E. A. (2016). “Modeling the Heavens: *Sphairopoia* and Ptolemy’s *Planetary Hypotheses*”. *Perspectives on Sciences*, 24 (4), pp. 416–424.
- Newton R. R. (1977). *The Crime of Claudius Ptolemy*. Baltimora: John Hopkins University Press.
- Russo L. (1997). *La Rivoluzione Dimenticata. Il pensiero scientifico greco e la scienza moderna*. Milano: Feltrinelli.
- Toomer G. J. (1984). *Ptolemy’s Almagest*. London: Duckworth.

THE DAWN OF MODERN SCIENTIFIC THOUGHT

Galileo e l'origine del cosmo. Discorso per l'assegnazione del Premio di Laurea SISFA 2019

Ivan Malara – Università degli Studi di Milano; Universiteit Gent – ivan.malara@unimi.it; i.malara@ugent.be

Abstract: The SISFA Board of Directors and a special SISFA Selection Board have awarded Ivan Malara's thesis *Galileo Galilei e il tema cosmogonico della creazione del mondo* with the 'SISFA Best Thesis Prize 2019'. In this paper, the Author reports the brief speech delivered during the award ceremony, which was held on September 10th, 2019 at the University of Pisa. The Author attempts (i) to highlight the scientific bearing of the cosmogonic theme at Galileo's time, while (ii) showing the shift in approaching the problem of the origin of the world in Galileo's work.

Keywords: Galileo Galilei, Cosmogony, Aristotle, Aristotelianism

1. Introduzione

L'obiettivo principale della mia tesi di laurea è mostrare che il problema cosmogonico rientrava per Galileo a pieno titolo nell'ambito della speculazione scientifica. E non perché Galileo fosse credente e cattolico, ma perché chi a quei tempi dettava l'agenda di lavoro scientifico, cioè i filosofi aristotelici, aveva fatto dell'ordine divino dell'universo un criterio in base al quale decretare la fondatezza o meno di una teoria scientifica. Le loro argomentazioni poggiavano su giustificazioni di tipo fisico, evitando categoricamente di ricorrere a precetti teologici.

2. Dal moto degli elementi all'ordine del cosmo

Prendiamo l'esempio di due professori che, proprio qua a Pisa, tennero lezione di fronte al giovane Galileo: mi riferisco a Girolamo Borro e Francesco Buonamici (cfr. Martin 2017; Camerota 2016; Helbing 1989). Erano entrambi aristotelici, ma uno, Borro, di indirizzo 'averroista'; l'altro, Buonamici, aderiva invece all'interpretazione dei commentatori greci di Aristotele. Tra di loro c'era una polemica accesissima riguardo alle cause del moto degli elementi, cioè di quelle che gli aristotelici consideravano come le particelle fondamentali costitutive di qualsiasi corpo terrestre. Esse, come sappiamo, erano terra, acqua, aria e fuoco. Gli elementi avevano la caratteristica di essere inanimati, ovvero senza anima. E dato che, come si credeva, solo ciò che è dotato di anima si muove di propria sponte, il problema era capire che cosa muovesse gli elementi (cfr. Camerota,

Helbing 2000). Perché, per esempio, un pezzo di terra, se lasciato cadere, va sempre verso il basso? Perché il fuoco va invece sempre verso l'alto? Queste erano domande cui Aristotele aveva in via generale dato una risposta. La risposta, per farla breve, era che a ogni elemento è associato un preciso luogo o regione dell'universo, ed è nella natura degli elementi di ritornare al proprio luogo naturale.

L'inferenza è semplice, e parte da un dato dell'esperienza quotidiana: vediamo il fuoco andare verso l'alto, dunque il fuoco riposa in una regione dell'universo che sta sopra di noi, e visto che la Terra, come già sapeva Aristotele, è sferica, e dato che la traiettoria ascendente del fuoco è perpendicolare al suolo terrestre, allora il luogo del fuoco non è solamente sopra di noi, ma è anche intorno a noi, alla periferia di un universo chiuso e sferico. La terra fa l'opposto del fuoco, dunque il suo luogo naturale è il centro dell'universo, che, in un universo geocentrico, coincide con il centro della Terra. Acqua e aria occupano invece posizioni intermedie tra terra e fuoco.

Nella teoria aristotelica del moto, dunque, tutto quadra alla perfezione: l'universo ha un ordine che è iscritto nella natura delle cose, e che è dunque sempre rispettato e ripristinato attraverso precisi moti naturali ogniqualvolta venga stravolto. Con l'assimilazione del pensiero aristotelico nell'Occidente latino, quest'ordine universale viene interpretato come l'ordine stabilito da Dio. Ma, ritornando a Borro e Buonamici, a questi ultimi non importava, se non per ragioni di istintiva (e direi più che ragionevole) 'autoconservazione', allineare l'insegnamento aristotelico a quello della teologia cristiana. A loro interessava capire come mai Aristotele avesse detto che solo i corpi dotati di anima si muovono da sé, quando invece pare che perfino gli inanimati, cioè gli elementi, abbiano in sé un principio naturale di movimento. A Borro e Buonamici, però, premeva anche far notare che una fisica diversa da quella aristotelica non avrebbe mai potuto rendere ragione di quest'ordine divino che ci sta dinanzi, e che non muta mai (cfr. Malara 2016, pp. 70-76; Buonamici 1591, pp. 462H-463D).

3. Dall'ordine del cosmo al moto degli elementi

Come sopra ricordato, l'ordine dell'universo per gli aristotelici è iscritto nella natura delle cose, è consustanziale all'universo stesso. Il moto degli elementi è naturale perché è scritto nel loro DNA che devono tornare a un preciso luogo dell'universo. Ora, provate a immaginare uno spazio vuoto, immenso, anzi infinito, senza sopra né sotto, senza destra o sinistra. Inserite poi in questo spazio isotropo i quattro elementi. Che cosa succede? La risposta per un aristotelico è semplice: non succede un bel niente. Gli elementi non possono muoversi perché non hanno un luogo dove andare. E se non possono muoversi in modo naturale, non possono nemmeno muoversi in modo disordinato e violento, perché per un aristotelico il moto violento si definisce in opposizione a quello verso un luogo naturale. Insomma, è impossibile pensare all'universo come a qualcosa formatosi da una serie di movimenti precosmici (ossia, che precedono una certa disposizione ordinata dell'universo) della materia, perché è inconcepibile l'idea di un moto al di fuori di un universo già formato e ordinato. È per questo che, secondo Aristotele e gli aristotelici,

tutte le dottrine fisiche che pretendono di spiegare la genesi di un certo ordine nell'universo a partire da moti caotici sono in realtà chimere, abominevoli fantasie, falsità. Queste dottrine falliscono sempre, perché non sono in grado di descrivere un universo divinamente ordinato.

Prendiamo gli atomisti e i platonici, per esempio. Loro pensavano di poter ridurre le differenze ontologiche tra corpi a differenze di tipo quantitativo. Così – pensavano gli aristotelici – allora non esisterebbe niente di leggero per natura, come il fuoco, che va sempre verso l'alto. E se tutto si giudica in base alla quantità della stessa materia, e se ciò che ha più quantità di materia è più pesante, allora una grande quantità di fuoco dovrebbe collassare su sé stessa, pervertendo così l'ordine divino dell'universo. Ma questo non succede, come ci mostra l'esperienza. Perciò – concludevano – queste teorie sono sbagliate (si veda, per es., la critica di Borro riportata in De Pace 1990, pp. 9-13).

4. La riabilitazione scientifica delle riflessioni cosmogoniche

Per gli aristotelici è impossibile comprendere il movimento dei corpi senza inserirli in un universo già formato e ordinato. Perciò è impossibile ragionare sul moto dei corpi astruendo da una precisa visione cosmologica, la quale è a sua volta basata su una fisica dei moti che non può fare a meno di questa precisa visione cosmologica. Si tratta di un circolo vizioso – o, come lo chiamava Galileo, di un paralogismo. Ed è proprio questo il circolo vizioso dal quale Galileo fin da giovane cerca di uscire, chiedendosi «*cur*», perché l'ordine del mondo è questo e non un altro? (cfr. Galilei 1890-1909, vol. I, pp. 374, 252, 342, 344)

Quando si fa questa domanda, Galileo pensa ancora che la Terra sia al centro del mondo. Ma egli ha comunque già reciso l'arbitrario legame tra movimento e luoghi dell'universo. Ha capito insomma che una astratta analisi geometrico-matematica del moto dei corpi non solo è possibile, ma risponde anche meglio al problema avanzato dagli aristotelici, cioè quello di rendere ragione dell'ordine divino dell'universo. Galileo, per farla breve, concepisce quest'ordine divino come una conseguenza dell'applicazione costante e inesorabile, da parte della natura, di precise leggi divine. E per leggi, si intende qui rapporti costanti, proporzioni che solo la geometria può aiutarci a comprendere. Una volta comprese le leggi, ecco che è possibile dimostrare agli aristotelici che avevano torto, che cioè è possibile un'altra fisica, attraverso la quale si può non solo descrivere l'universo, ma anche rendere ragione di perché esso sia così e non altrimenti. Sono le leggi della natura a essere eterne, non la disposizione ordinata delle parti dell'universo. Dunque, una volta trovate queste leggi, è possibile andare con la mente a ritroso, indietro nel tempo, fino a immaginare come Dio stesso creò l'universo a partire da una situazione precosmica. E se è possibile ricostruire l'origine dell'universo attraverso una sagace applicazione delle leggi naturali, allora queste ultime, nonché il metodo con cui sono state ricavate, non possono che ricevere l'assenso degli aristotelici stessi, i quali giudicavano la fondatezza di una teoria fisica anche sulla base della sua capacità di essere in linea con l'ordine divino in cui le cose accadono nell'universo. Ecco perché, a mio parere, Galileo non aspetta neanche un secondo a usare le proprie scoperte scientifiche per formulare ipotesi

cosmogoniche. Lo fa perfino quando ancora crede che la velocità di caduta aumenti in proporzione agli spazi percorsi. Tanto che, secondo il fisico e storico della scienza Jochen Büttner, fu solo applicando la legge di caduta a un problema cosmogonico che Galileo comprese il proprio errore iniziale (cfr. Büttner 2001, pp. 399-400; Malara 2016, pp. 102-105).

5. L'«architettura» e la «fabbrica» dell'universo

In effetti, quando nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, pubblicato nel 1632, Galileo scrive che Dio lasciò cadere i pianeti a uno a uno da una determinata altezza, e poi ne deviò la traiettoria, facendoli girare intorno al Sole a una velocità costante acquisita alla fine del loro moto di caduta (cfr. Galilei 1890-1909, vol. VII, pp. 44-45, 53-54), egli stava tentando di risolvere un problema sollevato dagli aristotelici, e lo stava facendo chiamando in causa due delle sue scoperte scientifiche: una corretta, cioè la cosiddetta legge di caduta dei gravi; e l'altra che oggi consideriamo scorretta, cioè l'idea di una 'inerzia circolare' – così come viene definita da alcuni studiosi galileiani. In tutto ciò, Galileo non stava, come spesso si ritiene, ricorrendo a un principio ultraterreno e metafisico – cioè Dio – per dare al sistema copernicano un fondamento che la meccanica galileiana non avrebbe mai potuto assicurargli. Al contrario, il ricorso a Dio non indica uno scacco della scienza galileiana, ma proprio l'opposto. Galileo immagina infatti una creazione non miracolosa, in cui Dio stesso non trasgredisce le proprie leggi. E se è possibile, a partire da queste leggi, dimostrare matematicamente com'è avvenuta la genesi divina del cosmo (e Galileo è convinto della dimostrabilità del proprio racconto cosmogonico: cfr. Galilei 1890-1909, vol. VIII, p. 284), allora la scienza fisica che ci consente di fare ciò, non solo è corretta, ma è anche una scienza che non ha più bisogno di presupporre un certo ordine del mondo senza poterne dare giustificazione. Il movimento dei corpi non si spiega più a partire da un certo sistema cosmologico, e quest'ultimo non è più desunto da una scienza dei moti che lo presuppone. Ora, è invece il sistema cosmologico che viene ricavato da un'indagine adeguata delle leggi universali che regolano il moto dei corpi.

Come diceva Galileo, e qua concludo, non si deve «accomodare l'architettura alla fabbrica», non si devono cioè ricavare le leggi di natura presupponendo l'esistenza di un certo ordine dell'universo. Bisogna bensì provare e riprovare a «[ri]costruire la fabbrica [dell'universo] conforme a i precetti dell'architettura» (Galilei 1890-1909, vol. VII, p. 40), ossia alle leggi, ai rapporti, alle proporzioni geometriche che regolano l'universo. Questo, secondo me, è uno dei più grandi lasciti galileiani, che segna una cesura netta col passato, e inaugura di per sé un nuovo modo, o chiamiamolo pure *metodo*, di studiare l'universo e le sue origini.

Bibliografia

Buonamici F. (1591). *De motu libri X*. Firenze: Semartelli.

- Büttner J. (2001). *Galileo's Cosmogony*, in J. Montesinos, C. Solis (a cura di), *Largo campo di filosofare. Eurosymposium Galileo 2001*. La Orotava: Fundacion Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, pp. 391-401.
- Camerota M. (2016). *Buonamici, Francesco*, in Sgarbi M. (a cura di), *Encyclopedia of Renaissance Philosophy*. Cham, Springer.
- Camerota M., Helbing M.O. (2000). "Galileo and Pisan Aristotelianism: Galileo's «De motu antiquiora» and the Quaestiones de Motu Elementorum of the Pisan Professors". *Early Science and Medicine*, V (4), pp. 319-365.
- De Pace A. (1990). Galileo lettore di Girolamo Borri nel De Motu. In *De motu. Studi di storia del pensiero su Galileo, Hegel, Huygens e Gilbert*. Milano: Cisalpino, pp. 3-69.
- Galilei G. (1890-1909). *Le opere di Galileo Galilei*. A. Favaro (a cura di), Firenze: Barbèra.
- Helbing M.O. (1989). *La Filosofia di Francesco Buonamici, professore di Galileo a Pisa*. Pisa: Nistri-Lischi.
- Malara I. (2016). *Galileo Galilei e il tema cosmogonico della creazione del mondo* (Tesi di Laurea Magistrale in Scienze Filosofiche). Università degli Studi di Milano.
- Martin C. (2017). *Borro, Girolamo*, in Sgarbi M. (a cura di), *Encyclopedia of Renaissance Philosophy*. Cham: Springer.

Guidobaldo, Galileo e il lancio della pallina tinta d'inchiostro sulla tettoia inclinata

Pietro Cerreta – Associazione *ScienzaViva*, Centro della Scienza, Calitri – p.cerreta13@gmail.com

Abstract. In the summer of 1592, on his first journey from Pisa to Padua, Galileo spent a few days in Montebardino near Pesaro with Guidobaldo del Monte, his patron, mentor and friend. As they shared the interest in cannonball trajectories, they had the idea of studying their geometrical shape by analyzing the traces of an inked ball launched across a sloped roof. At first, the two friends considered the curve left on the roof as an upside-down catenary arch. At a later stage, though, Galileo recognized this curve as a parabola. At the end, in his *Discorsi*, he gave advice on how to quickly draw parabolas by suggesting a very similar method to the early experiment he did with Guidobaldo more than forty years before: it consisted, this time, of holding the ball in one hand to moist and warm it, before throwing it along a smooth inclined metal mirror. A “truly wonderful” method, as he called it. Reproducing parabolic curves in Guidobaldo and Galileo's style is certainly a fun experience, but also an opportunity to go back to the time when the science of motion began. As a matter of fact, thanks to the translation of Apollonio's *Conics* by Commandino, this science no longer relied on the medieval geometrical schemes, which assumed that the projectile's trajectory was achievable only through some combinations of linear and circular forms. We therefore would like to suggest this experiment as a starting point for a beautiful interdisciplinary historical and didactic path.

Keywords: Inked ball, Sloped roof, Parabola, Catenary arch, Metal mirror.

1. L'esperimento di Guidobaldo e Galileo

Leggendo il libro di J. Heilbron (2010) *Galileo, scienziato e umanista*, sono venuto a conoscenza di un esperimento che mi ha immediatamente affascinato: come risalire alla forma geometrica del moto dei proiettili, lanciando una pallina tinta d'inchiostro su una piccola tettoia di legno e osservarne la traccia. L'esperimento venne realizzato nel 1592 da Guidobaldo del Monte insieme a Galileo e, a quanto risulta, fu la prima volta che qualcuno adoperò un modellino di tal fatta per studiare le traiettorie dei proiettili. Sebbene non segni ancora il momento della scoperta del moto parabolico, questo esperimento lascerà un'impronta indelebile nella mente dello scienziato pisano.

Desideroso di verificarne l'efficacia *hands-on*, ho voluto replicarlo subito, dopotutto si trattava di adoperare pochi materiali di uso comune (si veda il video *Esperimento di*

Guidobaldo e Galileo: <https://www.youtube.com/watch?v=rgBIa8F9-R4>). Tutte le volte che l'ho eseguito in pubblico, non ho mai rinunciato a descrivere il contesto storico in cui questo singolare esperimento fu concepito. L'episodio rientra in quella complessa fase culturale di metà '500 - inizio '600 (Russo, Santoni 2010, p. 149-154), in cui gli studiosi abbandonarono progressivamente la concezione medievale del moto per aderire a quella moderna, allora nascente, e rappresenta uno dei primi casi in cui i fisici, andando oltre le tradizionali combinazioni di rette e circonferenze della geometria euclidea, si rivolsero anche alla geometria delle coniche per interpretare i fenomeni del moto (Cerreta 2019, p.180).

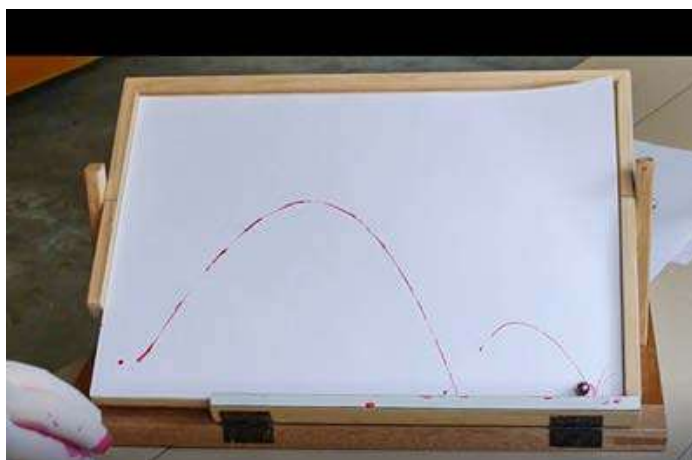


Fig. 1. Attualizzazione dell'esperimento di Guidobaldo e Galileo: traiettorie disegnate con il lancio di una pallina inchiostrata

Alcuni fattori decisivi di tale svolta emergono proprio dal resoconto di Heilbron, da lui redatto immaginando che sia lo stesso Galileo a raccontare gli avvenimenti:

Durante il mio primo viaggio da Pisa a Padova ho trascorso alcuni giorni con Guidobaldo del Monte, un uomo incredibilmente saggio e disponibile. Oltre a essere un buon matematico, è stato anche ispettore delle fortificazioni per la Toscana e si è diletta con le traiettorie delle palle di cannone. Per lui il problema di quando il moto naturale inizia ad agire in situazioni in cui un proiettile viene sparato a vari angoli rispetto all'orizzonte aveva un'importanza pratica. Ci è capitato di parlarne mentre sorseggiavamo vino nel suo giardino, accanto ad una tettoia con il tetto inclinato. Può darsi che abbia accennato al trucco di rallentare il moto naturale con l'aiuto di un piano inclinato; forse è venuto in mente a entrambi nello stesso momento che una palla fatta rotolare in salita lungo la tettoia inclinata di un certo angolo rispetto all'orizzontale avrebbe potuto simulare un colpo di cannone al rallentatore. Abbiamo fatto l'esperimento utilizzando una palla tinta d'inchiostro fatta rotolare su un piano più adatto di quello della tettoia, [...] la palla ha tracciato una linea che assomiglia ad una parabola, un'iperbole o, come ci piace pensare, alla curva formata da una catena fissata a due supporti molto distanti fra loro, ma capovolta (Heilbron 2010, p. 158).

Il viaggio a cui l'autore si riferisce è quello che, nel 1592, conduce per la prima volta il giovane scienziato verso Padova, città nella cui Università sta andando ad occupare la cattedra di professore di Matematica.

Lungo il tragitto, intanto, Galileo decide di far tappa a Mombaroccio (in provincia di Pesaro Urbino), dove abita il suo mentore Guidobaldo del Monte (1545-1607), un umanista-ingegnere-matematico molto in vista ed influente, il quale si è premurosamente interessato per fargli ottenere la sua nuova, ambita, sistemazione padovana. Ed è in questa residenza che i due amici affrontano insieme alcuni temi scientifici, tra i quali anche quelli relativi alle traiettorie delle palle di cannone, di cui Guidobaldo si interessa da tempo. In passato non era ben chiaro se e come fossero stati effettuati degli esperimenti in tale circostanza. Circa vent'anni fa, invece, attraverso una dimostrazione eseguita incrociando varie fonti¹, Renn, Damerow e Rieger sono riusciti a provare che Galileo fu protagonista diretto di lanci con palle tinte d'inchiostro «congiuntamente» a Guidobaldo (Renn *et al.* 2000) e non ne fu, insomma, semplice spettatore.

Questa dimostrazione, giudicata plausibile da Heilbron (2010, p.173, nota 65), è ciò che in definitiva dà consistenza storica alla narrazione poc'anzi considerata.

Sebbene corretta nella sostanza, l'ultima frase che compare nel brano di Heilbron: “la palla ha tracciato una linea che assomiglia ad una parabola, un'iperbole o, come ci piace pensare, alla curva formata da una catena fissata a due supporti molto distanti fra loro, ma capovolta” ha però il difetto di contrarre in pochi cenni le questioni geometriche che in quel momento indussero i due scienziati a preferire la catena capovolta alla parabola e all'iperbole, lasciando al lettore il difficile compito di figurarsele mentalmente. È il caso, dunque, di accedere direttamente alla fonte da cui Heilbron ha attinto i fatti, cioè al quaderno di appunti di Guidobaldo (del Monte ca. 1587-1592), manoscritto che contiene integralmente il resoconto degli esperimenti, e di esaminarne con attenzione il testo nonché i disegni esplicativi che lo corredano. Il più eloquente di questi è quello riportato in Fig. 2, parte sinistra, ed evidenzia chiaramente la simmetria tra l'ascesa e la discesa della pallina nella sua traiettoria, un fatto che fa riflettere Guidobaldo e lo muove ad esplorare le possibili interpretazioni geometriche:

Se si tira una palla o con una balestra o con artiglieria, o con la mano, o con altro instrumento, sopra la linea dell'horizonte, il medesimo viaggio fa nel callar che nel montare e la figura è quella che rivoltata sotto la linea horizontale fa una corda che non stia tirata, essendo l'un e l'altro composto di naturale e di violento et è una linea in vista simile alla parabola et hyperbole e questo si vide meglio con una catena che con una corda [...] perché la corda resta in sé dura. Che non fa così una catena, o catenina. La esperienza di questo moto si po' far pigliando una palla tinta d'inchiostro, e tirandola sopra un piano di una tavola, il qual stia quasi perpendicolare all'horizonte, che se ben la palla va saltando, va però facendo li punti, dalli quali si vede chiaro che sicome ella ascende così anco scende (Libri 1841, pp. 397-398).

Potremmo dunque ricostruire l'incontro di Mombaroccio in questo modo. Guidobaldo, in quanto ispettore delle fortificazioni per la Toscana, è interessato a comprendere militarmente quale sia la forma geometrica delle traiettorie delle palle sparate dai cannoni. Egli si

¹ Tra le quali una testimonianza di Muzio Oddi, un altro allievo di Guidobaldo, riportata da Bonaventura Cavalieri (Russo, Santoni 2000, p. 150-152) in una lettera a Galileo del 21 settembre 1632 (Renn *et al.* 2000, p. 327).

è già reso conto che a tal fine è necessario, prima d'ogni cosa, escogitare un efficace dispositivo di rilevamento. Ricevendo in visita Galileo, gliene parla e gli riferisce di aver provato a lanciare, a quanto pare anche a mano, palle di cannone sul piano inclinato di alcuni tetti, ritenendo che, nel rallentarne in tal modo il cammino, avrebbe potuto osservare da vicino la forma con cui curvavano verso il basso. I risultati, tuttavia, non sono del tutto convincenti ed attende ad ulteriori e più accurati riscontri. Dopo un confronto d'idee, i due si convincono di dover provare situazioni più agevoli rispetto a quelle sperimentate innanzi da Guidobaldo. Decidono di usare, cioè, palle e piani inclinati di dimensioni minori, ad esempio una biglia tinta d'inchiostro fatta rotolare lì, proprio sulla tettoia del giardino nel quale secondo Heilbron stanno discutendo, oppure su una tavola simile a quella, ma che offra il vantaggio di essere ancora più piccola e maneggevole.

Ed ecco che, così facendo, dalle macchioline di inchiostro lasciate dalla pallina lungo il suo tragitto essi osservano finalmente la traccia del moto. Traccia che ai loro occhi appare oltre che simmetrica anche interamente curvilinea (vedi parte sinistra di Fig. 2), cioè non presenta affatto tratti rettilinei.

Tale risultato dovette essere davvero sorprendente, perché la fisica aristotelica, allora ancora in vigore, affermava innanzitutto che la traiettoria non poteva “essere simmetrica perché il movimento del proiettile è determinato all'inizio e alla fine da cause nettamente diverse. All'inizio è dominato dall'impeto impresso nel proiettile, alla fine dal suo movimento naturale verso il centro della Terra” (Renn *et al.* 2000, p.316). E poi che le traiettorie dei corpi lanciati dovevano essere costituite da un misto di linee rette e di archi di circonferenza², come è mostrato nella parte destra di Fig. 2, tratta dal libro di Niccolò Tartaglia (1499-1557) *La nova scientia* (Tartaglia 1984).

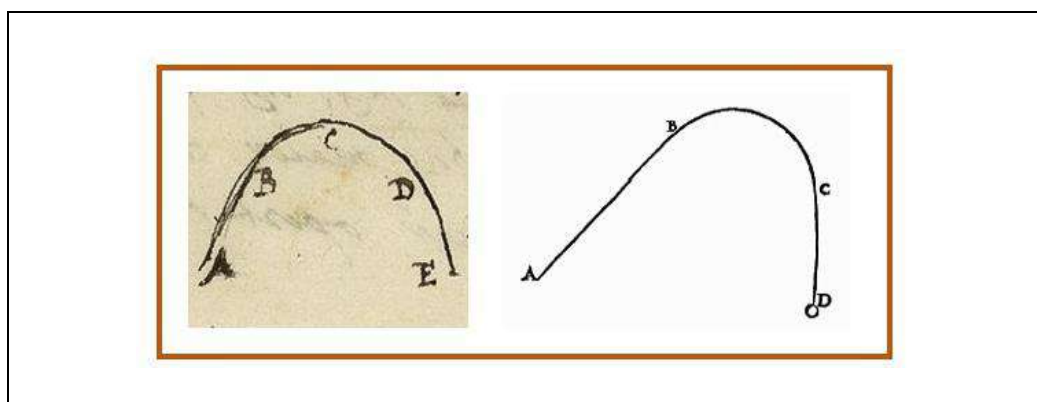


Fig. 2. A sinistra il disegno simmetrico riportato nel resoconto di Guidobaldo (gallica.bnf.fr /BnF) e a destra la figura asimmetrica del libro di Tartaglia.

Lo ripeto, l'espedito dell'intingere la pallina nell'inchiostro prima di lanciarla, che si sappia, non ha precedenti. Considerando come sono andate le cose, lo si può perciò interpretare come la trovata empirica di un apprezzato esperto balistico rinascimentale, qual era Guidobaldo, mentre si confronta con la genialità di un promettente giovane scienziato, Galileo, che in quel momento è andato a fargli visita. Questa prova qualitativa, *hands-on*,

² Tra i tratti rettilinei, però, Cardano (1501–1576) inserisce già un raccordo simile a quello di un arco di parabola (“[...] media quasi linea, quae Parabolae ferme imitatur [...]”) al posto dell'arco di circonferenza. Si veda (Cerreta 2019, p.177-179).

basterà ad incrinare irreversibilmente la fiducia negli assunti aristotelici in chi come loro vi aveva creduto fino a quel momento.

Sta di fatto, però, che quando l'esperimento fu realizzato per la prima volta, i due amici non riuscirono ad individuare con certezza quale figura geometrica corrispondesse al grafico rilevato. Una prova pratica, una catenella sospesa ai suoi estremi che, appoggiata sul tracciato appena ottenuto, a questo aderiva adeguatamente li spinse subito a pensare che poteva benissimo trattarsi di una *catenaria* (termine moderno) capovolta. Idea che a loro piacque molto perché l'equilibrio statico, realizzato nella catenaria tra la tensione agli estremi della catena e il peso degli anelli, lasciava supporre un analogo bilanciamento, questa volta dinamico, tra “moto violento” e “moto naturale”, allorché questi si scambiavano simmetricamente di ruolo nella salita e nella discesa (Heilbron 2010, p. 159). L'esperimento, infatti, aveva mostrato che i due moti ormai non erano più da considerarsi separati, “essendo l'un e l'altro [viaggio di salita e di discesa] composto di naturale e di violento” (Cerreta 2019, p. 174-175).

È anche probabile che la parabola e l'iperbole, pur ritenute somiglianti alla curva tracciata dalla pallina, siano state messe da parte perché non erano ancora figure entrate a pieno titolo tra gli “ingredienti” ufficiali della descrizione del moto. Solo più tardi Galileo acquisì una più chiara consapevolezza che la traiettoria di corpi lanciati in aria, come quelli tirati da un cannone, era da interpretarsi come una parabola. Ma allora poté farlo perché egli era ormai diventato del tutto confidente con la geometria delle coniche di Apollonio, da poco riscoperta in Italia grazie a Commandino.

Oltre quarant'anni più tardi, nei *Discorsi*, Galileo riprenderà l'esperimento eseguito con Guidobaldo e lo suggerirà a Sagredo e a Simplicio, desiderosi di comprendere come si potesse disegnare rapidamente una parabola senza seguire il rigido protocollo geometrico ritenuto necessario dai matematici. Questa volta, però, non ricorrerà ad una pallina inchiostata ma a qualcosa di molto simile, cioè ad una pallina inumidita e riscaldata nel palmo della mano. E il lancio sarà eseguito su uno specchio metallico inclinato, sul quale saranno meglio visibili le sottili goccioline di acqua lasciate dalla sfera. Un metodo, a suo dire, “veramente meraviglioso” (Galilei, 1890–1909).

2. Impiego didattico dell'esperimento

Volendo ripetere con materiale moderno l'esperimento di Guidobaldo e Galileo, noi di *ScienzaViva*³ non abbiamo fatto altro che costruire una tavoletta inclinabile, sulla quale poter alloggiare un foglio A4 o A3, per poi lanciarvi sopra la pallina inchiostata⁴. Le procedure di costruzione e d'impiego sono descritte in (Cerreta 2018) e in (Cerreta 2019). Il funzionamento dell'apparecchiatura da noi realizzata è, inoltre, ben visibile nel video di Youtube, indicato all'inizio della sezione precedente.

La domanda più frequente che ci viene posta è: “ma è davvero una parabola?”. Per verificare che il grafico tracciato dalla pallina inchiostata rappresenti proprio tale curva basta acquisirlo con una foto o con lo scanner e poi collocarlo come sfondo di un foglio di

³ Oltre a me, il collega Canio Lelio Togliola e il falegname Vito Cerreta.

⁴ Heilbron, al quale ho mandato alcune foto del nostro l'esperimento, mi ha così risposto con una email del 08/10/2014: “Many thanks for the pictures. I'm glad to know that the sloped-roof experiment can be made to work so well”.

lavoro di GeoGebra. Disegnata a quel punto una parabola generica e muovendo opportunamente gli slider dei suoi coefficienti, si può giungere, in pochi passi, alla sovrapposizione di questa conica sul grafico poco prima acquisito come sfondo, vedi Fig. 3. Si dimostra in modo evidente⁵ che la curva così disegnata è proprio una parabola!

Questo esperimento può essere proposto benissimo nelle fiere della scienza che si svolgono nelle nostre scuole e addirittura nei *Science Center*. Ma andrebbe bene, per la sua singolare semplicità, anche nelle scuole medie superiori allorché si parla di parabola in matematica e di moto parabolico in fisica. In conclusione, riteniamo che il percorso da noi sviluppato sia un bell'esempio di didattica interdisciplinare perché raccorda argomenti di matematica, fisica, storia e filosofia e ci meravigliamo del fatto che, benché ormai noto, l'esperimento di Guidobaldo e Galileo non abbia ancora trovato posto nei manuali scolastici.

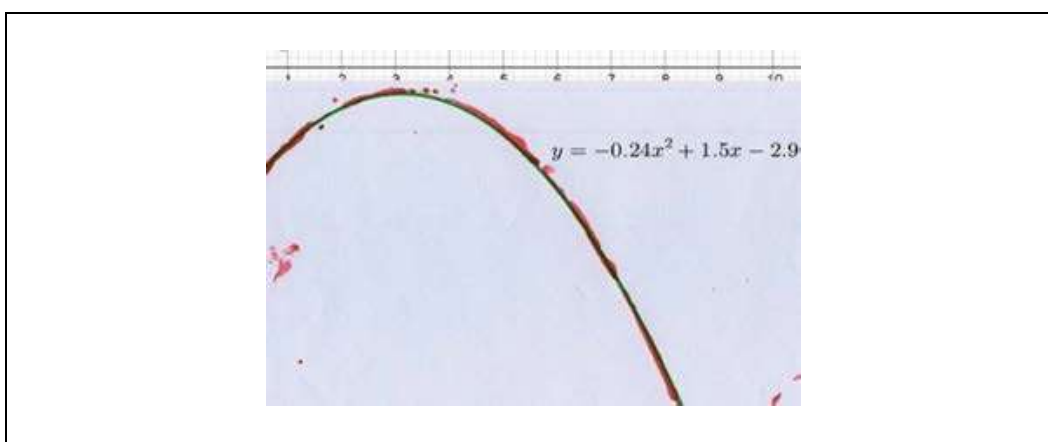


Fig. 3. La curva di colore verde, disegnata con GeoGebra e di cui si legge l'equazione, si sovrappone quasi perfettamente a quella di colore rosso, tracciata in precedenza dalla pallina.

Bibliografia

- Heilbron J. L. (2010). *Galileo. Scienziato e umanista*. Torino: Einaudi.
- Russo L., Santoni E. (2010). *Ingegneri minuti. Una storia della scienza in Italia*. Milano: Feltrinelli.
- Renn J., Damerow P., Rieger S. (2000). "Hunting the White Elephant: When and How did Galileo Discover the Law of Fall?", *Science in Context* 13, 3-4 (2000), pp. 299-419.
- del Monte G. (ca. 1582-1592), *Meditatiunculae Guidi Ubaldi e Marchionibus Montis Sanctae Mariae de rebus mathematicis*. Bibliothéque Nationale de Paris, Manuscript, Catalogue No. Lat. 10246, p. 236. URL: <<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b6000706k/f268.item>>.
- Libri G. (1841). *Histoire des Sciences Mathématiques en Italie, depuis la renaissance des lettres jusqu'a la fin du dix-septième siècle*. Tome Quatrième. Paris: Renouard et c.

⁵ Entro le incertezze dovute agli spessori scelti per le linee dei grafici.

- Tartaglia N. (1984). *La nova scientia*. Bologna: Forni editore, Bologna (Ristampa anastatica del testo del 1550). URL: <<http://www.liberliber.it/online/autori/autori-t/niccolo-tartaglia/la-nova-scientia>>.
- Galilei, G. (1890–1909). *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a due nuove scienze, attenenti alla meccanica e i movimenti locali*, in Favaro A. et al, *Le Opere di Galileo Galilei, Edizione Nazionale*. Firenze: Barbèra.
- Cerreta P. (2018). “Tra Terra e Cielo: il moto dei proiettili e l’esperienza di Guidobaldo del Monte e di Galileo”. *La fisica nella Scuola*, Supplemento al n. 3-4, pp.169- 174.
- Cerreta P. (2019). “Guidobaldo, Galileo e l’esperienza del lancio della biglia tinta d’inchiostro”. *Giornale di Fisica* 60(2), pp. 167-186.

Nature of Science Experiments: Exploring Galilean Physics of Motion

Raffaele Pisano – IEMN, Lille University, Lille, France; CPNSS, LSE, UK –
raffaele.pisano@univ-lille.fr

Vincenzo Cioci – PhD Student, Lille University, France – vincenzocioci@gmail.com

Abstract: The motion of bodies is a subject of fundamental importance both in the History of Physics & Nature of Science (NoS). Among the students, still several serious misconceptions occur. This work describes an *ad hoc* educational—and—experimental (physics and mathematics) path on Galileo’s notes in the field. It has been planned and implemented at the high school Liceo Scientifico “F. Sbordone” in Naples (Italy). It is based on historical foundations of science & Nature of Science Teaching Analysis (Cfr. Pisano, Cioci 2020). Galilean sources (e.g., his works and laboratory notes) and most recent historical studies have been analysed. This subject is part of larger doctoral research in Nature of Science by Mr. Vincenzo Cioci at the Lille University (France) under Raffaele Pisano’s supervising.

Keywords: Galileo, inclined plane, motion of the bullet.

1. Introduction

The replication of historically relevant physics experiments (Cfr. Heering, Höttecke 2014) can help students to understand how science works. We identified a comprehensive educational path of physics—and—mathematics and historical sources concerning Galileo’s experiments; it was part of the curriculum education at the Liceo Scientifico “F. Sbordone”. Galileo is a central figure in the history of science because of his physical discoveries/ideas about motion—and—astronomy, and his methodological innovations, which were of a fundamental contribution to the birth of modern science. Galileo used Euclidean geometry and proportions, so they are adequate for first high school levels. In fact, physics of the falling bodies and of the motion of bullets is close to the background of experiments usually implemented at the high school. In addition, this kind of topics solicits students’ curiosity among science, technology and society. Preliminarily, problem solving and brainstorming were applied. A rigorous quantitative and qualitative analysis of two questionnaires about students’ opinions and concepts they had learned will be analysed in the coming months, in order to check the effectiveness of the replication method – and in general – of the history of physics.

2. Pendulum Motion Properties and Galileo's Measure of Time

Apparatus, measurement & analysis. In order to calculate the factors that influence the pendulum's oscillation time, let us swing simultaneously a double pendulum, with different masses and (small) amplitudes; or with wires of different lengths. The students observed the period of an oscillation which depended only on the length of the wire. The independence of the amplitude of the pendulum oscillation during the motion allows us to set the period of oscillation as a unit of time measurement. The pendulum has a length of 25 cm and a period of 1 s. Further exploration concerned the analysis—modelling of the physics—mathematics relationship between the period of a simple pendulum and the length of its wire. Reading Galileo (Galileo 1890–1909, Vol. VIII), as he suggested, the students compared the motion of double pendulums; the first four times longer than the second. Thus for an oscillation time of the latter – which is twice of the former one – the times are proportional to the square roots of the wire lengths. (Pendulum can make measurements only at set times). In order to obtain continuous measurements of time the students built a water clock made of a 30 litres jerry can with tap combined with a 500 ml measuring cylinder graduated to 5 ml. The water collected in the cylinder was weighted using a balance scale accurate to 1g. With the aim of calibrating the water clock and checking the maintenance of a constant flow from the tap, the 25 cm long pendulum was utilized. We carefully turned on the tap at full flow rate every time. Thus, they proceeded to measures and observational errors/analysis of the rate of the flow and found it to be 50 ml (50g) per second.

3. The fall of Bodies in Fluids and in Vacuum

History, apparatus, measures & calculus. We dropped small balls of different masses and of the same shape first in glycerine, then in oil, then in water, then in air and we extrapolated their behaviour in a vacuum. The difference between the times of fall was always smaller when the resistance that the fluid opposed to the passage of the body decreased (fig. 1). Students concluded, like Galileo (Galileo [ca 1590]1960, [1638]1914) that the free fall of bodies of different masses in the void should not show any difference. We remark that Galileo did not describe how he actually carried out the experiments. Vergara Caffarelli hypothesized to drop wax balls mixed with other materials in water in order to replicate in a laboratory (Vergara Caffarelli 2009, pp. 38-51). As a further investigation suggested by Galileo's writings, we explored if the final velocities of objects when they fall through a fluid are proportional to the differences between the specific weight of the body and that of the surrounding medium as Galileo supposed. By means of a tracker software, a video analysis and modelling tool, we marked the positions of the two little balls ($d = 1,5$ cm) and obtained the space–time coordinates graphs to calculate the final velocities (fig. 2). The final velocities of the balls are proportional to the differences in density in the case of glycerine. In the case of water – oil as well, it must be assumed that the resistance of the medium is proportional to the square of velocity so

that final velocities of falling result proportional to the squared roots of the differences in density.

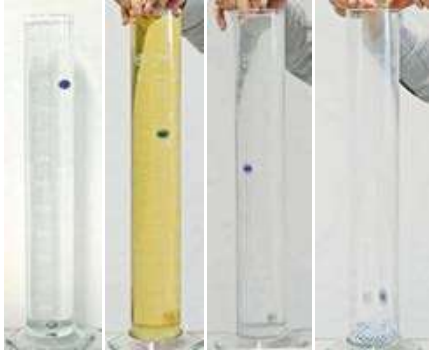


Fig. 1. The fall of the two balls in glycerine, in oil, in water and in air. Source: own experiments images

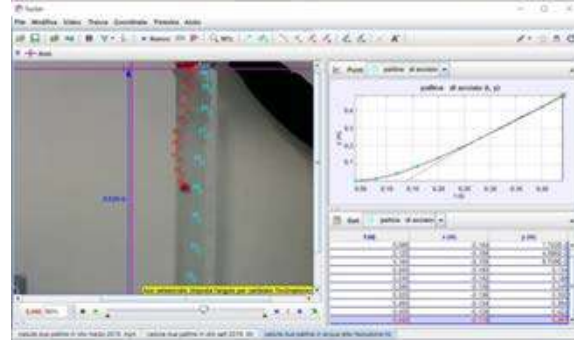


Fig. 2. An example of using Tracker software to calculate the final velocity. Note the final time interval during which the motion is uniform. Source: own experiments images

	Linearity range			Final velocity (m/s)
	Time (s)	Space (m)		
Steel ball in glycerine	1,48	0,445	0,24	
	0,12	0,112		
Glass ball in glycerine	7,60	0,471	0,062	
	0,40	0,025		
Steel ball in oil	0,44	0,498	1,4	
	0,24	0,221		
Glass ball in oil	0,92	0,484	0,58	
	0,16	0,044		
Steel ball in water	0,44	0,510	1,5	
	0,28	0,268		
Glass ball in water	0,80	0,502	0,69	
	0,56	0,336		

Tab. 1. Final velocities. Relative uncertainties have been propagated. The absolute uncertainties affects the second significant digits.

	Density (g/cm ³)
Steel ball	7,84
Glass ball	2,77
Glycerine	1,26
Oil	0,916
Water	0,995

Tab. 2. Density

	$\frac{v_s}{v_g}$	$\frac{\rho_s - \rho_m}{\rho_g - \rho_m}$	$\sqrt{\frac{\rho_s - \rho_m}{\rho_g - \rho_m}}$
Glycerine	4,0	4,4	2,1
Oil	2,4	3,7	1,9
Water	2,2	3,9	2,0

Tab. 3. Ratios between final velocities v_s and v_g of steel and glass balls compared with ratios of the differences in densities - ρ_s , ρ_g and ρ_m - of steel, glass and the medium and with the squared roots of the their differences.

4. The Motion along an Inclined Plane

History, apparatus, measures, analysis & calculus. The students carried out the experiment in two ways: a) they fixed the spaces, then they measured the corresponding time intervals using the water clock; b) they fixed the times marked step-by-step by the pendulum in order to measure the corresponding spaces travelled. Galileo claimed ([1638] 1914, pp. 178-179) to have used an inclined plane about 12 *braccia* long (Florentine

braccio a terra = 0.55063m). We used a wooden beam (675cm x 15cm x 10cm). Our inclined plane was lifted by three cuboids (85cm x 55cm x 30cm; 85cm x 55cm x 20,5cm; 85cm x 55cm x 11cm). A channel shaped like a circular segment was cut into it: 3.4cm wide and 0,8cm deep. Galileo's notes did not size the balls used. Thus, we used steel balls (2,7; 3,0; 3,5 cm of diameter) so that the balls touched the channel in *one point*, only. In the following, the inclined plane is presented.



Fig. 3. The inclined plane with the bells and the pendulum built and used at the Liceo Scientifico "F. Sbordone" in Naples. Source: own experiments images.

The students fixed spaces. The distances to be covered have been set by placing a small wooden block in the canal. The experimenter started the water clock with one hand and let the ball fall by the other one; in order to reduce the inaccuracy of the measurement. The water clock turned off and a sound of the ball impact occurred. The ball was lowered first along the entire length of the canal. The problem of fixing the distance to get half the fall time was raised; the students required a solution. The students were surprised to verify that the situation does not happen for half the plane length but for a quarter of it. Thus, they repeated the measures checking the different values of distance. Thus they modelled the ratio between the travelled distances and the squared times and they found it is constant (tab. 4).

d (m)	Water (g)										t (s)	d/t (m/s)	d/t ² (m/s ²)
	I=1	I=2	I=3	I=4	I=5	I=6	I=7	I=8	I=9	Average			
6,66	397	400	400	404	410	412	419	420	422	408±13	8,2±0,3	0,82	0,100
5,00	356	366	363	368	363	344	354	356	363	359±10	7,2±0,2	0,70	0,097
3,33	296	301	286	293	284	280	282	279	287	289±11	5,8±0,2	0,58	0,100
1,67	198	204	205	206	206	209	211	212	213	206±8	4,1±0,2	0,41	0,098

Tab. 4. Fall times *t* taken to travel the distances *d* from the rest along an inclined plane measured with the water clock. The uncertainty on times (the half-range of measurements) is of the order of a few tenths of a second.

In the experiment with fixed times, eight small bridges with bells are adjusted along the channel in positions that a bell rings every time a pendulum 25 cm long describes a complete oscillation with a duration of 1s. The distances Δd travelled in subsequent equal

time intervals starting from rest follow the Galileo's law of odd numbers (Galileo [1638] 1914, pp. 175-177: see also Pisano and Cioci 2020): the differences between experimental and theoretical values are less than 3% of their value (tab. 5).

t (s)	Odd Numbers	Δd_{sper} (cm)	$\Delta d_{\text{theor}} = \text{Odd } N \cdot \Delta d_1$ (cm)	Diff (cm)
1	1	9,9	9,9	0
2	3	29,6	29,7	-0,1
3	5	49,4	49,5	-0,1
4	7	69,9	69,3	0,6
5	9	89,6	89,1	0,5
6	11	111	109	2
7	13	130	129	1
8	15	145	149	-4

Tab. 5. Measures of the distances Δd_{sper} travelled along the inclined plane in subsequent equal time intervals $\Delta t = 1$ s and their theoretical values Δd_{theor} .

H (cm)	G_{sper} (cm)	G_{theor} (cm)	Diff (cm)
30,0	79,8	79,8	0
40,0	93,9	92,1	1,8
50,0	101,7	105,0	-3,3
60,0	110,1	111,4	-1,3
70,0	119,5	118,9	0,6
80,0	128,8	127,8	1,0
90,0	138,3	136,6	1,7
100,0	142,4	145,8	-3,4

Tab. 6. Proportionality between the range G of the projectile and the square root of the falling height H on the launching ramp.

x (cm)	y (cm)	y/x^2 (1/cm)
72	23	0,0045
100	44	0,0044
128	70	0,0043
146	96	0,0045

Tab. 7. The reconstruction of the trajectory of the bullet and the proof that it is a parable,

6. The Motion of the Projectile

History, apparatus, modelling & calculus. The students dropped a small ball (diameter = 1,5cm) along a launch pad/inclined plane (100cm x 50cm) varying the falling height and thus its final velocity. The initial velocity of the ball in air – in modern terms modelled by a vector and due to small distance travelled – is visibly assumed by the students to be horizontally directed. Thus, based on Galileo's notes and further geometrical and physical assumptions, they calculated the direct proportional relationship between the range G and the square root of the launch pad height H that is to say the module of its initial velocity (fig. 4). In particular, they measured the range G when the height H changed (instead $h = 81,0$ cm was fixed). Then, in order to match experimental and theoretical data, the students after making the first measure calculated the expected theoretical values (based on the historical Galilean proportion):

$$G_1 : G_2 = V_1 : V_2 = \sqrt{H_1 : H_2}, \quad \text{that is to say: } G_{\text{teor}} = \sqrt{H_{\text{sper}}(\text{cm}) : 30 \text{ cm}} \cdot 65 \text{ cm}.$$

The differences between the experimental and theoretical data are of the order of magnitude of those calculated by Galileo (1602–1637, BNCF, Ms Gal72, f. 116v) (tab. 6).

In order to claim the parabolic bullet's trajectory, the students measured the horizontal range of the ball at different heights (as "x" in tab. 7). The position of the ball's impact

point is deduced from the trace left by the ball on a rigid panel placed on an elevator and covered with flour (fig. 5).

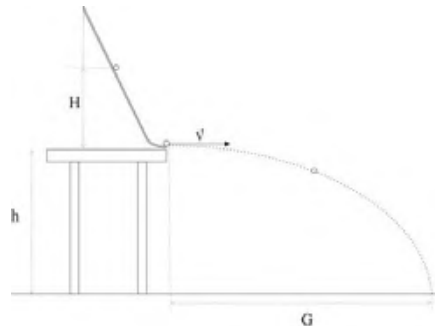


Fig. 4 The experimental apparatus for verification of proportionality between range and square root of the height of fall from the launching ramp. Source: our graphic representation



Fig. 5 The experimental apparatus for the reconstruction of the parabolic trajectory of the bullet. Source: own experiments images

Then they analysed the observed and calculated errors as usual. The “y” values are measured from the highest point of the trajectory. They also verify that the experimental points were arranged along a parabola because the ratios between the values of “y” and the squares of “x” were constant (tab. 7).

Acknowledgments

We are very grateful to Mme Susanna Pelle *Fondo galileiano, Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze*, for permission to utilise Galileo’s laboratory note. We warmly thank Mme Maria Antonella Caggiano, Principal of *Liceo Scientifico “F. Sbordone”*, for supporting our project and Mme Marinella Rodio for experiments laboratory.

References

- Galileo G. ([1638] 1914). *Dialogues Concerning Two New Sciences*. New York: Macmillan.
- Galileo G. (1890–1909). *Le opere di Galileo Galilei: Edizione nazionale sotto gli auspici di sua maestà il re d’Italia*. Favaro A. (ed.). Firenze: Barbera.
- Galileo G. (1960). *On Motion and On Mechanics. Comprising De Motu (ca. 1590)*. Madison: The University of Wisconsin Press.
- Heering P., Höttecke D. (2014). *Historical Investigative Approaches in Science Teaching*. Dordrecht: Springer, pp. 1473-1502.
- Pisano R., Bussotti P. (eds) (2017). *Homage to Galileo Galilei 1564-2014. Reading Iuvenilia Galilean Works*. History, Historical Epistemology of Science Phil. Sci 21-1.

Pisano R., Cioci V. (2020). *Galileo's Free fall into History Physics & Nature of Science Teaching*. In: Esposito S., Fregonese L., Mantovani R. (eds.). *Proceedings of 38th SISFA Congress*. Pavia: Pavia University Press, pp. 271-278.

Vergara Caffarelli R. (2009). *Galileo Galilei and Motion*. Berlin–New York: Springer.

Archival sources

Galileo G. (1602–1637). Fondo galileiano, Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze. Opere di Galileo Galilei, Meccanica, P.5, T.2, Ms Gal. 72.

Preparing for the experimental research on ‘Newton’s prisms’ in Italy compared to those in Britain

Yoshimi Takuwa – Tokyo Institute of Technology, Japan – takuwa443@gmail.com

Abstract: There are seven historical prisms associated with Isaac Newton (1643-1727), and three of them are held in the Musei Civici di Treviso, Italy. These three prisms are thought to have been brought by Francesco Algarotti (1712-1764) from Britain. The most remarkable thing about these three prisms is their material: according to Vasco Ronchi’s report, one is made of crown glass and the other two are made of quartz crystal. In contrast, all four of the prisms in Britain are made of flint glass. Crown glass is a conventional type of glass which has a relatively small refraction and dispersion, while flint glass is a newer type of glass invented in the 1660s which has a relatively big refraction and dispersion. The difference in glass type has been a cause of trouble for Newtonian researchers because all the experimental data that Newton left seems to be those of crown glass but not flint glass. Furthermore, I revealed the following result by replicating Newton’s experiments: if Newton had used not only crown glass but also flint glass, he would not have had to add complicated refinements to the famous ‘crucial experiment’, and he would not have made a mistake when he divided spectrum into seven principal colors using the geometrical division. For these reasons, three prisms in Italy which possibly have similar characteristics as Newton’s data have become important. For the first step of the experimental research on ‘Newton’s prisms’, I have thought up a simple examination that will allow us to observe the rough optical characteristics of the prisms without touching them. If a prism has angles of approximately 60° , this simple examination may enable us to distinguish whether the glass’s refraction and dispersion correspond to Newton’s data.

References

- V. Ronchi, “I ‘prismi del Newton’ del Museo Civico di Treviso,” *Atti della Fondazione Giorgio Ronchi*, 12 (1957), 224-40.
- Y. Takuwa, “The Historical Transformation of Newton’s *experimentum crucis*,” *Historia Scientiarum*, 23 (2013), 113-140.

Newton's Geneva Edition (1822): the *Notes* on Integral Calculus

Raffaele Pisano – IEMN, Lille University, Lille, France; CPNSS, LSE, UK – raf-faele.pisano@univ-lille.fr

Paolo Bussotti – University of Udine – paolo.bussotti@uniud.it

Abstract: Based on our current scientific and editorial project (Pisano, Bussotti 2014–2022) concerning a critical, commented translation – from Latin into English – of Newton's *Principia - Geneva Edition (1739-1742)*, new details and insights are here presented. The *Geneva Edition* of the *Principia* is an annotated edition of Newton's masterpiece. The apparatus of notes is broad and longer than Newton's text itself. The notes concern and clarify several aspects of Newton's procedures and methods, but they also refer to the development of theoretical mathematics and physics after the publication of *Principia*'s first edition (1687). In many *notes* there are also historical considerations which trace the history of a certain concept until Newton. Thence, these *notes* are a precious instrument to guess some aspects of history of physics and mathematics before Newton, in Newton's epoch and immediately after Newton's death. In this contribution, the *notes* concerning integral calculus will be analysed as a case study. They offer an interesting example of the huge work carried out by the editors of the *Geneva Edition*.

Keywords: Newton, Geneva Edition, Integral Calculus.

1. Introduction

On several occasions we have clarified the features of Newton's *Principia - Geneva Edition* (Newton [1739-1742] 1822), as well as the profound work developed by the three editors Thomas Le Seur (1703-1770), François Jacquier (1711-1788) and Jean Luis Calandrini (1703-1758) (Bussotti, Pisano 2014; Pisano, Bussotti 2016a, 2016b, 2017; see also Guicciardini 2014), thence in this context we will only refer to a synthetic scheme for the reader to guess the main characteristics of the *notes*' apparatus included in the Geneva Edition¹. After that we will focus on the case study of integral calculus. The *notes* of the editors can be divided into four kinds:

¹ The Geneva Edition was published three times: the first time it was published between 1739 and 1742 in Geneva; the second time in 1760 once again in Geneva and the third time in 1822 in Glasgow. The editions following the first one corrected some (in general not significant) mistakes of the original edition. The second reprint was published in Glasgow in 1822 (one might speak of *Glasgow-Geneva Edition*). Since this edition is the most refined one, we will refer to it. The third book of Newton's *Principia* is divided into two tomes in the Glasgow-Geneva Edition. Thence, the reader can find a "IV" while referring to it. For any detail, it is possible to consult out mentioned publications.

1. *Notes* which are directly referred to Newton's text. These *notes* explain the passages of Newton's work which the editors judge to be not completely clear or, at least, clear only for experts. They offer very broad explanations to make Newton's work easier available for scholars who had a certain knowledge of physics though not being professional physicists. The editors often transcribe Newton's geometrical arguments into analytical terms, which is a useful operation to express Newton's thought in a language which was more adherent to that used in physics immediately after Newton.
2. There is a series of *notes* which are not direct explanations of Newton's text, but additions of the editors connected to Newton's book. A high percentage of these *notes* concerns the historical development before and after Newton's masterpiece of some aspects of mathematics and physics faced in the *Principia*.
3. Treatises the editors inserted for the reader to get a satisfying introductory picture of the arguments faced by Newton. As examples of this kind of additions one might refer to: a) a treatise on the conic sections inserted in the *notes* to the first book (Newton 1739-1742, 1822, pp. 86-103); b) a treatise on the essential elements of positional astronomy inserted at the beginning of the third book (*Ivi*, III, pp. IX–XXXVI).
4. Treatises written by authors who developed and improved Newton's tides theory. They are three, which are inserted in the third book after Newton's theory of tides. They are: a) D. Bernoulli: *Sur le Flux et Reflux de la Mer*, 1740 (*Ivi*, IV, pp. 101–207); b) C. McLaurin: *De causa physica fluxus et refluxus maris*, 1740 (*Ivi*, pp. 209–245); c) L. Euler: *Inquisitio physica in causam fluxus ac refluxus maris*, 1740 (*Ivi*, pp. 247–341). These works were awarded with the praise of the *Académie Royale des sciences*.

The *notes* concerning integral calculus enter the first and second kind. We face them because they are a paradigmatic example of the way in which the editors worked and because of the great importance of integral calculus.

2. The *Notes* on Integral Calculus

Newton introduced the basic elements of integral and differential calculus in the section I, book I of his *Principia* (After the *Definitions* and *Axioms or Laws of Motion*). The Lemmas concerning the concept of integral are numbered II, III, IV. The section is closed by a Scholium in which Newton, besides other questions, explained why he preferred to use the method of first and last ratios to calculate curvilinear areas (so introducing, as a matter of fact, the concept of integral) rather than the ancient exhaustion method or the more modern method of indivisibles. We will focus on two brief *notes* to the Lemma II because they represent a paradigmatic example of *notes* belonging to the kind 1) and on a longer note to the scholium since it is emblematic of the notes belonging to the kind 2). In Lemma II Newton established what follows (Fig. 1):

If in any figure $AacE$ terminated by the right lines Aa , AE , and the curve acE , there be inscribed any number of parallelograms Ab , Bc , Cd , &c. comprehended under equal bases AB , BC , CD , &c. and the sides Bb , Cc , Dd , &c. parallel to one side Aa of the figure; and the parallelograms $aKbl$, $bLcm$, $cMdn$, &c. are completed. Then if the breadth of those parallelograms be supposed to be diminished, and their number to be augmented in infinitum: I say that the ultimate ratios which the inscribed figure $AKbLcMdD$, the circumscribed figure $AalbmendoE$, and the curvilinear figure $AabcdE$, will have to one another, are ratios of equality. (Newton [1739-1742] 1822, I, p. 45. See also *Id.*, 1687, p. 27. Source: Public domain. Translation: it is adapted from Newton 1729, p. 95).

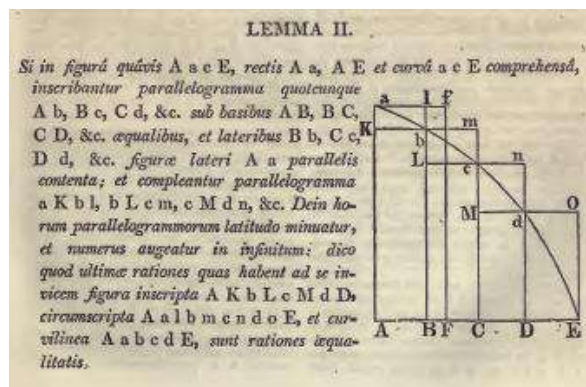


Fig. 1. Lemma II

In the note 107 (Newton [1739-1742] 1822, I, pp. 46-47), the editors explain the idea behind this Lemma in an elementary manner: when the line Bb moves towards Aa , both the distance AB between these two parallels and their difference Ka become evanescent. Namely they clarify: “In that state of evanescence the difference Ka of the lines Aa and Bb is less than any given line, or infinitely small or unassignable in respect to AK and Bb ”² (*Ivi*, p. 46). Now an interesting question arises: what conception of infinity did the editors present: a potential or an actual conception? There is no doubt that, in this context, Newton’s conception is that of a potential infinitesimal. For, Newton wrote that the number of parallelograms is augmented “in infinitum” and the expression “last ratios” is clearly referred to the limit of the ratio between the inscribed and circumscribed figures. Newton is thinking of a *process*, which takes place in time. He is saying that after a certain time, the length AB becomes smaller than any pre-assigned quantity and that, hence, the ratio between the circumscribed and the inscribed figure is a ratio of equality. However, the concept of infinity expressed by the editors is, at least verbally, less clear than Newton’s. For, while referring to the two segments AB and Ka they use the expression “In illo statu evanescentiæ” (“In that state of evanescence”, *Ivi*, p. 46) as if the being infinitesimal of a segment was a state and not a mere process, namely as if segments as AB and Ka were actual infinitesimals. We are not claiming that the editors had an actual conception of the infinitesimal magnitudes, and, as we will see, they fully understood that Newton had a potential one, but their language is in this case more ambiguous than Newton’s. On the other hand, they added an interesting consideration: we remark that Newton did not focus

² Hereafter, the translations from Latin into English of the *notes* of the *Geneva Edition* are ours. They are part of our current editorial project (Pisano and Bussotti 2014-2022).

on the limit of the segment Ka because it is not necessary for his argument. It is enough to concentrate on the variation of the basis AB . However, the consideration of this segment allows an easy and remarkable consideration on infinitesimals developed by the editors: since both $Kb=AB$ and Ka are evanescent, the parallelogram $Kalb$ and the triangle Kab have two infinitesimal dimensions, while the parallelogram $ABbK$ has the finite dimension AK and the infinitesimal dimension AB . Thence, the editors conclude in the note 108:

From this, it follows that there are different order of infinitesimals. For, it has been proved ([footnote] 107) that the parallelogram Kl is infinitesimal in respect to the parallelogram Ab , and this parallelogram is infinitesimal in respect to the curvilinear area $AEca$ (*Ivi*, p. 47).

Therefore, the editors stressed that infinitesimal of different orders exist and that their geometrical representation is possible. Obviously, the existence of different order of infinitesimals was a known fact, but the resort to their geometrical representation – which also was not an absolute novelty, it is enough to think of Leibniz – is a particularly appropriate means to clarify, with a visual support, these concepts to readers who were expert in the then traditional mathematics (namely geometry), but not completely accustomed with new mathematics (that is differential and integral calculus). From a historical and conceptual point of view, it would be interesting (and we will do it) to check all the occurrences of the terms “infinite” and “infinitely small” in the *notes* to clarify the conceptions the editors had of these notions, also considering that their nature was not then clear and will not be until Bolzano’s and Cauchy’s rigorization of analysis (in the 10s-20s of the 19th century). It is enough to think that in 1797 Lazare Carnot wrote the interesting *Réflexions sur la métaphysique du calcul infinitesimal*.

The scholium which closed the first section of Newton’s masterpiece is important because Newton clarified the reasons why he used the method of first and last ratios and his conception of infinitesimals. For, he wrote:

Those things which have been demonstrated of curve lines, and the superficies which they comprehend, may be easily applied to the curve superficies and contents of solids. These Lemmas are premised to avoid the tediousness of deducing perplexed demonstrations *ad absurdum*, according to the method of the ancient geometers. For demonstrations are more contracted by the method of indivisibles: but because the hypothesis of indivisibles seems somewhat harsh, and therefore that method is reckoned less geometrical, I chose rather to reduce the demonstrations of the following propositions to the first and last sums and ratios of nascent and evanescent quantities, that is, to the limits of those sums and ratios; and so to premise, as short as I could, the demonstrations of those limits. For hereby the same thing is performed as by the method of indivisibles; and now those principles being demonstrated, we may use them with more safety. Therefore if hereafter I should happen to consider quantities as made up of particles, or should use little curve lines for right ones, I would not be understood to mean indivisibles, but evanescent divisible quantities: not the sums and ratios of determinate parts, but always the limits of sums and ratios; and that the force of such demonstrations always depends on the

method laid down in the foregoing Lemmas (Newton [1739-1742] 1822, I, pp. 58-59. See also *Id.*, 1729, p. 102).

The editors add four *notes* to this part of Newton's Lemma. The first note indicated as (m) 136 (*Ivi*, pp. 58-59) concerns the exhaustion method used by the Greeks to calculate areas and volumes, of which Newton told to be involved in long *ad absurdum* demonstrations. This note is interesting because the editors specify the exhaustion method's essence with brief and clear traits. For, they wrote:

It is necessary to know the great progresses made by geometry. The ancient geometers, in the questions connected to *Infinity* carried out their proofs by the reduction *ad absurdum*, and obtained the truth starting from false presuppositions. To prove that, between two quantities, which tend constantly to equality and, eventually, are mutually closer than any given difference, a relation of equality subsists, they supposed that a relation of being bigger or smaller subsists, proving then both hypotheses were false. Basing on this method, they call *ad absurdum*, they argued that a perfect equality existed between those two quantities. Everyone sees how complex and tiring this method is. Actually, the ancients' geometry was rather imperfect. This does not mean they were completely unaware of the principles of infinitesimal method (*Ivi*, p. 58).

They continued claiming that the Greeks, in particular Euclid and Archimedes, considered as an axiom that the evanescent quantities are equal to null quantities. They adduced the example of Euclid's proof that the circles are as the squares of their diameters. They explain that Euclid imagined that similar polygons were inscribed or circumscribed to a circle. The number of the polygon's sides was infinitely increased and their length infinitely diminished, so that the difference between the area of the circle and that of the inscribed or circumscribed polygons became less than any given quantity. Since these polygons are as the diameters' squares, in which they are inscribed or circumscribed, Euclid concluded the circles were as the diameters' squares, as well. While the general description of the exhaustion method is perspicuous, the editors also asserted that the Greeks posed axiomatically the evanescent quantities as equal to null quantities in comparison to the finite ones, which is very debatable. There is no such axiom either explicit or implicit in the proves by exhaustion left by the Greeks. The *ad absurdum* reasoning allowed the Greeks to avoid the problem of assigning a specific value to the limit of a series of objects. The basic difference between Newton's approach and those of the ancients is that Newton had clear the concept of limit and the direct (though not completely explicit) use of the limits within differential and integral calculus. Whereas the ancients, probably guessing that what nowadays we call the concept of limit, was involved in several possible obscurities – who only the great mathematicians of the late XVII, XVIII and XIX centuries were progressively able to disentangle – avoided any reference to it and resorted to the exhaustion method based on an *ad absurdum* reasoning, where the only request is that the difference between two quantities becomes smaller than any given one; but this idea which might seem to construct an operative concept of limit, in fact, did not. In a further assertion of the same note, the editors claimed that the ancients considered the polygons inscribed or circumscribed in a circle as

composed of an infinite number of infinitesimal sides (*Ivi*, p 59), which is also debatable, because in the exhaustion method it is enough that the dichotomy process can be iterated with certain features. There is no reference to the idea that the inscribed or circumscribed polygons are composed of an infinite number of infinitesimal sides. Furthermore, if the Greeks would have been clear these infinitesimal concepts, it is to wonder why they did not try to develop the infinitesimal calculus but relied upon the ingenious exhaustion method. An interesting observation concerns the fact that in the procedure of dichotomy used by Euclid in his proof not only the concept of infinitesimal of first order is implicit, but also that of infinitesimals of higher order. For, the editors claimed that the area of the infinitesimal circular segment, which is obtained when the number of sides of the inscribed polygon tends to infinity and their length to zero, is what afterwards was called an infinitesimal of second order, which is correct (*Ivi*, p. 59). They asserted that the Greeks did not realize the difference among the different order of infinitesimals. The editors concluded their note pointing out that, in his method of indivisibles, Cavalieri first considered that the lines are composed of an infinite number of points, the surfaces of an infinite number of lines, and the solids of an infinite number of surfaces, which is also a debatable interpretation of what Cavalieri exactly meant. It is, instead true, as they claim, that Newton abandoned the idea of indivisibles considering it to be very problematic from a geometric point of view.

Finally, in the note (p) 139, the editors highlight that Newton's conception of evanescent quantities is a potential conception. For we read:

The evanescent quantities has not to be conceived as determinate or determinable parts having a certain and given finite smallness. For, whatever little portion of lines or surfaces or bodies we will consider and take into account, they will be always finite, not evanescent. The infinitesimal quantities cannot be included between pre-established terms, even though these terms are mutually very close. This means such a quantities must be considered as always decreasing and perpetually diminishing (*Ivi*, p. 59).

3. Conclusion

In our contribution we have tried to give an idea of the main features of Newton's Geneva Edition. We have focused on the case study of the integral calculus because it offers an interesting example of some historiographic (not always sharable) interpretations of the editors and highlights the importance of the Geneva Edition for several aspects of history of science.

References

- Bussotti P., Pisano R. (2014). “Newton’s *Philosophiae naturalis principia mathematica* “Jesuit” edition: the meaning of a huge work”. *Rendiconti Lincei. Matematica e Applicazioni*, 25 (4), pp. 413-444.
- Guicciardini N. (2015). “Editing Newton in Geneva and Rome: The Annotated Edition of the Principia by Calandrini, Le Seur and Jacquier”. *Annals of Science*, 72 (3), pp. 337-380.
- Newton I. ([1739-1742] 1822). *Philosophiae naturalis principia mathematica, auctore Isaaco Newtono, Eq. Aurato. Perpetuis commentariis illustrate, communi studio pp. Thomae le Seur et Francisci Jacquier ex Gallicana Minimorum Familia, matheseos professorum*. Editio nova, summa cura recensita. Glasgow: Duncan.
- Newton I. (1687). *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Londini: Streater.
- Newton I. (1729). *The mathematical principles of natural philosophy*. Translated by Motte Andrew. London: Motte.
- Pisano R., Bussotti, P. (2014–2022). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica. Full Transcription and Translation from Le Seur and Jacquier Jesuit Edition*, 5 Vols. NY–Oxford: Oxford University Press, pre-print
- Pisano R., Bussotti, P. (2016a). “A Newtonian tale details on notes and proofs in Geneva edition of Newton’s *Principia*”. *BSHM Bulletin Journal of the British Society for the History of Mathematics*, 31 (3), pp. 160-178.
- Pisano R., Bussotti, P. (2016b). “Newton Geneva” Edition as research programme concerning the relationship physics-mathematics in the history and philosophy of science, in Tucci P. (ed.), *Società italiana degli Storici della Fisica e dell’Astronomia, Atti del XXXIV Convegno annuale, Proceedings of the 34th Annual Conference*. Pavia: Pavia University Press, pp. 149-155.
- Pisano R., Bussotti, P. (2017). *The Fiction of Infinitesimals in Newton’s Works. On the Metaphorical use of Infinitesimals in Newton*, in Marcacci F., Rossi M. G.. *Isonomia – Epistemologica. Special issue Reasoning, Metaphors and Science* , pp. 141-160.

La questione delle forze vive nel primo scritto di Kant del 1746 (1749) e il problema epistemologico fondamentale della Scienza ‘classica’

Stefano Veneroni – Università del Piemonte orientale, Vercelli
– stefano.veneroni@icloud.com

Abstract: The *Thoughts on the True Estimation of Living Forces* represents the first synthetic step of Kantian speculation and addresses the famous controversy on ‘the living forces’ occasioned by Leibniz in 1686 with respect to Descartes’ philosophy on the theme of momentum conservation ($K: \Delta p = m.v$ or $F = m.v^2$?). From this first work emerges clearly the common thread that runs through all of Kant’s research, aimed at the pursuit of a systematic description of the Universe, determined *a priori*, according to the programmatic direction of ‘classical’ Science. That is to say, in absolute conformity with the law of causality and the principle of sufficient reason, according to which: *posita ratione, ponitur rationatum*.

Keywords: Kant, epistemologia, scienza classica.

«Vediamo ora quali concetti di carattere definitivo la Fisica debba alla teoria della Relatività particolare. [...] I due principi della conservazione della quantità di moto [mv] e della conservazione dell’energia [$\frac{1}{2} mv^2$] si fondono in un unico principio. La massa inerte di un sistema chiuso coincide con la sua energia [$E=mc^2$], e la massa viene così eliminata come concetto indipendente».

[A. EINSTEIN, *Autobiografia scientifica*, 1949]

1. La questione epistemologica fondamentale della Scienza ‘classica’ nella costruzione einsteiniana.

1.1. Osservazione ‘discreta’ e legge nel ‘continuo’

Il problema della determinazione del *nesso* (*nexus*) tra fenomeni fisici e concetti, e della deduzione delle relative leggi nel ‘continuo’ a partire dall’osservazione – inevitabilmente – ‘discreta’ costituisce il problema fondamentale della Scienza ‘classica’, intesa quale modello programmatico volto al perseguimento di una descrizione sistematica delle variazioni fisiche dell’Universo, *antecedentemente* determinata (cioè regolata secondo principi, e pertanto *a priori*), in assoluta conformità rispetto alla legge di causalità ed al principio di ragion sufficiente, secondo cui: *posita ratione, ponitur rationatum*.

Già da Aristotele e lungo tutta la Storia della Filosofia, la legge di causalità era stata infatti assunta quale modello ‘classico’ di conoscenza dei fenomeni naturali, al punto che, per Kant così come per lo Stagirita, non avrebbe potuto darsi alcuna conoscenza scientifica (capace cioè di conseguire una certezza apodittica ed universale) al di fuori di una spiegazione causale. Come avrebbe scritto Kant nella *Critica della ragione pura* rispetto al rapporto tra carattere *a posteriori* dell’osservazione e carattere *a priori* del *nexus*¹ causale della legge:

L’esperienza stessa, in effetti, donde mai trarrebbe la sua certezza, se tutte le regole, secondo le quali essa procede, fossero ogni volta empiriche, e quindi contingenti (cosicché è difficile credere che si possano far valere come prime proposizioni fondamentali)?².

Il problema del rapporto tra osservazione empirica e determinazione *a priori* dei fenomeni in virtù di una legge sottratta per sua stessa natura all’osservazione sarebbe rimasto inspiegabile anche agli occhi dello stesso Einstein, costituendo così il limite più profondo di un tale modello teorico, rispetto in particolare ai guadagni speculativi che erano già stati raggiunti da Kant, nello specifico, con la *deduzione trascendentale*. Come scriverà infatti Einstein nel 1949 in merito alla possibilità di compiere una *deduzione logica* degli assiomi a partire dall’esperienza:

¹ In merito al concetto di *nexus* e di *conjunctio* in Kant, si veda l’importante nota contenuta nella *Critica della ragione pura*: «Ogni congiunzione (*conjunctio*) o è composizione (*compositio*), o è connessione (*nexus*). La composizione è la sintesi del molteplice, i cui componenti non appartengono necessariamente gli uni agli altri: per esempio, i due triangoli, in cui un quadro viene diviso dalla diagonale, non appartengono per sé necessariamente l’uno all’altro. Tale è la sintesi dell’omogeneo, in tutto ciò che può essere considerato matematicamente (a sua volta, questa sintesi può essere suddivisa in sintesi di aggregazione e sintesi di coalizione: la prima è rivolta a quantità estensive, e l’altra a quelle intensive). La seconda congiunzione (*nexus*) è la sintesi del molteplice, in quanto i componenti di questo appartengono necessariamente gli uni agli altri (così, per esempio, l’accidente appartiene ad una qualche sostanza, oppure l’effetto appartiene alla causa), e quindi di un molteplice, che viene rappresentato altresì come eterogeneo, ma come congiunto *a priori*. Tale congiunzione, in quanto non è arbitraria, io la chiamo dinamica, per il fatto che riguarda la congiunzione dell’esistenza del molteplice (a sua volta, questa congiunzione può essere suddivisa in congiunzione fisica delle apparenze tra loro, e in congiunzione metafisica delle apparenze nella facoltà conoscitiva *a priori*)» (Kant, I., *KrV*, KGS, III, pp. 148-149 n.; tr. it., p. 237 n.). Tale osservazione si fondava a sua volta affermato al §. 15 relativo alla possibilità di una congiunzione in generale: «Il molteplice delle rappresentazioni può venir dato in un’intuizione, che è semplicemente sensibile, cioè null’altro che recettività, e la forma di questa intuizione può trovarsi *a priori* nella nostra facoltà di rappresentazione [*Bildungskraft*] senza tuttavia esser null’altro che il modo in cui il soggetto viene modificato. Tuttavia, la congiunzione (*conjunctio*) di un molteplice in generale non può mai entrare in noi attraverso i sensi, e quindi non può neppure essere già contenuta nella forma pura dell’intuizione sensibile. In effetti, tale congiunzione è un atto della spontaneità della capacità di rappresentazione [*Bildungskraft*], e poiché tale spontaneità, per distinguerla dalla sensibilità, occorre chiamarla intelletto, allora ogni congiunzione – sia che possiamo divenirne coscienti sia che non lo possiamo, sia che possa risultare una congiunzione del molteplice dell’intuizione sia che possa essere una congiunzione di vari concetti, ed infine, sia che possa risultare una congiunzione del molteplice dell’intuizione sensibile sia che possa esserlo dell’intuizione non sensibile – è un atto dell’intelletto, che designeremo con la denominazione generale di sintesi, per fare così osservare, in pari tempo, che noi non possiamo rappresentarci alcunché come congiunto nell’oggetto, senza averlo noi stessi congiunto in *precedenza*, e che la congiunzione, fra tutte le rappresentazioni, è l’unica che non può essere data da oggetti, ma può essere costituita soltanto dal soggetto stesso, poiché essa è un atto della spontaneità del soggetto» (Kant, I., *KrV*, KGS, III, pp. 107-108; tr. it., pp. 152-153).

² Kant, I., *KrV*, KGS, III, p. 30; tr. it., p. 50.

Una teoria può essere verificata dall'esperienza, ma non esiste alcun modo per risalire dall'esperienza alla costruzione di una teoria³.

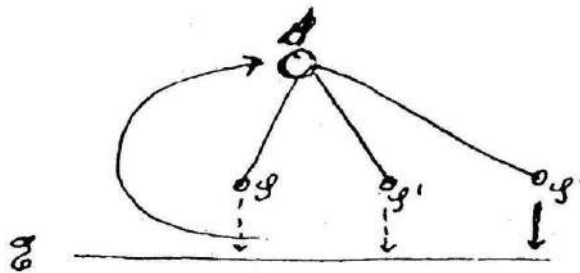
1.2. L'induttivismo einsteiniano

L'assunzione del paradigma empirico-osservativo, in base al quale la spontaneità dell'intelletto non prenderebbe parte attiva alla costituzione delle apparenze, intervenendo solo nella costruzione teorica dei modelli matematici per la spiegazione delle leggi, aveva difatti costituito – come sarebbe stato peraltro lui stesso a dichiarare – la più grande difficoltà di tutta la ricerca teorica di Albert Einstein. Per tale ragione, egli affermava nel 1934 come:

Nessun cammino *logico* conduce a queste leggi elementari: l'intuizione sola, fondata sull'esperienza, ci può condurre ad esse. [...] Nessuno di coloro che hanno approfondito il problema saprebbe negare che il mondo delle osservazioni determina praticamente, senza ambiguità, il sistema teorico e che, ciò nondimeno, ogni via della logica apporta dati di osservazione ai principi della teoria: è ciò che Leibniz ha così felicemente chiamato l'armonia "prestabilita"⁴.

Nella sua incapacità di compiere il *collegamento* tra percezioni e intuizioni, e tra intuizioni e concetti, un tale modello epistemologico, distanziando temporalmente (nella rappresentazione della successione metodologica) il momento intuitivo da quello deduttivo, aveva di fatto impedito ad Einstein di compiere la giustificazione del *passaggio logico fondamentale* dal 'discreto' al 'continuo', garantendo sinteticamente *a priori* la deduzione delle leggi fisiche e la relativa possibilità della loro applicazione ai *fenomeni*. Tale limite, del resto, sarebbe stato chiaramente espresso dallo stesso Einstein in una nota missiva inviata a Maurice Solovine nel 1952, nella quale è possibile leggere:

Per quel che riguarda la questione epistemologica, Lei mi ha del tutto frainteso; probabilmente mi sono espresso male. Io vedo la cosa nel modo seguente:



- 1) Ci sono date le *E* (esperienze immediate).
- 2) *A* sono gli assiomi, dai quali traiamo conclusioni. Dal punto di vista psicologico gli *A* poggiano sulle *E*. Ma non esiste alcun percorso logico che dalle *E* conduca agli *A*; c'è solamente una connessione intuitiva (psicologica) e sempre « sino a nuovo ordine ».
- 3) Dagli *A* si ricavano, con procedimento deduttivo, enunciati particolari *S* che possono pretendere di essere veri.

³ Einstein, A. (1949), tr. it., p. 52.

⁴ Einstein, A. (1949), tr. it., tr. it., pp. 35, 36.

4) Gli *S* sono messi in relazione con le *E* (verifica per mezzo dell'esperienza). Questa procedura, a ben vedere, appartiene essa stessa alla sfera extralogica (intuitiva), non essendo di natura logica la relazione tra i concetti che intervengono negli enunciati e le esperienze immediate. Questa relazione tra gli *S* e le *E* è tuttavia (pragmaticamente) molto meno incerta di quella che sussiste tra gli *A* e le *E*. Se una tale corrispondenza, pur restando inaccessibile alla logica, non potesse essere stabilita con un elevato grado di certezza, tutto l'armamentario logico non avrebbe alcun valore ai fini della «comprensione della realtà» (es., la teologia). L'aspetto essenziale è qui il legame, estremamente problematico, fra il mondo delle idee e ciò che può essere sperimentato (l'esperienza sensibile)⁵.

1.3. Il problema della deduzione

Il superamento dell'eterogeneità tra 'intuizioni' e 'concetti' finalizzato al raggiungimento di una «*descrizione completa* dell'Universo» (conformemente all'ideale programmatico della Scienza 'classica'), aveva costituito il punto di partenza del progetto di ricerca scientifica implicito in tutta la riflessione speculativa kantiana, la quale, proprio muovendo da una tale istanza, potrebbe oggi esser colta nuovamente in tutta la sua forza, soprattutto se comparata proprio con la teoria della Relatività generale di Einstein, ascrivibile all'interno del medesimo intento programmatico. Fu infatti dall'esigenza di giustificare la possibilità del collegamento tra intuizioni e concetti – rispetto cioè alla necessità di fornire validità oggettiva al *passaggio* dal 'discreto' al 'continuo' – che maturò la soluzione data da Kant al problema fondamentale della Scienza 'classica', esposta compiutamente nella *Critica della ragione pura* attraverso l'esposizione della *deduzione trascendentale*, ma già presente, come istanza programmatica, fin dal suo primo scritto sulle forze vive. La dottrina critica kantiana, infatti, costituisce ancora oggi, insieme all'intero progetto 'scientifico' di ricerca di Kant, la sola possibilità per un superamento definitivo dell'attuale *dualismo epistemologico* – del tutto antinomico e per nulla complementare – sussistente tra la teoria quantistica e la teoria 'classica' (ma foronomica) nel *continuum* proposta dalla Relatività generale. Mancando infatti ad Einstein il *passaggio* 'logico' deduttivo tra mondo dei fenomeni empirici e mondo dei concetti, l'unica modalità di connessione da questi ammessa era stata infatti quella di una "associazione puramente intuitiva", il cui procedere rimaneva tuttavia, in ragione della sua stessa natura psicologica (sub-conscia), del tutto indeterminato:

I concetti e le proposizioni acquistano "significato", cioè "contenuto", solo attraverso la loro connessione con le esperienze sensibili. Questa connessione è puramente intuitiva, non è essa stessa di natura logica. Ciò che distingue la vuota fantasia dalla "verità" scientifica è il grado di certezza con cui questa connessione, cioè questa *associazione intuitiva*, può essere compiuta, e null'altro⁶.

⁵ Einstein, A. (2011), pp. 101-105; tr. it., *Lettera a Solovine*, 7 Maggio 1952.

⁶ Einstein, A. (1949), tr. it., p. 14.

2. La questione epistemologica fondamentale della Scienza ‘classica’ nel primo scritto di Kant

2.1. Il punto di partenza della speculazione kantiana

Ad una lettura storico-critica attenta, si comprende facilmente come i due veri interlocutori di Kant (*in actu exercito*), all’inizio della sua speculazione ed in particolare nel primo scritto sulle forze vive del 1746 (1749), siano inequivocabilmente Galilei (di cui Kant possedeva le opere⁷) e Newton⁸ (del quale Kant possedeva tanto i *Principia* quanto l’*Optice*,⁹ laddove invece (*in actu signato*) Descartes e Leibniz siano chiaramente ripresi da Kant in questo primo scritto sempre e soltanto a partire dalla risposta più o meno valida fornita dai rispettivi modelli teorici in merito ai nodi problematici insiti nella descrizione dell’Universo gravitazionale newtoniano, a sua volta tuttavia eminentemente ‘inerziale’ e *foronomicamente*¹⁰ costruito sulla base della relatività galileiana, retta essenzialmente su tre postulati fondamentali, vale a dire:

l’assolutezza e la relatività del moto e della quiete;

la legge della co-varianza o dell’invarianza della legge al variare del sistema di riferimento;

il modello ‘meccanico’ causale di tipo eminentemente corpuscolare, operante per ‘contatto fisico’ e secondo le leggi dell’equilibrio proposte dal modello aristotelico-archimedeo delle macchine ‘semplici’.¹¹

2.2. Le aporie del modello newtoniano

Tre erano infatti i problemi teorici insiti nella descrizione dell’Universo newtoniano emergenti all’inizio del XVIII secolo e colti perfettamente da Kant nel suo primo scritto. Come anche lo stesso Leibniz ebbe modo di recepire (avanzando il problema della fondazione ‘dinamica’ dei moti meccanici), vi era anzitutto il problema relativo alla giustificazione della natura metafisica del concetto di ‘forza’ e della conseguente spiegazione della sua azione, quale causalità agente “a distanza”. A questo, in secondo luogo, andava aggiungendosi un secondo problema, derivante dall’introduzione della finitezza della velo-

⁷ Cfr.: Galilei, G. (1699) [Warda, V, 11, p. 34].

⁸ Cfr., ad esempio: «Pertanto, la regola della continuazione ‘libera’ e ‘uniforme’ del moto non varrà *in generale*, ma solo a partire da un certo determinato grado di velocità, al di sotto del quale tutti i movimenti di grado minore si consumeranno e scompariranno da sé, fino a che il movimento, con un grado infinitamente piccolo, dura solo un istante, e ha bisogno di una continua aggiunta dall’esterno. Per tale ragione, la regola di Newton, nel suo significato ‘indeterminato’, non vale per i corpi della Natura: *Corpus quodvis pergit in statu suo, vel quiescendi, vel movendi, uniformiter, in directum, nisi a causa externa statum mutare cogatur*» (Kant, I., *Gedanken*, KGS, I, §. 132, p. 155).

⁹ Cfr.: Newton, I. (1714); Newton, I. (1719).

¹⁰ In merito all’adozione del termine *Foronomia* da parte di Kant, si richiama l’opera di Jacob Hermann (richiamata nei *Gedanken* al §. 48) *Phoronomia* del 1719, peraltro posseduta da Kant. Cfr.: Hermann, J. (1716); Hermann, J. (1728).

¹¹ Oltre agli stessi riferimenti storici relativi all’assunzione del modello meccanico-corpuscolare da parte di Newton (cfr.: Roger Cotes, Émilie du Châtelet, Voltaire, Euler e de Maupertuis), si vedano in particolare: Mach, E. (1883); Duhem, P.M.M. (1903); Einstein, A. – Infeld, L. (1942); Jammer, M. (1957¹); Koyré, A. (1960¹); Koyré, A. (1950); Koyré, A. (1962); Koyré, A. (1966¹).

cità della luce ad opera di Rømer e Bradley, che andava a compromettere tanto (*objective*) la possibilità dell'affermazione dell'azione 'immediata' – vale a dire *istantanea* – della forza newtoniana di gravità, quanto (*subjective*) la stessa formulazione della relatività galileiana, su cui si fondava il modello meccanico empirico-osservativo retto sull'idea della possibilità dell'immediatezza dell'osservazione, da cui derivava quella della possibilità della determinazione della *simultaneità* quale stato del moto.

Vi era infine un terzo ordine di problemi, colti nello specifico da Kant in particolare proprio nei *Gedanken*, a partire dai quali si sarebbe a sua volta articolata progressivamente la speculazione kantiana relativa agli scritti "scientifici". L'osservazione fondamentale di natura metodologica (circa il «*modus cognoscendi*», cfr. *Gedanken*, §. 50) mossa da Kant nel suo primo scritto, sulla quale sarà costruita tutta la ricerca speculativa degli anni a seguire, riguardava infatti un inadempimento tanto della posizione cartesiana quanto di quella leibniziana rispetto all'indirizzo programmatico della Scienza 'classica'.¹²

Adottando infatti un metodo epistemologico empirico-osservativo – proprio di entrambi gli schieramenti – per la descrizione dei fenomeni, in taluni casi non era *apparentemente* rispettata la legge di causalità ed il relativo postulato circa l'uguaglianza tra l'effetto e la relativa causa ($C \neq E$).

Questa inosservanza indusse quindi Kant ad interrogarsi circa la validità di un tale modello epistemologico, spingendolo già nel suo primo lavoro all'importante quanto decisiva rivendicazione del carattere esclusivamente *fenomenico* del moto (*Gedanken*, §§. 3, 117) e delle 'apparenze' empiriche, da cui discendevano a loro volta due esigenze metodologiche fondamentali, vale a dire:

- I. da un punto di vista *oggettivo (in re)*, l'esigenza di postulare un ordine di causalità ('ortogonalmente' convergente rispetto alla serie della successione empirica delle apparenze) sottratto all'ordine della successione temporale ed agente simultaneamente come «*immediata successio*», secondo un ordine causale 'intensivo' di ordine metafisico e al tempo stesso convergente rispetto all'ordine 'estensivo', soggetto invece alla serie della successione temporale;
- II. e, da un punto di vista *sogettivo (in rem)*, l'esigenza di superare il modello aristotelico empirico-osservativo fondato esclusivamente sulla sensazione empirica (*esse est percipi; nihil est in intellectu quod prius non fuerit in sensu*) in vista di un recupero del valore epistemologico della facoltà sintetica della *rappresentazione (Bildungskraft)*, intesa da Kant, sulla base dell'insegnamento ricevuto da Martin Knutzen, come *Ars analytica inveniendi*¹³) in quanto, ammettendo un'azione causale agente simultaneamente rispetto all'ordine della successione temporale – e ciò proprio in virtù dell'esigenza epistemologica di rispettare incondizionatamente la legge

¹² Cfr., ad esempio: Blay, M. (1992); Blay, M. (1998); Blay, M. (1999); Blay, M. (2002).

¹³ In opposizione alla dottrina dell'*Ars inveniendi* inscritta invece nel solco della tradizione dialettica. A tale proposito, si veda la trattazione dell'*Ars inveniendi sensualis* e *rationalis* contenuta negli *Elementa Philosophiae rationalis* di Martin Knutzen, Professore di Kant all'Albertina, del 1747 (cfr.: *ivi*, §§. 571-597, pp. 383-399).

dell'uguaglianza tra la causa ed il relativo effetto ($C=E$) –, la sensazione sarebbe stata incapace di cogliere immediatamente – *in instanti* – attraverso i sensi una tale variazione fisica di natura 'intensiva'.

Si apriva così, in Kant, la via *soggettiva* della riflessione metodologica condotta sulle condizioni *a priori* rispetto al problema fondamentale relativo alla determinazione della possibilità della conoscenza scientifica, vale a dire quello della possibilità della *deduzione* di una legge – nel 'continuo' logico e spazio-temporale – a partire dall'osservazione 'discreta', e della relativa possibilità della riconduzione dei fenomeni empirici all'interno di una determinata legge fisico-matematica (nel *continuum*¹⁴).

2.3. L'intento programmatico della ricerca speculativa kantiana

L'intento della ricerca scientifica di Kant, fin dal suo primo scritto, era infatti rivolto al perseguimento di una descrizione 'sistematica' dell'Universo nel 'continuo',¹⁵ *antecedentemente* determinata (*a priori*), in assoluta conformità rispetto all'indirizzo programmatico della Scienza 'classica', vale a dire nel rispetto incondizionato della *legge di causalità* e del conseguente *principio di ragion sufficiente*, secondo cui, in linea con l'insegnamento di Baumgarten¹⁶ e come più volte ribadito nei *Gedanken: posita ratione, ponitur ratiatum*.

Le dichiarazioni metodologiche di Kant, espresse in particolare ai §§. 88-89 ed anticipate al §. 50 (ma sulla cui base metodologica si fonda l'intero scritto sulle forze vive), individuano infatti ciò che si potrebbe definire propriamente come l'invenzione del metodo critico kantiano, il cui senso trova la propria giustificazione all'interno di una ricerca speculativa fortemente unitaria e volta interamente (in tutti gli scritti sistematici kantiani) al perseguimento di [I.] una descrizione sistematica dell'Universo (cioè costruita sulla base di 'principi' secondo un nesso sintetico di continuità), [II.] *antecedentemente* determinata (*a priori*, ovvero non *a posteriori*, cioè elaborata indipendentemente dall'esperienza seppur a partire da questa),¹⁷ [III.] secondo l'indirizzo programmatico della Scienza 'classica', vale a dire in assoluta conformità rispetto alla legge 'logica' di causalità, secondo la quale, in virtù del principio della razionalità universale (*ratio universalis*), richiamato nell'*Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels* ed esplicitamente esposto («in actu signato») nella *Nova dilucidatio*, ma chiaramente e con-

¹⁴ La questione del 'continuo', come noto, era stata posta programmaticamente – da un punto di vista logico, intuitivo ed ontologico (rispetto cioè alla questione del passaggio dalla potenza all'atto, agli enti geometrici, al mutamento ed al movimento) – da Aristotele.

¹⁵ A tale proposito, si veda ad esempio quanto Leibniz affermerà nelle proprie note manoscritte attorno alla *Metafisica* di Sant'Agostino – «*Totum universum est unum corpus continuum*» [Leibniz, G.W. (1948¹), cit., vol. II, p. 561] –, o ancora nei *Nouveaux Essais sur l'entendement humain* – «Il semble aussi que nous différons encore par rapport à la Matière en ce que l'auteur [i.e.: Locke] juge que le vide est nécessaire pour le mouvement, parce qu'il croit que les petites parties de la matière sont raides. J'avoue que si la matière était composée de telles parties, le mouvement dans le plein serait impossible (...). Il faut plutôt concevoir l'espace comme plein d'une matière originairement fluide, susceptible de toutes les divisions et assujettie même actuellement à des divisions et subdivisions à l'infini» [Leibniz, G.W. (GP), ed. cit., *Avant-propos*, p. 14 (GP, V, p. 52)]. Cfr., inoltre: Leibniz, G.W. (2001).

¹⁶ Cfr.: Baumgarten, A.G. (1739), cit., §§. XXI-XXX, pp. 5-6.

¹⁷ Tale osservazione rimanda alla tradizione aristotelica ed ai diversi significati di 'anteriore' trattati nel Libro V della *Metafisica*.

sapevolmente assunto («in actu exercito»)18 già nei Gedanken (cfr.: §§. 25 n., 27, 28, 39, 40, 41, 42, 56, 68 e Chiarimento del §. 105):

1. (C, E) ciò che non ha in sé la ragione sufficiente delle proprie determinazioni (o del proprio essere) trova necessariamente in altro un tale fondamento [*Grund*], quale ‘effetto’ E della relativa ‘causa’ C;
2. (*universalità* della causa) per ogni effetto E dato, esiste sempre una causa C da cui esso è determinato;
3. (*unicità* della causa) tale causa C, logicamente, è una ed una soltanto;
4. (*monodirezionalità* dell’azione causale) tale relazione tra C ed E è monodirezionale, procedendo cioè dalla causa al relativo effetto, e mai viceversa;
5. (*continuità*) tale relazione implica un passaggio *continuo* dalla causa all’effetto, vale a dire senza salti o interruzioni;
6. (*necessità*) tale relazione è dunque necessaria, in modo tale che sempre, dato un effetto, sia data (logicamente) *a priori* anche la sua causa determinante (seppur non esplicitamente);
7. (*uguaglianza* tra la causa e l’effetto) la quantità della determinazione contenuta nell’effetto non può mai essere maggiore o minore della determinazione di fatto contenuta nella relativa causa, artefice di un tale effetto, ma deve sempre esserne perfettamente uguale. Nel primo caso, infatti, occorrerebbe ammettere che una certa quantità di effetto sia stata determinata dal nulla (cioè che qualcosa di non attuale sorga senza una determinata ragione, immettendosi *sine ratione* in qualcosa di attuale); nel secondo caso, che una parte di determinazione si sia dispersa, allo stesso modo *sine ratione*, nel nulla. Ma ciò negherebbe la legge della *ratio universalis*, quale condizione necessaria e sufficiente dell’intelligibilità dei fenomeni, comportando allo stesso tempo la negazione della legge di causalità e, pertanto, della possibilità stessa di una descrizione ‘scientifica’ e sistematica dell’Universo.

3. Conclusioni

La violazione della legge dell’uguaglianza tra la causa ed il relativo effetto obbligò dunque Kant ad una ridefinizione del modello epistemologico assunto dai cartesiani e dai leibniziani in merito al problema della determinazione della conservazione della forza nelle variazioni fisiche dell’Universo, spingendolo alla ricerca di un nuovo modello che fosse capace di recepire le istanze logiche e metafisiche presenti nella formulazione newtoniana. Su queste basi, Kant fu quindi spinto nel suo primo scritto a trarre due importanti

¹⁸ In merito alla distinzione (di origine aristotelica) tra conoscenza «in actu exercito» e conoscenza «in actu signato», si rimanda in particolare al celebre commento del Cardinal Cajetani a: *Summa Theologiae*, I, Q. 16, a. 2. Cfr.: Tommaso d’Aquino (1698), cit., Pars I, Q. XVI, Art. II, pp. 132-133. Cfr.: «Atto, poi, si dice in due sensi, o come la conoscenza o come l’esercizio di essa» (Aristotele, *De Anima*, II, 1, 412 a 23-24; trad. it., pp. 116-117).

affermazioni che si manterranno nel corso di tutta l'evoluzione della speculazione kantiana, vale a dire:

- I. (rispetto alla *ratio cognoscendi*) l'affermazione, da un punto di vista *soggettivo*, della distinzione tra realtà 'assoluta' delle apparenze e loro apparire 'fenomenico';
- II. (rispetto alla *ratio essendi*) l'esigenza di postulare, da un punto di vista *oggettivo*, un nuovo ordine di successione causale agente rispetto alla serie della simultaneità temporale (dinamica dei corpi e dinamica delle facoltà).

Su queste basi sarebbero quindi state presentate le sei osservazioni fondamentali più rilevanti avanzate da Kant nei *Gedanken*, vale a dire:

- I. [§. 134] l'affermazione, sulla base di un nuovo modello dinamico 'gravitazionale' nel continuo, dell'impossibilità di una velocità *infinita* e, quindi, istantanea (in accordo così con la dottrina della *finitezza* e del valore *limite* della velocità della luce);
- II. [§§. 3, 4] la separazione tra il concetto di 'velocità' (quale fenomeno esterno dell'attività metafisica causale della forza nella successione temporale) e quello di 'azione' metafisica;
- III. [§§. 3, 117] l'affermazione del carattere solamente *fenomenico* delle apparenze (e del moto);
- IV. la possibilità di concepire l'azione, così distinta dal concetto di 'velocità', come «*immediata successio*»;
- V. la relazione *dinamica* 'gravitazionale' tra i concetti di 'attività', 'massa' e 'velocità';
- VI. la negazione del modello epistemologico empirico-osservativo, fondato sull'idea della possibilità di un'osservazione *immediata*, e la rivendicazione del valore epistemologico della rappresentazione (*Bildungskraft*).

Bibliografia

- Aristotele (2001). *De Anima*, II, 1, 412 a 23-24; trad. it., Id., in *L'anima*, Movia G. (a cura di). Milano: Bompiani.
- Baumgarten A.G. (1739). *Metaphysica*. Halae Magdeburgicae: Impensis C. H. Hemmerde.
- Blay M. (1992). *La naissance de la Mécanique analytique. La science du mouvement au tournant des XVII^e et XVIII^e siècles, préface de Jacques Merleau-Ponty*. Paris: PUF.
- Blay M., Halleux R. (1998). *La Science classique XVI^e-XVIII^e siècle. Dictionnaire critique*. Paris: Flammarion.
- Blay M. (1999). *La naissance de la Science classique au XVII^e siècle*. Paris: Nathan.
- Blay M. (2002). *La Science du mouvement. De Galilée à Lagrange*. Paris: Éditions Belin.

- Duhem P.M.M. (1903). *L'évolution de la Mécanique*. Paris: Joanin (Id., *L'évolution de la Mécanique. Suivi de «Les théories de la chaleur»; «Analyse de l'ouvrage de Ernst Mach: 'La Mécanique'»*). Paris: Librairie Philosophique J. Vrin, 1992).
- Einstein A. (1934). *Mein Weltbild*. Amsterdam: Querido Verlag [tr. it., ID., *Come io vedo il mondo. La teoria della Relatività*, Roma: Newton, 2012].
- Einstein A., Infeld, L. (1942). *The Evolution of Physics from Early Concepts to Relativity and Quanta*. New York: Simon and Schuster, 1942 [trad. it., Id., *L'evoluzione della Fisica. Sviluppo delle idee dai concetti iniziali alla Relatività e ai quanti*, Torino: Bollati Boringhieri, 2013 (1948¹)].
- Einstein A. (1949). *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Schilpp P. A. (ed.), Evanston, Ill.: Library of Living Philosophers [tr. it., ID., *Autobiografia scientifica*, Torino: Bollati Boringhieri, 2010].
- Einstein A. (1988). *Opere scelte*. Bellone E. (a cura di). Torino: Bollati Boringhieri.
- Einstein A. (2011). *Letters to Solovine. 1906-1955*. New York: Philosophical Library [tr. it., *Lettera a Solovine, 7 Maggio 1952*, in *Opere scelte*, 1988].
- Galilei G. (1699). *Systema cosmicum*. Lugduni Batavorum: Apud Fredericum Haaring, et Davidem Severinum. Bibliopolas. Nello stesso volume: Id., *Discursus et Demonstrationes Mathematicæ, circa duas novas scientias pertinentes ad Mechanicam & Motum Localem (...) Quibus accedit Appendix de Centro gravitatis quorundam Solidorum*, Lugduni Batavorum: Apud Fredericum Haaring, et Davidem Severinum, Bibliopolas.
- Hermann. J. (1716). *Phoronomia, sive de Viribus et Motibus corporum solidorum et fluidorum, Libri duo*. Amstelædami: Apud Rod. & Gerh. Wetstenios H.F.F. [Warda, V, 17, p. 34].
- Hermann J. (1728). *De Mensura virium Corporum, M. Sept. 1725*, in *Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae*. Petropoli: 1726, tomus I, sectio prima, pp. 1-42.
- Jammer M. (1957). *Concepts of Force. A Study in the foundations of Dynamics*. Cambridge (Massachusetts): Harvard University Press (Mineola, New York, Dover Publications, Inc., 1999) [trad. it., Id., *Storia del concetto di forza. Studio sulle fondazioni della dinamica*, Milano, Feltrinelli, 1971].
- Kant I. (1746/1749). *Gedanken von der wahren Schätzung der lebendigen Kräfte und Beurteilung der Beweise derer sich Herr von Leibniz und andere Mechaniker in dieser Streitsache bedienen haben, nebst einigen vorhergehenden Betrachtungen welche die Kraft der Körper überhaupt betreffen, durch Immanuel Kant*, Königsberg, gedruckt bey Martin Eberhard Dorn, 240 pp., in 8°
- Kant I. (2019). *Pensieri sulla vera valutazione delle forze vive*. Veneroni S. (a cura di), 4 Vol. Milano-Udine: Mimesis, pp. 1-567.
- Koyré A. (1950). *Études d'histoire de la pensée philosophique*. Paris: Armand Colin.
- Koyré A. (1960). *Études newtoniennes*. Paris: Gallimard.
- Koyré A. (1962). *Du monde clos à l'univers infini*. Paris: PUF. [trad. de l'anglais par Mme Raissa Tarr].
- Koyré A. (1966). *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Paris, PUF, 1966; ID., *Études galiléennes*, Paris: Hermann. [trad. it., Id., *Studi galileiani*, cap. II. *La legge della caduta dei corpi. Descartes e Galileo*, Torino: Einaudi, 1976].
- Leibniz G.W. (1948). *Textes inédits d'après les manuscrits de la Bibliothèque provinciale de Hanovre*, Grua G. (ed.). Paris: PUF, 2 Vol..

- Leibniz G.W. (1882). *Nouveaux essais sur l'entendement humain par l'auteur du système de l'harmonie préétablie*, in Id., *Die Philosophischen Schriften*, hrsg. von C.I. Gerhardt (GP), Bd. 5, pp. 39-509.
- Leibniz G.W. (2001). *The Yale Leibniz. The Labyrinth of the Continuum. Writings on the Continuum Problem, 1672-1686*. Transl. Richard T.W. Arthur. New Haven: Yale University Press.
- Mach E. (1883). *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig: F.A. Brockhaus, pp. 483, in 8° [trad. fr., Id., *La Mécanique: exposé historique et critique de son développement*, Paris: Hermann, 1904; trad. it., Id., *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, Torino: Einaudi, 1992 (Torino, Boringhieri, 1977)].
- Newton I. (1714). *Philosophiæ naturalis Principia mathematica*. Amstælodami: Sump-tibus Societatis, pp. 484, in 4° [Warda, V, 23, p. 35].
- Newton I. (1719). *Optice: sive de Reflexionibus, Refractionibus, Inflexionibus & Coloribus Lucis, Libri Tres. Authore Isaaco Newton, Equite Aurato. Latine reddidit Samuel Clarke, S.T.P. Editio Secunda, auctior, Londini, Impensis Gul. & Joh. Innys Regiæ Societatis Typographorum ad Insigna Principis in Areâ Occidentali D. Pauli*, 415 pp., in 4° [Warda, V, 24, p. 35].
- Tommaso d'Aquino (1698). *Summa Theologica in quinque tomos distributa, Cum Commentariis Thomæ De Vio Cardinalis Cajetani (...)*. Patavii: Ex Typographia Seminarii.

Some incongruences in Coulomb's memoirs on electricity 1785-1788

Danilo Capecchi – Sapienza Università di Roma (f.) – danilo.capecchi@uni-roma1.it

Abstract: Charles Augustin Coulomb was one of the major characters in the history of physics and engineering. In the years 1785-1788 he wrote six fundamental memoirs on electricity, all printed in the *Mémoires de l'Académie des sciences de Paris*. In the first of these memoirs he proved that the force exerted between electrified bodies is in the inverse proportion of the square of distance (Coulomb law). The proof was direct and experimental, and was made possible by the invention, due to Coulomb himself, of a very sensible torsion balance. In most cases Coulomb flanked experimental findings with theoretical ones, based on his law. The theoretical analyses were however not always very rigorous. This holds true in particular in his memoir of 1786, *Quatrième mémoire sur l'électricité et le magnétisme où l'on démontre deux principales propriétés du fluide électrique*.

Keywords: History of electricity, Coulomb, Rhetoric power.

1. Introduction

In this paper, I draw inspiration from some quite questionable argumentations of Coulomb regarding the properties of electric charges, to underline the need of studies about rhetoric in carrying out wrong proofs for correct propositions. And also about the approach to the history of science by many technically prepared scholars, who tend at a superficial reading of the texts because their intent is mainly to provide a general picture and therefore are interested in details and other scholars who instead do not have the necessary skill to understand what they read and equally write historical papers. Some interest should also be deserved to the study the way the scientists, successive of one or two generations, react to the wrong demonstrations; often in a very benign way it must be confessed. And also, even though this is a little less interesting, of the value of the priority assigned to a discovery when it is made with the use of wrong demonstrations.

Before presenting the argumentations of Coulomb, I will refer to some important cases in the history of science. First, the demonstration of Galileo Galilei on the law of the natural fall of the heavy bodies according to which it occurs with the square of time, then Stevin's proof of the parallelogram rule, and finally a demonstration by Federico Menabrea, of the mid-1800s, on the theorem of minimum complementary elastic energy. All them are instances of incorrect demonstrations of 'true' propositions made convincing by rhetorical arguments whose inconsistency was not immediately detected.

2. Inconsistent proofs of the early modern and modern science

Let's start with famous letter by Galileo Galilei (1564-1642) to Paolo Sarpi (1552-1623) in 1604. A modern reader finds some ambiguity in reading the letter; in particular because to the term speed is given more than one meaning (total speed and degree of speed). However, it seems quite clear that Galileo wants to affirm the validity of the principle according to which speed, understood in the modern sense as instantaneous speed, of a falling body grows as the space increases: "And the principle is this: that the natural mobile moves with speed increasing in proportion to the distance passed from the beginning of its motion" (Galileo 1890-1909, vol. 10, pp. 115).

A fragment found on Galileo's manuscripts, and published in his works, shows how the principle stated of the letter sent to Sarpi could be used to prove the law of spaces proportional to the square of times. Obviously, this now recognized as impossible proof was carried out without a clear explanation of the logical process. And Galileo himself will deny it in the *Discorsi e dimostrazioni matematiche sopra due nuove scienze* of 1638. But, at a superficial reading of a not skilled reader, Galileo was convincing.

Let us now pass to the demonstration of rule of parallelogram of forces. Its formulation in statics is usually attributed to Simon Stevin (1548-1620) in the early 1600s. Leonardo, a century earlier, had given it a substantially correct proof, but it remained in the drawer (Capecchi 2012). Stevin derived the parallelogram rule from that of the inclined plane (Stevin 1605, pp. 36-37). And it is here that he made an affirmation, true, but supported only by an analogy that does not hold even a superficial criticism. Stevin demonstrated indeed that when forces are considered to lift a body on an inclined plane, acting respectively in vertical, horizontal and parallel directions, they obey a simple geometric rule. By analogy he extended this rule also to the case of a force acting in any direction. The correct demonstration of the parallelogram rule was due to Personne de Roberval (1602-1675) in 1636 (Capecchi 2012).

Finally, the last case, the demonstration of the minimum theorem of complementary elastic energy by Luigi Federico Menabrea (1809-1896):

When an elastic system is in equilibrium under the action of external forces, the work developed by the effect of the tensions or compressions of the bars which unite the different points of the system is a minimum (Menabrea 1858, p.1056).

The theorem is stated for a system of redundant trusses. The demonstration is carried out with the use of the principle of virtual works, without noting that in this case it cannot be applied because by varying equilibrated forces the displacements corresponding to them through the law of elasticity may be not compatible with the constraints. However, the theorem still bears the name *Menabrea theorem*, even when it was reformulated and demonstrated in a formally correct way only later. Famous is the controversy which opposed Menabrea to Alberto Castigliano (1847-1884) on the priority of the proof of the theorem. Menabrea declared his priority in formulating the theorem, by considering as irrelevant the defects of his proof, Castigliano his priority in a correct proof of it (Capecchi and Ruta, 2015).

3. Coulomb's Memoirs on electricity

Charles Augustin Coulomb (1736-1806) is an interesting character as a transitional figure towards what will become the scientific engineer. Coulomb has the courage to face thorny issues; for example, studying the phenomenon of friction in a systematic way, a topic largely ignored by physicists who considered it only as disturbance of a perfect ideal condition that one wants to study mathematically. An important exception is represented by Guillaume Amontons (1663-1705) with his *De la resistance causée dans les Machines, tant par les frottemens des parties qui les composent, que par roideur des cordes qu'on y employe, & la maniere de calculer l'un & l'autre* of 1699. Coulomb also tried to quantify man's fatigue. In the study of the resistance of materials he addressed the study of the problem of shear forces acting on beams, normally ignored because too difficult. Reached in the middle of the 1780s a relative economic tranquility, Coulomb could start an intense activity as a physicist; in particular he dealt with the study of forces among electric particles and their distribution in conductors of various shapes (Heilbron 1979).

He discussed these problems in a series of memoirs presented from 1785 to 1788 published by the Académie des sciences de Paris (Coulomb 1789, Gillmor 1971). These were preceded by two other important memoirs; one which studied magnetism, the other presented the famous torsion balance (Coulomb 1784).

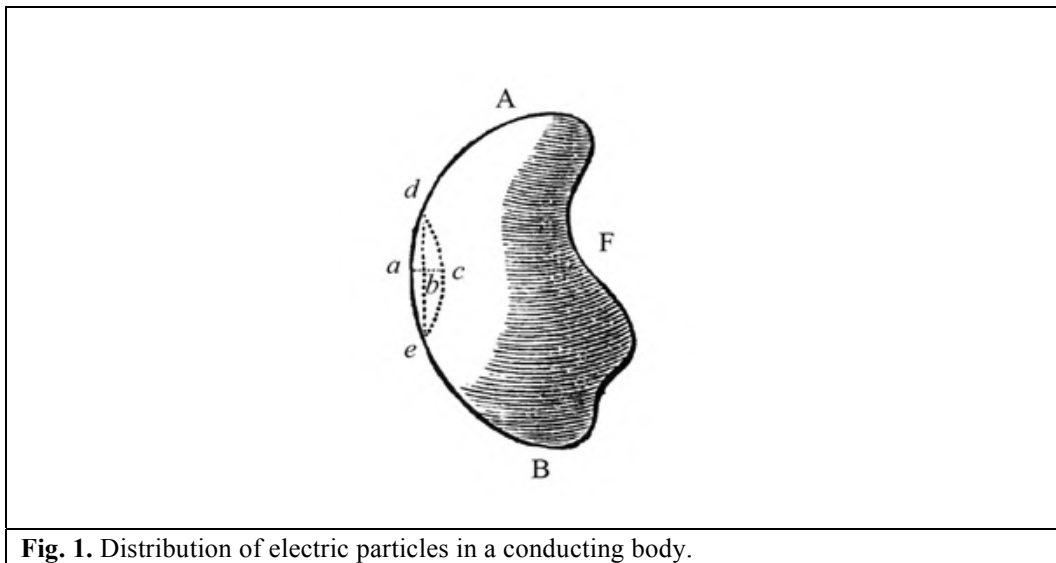


Fig. 1. Distribution of electric particles in a conducting body.

Here I will examine some results Coulomb presented in the fourth of his memories, on electricity: *Quatrième mémoire sur l'électricité et le magnetisme où l'on démontre deux principales propriétés du fluide électrique*, dated 1786. The first result relates to the proposition-theorem, concerning the distribution of charges in a conducting body:

THEOREM. Whenever a fluid, enclosed in a body where it can move freely, acts by repulsion in all of its elementary parts with a force having a proportion lower than the inverse of the cube of distances, such as for instance, the inverse of the fourth power [dots] the fluid that has come into play with this law of repulsion, will spread uniformly throughout the body. But all times the repulsive action of the fluid elements which produce its elasticity is greater than the inverse of the cube, as, for example, we have found for electricity, which is as the inverse square of the distances, then the action of the masses of electric fluid placed at a finite distance from one of the elements of this fluid being not infinitely small relative to the elementary action of the points in contact, all the fluid must move to the surface of the body and there must not remain any at all in its interior (Coulomb1789 pp. 75-76).

The first part of the proposition considers the hypothetical case that the electric forces vary with the inverse of the distance raised to a power greater than three. With a fairly simple proof Coulomb showed that the electric forces have a local action (which is extinguished at short distance) and then the electric particles separate and distribute inside the conductor.

The second part of the proposition aimed to proof that one can have balance between electric charges that repel with the inverse square law of the distance only if they are distributed on the surface. The proof is carried out with a reduction ad absurdum.

Assume by hypothesis that there is some electric fluid inside the body and all the electric particles are at rest. With reference to Fig. 1, let consider a small element of surface dae of an electrified body and a point a on it. From a trace the normal ab to the surface, and through the point b pass a normal plane dbe . Then consider a small element dce symmetric – with respect to de – to dae . Now, said Coulomb, as “the law of continuity holds”, it is necessary, when dae is made infinitely small, that the fluid density at point c either be equal to, or differ only infinitesimally from, the density at point a . Consider now the point b , coinciding with the barycenter of $dcea$; the force that the two symmetric parts dae and dce exert on it are equal and contrary. Because b is in equilibrium (by hypothesis), and the sum of all the forces acting on it must be zero this means that the force of the fluid in the rest of the volume ($AFBecd$) on b vanishes. But because the electric forces among the electric particles vary proportionally to the inverse square of the distance, this is not possible, a result that Coulomb has proved in a note of the second memoir (Coulomb1789, pp. 587-588). So the forces acting on b are both zero and non zero, which is absurd. Thus admitting equilibrium there cannot be electric particle inside the body.

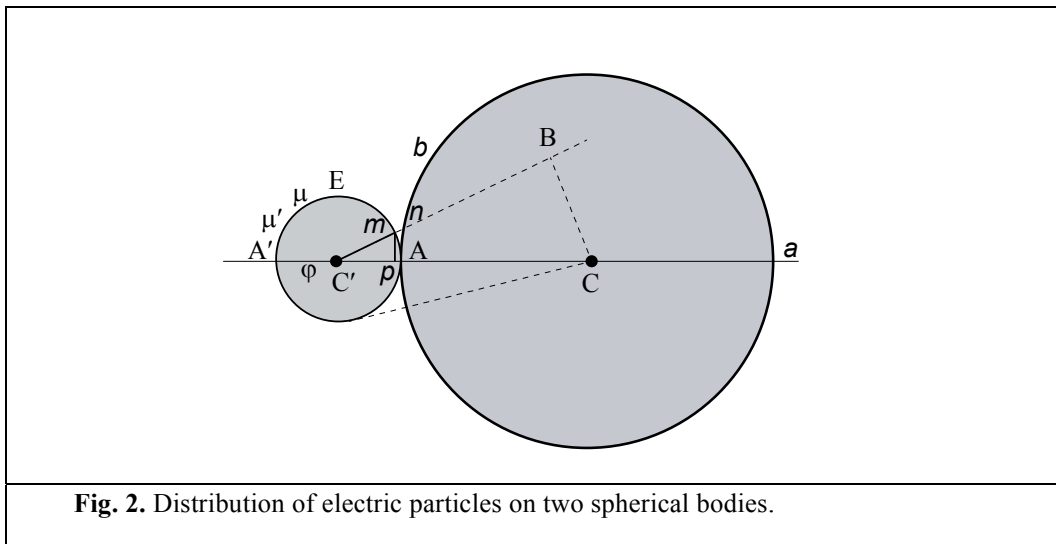
There are many criticisms that can be raised against Coulomb proof in an increasing order of criticality:

1. The reasoning according to which the densities of electricity in the portions dae and dce become equal to each other considering ever smaller thicknesses is not strictly rigorous even if admissible for the use of infinitesimals in the 18th century.

2. The assertion that, in the case of dependence on the inverse of the square of the distance, the force exerted by the outer particles on b is necessarily different from zero, although intuitive, is not fully convincing. There is nothing to prevent this action to be null for particular shapes of bodies and particular areas.
3. Coulomb forgot to point out that the proof could only be valid if all the particles have the same kind of electricity. But, as specified at the end of his memoir, he considered electricity as due to two fluids having electricity of opposite sign. In this case Coulomb's argument completely falls.

In conclusion, the demonstration of Coulomb, although interesting is not conclusive and represents, as in the cases illustrated in section. 2, an attempt to justify theoretically a result that is known to be true (experimentally), and therefore every demonstration must necessarily lead to that result.

Let us now turn to a case in which Coulomb's ingenuity exceeds any imagination. It is a question of finding the distribution of electricity on two charged spheres put into contact. Coulomb reasoning is not strict and may be wrong, but it is clever and fascinating. It is not the reasoning of a professional mathematician, but rather that of a clever engineer or physicist with has a not negligible knowledge of mathematics. To obtain his purpose Coulomb imposed the equilibrium at the point m located on the surface of the smaller sphere, in the radial direction $C'B$. As in the previous analysis it is assumed that the electricity is uniformly diffused of the surface of the two spheres with density respectively D (the larger sphere) and D' (the smaller). A further infinitesimal sphere is imagined located around m having density δ .



According to Coulomb on m act:

1. The force exerted by the small sphere A' , which acts as mass point whose charge is concentrated in the center C , and thus at distance r from m :

$$f_{A'} \propto \frac{D' r^2}{r^2} = D'$$

2. The force exerted by the infinitesimal sphere acting at distance dr :

$$f_m \propto -\frac{\delta dr^2}{dr^2} = -\delta$$

3. The force exerted by the the large sphere A , acting at distance Cm in the direction $C'B$:

$$f_A \propto 2D \frac{\overline{CA}^2}{\overline{Cm}^2} \times \frac{\overline{mB}}{\overline{Cm}}$$

In the expression of f_A , the last multiplying term is due to evaluate the component of the force applied by A on m in the radial direction $C'B$. By imposing equal to zero the summation of the three forces, Coulomb could obtain the expression of δ as a function of D and D' . In the particular case of two equal spheres, $D = D'$ and $R = r$, he got:

$$\delta = D \left(1 + \frac{2 - 4 \cos f}{(5 - 4 \cos f)^{\frac{1}{2}}} \right)$$

with f the angle $AC'm = CC'B$. This expression furnishes values in good accordance with the experimental results.

Some criticisms on Coulomb approach are needed, an increasing order of criticality:

1. A uniform distribution of electricity on the two spheres is assumed even though the purpose is to study unevenness.
2. By considering the force due to an infinitesimal electrified sphere, Coulomb as a matter of fact admitted a force that a body exerted on itself as an external force; which is not consistent with the principles of statics.
3. If the equilibrium is imposed in another direction, for instance in the direction orthogonal to $C'B$ a different result is obtained for δ .

References

Capecchi D. (2012). "Historical roots of the rule of composition of forces". *Meccanica*, 47, pp. 1887-1901.

- Capecchi D., Ruta G. (2015). *Strength of materials and theory of elasticity in 19th century Italy*. Dordrecht: Springer.
- Coulomb C.A. (1784). “Recherches théoriques & expérimentales sur la force de torsion, & sur l'élasticité des fils de métal, &c”. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris*, pp. 229-269
- Coulomb C.A. (1789). *Mémoires sur l'électricité et le magnetism*. Paris: Bachelier.
- Galilei G. (1890-1909). *Le opere di Galileo Galilei*. National edition, 20 vols. Florence: Barbera.
- Gillmor C.S. (1971). *Coulomb and the evolution of physics and engineering in eighteenth century France*. Princeton: Princeton University Press.
- Heilbron J.L. (1979). *Electricity in the 17th and 18th centuries*. Berkley: University of California Press.
- Menabrea L.F. (1858). “Nouveau principe sur la distribution des tensions dans les systèmes élastiques”. *Comptes Rendus*, 46, pp. 1056–1060.
- Stevin S. (1634). *Tomus quartus mathematicorum hypomnematum de statica*. Leiden: Patii.

EXPERIMENTAL TESTS OF GENERAL RELATIVITY:
ONE HUNDRED YEARS AFTER ARTHUR EDDINGTON'S ECLIPSE EXPEDITION

No Shadow of Doubt: The Eclipse Expeditions of 1919 in detail

Daniel Kennefick – University of Arkansas – danielk@uark.edu

Abstract: This is the centenary year of the celebrated eclipse expeditions of 1919 which confirmed Einstein's theory of General Relativity. In recent decades the story of these expeditions has focused on Arthur Stanley Eddington and the question of his alleged bias in favor of Einstein's theory. It has been alleged that Eddington threw out data which did not favor Einstein's theory. Meticulous examination of the expeditions' papers reveals that this view is mistaken. The relevant data was taken by the expedition organized by the Greenwich observatory and it was the director of that observatory, the Astronomer Royal, Frank Watson Dyson, who was responsible for the decisions in question. Studies of the data analysis sheets and comparison with modern re-analysis of the original plates vindicate his decision. The story of the two expeditions, is a remarkable one and this talk will examine the people, the instruments and the science of the teams and how their work changed science forever.

How relativistic astrophysics bubbled up from post-WWII science. A preliminary survey

Luisa Bonolis – Max Planck Institute for the History of Science, Berlin –
lbonolis@mpiwg-berlin.mpg.de]

Abstract: During the post-War period, studies related to the design of thermonuclear weapons brought about renewed interest in highly dense stellar matter and the abandoned problem of gravitational collapse tackled in 1939 by Oppenheimer and his collaborators, who had applied for the first time Einstein's general theory of relativity to the dense core of a neutron star. At the same time, the old problem of nucleosynthesis — now becoming a central issue also for cosmology — rekindled interest in neutron stars, up to that time still theoretical entities, whose existence had been suggested by Fritz Zwicky in 1933. During the 1950s, model building with computers showed that such exotic objects might actually be formed in nature. Technological progress during the WWII had opened new horizons also in the study of astronomy where the realm of radio stars and very distant radio galaxies had become a subject of investigation. While a new community of researchers in general relativity was achieving novel theoretical insights into Einstein's equations, the unveiling of the high-energy universe by radio astronomy and the emerging science of nuclear astrophysics, led to a resurgent awareness at the end of the 1950s of astrophysical processes in which general relativistic effects might play a dominant role. Given this background, the emergence of relativistic astrophysics in the early 1960s, triggered by the discovery of quasars and inaugurated by the first Texas conference organized in 1963, can be understood as the culmination of a complex process including the longstanding tradition of the study of compact stars, revisited within the growing dialogue and co-operation between new astronomies, high-energy astrophysics, general relativity and computer simulations.

Keywords: General Relativity, Nuclear Astrophysics, Cosmology, Radio Astronomy, High-Energy Astrophysics, Computer simulations.

1. The rise of physical cosmology

In September 1939, when World War II was beginning with the invasion of Poland by Nazi Germany, the seminal Oppenheimer-Snyder work was published (Oppenheimer, Snyder 1939). It used Einstein's general theory of relativity to show for the first time how a superdense astrophysical object could collapse to what since the late 1960s was called a "black

hole”.¹ Post-war science provided new conditions for the interaction between nuclear physics, astrophysics and cosmology. In a widening scenario, in which optical and new astronomies — as well as the new field of ‘cosmic physics’ including cosmic rays, galactic magnetic fields, and relativistic plasmas in space — were unveiling the high-energy universe, it was recognized that physical processes and astrophysical objects exist in the cosmos that can be understood only in terms of Einstein’s theory of gravitation. Many strands of research were destined to give a meaningful contribution to the emergence of relativistic astrophysics between the end of the 1950s and early 1960s, but only a very schematic and partial survey can be offered here, a bird’s-eye view of the involved knowledge network and the role of some leading actors, whose multidisciplinary competence was instrumental in catalyzing the flourishing of the underlying processes.

Nuclear physics had played a leading role in pre-war research, but explosion of studies following the discovery of the nuclear fission in heavy elements led to a growing knowledge of neutron-capture cross-sections that would be extensively investigated within the nuclear physics programs carried out during the war. Problems concerning stellar structure, stellar energy-generation and stellar evolution could thus be studied on a more realistically physical basis than before. The raw material of stellar energy is hydrogen. So, there was both the problem of where did the hydrogen come from, and the presumably closely related question of whence came any other elements needed at the outset of a star’s existence. New astrophysical data and nuclear physics indicated a connection between the origin and the relative abundances of nuclear species, providing the clues required for attempting an explanation.

The problem of the origin of elements was by no means a new one, having almost always been considered an integral part of the origin, structure, and evolution of the universe. Astrophysical studies had also shown that one could attach a fairly definite age to the known universe and at the end of WWII, reasonably accurate data were at disposal on the relative abundances of nuclear species in the atmospheres and interiors of stars, in cosmic dust, gas clouds and nebulae populating interstellar space, in other galaxies, and in the various objects present in the solar system. These investigations made clear that they are, to a good approximation, universal quantities. When the observed distribution of chemical elements in the cosmos became available, several different theories to explain their origin were developed, each of which involving a different type of cosmology and of course different cosmological implications, establishing a brand new connection between cosmology and physics, that added to the traditional relationship with astronomy. In this way, general relativity, too, entered the game.

As the hypothetical dense neutron core in stars had represented before the war a nuclear physics laboratory to investigate processes that might be a source of energy and at the same time explain the structure and evolution of stellar bodies, the early universe, as a hot melting pot of a primordial highly compressed neutron gas in which chemical elements could be built, most naturally, dramatically extended the borders of such physical laboratory. Physical conditions in the interiors of certain kinds of stars and near the ‘beginning’ of the universe might have been similar in being sufficiently severe to have permitted the nuclear processes required for forming all the nuclear species. No physicist better than George Gamow represented this turn of cosmology from a mathematical to a physical science. As Helge Kragh has duly stressed, Gamow coined the name *factual cosmology* to

¹ For an overview of the evolution of the concept of dense core in stars leading to the first application of Einstein’s theory to a compact astrophysical object see (Bonolis 2017).

express his research philosophy in this new phase of his scientific activity. His study of the relations between small-scale nuclear processes and cosmology led him to consider “the very early universe merely to be an extremely hot and compact crucible, an exotic laboratory for nuclear-physical calculations” (Kragh 2005, p. 183). In his “Expanding Universe and the Origin of Elements” Gamow suggested that only a rapid cooling from an initial high temperature could have produced the fusion of protons and neutrons required to produce the amounts of hydrogen and helium observed in the universe (Gamow 1946). His later article with Ralph Alpher explained the distribution of chemical elements throughout the universe positing a primeval thermonuclear explosion (Alpher *et al.* 1948), later dismissively called the *Big Bang* by Fred Hoyle. This idea went back to Georges Lemaître, who proposed in 1931 that an expanding Universe might be traced back to the explosion of a *primeval atom* (Lemaître 1931). In developing from a predominantly mathematical to a physical science, cosmology was becoming more and more involved in the problem of the formation of elements.

In providing a common ground of discussion between physicists and astrophysicists, an alternative novel relationship was established between general relativity, microscopic physics, the physical universe on the whole, and nuclear astrophysical processes. Within the realm of these problems, a crucial actor entered the post-war scene: Fred Hoyle, whose interest towards collapsing cores of red giants and the problem of nucleosynthesis led him to cosmology. Hoyle had studied quantum mechanics with Max Born, general relativity with Arthur Eddington and had P.A.M. Dirac as his supervisor at Cambridge. During his war work on radar, he met Hermann Bondi and Thomas Gold, both from Austria, with whom he began to discuss astronomy. These discussions eventually resulted in their proposals of the *steady-state cosmology*: the universe should not change in appearance over time and it has neither beginning nor end. While expanding, it would preserve its density if there were a process of continuous creation of new matter to fill the void left by receding galaxies (Bondi, Gold 1948) (Hoyle 1948). Hoyle’s wide knowledge of nuclear physics, also led him to an intense dialogue with the nuclear astrophysicist William Fowler, working at the California Institute of Technology. Their collaboration included Margaret Burbidge, an observational astrophysicist, and Geoffrey Burbidge, a theoretical physicist, both working between Caltech and Mount Wilson and Palomar Observatories. Together they developed a theory explaining the creation of heavy elements in stars and inaugurated the field of *stellar nucleosynthesis* in a joint article published in 1957. The so-called B²FH paper (Burbidge *et al.* 1957), definitely showed that all of the elements except the very lightest, are produced by nuclear processes inside stars. They described eight different types of processes which could lead to the synthesis of elements heavier than helium. These new insights showed what is currently a well-established knowledge: elements heavier than lithium are all synthesized during the late stages of stellar evolution.

2. The discovery of the non-thermal Universe

At Caltech, Hoyle had also come in contact with the renowned astronomers Walter Baade and Rudolph Minkowski, who had recently identified with the 200-inch Palomar telescope

the intense discrete radio source in Cygnus, that was initially explained as being an emission from two colliding galaxies. Hoyle entered the discussion of the radio sources, openly expressing in favour of the synchrotron-type emission by relativistic electrons spiraling in weak interstellar magnetic fields as an explanation for such phenomenon (Hoyle 1954), as recently pointed out by Hannes Alfvén and N. Herlofson (Alfvén, Herlofson 1950) and later discussed by others, like the Russian scientists Vitaly Ginzburg and Iosif Shklovskii. Radio astronomy, stemming from radar research during the war, had opened during the 1950s a new technological window. Radio catalogues compiled in 1955 pointed to the inference that radio astronomers were studying the Universe on a much greater scale than optical astronomers; extragalactic sources could be thus used to test cosmological models.

While in the past it was the geometry, kinematics, and dynamics of the universe which were in the foreground, in the recent development of cosmology, physical processes in the universe, involving elementary particles, electromagnetic radiation, and nuclear reactions, were becoming the dominant interest. In the middle of their nucleosynthesis work, Geoffrey Burbidge, got excited by the recent demonstration that the optical radiation emitted by the jet in the galaxy M87 was strongly polarized (Baade 1956) and thus it must be synchrotron radiation emitted by ultra-relativistic electrons and positrons. Burbidge calculated the tremendous amount of energy contained in the magnetic field and the charged particles which was necessary to explain both the optical radiation from the jet in the galaxy M87 and the radio emission and suggested that such huge output — at levels about 1000 times that those present in our Galaxy and other normal galaxies — might have a very different origin (Burbidge 1956). At the time, all that energy floating around appeared as nonsense; something must be wrong somewhere. Moreover, there was controversy about the real distance of such powerful radio sources. But towards the end of the 1950s, when the problem of radio emission was definitely clarified, it brought with itself the energetics problem. For centuries, the stars had been the focus of optical astronomy, and now the space between the stars was coming to the fore, revealing to be full of material emitting radio photons. The dialogue between different subcultures contributed to focus the attention on the fact that the radio universe was full of high energies as opposed to the “quiet” optical universe. The gradual realization of the existence of violent events, both in stars and in galaxies, marked the entry in the realm of high-energy astrophysics. It set the stage for further decisive events that would inaugurate the era of relativistic astrophysics. New tools, typical of post-war science, were now available especially in US: the impressive advances in nuclear science were combining with the first powerful computers, designed to perform the complex calculations for thermonuclear weapons, but also used by astronomers who were discovering that computer simulations could be the standard tool for stellar interior models, especially in the case of stars that have exhausted the hydrogen in the core and become more and more compressed. The parallel development of modern nuclear astrophysics rekindled interest in neutron stars, possible remnants of supernova explosions, as suggested by Baade and Zwicky in 1933. Such catastrophic events might also play a role in the genesis and spreading of heavy elements in the universe, a major issue in contemporary models of the universe.

3. The emergence of relativistic astrophysics

During the post- and Cold War period, implosion, and explosion problems, related to the design of thermonuclear weapons, brought about renewed interest in highly dense stellar matter and the abandoned problem of gravitational collapse within Einstein's theory. The possibility of using the new computing facilities to investigate the physics of supernova explosions and of the formation of the elements, actually led Alastair Cameron, working at Chalk River, Canada's largest nuclear science and technology laboratory, to construct twenty neutron star models by integrating the general relativistic equations of hydrostatic equilibrium of the neutron gas. He could show the existence of an upper limit to the observable mass, concluding that: "neutron stars are probable products of the supernova process" (Cameron 1959). Within this context, physicists and astronomers established a cultural dialogue that contributed to arise the curiosity of scientists like John A. Wheeler, who had been involved in Teller's project, aiming at designing a thermonuclear device.

In January 1952, clearly inspired by heavy work in these challenging problems, Wheeler had rediscovered Oppenheimer's forgotten papers and was led to a systematic study of general relativity: "It was actually nuclear physics and quantum theory that drew me into relativity" (Wheeler 1998, p. 228). Wheeler decided to teach a course to really delve into the subject, and thus, around his wide research project, Princeton became one of the most lively research centers, contributing to fire up the return of general relativity to the mainstream of physics after the "low-water-mark" period (Blum et al. 2015, 2016).

It is hardly possible for someone interested in nuclear physics and relativity, as I was and am, not to get interested in stars. My Princeton friend Martin Schwarzschild drew me into stellar atmospheres. From there it was natural to fall, so to speak, into the center of stars (Wheeler 1998, p. 292),

recalled Wheeler in his autobiography. However, he added:

What interested me was not the center of an ordinary star like our Sun, cooking away and generating thermonuclear energy. I was interested in the center of a cold dead star (Wheeler 1998, p. 292).

He thus became intrigued with the problem of what could be the final fate of a star after it has consumed all of its nuclear fuel and can burn no longer. He involved, in particular, his students Ken Harrison and Masami Wakano in the study of compact stars as hypothetical objects posing interesting and fundamental problems in general relativity and gravitation theory, as well as in high energy physics. As an important center of research on the thermonuclear project, Princeton was the place where the first electronic computers had been built, immediately followed by Los Alamos Laboratories, offering the possibility of simulating models of stellar evolution and compact stars, as Cameron would soon be able to do in Canada (Cameron 1959).

Wheeler and his collaborators presented their results during the 11th Solvay Conference of 1958, *La Structure et l'Évolution de l'Univers*, held in Bruxelles in June 1958, the first one devoted to astrophysics and cosmology. The topic chosen for the Solvay congress meant an acknowledgment of cosmology as part of physics, thus mirroring the growing influence of results coming from radio astronomy and from nuclear astrophysics on the debates on cosmological models. Some of the most distinguished astronomers and experts in general

relativity were invited to present reports. In 1952 Baade had announced that the distance to the Andromeda Nebula had been underestimated by a factor of 2, a result obtained using the new 200 inch Palomar telescope commissioned in 1950 and leading to a revision of the Hubble constant and thus to a doubling of the estimated age of the universe from 1.8 to 3.6 billion years. According to the British radio astronomer Martin Ryle, who had developed highly innovative radio telescope systems, it seemed that the density of sources at distances of billions of light-years — therefore representing the universe billions of years ago — was much higher than the current density near our galaxy. A result being in conflict with a model of a never-changing universe, as predicted by the steady-state cosmology. Wheeler had been asked to report on the implications of general relativity for cosmology by the renowned astronomer Jan Oort, whom he had come to know and admire through his days in Leiden in 1956 (Wheeler 1994): “This work, which grew out of a natural interest in the properties of nuclear matter, tied on with the story of cosmology.”

In the section “Matter-energy at high density; end point of thermonuclear evolution”, Wheeler, Harrison and Wakano introduced the concept of cold matter, when temperature does not affect the equation of state: “In seeking the consequences of Einstein’s theory for the structure and evolution of the universe we have been forced to consider what happens during contraction. Such implosion can be expected to lead not only to the dynamic instabilities just discussed, but also to unprecedentedly high densities of matter and radiation. Such densities pose unsolved problems to general relativity and elementary particle physics” (Harrison *et al.* 1958, p. 124). Combining the equation of state with the general relativistic equation describing the balance of gravity and pressure inside a star, Wakano performed 44 numerical integrations, for different choices of central density, of the general-relativistic stellar equilibrium equations with the MANIAC computer, whose first job had been to perform the complex calculations for the hydrogen bomb. The numerical integrations showed for the first time on a single curve with mass as function of density the two transition points from stable to unstable equilibrium that had been already found in the 1930s by Subramanyan Chandrasekhar, for white dwarfs, and Oppenheimer & Co, for neutron stars (Bonolis 2017). As emphasized by Wheeler and his collaborators, of all the implications of general relativity for the structure and evolution of the universe, the question of the fate of great masses of matter was one of the most challenging. Once the star had come to the final state — the absolutely lowest state possible for an A-nucleon system under the dual action of nuclear and gravitational forces, in which it could not eject matter, nor radiate photons and emit neutrinos — one had a powerful motivation to ask once more the question: “*What is the final equilibrium state of an A-nucleon system under gravitational forces when A is large?* Perhaps there is no equilibrium state: this is the proposal of Oppenheimer and Snyder...” (Harrison *et al.* 1958, pp. 136-137). During the discussion following Wheeler’s talk at the Solvay conference, Oppenheimer, maintained the view proposed with Snyder about 10 years before. However, as it is well known, Wheeler resisted for a long time to the idea of the singularity, which intrigued him and at the same time haunted his thoughts, and tried to find a way out, to avoid compulsory implosion of great masses.

Only during the second half of the 1960s, Wheeler would realize that nothing could prevent a large-enough chunk of cold matter from collapsing to a dimension smaller than the Schwarzschild radius. Like Wheeler, other groups in Europe and the US who aimed at exploring the potentialities of Einstein’s theory, developed around them a school of young theorists of the new generation, a community of researchers in general relativity addressing a common set of problems. The meeting organized in Bern in 1955 to celebrate the 50th

anniversary of Einstein's theory of special relativity, attended by more than 80 people from 22 countries, marked the reawakening of interest in the field. Two years later, a conference on *The Role of Gravitation in Physics* was held in Chapel Hill, which became the forerunner of the successful General Relativity and Gravitation series of conferences. The end of the decade was marked by new insights into the Schwarzschild solution of the GR equations which paved the way to the modern version of black hole theory.

The early 1960s also saw Joe Weber making his first attempts to detect gravitational waves as well as experimental developments which promised feasible new tests of general relativity and stimulated greatly increased activities and new research directions for GR. Towards the end of the 1950s and early 1960s, discussions of the question of the equation of state of matter at ultrahigh densities in connection with the problem of the last stage of the evolution of heavy stars was intensifying. Apart from the already cited article by Cameron, that attracted attention of theoreticians to neutron stars, other pioneering attempts had been made by taking into account the various elementary particles, and on the other by taking into account the nuclear interaction between nucleons and other baryons, like hyperons. Already in the 1950s, Stirling A. Colgate and Montgomery H. Johnson working at the Livermore Laboratory, in California, where Teller had his general headquarters for the development of the H-bomb project, had conducted precise and extensive simulations to investigate about the outcome of a H-bomb explosion. The result of computer calculations using a hydrodynamic code which had been modified to include gravitation, was that that a H-bomb is quite similar to a supernova explosion, and the material spalled from the surface is the source of cosmic radiation.² At that time, Yakov Borisovic Zeldovic, who had been one of the main creators of the first Soviet nuclear weapon, became interested in astrophysics and quickly turned from particle physics to relativity theory and physical cosmology. In the summer of 1961, the First Soviet gravitational conference was held in Moscow. Zeldovich and Wheeler had remarkably parallel interests: Zeldovich had a strong background in nuclear physics and had worked at nuclear weapons, he thus saw that the physics of stars and the physics of a nuclear explosion have much in common and reoriented his research agenda towards the physics of matter under extreme conditions and towards cosmological issues since the early 1960s. Zeldovich had a great influence also in forming a new generation of brilliant scientists in the field, like Igor Novikov and Rashid Sunyaev. The information carried by radio waves was turning out to be completely different from that carried by optical radiation: non-thermal radio emission originated by synchrotron radiation of intergalactic magnetized plasmas instead of photons emitted during atomic transitions in stellar atmospheres. Moreover, the extragalactic sources became probes of cosmological models: the number of intense radio sources was increasing with distance, showing that galaxies produced more radio waves in the past, in conflict with steady state cosmology, according to which the universe must be the same everywhere and everywhen. During the Solvay

² Their attempt to understand the mechanism of a supernova explosion, was later followed by systematic studies performed in collaboration with Richard White, in which they created models of collapsing stars combining equations of state of superdense matter with software used to design bombs. Their work, showing that stars really could undergo an ongoing and endless catastrophic collapse, was ready in 1962, but it was eventually published only in 1966 (Colgate, White 1966). Their work confirmed that supernovas would be accompanied by an enormous release of neutrinos into space. The same conclusions were independently reached in USSR.

Conference of 1958, the Armenian astronomer Viktor Ambartsumyan suggested that the nuclei of galaxies must be centers of large scale activity proceeding in different forms and that the radio galaxies are not the products of collision of galaxies, as was accepted at that time, but are systems containing a mass many times exceeding that of the Sun, in which ejections from the nuclei of tremendous scale take place. In Summer 1958, the 9th Symposium of the International Astronomical Union was jointly held in Paris with the International Scientific Radio Union. In his introductory lecture in Paris, Geoffrey Burbidge showed that the new breakthrough in understanding strong non-thermal radio sources as synchrotron radiation made the mystery of Cygnus A and other strong radio sources in very distant galaxies still more puzzling than before. Optical and radio astronomy showed jets of particles accelerated to relativistic speeds by the magnetic fields around the center of the galaxy Hercules A. The British astrophysicist computed from the theory of synchrotron radiation the minimum energy of Cygnus A contained in relativistic electrons and in the magnetic field as 2.8×10^{59} erg to account for the radio emission. He also put forward that a much larger amount of energy might still be present in relativistic protons. He thus arrived at a minimum total energy contained in protons and magnetic field of 3.9×10^{60} erg corresponding to a mass equivalent of two million times the mass of the Sun. These staggering numbers were clearly not in favor of the collision theory for Cygnus A (especially promoted by Baade) or any other explanation, that definitely seemed to be unable to provide energies of that order. His detailed dedicated article, “Estimates of the Total Energy in Particles and Magnetic Field in the Non-Thermal Radio Sources”, marked the beginning of modern high-energy astrophysics (Burbidge 1959). What kind of astrophysical process was converting a significant fraction of the rest-mass energy of a galaxy — and even of supernovae remnants such as Cassiopeia A — into high-energy particles and magnetic fields? Vitaly Ginzburg suggested in 1961, that from available data it could be concluded that such energies were not coming from *colliding systems*. He then hypothesized that gravitational energy released in contraction might account for the radio sources:

[T]he gravitational contraction of a galaxy (or of its central region), which is accompanied by the appearance of motions and inhomogeneities in the gas (instability) and, subsequently star formation, must also lead to the generation of cosmic rays. It is easy to see the energy required (up to 10^{61} erg in the case of Cygnus A) may have a *gravitational origin* [added emphasis] (Ginzburg 1961, p. 282).

The migration of nuclear physicists to the growing field of nuclear astrophysics had created a new community that possessed the tools for interpreting those high-energy processes. In his review article on nuclear astrophysics prepared in 1962 Burbidge again put forward the fundamental question: “How could such large fluxes of relativistic particles be generated in a galaxy?” Even the Crab nebula, as well as other supernova remnants in our galaxy, had been recognized to be a strong source of both radio and optical synchrotron radiation. A possible energy source would be the release of gravitational energy: “If collapse to extremely high-density configurations takes place in a large number of stars or in a single massive configuration, the release of gravitational energy might be large enough to provide

the energy required” (Burbidge 1962, p. 570). Understanding the sources of energy required to explain the non-thermal radio sources was of the utmost importance for nuclear astrophysics. However, the idea that very massive configurations (in the order of 10^6 solar masses) could condense, evolve, and collapse had never been investigated.

In the meantime, the accumulation of evidence showing that the centers of galaxies appeared to be the seat of remarkable and violent activity, connected to both Burbidge and Ambartsumyan’s ideas, influenced Hoyle and Fowler who began to reflect on the production of relativistic particles, exploring the possibility that “at the centers of the galaxies there are star-like objects with masses ranging from about 10^5 up to about 10^8 solar masses for abnormal galaxies”. They stressed that the concept of such very massive “stellar-type objects” was of course strange, but the very nature of the case demanded “an unusual physical situation” (Hoyle, Fowler 1962, p. 170). This article was published in August 1962, but in the meantime Hoyle and Fowler took a further step and in February 1963 observed that nuclear energy could not be the key to the problem: gravitational energy, instead, could be of decisive importance for bodies in that range of masses. The energies demanded by the strong sources were “so enormous as to make it clear that the relativity limit must be involved.” As this limit was approached “*general relativity must be used*” [added emphasis] (Hoyle, Fowler, 1963, p. 535). The suggestion that these huge outpourings of energies in distant galaxies could be supplied through the gravitational collapse to its *Schwarzschild* radius of a supermassive star — the equivalent of thousands of supernovas — coincided with the momentous optical identification of 3C 273, a star-like object, a strong radio-source of unknown nature, announced in March 1963 (Hazard *et al.* 1963).

In February 1963, Maarten Schmidt at Palomar had been able to identify the Balmer lines in the spectrum of 3C 273, which showed a large red-shift ($z=0.158$), suggesting that such stellar object might be either “a star with a large gravitational redshift, having a radius of the order of 10 km”, or “a nuclear region of a galaxy with a cosmological redshift” being about 100 times brighter optically than the luminous galaxies which had been identified with radio sources up to that time (Schmidt 1963). These two articles appeared on March 16, in the same issue of *Nature* and were followed by a further contribution by Jesse L. Greenstein and Thomas A. Matthews, who had been able to identify their old spectrum of 3C 48, the first quasi-stellar object discovered, and the related incredible redshift of 0.3675: “So large a redshift, second only to that to the intense radio source 3C 295 [with a redshift of 0.464] will have an important implications in cosmological speculation.” The interesting alternative that the source might be a nearby ultra-dense star of radius near 10 km containing neutrons and even hyperons, seemed to meet “insuperable objections from the spectroscopic point of view.” This hypothesis was dismissed in favour of an interpretation of 3C 48 as “the central core of an explosion in a very abnormal galaxy” (Greenstein, Matthews 1963). This meant, in any case, that the existence of very compact objects like neutron stars was no more considered as a mad speculation *à la Zwicky*. Both the discovery of quasi-stellar objects and the gravitational-collapse theory of Hoyle and Fowler, became crucial elements, acting as catalyzing agents for a quick reaction. But at the same time, such elements were also the result of many parallel and intersecting lines of investigations, now finally merging and providing the underlying reasons for the decision taken in June 1963 by the relativists Ivor Robinson, Alfred Schild, Engelbert Schucking (soon also involving Peter Bergmann) to organize in Dallas the Symposium *Quasi-Stellar sources and Gravitational Collapse*, the first of this type,

to discuss such exciting new perspectives. They sent out an invitation to more than 300 of the world's best relativists, optical and radio astronomers, theoretical astrophysicists. The message read as follows:

The intriguing new discoveries and the theory put forward by Hoyle and Fowler open up the discussion of a wealth of exciting questions. Among the problems raised are the following: (a) The astronomers observed some unusual objects connected with radio sources. Are these the debris of a gravitational implosion? (b) By what machinery is gravitational energy converted into radio waves? (c) Does gravitational collapse lead, on our present assumptions, to indefinite contraction and a singularity in space time? (d) If so, how must we change our theoretical assumptions to avoid this catastrophe? (Robinson et al. 1965, Preface)

The suspicion that the quasi-stellar objects might have something to do with general relativity, had suggested a brand new name for this new field of science: *relativistic astrophysics*. The Texas event took place in December 1963, a short time after John Kennedy's assassination. As Thomas Gold emphasized during the dinner speech, reproduced at the end of the Proceedings (Robinson et al. 1965): "It was, I believe, chiefly Hoyle's genius which produced the extremely attractive idea that here we have a case that allowed one to suggest that the relativists with their sophisticated work were not only magnificent cultural ornaments but might actually be useful to science! Everyone is pleased: the relativists who feel they are being appreciated, who are suddenly experts in a field they hardly knew existed; the astrophysicists for having enlarged their domain, their empire, by the annexation of another subject, general relativity. It is all very pleasing, so let us all hope that it is right. What a shame it would be if we had to go and dismiss all the relativists again."

All this was setting the stage for the dialogue with a new community of researchers in general relativity that was achieving novel fundamental theoretical insights into Einstein's equations and contributed to laying the foundations for the establishment of general relativity as a standard working tool of theoretical astrophysics (Lalli 2017). While the knowledge network of general relativity proper was being actualized, and Weber's followers were starting the long search for gravitational waves, the space age had fueled the birth of X- and gamma-ray astronomy, new technological windows that would allow investigations on very high-energy astrophysical processes that did seem possible only in the framework of general relativity.

References

- Alfvén H., Herlofson N. (1950). "Cosmic Radiation and Radio Stars". *Phys. Rev.*, 78(5), pp. 616-616.
- Alpher R.A., Bethe H., Gamow G. (1948). "The Origin of Chemical Elements". *Phys. Rev.*, 73(7), pp. 803-804.
- Baade W. (1956). "Polarization in the Jet of Messier 87". *Ap. J.*, 123, pp. 550-551.
- Blum A., Lalli R., Renn J. (2015). "The Reinvention of General Relativity: A Historiographical Framework for Assessing One Hundred Years of Curved Space-time". *Isis*, 106(3), pp. 598-620.
- Blum A., Lalli R., Renn J. (2016). "The renaissance of General Relativity: How and why it happened". *Ann. Phys.*, 528 (5), pp. 344-349.

- Bondi H., Gold. T. (1948). “The Steady-State Theory of the Expanding Universe”. *MNRAS*, 108, pp. 252-270.
- Bonolis L. (2017). “Stellar structure and compact objects before 1940: Towards relativistic astrophysics”. *Eur. Phys. J., H* 42, pp. 311-393.
- Burbidge G. (1956). “On Synchrotron Radiation from Messier 87. *Ap. J.* 124, pp. 416-429.
- Burbidge G. (1959). “Estimates of the Total Energy in Particles and Magnetic Fields in the Non-Thermal Radio Sources”. *Ap. J.*, 129, p. 849-852.
- Burbidge G., Burbidge M., Fowler W., Hoyle F. (1957). “Synthesis of the Elements in Stars and cosmological theories”. *Rev. Mod. Phys.*, 29(4), pp. 547-650.
- Cameron A.G.W. (1959). “Neutron Star Models”. *Ap. J.*, 130, pp. 884-894.
- Colgate S.A., White R.H. (1966). “The Hydrodynamic Behavior of Supernovae Explosions”. *Ap. J.*, 143, pp. 626-681.
- Gamow G. (1946). “Expanding Universe and the Origin of Elements”. *Phys. Rev.*, 70(7-8), pp. 572-573.
- Ginzburg V. (1961). “The Nature of the Radio Galaxies”. *Sov. Astron.*, 5, pp. 282-283.
- Hazard C., Mackey M. B., Shimmins A. J. (1963). “Investigation of the Radio Source 3C 273 by the method of lunar occultations”. *Nature*, 197(4872), pp. 1037-1039.
- Greenstein J.L., Matthews T.A. (1963). “Red-shift of the unusual radio source: 3C 48”. *Nature*, 197(4872), pp. 1041-1042.
- Hoyle F. (1948). “A New Model for the Expanding Universe”. *MNRAS*, 108, pp. 372-382.
- Hoyle F. 1954. Generation of Radio Noise by Cosmic Sources. *Nature*, 173(4402), pp. 483-484.
- Hoyle F., Fowler W.A. (1962). “On the Nature of Strong Radio Sources”. *MNRAS*, 125(2), pp. 169-176.
- Hoyle F., Fowler W.A. (1963). “Nature of strong radio sources”. *Nature*, 197(4867), pp. 533-535.
- Kragh H. (2005). *George Gamow and the ‘Factual Approach’ to Relativistic Cosmology*, in Kox, A. J., Eisenstaedt, J. (eds), *The Universe of General Relativity*. Basel: Birkhäuser (Einstein Studies 11), pp.175-188.
- Morrison P. (1958). “On gamma-ray astronomy”. *Il Nuovo Cimento*, 7(6), pp. 858-865.
- Oppenheimer R., Snyder H. (1939). “On Continued Gravitational Contraction”. *Phys. Rev.*, 56(5), pp. 455-459.
- Lalli R. (2017). *Building the General Relativity and Gravitation Community During the Cold War*. Cham (CH): Springer International Publishing.
- Lemaître G. (1931). “The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory”. *Nature*, 127(3210), pp. 706-706.
- Robinson I., Schild A., Schucking E. (eds.) (1965). *Quasi-stellar sources and gravitational collapse. Including the Proceedings of the First Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Schmidt, M. (1963). “3C 273: A star-like object with large red-shift”. *Nature*, 197(4872), pp. 1040-1040.
- Harrison B.K., Wakano J.A., Wheeler J.A. (1958). *Some implications of general relativity for the structure and evolution of the universe*, in *Proceedings, 11ème Conseil de Physique de l’Institut International de Physique Solvay: La structure et l’évolution de l’univers: rapports et Discussions*, Brussels: R. Stoops, pp. 96-148.
- Wheeler J.A. (1994). Interview by Kenneth W. Ford, session IX, 4 March 1994, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA.

Wheeler J.A. (1998). *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics*. New York: W.W. Norton & Co Inc.

A Singular Problem: Conceptual development of black holes

Steve Shore – Dip. di Fisica “Enrico Fermi”, Univ. di Pisa – INFN, Sezione di Pisa
– steven.neil.shore@unipi.it

Abstract: Although a known result of the general relativistic treatment of a point mass, the physical significance of the Schwarzschild singularity was not appreciated for decades. This talk will review the passage from a mathematical nuisance to a necessary consequence of gravitation, and finally to an observationally ubiquitous cosmic presence.

Una prospettiva storica sulla terza generazione di rivelatori di onde gravitazionali: i primi tentativi per una collaborazione Europea (1986-1989)

Adele La Rana – Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche “Enrico Fermi”, Rome, Italy; INFN, Sapienza Università di Roma –
Adele.LaRana@roma1.infn.it

Abstract: The advent of long-base-line interferometric detectors projected the field of GW research in the cosmos of Big Science, a gradual transformation taking place at the turn of the ‘80s and 90s. The first two generations of detectors – Joe Weber’s resonant bars and the following cryogenic resonators – were gradually supplanted by the third generation: the interferometric antennas. Particularly engaging is the European context of this transformation. The present talk focuses on the origins of the Virgo endeavor, rooted in the 80s, critically analyzed in the European and international context. The first proposals for large based interferometric detectors were then being discussed and presented in Europe and in USA, strongly bound to the need of creating a coordinated network of antennas, including the optimistic plan of building an array of three interferometers in Europe. A comparable change of scale is needed today, at the dawn of 3G interferometric antennas and an attempt of comparative analysis can be made between the past and the present negotiations for a joint European project. A detailed paper about this historical analysis is actually in press in the series *Einstein studies* (La Rana 2020).

Keywords: Virgo, Eurograv, onde gravitazionali, antenna interferometrica.

1. Introduzione

La prima osservazione diretta di un segnale gravitazionale, avvenuta nel settembre 2015, è stata un risultato scientifico straordinario, firmato da entrambe le collaborazioni internazionali LIGO e Virgo. L’attesissima scoperta, inseguita per oltre cinquant’anni di ricerche sperimentali, non è stata tuttavia percepita dagli scienziati dell’esperimento Virgo come un completo successo. Al tempo di quella prima entusiasmante osservazione, l’interferometro europeo, situato a Cascina in provincia di Pisa, era infatti spento e stava affrontando una fase di *upgrade* verso *Virgo Advanced*. Il segnale fu materialmente captato dalle sole antenne interferometriche statunitensi LIGO, una situata a Hanford (Washington State) e l’altra a Livingston (Louisiana). Tuttavia, la complessa analisi dei dati è stata uno sforzo congiunto dell’intera collaborazione, che ha necessitato di molte settimane di accuratissimo lavoro e verifiche da parte di decine e decine di

ricercatori in tutto il mondo. L'articolo finale è stato firmato da circa 1000 scienziati, provenienti da 133 istituzioni scientifiche appartenenti a 18 paesi diversi¹.

La scoperta è stata siglata dall'intera collaborazione LIGO-Virgo, sulla base di un accordo del 2007 che stabiliva la completa condivisione dei dati e della loro analisi e la pubblicazione congiunta degli articoli da parte degli scienziati dei due rilevatori interferometrici. Per comprendere le ragioni di questo accordo (*Memorandum of Understanding*), va evidenziato che durante i vent'anni richiesti per costruire, far funzionare e migliorare le tre antenne interferometriche LIGO e Virgo, la cooperazione scientifica tra gli esperimenti è stata fondamentale a molti livelli diversi. Le persone stesse che hanno lavorato per un esperimento si sono poi successivamente trasferiti sull'altro, condividendo competenze, tecnologie, metodi e formati di analisi dei dati. Ad esempio, gli specchi in vetro al quarzo ad alta purezza di LIGO e Virgo, caratterizzati da un bassissimo assorbimento, sono fabbricati dalla società tedesca *Heraeus*, lucidati con precisione - entro un decimo di angstrom - dalla società statunitense *Wave Precision*, mentre il sofisticatissimo rivestimento (*coating*) per renderli riflettenti, garantendo elevata omogeneità e basse perdite, viene realizzato in Francia, dal *Laboratoire Matériaux Avancés* a Lione.

I tre interferometri sono cresciuti insieme, così come la comunità dei ricercatori del campo delle onde gravitazionali (OG). Tuttavia, esiste un'asimmetria ovvia e fondamentale tra la ricerca sulle onde gravitazionali statunitense ed europea. Gli Stati Uniti hanno due interferometri a bracci chilometrici, il che apre la possibilità di fare rivelazione da soli, mentre l'Europa ha un unico rivelatore a lunga base e non può stabilire in modo indipendente una rivelazione di segnale gravitazionale transiente, come quelli rivelati finora. Sono infatti necessari almeno due interferometri per osservare un segnale transitorio del tipo di quelli emessi dai sistemi binari coalescenti.

Dopo che le prime osservazioni sono state annunciate nel 2016 e nel 2017, sono emerse molte domande nella comunità scientifica sulla mancata opportunità di avere due o più interferometri di OG con bracci chilometrici in Europa. Una simile opportunità è stata effettivamente discussa tra i gruppi europei negli anni '80 e nei primi anni '90 in vari incontri e conferenze ad hoc e sono state fatti diversi tentativi per stabilire una collaborazione europea di qualche tipo, come vedremo. Tuttavia, questi tentativi di promuovere una rete europea di interferometri non ebbero successo.

Virgo è nato nei primi anni '90 come progetto italo-francese, finanziato dal *Conseil Nationale de la Recherche Scientifique française* (CNRS) e dall'*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare* (INFN). La costruzione dell'interferometro, avente bracci lunghi 3 km, è iniziata nel 1997 nelle pianure attorno a Cascina, vicino a Pisa, ed è stata completata nel 2003. Altri paesi europei hanno aderito all'esperimento Virgo solo in seguito: il *National Institute for Subatomic Physics* (Nikhef) nei Paesi Bassi è entrato a far parte della collaborazione Virgo nel 2006, mentre il gruppo *Polgraw* a Varsavia e l'*Istituto di Ricerca per le Particelle e la Fisica Nucleare del KFKI* (RMKI) a Budapest si sono uniti

¹ I circa 1000 scienziati che hanno firmato l'articolo della scoperta (LIGO-Virgo Scientific Collaboration 2016) lavorano per diverse istituzioni scientifiche situate nei seguenti paesi: Australia, Belgio, Brasile, Canada, Cina, Francia, Germania, Ungheria, India, Italia, Giappone, Corea, Paesi Bassi, Polonia, Russia, Spagna, Regno Unito e Stati Uniti.

nel 2010. Virgo ha cominciato a fornire i primi dati scientifici (*first scientific run*) nel 2007, a partire dal 18 maggio. Il primo *run* di misure si è concluso quattro mesi dopo, e in questo periodo fu firmato il protocollo d'intesa tra Virgo e LIGO.

Perché Virgo non è nato come progetto europeo invece che come esperimento italo-francese? Perché in Europa è stato costruito un solo rivelatore interferometrico a lunga base se la rivelazione ne richiede almeno due? Queste questioni sono state recentemente poste da numerosi ricercatori della comunità delle OG, specialmente in connessione con le attuali proposte e trattative per la nascita del futuro grande osservatorio europeo di OG *Einstein Telescope* (ET).

2. La necessità di una rete di rivelatori

La collaborazione internazionale è una caratteristica fondante del campo di ricerca sperimentale delle OG, a causa della natura specifica del fenomeno indagato. I segnali previsti sono così deboli rispetto ai diversi disturbi che agiscono sul rivelatore, da essere sommersi dal rumore. Il *Problema* sperimentale è quello di riuscire a captare questo piccolo segnale, che viaggia alla velocità della luce e che quindi colpisce tutti i rivelatori quasi contemporaneamente: riuscire, cioè, a distinguere il suo effetto da quello indotto sul rivelatore dalle molteplici fonti di rumore. Per identificare un segnale OG transitorio in un flusso di dati sperimentali, è necessaria l'analisi di dati provenienti da diversi rivelatori funzionanti *in coincidenza*. Se due rivelatori sono distanti tra loro, i *rumori* cui sono soggetti sono per lo più non correlati: l'analisi comparata dei dati prodotti da due distinte antenne serve a sottrarre, cancellare il rumore locale e mettere in evidenza i possibili *eventi di coincidenza*, eventualmente prodotti da una causa comune (un eventuale segnale di OG). Più rivelatori riducono la probabilità di una coincidenza casuale..

Micro-slittamenti nel sistema di sospensione degli specchi (*micro-creep*), improvvisi disturbi meccanici o elettromagnetici esterni, il cosiddetto rumore *non gaussiano*, imitano molto bene i segnali che ci si aspetterebbe da segnali transitori di OG. Non è possibile identificare tutti i disturbi esterni, per ridurli alla fonte. L'unica possibilità è quella di fare analisi di coincidenza, per cancellare *a posteriori* il rumore locale.

La necessità di una rete di rivelatori, tuttavia, non è motivata unicamente dall'obiettivo di rivelare il passaggio di un'OG. L'analisi delle coincidenze è necessaria per estrarre dai dati preziose informazioni sulla sorgente astrofisica che ha generato il segnale. Le dimensioni degli interferometri per OG sono piccole rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione cercata, perciò è necessario impiegare antenne ben distanziate tra loro e appropriate tecniche di analisi di coincidenze per localizzare le fonti nel cielo e per ottenere utili informazioni astrofisiche. Si tratta di una strategia simile a quella usata in radioastronomia, campo di ricerca che affronta problemi analoghi, e va sotto il nome di VLBI (Very-Long-Base-Line-Interferometer). Al fine di identificare la direzione di arrivo di un'OG, il segnale deve essere osservato da almeno tre rivelatori, il che può ridurre l'incertezza sulla posizione a una regione ragionevolmente piccola nel cielo. Il ritardo tra gli arrivi del segnale in due distinti rivelatori identifica un cerchio nel cielo, su un piano perpendicolare alla linea che unisce i rivelatori, in cui deve tro-

varsi la sorgente. Con tre rivelatori ci sono due ritardi temporali indipendenti, che determinano due cerchi nel cielo, intersecantesi in generale in due punti diversi. Con quattro o più rivelatori ci sarebbe una regione di intersezione unica.

Negli anni '80 la prospettiva di una rete di rivelatori interferometrici per dar vita all'*astronomia gravitazionale* era un argomento scientifico forte a sostegno dei progetti che si andavano definendo in Europa e negli Stati Uniti. L'enorme sforzo richiesto per costruire una serie di antenne gravitazionali sarebbe stato giustificato dall'inaugurazione di un nuovo campo di indagine astrofisica. L'acronimo LIGO (*Laser Interferometer Gravitational Observatory*), contenente la parola "osservatorio", racconta proprio questo aspetto.

La ricerca delle OG è necessariamente uno sforzo internazionale, che evidenzia il processo antinomico della competizione/collaborazione scientifica. La necessità di una cooperazione scientifica ha avuto un peso sulle interazioni tra i pochi e piccoli gruppi impegnati in questo settore in Europa negli anni '80 e ha anche influenzato le strategie politiche adottate per negoziare con gli enti finanziatori. Guardare alla storia della rivelazione delle onde gravitazionali è pertanto particolarmente interessante dal punto di vista delle collaborazioni internazionali: sia quelle che sono state effettivamente stabilite sia quelle che sono state tentate, senza poi raggiungere un accordo.

3. La ricerca sui rivelatori interferometrici in Europa negli anni '80

Durante gli anni '80 tre piccoli gruppi stavano lavorando in Europa allo sviluppo dell'interferometria laser per la rivelazione di OG: 1) il gruppo del *Max Planck Institute for Quantum Optics*, a Garching (Monaco), diretto da Heinz Billing e poi, con il pensionamento di Billing nel 1982, da Gerd Leuchs negli anni 1985 -1990; 2) la squadra fondata a Glasgow da Ron Drever e, dopo la sua partenza per Caltech nel 1981, guidata da Jim Hough; 3) il team di Alain Brillet a Orsay. Questi piccoli gruppi europei sono stati pionieri nel campo dell'interferometria laser e hanno fornito risultati di ricerca e sviluppo fondamentali, che in seguito sono stati cruciali per l'approvazione dei progetti LIGO e Virgo nei primi anni '90.

Dopo i primi esperimenti con barre risonanti a temperatura ambiente *alla Weber* (1971-1975), il gruppo di Garching incominciò a lavorare nel 1975 allo sviluppo dei rivelatori interferometrici, sulla base di alcuni calcoli preliminari del fisico statunitense Rainer Weiss (Weiss 1972). Costruirono un primo prototipo di 3 m, che fu il primo a raggiungere il limite di *shot noise*, nel 1982: un risultato di grande rilievo². Nel 1985 era già operativo il loro secondo prototipo: un interferometro di 30 m funzionante con *linee di ritardo*, che ancora una volta raggiungeva il limite di shot noise, ora corrispondente a uno *strain noise* 10 volte inferiore, data la lunghezza del braccio 10 volte maggiore.

² Il *photon shot noise* è dovuto alla fluttuazione del numero di fotoni rilevati dal fotodiodo, all'uscita dell'interferometro. Se lo shot noise è il fattore limitante, la sensibilità del rivelatore interferometrico aumenta con il quadrato della potenza del laser: una potenza del laser quattro volte maggiore significa avere il doppio della sensibilità.

Anche il team di Glasgow aveva iniziato l'attività di ricerca sui rivelatori a barra risonante nei primi anni '70, migrando verso le tecniche interferometriche all'incirca nello stesso periodo di Garching. Negli anni '80 svilupparono un proprio prototipo da 10 m con prestazioni comparabili, ma testando l'uso di *cavità Fabry-Perot* al posto delle linee di ritardo, per incrementare la lunghezza ottica dei bracci dell'interferometro³. Il gruppo sperimentale di Glasgow si rafforzò in quegli anni con la collaborazione del gruppo teorico guidato da Bernard Schutz all'Università del Galles (Cardiff)⁴.

Il gruppo francese aveva dato il via alle proprie ricerche nel 1982, lavorando principalmente sulla tecnologia laser e sulle tecniche interferometriche, individuando nel laser Nd-Tag la soluzione per una fonte potente e stabile di luce coerente. A differenza dei britannici e dei tedeschi, il team di Alain Brillet non aveva alle spalle esperienza con le barre risonanti. Dal 1970 ingegnere di ricerca del CNRS presso il *Laboratoire de l'horloge atomique*, a Orsay, Brillet aveva maturato notevoli competenze in metrologia e tecnologia laser. Nel 1987 entrambi i gruppi di Orsay e Garching avevano dimostrato con successo il principio di riciclo della luce, un'idea suggerita per la prima volta da Ron Drever a Glasgow e Roland Schilling a Garching, che conferisce maggiore potenza luminosa all'interferometro e quindi una migliore sensibilità.

Le attività di ricerca dei tre gruppi ottici europei furono parzialmente sostenute da una sovvenzione della Comunità Economica Europea, richiesta nel 1985 sotto l'impulso di Philippe Tourenç, fisico teorico dell'*Institut Henri Poincaré* a Parigi e uno dei principali promotori della ricerca delle OG in Francia. La domanda congiunta per questa sovvenzione fu di fatto la prima azione formale per una collaborazione europea nel campo di ricerca delle OG.

Oltre agli specialisti in ottica, c'era un quarto gruppo sperimentale che lavorava indipendentemente dal 1983 su un argomento completamente diverso e complementare. Era il piccolo team diretto da Adalberto Giazotto a Pisa, che aveva il proprio laboratorio a San Piero a Grado. Il gruppo stava sviluppando uno speciale sistema di isolamento si-

³ Al fine di ottenere la massima risposta dell'antenna interferometrica al passaggio di un segnale gravitazionale, la distanza tra le masse di prova (cioè gli specchi sospesi) dovrebbe essere dell'ordine di $\frac{1}{4}$ della lunghezza d'onda dell'OG che attraversa il rivelatore. Ciò significa che per i segnali di frequenza attorno al kHz la lunghezza dei bracci dell'interferometro dovrebbe essere un multiplo di 100 km. Per raggiungere lunghezze ottiche di quest'ordine in un'antenna a terra (*ground-based*), si adotta la strategia di moltiplicare il percorso della luce nei bracci dell'interferometro, utilizzando due possibili apparati: le *linee di ritardo* o le *cavità risonanti* come le *Fabry-Perot*. In una linea di ritardo ottica la luce rimbalza avanti e indietro tra gli specchi, che hanno una leggera curvatura, in modo che i raggi non si sovrappongano. Dopo un numero ben determinato di rimbalzi, la luce ritorna da dove è venuta ed esce attraverso un buco in uno degli specchi. Il principale svantaggio della linea di ritardo è che gli specchi devono essere abbastanza grandi da consentire un sufficiente numero di rimbalzi senza produrre interferenze tra i raggi luminosi. Una cavità Fabry-Perot è composta da due specchi speciali, che sono posizionati paralleli: la luce che entra nella cavità viene riflessa avanti e indietro tra gli specchi, con i raggi che si ripiegano uno sopra l'altro. Ad ogni riflesso, una piccola parte della luce esce da uno degli specchi (specchio semitrasparente) e i raggi in uscita interferiscono l'uno con l'altro, producendo anelli d'interferenza.

⁴ È importante notare che nel 1986 Schutz scoprì come i segnali da sistemi binari trasportano informazioni sulla loro distanza, e consentono quindi la misurazione della costante di Hubble, il cui valore allora era ancora molto incerto (Schutz 1986). Schutz mostrò che la misurazione aveva bisogno di un minimo di tre rilevatori e forniva una forte argomentazione a favore del finanziamento di una serie di interferometri: era un obiettivo astronomico concreto, specialmente in considerazione del crescente numero di sistemi binari di stelle di neutroni che si andavano osservando proprio in quegli anni.

smico, per ridurre drasticamente i disturbi agenti su di una massa di prova alle basse frequenze: frequenze fino a 10 Hz, la regione in cui si supponeva che fossero rilevabili OG prodotte da un numero significativo di pulsar⁵.

4. Le prime proposte di antenne interferometriche a lunga base in Europa

Il gruppo di Garching è stato il primo team europeo a presentare una proposta ufficiale per un rivelatore interferometrico con bracci chilometrici, sottoponendo al *Max Planck Institute of Quantum Optics* il documento “Piani per un’antenna a onde gravitazionali di grandi dimensioni in Germania” nel 1985.⁶

Il gruppo di Glasgow, guidato da Jim Hough dal 1983 - quando Drever assunse un posto permanente al Caltech per lavorare sul prototipo da 40 m - suggerì una prima idea per lo sviluppo di un interferometro da 1 km in Scozia nel 1984, durante una conferenza tenutasi ad Aussois (Francia) e organizzata da Philippe Tournenc. Uno studio dettagliato fu preparato con il supporto tecnico del *Rutherford Appleton Laboratory*, diretto da Ian Corbett, e presentato allo *Science and Engineering Research Council* (SERC) del Regno Unito nel maggio 1986.

Le cose intanto si stavano muovendo anche dalla parte francese. Nel 1982-84, con il supporto dell’*Institut National d’Astrophysique et de Géophysique* (INAG) il team di Brillat fece una stima dei costi - sottovalutati, come per tutte le proposte fatte in quei primi anni - per un interferometro di braccio 1 km, da costruire a Nançay. Qui furono eseguite anche alcune misurazioni del rumore sismico. Nel 1986 la proposta preliminare volta a progettare una grande antenna per OG in Francia fu inserita in bassa priorità nell’elenco dei futuri *Très Grandes Équipements*, preceduta nel campo delle scienze di base dal *Very Large Telescope*. Tutto rimase a questo stadio larvale.

Le proposte di Glasgow e Garching erano entrambe incentrate su una gamma di frequenze che variava da poche centinaia di hertz a pochi kHz. La proposta di Garching del 1985 afferma: “A limitation of the usable frequency range is given at the low-frequency end by the steep increase of many optical and mechanical noise contributions, particularly of the seismic noise. To extend the frequency range to a lower limit of 100 Hz will already be a very difficult task”.

L’obiettivo di 10 Hz era, invece, la speciale caratteristica distintiva delineata da francesi e italiani nella loro prima proposta congiunta, presentata all’INFN nel maggio 1987. L’idea di una collaborazione franco-italiana per il rivelazione di OG era nata dall’incontro di Alain Brillat e Adalberto Giazotto, che avevano background scientifici molto diversi. Si incontrarono per la prima volta nel 1985, al quarto meeting *Marcel*

⁵ Nelle antenne interferometriche, le masse di prova sono gli specchi dell’interferometro, che devono essere isolati il più possibile dal rumore esterno e in particolare dal rumore sismico, nella gamma di frequenza da 10 Hz a pochi KHz. Questo obiettivo può essere raggiunto appendendo gli specchi con speciali sospensioni multi-pendolari, di cui Giazotto è stato un autentico pioniere.

⁶ Winkler W., Maischberger K., Rüdiger A., Schilling R., Schnupp L., Shoemaker D. (1986). *Plans for a Large Gravitational Wave Antenna in Germany*, in Ruffini R. (ed), *Proceedings of the Fourth Marcel Grossmann Meeting* (Rome, 17-21 June 1985). Amsterdam (Netherlands): North-Holland.

Grossman (MG4), svoltosi a Roma. Molti anni dopo, Giazotto descrisse quel felice incontro come *certamente pianificato dal destino*: camminando insieme attorno alla fontana di Minerva dell'Università Sapienza, avevano cominciato quel dialogo che darà vita al progetto Virgo.

5. Verso un gruppo di lavoro europeo, 1986-87

I tre gruppi ottici europei avevano già incominciato una forma di collaborazione e si erano avvantaggiati di una sovvenzione europea condivisa, come si è detto. Stavano inoltre già discutendo possibili coordinamenti con i team statunitensi al MIT e al Caltech. I cinque gruppi avevano avuto un incontro a Cardiff nel febbraio 1986, con lo scopo di formare una rete internazionale per promuovere i vari progetti di rivelatori interferometrici.

Giazotto non era stato coinvolto nell'incontro di Cardiff, né nei precedenti incontri e iniziative tra i gruppi europei. In quella fase iniziale, non era un interlocutore naturale per i gruppi ottici, poiché non lavorava sulla fisica dei laser e sull'interferometria - gli argomenti considerati il cuore della nuova generazione di antenne -, né sugli aspetti teorici delle OG. Non aveva preso parte alle conferenze di ottica quantistica a Bad Windsheim (1981) e allo Schloss Ringberg (1985) - ritenute pietre miliari per la nascita dei progetti interferometrici europei-, né era presente alle Journées Relativistes organizzate da Tournenc ad Aussois (1984). Non solo il gruppo di Pisa stava lavorando ad aspetti sperimentali completamente diversi rispetto agli altri gruppi in Europa, è stato anche l'ultimo cronologicamente ad entrare nel campo della rivelazione delle OG. Giazotto proveniva, inoltre, dalla fisica delle alte energie: in un certo senso, era percepito come un forestiero nel campo della ricerca delle OG. Non essendo un interlocutore naturale del piccolo mondo dei fisici dediti allo sviluppo dei rivelatori interferometrici di OG, non fu invitato a partecipare all'*European gravitational detector working party*, che veniva discusso tra gli altri gruppi europei nel marzo-aprile 1987.

Il 24 aprile 1987, Ian Corbett aveva preparato una nota in cui proponeva alcuni argomenti che il gruppo di lavoro doveva affrontare. Lo scopo era "to produce a report to be submitted to the three funding bodies which have so far been approached: BMFT⁷, CNRS e SERC"⁸. Tra gli argomenti che il gruppo di lavoro avrebbe dovuto discutere, c'erano domande scientifiche e strategiche come⁹: "Whilst we are convinced that there should be at least two detectors in Europe, what are the cogent scientific arguments to justify this? How many antennae should we attempt to argue for?"; "Is there a minimum/optimum separation between the antennae?"; "What is the minimum arm length?"; "What is the long-term role of the prototype detectors (Garching and Glasgow)?".

⁷ Ministero Federale Tedesco per la Ricerca e la Tecnologia (BMFT).

⁸ Le lettere e i documenti archivistici citati provengono dall'Archivio personale di Alain Brillet, sito all'European Gravitational Observatory (EGO), Cascina (Pisa).

⁹ Nota di Ian Corbett, *European gravitational detector working party*, p.1-2, Aprile 24, 1987.

C'erano anche questioni organizzative da affrontare, fortemente legate ad argomenti scientifici: "What are the arguments for building the antennas simultaneously? Do we have the resources to build and commission them simultaneously?"; "How much can be done in common, how much should be done in common, and how much must be done in common?"; "Should we have a common data acquisition, storage and analysis philosophy from the start?"

Alcune domande molto interessanti riguardavano i possibili scenari collaborativi. Che tipo di struttura organizzativa doveva essere adottata per la collaborazione europea? "Do we envisage a single co-ordination and management committee for the whole project comprising several antennae and many interferometers? Should this committee have financial authority delegated by the funding agencies, or should the various national groups contribute in equipment and manpower, under their control? How do we maintain the integrity of the national groups? How do we minimize bureaucracy while retaining accountability? What existing collaborative projects could provide a useful model? (or, conversely, indicate things to avoid!)"

I gruppi ottici prevedevano di discutere queste importanti questioni durante la prima riunione del gruppo di lavoro, che doveva tenere presso il *Rutherford Appleton Laboratory* a Chilton, nel Regno Unito, nel mese di giugno. È interessante notare che quando Corbett scrisse il testo sopra citato, il 24 aprile, i gruppi di Glasgow e Garching non erano a conoscenza del fatto che Brillet e Giazotto stavano per presentare, di lì a pochi giorni, una proposta congiunta all'INFN.

6. I primi incontri dell'*European Gravitational Wave Detectors Working Party*

Scritta in italiano in brevissimo tempo, con l'urgenza di presentarla in tempo per una richiesta finanziaria all'INFN, la proposta del 1987 colse di sorpresa gli altri gruppi europei, che erano a conoscenza dei collegamenti che si stavano stabilendo tra Pisa e Orsay ma non che stava già per essere presentata una proposta congiunta. Questa azione fu difesa sulla base della necessità e dell'urgenza, come descritto anche alla fine della proposta¹⁰.

La prima occasione per palesare l'alleanza franco-italiana davanti altri gruppi europei fu la riunione tenutasi il 17 giugno presso il *Rutherford Appleton Laboratory*: la prima riunione dell'*European gravitational wave detectors working party*.

Le persone presenti all'incontro di Chilton erano: Brillet, Corbett, Hough, Leuchs, Schutz, Tourrenc e Winkler. Giazotto, come già detto, non era stato invitato ufficialmente, perché il gruppo di lavoro era stato costituito alcuni mesi prima tra gli esperti di ottica. Brillet e Tourrenc ebbero così occasione di mostrare il progetto presentato

¹⁰ *Proposta di Antenna interferometrica a grande base per la ricerca di Onde Gravitazionali*. Proposal to INFN (May 1987), signed by: A. Brillet, C. N. Mann, D. Shoemaker, P. Tourrenc, J-Y. Vinet (CNRS and the Université Pierre et Marie Curie in Orsay, Paris); R. Del Fabbro, A. Di Virgilio, A. Giazotto, H. Kautsky, V. Montelatici, D. Passuello, A. Stefanini (Pisa INFN section and Pisa University); F. Barone, R. Bruzzese, A. Cutolo, M. Longo, L. Milano, S. Solimeno (Naples University Federico II); F. Bordoni, F. Fuligni, V. Iafolla (Frascati CNR); I. Pinto (University of Salerno).

all'INFN, da cui si attendeva una prima risposta entro il 19 giugno. Nel verbale dell'incontro, preparato il giorno dopo da Ian Corbett e non destinato alla circolazione generale, si può leggere che “there was some criticism of the way the proposal to the INFN had been prepared without informing or consulting the other groups in the EC collaboration”. È anche interessante notare che la prima bozza del verbale riportava l'oggetto della proposta franco-italiana come un interferometro a lunga base da essere costruito a Nançay (il luogo un tempo previsto per ospitare l'interferometro francese). Tourenç apportò diverse correzioni alla bozza, cancellando anche la parte su Nançay.

In una lettera a Tourenç del 16 luglio 1987, Corbett osservò che sebbene la preparazione e la presentazione di questa proposta avessero generato malumore (*ill-feeling*), sperava di poter mettere tutto questo dietro di sé e “cooperare per aiutarsi a vicenda in ogni modo possibile”, sottolineando l'importanza di un dialogo aperto e onesto.

È importante comprendere la linea d'azione prevista fino a quel momento dai gruppi britannico, francese e tedesco, volta a promuovere i loro progetti nazionali presso gli enti finanziatori. Dopo la buona riuscita della richiesta comune di fondi europei, i tre gruppi stavano formando un *working party* per stabilire una strategia condivisa a lungo termine. Questa strategia doveva basarsi su una qualche forma di coordinamento, che doveva essere discussa e concordata tra i diversi progetti nazionali. A quel tempo i progetti che sembravano avere maggiori speranze di essere portati avanti erano quelli di inglesi e tedeschi. Tuttavia, tre antenne ben distanziate e orientate in modo appropriato avrebbero permesso all'Europa di avere un proprio osservatorio gravitazionale, indipendentemente se gli Stati Uniti avessero costruito i due LIGO o meno. La strategia prevista per promuovere le proposte nazionali si basava sul presupposto di presentarle come parte di un progetto europeo su larga scala: un forte incentivo per gli enti finanziatori.

In questa prospettiva, le iniziative nazionali apparivano strettamente legate l'una all'altra. L'inaspettata presentazione del progetto franco-italiano all'INFN violava questa delicata strategia, mostrando una comunità disunita e disomogenea, un'immagine chiaramente in contrasto con l'aspirazione a presentarsi come un *network* europeo.

Nonostante questo inizio problematico, la proposta franco-italiana ebbe l'effetto positivo di allargare il nascente gruppo di lavoro europeo per includere l'Italia, aumentando idealmente la massa critica per il futuro progetto di un osservatorio comunitario. Il 19 giugno, l'INFN accettò di inserire la proposta di un'antenna interferometrica a lunga base nella pianificazione quinquennale 1989-1993, da presentare al Ministero dell'Università e della Ricerca italiano il dicembre successivo. Tourenç comunicò l'esito positivo di questo primo passo agli altri gruppi europei (29 giugno 1987), sottolineando che il risultato ottenuto avrebbe aiutato tutti.

Il primo compito del *working party* sarebbe stato quello di produrre un documento da presentare agli enti finanziatori di ciascun paese (BMFT, CNRS, INFN, SERC), come si è detto. I contenuti del *report* furono discussi nella seguente riunione del gruppo di lavoro, tenutasi a Parigi nel settembre 1987. Si convenne che il rapporto avrebbe descritto la scienza possibile con tre rivelatori (più due negli Stati Uniti) e avrebbe mostrato cosa si perdeva se il numero di rivelatori fosse stato ridotto a due o a uno. Il documento avrebbe inoltre messo in evidenza le condizioni necessarie, affinché l'Europa

potesse fare della buona scienza anche senza i rivelatori statunitensi, enfatizzando “the current position of European leadership and the fact that a collaborative European project for three antennas was the logical step for the present situation”¹¹.

Quanto al tipo di collaborazione da stabilire tra i gruppi europei, incontro parigino portò a una ipotetica soluzione di compromesso. Il verbale della riunione preparato da Corbett riporta che il *Comitato di coordinamento* non avrebbe avuto alcun potere esecutivo, né avrebbe diretto il lavoro dei gruppi, *funzionando solo per consenso*. La collaborazione si sarebbe chiamata EUROGRAV.

7. EUROGRAV

Nel marzo 1988 fu finalmente raggiunto un accordo sul rapporto finale di EUROGRAV. Il documento fu firmato da tutti i membri del gruppo di lavoro: Brillet, Corbett, Giazotto, Hough, Leuchs, Schutz, Tourrenc, Winkler. Inviato agli enti finanziatori nazionali BMFT, CNRS, INFN e SERC, il *report* assumeva come punto di partenza le proposte nazionali esistenti e ratificava un accordo di collaborazione tra i gruppi europei, che era una “logica estensione dell’attuale programma di ricerca e sviluppo sostenuto dalla Comunità Europea”¹².

È interessante notare che nel rapporto EUROGRAV appare per la prima volta il nome *Virgo*, per identificare il progetto congiunto franco-italiano. Le osservazioni conclusive del documento sono significative, in particolare se lette oggi: “An array of three detectors in Europe would give the European groups the minimum independence necessary to enable Europe to maintain its leading position in the field. Technically and scientifically the European groups have the capability to construct and operate a network that could make the first detection of gravitational waves and that could reach the critical number of three antennas that would see the birth of gravitational wave astronomy. Three European detectors operating with an American array, built either simultaneously or subsequently, would become one of the most important astronomical instruments of the modern age”.

A ogni modo, il rapporto EUROGRAV divenne rapidamente obsoleto, poiché le condizioni al contorno dei gruppi europei, i gruppi stessi e le loro relazioni cambiarono. Nel settembre 1989 i gruppi britannico e tedesco presentarono a SERC e BMFT una proposta congiunta per un rivelatore interferometrico di 3 km.¹³ L’idea di un progetto comune anglo-tedesco era nata da due referenti degli enti finanziatori in Gran Bretagna

¹¹ Ian Corbett, *Notes on the second meeting of European Gravitational Wave Detector Working Group – 30 September 1987 Paris*, in una lettera di Corbett ad Alain Brillet del 2 Ottobre, 1987 (Archivio Brillet, EGO, Cascina).

¹² Brillet A., Corbett I. F., Giazotto A., Hough J., Leuchs G., Schutz B. F., Tourrenc P., Winkler W., *Report of an Ad-Hoc Working Group on the Future of Interferometric Gravitational Wave Antennas in Europe – Marzo 1988* (Archivio Brillet, EGO, Cascina).

¹³ Hough J., Meers B., Newton G., Robertson N., Ward H., Leuchs G., Niebauer T. M., Rüdiger A., Schilling R., Schnupp L., Walther H., Winkler W., Schutz B., Ehlers J., Kafka P., Schäfer G., Hamilton M. W., Schütz I., Welling H., Bennett J. R. J., Corbett I. F., Edwards B. W. H., Greenhalgh R. J. S., Kose V. (1989), *Proposal for a Joint German-British –Interferometric Gravitational Wave Detector*, Max-Planck-Institut für Quantenoptik Internal Report 147, September 1989.

e Germania: durante una riunione a Bonn, Ian Corbett, che era allora responsabile per il programma delle ricerche astronomiche del SERC, aveva discusso la questione con Hermann Schunck, scienziato a capo dell'Unità di ricerca fondamentale della BMFT dal 1987. A quel tempo, Corbett era chiaramente consapevole che il SERC non si sarebbe imbarcato da solo in un'impresa costosa ed impegnativa come la costruzione di un rivelatore interferometrico. Inoltre, il progetto gravitazionale britannico era finanziariamente in concorrenza con diversi altri dell'ambito astrofisico: questi progetti servivano una comunità molto più ampia ed erano quindi favoriti dall'agenzia di finanziamento britannica.

Allo stesso tempo si verificò un evento importante nella storia europea: il 9 novembre 1989 il Governo della Germania orientale annunciò l'apertura del confine tra Germania orientale e occidentale, decretando la caduta del muro di Berlino. La grande Storia intercettava la piccola comunità dei cacciatori di OG. Negli anni seguenti, la riunificazione della Germania avrebbe influenzato drasticamente il destino del progetto congiunto britannico-tedesco, ridimensionando le ambizioni scientifiche dei gruppi alleati e la lunghezza della futura antenna gravitazionale, ridotta a un interferometro di 600 m, che prenderà il nome di GEO 600.

A cavallo degli anni '80-'90, anche sul fronte britannico i finanziamenti per la ricerca scientifica diminuirono notevolmente, a causa della recessione economica che pose fine al ruolo di Primo Ministro e Capo del Partito conservatore di Margaret Thatcher nel novembre 1990. A gennaio del 1991, Sir Mark Richmond, presidente del SERC, ricevette una lettera a sostegno di GEO (al tempo ancora un progetto mirato a bracci di 3 km), firmata da Brillet, Giazotto e Tournenc. Richmond rispose il 1 ° febbraio in questi termini: “[...] the overall SERC funding position for 1991-92 and subsequent years has been seriously undermined by the very poor Public Expenditure Survey outcome for science announced in November 1990. [...] In the short term SERC is having to consider delaying participation in several projects by up to 5 years; GEO may well be one of these projects”¹⁴.

Di fatto, il nuovo progetto congiunto anglo-tedesco per un'antenna da 600 m fu presentato nel 1994. La costruzione di GEO 600 iniziò nel settembre 1995 su un terreno vicino all'Università di Hannover (Germania), dove il gruppo tedesco diretto ora da Karsten Danzmann si era trasferito nel frattempo¹⁵.

Intanto, il 27 giugno 1994, l'accordo per la costruzione di Virgo era stato finalmente firmato dal Presidente del CNRS François Kourilski e dal Presidente dell'INFN Luciano Maiani; i lavori nel sito di Cascina presero il via tre anni dopo, nel 1997.

¹⁴ Lettera di Mark Richmond ad Alain Brillet, Adalberto Giazotto and Philippe Tournenc, Febbraio 1, 1991 (Archivio Brillet, EGO, Cascina).

¹⁵ Danzmann K., Lüc, H., Rüdiger A., Schilling R., Schrepel M., Winkler W., Hough J., Newton G. P., Robertson N. A., Ward H., Campbell A. M., Logan J. E., Robertson D. I., Strain K. A., Bennett J. R. J., Kose V., Kühne M., Schutz B. F., Nicholson D., Shuttleworth J., Welling H., Aufmuth P., Rinkleff R., Tünnermann A., Willk, B. (1994), *Proposal for a 600 m laser-interferometric gravitational-wave antenna*, Max-Planck-Institut für Quantenoptik Internal Report 190.

8. Alcune conclusioni preliminari

Come sostenuto nel rapporto EUROGRAV del 1988, le motivazioni scientifiche per la costruzione di una rete di antenne interferometriche di OG in Europa erano robuste: un osservatorio gravitazionale avrebbe permesso agli scienziati europei di essere sulla frontiera della nuova astronomia che sarebbe nata. Con tre interferometri la scienza europea avrebbe potuto “capitalizzare sui propri investimenti passati e sulla propria attuale leadership scientifica e tecnologica” (EUROGRAV Report 1988). La cooperazione europea era la chiave per raggiungere questi obiettivi.

Allora cos'è che è andato storto e quali sono stati i principali fattori che si opposero al raggiungimento di una collaborazione, che presentava vantaggi condivisi così forti? Perché i gruppi europei, che erano all'epoca leader nel campo sperimentale degli interferometri per la rivelazione di OG, non riuscirono a unire le forze per costruire un osservatorio con almeno due rilevatori di dimensioni chilometriche in Europa?

Diversi fattori giocarono un ruolo importante, come abbiamo visto. Alcuni fattori erano legati in modo contingente alle relazioni tra i piccoli gruppi di fisici che lavoravano nei rivelatori interferometrici OG, in una fase in cui si doveva compiere un notevole salto di scala organizzativo e finanziario: passare, di fatto, dalla sperimentazione su banco ottico alla *Big Science*. Altre ragioni erano connesse al particolare momento storico vissuto all'interno del campo di ricerca. Anche gli eventi storici esterni hanno avuto un'influenza notevole, come si è menzionato sopra: in particolare, la riunificazione della Germania e, come ha sottolineato Ian Corbett, il cambiamento delle priorità globali di finanziamento della ricerca nel Regno Unito, che ha ridotto il sostegno alla ricerca di base nelle scienze fisiche, a favore delle scienze della vita e delle scienze applicate¹⁶. Una trattazione più dettagliata di queste complesse e recentissime vicende, completa delle numerose referenze archivistiche e bibliografiche analizzate, è attualmente in corso di pubblicazione (La Rana 2020).

Bibliografia

- La Rana A. (2020). *Virgo and the emergence of the International gravitational wave community*, in Blum A., Lalli R., Renn J. (eds), *The Renaissance of General Relativity*, Series Einstein Studies, Howard D., Kormos-Buchwald D. L. (eds), Vol. 14. Boston: Birkhäuser. In stampa (2020). Vedere fonti bibliografiche e archivistiche li citate.
- LIGO-Virgo Scientific Collaboration (2016). “Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”, *Physical Review Letters*, 116 (6), p. 061102.
- Schutz B. F. (1986), “Determining the Hubble constant from gravitational wave observations”, *Nature*, 323, p. 310-11.
- Weiss R. (1972). *Elettromagneticamente Coupled Broadband Gravitational Antenna*, in *MIT Quarterly Progress Report*, 105. Cambridge (Massachusetts): MIT Press.

¹⁶ Commento scritto di Ian Corbett, e-mail all'autrice del presente contributo, 1° aprile 2019.

PHYSICS IN THE 20TH CENTURY

Ninety years of X-ray spectroscopy in Italy 1896-1986

Vanda Bouché - Rome Int. Centre Materials Science Superstripes (RICMASS), Rome, Italy; Physics Dept., Sapienza University of Rome, Italy - Vanda.Bouche@gmail.com

Antonio Bianconi - Rome Int. Centre Materials Science Superstripes (RICMASS), Rome, Italy; Institute of Crystallography, CNR, Rome, Italy; National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute, Moscow, Russia - antonio.bianconi@ricmass.eu

Abstract: Ninety years of X-ray spectroscopy research in Italy, from the X-rays discovery (1896), and the Fermi group theoretical research (1922-1938) to the Synchrotron Radiation research in Frascati from 1963 to 1986 are here summarized showing a coherent scientific evolution which has evolved into the actual multidisciplinary research on complex phases of condensed matter with synchrotron radiation.

Keywords: X rays, Synchrotron radiation, X and light spectroscopy.

1. The early days of X-ray research

The physics community was very quick to develop an intense research in Italy on X rays, after the discovery on 5th, January 1896 by Röntgen in Munich. Antonio Garbasso in Pisa (Battelli, Garbasso 1896), and then in Rome Alfonso Sella, with Quirino Majorana, Pietro Blaserna and Garbasso, published several papers on *Nuovo Cimento* (Sella et al. 1896), starting the Italian experimental school on X-rays research in XIX century (Murani, Faè 1898). The focus was on the mechanism of the emission by the X-ray tubes, the nature of X-rays (wave or particles), the propagation characteristics in the matter, the absorption and diffusion. Cambridge and Edinburgh at the beginning of the XX century became the world hot spots of X-ray spectroscopy with Charles Barkla (Nobel prize 1917) who demonstrated the electromagnetic wave nature of X-ray propagation in the vacuum, similar with light and Henry Moseley who, studying the X-ray emission spectra, recorded the X-ray emission lines of most of the elements of the Mendeleev atomic table. The wave nature of X-rays was confirmed in Munich in 1912 by Max Von Laue who discovered the X-ray diffraction in crystals. William Laurence and William Henry Bragg demonstrated the use of the X-ray diffraction to extract the predicted crystalline space groups of spatial arrangements of atoms in crystals.

Moseley results provided evidence for a dramatic difference of X-ray sources from the thermal light sources since the X-ray emission spectra show only a very weak continuum spectrum and very narrow strong emission lines with wavelengths as short as

0.01 nm. The experimental results of Moseley led Niels Bohr in Copenhagen, following his traveling to Edinburgh, to the formulation of the atomic model for all elements of the Mendeleev table which was elaborated by Sommerfeld in Munich in 1915-1916, proposing the old Semi classical Quantum Physics.

Orso M. Corbino and Cesare Trabacchi in Rome directed their studies to the X-rays sources and to the X-ray crystallography after 1910. Novel high energy X-ray tubes for radio diagnostic and radiotherapy purposes were developed. Nella Mortara graduated in Rome in 1916 in Physics and became assistant professor of Corbino. She developed new X-ray techniques able to monitor the cathode electron gun, establishing laws on the relation between the cathodic current and the potential (Mortara 1916). The interest on X rays and on γ ray emission from radioactive materials was dominated by the medical, diagnostic and therapy applications. Following the creation of the 'Institut du Radium' in Paris by Curie, the new institute called 'Radio Office', of the Internal Affairs Ministry was created in 1923 in the Physics Institute of Via Panisperna. In 1923 it was converted into the 'Public Health Physics Laboratory' under the Trabacchi's direction. In this Institute Nella Mortara directed her experimental studies to the natural radioactivity applied to Medical purposes.

In Florence X-ray spectroscopy was carried out by the Garbasso's students. Between them assistant professor Rita Brunetti, graduated in 1913, focused her interests on X-ray atomic spectroscopy. She proposed new experimental methods for high resolution X-ray spectra and diffraction (Brunetti 1917).

2. X-ray research and Quantum Mechanics: 1922-1938

In Pisa Enrico Fermi and Franco Rasetti graduated in 1922 with an X ray experiment. Their supervisor was prof. Pier Luigi Puccianti, chair of experimental Physics in Pisa since 1917, known for his measures of the X-ray wavelength. Fermi published two papers on X-rays: the first one is a review on the contributions of X-ray spectroscopy to foundation of the semiclassical Quantum theory and on experimental methods using Röntgen rays, citing the Brunetti's work (Fermi 1922); the second one (Fermi 1923) is on his hand-made X-ray tube and his experimental results on X-ray imaging. These papers show that the 21 years old student of Pisa was already acquainted with the Bohr and Sommerfeld atomic models. He moved as post-doc in 1923 to work with Max Born in Gottingen Physics Institut, and in 1924 to Leiden with Paul Ehrenfest. In these two hot spots where the new Quantum Mechanics will be developed, he became friend of the major young actors of the 1925-1927 Quantum Mechanics revolution and in particular with Ralph L. de Krönig and H.A. Kramers. Kramers had worked on the interpretation of X-ray absorption spectra and on the continuous X-ray spectrum (Kramers 1923). Krönig was interested on Compton effect and on the study of atoms-form factors in X-ray scattering, stimulated by Scherrer. In 1925 he was interested on the splitting of the X-ray emission lines identified by Sommerfeld and Landè, later assigned to spin orbit splitting. The idea of electron spin was presented by Krönig in 1925 when he was working as an assistant to Landè, some months before George Uhlenbeck and Samuel

Goudsmit. Landé in fact had measured the presence of particular multiplets in the X ray spectra of heavy atoms which led Pauli and Krönig to suppose the existence of the electron ‘spin’, explained by Krönig as an electron rotation motion, and distinguished by Pauli by having only two possible values.

In the summer 1925 Krönig, Fermi and Edoardo Amaldi have spent their summer vacation in Val Gardena when Krönig was working on the elaboration of the idea of the spin (Goudsmit, R. de L. Krönig 1925) and Pauli on exclusion principle (Pauli 1925). The discussions with Krönig allowed Fermi to propose “the Fermi statistics” on January 1926 (Fermi 1926) and to enter among the fathers of the new Quantum Mechanics with Heisenberg, Pauli, Jordan, Born and Schrödinger.

The X-ray absorption spectra of crystals attracted the interest of Wentzel and Koster. X-ray spectroscopy studies led to the famous Kramers-Krönig relations between absorption and dispersion (Kramers, Krönig 1928). Krönig developed the ‘Krönig-Penney’ periodic potential model for electrons in solids. Moreover he interpreted the weak modulation of the cross-section observed in X-ray absorption spectra of solids (Krönig 1931) as due to a single scattering of the photoelectron, emitted from a core level, by the nearest atoms in a crystal. This theory was improved by Krönig, Hartree, and Petersen for theoretical calculation of K-absorption spectra of Ge in GeCl_4 (Hartree et al. 1934). In 1970 the Krönig structure was called EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure).

In 1927 Corbino called E. Fermi on the chair of Theoretical Physics in Rome. In the same year R. Brunetti became full professor of experimental physics in Cagliari. Fermi gathered an excellent theorist group on fundamentals of the new quantum mechanics with interests on X-ray spectroscopy: Ettore Majorana, Giovanni Gentile Jr, Giulio Racah, Ugo Fano, Leo Pincherle and Piero Caldirola.

Majorana, in his first paper in collaboration with Gentile Jr. (Gentile, Majorana 1928), focused on the spin-orbit splitting of Röntgen lines in heavy atoms. By using the screening Fermi potential and the quantum electron Dirac theory in the Schrödinger equation, they deduced that the doubling is related with the near nucleus region where there is little electronic screening. In a second key paper Majorana interpreted the anomalous incomplete P triplets in Cd, Hg, Zn atomic spectra (Majorana 1931) and discussed the selection rules for the non radiative decay, with a resulting interaction between discrete and continuous channels towards the same electronic configuration. This non radiative process is analogous to the Auger recombination of excited core levels, discovered by Lise Meitner and Pierre Auger, and explained by Wentzel by quantum mechanics (Bianconi Vittorini 2006). This was called an auto-ionization process involving the overlap of three localized and one delocalized wave-functions. The scattering resonances between open and closed scattering channels due to overlap of localized and delocalized states predicted by the new Quantum Mechanics was object of the thesis of Majorana and of hot discussions between Majorana and Fermi.

Fano, graduated in mathematics at the Turin University with Enrico Persico in 1934, joined the Fermi group in the winter. Segré and Fermi asked him to give the Quantum Mechanics interpretation of the absorption line of two electron excitations degenerate with the continuum above the ionization potential in the 1s core level ab-

sorption spectrum in helium measured by Beutler. Fano (Fano 1935) provided the theory for a Quantum resonance due to configuration interaction between open and closed scattering channels. The Fano theory allows to extract from the experimental measure of the anisotropic coefficient of the “Fano line-shape” of an absorption peak the strength of the resonance between a localized quasi stationary state and a continuum predicted by E. Majorana.

In 1934 L. Pincherle, graduated in Bologna on 1934, undertook in the Fermi group the studies on the Auger effect. Particularly Pincherle (Pincherle 1935) compared the probability of an Auger electron photoemission to the probability of a radiative X-ray emission after a deep level excitation. His calculations show that Auger effect is more probable in light atoms, but less probable in heavy atoms.

Theorist in atomic and molecular spectroscopy research, Racah, Fano’s cousin, in Florence was in close contact with Fermi group, and finally Caldirola joined the Fermi group in 1938 and was very influenced by Fano. In 1938 Enrico Fermi, Giulio Racah, Nella Mortara, Ugo Fano, Leo Pincherle, were forced to leave Italy; Ettore Majorana in 1938, Giovanni Gentile Junior and Rita Brunetti in 1942 passed away.

3. X-ray research with Frascati synchrotron radiation: 1958 -1986

Twenty years later, in 1958, U. Fano proposed to Amaldi the revival of “X-ray spectroscopy” in Italy by using as X-ray synchrotron radiation source the Frascati 1 GeV electron-synchrotron but for Amaldi it was impossible to find experts in the field in Italy. Fano published in 1961 (Fano 1961) a revised paper of his *Nuovo Cimento* 1935 paper and Madden and Codling in 1963 (Madden, Codling 1963) verified the prediction of the Fano lineshape of the core level K-edge absorption spectra. Finally a collaboration promoted by Fano, called “Sanità Luce”, started between Yvette Cauchois at *Institut du Radium* in Paris and Mario Ageno of *Istituto di Sanità in Rome* (Jaeglè et al. 1963) (Jaeglé et al. 1969) focused on the x-ray spectra of heavy elements. In 1971 the group called “Solidi Roma built two new beam lines (Balzarotti et al. 1972) The research was funded by a joint project of three institutions: LNF (Laboratori Nazionali di Frascati) of CNEN, represented by its director, GNSM (Gruppo Nazionale Struttura della Materia) of CNR represented by G. Chiarotti; and ISS (Istituto Superiore di Sanità) represented M. Ageno, with U. Fano of Chicago University as the foreign supervisor, visiting Frascati LNF in the summer semester. While scientists in USA focused in the “Krönig structure”, a weak modulation of the cross-section over a large energy range, renamed “EXAFS” in 1970 the Frascati X-ray spectroscopy group formed by A. Bianconi R. Habel (LNF) A. Balzarotti, E. Burattini, M. Piacentini, (GNSM) M. Grandolfo (ISS) focused on the X-ray absorption near edge spectra proposing that the strong absorption peaks in the first 50 eV beyond the edge in Al L₃-edge absorption of polymorphic Al₂O₃ (Balzarotti et al. 1974) (Balzarotti et al 1976) (Bianconi et al. 1979) and in Ca K-edge in biomolecules (Bianconi et al. 1978b) are determined by *multiple scattering resonances* (shape resonances) as in nitrogen K-edge spectra predicted by Fano and his students Dehmer and Dill. (Bianconi 1978b).

In 1974 Balzarotti, Bianconi Burattini and Piacentini proposed the project of the PULS facility at the Adone storage ring to prof. Amaldi and presented the project to CNR. The PULS construction spanned over five years. When in 1980 the research activity started at PULS, a new acronym XANES was coined to indicate the fact that XANES probes the selected local structure in complex materials via multiple scattering processes of the photoelectron (Bianconi 1980) (Belli 1980) (Bianconi 1982) (Benfatto 1986) opening a new roadmap to investigate the active site geometry in a protein (Durham 1983) (Bianconi 1985). X-ray spectroscopy was shown to be a unique probe of correlated electronic systems (Bianconi 1982b) (Davoli, 1986) (Petiau, 1986), unconventional superconductors (Balzarotti 1984) and small atomic clusters (Balerna 1985). Finally the X-ray spectroscopy in Italy reached a worldwide leader position in the field of XANES spectroscopy when the first EXAFS conference in 1982 (Bianconi 2012a) and the first Biophysics and Synchrotron Radiation conference in 1986 (Bianconi 2012b) were organized in Frascati.

References

- Balerna A., Bernieri E., Picozzi P., Reale A., Santucci S., Burattini E., Mobilio S. (1985). "Extended X-ray-absorption fine-structure and near-edge-structure studies on evaporated small clusters of Au". *Physical Review B*, 31, pp. 5058- 5065.
- Balzarotti A., Bianconi A. (1976). "Electronic Structure of Aluminium Oxide as Determined by X-Ray Photoemission". *Physica Status Solidi* (b), 76 (2), pp. 689-694.
- Balzarotti A., Bianconi A., Burattini E., Grandolfo M., Habel R., Piacentini M. (1974). "Core transitions from the Al 2p level in amorphous and crystalline Al₂O₃". *Physica Status Solidi* (b), 63, pp. 77-87.
- Balzarotti A., Bianconi A., Burattini E., Piacentini M., Bartolini L., Habel R., Grandolfo M. (1972). *Ultraviolet spectroscopy using synchrotron radiation*. LNF-Report (No. CNEN-LNF--72-98). Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare.
- Balzarotti A., Menushenkov A. P., Motta N., Purans J. (1984). "EXAFS of the superconducting oxide BaPb_{1-x}BixO₃". *Solid State Communications*, 49 (9), pp. 887-890.
- Battelli A., Garbasso A. (1896). "Sopra i raggi di Röntgen". *Il Nuovo Cimento* (1895-1900), 3, pp. 40-61.
- Belli M., Scafati A., Bianconi A., Mobilio S., Palladino L., Reale A., Burattini E. (1980). "X-ray absorption near edge structures (XANES) in simple and complex Mn compounds". *Solid State Communications*, 35, pp. 355-361.
- Benfatto M., Natoli C. R., Bianconi A., Garcia J., Marcelli A., Fanfoni M., Davoli I. (1986). "Multiple-scattering regime and higher-order correlations in x-ray-absorption spectra of liquid solutions". *Physical Review B*, 34, pp. 5774-5781.
- Bianconi A. (1980). "Surface X-ray absorption spectroscopy: Surface EXAFS and surface XANES". *Applications of Surface Science*, 6, pp. 392-418.

- Bianconi A. (1982). "Multiplet splitting of final-state configurations in x-ray-absorption spectrum of metal VO₂: Effect of core-hole-screening, electron correlation, and metal-insulator transition". *Physical Review B*, 26, p. 2741.
- Bianconi A., Bachrach R.Z., Hagstrom S.B.M., Flodström S.A. (1979). "Al-Al₂O₃ interface study using surface soft-x-ray absorption and photoemission spectroscopy". *Physical Review B*, 19, pp. 2837-2843.
- Bianconi A., Castellano A.C. (eds) (2012). *Biophysics and synchrotron radiation. Proceedings of the International Conference on Biophysics and Synchrotron Radiation* (Frascati - Italy, July 1986), Vol. 2. New York: Springer Science.
- Bianconi A., Congiu-Castellano A., Durham P.J., Hasnain S.S., Phillips S. (1985). "The CO bond angle of carboxymyoglobin determined by angular-resolved XANES spectroscopy". *Nature*, 318, p. 685.
- Bianconi A., Dell'Aricea M., Durham P.J., Pendry J.B. (1982). "Multiple-scattering resonances and structural effects in the x-ray-absorption near-edge spectra of Fe II and Fe III hexacyanide complexes". *Physical Review B*, 26, pp. 6502-6508.
- Bianconi A., Doniach S., Lublin D. (1978). "X-ray Ca K edge of calcium adenosine triphosphate system and of simple Ca compounds". *Chem. Phys. Lett.*, 59, pp. 121-124.
- Bianconi A., Inoccia L., Stipcich S. (eds) (2012). *EXAFS and Near Edge Structure. Proceedings of the International Conference* (Frascati - Italy, September 13-17, 1982), Vol. 27. New York: Springer Science.
- Bianconi A., Petersen H., Brown F.C., Bachrach R.Z. (1978b). "K-shell photoabsorption spectra of N₂ and N₂O using synchrotron radiation". *Physical Review A*, 17, pp. 1907.
- Bianconi A., Vittorini Orgeas A. (2007). "From the Majorana theory of Incomplete P³ triplets to Feshbach resonances". *Proceedings of Science*, EMC2006, pp. 001-013. URL: < <https://doi.org/10.22323/1.037.0001> >.
- Brunetti R. (1917). "Spettri ad alta frequenza con lamine di salgemma cilindriche". *Il Nuovo Cimento*, 13, pp. 224-240.
- Davoli I., Marcelli A., Bianconi A., Tomellini M., Fanfoni M. (1986). "Multielectron configurations in the x-ray-absorption near-edge structure of NiO at the oxygen K threshold". *Physical Review B*, 33 (4), pp. 2979-2982.
- Durham P., Bianconi A., Congiu-Castellano A., Giovannelli A., Hasnain S.S., Inoccia L., Morante S., Pendry J.B. (1983). "X-ray absorption near edge structure (XANES) for CO, CN and deoxyhaemoglobin: geometrical information". *The EMBO journal*, 2, pp. 1441-1443.
- Fano U. (1935). "Sullo spettro di assorbimento dei gas nobili presso il limite dello spettro d'arco". *Il Nuovo Cimento*, 12, pp.154-161.
- Fano U. (1961). "Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts". *Physical Review*, 124, pp. 1866-1878.
- Fermi E. (1922). "I raggi Röntgen". *Il Nuovo Cimento*, 24, pp. 133-163.
- Fermi E. (1923). "Formazione di immagini coi raggi Röntgen". *Il Nuovo Cimento*, 25, pp. 63-68.

- Gentile G., Majorana E. (1928). "Sullo sdoppiamento dei termini Röntgen e ottici a causa dell'elettrone rotante e sulle intensità delle righe del Cesio". *Rendiconti dell'Accademia dei Lincei*, 8, pp. 229-233.
- Hartree D.R., Kronig R., Petersen H. (1934). "A theoretical calculation of the fine structure for the K-absorption band of Ge in GeCl₄". *Physica*, 1, pp. 895-924.
- Jaeglé P., Farnoux, F.C., Dhez P., Cremonese M., Onori G. (1969). "Experimental and Theoretical Study of the Absorption of Ultrasoft X Rays in Some Heavy Elements". *Physical Review*, 188, pp. 30-35.
- Jaeglé P., Missoni G., Dhez P. (1967). "Study of the Absorption of Ultrasoft X Rays by Bismuth and Lead Using the Orbit Radiation of the Frascati Synchrotron". *Physical Review Letters*, 18, pp. 887-888.
- Kramers H.A. (1923). "On the theory of X-ray absorption and the continuous X-ray spectrum". *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 46, pp. 836-871.
- Kramers H.A., Krönig R. (1928). "Zur Theorie der Absorption und Dispersion in den Röntgen spektren". *Zeitschrift für Physik*, 48, pp. 174-179.
- Kronig R.D.L. (1931). "Zur Theorie der Feinstruktur in den Röntgen absorptions spektren". *Zeitschrift für Physik*, 70, pp. 317-323.
- Madden R.P., Codling K. (1963). "New autoionizing atomic energy levels in He, Ne, and Ar". *Physical Review Letters*, 10, pp. 516-517
- Majorana E. (1931). "Teoria dei tripletti P'incomplete". *Il Nuovo Cimento*, 8, pp.107-113.
- Mortara N. (1916). "La Caratteristica dinamica dei tubi per raggi X". *Il Nuovo Cimento (1911-1923)* 12, pp. 133-143.
- Murani O., Faè G. (1898). "Luce e raggi Röntgen". *Il Nuovo Cimento (1895-1900)*, 7, pp. 62-65.
- Petiau J., Calas G., Petitmaire D., Bianconi A., Benfatto M., Marcelli A. (1986). "Delocalized versus localized unoccupied 5f states and the uranium site structure in uranium oxides and glasses probed by x-ray-absorption near-edge structure". *Physical Review B*, 34, p. 7350.
- Pincherle L. (1935). "L'effetto Auger". *Il Nuovo Cimento* 12, pp. 81-92.
- Sella A., Majorana Q., Garbasso A. (1896). "Ricerche sui raggi di Röntgen". *Il Nuovo Cimento (1895-1900)*, 3, pp. 225-227.

Aldo Romano e i cinquant'anni del Centro Studi e Applicazioni in Tecnologie Avanzate (CSATA) (1969-2019)

Benedetta Campanile - Seminario di Storia della Scienza, Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" - benedetta.campanile@uniba.it

Abstract: Fifty years have passed since the foundation of the *Centro Studi e Applicazioni in Tecnologie Avanzate* (Csata), the research centre in Bari for the applications in advanced technology. The relationship between this centre and the physicist Aldo Romano, considered its founder, created a new identity for the University of Bari, marked by the technological innovations of applied physics and by a new bond with his territory. Romano raised a question in 1965 in one of his articles: "What can an electronic calculator do for the university?". It included the idea of using the emerging technology to give a future to the Academy as knowledge enterprise. At the time, he acknowledged that Computer science was able to transform the traditional methods of scientific work, administrative management and education. It could create the conditions to bring life back to the occupational southern area. In the past fifty years, Csata has assumed various configurations – as an association, a consortium, a scientific and technological park – but in the meantime has always kept close ties with the University of Bari, as established by Romano at its start.

Keywords: Aldo Romano, Centro Studi e Applicazioni per le Tecnologie Avanzate, Università di Bari, camere a bolle, Informatica.

1. Un matematico alla corte della Fisica barese

Dopo aver conseguito brillantemente la laurea in Scienze matematiche, dal 1957 il brindisino Aldo Romano (1934-2015) (Bari, Archivio generale di Ateneo (Agab), *Personale*, n. 6105) iniziò la carriera accademica all'Università di Bari come assistente presso la cattedra di Fisica terrestre della Facoltà di Scienze diretta da Carlo Morelli. La sua esuberante personalità attirò subito l'attenzione di un vero cacciatore di talenti, il fisico sperimentale triestino Michelangelo Merlin (1910-2001) (Agab, *Personale*, n. 3965), che nel '58 era stato trasferito a Bari sulla cattedra di Fisica sperimentale. Quest'ultimo lo volle tra i giovani con i quali intendeva *rifondare* l'Istituto barese che languiva nell'abbandono strutturale (Ghidini 2017, p. 22). La «sensibilità di un uomo del Nord [desideroso di lavorare] per lo sviluppo del Sud» (Colelli, Lapomarda 2014, pp. 21-23) entusias mò Romano, che si appassionò alla ricerca in fisica delle particelle elementari. Merlin, infatti, inserì Bari nel circuito di cooperazione internazionale del Conseil Euro-

péen pour la Recherche Nucléaire (Cern) e avviò una collaborazione con i Centri di Saclay e Orsay in Francia e Ginevra in Svizzera, dove si svolgevano ricerche sulle particelle alle alte velocità con le nuove camere a bolle. Bari non disponeva di grandi risorse, ma Merlin aveva l'esperienza dell'analisi delle emulsioni del progetto G-Stack e si ritagliò il lavoro di analisi dei fotogrammi degli eventi avvenuti nelle camere a bolle (Campanile 2017, p. 74). La lettura dei numerosi fotogrammi, infatti, era demandata ai centri periferici dove gruppi di ragazze svolgevano il lavoro paziente e lungo usando i tavoli di misura.¹ Per questo lavoro Romano frequentò, tra il '59 e il '62, l'Istituto di Fisica dell'Università di Bologna, dove Giampietro Puppi (1917-2006) guidava un gruppo di ricerca sperimentale specializzato nello studio delle interazioni forti nel campo della Fisica delle alte energie (Giacomelli 2008, pp. 29-31). Si recò in vari centri, ma fu a Ginevra che sperimentò le *Reading machines* del Cern, cioè le macchine per leggere i fotogrammi. Il cuore di questo sistema di elaborazione era l'*Instrument for the Evaluation of Photographs*, cioè un sistema di hardware e software specializzato, che oltre ad aver reso più veloce e preciso il processo di lettura, aveva trasformato il significato di un'immagine, cioè i punti che rappresentavano il passaggio delle particelle, in "testo", cioè nelle coordinate di quei punti che si potevano, quindi, digitalizzare ed elaborare a computer per ottenere le traiettorie percorse dalle particelle e studiarne il comportamento (Krige 1987, p. 4).

Romano s'impadronì delle prime tecniche di programmazione e le trasferì a Bari, ottenendo risultati significativi nello studio di risonanze mesoniche generate dalle interazioni forti tra pioni e nucleoni (Armenise *et Alii*, 1965, pp. 361-375). Questo fu il suo approccio con gli elaboratori elettronici e con le loro potenzialità al di là del calcolo numerico. Infatti, l'uso delle *Reading Machines* non risolveva solo il complesso calcolo numerico, ma implicava una riorganizzazione della ricerca, perché lo scienziato doveva confrontarsi con nuovi problemi gestionali: grandi quantità di dati; coordinamento dei tecnici necessari ad accelerare l'analisi dei dati; dialogo con la macchina-computer per elaborare i dati (Galison 1992, p. 229).

In questo contesto Romano scoprì le sue doti manageriali e assunse la guida del gruppo di Bologna, che Puppi gli affidò dal '63 al '66. Ne scaturirono diverse pubblicazioni sulle proprietà degli stati risonanti mesonici di massa intermedia sulle riviste nazionali e internazionali dal '61 al '65, che gli valsero l'ordinariato in Fisica generale nel '70, ma anche la capacità di ripensare la didattica con l'uso del computer. Al fianco di Puppi, inoltre, egli sviluppò l'abilità di consulente esperto nella elaborazione e valutazione di programmi e progetti strategici di Enti regionali, nazionali ed internazionali per le politiche scientifiche e tecnologiche. Puppi, infatti, era coinvolto dal 1959, nel gruppo guidato da Adriano Buzzati-Traverso che lavorava a un *Piano di sviluppo delle facoltà scientifiche* (1960), per il «potenziamento della ricerca e dell'insegnamento scientifico in Italia» (Cassata 2013, p. 164).

¹ Il primo tavolo di misura digitale in Italia fu creato, nel 1965, da Guglielmo Giannelli, docente di Elettronica della Facoltà di Smfn dell'Università di Bari, con un programma scritto per l'IBM 1620.

2. La prima automazione a Bari: il Centro di Calcolo

Per Romano la padronanza nell'uso del computer fu fonte d'ispirazione di nuove applicazioni in ambiti diversi – dalla didattica alla sperimentazione scientifica – da sviluppare a Bari (Agab, *Verbali del Consiglio di Facoltà di Smfn*, 1975). Egli avviò un'attività promozionale dell'uso del computer, che vide Merlin tra i maggiori sostenitori. Quest'ultimo, infatti, nel 1962, fece acquistare all'Amministrazione barese il suo primo Data Processing System Ibm 1620, un computer dai costi contenuti ma in grado di svolgere sia i complessi calcoli scientifici sia la gestione documentaria e amministrativo-contabile. Per Romano questa era la base tecnologica giusta per la prospettiva competitiva dei progetti di industrializzazione del Mezzogiorno e delle collaborazioni che l'Università voleva stringere con Enti pubblici e privati secondo il piano nazionale per l'energia nucleare (Del Prete 1963, pp. 7-15). L'uso del nuovo computer fu condiviso da quattro facoltà – Scienze, Ingegneria, Agraria ed Economia e Commercio – che costituirono un consorzio, il *Centro di Calcolo* (CeCa) (Campanile 2017, p. 78). Il CeCa si configurò subito come un “polo di aggregazione intorno a risorse tecnologiche”, nel senso che costituì il primo momento di scambio di tecniche all'interno della comunità scientifica, un dialogo interno tra discipline.

3. La nascita del Csata

Secondo Romano, l'origine dell'idea di costituire un Centro Studi e Applicazioni in Tecnologie Avanzate (Csata) va ricercata nel convegno “Cosa possono fare i calcolatori per il Mezzogiorno?”, organizzato nel 1965 dalla rivista «Politica e Mezzogiorno» dell'intellettuale meridionalista Beniamino Finocchiaro. Nell'articolo omonimo, il fisico spiegò che da quell'incontro era emersa la necessità di svecchiare l'Università e la proposta era stata quella di potenziare l'esperienza del CeCa, cioè incentivare l'utilizzo del computer per dare all'accademia l'opportunità di aggiornarsi quantitativamente e qualitativamente con un'innovazione che rispondeva «alle nuove esigenze e specificatamente ai due fini fondamentali [...] della ricerca scientifica e dell'insegnamento superiore» (Romano 1965, p. 439). Il fisico prospettava, infatti, di allargare l'uso delle risorse elettroniche del CeCa ad altre facoltà, all'amministrazione e alle imprese del territorio. Infatti, la tecnologia elettronica risolveva svariate problematiche: gestione di grandi quantità di dati; ricerche bibliografiche; servizi di documentazione; analisi statistiche e contabilità. Quindi il computer permetteva la condivisione delle pratiche della ricerca con la didattica, la gestione amministrativa e le prassi aziendali. Da questo scambio sarebbe derivato un rinnovamento delle funzioni lavorative che poteva portare sviluppo economico e sociale nel Mezzogiorno. In questo modo Romano legava strettamente scienza e territorio. In questo contesto, l'Università, attraverso il Csata, avrebbe svolto il ruolo di formatore di personale altamente qualificato specializzato nell'uso dei computer, con nuove prospettive di occupazione. Romano spiegava che «L'Informatica rappresenta un modo nuovo di vedere i problemi [...] e ha un diritto di cittadinanza in tutti i livelli di istruzione» (Torino, RAI, *Teche*, 19-4-71).

L'idea di un consorzio che vedeva la cooperazione di pubblico e privato era condivisa da diversi intellettuali pugliesi, tra i quali Vittore Fiore (1961-62, p. 170), consigliere della Cassa del Mezzogiorno (CasMez), che sosteneva la necessità di creare forme concrete di collaborazione economica con l'area del Mediterraneo. Per questo il primo atto fondativo del Csata, registrato il 10 gennaio 1969, fu l'approvazione da parte della CasMez dello stanziamento di 243 milioni di Lire per il noleggio del computer. Il 4 febbraio successivo, il Consiglio di Amministrazione dell'Università approvò la Convenzione tra l'Università di Bari e la CasMez per la costituzione del Csata. Il 24 aprile aderì alla convenzione il Centro di Formazione e Studi per il Mezzogiorno (Formez), guidato dal giurista Giovanni Marongiu, convinto sostenitore della cooperazione tra pubblico e privato come soluzione per il futuro al Mezzogiorno.

Il Csata così costituito aveva personalità giuridica ed economica autonoma rispetto all'Università e primo presidente fu nominato Michelangelo Merlin. Quest'ultimo si dimise dall'incarico di Preside della Facoltà di Scienze con la motivazione dell'impegno totale che intendeva infondere nella nuova importante iniziativa (Agab, *Personale*, 27 maggio 1969). L'Istituto di Fisica mise a disposizione: 50 ricercatori e 60 tecnici, il Centro di Fisica nucleare con un acceleratore da 400 keV, 2 piccoli calcolatori e l'IBM 360/65 del CeCa e il terreno nel campus universitario dove furono impiantate le baracche con le apparecchiature. Il cuore del sistema era un elaboratore *general purpose*, con il quale gestire i servizi di calcolo dell'Università di Bari e di altre università consociate, in particolare di Sassari (Romano, 1988, p. 238).

La «Gazzetta del Mezzogiorno» scrisse: «È stato istituito presso l'Istituto di Fisica dell'Università [un centro che] specializzerà i laureati nei settori nucleare e elettronico [...] Il Centro, primo del genere in Italia, opererà dal prossimo 1° marzo, nella sua fase iniziale, lungo tre direttrici principali: settore nucleare, settore utilizzo ed impiego degli elaboratori elettronici, settore elettronico» (*Un centro studi a Bari... 1969*, p. 4).

Negli stessi giorni, però, si ebbe un'accelerazione dei «processi di modernizzazione interni all'università di Bari» (Amendola 1997, p. 350), perché il 4 e il 6 febbraio gli studenti occuparono rispettivamente le Facoltà di Matematica e Fisica per reclamare la riforma degli studi. Ciò generò un periodo turbolento con le dimissioni del rettore, ma anche il rinnovamento del corso di Laurea in Fisica, che reagì positivamente e introdusse il nuovo percorso di fisica applicata, con le nuove discipline caratterizzanti: elettronica e informatica (Agab, *Verballi del Consiglio di Facoltà di Smfn*, 6-2-1969).

Il 4 marzo 1969 il Consiglio di Facoltà di Scienze mise a verbale la partenza del Csata come iniziativa fondata sull'esperienza del CeCa e del suo «elaboratore elettronico di tipo avanzato e di notevole potenza che costituisce uno dei sistemi di calcolo più avanzati attualmente in dotazione presso le università italiane» (Agab, *Verballi del Consiglio di Facoltà di Smfn*, 4-3-1969).

Il 19 giugno il Rettore propose al Consiglio di Amministrazione di aprire il Csata a nuovi soggetti che avevano manifestato interesse. L'atto costitutivo ufficiale del Csata, infatti, fu siglato il 19 settembre 1963 nella forma di associazione tra pubblico e privato cui aderirono: le Università di Bari, di Sassari e di Lecce, il Consiglio Nazionale delle Ricerche, la Digital Engineering s.p.a., il Formez, la CasMez, la Banca d'Italia e il Ministero della Pubblica Istruzione. Tra le imprese figurava anche la Nuovo Pignone, che

aveva nuovi interessi nell'elettronica. Presidente del Consiglio di amministrazione fu nominato Aldo Romano, in virtù del suo impegno nel trasferire le proprie competenze software ad altri settori scientifici e sociali e per lo studio da lui condotto di importanti iniziative analoghe europee e americane. Inoltre, fu approvato un regolamento per fissare i costi per l'utilizzo del computer da parte degli interni all'Università e delle aziende esterne, tra cui l'IBM, fornitrice del computer, da poco a Bari. Tra i costi fu quantificato anche il valore della programmazione, cioè del lavoro creativo dell'uomo. Era la dimostrazione concreta che l'industria dell'informazione entrava nel settore terziario.

Le attività svolte da Romano nel Csata spaziarono nelle varie aree dell'informatica, con una predilezione per l'Ingegneria dell'educazione, il nuovo approccio alla didattica basato sul computer (RAI, *Teche*, 19-4-71). In quest'ultimo ambito organizzò, nel 1972, la prima scuola estiva internazionale in "Computer in Education", tenuta a Pugnochiuso, sul Gargano, per parlare di didattica nell'istruzione. Parallelamente, tra il '76 e l'81, fu consulente per i progetti di sviluppo regionale e del Mezzogiorno basati sull'innovazione.



Fig. 1. Firma dell'accordo di fondazione del Csata nell'Ateneo barese. Da sinistra: Aldo Romano, per la Facoltà di Fisica, Pasquale Del Prete, rettore dell'Università di Bari, (il dirigente amministrativo), Vittore Fiore, consigliere della CasMez e Giovanni Marongiu presidente del Formez (Agab, *Fondo fotografico Ficarelli*, Bari, 19-9-1969).²

² Si ringrazia per la segnalazione del documento il dott. Giuseppe Ventrella, responsabile dell'Agab.

4. Le trasformazioni del Csata

Il 2 dicembre 1978, la forma associativa del Csata fu trasformata in “consorzio di ricerca con la partecipazione di enti pubblici” così da avere accesso alle agevolazioni economiche per i centri di ricerca scientifica e tecnologica con sede nel Mezzogiorno per superare le difficoltà di sopravvivenza del centro (Agab, *Personale*, 21-3-1985). Romano era consapevole della resistenza del mondo accademico tradizionale rispetto alla rivendicazione di una diversa e maggiore dignità per la formazione di base in informatica (Romano 1974, p. 29). Lamentava, inoltre, il contraddittorio comportamento del Cnr, conteso tra la linea politica di sostegno alla ricerca scientifica del Mezzogiorno, considerato fattore trainante, e l’assegnazione dei finanziamenti che invece era stata solo del 15% nel 1968.

Negli anni Ottanta, per contrastare la crisi economica, Romano avanzò una nuova sfida, quella di dare al Csata l’identità di una polis tecnologica, sul modello del *Tecnopolis Project* attuato in Giappone nel 1981 (Hsu 1981, p. 384). Con il sostegno dei rapporti con la Silicon Valley nati a Pugnochiuso, e di vari politici, nel 1984, nella zona agricola di Valenzano, aprì *Tecnopolis-Csata Novus Ortus*, il primo parco scientifico tecnologico nel Mezzogiorno (Pirro 1984, p. 33). Nella prolusione tenuta per l’inaugurazione dell’a.a. ’83-84, il fisico sostenne, infatti, che la crisi poteva essere superata grazie al “motore dello sviluppo” costituito dall’innovazione tecnologica (Romano 1984, p. 4). Frutto delle contaminazioni tra Fisica e idee schumpeteriane, la sua era una fiducia incondizionata nella “rivoluzione” prodotta dalle nuove tecnologie della comunicazione e trasmissione, che indirizzavano verso una nuova organizzazione del lavoro. L’idea si basava sulle caratteristiche di due nuovi sistemi, che erogavano diversi servizi: un IBM 370/158, per gestire i servizi di calcolo delle università consociate (Romano, 1988, p. 238) e un mainframe PDP 11/70, che erogava servizi specializzati, i servizi di rete della Rete Garr Sud,³ e gestiva in remoto circa 100 terminali. Ciò introduceva il concetto del lavoro a distanza, che cambiava l’organizzazione sociale con ricadute sulla qualità della vita dei lavoratori e sull’ambiente. Con *Tecnopolis-Csata Novus Ortus*, l’Università diventava soggetto centrale nel sistema di produzione della conoscenza e formazione del capitale umano del territorio meridionale, formando il personale dirigenziale delle nuove imprese. Il focus di Romano era la valorizzazione del “capitale umano”, arricchito dalla formazione specialistica.

Nel 1987, *Tecnopolis-Csata* si trasformò in consorzio misto pubblico-privato per operare sul territorio in osservanza della legge 46/82 sugli interventi per i settori dell’economia di rilevanza nazionale. Infine, nel 2008 la società fu modificata per dare vita a due entità: *InnovaPuglia*, società in house della Regione Puglia con la missione di progettare e gestire programmi ICT per l’amministrazione regionale e *Tecnopolis PST*, la società per la promozione, gestione e sviluppo del Parco Scientifico e Tecnologico, partecipata al 100% dall’Università degli Studi di Bari (Annicchiarico 2011).

³ Nel 1984 il Csata partecipò al progetto di Rete Universitaria Nazionale, che collegava tutte le università afferenti ai vari Consorzi di Calcolo: CILEA, CINECA, CSATA. Nel 1986 nacque il Gruppo per l’Armonizzazione delle Reti della Ricerca (GARR), costituito da 6 enti fondatori: CNR, INFN, ENEA, CILEA, CINECA, Tecnopolis Csata.

5. Conclusione

Nel 2005 Romano ricevette la medaglia d'oro del Presidente della Repubblica per i suoi meriti nel campo degli studi sulle innovazioni tecnologiche e per il rinnovamento della didattica con il computer. A lui fu riconosciuto il *genus loci* che dallo spirito imprenditoriale pugliese aveva tratto la vitalità per declinare le Leggi della Fisica e le teorie *schumpeteriane* dell'innovazione in nuove occasioni di crescita della conoscenza, individuando nello sviluppo del nucleare e delle tecnologie dell'informazione le peculiarità del potenziale decollo economico-sociale della Puglia (Amendola 1997, p. 337).

Bibliografia

- Amendola G. (1997). *1960-1980: gli anni della "Belle Epoque"*, in Tateo F. (a cura di), *Storia di Bari. Il Novecento*. Bari: Laterza, pp. 335-356.
- Annicchiarico A. (2011). "La storia di Tecnopolis" [online]. URL: <<https://www.innova.puglia.it/storia-tecnopolis>> [data di accesso: 25-11-2019].
- Armenise N., Ghidini B., Mongelli S., Romano A., Waloschek P., Laberrigue-Frolow J., Khanh Nguyen Hun, Ouannes C., Sene M., Vigneron L. (1965). " π - π interactions in $\pi^+p \rightarrow \pi\pi$ Reactions at 2.75 GeV/c". *Il Nuovo Cimento*, 37 (2), pp. 361-375.
- Campanile B. (2017). *La Fisica a Bari*, in Campanile B., De Frenza L. (a cura di), *...E pur si vuole! La Facoltà di Scienze di Bari. Origini, istituzione, sviluppi fino agli anni Settanta*. Bari: Edizioni Giuseppe Laterza.
- Cassata F. (2013). *L'Italia intelligente. Adriano Buzzati-Traverso e il Laboratorio internazionale di genetica e biofisica (1962-69)*. Roma: Donzelli.
- Colelli A., Lapomarda C. (2014). "Dipartimento Interateneo: mezzo secolo di Fisica. Campus in festa per i primi 50 anni del "Michelangelo Merlin"". *Scienza & Cultura*, 1, pp. 21-23.
- Del Prete P. (1963). "Relazione letta dal magnifico rettore prof. Pasquale Del Prete il 18 Novembre 1961 in occasione della solenne inaugurazione dell'anno accademico 1961-62", in *Annuario della Università degli Studi di Bari*, a.a. '62-63, pp. 7-15.
- Fiore V. (1961-62). "Mezzogiorno e Mediterraneo". *Civiltà degli Scambi*, 63-66, pp. 169-171.
- Galison P. (1992). *Fortran, Physics, and Human Nature*, in Nye M. J., Richards J. L., Stuewer R. H. (Eds.), *The Invention of Physical Science. Intersections of Mathematics, Theology and Natural Philosophy Since the Seventeenth Century*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 225-260.
- Ghidini B. (2019). *Storia della nascita della scuola di fisica barese*, in Campanile B., De Frenza L., Garuccio A. (a cura di), *Atti del XXXVII Convegno annuale SISFA* (Bari, 26-29 settembre 2017). Pavia: Pavia University Press, pp. 21-43.
- Giacomelli G. (2008). *Gianni Puppi e gli esperimenti in camere a bolle*, in S. Bergia, P. Capiluppi, S. Focardi, G. Giacomelli (a cura di), *In memoria di Giampietro Puppi* (1917-2006), in *Il Nuovo Saggiatore*, supplemento al n. 5-6(2007), pp. 29-31.

- Hsu R. C. (1994). *The MIT Encyclopedia of the Japanese Economy*. Cambridge (MA): MIT Press.
- Krige J. (1987). *The Development of Techniques for the Analysis of Track-Chamber Pictures at CERN*. Genève: CERN.
- Pirro F. (1984). “Nasce a Bari una ‘Tecnopolis’ per il futuro del Mezzogiorno”. *La Repubblica*, 27 luglio 1984, p. 33.
- Romano A. (1965). “Elettronica e Mezzogiorno. Prospettive di un centro di calcolo universitario”. *Politica e Mezzogiorno*, 4, pp. 439-443.
- Romano A. (1974). *Formazione di base e formazione professionale in Informatica*, in *Convegno AICA. (Milano, novembre 1974)*, pp. 1-32.
- Romano A. (1988). *Mezzogiorno 1992*. Milano: Franco Angeli.
- Un centro studi a Bari sulle tecnologie avanzate* (4 febbraio 1969). *La Gazzetta del Mezzogiorno*, p. 4.

Fonti di archivio

Bari:

- Archivio generale di Ateneo Bari (Agab), *Personale*, Fascicoli del personale, A. Romano, n. 6105.
- Agab, *Personale*, Fascicoli del personale, M. Merlin, n. 3965.
- Agab, *Verbali del Consiglio di Facoltà di Scienze matematiche, fisiche e naturali (Smfn)*, seduta del 6 febbraio 1969.
- Agab, *Verbali del Consiglio di Facoltà di Smfn*, seduta del 4 marzo 1969.
- Agab, *Personale*, Fascicoli del personale, M. Merlin, n. 3965, Lettera del prof. Michelangelo Merlin al decano, prof. Mario Manarini, del 27 maggio 1969.
- Agab, *Verbali del Consiglio di Facoltà di Smfn*, seduta 30 aprile 1975.
- Agab, Aldo Romano, *Scienza tecnologia e cultura di fronte alla crisi* (dattiloscritto, 1984, pp. 1-36).
- Agab, *Personale*, Fascicoli del personale, Aldo Romano, n. 6105, “Ordinanza della Corte di Appello di Bari”, 21-3-1985.
- Agab, *Fondo fotografico Ficarelli*, Bari, 19-9-1969

Torino:

- RAI, *Teche*, trasmissione “Sapere Informatica”, V puntata: “Scuola e Sanità”, 19-4-1971, “L’Informatica” a cura di Giuseppe Dicorato, realizzazione di Eugenio Giacobino.

Small fluctuations of the velocity of light: a guiding principle from Michelson-Morley to modern optical interferometry

Maurizio Consoli – INFN, Sezione di Catania i – maurizio.consoli@ct.infn.it

Abstract: In all ‘ether-drift’ experiments, from Michelson-Morley to modern measurements with optical resonators, there are irregular residuals. These are always interpreted as mere instrumental artifacts but, in principle, could also indicate that, in the various interferometers, there are small fluctuations of the velocity of light depending on the existence of some fundamental reference frame. To explore objectively this other interpretation one should control the two main ingredients to identify an expected signal: its typical magnitude and its time modulations. To this end, I will first briefly resume the theoretical scheme illustrated in my previous 2013 SISFA contribution and then present i) a re-analysis of the Piccard-Stahel 1928 experiment ii) a re-analysis of the standard thermal interpretation of the observed residuals iii) a brief discussion of the implications for modern optical interferometry. By comparing with all existing data, I confirm that in our scheme one finds surprising correlations between optical measurements in laboratory and direct observations of the Cosmic Microwave Background with satellites in space. These correlations, which traditionally are considered indicative of a preferred reference frame, should be checked by other groups with different numerical and statistical techniques. The importance of the issue, just think to the implications for the interpretation of non-locality in the quantum theory, would also deserve new experimental tests and substantial improvements in the data analysis.

References:

- M. Consoli and A. Pluchino, EPJ Plus 133, 295 (2018); arXiv:1801.03775 [physics].
M. Consoli and A. Pluchino, Michelson-Morley Experiments: an Enigma for Physics and the History of Science, World Scientific 2019, ISBN 978-981-3278-18-9.

Relativity at first order and gravitational deflection of light - An interplay between history and didactics

Christian Bracco – SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, LNE, Paris – Christian.Bracco@obspm.fr
 Jean-Pierre Provost – 720 route de la Turbie, 06360 Eze, France – Provost@unice.fr

Abstract: Einstein’s failure to derive in his Zurich notebook the equations of general relativity in vacuum was, as well documented, mainly due to his 1912 metric which ignored the influence of gravitation on its spatial part, even at first order. We argue that a complete application of the equivalence principle using relativity at first order in V/c would have enabled him to obtain the correct deflection of light (as well as probably Mercury’s perihelion advance) as soon as 1911. The key point is that the transformations $x'=x-Vt$, $t'=t-Vx/c^2$ (introduced by Lorentz in 1895) allow to discuss not only time issues (as Einstein did in 1907 and 1911) but also issues concerning space; in particular, they imply not only a “time dilation” $T'=T(1-Vv/c^2)$ for moving clocks but also a “length contraction” $L'=L(1+Vv/c^2)$ for moving rods, two inverse relations leading simply to the correct metric at first order. More generally, these transformations present today a great pedagogical interest for the teaching of special relativity at an elementary level.

Keywords: Einstein, Light deflection, Lorentz transformations, Equivalence Principle.

1. 1895 Lorentz Transformations and relativity before 1905

In 1818, Fresnel interpreted Arago’s observations of stars through a prism by: “The motion of our globe must have no observable influence on apparent reflexion”. In order to explain it, he calculated the requisite velocity of light in the prism with respect to the ether $v = c/n + V(1 - 1/n^2)$ (Fresnel 1818). Fresnel’s issue concerning geometrical optics has become Lorentz’ one concerning electromagnetism after Maxwell theory of light. In 1895 Lorentz introduced his theory of corresponding states for the study of moving dielectrics (Lorentz 1895) to which he addressed already in 1892. One of his major successes was the explanation of Fresnel’s ether drag formula from Maxwell equations and the electromagnetic (e.m) force on microscopic charges. The originality of his 1895 approach lied in a change of variables

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{V}t, \quad t' = t - \vec{V} \cdot \vec{r}/c^2 \quad (V \ll c) \quad (1)$$

and of fields $\vec{E}' = \vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}$, $\vec{B}' = \vec{B} - \vec{V} \times \vec{E}/c^2$, bringing the study of charges inside a dielectric in uniform motion at global velocity \vec{V} to that of charges in a dielectric at rest. The change of spatial variables was natural since it amounts to following the dielectric (frame R') in his translation in the ether frame R . The introduction of t' was new and its necessity probably was a surprise for Lorentz. This may be a reason why he spoke of t' as a “fictitious variable” (the “local time”)¹ although he did not hesitate to explain Fresnel’s formula as well as Doppler and aberration effects by simply rewriting the phase $\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}$ of a plane wave with the prime variables. Today, we know, after (Poincaré 1906), that eqs. (1) are the infinitesimal version of the 1905 transformations named by him “Lorentz transformations” (L.T) which, besides rotations, leave invariant the equations of e.m and Lorentz 1904 law of dynamics $\vec{F} = d\vec{p}/dt$ with $\vec{p} = m\gamma(v)\vec{v}$ ($\gamma(v) = \sqrt{1 - v^2/c^2}$). This allows us to speak of “relativity at first order” (Provost, Bracco 2016) for the physical results involving eqs. (1). Einstein himself indirectly testifies to this relativity in his June 1905 paper when, after claiming that “the same laws of electrodynamics and optics will be valid for all coordinate systems in which the equations of Mechanics hold”, he immediately adds “as has already been shown for quantities of first order” (Einstein 1905).

Lorentz’ work has been largely referred to, and extended, in the e.m community before 1905. As soon as 1898, in a paper which has interested Einstein in September 1899 (Bracco 2017), Wien (1898) recalled the expression of t' and no less than 13 experiments (with positive or negative results) agreeing with it. The same year, Liénard (1898) presented Lorentz’ work with complements concerning the transformations of charge densities, of e.m. volumic forces and of Maxwell tensor. In his well-known treatise *Électricité et Optique* following his 1899 Sorbonne lectures, Poincaré (1901) expressed in Chap. VI as a theorem the invariance of Maxwell eqs. for dielectrics with use of t' , \vec{r}' , and conjectured its validity at any order; in Chap. VII, he derived Liénard’s results in relation to their possible influence on “observable mechanical effects”. Independently in a paper intended to Lorentz Festschrift (Poincaré 1900), he used \vec{r}' and t' as coordinates of events in R' in order to obtain the change $L' = L(1 + V/c)$ of the length of a wave packet emitted by a resonator slowly moving in the same direction. His goal was to deduce from the fields transformation the change $E'_\gamma = E_\gamma(1 - V/c)$ of the wave packet energy E_γ and that of momentum $p_\gamma = E_\gamma/c$, and to discuss the recoils of the resonator in frames R and R' . This paper, quoted in (Einstein 1906), contained implicitly the variation of the resonator mass $\Delta m = -E_\gamma/c^2$.

As we now show, relativity at first order is also the one used in fact in Einstein (1907; 1911) applications of the “Equivalence Principle” (E.P) (section 2), and his “bumpy road” to General Relativity (Janssen et al. 2007) is in large part due to his ignorance that

¹ A more serious reason is his attachment to the ether at that time. Poincaré (1900) presents t' as the result of the synchronization of watches in R' and in 1902 he quotes local time “Lorentz’ ingenious invention” in his letter to the Nobel committee (Poincaré 1902). In his treatise, Abraham (1905) deduces t' from $x' = x - Vt$ and the requirement that $x = ct$ implies $x' = ct'$.

relativity at first order allows to address length issues (section 3). In conclusion, we briefly discuss the interest of this relativity for present teaching.

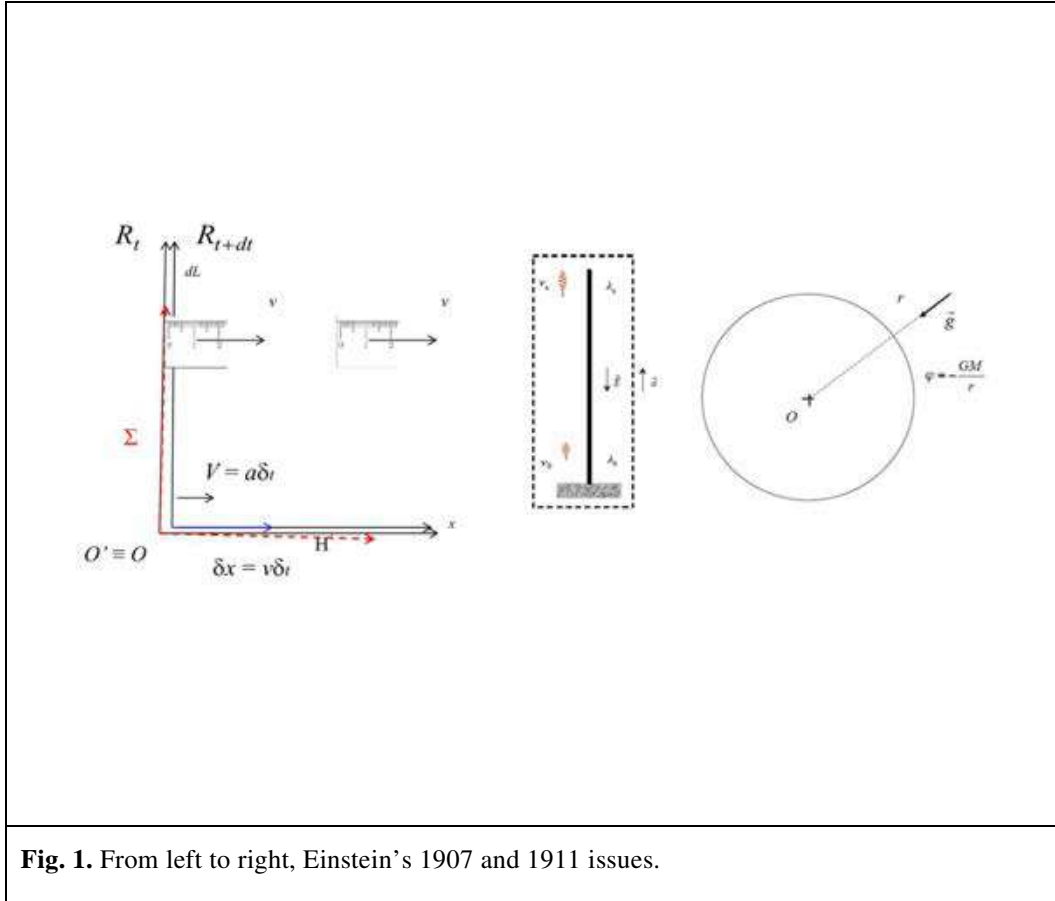
2. Einstein's 1907 and 1911 applications of the Equivalence Principle and light deflection; the 1912 incomplete metric

In chap. V *Principle of relativity and gravitation* of his review article on relativity, Einstein (1907) assumes “the complete physical equivalence of a gravitational field and the corresponding acceleration of the reference system”. Assimilating an accelerated frame Σ to a continuous succession of instantaneous inertial frames R_t , he considers two identical clocks of Σ , one located at origin O ($x = 0$) with proper time t , and one at H ($x = h$) on the axis x of the acceleration. Being equally accelerated, the clocks walk at the same pace in any inertial reference frame, e.g. δt in R_t . However, the simultaneity being not the same in R_t and in $R_{t+\delta t}$ which moves at velocity $V = a\delta t$ with respect to R_t , when the clock at H indicates δt , the corresponding one in $R_{t+\delta t}$ indicates (cf. eqs. (1)) $\delta t' = \delta t - Vh/c^2 = \delta t(1 - ah/c^2) \neq \delta t$. From this apparent contradiction, Einstein deduces the relation between the proper times of the clocks at H and O : $\tau_H = \tau_O(1 + ah/c^2)$. Using the E.P. ($a = g$) and noting that gh is the gravitational potential difference between H and O , he extends this relation at first order in the potential φ to $\tau = t(1 + \varphi/c^2)$, t being the proper time at infinity (where $\varphi = 0$). As well known, he predicts from this relation the gravitational redshift. In the following of the paper, the new writing of Maxwell eqs. in Σ , leads him to a spatially dependent light velocity (measured with respect to time t): $c(\vec{r}) = c(1 + \varphi(\vec{r})/c^2)$ from which he quotes the possibility of an (unobservable) gravitational deflection of light by the Earth.

Einstein (1911) comes back to his 1907 use of the E.P, firstly because his “former treatment of the subject does not satisfy” him, secondly because light deflection by the sun “amounts almost one second of arc” and could be measured. He thinks of a source at the height h sending a light signal of frequency ν_h and energy E_h , towards a receptor on the ground. At reception after the travel time h/c , everything occurs as if the receptor was in motion with an upwards velocity $V = gh/c$. The received energy is $E_0 = E_h(1 + V/c)$ (first order transformation of the energy of a “light complex”) and the frequency is $\nu_0 = \nu_h(1 + V/c)$ (Doppler effect)². Einstein then interprets the difference between ν_0 and ν_h (a paradoxical one since the field is stationary with respect to Newtonian time t) as being due to a difference in the proper times of (identical) clocks at $z = 0$ and $z = h$. He deduces again the 1907 relation $\tau = t(1 + \varphi/c^2)$. Considering as in 1907

² Clearly Einstein's reasoning on energy, which endows the light complex with the potential energy ghE_h/c^2 , is related to his interest in quanta. On 13th May 1911 (Klein *et al.*, 1995, Doc. 267 p. 187) Einstein informs Michele Besso that, concerning light quanta, he “rummage[s] through the consequences as carefully as possible so as to learn about the range of applicability of this conception”. On June 9 (Klein *et al.* 1995, Doc. 269 p. 190), Ernest Solvay invites him to speak on “Specific heat and the theory of quanta” leaving to Sommerfeld “The application of the theory of quanta to a series of problems in physics” and telling him that he intends himself to speak of energy and gravitation. No surprise that Einstein's paper is presented on June 21 and begins with a discussion on energy!

that lengths are not affected by acceleration, he recovers the light velocity $c(\vec{r}) = c(1 + \varphi(\vec{r})/c^2)$ and uses Huygens principle to obtain the angular deviation $\delta\theta = 2GM/rc^2$ (half of the correct value) for light passing the sun at the distance r .



As well as in 1907 and 1911, Einstein (1912) does not consider any issue for lengths. Finally, he introduces in March

$$ds^2 = (1 + 2\varphi/c^2)dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)/c^2$$

in the Least Action Principle describing free-fall. The metric ds^2 with $\varphi = -GM/r$ for the potential due to a spherical mass M at origin, will be in large part responsible for his “bumpy road” (Janssen 2005; Provost, Bracco 2014) to GR, before his explanation in November 1915 of Mercury perihelion advance and light deflection.

3. Relativity at first order and the tests of GR

3.1. The issues of lengths and wavelengths forgotten by Einstein

Let us note first that a slice of length λ of a plane wave (phase amplitude 2π) propagating along the x -axis lies in the region $0 < x - ct < \lambda$, which is mathematically similar to that $0 < x - vt < l$ occupied by a rule of apparent length l moving along this axis at velocity v . A simple calculation shows that this region reads in R' (Provost and Bracco 2016): $0 < x' - v't' < l'$ with $l' = (1 + vV/c^2)$ and $v' = v - V(1 - v^2/c^2)$ (of which Fresnel's formula is a particular case). For $v = c$ and $l = \lambda$, one recovers Doppler effect, which allows to consider the wavelength as a standard length moving at velocity c .³ As a consequence, Einstein should have written in 1911 $\lambda_0 = \lambda_h(1 - gh/c)$ for wavelengths and (with the same reasoning as for frequencies) should have obtained the proper lengths in the direction of the acceleration $l_h = l_0(1 - \varphi/c^2)$.

Another derivation, based on Einstein's 1907 view of an accelerated system as a succession of inertial frames, consists in considering a rule of infinitesimal length dL in uniform motion at velocity v in R_t , which at time t passes through O and which at time $t + \delta t$ passes through the point H of abscissa $\delta x = v\delta t$. Its length measured when it passes at H is then in $R_{t+\delta t}$: $dL' = dL(1 + vV/c^2) = dL(1 + va\delta t/c^2) = dL(1 + a\delta x/c^2)$. Once more one deduces the space-dependence of proper lengths in Σ : $dL_H = dL_O(1 - a\delta x/c^2)$.

3.2. Consequences for the metric: light deflection and Mercury perihelion shift

The above reasoning either on wavelengths or on moving rules, leads to the metric, in presence of the radial gravitational field of a spherical mass M :

$$ds^2 = (1 - 2GM/rc^2)dt^2 - [(1 + 2GM/rc^2)dr^2 + r^2d\Omega^2]/c^2.$$

Remarkably, this metric is Schwarzschild's one at first order in the gravitational potential. With it, Einstein should have obtained the correct value of light deflection as well as Mercury perihelion advance (of which he has been thinking from 1907 with his friend Michele Besso).⁴ In addition, it satisfies the equation $R_{\mu\nu} = 0$ at first order outside matter, an equation he has probably discussed by the end of 1912 with his friend Marcel Grossmann, but which was left aside because of its incompatibility with the incomplete 1912 metric.

³ Similarly the relation $T' = (1 - vV/c^2)T$ between the time intervals in R' and R corresponding to some proper interval of a clock moving at velocity v in R , is obtained from $T' = T - V\Delta x/c^2$ (eqs. (1)) with $\Delta x = vT$.

⁴ In all rigor, the time-part of the metric is uniquely determined by the E.P at first order but the calculation of Mercury's perihelion involves the knowledge that second order terms are not present in it (Provost, Bracco 2018).

4. Conclusion

In present teaching, special relativity is taught through the exact L.T, which prevents from discussing it in detail before university. As we have seen, 1895 L.T on the contrary are simple to introduce as a correction to Galileo's ones (note 1). In addition, they are deeply connected to historical relativistic issues (Fresnel 1818; Lorentz 1895; Poincaré 1900; Einstein 1907 and 1911) concerning many domains of physics: geometrical optics, e.m., mechanics, gravitation and the E.P, and even the tests of general relativity. The interested reader can find in (Provost and Bracco 2016) suggestions for the derivation from eqs. (1) of relativistic kinematics and dynamics, the key point being the search for invariants.⁵

References

- Abraham M. (1905). *Elektromagnetische Theorie der Strahlung*. Leipzig: Teubner.
- Bracco C. (2018). *Quando Albert diventò Einstein*. Pisa: Pisa University Press.
- Einstein A. (1905). "On the electrodynamics of moving bodies", in Stachel J. et al., *Collected Papers of Albert Einstein (CPAE), vol. 2, Writings 1902-1909*. Princeton, NJ: Princeton University Press, Doc. 23, pp. 140-171. URL: <http://einsteinpapers.press.princeton.edu/> [access date: 02/07/2020].
- Einstein A. (1906). "The principle of conservation of motion of the center of gravity and the inertia of energy", in *CPAE vol. 2, Doc. 35*, pp. 200-206.
- Einstein A. (1907). "On the relativity principle and the conclusions drawn from it", in *(CPAE), vol. 2, Doc. 47*, pp. 432-88.
- Einstein A. (1911). "On the influence of gravitation on the propagation of light", in Klein M. J. et al., *CPAE, vol. 3, Writings 1909-1911*. Princeton, NJ: Princeton University Press, Doc. 23, pp. 485-97.
- Einstein A. (1912). "On the theory of the static gravitational field and Note added in proof", in Klein M. J. et al., *CPAE vol. 4, 1912-1914*. Princeton, NJ: Princeton University Press, Doc. 4, pp. 107-120.
- Fresnel A. (1818). *Œuvres Complètes*, vol. 2 (1868). Paris: Imprimerie impériale, pp. 627-636.
- Janssen M. (2005). "Of pots and holes: Einstein's bumpy road to General relativity". *Annalen der Physik*, 14, Supplement, pp. 58-85.
- Liénard A. (1898). "La théorie de Lorentz et celle de Larmor". *Éclairage électrique*, 16, pp. 360-365.
- Klein M.J. et al. (1995). *CPAE vol. 5, Correspondance, 1902-1914*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

⁵ For example (cf. section 3), the relations $l' = (1 + vV/c^2)l$ and $(1 - v'^2/c^2) = (1 - v^2/c^2)(1 + 2vV/c^2)$ (obtained from $v' = v - V(1 - v^2/c^2)$ and describing the gap between v and c), immediately lead to the invariance of $l/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, equal to l_0 in the proper frame of the rule where $v = 0$ (length contraction). Similarly, the invariance of $(x - vt)/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ implies L.T for the x -coordinate of an event.

- Lorentz H.A. (1895). “Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern”, in *Collected Papers*, 5. The Hague: Nijhof, pp. 1-137.
- Poincaré H. (1900). “La théorie de Lorentz et le principe de réaction”. *Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, 5, pp. 252-278.
- Poincaré H. (1901). *Électricité et Optique*. Paris: Carré et Naud.
- Poincaré H. et al. (1902). “Aux membres du comité Nobel”. *Archives de l'académie royale des sciences de Suède*, in Boudenot J. C., Samueli J. (2015), *Henri Poincaré physicien*. Paris: Ellipses Poche.
- Poincaré H. (1906). “Sur la dynamique de l'électron”. *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo*, 26, pp. 129-176.
- Provost J.-P., Bracco C. (2014). “Une brève histoire du tenseur énergie-impulsion:1900-1915”, in Bounames A., Makhlof A., *Actes de l'école de physique théorique de Jijel 2009* (Jijel, Algeria, 26 Sept. - 3 Oct. 2009), 79, pp. 417-448.
- Provost J.-P., Bracco C. (2016). “The 1895 Lorentz transformations: historical issues and present teaching”. *European Journal of Physics*, 37/4 (Highlights 2016).
- Provost J.-P., Bracco C. (2018). “1895 Lorentz transformations, Einstein principle of equivalence and the perihelion advance of Mercury”. *European Journal of physics*, 39/6.
- Wien W. (1898). “Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen”. *Annalen der Physik und Chemie*, 65, Beilage i-xvii.

Joseph Weber e i primi esperimenti sulle onde gravitazionali

Laura Franchini – Associazione Amici di Città della Scienza, Napoli
crateri48@gmail.com

Abstract: We describe the scientific path of Joseph Weber, a lieutenant commander in the US Navy who, after surviving Pearl Harbor, studied electronics at the Naval Postgraduate School from 1943 to 1945. From 1945 to 1948, he was head of the electronic countermeasures for the Navy's Bureau of Ships, in Washington DC, and in 1948 he resigned from the Navy to become a professor of Engineering at the University of Maryland. Later on, he earned a PhD on microwave physics, with a thesis on Microwave Technique in Chemical Kinetics. During the 50s Weber's works on masers and lasers were highly cited and he became an important expert in the field. At the beginning of the 60s he once more changed his interest and started to study the General Relativity. In 1969 he proposed an experiment to detect the gravitational waves: a suspended aluminum bar, when hit by a gravitational wave, would enter into resonance with it, much in the same way as a tuning fork does with the sounds. May be that Weber never actually detected any gravitational waves, but in the following years similar experiments were started in all over the world. The recent results of the LIGO and VIRGO show how important was to start the search for the gravitational waves detection. This historical reconstruction could be useful for teaching modern physics.

Keywords: Gravitational waves, Weber bar, Teaching modern physics.

1. Introduzione

Le recenti rilevazioni di segnali di onde gravitazionali, effettuate contemporaneamente dagli interferometri LIGO e VIRGO, saranno molto importanti nella storia della scienza. Infatti, se da un lato sono la conferma della teoria, dall'altro aprono le porte di una nuova astronomia, basata non più solo su osservazioni fatte con telescopi che rilevano segnali elettromagnetici provenienti dal cosmo, ma sull'ascolto dell'universo attraverso le vibrazioni dello spazio-tempo: quelle onde gravitazionali che nel 1915 Einstein aveva calcolato essere soluzioni delle sue equazioni nell'ipotesi di campo debole.

Dopo circa 50 anni, nel 1969, Joseph Weber ideò e realizzò esperimenti per misurare onde gravitazionali. Descriveremo il suo complesso percorso scientifico, costellato da risultati importanti in diversi ambiti scientifici.

2. Weber: dai radar alle microonde

La formazione scientifica di Joseph Weber fu influenzata dagli anni che trascorse in gioventù frequentando la USNA, l'Accademia della Marina Americana, dove era stato segnalato per la sua bravura già prima di raggiungere l'età minima consentita per l'iscrizione, e dove poi conseguì nel 1940 il diploma. Diventò così un ufficiale di Marina con il grado di maggiore, *lieutenant commander*, un ufficiale cui si potevano affidare diversi incarichi. Fu imbarcato sulla portaerei Lexington che, per puro caso, scampò al disastro di Pearl Harbor, e si trovava sul ponte quando essa fu affondata nella battaglia del Mar dei Coralli nel maggio del 1942. Weber raccontava che gli era stato affidato il compito di trovare la migliore spiaggia dove potessero sbarcare in Sicilia, nel luglio del 1943, il generale di brigata Theodore Roosevelt Jr e 1800 rangers. Un incarico successivo fu di guidare un sottomarino dotato di un'attrezzatura di radar non standard, ma che imparò a gestire. Stava diventando un esperto cacciatore di onde.

Dopo avere partecipato al primo sbarco in Sicilia, ritornò negli Stati Uniti e dal 1943 al 1945 studiò Elettronica alla Naval Postgraduate School. Grazie alle sue notevoli competenze di elettronica e la sua esperienza con i radar, dal 1945 al 1948 ebbe l'incarico di sviluppare contromisure elettroniche per le navi. Questa attività consisteva nel costruire il migliore apparato elettronico per catturare segnali o, viceversa, per emettere segnali trappola e realizzare amplificatori con il più basso rumore di fondo possibile, in modo da rendere molto efficienti i radar.

Nonostante il prestigioso ruolo che ormai aveva assunto, Weber lasciò la Marina nel 1948, dopo avere avuto un incarico d'insegnamento di Elettronica presso l'Università del Maryland: poteva finalmente seguire la sua grande passione, che era lo studio della fisica. L'incarico era vincolato alla promessa di prendere in breve tempo un PhD. A questo scopo, avendo tanta esperienza e cultura nel campo delle microonde, chiese a George Gamow se potesse indicargli un tema di studio sulle microonde per la sua tesi, ma Gamow si rifiutò. Il suo gruppo, cui appartenevano i fisici Ralph Alpher e Robert Herman, a quell'epoca si occupava di cosmologia e aveva ipotizzato l'esistenza di una radiazione di fondo, *Cosmic microwave background radiation* (CMBR), residuo del big bang. La CMBR sarà poi fortuitamente rivelata da Arno Penzias e Robert Wilson nel 1964, i quali per questo furono insigniti nel 1978 del Nobel. Una risposta diversa di Gamow avrebbe cambiato l'esistenza di Weber, il quale in quel periodo, mentre era professore nel Maryland, studiava come *graduate student* all'Università Cattolica e continuava ad essere un consulente per i laboratori della Marina.

3. Maser, laser e Nobel mancati

Frequentando per il PhD un corso di spettroscopia delle microonde, Weber studiò i coefficienti di emissione spontanea A e stimolata B di Einstein e intuì che, se in una popolazione di molecole alcune sono in uno stato più alto di altre, tale situazione può essere usata per costruire un amplificatore. Dopo aver conseguito il PhD all'Università Cattolica, nel 1951, con una tesi su *Microwave technique in Chemical Kinetics*, nel marzo dello stesso anno costruì nel suo laboratorio un maser (*Microwave amplification by stimulated emission of*

radiation) ottenuto da azoto molecolare, verificando che funzionava come uno spettrometro ad alta risoluzione e permetteva di emettere radiazione coerente. Cominciò a tenere seminari a Princeton e nell'area di Washington sui suoi risultati riguardo alle emissioni coerenti di microonde. Ad Ottawa nel 1952, durante una conferenza sul tubo elettronico, per la prima volta in contesto internazionale, Weber parlò di «*amplification of microwave radiation by substance not in thermal equilibrium*» (amplificazione di radiazione di microonde con una sostanza non in equilibrio termico). Qualche giorno dopo, Charles Townes, che aveva ascoltato il seminario di Weber, chiese un reprint del lavoro per suo allievo che stava studiando quell'argomento e in seguito costruì il suo prototipo di maser. Nel 1964, Townes, Nicolay Basov e Aleksandr Prokhorov riceveranno il Nobel, per «un lavoro fondamentale nel campo dell'elettronica quantistica, che ha portato alla costruzione di oscillatori e amplificatori basati sui principi dei maser e laser». Weber era stato nominato al Nobel nel 1962 e nel 1963 per i suoi contributi sul laser.

4. La ricerca delle onde gravitazionali

Nel 1955, Weber decise di spendere il suo primo anno di sabbatico a Princeton, dove cominciò ad occuparsi di relatività generale, sotto la guida di Robert Oppenheimer e Arcibald Wheeler. Le onde gravitazionali erano in quel momento un tema discusso; sulla loro esistenza lo stesso Einstein aveva nutrito dubbi, pur avendole dedotte dalla sua teoria.

Nel 1955, a Berna, durante il primo congresso internazionale su Relatività generale e Gravitazione – ribattezzato in seguito GR0 – si rinfocolò il dibattito sulla questione se le onde gravitazionali fossero solo entità matematiche, cioè soluzioni delle equazioni Einstein in particolari sistemi di coordinate, o se avessero una loro realtà fisica rivelabile con le misure.

Durante la conferenza GR1 a Chapel Hill (1957), Richard Feynman usò lo *sticky bead argument* per dimostrare che le onde gravitazionali possono essere rivelate, cioè il seguente esperimento mentale: prendiamo un'asta sulla quale possono scivolare delle palline come in un pallottoliere, il passaggio di un'onda gravitazionale fa oscillare le palline e riscalda il sistema per l'attrito. Weber partecipa a questo dibattito pubblicando insieme a Wheeler (1957) un articolo in cui pur appoggiando l'ipotesi che le soluzioni ondulatorie abbiano una realtà fisica, sostengono che è impossibile realizzare un esperimento per misurarne l'effetto, a causa della debolezza della loro interazione con la materia. Ma un cacciatore di onde come Weber, che da giovane era stato persino radioamatore, non poteva fare a meno di cercare il modo d' intercettare anche le onde gravitazionali. Già nel 1960 uscì un suo primo lavoro in cui proponeva come rivelare onde gravitazionali incidenti sulla Terra o dal Sole o dallo spazio esterno e come eventualmente generarle in laboratorio.

5. Il principio di funzionamento della barra di Weber e i suoi primi esperimenti

Forse fu lo *sticky bead argument* a suggerire a Weber l'idea di costruire la sua ingegnosa macchina per rivelare le onde gravitazionali. Se le onde gravitazionali, che attraversano la materia senza esserne assorbite, potrebbero, in linea di principio, far oscillare le palline di un pallottoliere, allora potrebbero mettere in oscillazione anche gli atomi del reticolo cristallino di una barra metallica. E tale vibrazione, captata da cristalli piezoelettrici posti nella parte centrale della superficie esterna del cilindro, può essere trasmessa ad un amplificatore (Fig.1).

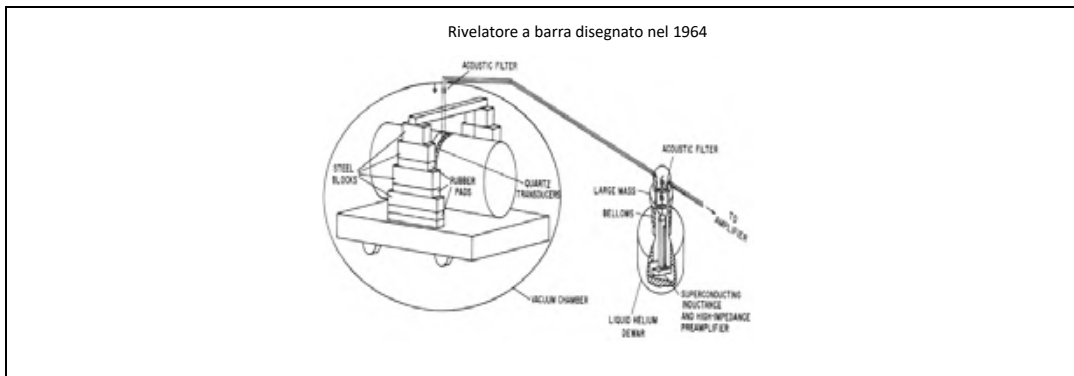


Fig. 1. Elementi di un rivelatore a barra.

La prima barra che Weber costruì era lunga poco più di 1 metro e del peso di 3000 libbre. Negli anni ne costruì molte di varie forme e dimensioni, cercando sempre di migliorare l'isolamento dell'apparato da tutti i segnali, acustici, sismici o elettromagnetici, che non fossero onde gravitazionali. Inoltre, si cercavano materiali che avessero a varie temperature alti fattori Q di risposta alla risonanza e si cercava di individuare il migliore adesivo con cui fare aderire i cristalli alla barra.



Fig. 2. Registratore tipo Easterline-Angus.

Si operava con più antenne poste nel campus del Maryland, in un edificio chiamato Gravity Building, sperando di captare segnali che fossero in coincidenza. I segnali erano trasmessi per via telefonica e grazie ad un sistema di registrazione a microonde venivano impressi su strisce di carta di registratori tipo Easterline-Angus (Fig. 2) con inchiostro rosso: si contava quanti segnali erano registrati entro una certa soglia. La prima barra fu progettata in modo da essere risonante a 1000 Hz, le ultime a 1661 Hz, che è l'intervallo di frequenze atteso per le radiazioni emesse durante un collasso gravitazionale.

Il primo annuncio di evidenza ci fu nel 1969, a seguito dei risultati di misure fatte da una barra nel Maryland e da un'altra a mille chilometri di distanza, a Chicago. Scrisse Weber:

Sono state osservate coincidenze su rivelatori di radiazione gravitazionale su una linea di base di 1000 km all'Argonne National Laboratory e all'Università del Maryland. La probabilità che tutte queste coincidenze fossero accidentali è incredibilmente piccola. Esperimenti implicano che effetti elettromagnetici e sismici possono essere scartati con buona approssimazione. Questi dati sono consistenti con la conclusione che i rivelatori sono stati eccitati da radiazione gravitazionale.

L'annuncio di Weber e la successiva scoperta nel 1974, da parte di Russell A. Hulse e Joseph H. Taylor Jr, della prima pulsar binaria, il cui periodo orbitale doveva gradualmente diminuire nel tempo – secondo le previsioni della relatività generale – a causa dell'emissione di radiazione gravitazionale, diedero inizio, negli anni Settanta, alla corsa alla costruzione di nuovi rivelatori a barra.

In pochi anni nacquero gruppi di ricerca a Stanford, Saskatchewan, Glasgow, Rochester, alla Louisiana State University e all'Università di Mosca, al Max Planck Institute di Monaco, ai Bell Telephone Labs di Caltech, all'Università di Tokyo, all'ESRIN (European Space Research Institute) di Frascati e a Roma sotto l'egida di Edoardo Amaldi e Guido Pizzella. Vennero costruiti rivelatori a barra risonante e organizzati i primi esperimenti in coincidenza (Frascati-Monaco). Poiché nessuno riportò dati coerenti con gli esperimenti in Maryland, a un certo punto fu chiaro che i segnali osservati da Weber erano dovuti a fenomeni di tipo diverso (onde sismiche, o raggi cosmici), e non a onde gravitazionali! Ne nacquero accesi dibattiti e dal 1971 i finanziamenti per gli esperimenti di Weber diminuirono drasticamente.

Intanto si stava facendo largo un'altra linea di pensiero riguardo alla rivelazione delle onde gravitazionali con interferometri laser: nel 1970, Weiss aveva pubblicato un lavoro in cui illustrava la fattibilità di questo progetto. Mentre in molte parti del mondo continuava la ricerca con barre risonanti più sofisticate e portate a temperature criogeniche, nel 1990 iniziò la costruzione di due interferometri LIGO (Laser interferometer gravitational wave observatory), uno ad Hanford (Washington) e un altro a Livingston (Louisiana).

Weber continuò a dare contributi alla ricerca scientifica, e fece rilevazioni con le barre fino al 2000, anno della sua morte.

6. Cosa rimane oggi del lavoro di Weber

Nel 2019, a cinquant'anni dal primo annuncio di evidenza, l'Università del Maryland ha creato nel suo campus uno spazio in cui sono esposte diverse barre di Weber, illustrate dalla seguente didascalia:

Questi cilindri di alluminio sono i nuclei dei rivelatori a barre di onde gravitazionali inventati, costruiti e messi in opera dal professore di Fisica Joseph Weber (1919-2000) sin dagli inizi degli anni Sessanta e per tutta la sua carriera. Ogni barra era sospesa orizzontalmente ad un cavo fissato al centro in modo che i suoi estremi fossero liberi di vibrare. Sensori elettromeccanici erano sospesi alle barre per cogliere le deboli oscillazioni che sarebbero state indotte dal passaggio di un'onda gravitazionale emessa da oggetti astrofisici nell'universo, come previsto dalla teoria della relatività generale di Einstein. Weber aveva installato i suoi rivelatori in vari punti del campus del Maryland e anche altrove. I suoi sforzi visionari hanno portato alla nascita di un nuovo campo di ricerca che alla fine si è concretizzato con la rilevazione diretta delle onde gravitazionali mediante il *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory* (LIGO), nel 2015. I primi lavori di Weber sull'amplificazione delle microonde contribuirono anche allo sviluppo del laser.



Fig. 3. Lo spazio dedicato a Weber nel campus del Maryland.

Quando chiesero alla moglie di Weber se pensasse che suo marito avesse veramente rilevato le onde gravitazionali, la professoressa Virginia Trimble rispose «Non so»; riteneva tuttavia che la perdita di supporto a Weber da parte della comunità scientifica non solo avesse penalizzato lui, ma che potesse anche avere rallentato lo sviluppo del campo da cui egli era partito. E aggiunse:

Se ci fossero state due tecnologie che procedevano parallelamente stimolandosi reciprocamente, come collaboratori e non come competitori, si sarebbe arrivati più presto alle osservazioni.

Bibliografia

- Alpher V. (2014). “Ralph Alpher, George Antonovich Gamow, and the Prediction of the Cosmic Microwave Background Radiation”. *Asian Journal of Physics*, 1&2, pp. 17-26.
- La Rana A., Milano L. (2017). *The early history of gravitational wave detection in Italy: from the first resonant bars to the beginning of the Virgo collaboration*, in Esposito S. (a cura di), *Società Italiana degli Storici della Fisica e dell’Astronomia - Atti del XXXVI Convegno annuale* (Napoli 2016). Pavia: Pavia University Press, pp. 185-198.
- Ricci F. (2018). *Le onde gravitazionali. Lezioni di Fisica - Iniziativa del Corriere della Sera*. Trebaseleghe (PD): Grafica veneta.
- Trimble V. (2017), “Wired by Weber. The story of the first searcher and searches for gravitational waves”. *The European Physical Journal – H*, 42, pp. 261-291.
- Weber J. (1960). “Detection and Generation of Gravitational Waves”. *Physical Review*, 117 (1), pp. 306-313.
- Weber J. (1969). “Evidence for Discovery of Gravitational Waves”. *Physical Review Letters*, 22 (24), pp. 1320-1324.
- Weber J., Wheeler J. (1957). “Reality of the Cylindrical Gravitation Waves of Einstein and Rosen”. *Reviews of Modern Physics*, 29, pp. 509-515.

Einstein's Mantle, Bohr's Shadow: Glimpses from Wheeler's Relativity Notebook III

Stefano Furlan – MPIWG, Berlin; Université de Genève
sfurlan@mpiwg-berlin.mpg.de

Abstract: A new spark of interest in Einstein's theory of gravitation, from the 50s on, led to what is known as the *Renaissance* of General Relativity, in which J.A. Wheeler (1911-2008) played a key role both in dusting off Einstein's legacy and in building upon it his own program of research. Such an operation is well documented, in Wheeler's archives, by the so-called *Relativity Notebooks*, which contain ideas and projects for an ambitious picture of all physics that, even if they were not a direct success, provided fruitful guidance to Wheeler's Princeton school and to his own later developments. Particular emphasis will be given here to Relativity Notebook III, which covers the period of Einstein's death (1955); as it will be shown, those working notes are also intertwined with the construction of an overarching narrative from Newton to Wheeler himself. As it is quite typical when active scientists speak of other ages, Wheeler's historical references might seem naïve or superficial to the historian of physics – but his aims were not so. Far from being a propagandistic exploitation of the past, such narratives involve Wheeler as a sort of super-character: he is at once the narrator, the character who brings to a culmination those trends of thought, and a *persona* projecting onto other characters (especially his two mentors Bohr and Einstein) some features of his own research-shaping vision and methodology.

Keywords: J.A. Wheeler, A. Einstein, N. Bohr, Daring Conservatism, Renaissance of General Relativity.

1. Geons and monumental history

July 2nd, 1954. “Spirits of Rayleigh, Rutherford, Maxwell, Faraday?” This is not a séance with some late-Victorian flavour to it: this is John Wheeler taking notes for a lecture he was going to deliver at the Royal Institution in London five days later.

In those years, Wheeler was taking general relativity away from “the playground for mathematicians” (Ford 2002) and putting it again at the centre of the scene in physics, thus becoming one of the leading figures of what has been dubbed the *Renaissance* of General Relativity (Blum *et al.* 2015); being in Princeton, moreover, he was in direct and friendly contact with Einstein himself. Strictly intertwined with all of this, there was his own original line of research, building on Einstein's legacy and ambitiously trying to show the actual physical meaning of “the Newtonian concept of body” (Wheeler 1955): moving from the slogan “everything is fields” (after the dismissal of the previous “everything is

particles”), the crucial idea was now that of the “geon”. By the latter it is meant a solution to the Einstein-Maxwell equations - a wave - which self-gravitates thanks to its own energy and, thus, stays confined in a well-localized region of space for a relatively long time (these hypothetical geons, though, soon turned out to be unstable). In this way, Wheeler believed he had found a candidate that could act as *trait d'union* between a pure field ontology (since “everything is fields”) and massive bodies such as particles, whose existence had then, ideally, to be explained in terms of the former. In the middle of these considerations, Wheeler – as honestly showed by his notebooks – did not find much support from illustrious colleagues for his new idea, which had problems to make contact with empirically testable regimes too. Nevertheless, he serenely went on following his own path – “When I see a herd running one way, I like to march another way” (Wheeler 2000) –, convinced that the tradition of physics pointed in that direction. Wheeler’s pronounced eclecticism, joint with curiosity and originality, and a strong *monumental* vision of history¹ made the rest: it is no wonder, therefore, that Wheeler liked picking great figures from the places (such as London) that he visited and imagining interrogating them, putting their busts and statues along an ideal “charismatic chain” (Wheeler 1963); thus, he created a sort of narrative legitimizing the program he was following. Even among Wheeler’s collections of historical names, however, the two that stood out the most for him were those of his mentors Bohr and Einstein.

2. Einstein’s legacy

The quote in the beginning comes from Wheeler’s *Relativity Notebook III* (Philadelphia, American Philosophical Society Library, John Archibald Wheeler Papers, Mss.B.W564; from now on, APS), which covers the period April 1954 - July 1955; therefore, it includes the moment, in April ’55, of Einstein’s death. While it is essentially constituted of working notes, rather than of pages of a private diary, the notebook carries nonetheless some trace of the event: opening it, one immediately finds, on the starting endsheets, a quote, possibly by Einstein himself as reported by Harold W. Dodds, President of Princeton University at the time: “The human brain needs to be put tasks beyond its power”; on its right, there is a pencil portrait of Einstein, with his own signature.

Moreover, on the closing endsheets, where Wheeler used to put physics-related cartoons, there is on the left side a satirical depiction of Einstein, his hair sticking up, while on the right a Miró-esque harlequin-like figure which stands (self-)ironically for Wheeler himself: it is Miró’s *Personajes y Perro delante del Sol* (from the title one sees that it is actually upside-down, although some ambiguity, at first glance, is in the work itself), on which someone wrote “THE GiON”, probably mocking amiably the idea Wheeler was so taken by at the time, the geon.²

¹ Although, quite obviously, there was no direct influence, I am here using “monumental” in a sense close to the one Nietzsche gave to the adjective in his *Vom Nutzen und Nachteil der Historie für das Leben*: selected examples from history presented in such a way that they spur individuals to perform “great actions”.

² Related to this picture (while it is immediately recognizable as a Miró, I wish to thank Valentina Schütze Sánchez for sparing me the search for its title) there is a nice lesson for historians. It is easy to notice that we are not in front of Wheeler’s handwriting, as much as we are just dealing with a handful of capital letters. Moreover, could there be some meaning attached to that spelling? “Gion” is the name of a *geisha* district in Kyoto – is it, then, a pun written on a postcard sent to Wheeler by someone who visited the place in that period?

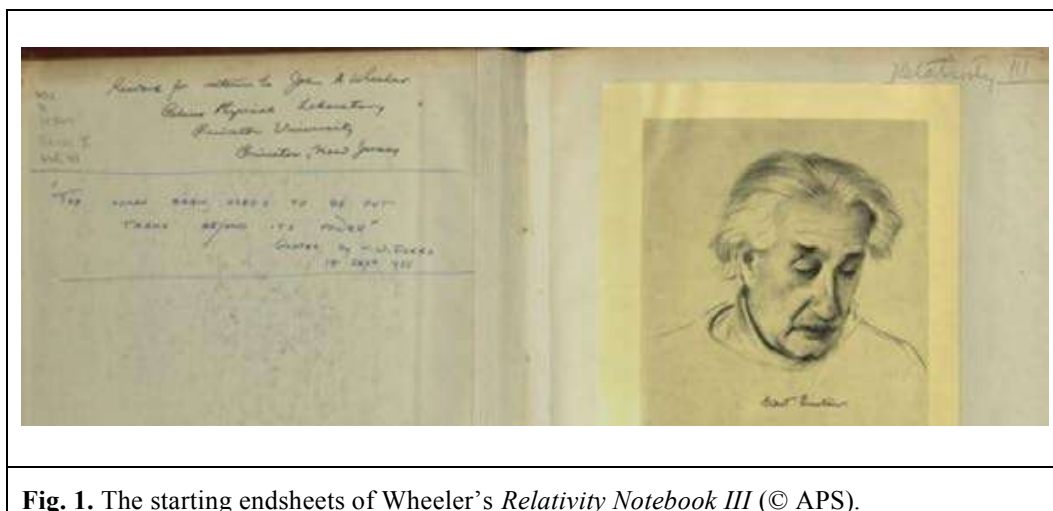


Fig. 1. The starting endsheets of Wheeler's *Relativity Notebook III* (© APS).

The juxtaposition of the two images on the endsheets at the end of the notebook, thus, even though it might be a slight overreading, seems again to point, in its own way, towards the bond between Wheeler and Einstein.

The guidelines of research inspired by the notion of geon, as already mentioned, were perceived by Wheeler as being clearly grounded in Einstein's legacy and, second, as bringing to completion conceptual issues going back to Newton: the history of "the" theory of gravitation is thus the past of Wheeler's idea and of his program. Things, however, are not so linear (no pun intended with the non-linearity of general relativity). Among the same preparatory notes for the Royal Institution lecture, for instance, he underlines how "Einstein has so often expressed to me his admiration for Newton's practical point of view" regarding the attraction of bodies – passing through the mediation of Einstein was an important point: he was certainly not a mere step leading to Wheeler, and it was (also) their relationship that allowed the latter to see the past as through a filter (the historical dimension and reach of Einstein's vision, after all, is explicit also in the *choice* of the quote

Knowing also that, at the 1957 Chapel Hill Conference, Feynman mocked him with the name of "Geon Wheeler", and had already expressed scepticism about the idea, it is quite natural to think that we have a suspect – after all, making a joke about such a visit would be in line with Feynman's character, and more in general the harlequin-like overtones catch some aspect of the relationship between him and Wheeler. As a matter of fact, Feynman visited Kyoto during the summer of 1954, that is precisely within the period covered by the notebook. A brief confrontation of Feynman's handwriting and capital letters may offer a further clue in favor of this hypothesis, so to speak. If it is not enough, Wheeler, who visited Japan in 1953, sent to many friends and acquaintances a small book with basic Japanese sentences – and you might expect some sort of answer from Feynman, if he happens to follow your footsteps. Everything seems ready for a nice story, maybe with the title *Between Geishas and Harlequins: Tokyo Wheeler, Kyoto Feynman, and Miró*. The hypothesis, however, does not really explain the choice of Miró, besides the comment above on the "harlequin-like overtones": while Miró was definitely fascinated by *Japonism*, his first exposition there dates to 1966, and the story of this specific work, now in Basel under the title *Personnages et chien devant le soleil*, does not include any trip of that kind. During the search for the last piece of the puzzle, it turned out that a corner of the postcard could be lifted – and then, thanks to the kind collaboration of the American Philosophical Society, the name of the "culprit" was unexpectedly revealed: Alexandru Proca, who had met Wheeler in Paris, where Miró's painting was at the time. This does not amount to "the slaying of a beautiful theory by an ugly fact" of which Thomas Huxley spoke, but it definitely shows in a very clear way what, in such inquiries, has always the last word.

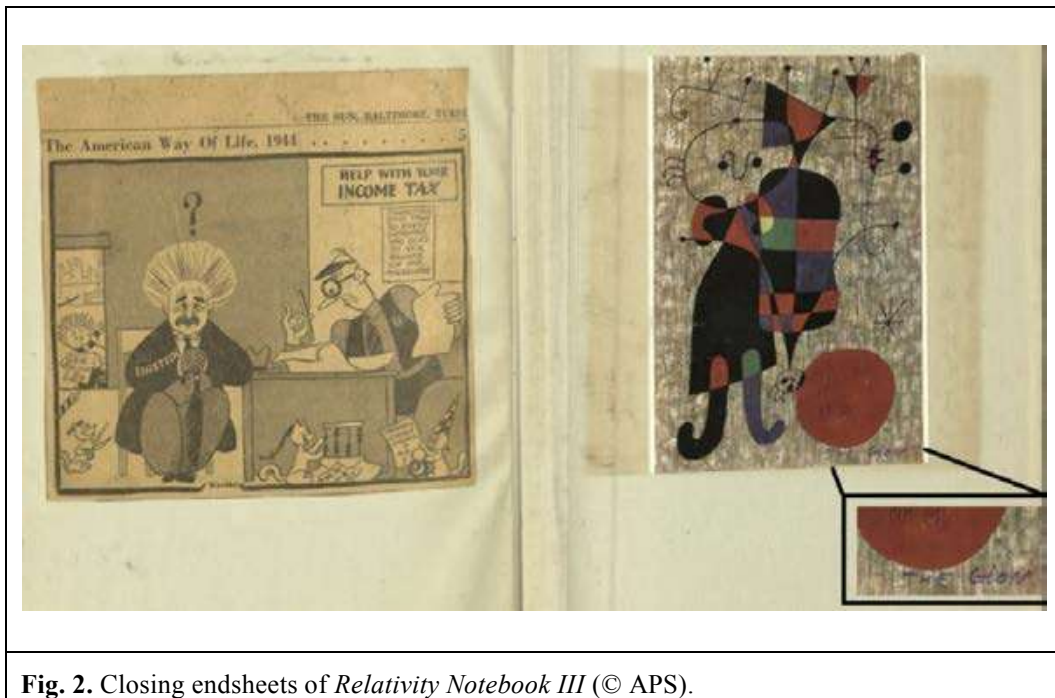


Fig. 2. Closing endsheets of *Relativity Notebook III* (© APS).

reported by Dodds); and, of course, it was Einstein’s legacy that now allowed Wheeler to build “more”. Here, again, things are not so simple, since Wheeler was the one (especially in the following years) brushing up Einstein’s legacy – general relativity –, systematizing with the help of his students and collaborators its mathematical language and its geometrical interpretation, which should not be taken for granted in all its aspects and connotations. Thus, the personal bond that tied him to Einstein – bond often underlined by Wheeler himself, as in the case of Bohr – generated in Wheeler’s mind some sort of “exchange interaction” between his own figure and the one of his mentor; in other words, he started projecting upon him some of his own views as if they were, *sic et simpliciter*, Einstein’s.

This might scandalize the meticulous and naïve historian, but, in the present case, it should not be regarded as some sneaky trick to better sell one’s ideas, even though there is definitely a legitimizing component to it: rather, there seems to be in Wheeler the genuine conviction that those were the lessons inherited by Einstein and other great figures, and he was at most polishing and renaming them while telling this sort of narrative. Highly significant, in this regard, is an abstract that can be found again in Wheeler’s archives, inside *Relativity Notebook XIV*. It refers to a speech that Wheeler gave in different occasions during 1966: *Einstein’s Dream As Seen Fifty Years Later*. Here its content:

Thus Einstein gave geometrodynamics to the world in November 1915 as Maxwell had established electrodynamics fifty years earlier. Einstein dreamed of more, of all matter and all forces as constructs out of pure geometry and nothing more. Today the gap appears to be wider than ever between the beautiful geometrical simplicity of Einstein’s vision and the wealth of structure revealed in elementary

particle physics. However, the union of the quantum principle with Einstein's geometrodynamics opens out new pathways for progress, and Einstein's dream of matter as a state of excitation of a dynamic geometry remains very much alive.

Besides the historical *pathos* – as a great flux from the past to the future – that, by many accounts, Wheeler was really good at conveying (that is, after all, one of the uses of “monumental” history, and the way in which those narratives of his tried to shape, in part, the lines of research of a community), it is easy to notice how he nonchalantly and directly calls general relativity with the name that *he* gave to his own speculations and program based on Einstein's theory.

3. Bohr's lesson

Something very similar happened with Bohr, with whom Wheeler started to work in 1934 as a post-doc. In particular, in Relativity Notebook III there is some sign that Wheeler's own heuristic methodology, the so-called “daring conservatism” – which consisted in pushing to the extreme consequences the already well-established principles before introducing anything new (if necessary at all) –, is presented as Bohr's, or at least strictly linked to him, as it may be suspected from the excerpt of a review (which turns out to be dedicated to Whittaker's *History of the Theories of Aether and Electricity*) that caught Wheeler's attention:

Probably the most important theme of the books is that the great and “radical” theories were often the fruitful acceptance of an earlier suggestion or, more commonly, a successful amalgamation of various aspects of currently competing theories. [...] Bohr's atomic theory is described by Whittaker as being based on nine fundamental principles, the first eight due to Conway, Nicholson, Rutherford, Ritz, Planck, and others, and the ninth, the renunciation of any classical explanation of electronic transitions, the one new element that Bohr added to create a successful theory (APS, Rel. Not. III).

For years Wheeler explicitly presented Bohr as a hero of “daring conservatism” – until, more or less like it happened earlier with “geometrodynamics”, it became directly Bohr's, in the foreword to *Science and Ultimate Reality* at the beginning of the new millennium: “Niels Bohr liked to speak of ‘daring conservatism’ in pursuing physics” (Wheeler 2004). Again, this is not a fraud; there is definitely some Bohrian flavour to Wheeler's methodology, and everything seems to suggest that he genuinely believed to have received daring conservatism from Bohr. It is also curious that, in a 1956 letter to Bohr (APS, Wheeler's Correspondence, Box 5), Wheeler presents daring conservatism as if he himself were just a freshman trying to juggle – remember the harlequin-like picture of Miró – with the principles that he found in his textbook.

The different emphasis, in the end, turns out, again, to be a remark on a personal bond – and thus, considering such an aspect in the wider perspective outlined above, we can see that Wheeler, from the lessons that he “directly” got from the two pillars of modern physics, went on acting as a super-character of those historical narratives of his, in which he was at the same time the narrator, a character in his own right and, since Borges taught us how everyone creates his or her own precursors, a *persona* projecting upon others some of his own features. When he underwent a transition in his interests at the end of the 60s, starting to move towards “it from bit”, his narrative changed as well, in convolution so to speak, with new “heroes” required for his new ideas (and for looking for new ideas – hence Wheeler’s interest in Gödel’s results, the work of logicians, philosophers, etc). That is when references to Leibniz started to emerge and, curiously enough, he decided to call “monads” the acts of quantum measurement admitting binary answer – while such topic is going to be addressed in a forthcoming work, here again one sees the shadow of Bohr, as in other aspects of the late Wheeler, and the “projecting mechanism” seems to stay the same as outlined above, with some features accompanying formulaically, almost in Milman Parry’s sense, the recurring characters of his storytelling. While this might just seem some marked idiosyncrasy of Wheeler,³ the construction of legitimizing narratives is a phenomenon that, since the WWII aftermath, has been recurring relatively often in programs of physics without empirical support; as a conclusive remark, a suggestion: while methodological arguments, stated more impersonally and generally, have been put forward to defend those approaches, cases such as Wheeler’s could offer an unfiltered version of the processes and the risks behind “meta-inductive”⁴ legitimizations.

References

- Blum A.S., Lalli R., Renn J. (2015). “The reinvention of general relativity: a historiographical framework for assessing one hundred years of curved space-time”. *Isis*, 106 (3), pp. 598-620.
- Dawid R. (2013). *String Theory and the Scientific Method*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ford K. (2002). *The Legacy of John Archibald Wheeler* [online]. URL: <<https://metanexus.net/legacy-john-archibald-wheeler>> [access date 14/02/2020].
- Wheeler J.A. (1955). “Geons”. *Physical Review*, 97 (2), pp. 511-536.
- Wheeler J.A. (1963). *A Few Links in the Charismatic Chain*, in Rose M.E. (ed.), *Proceedings First Eastern Conference on Theoretical Physics* (Charlottesville, VA, October 1962). New York: Gordon and Breach.
- Wheeler J.A. (with Ford K.) (2000). *Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics*. New York: Norton & Company.

³ Up to which point was he “serious” in presenting and using such narratives? Some research on Wheeler’s important role in the famous project *Sources for History of Quantum Physics* will be crucial in order to clarify it, although some degree of hero-worshipping and of veneration for Bohr seems definitely involved on Wheeler’s side.

⁴ See the debate around the “non-empirical arguments” sparked by Dawid (2013).

Wheeler J.A. (2004). *Foreword*, in Barrow J.D., Davies P.C.W., Harper C.L. Jr., *Science and Ultimate Reality*. Cambridge: Cambridge University Press.

Archival sources

Philadelphia, American Philosophical Society Library, John Archibald Wheeler Papers, Mss.B.W564.

The debate on quantum mechanics and constructive mathematics: a review

Antonino Drago - Formerly at Naples University “Federico II”, Italy – drago@unina.it

Abstract: Some years ago, I offered a review of the papers concerning the relationship between theoretical physics and the kinds of mathematics which more or less reject the notion of actual infinity. The present paper offers a review concerning the specific debate whether Constructive mathematics covers the entire Quantum Mechanics, a subject which attracted the attention of the scholars supporting the thesis of the indispensability of classical Mathematics (which freely includes the notion of actual infinity) for theoretical physics. At present time the above thesis is still undecided. In order to prove the dispensability of classical mathematics in theoretical physics, I suggest how a recent, accurate version of Dirac’s quantization may be translated into constructive mathematics.

Keywords: Alternative kinds of Mathematics, Constructive mathematics, Relationship Mathematics – Theoretical Physics, Quantum Mechanics

1. The choice of Constructive Mathematics. The method for introducing this Mathematics within Theoretical physics.

At the beginning of the 20th Century Intuitionists started an alternative foundation of Mathematics which involved a more accurate attitude in allowing the idealized notions within Mathematics. Eventually, Bishop formulated it as the version called Constructive Mathematics (CoM); his 1967 book showed that through a minimal involvement with actual infinity (Billings 2003), it covers almost all the subjects of the usual mathematics of a working mathematician (Bishop, Bridges 1986); moreover, differently from other kinds of mathematics bounding the use of actual infinity, its formalism is similar to the classical one and it is the most developed non-classical mathematics. Afterwards, CoM was recognized as a valid and promising mathematical theory. Therefore, it appeared as a candidate for replacing classical Mathematics in the applications to reality, in particular Theoretical Physics (TP). Here the question that CoM poses is the legitimacy of making recourse to idealizations to obtain experimental results. By rejecting the free use of actual infinity CoM is surely more adherent to the operative viewpoint of experimental Physics than classical Mathematics which introduces idealistic notions and techniques within TP.

Some scholars, e.g. Georg Kreisel (Kreisel 1974), launched a program of research to re-construct the entire TP through an alternative Mathematics. Whether an alternati-

ve mathematics rejecting actual infinity represents all important physical theories or not is a question on which a century long debate was developed (Drago 1990). Incidentally, a positive answer to this question will offer the highest evidence for deciding that the entire body of Mathematics has to be conceived not as it was along millennia, ie as a monolithic body with little relevant variants, rather as severed into two or more basically different kinds of Mathematics (the classical one and the others), all to be considered on the same par. If CoM will result inadequate to TP, it will be clear that the other kinds of Mathematics obtain more relevant results for TP only because they introduce actual infinity in some specific forms. Therefore, I focus the attention on CoM.

By having the goal to prove that TP cannot be expressed through CoM, scholars supporting the thesis of indispensability examine one of the following subjects: 1) A number of significant physical measurements. 2) A mathematical technique (eg wave equation). 3) An entire theory. The first two cases represent a reduction of the problem to a simpler and more convenient one. Actually, no certain problem exists on a single number of TP; rather, a decisive problem is to constructivize a crucial mathematical technique (eg the set of solutions of wave equation, Gleason theorem in Hilbert space, etc.). On another hand, constructivists try to obtain the constructive translations of all physical theories.

Some papers of mine offered a review of the past papers either analyzing or suggesting relationships between a reduced mathematics and TP (Drago 1990, Drago 1993, Drago 2001, Drago 2003). At present time, only classical Mathematics covers all needs of TP. I suggested that the translation of a physical theory into CoM is possible only by considering its particular formulations. Indeed, principles and/or mathematical techniques of a specific formulation of a given theory may result undecidable, i.e. they include actual infinity (Drago 1986; Drago 1995); for instance, CoM excludes the main axiom of Carathéodory's formulation of Thermodynamics and hence it rejects this formulation (Drago 1984). The same holds true for Newton's three principles and hence CoM rejects his formulation of Mechanics (Drago 1988). However, a given physical theory may enjoy other formulations which make use only of constructive techniques - although their authors ignored CoM; actually, in the case of Thermodynamics such is Carnot-Kelvin-Clausius' formulation (Drago 1984); in the case of Mechanics, L. Carnot's one (Drago 1990; Drago 2004). Hence who wants to translate a physical theory into CoM should previously choose a suitable formulation of the theory.

I proved that, beyond the previous two theories, Huygens-Leibniz-L. Carnot's kinetic theory of gases (Drago 2016a), Lévy Leblond's special relativity (Drago 1998) and Einstein's black body theory (Drago 2013; Drago 2017b) make use of no more than CoM.¹ Thus, almost all the main physical theories enjoy constructive formulations.

In the case that no formulation of a physical theory is constructive, one should build a new formulation of this theory that does not make use of actual infinity (Drago 1986; Drago 1995; Drago 2017a).

¹ I do not know any other scholar that suggested a constructive formulation of any physical theory.

2. The case of Quantum Mechanics. Is Classical Mathematics indispensable to Theoretical Physics?

Let us focus the attention on the physical theory of Quantum Mechanics (QM). It is the most accurate theory among all physical theories; in fact, no experimental result denies it. Moreover, its novelty was so astonishing that QM is the most important theory to which the debate on foundations of the entire TP is referred. No surprise if scholars see in QM the most prestigious physical theory for proving their theses about e.g. the relationship between Mathematics and Physics.

In 1981, after having translated functional spaces, and in particular Hilbert space, into CoM (Bridges 1979), Douglas Bridges, a prominent constructivist mathematician, tackled the problem of translating QM in such a kind of mathematics. He investigated on yes-or-not questions within Hilbert space; they represent both the dichotomic results of measurement processes and the simplest questions in mathematical terms. In Hilbert space a non-commutative set or event is a projection; a non-commutative function or random variable is a normal operator of that space; a non-commutative integral or expectation is a positive linear functional (or state). The observables form a C^* -algebra or von Neumann algebra and the states are positive linear functionals of that space. Bridges defined the probability measure and debated Gleason theorem². He concluded: “We know of no constructive proof of this famous and beautiful theorem” (Bridges 1981, p. 266)

Ten years later, this question attracted the attention of scholars supporting the thesis of the indispensability of classical mathematics for TP. Geoffrey Hellman (1992) claimed to have obtained two results: 1) Gleason theorem cannot be constructively proved; 2) an application of Pour-El and Richards theorem, concerning the set of constructive solutions of the wave equation, precludes a constructive version of the linear unbounded operators in Hilbert space. He wrote two more papers for detailing in both mathematical and philosophical terms the proofs of his results (Hellman 1993a; Hellman 1993b).

To him Bridges replied (Bridges 1995) contesting the application of Pour-El and Richards theorem, because by assuming the classical notion of closedness it does not pertain to CoM (see also the review of these authors' book: Bridges 1991). In addition, he contested Hellman's assumption of a decidable domain for each constructive function; that constitutes a very strong restriction to the set of constructive functions. Hellman (1997) replied by conceding something about his thesis on the unbounded operators, but insisting on both his conclusions. A new paper by Bridges (1997) contested point by point Hellman arguments and announced a next constructive proof of Gleason theorem. (A quick review of the debate was written in 1999 by Boris A. Kushner who sided with Bridges arguments).

² Gleason theorem proves that Born rule for the probability of obtaining specific results for a given measurement follows naturally from the structure formed by the lattice of events in a real or complex Hilbert space

In the same year, Helen Billinge (Billinge 1997) offered a first constructive proof of such a theorem. Moreover, Richman and Bridges (2000) obtained a new translation of Gleason theorem into constructive mathematics.

In addition, Fred Richman wrote a paper (2000) to underline the novelty. He commented the result and illustrated the correct way for translating classical results into constructive mathematics. He remarked that the verbal language expressing a classical result has a degree of variability which in classical mathematics does not affect its content. However, these equivalent verbal versions may result different from a constructive viewpoint. E.g, a classical mathematician states equivalently the two following propositions: “Either $x > 0$ or $x \leq 0$ ” and “If not $x > 0$, then $x \leq 0$ ”.³ Yet, by applying the law of the excluded middle the former proposition is undecidable in CoM.

About Gleason theorem Richman showed that Hellman’s arguments refer to a version of it which includes the principal axes theorem⁴, which is non constructive; but this latter theorem is not essential to Gleason theorem. He showed also that Billinge rightly chooses a constructive enunciation of the theorem; but in the course of the proof she left an ambiguity – as also Hellman did - on the use of the operators $\sup f$ and $\inf f$ (with f a frame function), that in general are not constructive.

In sum, the entire debate obtained two relevant results: 1) A well-defined mathematical result, i.e. the constructive version of Gleason theorem. 2) An improvement of the methodology for this kind of translation.

By exploiting Richman’s suggestion, Feng Ye (2000) chose among the classical notions of self-adjointness a suitable version. He then proved Kato-Redlich theorem, the spectral theorem, Stone’s theorem and the self-adjointness of the most common quantum operators, including the Hamiltonians of the electromagnetic fields with some general forms of potentials.

3. One more stumbling block: von Neumann algebra

However, these improvements merely removed some obstacles for constructivizing QM; they did not decide the question of the translatability of the entire QM into CoM.

Notice that the previous results are all obtained within Hilbert space, because most scholars locate their investigations within Dirac-von Neumann’s formulation of QM, by ignoring all other formulations of QM which have been accumulated since its birth

³ According to Richman (2000, p. 429), “*any* statement has a classic reformulation that does not admit a constructive proof”. I suggest that this reformulation merely introduces a double negation which in classical logic may be cancelled - owing to the double negation law -, but in non-classical logic cannot be cancelled; in the previous case, one may introduce $\neg\neg x > 0$ or $x \leq 0$ which is classically equivalent to both the former formula - because one can cancel the two negations - and to the second one - by recalling the explicit formula of an implication; however in non-classical logic this new formula is not equivalent to the former one because the law of double negation fails).

⁴ The principal axes notion is a geometrical counterpart of the spectral theorem, about when a linear operator or matrix can be diagonalized. It generalizes the major and minor axes of an ellipse or hyperbola. The principal axes theorem states that they are perpendicular (Notwithstanding what is often written, this theorem does not offer a constructive procedure for finding them, because usually it is enunciated as an ill-posed problem).

(Drago 2016b). But several celebrated physicists (Einstein, De Broglie, etc.) and philosophers (Popper, etc.) addressed radical criticisms to Dirac-von Neumann formulation of QM and invoked new formulations. Hence, the search of a constructive formulation of QM leads us to investigate on a crucial question (which new formulations of QM?) of the last century debate on the foundations of QM and at last on TP's foundations.

My papers (Drago 1991; Drago 2000; Drago 2017a) presented my motivations for searching a constructive foundation of QM without Hilbert space. Among the several formulations of QM which are independent from Hilbert space those suggested by Heisenberg in 1925, Weyl in 1928 and Thomas F. Jordan in 1985⁵ closely approached constructive formulations; however, they all are incomplete formulations (Drago 2000; Drago 2016c).

Irving Segal (1947) suggested an alternative to the usual mathematical apparatus for QM, Hilbert space. He based QM on postulates relying entirely on a C^* -algebra of operators (Segal 1947, p. 930). Then, by producing an analogous of Gelfand-Naimark theorem (afterwards called GNS theorem) he obtained the QM representation within Hilbert space and then Schrödinger equation⁶. From a constructivist viewpoint this algebraic foundation presents two advantages; first, the historical tradition of algebra is constructivist; second, the theory of operator algebras is an infinite-dimensional generalization of matrix algebra theory, which was the basis of Heisenberg's (incomplete) theory of QM, which (unwarily) was a constructive one.

Some mathematicians (Mines et al. 1988) edited a university textbook on constructive algebra. By making use of both the notion of apartness (for covering the notion of inverse element) and the notion of quasi-norm (for covering the classical norm which presents a problem), they covered almost the entire theory of C^* -algebras: however, in the commutative case only. But in the case concerning QM, the non-commutative one, the problems are much more difficult. An apparently conclusive paper (Spitters 2005) solves many problems but concludes that the classical double commutant theorem⁷ of von Neumann algebras cannot be proved constructively⁸ (although it was proved for Abelian von Neumann algebras with a weakly totally bounded unit ball).

⁵ (Drago and Pirolo 1995) sketched a QM formulation on the basis of didactical T.F. Jordan's formulation of QM.

⁶ Jammer (1974, pp. 381-383) offered a historical account of this innovation. A C^* -algebra is also a non-commutative version of the topology of measure theory

⁷ This theorem expresses purely topological aspects of these algebras in terms of purely algebraic properties. It says that the following two definitions of a von Neumann algebra are equivalent: 1) A weakly closed $*$ -algebra of bounded operators (on a Hilbert space) containing the identity. In this definition the weak (operator) topology can be replaced by many other common topologies including the strong, ultrastrong or ultraweak operator topologies. The $*$ -algebras of bounded operators that are closed in the norm topology are C^* -algebras; in particular, any von Neumann algebra is a C^* -algebra. 2) A subset of the bounded operators closed under involution (under the $*$ -operation) and equal to its double commutant, or equivalently the commutant of some subset closed under $*$.

⁸ The same holds true for (D'Ariano 2017), which obtains QM within a C^* -algebra derived from some very general axioms on the characteristic features of physical measurements.

4. A suggestion for a constructive formulation of QM

In sum, Hellman's attempt to decisively exclude CoM from TP failed; thus the thesis of the indispensability of classical mathematics has still to be proved by classicists because they did not exhibit a mathematical technique which is both indispensable to QM and non-constructive. On the other hand the above review of the results on the relationship between TP and CoM shows that CoM surely covers great part of TP; but constructivists have still to exhibit a formulation of QM that is entirely constructive.

However, Franco Strocchi (Strocchi 2018) solved the basic problem of QM, i.e. to overcome the indeterminacy of the two conjugate magnitudes, by translating Dirac's analogy between commutators and Poisson brackets of the Hamiltonian into an accurate algebraic technique which allows only two representations, one for the classical mechanics and the other for QM.

I suggest to re-formulate QM according to the choices PI&PO by exploiting this result, which is already aimed to solve a basic problem, a PO theory does. I suggest developing the theory by starting – in a similar way to the alternative classical mechanics of Lazare Carnot (Carnot 1803, p. x) – from dynamics and then obtain statics. That means to start from the dynamics of the invariants of motion of the Hamiltonian - obtained by its groups of symmetries determined by the Poisson brackets – and as a last step to achieve the statics.

By inspecting Strocchi's result from CoM viewpoint one recognizes as constructive both his construction of the suitable Poisson algebra and his result of two only representations of this algebra. Yet, the last step for obtaining Hilbert space, i.e. GNS theorem, is an undecidable problem. However, rather than searching for a general constructive solution, at this advanced point of the theory development one may proceed in a heuristic way, being assured that the Poisson algebra surely is represented by at least by Pauli matrices and more generally by finite matrices; the more general cases may be inspected case by case. This suggestion for achieving a formulation of QM within CoM will be detailed by a next paper.

Bibliography

- Billinge H. (1997). "Constructive formulation of Gleason's theorem". *J. Phil. Logic*, 26, pp. 661-670.
- Billinge H. (2003). "Did Bishop have a philosophy of Mathematics?". *Philosophia Mathematica*, 2, 11, pp. 176-194.
- Bishop E., Bridges D.S. (1985). *Constructive Mathematics*. Berlin: Springer.
- Bridges D.S. (1979). *Constructive Functional Analysis*. London: Pitman.
- Bridges D. (1981). "Towards a constructive foundation for Quantum Mechanics", in Richman F., Bridges D.S. (eds.), *Constructive Mathematics*, LNM 873. Berlin: Springer, pp. 260-273.
- Bridges D.S. (1991). "Review". *Bull. Am. Math. Soc.*, 24, pp. 216-228.
- Bridges D. (1995). "Constructive mathematics and unbounded operators - a reply to Hellman". *J. Philosophical Logic*, 24, pp. 549-561.

- Bridges D.S. (1997), “What is the problem with constructive mathematics and quantum mechanics? (preprint), Sept. 5.
- Bridges D.S. (1999). “Can constructive mathematics be applied in physics?”. *J. Phil. Logic*, 28, pp. 439-453.
- Bridges D.S., Richman F. (1987). *Varieties of Constructive Mathematics*. Cambridge: London Math. Soc.
- Carnot. L. (1803). *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*. Paris: D'Ariano G.M. (2017). “Physics without Physics”. *International Journal of Theoretical Physics*, 56 (1), pp. 97–128.
- Drago A. (1984). “Constructive Analysis and Thermodynamics Formulations”. *Arch. Math. Logik Grund. Math.*, 24, pp. 17-22.
- Drago A. (1986). “Relevance of Constructive Mathematics to Theoretical Physics”, in Agazzi E. et al. (eds.), *Logica e Filosofia della Scienza, oggi*. CLUEB, Bologna, 1986, vol. II, 267-272 (abstract in *J. Symb. Logic*, 52 (1987), p. 316).
- Drago A. (1988). “A Characterization of Newtonian Paradigm”, in Scheurer P.B., Debrock O. (eds.), *Newton's Scientific and Philosophical Legacy*. Dordrecht: Kluwer Acad. P., pp. 239-252.
- Drago A. (1990). “Storia del dibattito sull'introduzione della matematica costruttiva in fisica teorica”, in Bevilacqua F, (ed.), *Atti del X Congr. Naz Storia Fisica*. (Trento), Pavia: La Goliardica, pp. 141-152.
- Drago A. (1991). “Alle origini della meccanica quantistica: le sue opzioni fondamentali”, in Cattaneo G., Rossi A. (eds.), *I fondamenti della meccanica quantistica. Analisi storica e problemi aperti* Editel, Cosenza, pp. 59-79.
- Drago A. (1993). “The debate on the introduction of constructive mathematics in theoretical physics” (abstract). *J. Symb. Logic*, 58, pp. 1138-1139.
- Drago A. (1995). “Constructive mathematics and theoretical physics: from the wave equation to a general method” (abstract). *Bull. Symb. Logic*, 1, pp. 89-90.
- Drago A. (1998). “Minkowsky, Poincaré, Lobacevskij: la via geometrica alla relatività ristretta”, in Tucci P. (ed.), *Atti XV Congr. Naz. Storia Fis. e Astr.* Milano: Dip. Fis. Generale e Appl. Univ. Milano, pp. 151-170.
- Drago A. (2000). “Which kind of mathematics for quantum mechanics? The relevance of H. Weyl”, in Garola C., Rossi A. (eds.), *Foundations of Quantum Mechanics. Historical Analysis and Open Questions*, Singapore: World Scientific, pp. 167-193.
- Drago A. (2001). “Which kind of Mathematics for Theoretical Physics? A survey of past debate and its solution.” *Atti Fond. G. Ronchi*, 56, pp. 115-131.
- Drago A. (2003). “The introduction of actual infinity in modern science: mathematics and physics in both Cavalieri and Torricelli”. *Ganita Bharati, Bn/I. Soc. Math. India*, 25, pp. 79-98.
- Drago A. (2004). “A new appraisal of old formulations of mechanics”. *Am. J. Phys.*, 72(3), pp. 407-409.
- Drago A. (2013). “The emergence of two options from Einstein's first paper on Quanta”, in Pisano R., Capecchi D., Lukesova A. (eds.), *Physics, Astronomy and Engineering. Critical Problems in the History of Science and Society*. Siauliai: Scientia Socialis P., pp. 227-234.

- Drago A. (2016a). "G.W. Leibniz- Lazare Carnot's Mechanics and Kinetic Theory of Gases", in Fregonese L. and Gambaro I. (eds.), *Atti XXXIII Convegno della SISFA*. Pavia U.P., pp. 345-458.
- Drago A. (2016b). "A dozen formulations of quantum mechanics: a mutual comparison according to several criteria", in P. Tucci (ed), *Atti 34th SISFA 2014*. Pavia: Pavia U.P., pp. 103-112.
- Drago A. (2016c). "*The three formulations of quantum mechanics founded on the alternative choices*", in Esposito S. (ed.). *Società Italiana degli Storici della Fisica e dell'Astronomia: Atti del XXXV Convegno annuale* Pavia: Pavia U.P., pp. 251-259.
- Drago A. (2017a). "A program of research for discovering an alternative formulation of quantum mechanics". in Esposito S. (ed.), *Atti del 36° Convegno annuale Società Italiana degli Storici della Fisica e dell'Astronomia*. Pavia: Pavia U. P., pp. 319-329.
- Drago A. (2017b). *Dalla Storia della Fisica ai Fondamenti della Scienza*, Roma: Aracne.
- Drago A., Pirolo A. (1995). "Quantum mechanics reformulated by means of symmetries", on Garola C., Rossi A. (eds.), *The Foundations of Quantum mechanics*. Dordrecht: Kluwer A. P., pp. 229-237.
- Hellman G. (1992). "Limitation for constructivization for quantum mechanics". *J. Symb. Logic*, 57, pp. 360-369.
- Hellman G. (1993a). "Gleason's theorem is not constructively provable". *J. Phil. Logic*, 22, pp. 193-201.
- Hellman G. (1993b). "Constructive mathematics and quantum mechanics. Unbounded operators and spectral theorem". *J. Phil. Logic*, 22, pp. 221-248.
- Hellman G. (1997). "Quantum mechanical operators and constructive mathematics - A rejoinder to Bridges". *J. Phil. Logic*, 26, pp. 121-127.
- Jammer D. (1974). *The Philosophy of Quantum Mechanics*. New York: Wiley.
- Kreisel G. (1974). "A notion of mechanistic theory". *Synthese*, 29, pp. 11-26.
- Kushner B.A. (1999). "Review". *Bull Symb. Logic*, 5, pp. 397-398.
- Mines R., Richman F., Ruitenberg W. (1988). *A Course in Constructive algebra*, Berlin: Springer
- Richman F. (2000). "Gleason Theorem has a constructive proof". *J. Phil. Logic*, 29, pp. 427-451.
- Richman F. Bridges D. (1999). "A constructive proof of Gleason theorem", *J. Functional Analysis*, 162, 287-312.
- Segal I. (1947). "Postulates of general quantum mechanics", *Annals of Mathematics*, 48, pp. 930-948.
- Spitters B. (2005). "Constructive results on operator algebras". *Journal of Universal Computer Science*, 12, pp. 2096-2113.
- Strocchi F. (2018). *A Primer of Analytical Mechanics*. Berlin: Springer, pp. 93-101.
- Ye F. (2000). "Toward a constructive theory of unbounded linear operators". *Journal Symbolic Logic*, 65 (1), pp. 357-370.

An unpublished approach to electrodynamics by Richard Feynman

Roberto De Luca – Dipartimento di Fisica “E. R. Caianiello”, Università di Salerno – rdeluca@unisa.it

Marco Di Mauro – Dipartimento di Fisica “E. R. Caianiello”, Università di Salerno and INFN, Sezione di Napoli – madimauro@unisa.it

Salvatore Esposito – INFN, Sezione di Napoli – salvatore.esposito@na.infn.it

Adele Naddeo – INFN, Sezione di Napoli – adele.naddeo@na.infn.it

Abstract. In this contribution we describe an original formulation of electromagnetism which was sketched by Richard Feynman in a set of unpublished notes and alluded to by him in the preface of his *Caltech lectures* and in a famous interview to Charles Weiner. Feynman further refined his view when lecturing on electrodynamics at the *Hughes Aircraft Company* some years later. In this approach, the role of special relativity is predominant, i.e. electromagnetism is consciously constructed *ab initio* as a relativistic theory. This hypothesis, together with the experimental fact that electric charge is a relativistic invariant and the least action principle, allows to derive the Lorentz force and the homogeneous Maxwell’s equations with no further physical input. This way of doing is different from the usual relativistic formulation of electromagnetism, initiated by Leigh Page in 1912, in that it goes a long way without even assuming Coulomb’s law.

Keywords: Lorentz force, Relativity, Homogeneous Maxwell’s equations.

1. Introduction

Richard P. Feynman’s attitude in finding new and original ways of presenting physics is well known. In this contribution we report on his search for an original approach to electromagnetism, began at Caltech in 1961-63, when he gave his famous general physics lectures. As stated in his preface to the published version (Feynman 1963a), he was not satisfied with the result. Indeed, the presentation of electromagnetism in the second volume of Feynman’s lectures is quite similar to the existing ones in literature, which derives the Lorentz force and Maxwell’s equations following a historical/experimental path, see for instance (Jackson 1998). The starting point is electrostatics, followed by magnetostatics, Faraday’s law of induction, Maxwell’s equations, and electromagnetic waves. Finally, the consistency of Maxwell’s equations with special relativity is shown.

Later on, in 1966, in an interview for the American Institute of Physics with Charles Weiner (Weiner 1966) Feynman briefly hinted at a new and much better way of introducing electrodynamics, but no such presentation appears to have been published

or used by him. Later on Feynman claims led M. A. Gottlieb to look for an answer in the Caltech archives, where he found five pages of handwritten notes, dating from 13 December 1963 and containing some of Feynman ideas on the topic. The notes (both the originals and a transcript by Gottlieb himself) were made available online (Feynman 1963b). To the best of our knowledge, no attempt to explain the physics contained in these notes was made by Gottlieb or anyone else up to now.

The starting point of the Feynman notes is an outline of a possible course on electromagnetism, along with a list of possible disadvantages and advantages of the proposed approach. Finally, a sketch of a derivation of the Lorentz force law from the requirements of special relativity and charge invariance, without any other external input, is provided. Feynman's approach to electromagnetism relies strongly on relativity but it is radically different from the existing ones. The general idea dates back to 1912 (Page 1912); starting from the Coulomb law of electrostatics, it is possible to derive the Lorentz force and magnetostatics from the Lorentz transformations. This viewpoint, to be fully consistent, clearly requires the introduction of special relativity independently from electromagnetism. It was used by many textbooks and papers (see e.g. the books by Purcell and Morin (Purcell et al. 2013) and by Landau and Lifshits (Landau et al. 1975)) and also by Feynman, while delivering a course on Electromagnetism at the Hughes Aircraft Company (Feynman 1967). But in his notes a novel approach is followed which cannot be found elsewhere: Feynman derives Lorentz force and the transformation laws of electric and magnetic fields only by requiring charge invariance (coming from experiments), relativity and linearity, but without stating Coulomb's law. Relativity plays a pivotal role also in later courses, in particular in the Hughes Lectures, where he follows another path, based on a relativistically invariant generalization of the least action principle, where a 4-vector potential is added to the free particle relativistic action. A comparison of the resulting equations of motion with the expression of Lorentz force gives the link between the electric and magnetic fields and the components of the 4-potential. Finally, by means of well-known vector analysis identities, homogeneous Maxwell equations are recovered.

The aim of the present contribution is to discuss and further develop the content of Feynman's notes in order to bring to fruition an alternative view on the fundamentals of electromagnetism. The content of (Feynman 1963b), in particular the derivation of the Lorentz force, is the subject of Section 2, while in Section 3 we report on the derivation of homogeneous Maxwell's equations from relativistic least action principle, as shown by Feynman when lecturing at Hughes Aircraft Company (Feynman 1967). Finally, in Section 4 some concluding remarks are presented. Besides the obvious historical interest, this work could be useful for teaching because it can supplement the existing approaches.

2. The Lorentz force and the transformation laws for the E, B fields

In the first page of his handwritten notes, Feynman gives the outline of a possible full course on electrodynamics, as follows:

1. Get the Lorentz force equation from charge conservation and relativity, get the potentials or at least the homogeneous Maxwell's equations.
2. Discuss the field idea, discuss the qualitative properties and shapes of the fields in some situations, differential operators, motion of electrons on given fields, induction, etc.
3. Get the inhomogeneous Maxwell's equations, either by arriving at the wave equation for the potentials from relativity or from some other principle, or even through the experimental, usual route (Coulomb, Ampère, ...).
4. Discuss the fields produced in several semi-static circumstances, e.g. condensers, inductances, etc.
5. Discuss the field in wave situations, e.g. radiation, waveguides, etc.
6. Energy and related problems, self-mass, Liénard-Wiechert potential, etc.
7. Fields in matter: \mathbf{D} , \mathbf{H} , etc.

Points 1 and 3 are the crucial ones, as pointed out by Feynman himself, while the other ones only concern applications of electrodynamics, rather than the formulation of electromagnetic laws, so that it is very much plausible that he aimed to address them in a standard way, similar to the one adopted in the Caltech or Hughes Lectures. However, in his notes Feynman only addressed the first part of point 1.

Feynman's approach to electromagnetism can be traced back to the fundamental assumptions that matter has an atomic structure (Feynman 1963a) and electric current is due to the motion of electric charges in matter. Building on this assumption, in the fifth page of his notes he argues that motion does not alter charge, i.e. electric charge is Lorentz invariant. Therefore, a conducting wire, where an electric current is present, is electrically neutral. If two such wires are placed next to each other, however, a net force between them is observed: this suggests that the force between electric charges depends not only on their position, but also on their velocity. The conclusion is that a point charge q , moving anyhow in the presence of other charges, experiences a force \mathbf{F} which is a function of its position and velocity:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{v}). \quad (1)$$

Charge invariance can be used again to observe that a charge in motion with zero average velocity (such as for example an electron in an atom) will feel an average force acting on it due to the presence of other charges. It must be equal to the force felt by a charge of equal magnitude at rest:

$$\overline{\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{v})} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{0}) \quad \text{if} \quad \bar{\mathbf{v}} = \mathbf{0}. \quad (2)$$

Eq. (2) excludes the dependence of the force from any even power of the velocity and actually implies that the force depends linearly on velocity as follows:

$$F_i(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = q(E_i + v_j B_{ij}), \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (3)$$

Here E_i and B_{ij} are coefficients depending on the other surrounding charges and on position, while the proportionality to q can be experimentally verified. From Eq. (3) one immediately identifies E_i with the components of the electric field while the identification of B_{ij} with the magnetic induction is not so obvious. Indeed, it is the main issue of Feynman notes and requires special relativity: the 3-vector in Eq. (3) must be related

to the spatial components of a 4-force. By using the well known formulae from relativistic mechanics one can write:

$$F^\mu = \gamma(F_t, F_x, F_y, F_z), \quad (4)$$

where $F_t = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$ and $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2}$ and we set for simplicity $c = 1$.

By imposing that the Lorentz transformation under a boost (with velocity \mathbf{u} , chosen for simplicity along the x-axis) of this 4-force is linear in the velocity, i.e. (putting $q=1$ for simplicity)

$$F'_x = \frac{F_x - uF_t}{1 - uv_x}, \quad F'_x = E'_x + v'_x B'_{xx} + v'_y B'_{xy} + v'_z B'_{xz}, \quad (5)$$

$$\gamma' F_t = \gamma_u \gamma (F_t - uF_x), \quad F'_t = \mathbf{F}' \cdot \mathbf{v}' = \mathbf{E}' \cdot \mathbf{v}', \quad (6)$$

$$\gamma' F'_y = \gamma F_y, \quad F'_y = E'_y - v'_x B'_z + v'_z B'_x, \quad (7)$$

where $\gamma' = \frac{1}{\sqrt{1 - v'^2}}$, $\gamma_u = 1/\sqrt{1 - u^2}$ and $B_i = \frac{1}{2} \epsilon_{ijk} B_{jk}$, Feynman was able to fix the functional form of the force in Eq. (3), thus recovering the Lorentz force (where we restore the q dependence):

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (8)$$

He also succeeded to derive the behavior of the coefficients E_i and B_{ij} under the boost:

$$E'_x = E_x, \quad E'_y = \gamma_u (E_y - uB_z), \quad E'_z = \gamma_u (E_z + uB_y), \quad (9)$$

$$B'_x = B_x, \quad B'_y = \gamma_u (B_y + uE_z), \quad B'_z = \gamma_u (B_z - uE_y). \quad (10)$$

Not surprisingly such transformation laws turn out to be the correct ones for the electric and magnetic fields.

3. Homogeneous Maxwell's equations

A possible way to address the second part of Feynman's point 1 above, i.e. to introduce the homogeneous Maxwell's equations, can be found in his Hughes lectures (Feynman 1967), where the vector potential was there introduced in order to write down a relativistic invariant least action principle for a particle in a given potential energy V . It is conceivable that Feynman had something like this in mind in 1963, when he wrote his notes, but it is as well possible that he thought about this issue sometime between 1963 and 1967. Part of this discussion is already present in Chapter 19 of Volume II of the Lectures (Feynman 1963a), though in a much less detail; a similar approach is also followed by Landau and Lifshits (Landau et al. 1975), and by Susskind in his Theoretical Minimum (Susskind *et al.* 2017).

As is well known, Feynman was convinced that potentials had the same level of reality as the fields. The starting point of his treatment is the generalization of the least action principle in classical mechanics to the relativistic case. Since in relativistic mechanics the momentum of a particle with mass m_0 is given by $m_0 \dot{x}/\sqrt{1 - v^2}$, as a first naive guess we may look for an action S , whose corresponding equations of motion are:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1-v^2}} \right] = -\nabla V. \quad (11)$$

The required action can be shown to be:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \left[-m_0 \sqrt{1-v^2} - V(\mathbf{x}, t) \right] dt = \int_{t_1}^{t_2} \left[-m_0 ds - V(\mathbf{x}, t) dt \right], \quad (12)$$

where ds is the invariant proper time interval. Eq. (11) indeed simply follows by imposing that S is an extremum. The key point now is the relativistic invariance of the action or, in Feynman's words, to establish if the action keeps its extremum value in any inertial reference frame. Since the potential energy term is clearly not invariant, it must be modified. The obvious choice would be an invariant scalar potential term $\chi(x, y, z, t) ds$ but, as quickly stated by Feynman, such a term does not lead to any known law of nature. A more elaborate discussion on scalar field forces can be found elsewhere in the Hughes Lectures (Feynman 1966) and in the Lectures on Gravitation (Feynman *et al.* 1995), where Feynman notices that such fields would require sources which, unlike the electric charge, decrease with the velocity. As the next simplest possibility, Feynman then suggested the use of a 4-potential $A_\mu(x, y, z, t)$, in order the action assumes the form:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \left[-m_0 ds - A_\mu dx^\mu \right], \quad (13)$$

where we put $A_t = \phi$ in order to match the usual notation. Now, by varying this action Feynman gets the following equations of motion:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1-v^2}} \right] = \mathbf{F}. \quad (14)$$

with the force \mathbf{F} given by:

$$\mathbf{F} = -\nabla \phi - \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} + \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}). \quad (15)$$

This expression coincides with Lorentz force (see Eq. (8)) (upon restoring q in front of it, or in the 4-potential term of the action (13)) if we make the following identifications:

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi - \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A}, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (16)$$

From these expressions, by means of standard vector analysis identities, one finally gets the homogeneous Maxwell equations:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}. \quad (17)$$

4. Conclusions

In this contribution we have discussed and further developed a previously unpublished description of electromagnetism by Richard Feynman, contained in five handwritten pages, recently made available online by M. A. Gottlieb (Feynman 1963b), as well as in later lectures given at Hughes Aircraft Company (Feynman 1967). Notwithstanding the fact that such a description was left incomplete (it lacks the derivation of the inhomogeneous Maxwell equations), it provides a clear and concise introduction to the relativistic theory of electromagnetism.

geneous Maxwell equations), the key epistemological interest in the exploration of alternative formulations of classical electrodynamics is evident by itself.

Feynman's approach in the handwritten notes is similar to the existing ones in which electromagnetism is derived from special relativity, but at variance with them it is based upon minimal physical assumptions, in particular it proceeds without postulating Coulomb's law.

After sketching such an approach, Feynman never fully used it, even when he taught electromagnetism again, at the Hughes Aircraft Company in 1967. Indeed here, in accordance with the plan delineated in his 1963 notes, he followed an inverse route in the derivation of homogeneous Maxwell's equations, by first introducing electromagnetic potentials and then writing down a relativistically invariant action. However, he did not use the derivation of the Lorentz force sketched in the notes. We believe that Feynman's contributions discussed here, while being of obvious historical value, also provide a novel route to the development of the foundations of electromagnetism, which can complement usual approaches.

References

- Feynman R. P., R. B. Leighton, M. Sands (1963a). *The Feynman Lectures on Physics*. Reading (Mass.): Addison-Wesley.
- Feynman R. P. (1963b). "Alternate way to handle electrodynamics" [online]. URL: <http://www.feynmanlectures.caltech.edu/info/other/Alternate_Way_to_Handle_Electrodynamics.html> [access date: 20/06/2020].
- Feynman R.P. (1966). *Feynman Hughes Lectures. Volume 1: Astronomy, Astrophysics and Cosmology. Notes taken and transcribed by John T. Neer* [online]. URL: <http://www.thehugheslectures.info/wp-content/uploads/lectures/FeynmanHughesLectures_Vol1.pdf> [access date: 20/06/2020].
- Feynman R. P. (1967). *Feynman Hughes Lectures. Volume 2: Relativity, Electrostatics, Electrodynamics, Matter-Wave Interactions. Notes taken and transcribed by John T. Neer* [online]. URL: <http://www.thehugheslectures.info/wp-content/uploads/lectures/FeynmanHughesLectures_Vol2.pdf> [access date: 20/06/2020].
- Feynman R. P., F. B. Morinigo, W. G. Wagner, B. Hatfield (1995). *The Feynman Lectures on Gravitation*. Reading (Mass.): Addison-Wesley.
- Jackson J. D. (1998). *Classical Electrodynamics*. New York: Wiley.
- Landau L. D., Lifshits E. M. (1975). *The Classical Theory of Fields*. 4th ed. Oxford: Pergamon Press.
- Page L. (1912). "Derivation of the fundamental relations of electrodynamics from those of electrostatics". *American Journal of Science*, 34, pp. 57-68.
- Purcell E. M., D. J. Morin (2013). *Electricity and Magnetism*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Susskind L., Friedman A. (2017). *Special Relativity and Classical Field Theory*. United Kingdom: Penguin Books.

Weiner C. (1966). *Interview of Richard Feynman by Charles Weiner*. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA [online]. URL: <www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/5020-1> [access date: 20/06/2020].

Prolegomena to a study on analogy in modern physics: the case of spontaneous symmetry breaking

Rocco Gaudenzi – Max Planck Institute for the History of Science
rgaudenzi@mpiwg-berlin.mpg.de

Abstract: The conceptualization of spontaneous symmetry breaking, put forward by Yoichiro Nambu and Giovanni Jona-Lasinio in two landmark papers issued in 1961, was rendered possible by the progressive interweaving, on the one hand, of many-body methods from atomic and solid-state physics; and on the other, of the language, techniques and motivations provided by high-energy physics. Exhuming this conceptual network and outlining its salient steps, I show how prominent a role analogical reasoning had in its construction, and more specifically, in turning ideas developed in one domain into tools deployable in another disciplinary context.

Keywords: Cross-disciplinary analogy, Spontaneous symmetry breaking.

1. Introduction

In 1961, a pair of papers entitled *A dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity*, authored by Yoichiro Nambu and Giovanni Jona-Lasinio (Nambu, Jona-Lasinio 1961), marked the appearance of the first instance of what would be shortly after named “spontaneous symmetry breaking”, and which would become foundational in the nascent Standard Model of elementary particles.

As hinted at in the title of the two papers, the key to this discovery is an analogical transfer from one of the domains of solid-state physics (superconductivity) to elementary particles physics, based on a correspondence between the emergence of the superconducting *gap* in a solid and the acquisition of *mass* by originally massless particles.

While this analogy itself has been studied, rarely it has been embedded into the context that *supported* it, thus leaving us with the wrong impression that it does surface out of nowhere, so to speak. What emerges instead, upon framing it in a larger perspective – both time-wise and discipline-wise – than customarily done, is that it is the result of a decade-long *cultivation* of an analogical sensitivity, as well as the final outcome of a *series* of cross-disciplinary analogical transfers weaving into an articulated conceptual network.

In this brief communication, after a short introduction of the main concept, we will outline this conceptual network, emphasizing in particular Nambu’s use of analogy as a way to move across, or *diagonally*, with respect to the parallel – i.e., independently

advancing – disciplinary threads of general solid-state physics, superconductivity, and particle physics. Given the modest space here, we are forced to refer the reader to a forthcoming monograph for the extensive discussion.

1.1. Spontaneous symmetry breaking in few words

The core of the argument at the base of the so-called Nambu-Jona-Lasinio’s dynamical model is to show how a simple Hamiltonian featuring a *massless* – thus invariant under chiral transformations – and self-interacting fermion can in fact give rise to a composite particle which is instead *massive*. In this way, a fundamental property like mass, that had hitherto been explicitly written in the Hamiltonian as a parameter, is instead dynamically generated as a consequence of a primary interaction. Since a so *spontaneously* generated mass *breaks* the chiral symmetry of the ground state which is intact in the original Hamiltonian, the violation, the authors argue, is only apparent. Indeed, it is found out that a mass so generated is always necessarily accompanied by the emergence of collective excitations (bosons) in such a way that the system as a whole (ground *plus* excited states) possesses in fact the full symmetry of the Hamiltonian.

What leads to such an idea becomes clear when considering it in relation to the one particular problem emerged in the context of a theory of the weak force, as we will see below.

2. The conceptual network and Nambu’s pathway

In Figure 1, the conceptual network that concurred in the uncovering of spontaneous symmetry breaking is shown. At a glance, the layout and the colour-coding (see figure caption) reveal the network’s basic characteristic: it includes problems and techniques from nuclear and solid-state physics (in green), quantum field theory (quantum electrodynamics in dark red; weak interactions in orange), with a particular prominence given to superconductivity (in blue). These disciplinary threads, arranged roughly in parallel from top to bottom to emphasise their independent development, are visibly crossed by a “diagonal” pathway that begins in the early 50s (top left) and ends with the two publications from 1961 (bottom right). Nambu is the main protagonist of such decade-long cross-disciplinary path leading to the concept of spontaneous symmetry breaking.

In order of their chronological relevance, in the following we recall the developments of non-perturbative techniques in solid-state and nuclear physics, then those of the weak interactions and superconductivity. While the former is subject of Nambu’s early speculations, the latter two had an independent course until they happened to pose crucial problems which would be the task of spontaneous symmetry breaking to be resolved.

2.1. Non-perturbative methods in solid-state and nuclear physics

When confronted with an *ab-initio* treatment of the atomic nucleus, the well-known difficulty is that, due to the large coupling constant, the nucleons cannot be treated with perturbative methods. A partial solution to this problem, proposed already in the mid-30s (Bethe, Culver 1936), consisted in employing non-perturbative methods, developed few

years earlier, to address many-body problems in solid-state physics, prominently the Thomas-Fermi and the Hartree-Fock approximation methods. The resulting nuclear models are, however, necessarily rather rough: they are based on an interparticle potential modelled after the electron-electron interaction in atoms (with no mesons involved), and non-relativistic in nature.

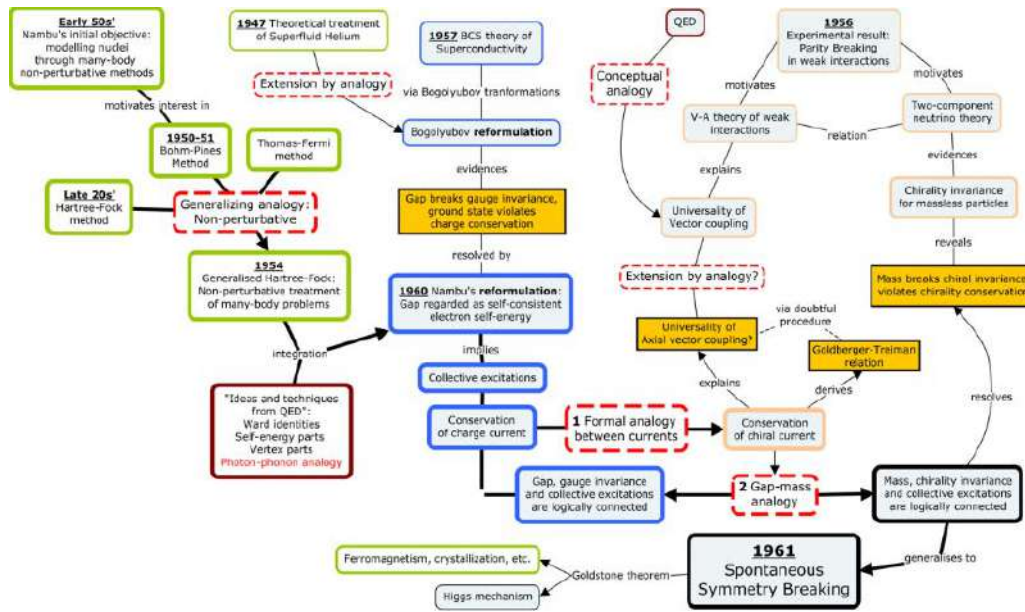


Fig. 1. The diagram schematically mapping the conceptual network behind the concept of spontaneous symmetry breaking. Crossing the diagram from top left to bottom right is (highlighter in bold) Nambu’s decade-long way to it. His initial interests, pertaining nuclear and solid-state physics questions (green), lead Nambu to recognise an analogy (red dashed rectangle) between three non-perturbative treatments of many-body problems, and generalise it in 1954. Through the integration of the latter with ideas techniques used previously in quantum field theory of elementary particle (dark red), he is able to offer a solution to the problem (yellow rectangle) of gauge invariance in the BCS theory of superconductivity (blue). A formal analogy between the charge current in a superconductor and the chiral current in weak interactions suggests a deep analogy between the superconducting gap and the mass in elementary particle theory. In this way, mass can be regarded as a dynamical property, solving an incompatibility that had meanwhile arisen as a consequence of the discovery of parity violation. The realisation that these are two instances of the same general phenomenon of spontaneous symmetry breaking lays the conceptual base for the standard model of elementary particles as well as a unified framework to treat a large variety of analogous phenomena in solid-state physics.

In his first independent speculations of the late 40s and early 50s, Nambu sets out to refine the existing approach, surpassing the idea of “classical” interparticle potential in favour of a field-theoretical picture – which could appropriately include the exchange mesons. Remaining receptive for inputs on how to carry this out, he recognises in the “collective description” proposed by Bohm and Pines in 1951 (for reference, see, e.g., Bohm, Pines 1953) a crucial hint. Applying a canonical transformation to the interacting

electron gas, Bohm and Pines had provided an approximate description of it based on two dynamical variables: one for the (average) collective motions of electrons as a whole; and another for the deviations of the individual electrons from that average. To the former, there corresponded a modified electromagnetic field, the so-called plasma field, which incorporated, in an effective and *self-consistent* way, the interaction with the charge distribution. Now, regarding the plasma field as a free electromagnetic field renormalized by the presence of electric charge, Nambu and Kinoshita (1954), are able to recast the Bohm and Pines' method in the language of quantum field theory, and use the renormalization procedure *actively* to derive the properties of the plasma field. This 'generalised Hartree-Fock' picture is not only a more general scheme under which the three mentioned approximation methods (Thomas-Fermi, Hartree-Fock, and Bohm-Pines) are recognised as analogous and subsumed; but also turns out to provide, six years later, the basic structure to successfully reframe superconductivity first, and elementary particle theory then.

2.2. Two open fronts in the theory of the weak interactions

As far as weak interactions are concerned, the period 1955-1958 saw two important developments, that can be followed schematically on right hand side of the scheme in Figure 1. In providing new theoretical frameworks which accounted for the freshly discovered parity violation, both these developments were successful steps forward, while, at the same time, uncovering what would be then recognised as the two facets of a single problem.

The two-component neutrino theory proposed by Abdus Salam (1956) recognises chiral symmetry – the product of parity *and* charge conjugation – as the new key symmetry of weak interactions. Compatible with experimental findings, this theory works for the massless neutrino, but leads to a paradox upon attempting to extend it to massive particles, thereby revealing an incompatibility between mass and chirality symmetry.

On a second front, parity violation leads Richard Feynman and Murray Gell-Mann (1958) to propose the "V-A theory" of Fermi interaction based on the assumption that weak particles interact through an equal proportion of vector (V) and axial-vector (A) coupling. The scheme reveals rather successful and can explain, the universality of vector coupling on the basis of an analogy with quantum electrodynamics. On the other hand, due to experimental discrepancies, the theory left open the question of the universality of the counterpart coupling: that is, whether the universality fulfilled by vector coupling could be extended, by analogy, to the axial-vector coupling.

Assuming this analogic extension to obtain, the two dispersion theorists Marvin Goldberger and Samuel Treiman (1959) derived a simple formula relating the strength of the weak and the strong coupling constants. In its surprising simplicity and experimental accuracy, the formula enticed the particle physics community. On the other hand, the questionable way it is derived does actually give less of a handle on the problem of universality, than it creates a parallel problem. In retrospective, not without a benefit though: the link between weak and strong forces provided by the relation, coupled with its relatively shaky derivation, renders it attractive and so spurs several physicists to

derive it from more solid premises. None of the attempts is fully satisfying though, but one which, once again, draws on solid-state physics; and in particular, on superconductivity.

2.3. An open problem in superconductivity

The long quest for the microscopic mechanism of superconductivity came to a crucial resolution in 1957 with the so-called BCS theory, proposed by and named after John Bardeen, Leon Cooper and Robert Schrieffer (1957). The theory explains indeed most of the qualitative salient features of the known superconductors, and is able to quantitatively reproduce the experimental results. It is not just a success though, as a theoretical problem parallel to that in weak interactions, lurks in the background of the BCS theory too.

A reformulation of the theory was proposed shortly after by Nikolai Bogolyubov (1958) based on a canonical transformation analogous to the one used to treat superfluidity ten years before. This elegant treatment reproduces all the results of BCS, predicts the existence of collective excitations, and exposes its main problem with clarity: the presence of the energy gap in a superconductor appears to be incompatible with gauge symmetry, thereby violating a crucial premise of electromagnetism that expresses the conservation of electric charge.

2.4. The cross-disciplinary resolution

The realisation of the flaw of the otherwise successful BCS theory of superconductivity attracts quite some attention and calls for solutions. Here is where Nambu resurfaces, and his previous work and cross-disciplinary inclinations turn out crucial to find the way out.

He provides (Nambu 1960) his own reformulation of Bogolyubov's reformulation, integrating the generalised Hartree-Fock method developed earlier with ideas and techniques like self-energy, vertex operator and Ward identities, that are borrowed from quantum electrodynamics. Leveraging on the analogy between photons and phonons, the superconducting gap is then modelled as a dynamical quantity after the electron self-energy in electrodynamics. By the way of the same analogy, a modified current operator is proposed which yields a conserved electric charge current by *implying* the existence of collective excitations. Nambu's excitations are in fact the same ones that were already found by Bogolyubov, with the difference that now they perform a clear function: they restore that gauge invariance which is spontaneously broken in the superconducting ground state due to the energy gap. In this way, the gap, the gauge invariance and the collective excitations become logically connected manifestations, consequences of one another.

The new picture not only solves a fundamental theoretical problem in the theory of superconductivity, but gives Nambu also a vantage viewpoint on the still unresolved parallel problems in weak theory. Exploiting the formal analogy between the conserved charge current in the superconductor and the chiral current in the weak interactions, the weak current operator is reinterpreted as implying the existence of related collective excitations (identified as the pions). This justifies the conservation of chiral charge and the corresponding universality of the axial-vector coupling, and offers a transparent derivation of the formula proposed by Goldberger and Treiman. It is the expression of the

conserved current that suggests the further analogical correspondence between gap and mass, which in turn allows to recognise between mass, chirality invariance and the pions the same logical necessity found in superconductivity. This solves the problem opened by Salam's theory and allows to see how the two blocks of phenomena are the consequence of a general phenomenon called spontaneous symmetry breaking.

The mechanism proposed by Nambu and Jona-Lasinio, through its phenomenological generalisation by Jeffrey Goldstone, leads to the Higgs mechanism, on the one hand; and to the rationalisation of a plethora of long-known and most evident phenomena in many-body solid state physics, like ferromagnetism and crystallisation. A long excursion with a rich booty that eventually returns to feed its roots.

3. Conclusive remarks

By putting the concept of spontaneous symmetry breaking in its wider temporal and "spatial" context, I hope to have shown that the cross-disciplinary analogy that generated it is much less of an innocent isolated illumination, than the final leap in a network featuring different phases and threads of physics, and itself resulting from a systematic perception of analogical resonances between a variety of domains. By that means, ideas and techniques are first transferred from solid-state physics and quantum field theory to tackle nuclear problems, from quantum electrodynamics to superconductivity, wherefrom they eventually illuminate elementary particle physics at large, and feed back onto solid-state physics. In this way, those ideas and techniques which emerged in a certain context and were created for a specific problem turn into the *tools* to tackle other problems in other disciplinary contexts upon a creative *bricolage*-like adapting and re-purposing.

References

- Bardeen *et al.* (1957). "Theory of superconductivity". *Physical Review*, 108 (5), pp. 1175-1204.
- Bethe H., Bacher R. (1936). "Nuclear Physics". *Review of Modern Physics*, 8, pp. 82-228.
- Bogolyubov N. (1958). "A new method in the theory of superconductivity. I". *Soviet Physics*, 34 (7) pp. 41-46.
- Bohm D., Pines D. (1953). "A collective description of electron interactions". *Physical Review*, 92 (3), pp. 609-625.
- Feynman R., Gell-Mann M. (1958). "A theory of the Fermi interaction". *Physical Review*, 109 (1), pp. 193-198.
- Goldberger M.L., Treiman S.B. (1959). "Decay of the Pi Meson". *Physical Review*, 110 (5), pp. 1178-1184.
- Nambu Y. (1960). "Quasi-particles and gauge invariance in the theory of superconductivity". *Physical Review*, 117 (3), pp. 648-663.

-
- Nambu Y., Kinoshita T (1954). “The collective description of many-particle systems”. *Physical Review*, 94 (3), pp. 598-617.
- Nambu Y., Jona-Lasinio G. (1961). “Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity”. *Physical Review*, 122 (1), pp. 345-358.
- Salam A. (1956). “On parity conservation and neutrino mass”. *Il Nuovo Cimento*, 5 (1), pp. 299-301.

Toward a computational history of science: The dynamics of socio-epistemic networks and the renaissance of general relativity

Roberto Lalli – Max Planck Institute for the History of Science
– rlalli@mpiwg-berlin.mpg.de

Dirk Wintergrün – Max Planck Institute for the History of Science
– dwinter@mpiwg-berlin.mpg.de

Abstract: The exploding amount of available historical data provides intriguing possibilities as well as major challenges to historians of science. In the last years, several quantitative methods have been developed in order to analyze historical data. At the same time, new analytical frameworks need to be developed to bring together quantitative methods with the more traditional historians' toolkit. The present paper has a twofold aim. The first one is to briefly review major quantitative approaches that have been developed in the history of science in two areas: data modeling and network analysis. The second part of the contribution focuses on applications of social network analysis to the evolution of knowledge systems. We propose a methodological and conceptual framework aiming at uncovering the dynamical transformations of intra- and inter-connections within and between different *layers* of the scientific enterprise. We define knowledge networks as being composed of three different layers: the social network, the semiotic network, and the semantic network. The first is defined as the collection of relations involving individuals and institutions. The semiotic network is defined as the collection of the material or formal representations of knowledge. The semantic network is the collection of knowledge elements and their relations. We call *socio-epistemic networks* the interlinked set of these three levels. As an illustration of this methodology results drawn from our own work on social and conceptual changes in the history of general relativity in the 20th century will be presented.

Keywords: Computational history, socio-epistemic networks, general relativity.

1. Introduction

This paper aims at providing a short review of some of the main approaches of an emerging research field called “computational history of science”, with a focus on the methodological and conceptual framework of *socio-epistemic networks* elaborated by the authors

and others at the Department 1 of the Max Planck Institute for the History of Science (Renn *et al.* 2016). The computational history of science is a branch of research within the history of science that has been growing quite rapidly in the last few years. While still marginal, and in some respects controversial, its relevance within the international landscape has sensibly increased, as shown by a recent issue of the journal *Isis*, which dedicated the Focus session to this topic (Gibson *et al.* 2019; Laubichler *et al.* 2019). In the short space of this article we will not be able to do justice to the variety of approaches and the results obtained with them, nor will we be able to fairly address the various criticisms that have been raised against the excessive use of quantitative approaches. However, we hope that by summarizing some major approaches we shall convey a sense of the richness, potentiality, and challenges of computational perspectives in the history of science.

The paper is structured as follows. In the second section, we will provide a historiographical introduction in which we situate the computational history of science within the disciplinary frameworks of the history of science, digital humanities and quantitative history. In the third section, we will review computational methodologies in the humanities that are particularly relevant to the history of science in two areas: data modeling and network analysis. In the fourth section, we will present the framework of the socio-epistemic networks, which integrates various methods for addressing questions of relevance in the history of science. We will finally present, in section five, some applications of this framework to the case study of the history of general relativity which result in new perspectives on the phenomenon named the renaissance of general relativity, namely, the return of general relativity to the mainstream of physics in the post-World War II period after a thirty-year period of stagnation.

2. Historiographical discussion: between digital humanities and quantitative history

The use of quantitative methods in the history of science, or more generally, in the humanities, is a still controversial topic. Computational approaches, like any other methods, are not neutral and might be highly misleading, if used uncritically. Moreover, they have far-reaching conceptual and epistemological consequences which are yet to be understood. No doubt, the emerging community connected to this field hopes that computational methods will in the future provide sound mathematical models of complex historical processes, in order to understand *longue durée* dynamics taking into account the interrelation of factors of a different nature: social, cultural, economic, scientific, and so on. The search of general principles governing historical processes is, in other words, one ambitious goal of this emerging field in line with the program of *cliodynamics* aiming at transforming history into an analytical science (Turchin 2008, 2010). Most historians of science who are using these methodologies are, however, aware of the possible perils of the misuse of computational techniques. They are rather promoting a mixed approach that combines computational and other techniques of the historians' toolkit in a complementary fashion. This move is supported by the observation that, whatever our personal predisposition toward digital technologies, they are so widespread that they are deeply

affecting our scholarly practices anyway. The ideological opposition to computational approach and, *vice versa*, an uncritical embracement of it are both considered unproductive, while a better understanding and a careful application of these methods can do much for the field of the history of science in the near future. This is the view we also embrace in our work, even though it must be recognized that there is still much work to be done in order to create and improve the connections between quantitative and qualitative methods and fully open the black boxes of computational methods.

The current rise of the computational history of science is a consequence of a world-wide radical transformation in the way information is stored, accessed and transferred. An article published in *Science* in 2011 has showed how the greatest amount by far of stored information is now in the digital form (Hilbert and López 2011). One of the authors has even proposed to define the beginning of the digital age in the early 2000s, when digital storage started becoming larger than analog storage at a rapid pace (Hilbert 2012). Like many other human activities, our scholarly profession has now become almost unthinkable without computers, PDFs, search engines, online journals, digital databases, and so on. This is a phenomenon certainly not limited to the history of science or to history, but to the entire range of the humanities. As American historian Lincoln Mullen (2010) wrote in 2010, “we are all digital humanists now!”

But, the turn toward the computational history of science is not simply, nor uniquely, related to the, inevitable, growth of digital methods in historical research and scholarly communication practices. With computational history of science, one does not mean simply the intersection of the history of science with digital humanities. There is a second trend that flows into the computation approaches, and it is what is called the *second wave of quantitative history*. The first wave had its apogee in the 1970s, when quantitative methodologies became popular in historical research, in connection with an increasing interest in social and economic histories, comparative approaches, *long durée* perspectives, all areas that were forcefully stimulated by the *Annales* school of historiography (Trevor-Roper 1972). After an initial enthusiasm, this first wave of quantitative history known as “new social history” encountered substantial criticisms in the 1980s when many saw that quantitative and statistical methods were not providing what they promised to achieve: these approaches were extremely expensive, dragging away huge resources that could be used for many more projects; the authors failed to make the assumptions at the basis of their analysis - as well as part of their results - accessible to the entire scholarship; most of the findings turned out to be either obvious or wrong; many research approaches did not take into due consideration the biases in the historical data themselves, etc. (Stone 1979, Lemercier and Zalc 2019; Gibson and Ermus 2019).

While many of the criticisms raised at the time are still important challenges in the application of computational approach, the widespread accessibility of computational facilities and digitalized historical sources has enormously improved the feasibility of data-driven quantitative approaches. This has given hope that computationally intensive methods can revive the historians’ ambition to investigate and understand *longue durée* processes, against the trend of focusing on local practices characterizing much scholarship from the 1990s onward. The authors of *The History Manifesto* made it explicit by underlining how the new technological lens of digital analysis, together with the increasingly

availability of big data, make the new *longue durée* perspectives much more dynamic and flexible than previous attempts (Guldi and Armitage 2014).

Strikingly enough, the digital technology-driven second wave of quantitative history is not only going in the direction of sparking a return to grand narratives of the past. It is also increasingly employed to develop new approaches to microhistory. French historians Claire Lemerrier and Claire Zalc are promoting the application of quantitative methods to microhistory by arguing that, with the correct use of statistical sampling and careful assessment of data availability, each scholar can successfully apply quantitative methods to small, but indicative, samples that might reveal interesting and under-recognized historical patterns (Lemerrier and Zalc 2019).

The emerging field of computational history of science situates itself within these broad movements of digital humanities, and the *second wave* of quantitative history sparked by the digital revolution. The question is then what specifically characterizes the history of science, or, more broadly, of knowledge with respect to other branches of historical research in terms of application of computational methods. In other words, the question is whether the history of science has features that require specific methodological and conceptual approaches within the spectrum of computational techniques.

The response to this question is far from straightforward, and it is difficult to identify a consensus in the emerging community. We believe, however, that the history of knowledge does, in fact, require some specific approaches that look at complex systems comprehending layers of very different types¹. In this sense, the network theoretical framework emerges as the most promising approach to bring together digital humanities and the history of science, as it allows a joint investigation of the dynamics of such layers and the interrelations between them, as we shall discuss in our presentation of the socio-epistemic networks in Sec. 4. A more general perspective concerns the application of the evolutionary framework drawn from biological sciences to the history of science. Those who propose this view, such as historians of science Jürgen Renn and Manfred Laubichler, don't use the evolutionary framework at the metaphorical level. Rather, they specifically contend that the extended evolutionary theory might explain, rather than describe, what is indeed called the evolution of knowledge (Renn 2020; Renn and Laubichler 2017). Renn and Laubichler are also two of the main proponents of the computational history of knowledge and explicitly relate the use of computational methods with novel interpretations of historical processes within the evolutionary conceptual framework, as computational methods bring a “new ontology and epistemology of knowledge” (Laubichler *et al.* 2019, p. 504). The approach of socio-epistemic networks has certainly its origins within these perspectives, but we contend that the evolutionary conceptual framework is not necessary to make sense of it. The methods themselves, indeed, do not rely on the assumptions connected to the evolutionary view of the history of knowledge, although one might of course give a stronger interpretative account within the evolutionary perspective.

¹ For the relations between history of science and history of knowledge see: (Renn 2015).

3. Review of digital methods in historical research

After this brief introduction, we will give a sketch of approaches in areas that are necessary to conceptualize and build the framework of socio-epistemic networks: data modeling and network analysis.²

3.1. Data modeling

Reliable data retrieval is one of the biggest challenges in the computational history of science. There is still no standardized way to keep and store data. Each research project has its own data repository, and the collected data are strongly dependent on the questions the specific project is aimed to address. In general, these data are not openly available, and, in any case, the lack of standards makes them difficult to re-utilize in subsequent analyses. To become more effective, computational approaches need a standardization of the taking, storing and transferring of data (Damerow and Wintergrün 2019).

A relatively recent method to overcome these difficulties consists of building semantic models of data in machine-readable specifications. Semantic data modeling aims at presenting and storing data in a logical way by giving semantic information attached to the data. This modeling allows, in principle, to quickly retrieve a set of interlinked data through semantic queries. The most common of these machine-readable specifications is the RDF (Resource Description Framework) families of abstract specifications, which normally uses the triple subject/predicate/object as the unit of analysis (Wintergrün 2019).

To make these models interpretable outside the specific domain where they were originally build for, these models should be based on reference models, i.e. internationally standardized conceptual frameworks for the description of information that have been designed by a recognized community of experts. Currently, the most promising approach for semantic modeling of historical data is to moderately extend the CIDOC/CRM, namely the Conceptual Reference Model developed by the International Committee for Documentation for the object-based description of cultural heritage documentation. The CIDOC/CRM and its extension FRBRoo (Functional Requirements for Bibliographic Recodes – object oriented) are intended to become the standard reference model for the description of the underlying semantic of bibliographical and museum information (Doerr 2003). One example of complex data modeling based on the CIDOC/CRM framework is the database CorpusTracer created by Matteo Valleriani and Florian Kräutli, for the project *De Sphaera*, which investigates the commentary tradition of the thirteenth century university textbook *Tractatus de Sphaera* by Johannes de Sacrobosco. The data about each book included in the dataset are stored as triples in RDF and modeled using the FRBRoo extension of the CIDOC/CRM reference model. Their

² In our paper we could have included a review of a number of computational methods for textual analysis that are being developed to extract and visualize data and meta-data from large textual corpora (for an introduction see Moretti, 2013). Within the perspective of the socio-epistemic networks, these methods are extremely relevant to produce what we call semantic networks out of the material representations of knowledge (see Sec. 4). We didn't include such a review because of lack of space.

semantic data model captures bibliographic data of each treatise as well as data on the individual texts they contain (Kräutli and Valleriani 2018).

3.2. Network analysis

Once captured in standardized and machine-readable forms, data can be visualized and analyzed in multiple ways, depending on the historical questions one wants to address. One of the most used computational methods in the history of science is based on notions, methods and tools of network theory (Barabási *et al.* 2006). Network theory is a branch of graph theory, which, in turn, is the branch of mathematics modelling pairwise relations between discrete objects. As a possible formalization of complex dynamic (discrete) systems, network theory applies graph theoretical notions to the study of a wide range of structures in a variety of disciplines including physics, biology, engineering, computer science, economics, sociology etc. In network theory, the entities and the relations between them have been called in very different ways, according to the specific spheres of application. In this paper, we will call *nodes* the entities and *edges* the relations between them. Formal methods of network theory allow answering specific structural questions concerning complex data on relations and about how these relations are connected to the features (*attributes*, in network parlance) of *nodes* (see Fig. 1).

In addition, formal methods require giving some precise assessments of the biases present in the historical sources and on missing elements (Lemerrier 2015). Taken together, these features give the possibility of rethinking the history of science from a new perspective and build new narratives, focusing on the relational structures of the scientific enterprise and on their change over time. Only recently, a new generation of scholars has started to use formal network analysis tools to investigate historical data. This trend has given rise to a new research field and scholarly community, which has as a reference point the online platform *Historical Network Research*, and the related online journal established in 2017, which has the purpose of bridging traditional hermeneutics of historical research with the more technical methods of network analysis (Düring 2017).

The application of network theory to sociology, called Social Network Analysis (Wasserman and Faust 1994), constitutes the major conceptual and methodological reference in such historical studies, which aim at investigating from the historical perspective the relevance of individuals through various centrality measures, the structure of communities, the distance between actors, and so forth.³ While the most studied, social networks are only one of the possible areas of applications of complex network theory to the history of science. Another important application is what physicist Mark Newman (2003) calls the information or knowledge network. This network is not precisely defined in Newman's review, but might be interpreted as the network of relationship between knowledge products. Well-known examples are the various networks that might be created out of the patterns of citations. Another well-known example is the *World Wide Web*,

³ In network theory, *centrality measures* are a set of formulas aimed at identifying the most important nodes in a network's structure. The *distance* between two nodes is instead defined as the number of edges in the *shortest path* connecting them.

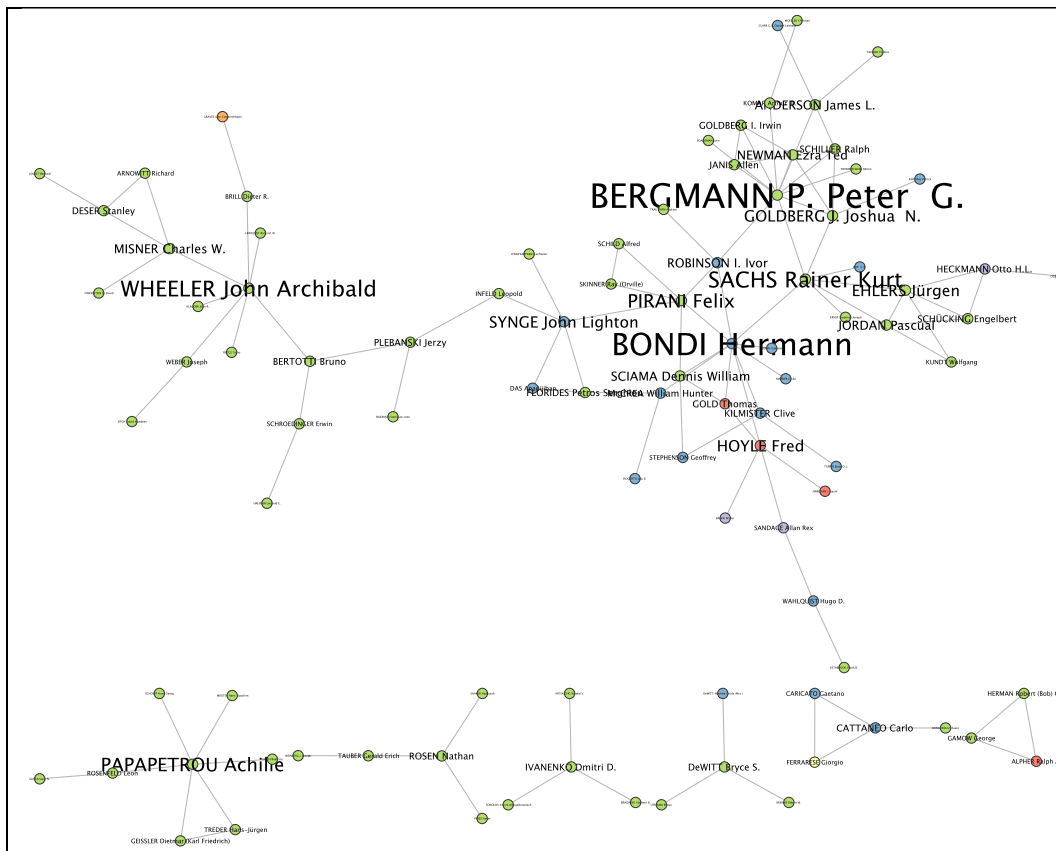


Fig. 1. The image represents a social network in which the nodes are the scientists who were active in research on topics related to general relativity in 1960. The edges represent collaboration links that had taken place within the previous 8 years (namely, between 1952 and 1960). The image shows also one specific attribute of the scientists, namely, the disciplinary domain of the nodes' PhD or, alternatively, of their highest degree: physics (green), mathematics (blue), astronomy (purple), astrophysics (dark orange). The size of the nodes' labels is proportional to the number of edges. This number is called *degree centrality*, which is one way to measure the structural relevance of each node in the network. Historical questions might be, for instance, related to the changing relations between disciplines in the field of general relativity, the importance of specific figures in connecting the network in specific periods, and the identification of different social groups within the network.

which is the network of web pages connected by hyperlinks. A different, and important, kind of network is the one of written words connected through some kinds of relations, such as the co-occurrence in textual units. We can then form a network of words, to which we can apply the various techniques for community detection or *centrality measures*, etc. (see, e.g., Leydesdorff and Welbers 2011).

4. The framework of the socio-epistemic networks

As we mentioned in Sec. 2 the framework of socio-epistemic networks has been elaborated to properly address questions pertaining to the field of the history of knowledge. In the scholarly tradition of the history of science one of the main goals has become to properly address the role of social factors in the production, circulation, and certification of knowledge. In the past decades, various approaches have been developed to connect the social history and the intellectual history of the scientific enterprise. We propose that the approach of socio-epistemic networks has the potential to bridge in a coherent conceptual way the socio-historical analyses of scientists and institutions with the history of ideas and their representations.

Within the perspective of the historical epistemology pursued in our department, we understand knowledge as complex systems of encoded experience represented in material forms by actors in specific social settings. This view is based on the assumptions that knowledge structures have three fundamental layers. The first level is composed of *social actors*, which might of course be individuals, social groups and institutions and the complex relations between them.⁴ *Nodes* in the social network might be connected by multiple types of *edges* and have different *attributes*. The social network is itself a very complex structure, whose boundaries strongly depend on the questions one wishes to address. The second level is the *semiotic network*. This rests on the assumption that knowledge is always represented and transmitted by material embodiments that carry meaning. Artifacts, symbol systems, publications are all examples of *semiotic networks*. The *semiotic network* is the set of these material representations of knowledge and the semiotic connections between them. The *semantic network* is composed of cognitive elements that are semantically related to each other. There is no direct access to these cognitive elements in the historical data, so we need proxies in the semiotic network that we might hypothesize to be closely related to the underlying semantic structure. The *nodes* might for instance be words or phrases that represent relevant concepts, and the *edges* might be retrieved by their *co-occurrence* in written texts or parts thereof.⁵

Scholars of various disciplines, including historians, have been interested in all these layers and have developed tools to investigate each layer in a variety of manners. What has been done much more rarely is to connect the analysis of these three layers in order to provide a unified, synthetic framework for the dynamics of knowledge structures (for an exception, see Mutschke and Haase 2001). At the more basic level, this unified approach creates many more *edges* between entities through the process of projecting intra-level and inter-level *edges* into one layer. This approach provides insights on layers of our socio-epistemic network that are notoriously more difficult to analyze on the basis of the available historical sources, such as the *semantic layer*. It is much easier to define and identify social connections (*edges* of the *social layer*), than connections between abstract entities such as concepts, ideas, or research agendas. Let's suppose, for example,

⁴ We use institutions and social groups only as actors, if historical evidence does not allow the identification of individuals in actions. A more precise formulation would introduce institutions and groups as graphs, so that interactions between them have to be formulated as hypergraphs.

⁵ In textual analysis, *co-occurrence* is the paired presence within a textual unit (e.g., abstracts, paragraphs, sentences, etc.).

that two scientists A and B (*nodes* in the *social layer*) are working on two different research agendas C and D, respectively (*nodes* in the *semantic layer*), which means that there are two inter-layer *edges* connecting the *social* and the *semantic layers* (between A and C, and B and D, respectively). In case A and B start collaborating at a certain point in time (and then create an intra-layer *edge* in the *social layer*), the socio-epistemic network approach leads to the hypothesis that at the same time an intra-layer *edge* is created in the *semantic layer* between research agendas C and D. This procedure is a projection of a connection in the *social layer* we have historical evidence about (e.g., A and B writing a paper together) in the *semantic layer*.

This is just the basic gain that one can obtain if one uses this taxonomy. The more ambitious goal is, however, developing dynamic models of how changes at one level impact the dynamics of other layers, which in turn enables the historians to formulate sound hypotheses on causal relationships on historical processes. The task is formidable, as it requires new mathematical techniques in the generalization of network theory, called multilayer network analysis. This is a relatively new branch of complex system research that studies in a unique formalism the structure and dynamics of various complex networks with different kinds of *nodes* and relations, both between the layers and within the layers (Bianconi 2018).

4.1. The socio-epistemic network of general relativity, 1925-1970

While we are still developing the methodology, we can already present some results from our project on the history of general relativity obtained by using the conceptual apparatus of socio-semantic networks and, partially, its methods. General relativity is now considered one of the pillars of modern physics, but it did not reach this status soon after the famous confirmation by Eddington in 1919, as it is commonly believed. It has been convincingly argued that general relativity remained a marginal theory of little interest to theoretical physicists for many years from the mid-1920s to the mid-1950s, after which it gradually returned to the mainstream of physics (Eisenstaedt 1986). We apply our framework of the socio-epistemic networks to give a quantitative and robust assessment of this change in the status of the theory, between what has been called the *low-water-mark* period and what is coined the *renaissance of general relativity*, and provide a more clear and systematic definition of this transformation (Will 1989).

Through the analysis of the dynamics of the collaboration networks of general relativity, we have provided robust evidence that there was a radical shift in the structure of such networks around 1960, when a giant component started forming at a rapid pace. While the number of authors working on general relativity (the *nodes* of the entire network) started increasing soon after World War II, this did not have immediately a significant impact on the topology of the network and on the connectivity between individuals. A significant shift occurred only fifteen years after the end of World War II, but before the discovery of quasars in 1963. Through this analysis we found that the structural change in the social dimension of general relativity research was, first, independent from serendipitous astrophysical discoveries in the 1960s, and, second, not immediately depending on the rapid increase of the number of physicists following World War II. Our

analysis disproves common explanations of the renaissance process. It shows that this phenomenon was not a consequence of astrophysical discoveries in the 1960s, nor was it a simple by-product of socio-economic transformations in the physics landscape after World War II. There was a more complex mechanism that took time to affect the topology of the network, but concerned the internal social dynamics of the scientists working on general relativity-related subjects. With more qualitative analysis and close analysis of the network, one sees that these changes were related to two social changes: the widening of the practice of long postdoctoral education in the 1950s, and the self-organization of the emerging international communities, especially with organization of the first conferences specifically dedicated to gravitation physics from the mid-1950s onward (Lalli *et al.* 2020).

To understand how knowledge changed in the same period, we have studied the *semiotic network* of general relativity using as a *proxy* the co-citation networks of most cited papers related to general relativity from 1947 to 1974 (Small 1973). We used a clustering algorithm to identify research agendas and visualized the outlook in a temporal arrow. For the study of the *semantic layer*, we identified the cluster's topics using algorithms on the titles of the citing articles. This analysis - carried on with the software *Citespace* (Chen 2017) - shows that a major shift occurred also at the *semio-semantic layer* exactly at the same time as the *social layer*, between the mid-1950s and the early 1960s. During the 1940s and 1950s - the last period of the *low-water-mark* phase - the involved scientists were focusing on attempts to substitute the theory of general relativity with a quantum theory of gravity, or a unified field theory of gravitational and electromagnetism or alternative cosmological models. Between the second half of the 1950s and the early 1960s, a unique large cluster of co-cited items emerged out of these different agendas, with papers in which scholars shifted their interest toward problems related to the theory of general relativity and its physical predictions, with a particular attention to gravitational waves. In the 1960s, scientists became involved in particular areas of research concerning the predictions of general relativity that were strongly related to specific astrophysical and astronomical discoveries made in the 1960s.

Combined with the results of our analysis of the social network, we claim that the renaissance process was a two-step process. During the first one, occurring between the mid-1950s and the early 1960s, a highly connected community of scholars formed, that reconfigured the research agendas on general relativity focusing on its role and effectiveness as a proper physical theory rather than a mathematical construct. We call this phase the renaissance of general relativity. The second step, which we call the astrophysical turn, represented a diversification of research agendas in the direction of relativistic astrophysics and physical cosmology of the emerging community strongly shaped by the recent discoveries in astrophysics (quasars in 1963, CMBR in 1964/1965, pulsar in 1968 and even the announcement by Joseph Weber that he had detected gravitational waves) (Blum *et al.* 2018). This analysis provides strong empirical support to previous interpretations proposed by our group (Blum *et al.* 2015, 2016).⁶

⁶ While the results of the dynamics of collaboration network has already been published, the part on the *semio-semantic network* will appear in more detail in Lalli R., Howey R., Wintergrün D. (2020), "The Socio-Epistemic

5. Conclusion

In this short piece, we aimed at showing that the computational history of science is an emerging field with strong potential, which comes with a full baggage of approaches, tools, open access software programs, as well as many challenges to be understood and solved. In spite of the potentiality, this approach is at the moment still marginal in the history of science for many reasons and controversies, some of which are connected to the difficulties in fully understanding these methods and not seeing them as black boxes. There is a steep learning curve that is of course quite worrying for practitioners and there is a justifiable resistance against the view that coding has to become indispensable expertise in the historians' toolkit.

To solve these fundamental problems and make full use of the possibilities of these methodologies, research practices and reward systems have to be considerably revised within the humanities. In fact, these sorts of projects might be fruitful only within a scheme of strong and close multi-disciplinary cooperation, including historians of science, mathematicians, statisticians, physicists, data and computer scientists, which is considerably different from the traditional, mostly solitary, works of historians of science. In a certain sense, this field requires a working environment more like the little-science style cooperation in the natural sciences.

If this sort of successful multi-disciplinary collaboration is achieved, these groups have the possibility to address major challenges of these methods: integration of quantitative and qualitative methods based on the greatest openness of assumptions; showing and limiting data biases, making the parameters' choice comprehensible to a non-expert audience, etc. Moreover, the multi-layer network theory is an emerging field and groups working in the computational history of science might contribute to the development of such a field providing questions, data and even possible approaches. Within this context, the approach of socio-semantic network is proposed as the way to address specific questions in the history of science with the aim to bridge tradition in the social and intellectual histories of science. ...

References

- Barabási A.-L., Watts D.J., Newman M.E.J. (2006). *The structure and dynamics of networks*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Bianconi G. (2018). *Multilayer Networks: Structure and Function*. Oxford, New York: Oxford University Press.
- Blum A., Lalli R., Renn J. (2015). "The Reinvention of General Relativity: A Historiographical Framework for Assessing One Hundred Years of Curved Space-time". *Isis*, 106, pp. 598–620.
- Blum A., Lalli R., Renn J. (2016). "The renaissance of General Relativity: How and why it happened". *Annalen der Physik*, 528, pp. 344–349.

- Blum A., Lalli R., Renn J. (2018). “Gravitational waves and the long relativity revolution”. *Nature Astronomy*, 2, pp. 534–543.
- Chen C. (2017). “Science Mapping: A Systematic Review of the Literature”. *Journal of Data and Information Science*, 2, pp. 1–40.
- Damerow J., Wintergrün D. (2019). “The Hitchhiker’s Guide to Data in the History of Science”. *Isis*, 110, pp. 513–521.
- Doerr M. (2003). “The CIDOC Conceptual Reference Module: An Ontological Approach to Semantic Interoperability of Metadata”. *AI Magazine*, 24, pp. 75–75.
- Düring M. (2017). *Historical Network Research. Network analysis in the historical disciplines*. [online]. URL: <<http://historicalnetworkresearch.org/>> [retrieved 14/12/2019].
- Eisenstaedt J. (1986). “La relativité générale à l’étiage: 1925 – 1955”. *Archive for History of Exact Sciences*, 35, pp. 115–185.
- Gibson A., Ermus C. (2019). “The History of Science and the Science of History: Computational Methods, Algorithms, and the Future of the Field”. *Isis*, 110, pp. 555–566.
- Gibson A., Laubichler M.D., Maienschein J. (2019). “Introduction”. *Isis*, 110, pp. 497–501.
- Guldi J., Armitage D. (2014). *The history manifesto*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hilbert M. (2012). “How much information is there in the ‘information society’?”. *Significance*, 9, pp. 8–12.
- Hilbert M., López P. (2011). “The World’s Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information”. *Science*, 332, pp. 60–65.
- Kräutli F., Valleriani M. (2018). “CorpusTracer: A CIDOC database for tracing knowledge networks”. *Digital Scholarship in the Humanities*, 33, pp. 336–346.
- Lalli R., Howey R., Wintergrün D. (2020). “The dynamics of collaboration networks and the history of general relativity, 1925–1970”. *Scientometrics*, 122, pp. 1129–1170.
- Laubichler M.D., Maienschein J., Renn J. (2019). “Computational History of Knowledge: Challenges and Opportunities”. *Isis*, 110, pp. 502–512.
- Lemercier C. (2015). Formal network methods in history: why and how?, in Fertig G. (ed.), *Social networks, political institutions, and rural societies*. Turnhout: Brepols, pp. 281–304.
- Lemercier C., Zalc C. (2019). *Quantitative Methods in the Humanities - An Introduction*. Charlottesville: University of Virginia Press.
- Leydesdorff L., Welbers K. (2011). “The semantic mapping of words and co-words in contexts”. *Journal of Informetrics*, 5, pp. 469–475.
- Moretti F. (2013). *Distant Reading*. London: Verso.
- Mullen L. (2010). *Digital humanities is a spectrum; or, we’re all digital humanists now*. [online]. URL: <<https://lincolnmullen.com/blog/digital-humanities-is-a-spectrum-or-we8217re-all-digital-humanists-now/>> [retrieved 11/08/2019].
- Mutschke P., Haase A.Q. (2001). “Collaboration and Cognitive Structures in Social Science Research Fields. Towards Socio-Cognitive Analysis in Information Systems”. *Scientometrics*, 52, pp. 487–502.

- Newman M. (2003). “The Structure and Function of Complex Networks”. *SIAM Review*, 45, pp. 167–256.
- Renn, J. (2015). “From the History of Science to the History of Knowledge – and Back”. *Centaurus*, 57, pp. 37–53.
- Renn J. (2020). *The Evolution of Knowledge*. Princeton: Princeton University Press.
- Renn J., Laubichler M. (2017). Extended Evolution and the History of Knowledge. in Stadler F. (ed.), *Integrated History and Philosophy of Science: Problems, Perspectives, and Case Studies*. Dordrecht: Springer, pp. 109–125.
- Renn J., Wintergrün D., Lalli R., Laubichler M., Valleriani M. (2016). *Netzwerke als Wissensspeicher*, in Mittelstraß J., Rüdiger U. (eds.), *Die Zukunft der Wissensspeicher : Forschen, Sammeln und Vermitteln im 21. Jahrhundert*. München: UVK Verlagsgesellschaft Konstanz, pp. 35–79.
- Small H. (1973). “Co-citation in the scientific literature: A new measure of the relationship between two documents”. *Journal of the American Society for Information Science*, 24, pp. 265–269.
- Trevor-Roper, H. R. (1972). “Fernand Braudel, the Annales, and the Mediterranean”. *The Journal of Modern History*, 44, pp. 468–479.
- Turchin P. (2008). “Arise ‘cliodynamics’”. *Nature*, 454, pp. 34–35.
- Turchin P. (2010). “Launching the Journal”. *Cliodynamics*, 1, pp. 1–2.
- Wasserman S., Faust K. (1994). *Social network analysis: methods and applications*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Will C.M. (1989). *The renaissance of general relativity*, in Davies, P. (ed.), *The New Physics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 7–33.
- Wintergrün D. (2019). *Netzwerkanalysen und semantische Datenmodellierung als heuristische Instrumente für die historische Forschung* (PhD dissertation). Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Physicists, engineers and soldiers at the origins of the “Istituto Centrale Aeronautico Italiano” (Italian Central Aeronautic Institute)

Sandra Linguerri – University of Bologna; Museo storico della fisica e Centro di studi e ricerche “Enrico Fermi” – sandra.linguerri@unibo.it

Abstract: The current communication presents the results of an ongoing research on the origins and first years of activity of the “Istituto centrale aeronautico italiano” (ICA). The history of the ICA intertwines with the history of research on the high atmosphere, aerostats, airships and the first airplanes, and with the establishment of the Italian air force service.

Keywords: Italian Army Corps of Engineers, aircraft, wind tunnels.

1. The origins (1884-1914)

In 1915, with the 11th Royal Decree of January 17, the “Istituto centrale aeronautico” (ICA) (Central Aeronautic Institute) was officially founded. The history of the ICA has its roots in the end of the eighteenth century and is tightly connected to the events of the Specialist Brigade of the 3rd Regiment of the “Arma del Genio dell’Esercito” (Army Corps of Engineers). In 1884, an aerostatic Section inside the “Arma del Genio” was born, later transformed in 1887 in “Compagnia specialisti del Genio” (Specialist Company of the Corps of Engineers), stationed in Rome at the foot of Mount Mario. Simultaneously, a small mechanical workshop named “Officina (Mechanical workshop) compagnia specialisti” was created and annexed to the “Compagnia specialisti del Genio”. In 1894, with the transition from “Compagnia specialisti del Genio” to “Brigata specialisti (Specialist Brigade) del Genio”, the “Officina” also began to expand into the “Laboratorio (Laboratory) Brigata specialisti del Genio” and in 1899, after years of limited aerostatic equipment, namely few imported weather balloons for meteorological investigations in the high atmosphere, the “Laboratorio” promoted the design of a weather balloon through an entirely Italian project. In 1902 the “Brigata Specialisti del Genio”, along with its “Laboratorio”, took up quarters in the Cavour military base in Rome, located at the Lungotevere Milvio (today Michelangelo).

In 1904 the “Società aeronautica italiana” (Italian aeronautic society) was founded by – among others – the notable physicians Pietro Blaserna. His interest in aeronautics and aerological fields was also shared by other professors of the “Istituto di fisica dell’Università di Roma” (Physical Institute of the University of Rome) and their students: Alfonso Sella and Domenico Pacini, who studied atmospheric electricity and the processes of air

ionization; Alfredo Pochettino, who carried out observations on the vertical thermal gradient of the atmosphere and investigated, together with Sella, the conductivity of atmospheric air; and another one of Sella's students, Emilio Oddone, who analysed speed variations and wind directions in the various atmospheric layers in order to draft a wind topographic map of Italy. Luciano Orlando, assistant professor of physics and mathematics, examined several aerodynamic issues, such as the elastic connection of the wings to the airplane fuselage, based on prior research by Gaetano Arturo Crocco, a lieutenant of the "Brigata Specialisti del Genio", and a pioneer of Italian aeronautics who became professor in aeronautic engineering at the University of Rome after World War I.

Crocco had begun his scientific research dealing with telephotographic aerostatic machines; in 1903, he moved on to progressive studies on the stability of airplanes and to investigations on propellers; in 1904 he started designing hydroplanes and airships in a mechanical workshop on the banks of Lake Bracciano near Vigna di Valle, which eventually became an authentic construction site for aeronautic experiments. The studies conducted by Crocco on the stability of airships, encouraged by Blaserna gained sufficient funding to supply, in September 1904, a first rudimentary wind tunnel in the courtyard of the Cavour military base. Despite being basic, the aerodynamic experimental system allowed Crocco to take the first steps towards the discovery of the aerodynamic laws, which were still unknown at the time.¹ According to Crocco himself, the system symbolised the cornerstone of the future ICA.

Crocco's endeavour featured the renowned physicist and mathematician Vito Volterra, one of the most brilliant and influential figures of the research policy of liberal Italy. In 1909 the "Comitato talassografico italiano" (CTI) (Italian talassographic Committee) was created by Volterra and it was assigned the task to study the atmosphere to the benefit of aerial navigation. The CTI collaborated with the "Brigata specialisti del Genio" and participated in the creation of a meteorological department for aeronautical purposes based in Vigna di Valle.

Meanwhile, Crocco's research had borne its fruit. He had patented a hydroplane for the study of an aerial propeller, as well as applying technical novelties to a military airship in order to prevent structural deformations.

With law n. 422 of July 10, 1910, the Government granted a funding of 10 million liras to the War Minister "for the manufacture of airships, airplanes and relative systems", and a second, more powerful wind tunnel was accomplished. Still in 1910, civil engineer Giulio Costanzi was assigned to the "Brigata specialisti del Genio" and he continued and expanded the research on propellers started by Crocco. Said surveys appeared on the journal *Rendiconti (Account) dello Stabilimento di costruzioni aeronautiche*, a periodic publication started in 1911. In response to the aerial activities undertaken during the Italo-Turkish war, the prominence of the "Laboratorio (Laboratory) Brigata specialisti del Genio" grew, and so did its tasks, leading to its transformation into "Stabilimento esperienze e di Costruzioni aeronautiche" (Establishment for aeronautic experiments and designs) in 1912. One of its assignments was to design a series of modern aeronautic systems.

¹ According to the influential view of Th. von Kármán, around 1900 there was a branch of science known as semi-empirical aerodynamics which was loosely linked to the rational theory of fluid mechanics.

The starting point for Crocco's third wind tunnel were the numerous experiments conducted by Costanzi on small scale wind tunnels aimed at determining the most suitable one for aerodynamic research. Crocco's new wind tunnel – established in 1914 – displayed a remarkably innovative layout, a double-return and closed-loop format, the first of its kind worldwide, and one of the best at the time.

After the Italo-Turkish war, Crocco proposed to create a central aeronautic institution (the future Istituto centrale aeronautico, ICA) managed by an advisory committee composed of soldiers and scientists along the lines of the National Physical Laboratory, chaired by the celebrated Lord Raleigh. According to Crocco, such institution could have reported to the equally renowned Volterra. The project was commended, yet the military authority vetoed the notion of an advisory committee, whilst welcoming the idea of the future institution being under the direct dependence of the aeronautic Inspectorate, and of it having civilian personnel. That was how, in 1914, the ICA blossomed from the “Stabilimento esperienze e di Costruzioni aeronautiche”. The goal was to distinguish between construction and design of aeronautic products.

Concurrently, the parliamentary dispute over the formation of an independent aeronautic weapon had progressed. The outbreak of the first World War drew novel attention to the matter, which was temporarily solved thanks to the aforementioned 11th R.D. of January 17, 1915. The decree mandated the establishment of the Military Aeronautic Body, making it a weapon of the permanent Army, and it ratified the official inception of the ICA, which was assigned tasks pertaining to research, trial and innovation. Crocco was appointed director. Several scientists and soldiers joined the ICA: Costanzi, Volterra, the chemists Gino Gallo and Demetrio Helbig, who studied hydrogen for aeronautic purposes; the engineer and future professor of thermal and hydraulic machines at the University of Rome Alberto Anastasi, who devised an innovative engine power supply system to prevent the loss of power at high altitudes; the lieutenant of Genio Luigi Avorio, who tested the durability and waterproofness of fabrics for airship shells; the engineer Eugenio Prassone, an expert in the construction of airships and drakens; the engineer Antonio Eula who analysed multibladed propellers.

2. The post war period (1915-1927)

During World War I, research at the ICA dealt with large-volume airships required to compete with Zeppelin airships; high-altitude engines; course deviation indicators; fuses for anti-aircraft and anti-submarine weapons; remotely controlled bombs devised by Crocco and engineer Alessandro Guidoni, another pioneer of aeronautics; and ballistic charts, calculated by Volterra, for bullets shot by airships armed with mountain guns for high precision shooting. To this end, Crocco patented a device that released the gun pointer from the airship's motion, thus solving the problem of automatized variations of the target line.

As a cutting-edge facility in the field of research applied to military purposes, the ICA worked closely with the “Ufficio invenzioni e ricerche” (UIR) (Office for inventions and

research), founded in 1917 inside the Ministry of War by initiative of Volterra. The newborn institution had the task to encourage all relevant ongoing researches conducted in Italy and amongst international allies in the field of science applied to military needs.

In 1918 the ICA, which had been expanded and improved, became known as the “Istituto sperimentale aeronautico” (ISA) (Experimental aeronautic institution). It included a Technical Division and a “Direzione sperimentale dell’Aviazione militare” (DSAM) (Experimental management of military Aviation), overseen by Costanzi. Immediately after the war Volterra took action to transform the UIR and ISA into a centralized and outside university research facility for the resolution of problems relating to experimental science and technology: the “Consiglio Nazionale delle Ricerche” (CNR) (National Council for Research). In this regard, in February 1919 he and Crocco advanced a series of projects that originally placed the emerging CNR inside the ISA. As is known, said projects went unheeded, and we must wait until 1923 for the CNR to be established. Until now, such delay has been correctly attributed to varied motives; further complications to acknowledge are the events concerning the ISA, which was heavily affected by post-war demobilisation.

From now on, we enter quite a complex phase of the history of the ISA, which got mixed up in the reorganisation of the aeronautic departments. On June 30, 1919, Decree n. 1233 was issued, which dictated the merging of ISA with the “Istituto sperimentale delle ferrovie” (Experimental railway Institution). The logic behind this procedure remained unclear, even to the key players. According to Costanzi, the fact that such organisations shared the term “experimental” had convinced the unintelligent minds that they were replicas of one another, with interchangeable competencies, and could thus be united for the sake of saving. In the end the decree was never actualised. Under the following governments (Nitti, Giolitti and Facta), the legislation became even more chaotic, due to a deluge of regulations and amendments. The outcome was a legislative void with a negative influence on aviation, and an indirect impact on the ISA. Meanwhile, in 1920, Crocco left the direction of the ISA.

A breakthrough in the situation occurred in 1923 with the creation of the Royal Air Force and with the establishment of the “Corpo (Body) del Genio Aeronautico” founded by Guidoni, which exercised all technical, experimental and planning functions relevant to aircrafts. These were the first steps towards the creation of a Ministry of Aeronautics, which was indeed founded in 1925. The newly formed Royal Air Force required a complete experimental center to match new and future demands, though research conducted in the ISA was still impactful. As a matter of fact, the *Rendiconti* (Accounts) present research on coefficients of safety and stability of airplanes; investigations on floats for seaplanes; guidelines for metallic constructions of airplanes; studies on petrol for aeronautic use, on high altitude engines, and on the aerodynamic characteristics of wings.

In June 1927, the “Direzione Superiore Studi ed Esperienze” (DSSE) (Superior Management Studies and Experiences) was established with the goal to indirectly succeed the ISA, though with the same departments and functions, therefore inheriting its aerodynamic systems. Crocco was one of the founders of DSSE. In 1929, an additional wind tunnel became operational; though smaller, it was more powerful than the one designed in 1914. They were both functional in the Laboratory headquarters of the Cavour military base in

Rome until 1935, the year in which the “Centro studi ed esperienze di Guidonia” was created in Montecelio (Roma). Crocco conceived the project and promoted its fulfillment. The Centro was dedicated to Alessandro Guidoni and it hosted novel and more powerful aerodynamic tunnels, thus becoming one of the most internationally important centers for aeronautic research.

References

- Battimelli G., Ianniello M.G. (2012). *La scuola romana di fisica alla Sapienza*. Milano: Mondadori.
- Costanzi G. (1959). “L’apporto italiano alla tecnica aeronautica”. *Rivista aeronautica*, 3, in particular pp. 523-563.
- Crocco B. (1957). *Questa terra non ci basta*. Bologna: Cappelli.
- Focaccia M. (2019). *Pietro Blaserna and the birth of the Institute of Physics in Rome. A Gentleman scientist at Via Panisperna*. Berlin-Heidelberg: Springer.
- Guerraggio A., Paoloni G. (2012). *Vito Volterra*. Berlin-Heidelberg: Springer.
- Kármán (von) Th. (1956). *Aerodinamica. Temi scelti alla luce del loro sviluppo storico*. Ginevra: Interavia.
- Lattanzi B. (1990). *Vita ignorata del Centro Studi ed Esperienze di Guidonia*. Roma: IBN, in particular pp. 17-33.
- Linguerrì S. (2005). *Vito Volterra e il Comitato Talassografico Italiano. Imprese per aria e per mare nell’Italia Unita (1883-1930)*. Firenze: Olschki.
- Linguerrì S. (2016). “Sulle ali del vento: il Regio Servizio Aerologico Italiano dai primordi alla Grande Guerra”. *PHYSIS Rivista Internazionale di Storia della Scienza*, 51 (1-2), pp. 19-31.
- Lodi A. (1981), *Il volo a Roma dalle origini ai primi anni del Novecento: personaggi e luoghi romani della storia dell’aeronautica antica*. Roma: Press Italia.
- Lo stabilimento di costruzioni aeronautiche* [online]. URL:<www.kapcasalboni.it/downloads/files/ID%20263.pdf> [access date: 17/02/2020].
- Montinaro G., Salvetti M. (eds) (2007). *L’Aeronautica italiana nella I Guerra Mondiale*, (Atti del Convegno, Roma 21-22 novembre 2007), Roma: Aeronautica Militare-Ufficio storico.
- Pistolessi E. (1939). *Il contributo italiano al progresso dell’aerodinamica e delle costruzioni aeronautiche*, vol. 3, in Silla L. (ed.), *Un secolo di progresso scientifico italiano (1839-1939)*. Roma: Società italiana per il progresso delle scienze, pp. 3-41.
- Ungari A. (2018). *The Italian Air Force from Its Origins to 1923*, in Wilcox V. (ed.), *Italy in the Era of Great War*. Leiden-Boston: Brill, pp. 55-79.
- Paoletti C. (2015). *Dalla Libia al Ministero: l’evoluzione ordinamentale dell’Aeronautica dal 1911 al 1925*. Roma: Associazione culturale Commissione Italiana di Storia Militare.
- Simili R. (2001). *La presidenza Volterra*, in Simili R., Paoloni G. (eds.) *Per una storia del Consiglio nazionale delle Ricerche*. Roma-Bari: Laterza, vol. I, pp. 71-127.

“Life belts” intorno alle città: la voce degli scienziati del MIT nella vita politica e sociale degli anni Cinquanta

Eleonora Loiodice – Università degli Studi di Bari “A. Moro” –
e.loiodice01@gmail.com

Abstract: In the 1950s, the situation in the USA was not so easy and the feeling of always being in danger was constant, because of the “containment policy”, contrasts, tensions, the promulgation of the Marshall Plan and the birth of NATO. People lived with the fear of an imminent outbreak of an atomic war. That’s why Norbert Wiener, Karl Deutsh and Giorgio de Santilana wrote a project to prepare American cities in the event of an atomic war. The project, published in the magazine «Life» (December 18, 1950), was titled “How U.S. cities can prepare for atomic war - M.I.T. professors suggest a bold plan to prevent panic and limit destruction”. In that project the professors outlined their idea of “life belts” around the main cities. The idea was to create circular highways about ten miles from the city centre, with roads leading into the city like spokes on a wheel. The three men designated the perimeter of the life belts as evacuation points for city dwellers, also designing essential facilities and places. The paper aims to analyse the project, contextualizing it in the visions of the three professors of MIT attentive to the role of the scientist in political and social life.

Keywords: City planning, Cold War, A-bomb, Role of the scientist.

1. Gli USA negli anni Cinquanta

Dopo la distruzione nei tanti campi della vita umana osservata durante la Seconda guerra mondiale, prese da un rimorso di coscienza e da un richiamo al buon senso, le grandi potenze del mondo si assunsero la responsabilità collettiva nella gestione dell’ordine internazionale. Infatti, il 26 giugno del 1945 nacque l’Organizzazione delle Nazioni Unite. Gli Stati Uniti, in particolare, abbandonarono la strategia dell’isolazionismo per assumere il ruolo di leadership economica, politica e anche morale. Sul piano delle politiche concrete, l’amministrazione americana abbracciò prima la strategia del *containment* elaborata dal diplomatico George F. Kennan, che consisteva nel rintuzzare ogni tentativo di espansione dell’influenza sovietica e del comunismo in Europa. Washington continuò ad affermare e ad esercitare la sua egemonia con strumenti sia politici che economici; in tal senso fu di fondamentale importanza lo “European Recovery Program”, meglio noto come “Piano Marshall”. Proprio il 1949 fu, per la politica internazionale, un anno denso di fatti di rilievo che continuarono a suscitare una vera e propria ondata di agitazione negli USA. La nascita della NATO, la divisione in due della Germania, la scoperta che anche l’URSS possedesse

l'arma nucleare, la vittoria della rivoluzione comunista in Cina e, in aggiunta, la politica attuata da McCarthy agli inizi del 1950 di lotta e denuncia delle "spie comuniste" agitarono e aumentarono lo spauracchio nella popolazione. Si parlava di Guerra fredda e Washington ritenne necessario abbandonare il puro e semplice "contenimento" per una strategia più attiva, senza escludere l'impiego diretto della forza militare in qualsiasi parte del mondo. Fu quello che accadde in Asia con la guerra di Corea (1950-1953).

As the Russian-sponsored armies of Communist China smashed southward through Korea the last week the growing likelihood of World War III posed a threat to this nation which its cities and civilians have never had to face before. War with Russia would be atomic war. And U.S. cities are the most destructible A-bomb targets in the world. (*How U.S. Cities Can Prepare for Atomic War*, 1950, p. 77).

La sensazione di essere sotto pericolo era costante e si viveva con la paura di un imminente scoppio di una guerra atomica. E fu per questo motivo che Norbert Wiener, Karl Deutsch e Giorgio de Santillana scrissero un progetto per preparare le città americane all'eventualità di una guerra atomica.

2. Piani di prevenzione

Il progetto, ritrovato tra i documenti conservati all'interno di "Institute Archive and special Collection" del MIT, era stato pubblicato integralmente sulla rivista «Life» (18 dicembre 1950) e si intitolava *How U.S. Cities can Prepare for Atomic War: MIT Professors Suggest a Bold Plan to Prevent Panic and Limit Destruction*. I tre autori dell'articolo si erano già distinti per la loro partecipazione e interessamento alla vita politica e alle questioni sociali. Soprattutto, erano ben consapevoli del ruolo che lo scienziato svolgeva all'interno della società. Infatti, gli studi di Wiener (1894-1964), considerato il "padre della cibernetica", rilevanti per l'ingegneria elettronica e i sistemi elettronici di comunicazione e controllo, si intrecciavano e sconfinavano inevitabilmente in riflessioni sociologiche e politiche. I lavori di Deutsch (1912-1992), sociologo e politologo, si concentravano sullo studio della guerra e della pace, del nazionalismo, della cooperazione e della comunicazione. Infine, Giorgio de Santillana (1902-1974), fisico, storico e filosofo della scienza presso il MIT, si era contraddistinto per i suoi interessi politici e sociali durante gli anni della Seconda guerra mondiale, scrivendo articoli sulla situazione europea. De Santillana si interrogò anche sul ruolo dello scienziato all'interno della società, proponendo un confronto tra il processo a Galileo e quello a Oppenheimer (de Santillana, 1957).

I tre, quindi, scrissero il progetto *Cities that survive the bomb* che venne inviato alla "New York State Civil Defense Commission" e che si andava a inserire in un progetto ben più grande di messa in sicurezza e prevenzione. Infatti, tra i documenti ritrovati c'è uno special report della "American Society of Planning Officials". Il report, datato ottobre 1950, è finalizzato a spiegare il ruolo della commissione per la protezione civile. (Cambridge, *Institute archive and special collection (IASC) MIT*, Giorgio Diaz de Santillana papers (GDdS papers), collection n. MC- 282, box 51, folder "atom", "Planning Advisory

Service”). Per preparare una città si sarebbero dovuti svolgere molti lavori nel campo della difesa e della prevenzione e molti in realtà non sarebbero stati di competenza della commissione di pianificazione, ma di altri dipartimenti: ingegneria e tutto ciò che riguardasse la linea telefonica, telegrafo, acqua, viabilità, trasporti, gas, luce, polizia, vigili del fuoco e così via. La commissione di pianificazione avrebbe svolto un ruolo di coordinamento in tutto questo programma di difesa anche a lungo raggio, avendo quindi l'opportunità di formulare raccomandazioni ponderate e di evidenziare le lacune nelle strutture e nei servizi della comunità.

3. Il progetto e l'articolo su «Life»

Considerato tutto ciò, Norbert Wiener, Karl Deutsch e Giorgio de Santillana parteciparono attivamente alla progettazione di un piano di prevenzione che, come abbiamo detto, venne pubblicato sulla rivista «Life», come vetrina divulgativa. Nell'articolo si faceva notare come la particolare vulnerabilità delle grandi città americane, in caso di attacco, derivasse da una combinazione di due fattori: l'intensa congestione delle città e l'immensa potenza distruttiva della bomba. Nella prima pagina dell'articolo, la rivista decise di porre una immagine del traffico ringhioso e brulicante tra auto e pedoni che avvolgeva, e avvolge tutt'ora, le strade di New York nella quotidianità. La catena di eventi e gli scenari che si aprono in una situazione di pericolo erano e sono fin troppo facili da immaginare. In caso di attacco atomico su una città come quella di New York, in primis ci sarebbe stato una devastazione immediata e totale di una vasta area, con centinaia di migliaia di vittime. Ma dopo il colpo iniziale, cosa sarebbe successo? In preda al panico la popolazione avrebbe abbandonato la città: i trasporti si sarebbero paralizzati, le riserve di cibo saccheggiate, nel giro di poche ore le scorte locali di benzina sarebbero state esaurite e ogni strada sarebbe stata bloccata da qualche macchina ferma.

The refugees would set off on foot, pouring through suburban communities too small to feed or shelter them. Railroads, ruptured at their city terminals, could neither evacuate the homeless and the injured nor bring in desperately needed supplies. In all, the indirect effects of the burst could well be more disastrous than its initial destruction, for the great city would act as a great explosive, triggered by the lesser explosion of the bomb itself. (*How U.S. Cities Can Prepare for Atomic War*, 1950, p. 77).

Per quanto da diversi anni il governo degli Stati Uniti fosse consapevole della probabilità e delle possibili conseguenze di un attacco atomico, soltanto nel Dicembre del 1950 il presidente Truman istituì la “Federal Civil Defense Administration”, un'istituzione governativa ufficiale.

Il piano di protezione civile ideato da Wiener era calcolato per soddisfare due esigenze urgenti nella crisi post-bomba. In primis, si poneva l'obiettivo di controllare il panico tra i sopravvissuti, dando un luogo preciso in cui dirigersi, una via di fuga che potesse essere raggiunta allontanandosi in qualsiasi direzione dalla città. E in secondo luogo avrebbe consentito ai servizi di trasporto vitali di continuare a funzionare, portando cibo e rifornimenti alla città bombardata. Il sistema di trasporto d'emergenza avrebbe dovuto essere collegato

a strutture ferroviarie e stradali estese: così, nessuna città sarebbe stata completamente tagliata fuori dagli aiuti esterni. I tre elementi suggeriti da Wiener per la via di fuga e la rete di comunicazione furono: una strada supplementare, che si irradiasse come i raggi di una ruota dal centro dell'area metropolitana per fornire una via d'uscita alla popolazione; una superstrada che circondasse la città a circa dieci miglia dal margine dell'abitato, per intersecare ogni strada che portava fuori dalla città; infine, una linea ferroviaria a cinque miglia oltre l'autostrada, creata per fornire un collegamento ausiliario diretto tra le linee ferroviarie esistenti. L'area tra la città e l'autostrada sarebbe stata mantenuta il più possibile libera per fungere da zona cuscinetto di sicurezza. Qui si sarebbero costruiti ospedali, magazzini di approvvigionamento, depositi, supermercati, case suburbane, centrali elettriche per far fronte all'emergenza. I terreni vicini sarebbero stati riservati come parchi e preparati per grandi tendopoli rapidamente erette per ospitare i rifugiati.

Dopo aver subito un attacco così devastante, anche l'economia e l'industria ne avrebbero risentito pesantemente. Per questo motivo i tre scienziati credevano che il sistema di trasporto pesante, in particolare la rete ferroviaria, potesse svolgere una parte significativa in un buon piano preventivo. Proprio la rete ferroviaria era formata da un elaborato intreccio di linee, che si riunivano nelle grandi città. Se una bomba atomica fosse stata sganciata, nodi ferroviari del genere avrebbero fatto crollare l'intera rete. Il groviglio avrebbe bloccato i trasporti di cibo, truppe, forniture mediche, conducendo così ad un'inevitabile sconfitta degli Stati Uniti. Costruendo invece dei *by-pass belt tracks* intorno ad ogni città più importante, Wiener riteneva che il pericolo di un danno ingente alle ferrovie sarebbe stato praticamente eliminato.

Per i tre autori le conseguenze sociali ed economiche del progetto sarebbero state vantaggiose in qualsiasi momento. Riforme di questo genere erano attese da tempo: guerra o no, la decentralizzazione della città e la resa più snella delle vie di comunicazioni avrebbero giovato molto. Le città campione erano, sul lato est, Boston, New York, Philadelphia, Baltimora e Washington, sul versante ovest, alcune come Sacramento, San Francisco e Los Angeles. Le conseguenze politiche e morali sarebbero state tre. Le prime due conseguenze avrebbero interessato le città americane, che così sarebbero diventate più estese e sicure, comportando anche un riordino amministrativo che avrebbe permesso una crescita anche dei quartieri periferici. La terza, più importante, avrebbe avuto conseguenze internazionali, poiché le *life belts* avrebbero reso le città americane meno appetibili in caso di *A-bomb* e allo stesso tempo questa idea sarebbe stata utilizzata anche in altri paesi.

4. Progetto non realizzato

Nel momento in cui il progetto venne pubblicato, Wiener inviò una lettera a un altro editore, «Harper's Magazine», lamentando un'insoddisfazione nei confronti della modalità di pubblicazione attuata da «Life» (Cambridge, *IASC MIT*, *GDdS papers*, MC- 282, box 51, "atom", Wiener 1950). Wiener sottolineò il fatto che la rivista avesse dato poca importanza a uno dei loro obiettivi. La rivista per quanto avesse reso abbastanza divulgativo il progetto, inserendo anche immagini e didascalie, non aveva propriamente coinvolto il pubblico. Si chiedeva infatti al lettore una riflessione più approfondita sull'importanza della messa in

sicurezza della città. Non si sarebbe potuta vincere una guerra, se si fosse lasciato scoperta la quotidianità della propria nazione.

Il progetto non venne messo in atto, ma ciò per cui si è ritenuto importante riportare questo lavoro è il ruolo che hanno svolto questi tre scienziati nella situazione politica e sociale durante la Guerra fredda. Gli scienziati, dopo aver conosciuto il peccato (Oppenheimer 1948), sentirono probabilmente in maniera più intensa il peso del ruolo che ricoprivano all'interno della società. Quando si parla di politica, di bene per la *polis*, tutti sono chiamati a partecipare, motivo per cui anche gli scienziati danno voce alle loro opinioni, ai loro progetti e alle loro suggestioni. Lo scienziato e l'intellettuale che dice la sua opinione, però non è facilmente gestibile dal potere. Ecco perché, anni dopo, de Santillana (1957) scrisse l'articolo su Galileo e Oppenheimer. Il problema, secondo de Santillana, era la presenza di un potere che non concedeva più libertà di parola e di ricerca allo scienziato.

Bibliografia

- Cioci V. (2004). *Una rivisitazione del caso Oppenheimer*, in Tucci P., Garuccio A., Nigro M. (a cura di), *Atti del XXIII Congresso Nazionale SISFA* (Bari 5-7 giugno 2003). Bari: Progedit, pp. 131-144.
- de Santillana G. Diaz (1957). "Galileo and Oppenheimer". *The Reporter*, pp. 10-18.
- Deutsch K.W. (1966). *The Nerves of Government: Models of Communication and Control*. New York: Free press.
- "How U.S. Cities Can Prepare for Atomic War: MIT Professors Suggest a Bold Plan to Prevent Panic and Limit Destructions" (1950). *Life Magazine*, 29 (25), 18 dicembre, pp. 77-86.
- Masani P. (1990). *Norbert Wiener, 1894-1964*, Basel: Birkhäuser Verlag.
- Oppenheimer R. (1948). "Physics in the Contemporary World", *Bulletin of Atomic Scientists*, 4 (3), pp. 65-68, e 85-86.
- Pogliano C. (2004). "Sciences at War and the Cybernetic Dream". *Nuncius*, 19 (1), pp. 171-204.
- Romero F. (2009). *Storia della Guerra Fredda. L'ultimo conflitto per l'Europa*. Torino: Einaudi.
- Schmitt R. (1952). "Demography and City Planning". *Social Forces*, 30 (3), pp. 300-304.

Fonti d'archivio

- Cambridge: MIT. *Institute Archive and Special Collection*, Giorgio Diaz de Santillana papers, collection n. MC-282, box 51, folder "atom":
- "Planning Advisory Service";
 - lettera di N. Wiener all'editore *Harper's Magazine* del 1° dicembre 1950;
 - progetto "Cities that survive the bomb".

The Charm of Theoretical Physics (1958-1993)

Luciano Maiani – Sapienza University of Rome and INFN – luciano.maiani@roma1.infn.it

Luisa Bonolis – Max Planck Institute for the History of Science – Berlin – lbonolis@mpiwg-berlin.mpg.de

Abstract: Personal recollections on theoretical particle physics in the years when the Standard Theory was formed. In the background, the remarkable development of Italian theoretical physics in the second part of the last century, with great personalities like Bruno Touschek, Raoul Gatto, Nicola Cabibbo and their schools.

References

Maiani L., Bonolis L. (2017). “The Charm of Theoretical Physics (1958 -1993)”. *The European Physical Journal H*, Volume 42, pp. 611 -661.

The history of technology transfer of the Casimir effect and van der Waals forces: From exotic, weak, and undesirable to enabling, emerging, and irresistible

Fabrizio Pinto – Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Izmir University of Economics, Teleferik Mahallesi, Sakarya Cd. No:156, 35330 Balçova/Izmir, Republic of Turkey – fabrizio.pinto@ieu.edu.tr

Abstract: The formulation of a successful quantitative theoretical framework explaining the existence of interactions among electrically neutral, polarizable particles is one of the towering achievements of quantum field theory. Mechanisms for atomic aggregation were hypothesized in antiquity on philosophical grounds to explain the formation, evolution, and destruction of everything we observe in the macroscopic world. Remarkably, surface forces have evolved from an exotic subject, investigated in vain even by Galileo and by Newton, to a central enabler of breakthrough technologies in novel aerospace applications. A fundamental event was the demonstration of the time modulation of dispersion forces through energy exchange at the core of proposed implementations of a novel class of thermodynamical engine cycles in nanodevices. This achievement showed that dispersion forces can be engineered not merely to negotiate a limitation but actually to yield an emerging enabling general purpose technology to vastly improve device performance or even to access capabilities entirely out of reach of traditional approaches.

Keywords: Atomism, Cohesion, Thermodynamical engines, nanodevices.

1. Maxwell on Atomism

In a lecture delivered at the British Association in Bradford and reprinted in *Nature* in September 1873, James Clerk Maxwell (1873, 1965) gives a remarkable assessment of the contribution of the Greek philosopher Anaxagoras, to whom, in his view, “[...] we are indebted for the most important service to the atomic theory, which, after its statement by Democritus, remained to be done.” Intriguingly, Maxwell clarifies that “Anaxagoras, in fact, stated a theory which so exactly contradicts the atomic theory of Democritus that the truth or falsehood of the one theory implies the falsehood or truth of the other.” Such a profound, even provocative, opinion of the seemingly inescapable mutual exclusiveness of those theories by the founder of classical electromagnetic theory represents the logical starting point for our brief discussion of disruptive aerospace

engineering advancements enabled by naturally occurring interactions among the basic constituents of matter.

In order to analyze the implications of Maxwell's statement, it is critical to recall the historical context within which both Democritus and Anaxagoras operated. Geographically, we refer to the area located within the coastal stretch straddling either side of the mouth of the Hellespont (or Dardanelles) from Miletus, in modern day Turkey, to Abdera, in modern day Greece. This region of Asia Minor and Thrace could be considered as the setting for an ancient Greek atomistic philosophy tour to act as a 'prequel' to the modern *Atomic Travelogue* (Marshall, Marshall 2010) proposed by Jim and Jenny Marshall for the 200th anniversary of John Dalton's A New System of Chemical Philosophy.

The earliest modern accounts of travels to this geographical region, specifically motivated by the emergence of intense historical and archaeological interest in the eighteenth century (Hodos 2006), can be traced back to the writings of Richard Pococke (1704–1765), first reported in 1745 (Pococke 1745). A few years later, in 1775, Richard Chandler (1738–1810) published the first edition of his *Travels in Asia Minor, or an Account of a Tour made at the Expense of the Society of Dilettanti*. Unlike Mark Twain and Edmondo de Amicis, who would later head to Istanbul, Chandler disembarked the ship the *Anglicana* on the Asian side of the Dardanelles near present-day Çanakkale. Upon making his way through the Troad, he was able to board the ship *Delaware* and landed at the “Frank *Scale*” (i.e. European wharf)¹ of Izmir. During his “excursions,” on the northern side of the Erythrae (later Litri or Ritri, today Çeşme) Peninsula (Hamilton 1842), Chandler identified the ancient city of Klazomenai (also sp. Clazomenae, Smith 1854), well known to ancient writers since Herodotus (Paspalas 2013). On that eventful trip, he used the writings of Pausanias, Plinius the Elder, and Strabo to also locate the causeway commissioned by Alexander the Great, still visible today connecting the mainland land to the historically important islet of Karantina (Ruzicka 1983), to which he crossed in strong winds and braving sea waves “as high as the bellies of our horses.” (Chandler 1776).

Unbeknownst to Chandler, barely three hundred meters to the northwest of the modern causeway and along the same coastline, also within the area both Pococke and he refer to as Vourla (today, Urla), the remains of the ancient port of Klazomenai (Paspalas 2013) were much later discovered at a mound overlooking the sea, now aptly named Liman Tepe (“Harbor Hill”). “Lesser known, but no less significant than its contemporaneous neighbor Troy to the north” (Goodman 2009), Liman Tepe was first shown in the 1950s to be the site of pre-Classical cultures since at least the 5th millennium BC (Gates 1995) and, with some periods of abandonment, an active port through the Roman period. In the aftermath of the failed Ionian revolt of 499-494 BC against the Persians, the citizens of Klazomenai left the settlement for the relative safety of Karantina although the oligarchic faction later returned to the mainland.

¹ In Ottoman times, “Frank” was a synonym of “European” (Pococke 1745, Ch. 1, p. 37). *Scale*, Latin for “ladder” or “stairway,” over the centuries gained the meaning of “wharf” in the Eastern Mediterranean *Lingua Franca* (Kahane 1988) and evolved into the Turkish *iskele* — e.g. Urla Iskele (see text).

2. Klazomenai to Athens

The role of Klazomenai in early investigations emerges not only as the birthplace of Anaxagoras, whom Maxwell again mentions in his “Atom” entry, included in the *Encyclopædia Britannica* (Maxwell 1875). Hermotimus of Klazomenai, according to Aristotle, had anticipated the concept of a controlling *Nous* (Curd 2015), and Abdera (Smith 1854) — the birthplace of Democritus juxtaposed to Anaxagoras by Maxwell — was a colony of Klazomenai though having a Phoenician name (Graham 1992).

A typically Ionian scientific mind — known by the nickname of “Brains” (Couprie 2011), for his quick learning — Anaxagoras left Klazomenai for Athens possibly, but not certainly, in his twenties due to undisclosed reasons that have aroused much speculation. On the one hand, Nietzsche chooses to view him as a refugee fleeing from the approaching Persian armies. Noting with Zeller (Zeller 1881) that, in that age, Athens had no philosophers of note, Nietzsche asserts that “It was not an educational journey, but rather a flight.” (Nietzsche 2006). The opposite possibility, however, is that Anaxagoras traveled either as a Persian conscript or as a sympathizer in time of war as “We must remember where Anaxagoras came from, and in what company a Klazomenian may very possibly have arrived at Athens in the year of Salamis.” (Taylor 1917) Thirty years after his journey, Anaxagoras became the target of a politically motivated trial from the potentially deadly consequences of which he was spared by his personal friendship with Pericles. Anaxagoras was able to depart safely to Lampsacus, about twenty miles along the Hellespontine coast (Smith 1854) further than Chandler's original landing place, before his capital trial *in absentia* could even start. In part, the trial focused on the familiar accusation of impiety, due to his cosmological view of the Sun as a stone instead of a god that even Socrates, in his own defense, scoffingly attributes to him, according to Plato's *Apology* (Couprie 2011). A second charge, however, was “Medism,” or “collaboration with the Persians” (Gillis 1979) connected to long standing suspicions about his background from Klazomenai and aggravated by his association with Themistocles (Woodbury 1981). In summary, we do not know whether Anaxagoras reached Athens by sea or by land, whether as part of the Persian expeditionary force or escaping from it, while the actual dates of his arrival and trial remain so relatively insecure (Taylor 1917, Davidson 1953) as to cause the experts to have “[...] almost perished in a sea of literature [...]” (Mansfeld 1980). Hence, neither supported nor refuted by surviving evidence, one can be forgiven for imagining Anaxagoras, son of Hegesibulus (or Eubulus), boarding a ship at the harbor area near Liman Tepe (today, Urla Iskele²) in approximately 480–462 BC. Although an apparently inconsequential journey on an individual scale, this would have been “an epoch-making event in the history of ideas” (Mansfeld 1979) and, particularly in our case, in the development of a theory of matter since, according to tradition, Anaxagoras “introduced the practice of philosophy at Athens” (Woodbury 1981).

² This location is near the childhood home of Giorgos Seferis, winner of the Nobel Prize in literature in 1963.

3. Anaxagoras, matter, and space

The prominent presence of the name of Anaxagoras in a discussion on the history of atomic interaction theory may appear daring. Indeed, foreshadowings of — not to speak of lasting contributions to — our modern understanding of any concept related to cohesion by this thinker, including his very name, are conspicuously absent from popularly acclaimed, recent book-length accounts of the development of atomism since ancient times (Greenblatt 2012). Even several scholarly reviews specifically focused on the history of cohesion theory do not hesitate to mention Democritus at least once (Millington 1954, Rowlinson 2002) while neglecting Anaxagoras. However, just as the archeological remains of his influential birthplace at Klazomenai are slowly reemerging from relative obscurity, we propose that his views on matter and its relationship to contemporary field theory deserve renewed consideration. Of course, a comprehensive analysis of this complex issue and its connections to interatomic forces is outside the space limitations of this necessarily short contribution and will be presented elsewhere.

Here we observe the suggestive presence of Anaxagoras in the minds of those philosophically educated protagonists of contemporary theoretical physics, not as offering philosophical tools in antithesis to modern science (Sedley 2008), but simply as pointing towards a different theory of matter. In this sense can be read the reflections of Sidney Drell on early Greek “metaphysicists”, who “[...] went off in widely different directions: Leucippus and Democritus to the concept of indivisible atoms; Anaxagoras to the original bootstrap model of infinitely divisible seeds within seeds, each as complex as the whole, and Anaximander, Pythagoras and Plato to more abstract mathematical concepts of numbers and symmetries” (Drell 1978). Simultaneously, we must recall the severe limitations of the atomic model, despite its being celebrated as “the greatest thought that mankind has ever hit upon” (Santayana 1910), as forcefully exposed by Heinz R. Post: “A theory of material atoms that does not introduce interaction between them is either ludicrously false or ludicrously weak [...] Any ‘ultimate’ atoms in quantum mechanics necessarily interact with each other in so far as they couple to any (other) species of particles” (Post 1975). Indeed, such forces as those between two neutral hydrogen atoms in the ground state — probably prohibitively challenging for Maxwell to anticipate³ — were first correctly explained within the framework of non-relativistic quantum mechanics by Fritz London (originally with Eisenschitz in 1930), to whom we owe the term “dispersion forces” (London 1937). The existence of such interactions clashes with the doctrine of “atoms and void and nothing else” (Greenblatt 2012), which, on the smallest scale possible, necessarily leads to the critical conclusion: “No point is more central than this, that empty space is not empty. It is the seat of the most violent physics [...] All these fluctuations coexist with quantum fluctuations in the geometry and topology of space” (Misner 1970).

³ A discussion of the conclusions regarding dispersion forces possibly reachable by Maxwell from his electromagnetic theory and early classical atomic models was presented by this author (Pinto 2018).

4. From philosophical argument to technical tool

The previous discussion hinges so profoundly on the ultimate nature of matter, fields, and spacetime as to suggest that dispersion force theories may be unfalsifiable, requiring measurements beyond any realistic detection limit or access to inaccessible environments. This is absolutely not the case. For instance, the forces between *electrically neutral*, polarizable particles or macroscopic boundaries are typically dominant on the nanoscale and they may produce accelerations comparable to those at the surface of extreme relativistic astrophysical objects (Pinto 2012). Analogously, it is estimated that the inertial equivalent of the Casimir energy of confined quark and gluon fields will account for a remarkable $\sim 10\%$ of nucleon mass (Milonni 1994).

Unsurprisingly, although this is often not appreciated, the usefulness of dispersion forces had been recognized long before any quantum mechanical explanation for their existence. Such inventions as the Johansson gauge blocks, mentioned by Feynman as a suggestive demonstration (Feynman 1963, Sec. 12-3) and still found in high precision machine shops, exemplify the technological potential of “engineering dispersion forces,” that is, of “manipulating dispersion forces to achieve a causally quantifiable success” (Pinto 2019). In this archetypal example of dispersion forces as an emerging enabling general-purpose technology (EEGPT) (Pinto 2019), polishing metal surfaces yields the “primary attribute of gauge blocks,” that is, “wringability,” or “[t]he ability to slide two or more length standards together to get a new longer standard with an uncertainty of only a few tenths of a micrometer” (Doiron 2008).

As extensively discussed by the present author (Pinto 2019), other breakthrough commercial applications crucially enabled by the presence of appropriately manipulated dispersion forces have included specific uses of the atomic force microscope (AFM), emerging nanotube-based nonvolatile random access memory (NRAM), and *repulsive* dispersion forces used to achieve superlubricity and eliminate “stiction” failure. Recently, synthetic adhesive research inspired by the hair-like *setae* on the toe pads of the gecko lizard (“gecko glue”) has led to stunning demonstrations of human climbing on vertical glass with anticipated space-related uses in grappling, rendezvous, repairs, assembly, and safer astronaut extravehicular activities (EVA) (Pinto 2019).

Thus, historically, one must consider dispersion force engineering as a rapidly growing, radically novel emerging technology now leading to several breakthrough commercial products with a prominent impact (Rotolo 2015). This process is certainly also accompanied by “uncertainty and ambiguity” (Rotolo 2015) as expected from emerging technologies. One example is the widespread, but incorrect, characterization (Pinto 2019) of interatomic forces as “weak [...] and barely detectable” (Kleppner 1990) in stark contrast with Feynman’s early warning that van der Waals forces could completely hinder manipulation on the nanoscale (Feynman 1992). However, uncertainties also appear partly linked to intrinsic physical properties. This is evident, for instance, from the difficulty to use dispersion forces to discriminate between the classical and quantum nature of a field, or from the analysis of dispersion force manipulation thermodynamical engine cycles in nanodevices (Pinto 2014, Pinto 2016).

References

- Chandler R. (1776). *Travels in Asia Minor or an Account of a Tour made at the Expense of the Society of Dilettanti*. London: J. Dodsley.
- Coupric D. L. (2011). *Heaven and Earth in Ancient Greek Cosmology*. New York: Springer.
- Curd P. (2015). *Anaxagoras*, in Zalta E. N. (ed.), *Stanford Encyclopaedia of Philosophy*. Stanford: Metaphysics Research Lab, Stanford University
- Davidson (1953). "Protagoras, Democritus, and Anaxagoras". *Class. Q.*, 47, pp. 33-45.
- Doiron T. (2008). "Gauge Blocks – A Zombie Technology". *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 113, pp. 175-184.
- Drell S. D. (1978). "When is a particle?". *Phys. Today*, 31, pp. 23-32.
- Feynman (1992). "There's plenty of room at the bottom". *J-MEMS*, 1, pp. 60-66.
- Feynman, R. P. Leighton, R. B., Sands, M. (1963). *Feynman's Lectures on Physics*. Pasadena: Caltech.
- Gates M. –H. (1995). "Archaeology in Turkey". *AJA*, 99, pp. 207-255.
- Gillis D. (1979). *Collaboration with the Persians*. Germany: Steiner.
- Goodman B. N. et al. (2009). "Multi-proxy geoarchaeological study redefines understanding of the paleocoastlines and ancient harbours of Liman Tepe (Iskele, Turkey)". *Terra Nova*, 21, pp. 97-104.
- Graham, D. W., Hintz, E. (1992). "Anaxagoras and the Solar Eclipse of 478 BC". *Apeiron*, 40, pp. 319-344.
- Hamilton W. J. (1842). *Researches in Asia Minor, Pontus, and Armenia with Some Account of Their Antiquities and Geology (vol. II)*. London: John Murray.
- Hodos T. (2006). *Lycia and Classical Archaeology: The Changing Nature of Archaeology in Turkey*, in Haggis D., Antonaccio C. (eds.), *Classical Archaeology in Context: Theory and Practice in Excavation in the Greek World*, Berlin, Boston: Walter de Gruyter GmbH & Co, Ch. 5.
- Kahane H., Kahane R., Tietze A. (1988). *The Lingua Franca in the Levant*. Istanbul: ABC Kitabevi, A. Ş.
- Kleppner D. (1990). "With apologies to Casimir". *Phys. Today*, 43, pp. 9-11.
- London F. (1937). "The general theory of molecular forces". *Trans. Faraday Soc.*, 33, pp. 8-26.
- Mansfeld J. (1979). "The Chronology of Anaxagoras' Athenian Period and the Date of His Trial". *Mnemosyne (Fourth Series)*, 32 (1/2), pp. 39-69.
- Mansfeld 1980 "The Chronology of Anaxagoras' Athenian Period and the Date of His Trial. Part II. The Plot against Pericles and His Associates". *Mnemosyne (Fourth Series)*, 32 (1/2), pp. 17-95.
- Marshall J., Marshall J. 2010. *Rediscovering Atoms: An Atomic Travelogue*, in Giunta C. J. (ed.), *Atoms in Chemistry - From Dalton's Predecessors to Complex Atoms and Beyond - ACS Symposium Series, Vol. 1044 (ACS, 2010)*, Ch. 8.
- Maxwell J. C. (1875). *Atom in Encyclopaedia Britannica (9th ed.)*. Edinburgh: Adam and Charles Black.
- Maxwell J. C. (1965). *Molecules*, in Niven, W. D., *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. New York: Dover Publications, Inc., Vol. II, pp. 361-378.

- Milonni P. W. (1994). *The Quantum Vacuum*. San Diego: Academic Press.
- Misner C. W., Thorne K. S., Wheeler J. A. (1970). *Gravitation*. San Francisco: W. H. Freeman and Company.
- Nietzsche F. (2006). *The Pre-Platonic Philosophers*. Urbana and Chicago: University of Illinois Press.
- Paspalas, S. A. (2013). *Klazomenai* in Bagnall, R. S. et al. (eds.), *The Encyclopedia of Ancient History*. Hoboken: Blackwell Publishing Ltd.
- Pinto F. (2014) “Engines powered by the forces between atoms”. *Am. Sci.*, 102, pp. 280-289.
- Pinto F. (2012) “*Nanopropulsion from high-energy particle beams via dispersion forces in nanotubes*” in 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference (JPC) & Exhibit (Atlanta, 2014).
- Pinto, F. (2016) “Gravitational Casimir effect, the Lifshitz theory, and the existence of gravitons”. *Class. Quantum Grav.*, 33, 237001.
- Pinto F. (2018). “*Casimir forces: Fundamental theory, computation, and nanodevices applications*” in Di Bartolo, B. et al. (eds.), *Quantum Nano-Photonics* (Springer, Berlin).
- Pinto F. (2019). *The future of van der Waals force enabled technology-transfer into the aerospace marketplace* in Schulz, M. J., Shanov, V. N., Yin, J., Cahay, M. (eds.), *Nanotube Superfiber Materials, Science to Commercialization*. Amsterdam: Elsevier.
- Pococke R. (1745). *A Description of the East, and Some other Countries*. London: W. Bowyer.
- Post H. R. (1975). “The Problem of Atomism”. *BJPS*, 26, 19-26.
- Rotolo D., Hicks, D., Martin B. R. (2015). “What Is an Emerging Technology?”. *Research Policy*, 44, pp. 1827-1843.
- Ruzicka S. (1983). Clazomenae and Persian Foreign Policy, 387/6 B.C. *Phoenix*, 37, pp. 104-108.
- Santayana G. (1910). “Three Philosophical Poets: Lucretius, Dante, Goethe”. Cambridge: Harvard University Press.
- Sedley, D. (2008). *Creationism and Its Critics in Antiquity*. Berkeley: University of California Press.
- Smith W. (1854). *Clazomenae* in *Dictionary of Greek and Roman Geography (Vol. I)*. Boston: Little, Brown and Company.
- Taylor A. E. (1917). “On the date of the trial of Anaxagoras”. *The Class. Q.*, 11, pp. 81-87.
- Woodbury L. (1981). “Anaxagoras and Athens”. *Phoenix*, 35, pp. 295-315.
- Zeller E. (1881). *A History of Greek Philosophy (Vol. II)*. London: Longmans, Green, and Co.

Franco Selleri and his research on Particle Physics 1958-1970: Peripheral model and One Pion Exchange model

Luigi Romano – Università degli Studi di Bari – luigi.romano@uniba.it

Augusto Garuccio – Università degli Studi di Bari – agosto.garuccio@uniba.it

Abstract: The present work deals with the contribution of the Italian physicist Franco Selleri (1936-2013) to the research on particle physics. During the years 1958-1970, several remarkable papers on particle physics were written by Selleri, even in collaboration with Francesco Bonsignori, Ezio Ferrari, Ugo Amaldi and so forth. Moreover, Selleri became well known after formulating, together with Francesco Bonsignori, the so-called “peripheral model”. During his stay at CERN in the years 1959-1961, Selleri also introduced the “one pion exchange model”. In the work it is also briefly analysed Selleri’s last contribution in particle physics: the nonconservation of angular momentum, a turning point for his shift to Foundations of Quantum Mechanics (FQM in the following).

Keywords: Peripheral model, One pion exchange model, Particle physics, Non-conservation of angular momentum, Franco Selleri.

1. Introduction

The aim of the present work is to introduce the contribution of the Italian physicist Franco Selleri (1936-2013), in the international debate on particle physics (PP in the following) during the 1960s. After a short overview of Selleri’s life, it is here briefly showed his research on topics described in the abstract, that is, the peripheral model and the one pion exchange model. Then we are going to underline the specific subject of nonconservation of angular momentum, which played a pivotal role in his shift to FQM.

2. An overview on Selleri’s life and his early contributions in PP

Franco Selleri was born in Bologna on October 9th, 1936, in a family with no specific scientific attitudes at all. His father Antonio, born in 1902 was a railway controller, while Selleri’s mother, Dina Capelli, born in 1910, was a housewife. Antonio was:

[...] a person of strong principles. He had never wished to swear allegiance to the fascist party, he had always considered fascism with great contempt. At that time,

there was still no obligation in swearing, though (Interview with Angela Selleri Pizzi¹).

Selleri attended the scientific high school named ‘Augusto Righi’ in Bologna. He spoke notably about his professor Aldo Graffi (1899-1974), who taught mathematics and physics for forty years at high schools in Bologna. He was a fundamental person in Selleri’s early education. According to his recollections:

[...] I think that I was very lucky from the point of view of school because I had an excellent teacher of mathematics and physics. [...] He had really a robust personality and he could push people to be interested in mathematics and physics. I think that if I decided to be a physicist it was his merit. Not that he suggested to me in particular to study physics at the university, but just his type of personality was very strong and influential for me (AIP 2003).

Due to some economical problems in his family, in 1954 Selleri decided to enroll in the Faculty of engineering (university registration number 5179), for the greater job opportunities it offered. However, a following recruiting advertisement on a local newspaper by Giampietro Puppi (1917-2006),² director of the Physics institute in Bologna at that time proved to be decisive for Selleri’s choices. In fact, he pointed out that:

[...] He [Puppi] said: ‘Show me your libretto with the grades, the records’. I gave it to him, and he said: ‘You can come even tomorrow’. So, I switched from Engineering to Physics and then I was very happy because that was my real interest (AIP 2003).

Selleri graduated with Puppi in Bologna, *summa cum laude*, on December 22nd 1958 (at the age of 22), discussing a thesis entitled *Analisi dell’interazione pione-nucleone*.

After his degree in physics, Selleri entered the INFN (Istituto nazionale di fisica nucleare) as a fellow, but, thanks to a basic contact with Daniele Amati (1931-) and Sergio Fubini (1928-2005) he could go straight to CERN for two years (from December 1st, 1959 to November 30th, 1961) with a grant. Surely an essential period for his career! Selleri worked over there with several scholars, introducing various papers concerning the so-called peripheral model and the one pion exchange model. Regarding the former it is worthy underlining that, in a pivotal joint paper with Francesco Bonsignori, they wrote that:

A simple model is proposed for the study of single pion production in collisions of a generic particle “a” on a target nucleon. The model consists essentially in neglecting all interactions but the one between the incoming particle and a single pion of the nucleon cloud (Bonsignori, Selleri 1960, p. 465).

¹ The interview with Angela Selleri Pizzi, Franco Selleri’s wife, was granted to one of the authors of the present paper (L.R.) in Bari on July 11th, 2017.

² He studied at Padua University with Bruno Rossi and Giancarlo Wick. Quite famous for several studies, we can remember, for instance, the so-called “Puppi’s triangle”, in PP, for the universality of weak interactions.

whereas concerning the latter, Selleri pointed out that:

[at CERN] I had what I consider a very good idea. That was the one pion exchange model; that is to say, the idea that in some inelastic processes really what is going on is that one pion is exchanged. For example, if you have two protons colliding and producing one pion, let us say a positive pion, you have in the final state a proton, a neutron and a positive pion.

The idea was that the target proton (for example) emitted a virtual positive pion, becoming a neutron, and that the incoming proton scattered elastically on this virtual pion producing it as real in the final state. So this One Pion Exchange model was really my idea, my first idea, and it was immediately a remarkable success in fitting the experimental data. I became known in the world of particle physics (AIP 2003).

As a consequence of this new state of celebrity, Selleri decided really soon to go abroad. He spent one year (1962-1963) at Saclay, in France, and then he chose the United States of America. He sent applications in five seminal universities in USA, receiving five positive answers.

From 1963 to 1965, he was at Cornell University in Ithaca, attracted by the presence of Nobel Prize Hans Albrecht Bethe. But, once in USA:

[...] slowly, I started to develop a critical attitude towards contemporary physics. I mean I had a very strong drive. I liked physics very, very much and I was very active, but it was soon evident that there were problems, fundamental problems in physics. [...] My model was, so to say, overcome by a different model that was called the one pion exchange model with absorption. [...] Perhaps today it does not seem so terrible, I know, but for me it was shocking. That was a frustrating development. I was very young and naive, so it was very difficult to take. So, I slowly realized that if something like that was possible, that meant there were great problems in physics. And somehow, I got very soon the conviction that the problems came from the foundations of quantum mechanics. That is to say, the problems in elementary particle physics are due to the fact that quantum mechanics is poorly understood and anyway is a very abstract idea (AIP, 2003).

Then in 1965 Selleri decided to come back to Italy. After spending two years teaching in Bologna and after taking up the course of matter structure, Selleri gave up and moved to University of Bari, in which he was the author of “the first paper in theoretical physics of Bari University” (AIP, 2003). During the period in Bari, Selleri moved his activity from PP to FQM³, with a huge amount of publications and works related the following topics:

the Empty Waves, for the study of the Einstein-De Broglie picture of wave-particle duality; the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox, dealing mostly with Bell’s Theorem, its proof and the meaning of the experimental investigations; the probabilistic Local Realism, the most general formulation of our idea still leading to the validity of

³ A more detailed description of Selleri’s research in FQM is portrayed in another paper published by the present authors in this book: Romano L., Garuccio A., “Franco Selleri and his contribution to the starting of debate on Foundations of Quantum Mechanics: 1969-1971”.

Bell's inequality; the Inequalities of Local Realism, showing that Bell's inequality is just one of an infinite set of inequalities that are consequences of local realism⁴.

Since 1994,⁵ he started researching almost exclusively (even though with several exceptions on FQM and PP) on FRT, still writing 62 papers, not all published, and some books. A possible reason for this involvement might come from the following evidence:

[...] the idea of real waves really requires a medium. And in recent years I switched to the foundations of relativity to see if a logical space existed for such a medium... With relativity I could go much deeper and I have basically a new theory that can replace special relativity... I was influenced by Prokhovnik and his books and by John Bell who wrote an article on the foundations of special relativity (AIP, 2003, Bell 1976, Prokhovnik 1967).

After his retirement in 2009, Selleri remained active, continuing in writing and publishing papers as well as books. Selleri keeps on working straight until the end, although his last years were marked by an illness maybe not well cared for initially. He passed away in Bari on November 20th, 2013, at the age of 77.

3. Nonconservation of angular momentum: a turning point toward FQM

There are at least 40 papers on Franco Selleri activity in PP ranging from peripheral model and one-pion exchange (with extension to many pions exchange), to scattering off-shell, unitarity, inelastic and elastic processes, close singularity models, nuclear reactions theory, reformulation of the theory of the $\pi+N \rightarrow P+N$ process and eventually on the *Regge poles* and on nonconservation of angular momentum.

Selleri produced in Bari University some remarkable papers on the nonconservation of angular momentum, a really remarkable argument for his future shift to FQM. In his first paper on this topic (Selleri 1968), he summarized that:

It is usually thought that angular-momentum conservation is implied by relativistic invariance. If this were true one would not need direct experimental proofs of angular-momentum conservation, for the many existing verifications of relativistic invariance would then imply it. In fact we will show that it is not so, by considering a simple example. Pictorially we can describe our mechanism for J-violation as the emission of a particle with fixed spin, but with zero four-momentum (spurion). From the point of view of the remaining observable particles participating in the considered reaction, some angular momentum disappears, but strict conservation of

⁴ This is an excerpt from a typescript found in the Selleri's private documents. Selleri prepared it on September 1991, grouping 25 complete papers in the different groups above reported. As Selleri stated: "The present collection has been prepared for the Cesena conference Bell's theorem and the Foundations of Modern Physics (October 7-10, 1991) and has been made possible by a grant of the Commission of the European Communities (D.G. XII) for which we are very grateful".

⁵ We have found two papers showing Selleri's contribution on Foundations of Relativity Theory already started in 1990 (Selleri 1990a, Selleri 1990b). To be more precise, there are some documents and recollections that seem to date back his embryonic interest as far as 1984.

energy and momentum is valid. Furthermore, the transition rate can be made an invariant essentially because the notion of zero four-momentum is relativistically invariant (Selleri 1968, p. 678).

[...] If we suppose [...] that angular momentum conservation is violated in strange-particle decays [...] with the rule $\Delta J = \frac{1}{2}$, we are led to the following possible new scheme [where] K has spin $\frac{1}{2}$, Λ has spin 1, Σ has spin 1, and Ξ has spin $\frac{3}{2}$ (Selleri 1968, p. 680).

[...] We wish next to show that the strangeness selection rules in strong, e.m. and weak interactions can easily be included in our model and that in some cases a better understanding of them is possible (Selleri 1968, p. 682).

Our scheme leads to an entirely new point of view in particle physics. For instance, the quark model should probably be abandoned. Perhaps the weakest point of our model lies in the success of SU_3 . It could happen, however, that this new point of view improves the understanding of SU_3 as well. [...] In conclusion, our theory presents the following advantages and disadvantages on the traditional one:

ADVANTAGES:

- There is a greater parallelism between elementary particles and the excited states of atoms in which higher masses (i.e. lower binding energies) correspond to higher angular momenta.
- Once accepted the idea of J-violation it is nice to think of weak interactions as generated by some sort of $\mathbf{T} \cdot \mathbf{J}$ coupling.
- The $\Delta T = \frac{1}{2}$ rule become rigorous. The order of magnitude of the rate for the decay $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ can easily be understood.
- Strangeness conservation in e.m. interactions is achieved without the minimality assumption, mainly is a consequence of J-conservation in photon interactions.
- The (rigorous) $\Delta S = 1$ rule becomes a consequence of the $\Delta T = \frac{1}{2}$ rule. So we have one selection rule less.
- The difficulties of interpretation of the decays $K_{\mu 3}$, $K_{e 3}$ are very probably eliminated.

DISADVANTAGES:

- As far as we can see, the only bad point of our scheme is in the successful predictions of SU_3 .

All together there seem to be many more positive than negative features in our proposal. Anyway, a good experiment will probably get rid of our scheme.

NOTE ADDED IN PROOFS

The difficulties connected with SU_3 are conceptually solved in the paper “The Physics of Spin- $\frac{1}{2}$ K-Mesons”, by the same author. In the same paper it is shown that our present empirical knowledge about the K-mesons generally does not contradict our scheme and in some cases seems even to support it (Selleri 1968, pp. 686-687).

The second paper concerning the nonconservation of angular momentum is (Selleri 1969), written during his stay in University of Notre Dame, Indiana, USA and later published when he came back to Bari. He wrote all advantages of his theory, still proposing several experiments to confirm it:

[...] the list of advantages of our scheme over the traditional one has become rather impressive. [...] all the particles have $2T$ and $2J$ either both even or both odd. This is further evidence for a relationship between isospin and angular momentum. Since also the rule $\Delta S = \Delta Q$ for leptonic decays of strange particles is a consequence of $\Delta T = \frac{1}{2}$ it follows from the latter three points that strangeness disappears altogether. This is hardly distressing since strangeness was always a very mysterious quantum number. It is no longer necessary to invoke CP-violation to explain the decay $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$. We explain easily total and differential cross-sections for the process $\pi p \rightarrow K^0\Lambda$ near threshold. In the usual scheme it was not possible to do so. [...] We predict that a $K^0_1 K^0_1$ decay of the resonances A_1 (1070) and E (1420) should be observed, in agreement with experiments. We should have no trouble in fitting the data for the K^+_{13} and K^0_{13} decay modes. The K-meson has spin $\frac{1}{2}$, the K^* spin $\frac{3}{2}$, Λ and Σ spin 1 and so on. The corresponding Regge trajectories lie therefore higher in the J - t plane than before. This certainly helps in understanding why the cross-section for strange particle production at high energy is not smaller than at low energy. The above evidence is impressive enough and our scheme deserves at least one timid, but accurate, experimental verification. Many experiments are possible: A Stern-Gerlach experiment with K-mesons and hyperons; a detailed balancing experiment, for instance with the processes $K^+d \leftrightarrow \Sigma^+p$; observation of anisotropy in the decay of polarized K^+ to $\pi^+\pi^0$; observation of a small ((5-10)%) asymmetry in the $\pi^+\pi^-$ decay of polarized K^0 's; observation of hyperfine splitting in K-mesic atoms; double scattering of K^+ , to detect a possible K^+ polarization; observation of $K^+ \rightarrow \pi^+\gamma$; difference in the angular distributions for the charged and uncharged KK_{bar} decays of the ϕ -meson; observation of 1 keV X-rays associated with the decay $K_L \rightarrow \pi\pi$; verification of the kind of statistics obeyed, for instance, by checking whether three lambdas can stay on the same nuclear level in hypernuclei created from Ω^- absorption. The author is grateful to Drs. Mullin and Kenney for the kind hospitality extended to him. Particular thanks are due to Dr. U. Amaldi for stressing the importance of some of the subjects discussed in the present paper. A suggestion by Dr. L.M. Brown was very illuminating. Stimulating correspondence with Drs. Che, Ferbel, C. Rubbia, E. Segrè and Streater is gratefully acknowledged. The author has benefited from discussions with Drs. Alees, Biswas, Burleson, DeCelles, Finocchiaro, Fitch, Kenney, McGlinn, Okubo, R.F. Peierls, J. Rosen, R.T. Torgerson and many other colleagues. He is very grateful to Dr. R.E. Lanou for reading the manuscript and for useful suggestions. (Selleri 1969, pp.317-318)

We reported the acknowledgements to show how Selleri's ideas received a peculiar attention from many physicists. In addition, some essential letters that we found in Selleri's Archive explain so well how much interest was created in PP community by Selleri research. Here is highlighted a correspondence with Carlo Rubbia, Emilio Segrè, John Stewart Bell:

I just saw your work on the non-conservation of angular momentum...I think it would be worth reviewing further the experimental work in this field from the point of view of your theory (Carlo Rubbia to Selleri, June, 5th, 1968).

We have read with considerable interest your paper where you want to give spin $\frac{1}{2}$ to the K meson. Min Chen is intrigued by your hypothesis, and has written you a letter sometime ago in which he points out the difficulty that it would entail for his measurements of the radiative decay of the K. ...We have been trying to find arguments against spin $\frac{1}{2}$ of the K meson. We were considering the radiative and non-radiative decay of hyperons, but as of today we have not concluded anything on it. I personally am somewhat skeptical on the subject but I believe one should think about it. I will be in Italy in the fall and maybe we might talk about it in Rome (Emilio Segrè to Selleri, July, 15th, 1968). Dr. Lehmann, who is now here, became interested in the possibility of testing your ideas on angular momentum conservation. In a preliminary discussion he asked me if I thought the theory Lorentz invariant, and it seems to me that it is not [...]. I am also somewhat concerned about locality in our theory. It seems to me that a decay in one region of space modifies the vacuum (emission or absorption of spurion) over the whole universe, and so changes the conditions for decays in other regions of space. What do you think of these remarks? (John S. Bell to Selleri, February 2nd, 1970)

Some interviews that I have carried out with various scholars could show the great expectation of many people on this matter. An evidence comes from the Italian physicist Francesco Guerra:

His proposal concerning the nonconservation of angular moment [...] would have led to a better understanding of some peculiar aspects of physics of a set of elementary “strange” particles. The proposal was initially accepted with great interest. I remember that [...] one of my graduating even decided to leave me and go to make his thesis with Selleri. [...] The proposal by Selleri was physically well founded. The missing angular momentum would have been absorbed by a new form of excitation of the vacuum, called spurion, devoid of energy and moment, but endowed with angular momentum. Spurion had a noble origin, even proposed by Heisenberg. Unfortunately Nature had decided not to use this opportunity. Non-preservation of the angular momentum proved contrary to the experimental evidence, and the proposal fell. (Interview of Prof. Francesco Guerra with the present author, Rome-December 9th, 2017).

Another far-reaching evidence results by the recollections of Dr. Michele Barone:

Franco abandoned that path because the Gell-Mann octet came out, and he won the Nobel Prize in 1969. The theory of the octet had been validated by the discovery of the Ω - and therefore had become successful. Elementary particle physics, at least in theory, evolved on the basis of group theory, that invalidated the nonconservation of angular momentum. Franco was against quarks and the spurion model could reorganize the particles discovered up to that point in a different way than quarks. Franco understood that physics had chosen another path and his model would no longer

be accepted. I think that also contributed to his abandonment of the PP. (Interviews with Dr. Michele Barone⁶).

4. Conclusions

We submitted a short overview of Selleri's life, also showing his research in particle physics, with a brief introduction to the Peripheral Model and the One Pion Exchange model. Then we addressed the specific subject of nonconservation of angular momentum, a pivotal research activity for his shift to Foundations of Quantum Mechanics.

Looking at Selleri's works in particle physics, an approach directed to a global analysis of physical phenomena emerges, as demonstrated by the introduction of extended models like the Peripheral model, the One Pion Exchange model, and the Non-conservation of Angular Momentum. It reveals in him a continuous ability to create acute and valid *gedankenexperimenten*, an absolute honesty in searching for experimental evidence, proposing conclusive experiments, quoting authors, and presenting a clear state of the art inherent in each single topic. Moreover, he has always proposed to experimentally verify his theories.

Acknowledgments

We are particularly indebted with Angela Selleri Pizzi and Diana Selleri, the wife and the daughter of Franco Selleri, for giving us the opportunity of having access to his whole private collection, providing us a unique, privileged insight in Selleri's life.

References

- AIP (2003). *Interview of Franco Selleri by Olival Freire on 2003 June 24* [online]. URL: <www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/28003-1> [access date: 10/06/2020].
- AIP (2003). *Interview of Franco Selleri by Olival Freire on 2003 June 25* [online]. URL: <www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/28003-2> [access date: 10/06/2020].
- Bell J.S. (1987). *How to Teach Special Relativity*, in *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 67-80.
- Bonsignori F., Selleri F. (1960). "Pion cloud effects in pion production experiments". *Il Nuovo Cimento*, 15 (3), pp. 465-478.
- Prokhovnik S. J. (1967). *The logic of special relativity*. Cambridge: Cambridge University Press.

⁶ The interviews with Dr. Michele Barone was granted to one of the authors of the present paper in Bari, on June 2nd, 2019 and in Athens, on June 17th-21st, 2019.

- Selleri F. (1968). “Relativistic invariance without angular-momentum conservation”. *Il Nuovo Cimento*, 57A, pp. 678-688.
- Selleri F. (1969). “The physics of spin- $\frac{1}{2}$ K-mesons”. *Il Nuovo Cimento*, 60A, pp. 291-320.
- Selleri F. (1990a). “Space-time transformations in ether theories”. *Zeitschrift für Naturforschung*, 46A, pp. 419-425.
- Selleri F. (1990b). *Special relativity as a limit of ether theories*, in Duffy C. (ed.) *Physical interpretations of relativity theory*. London: British Society for the Philosophy of Science, pp. 508-514.

Archival sources

Bari: Franco Selleri’s Private Archive (FSPA).

Franco Selleri and his contribution to the starting of debate on Foundations of Quantum Mechanics: 1969-1971

Luigi Romano – Università degli Studi di Bari – luigi.romano@uniba.it

Augusto Garuccio – Università degli Studi di Bari – augusto.garuccio@uniba.it

Abstract: The Italian physicist Franco Selleri (1936-2013) played an intriguing role in the modern research on quantum mechanics. After the reading of the book by Bernard d’Espagnat, *Conceptions de la physique contemporaine: les interprétations de la mécanique quantique et de la mesure*, published in 1965, Selleri started publishing papers on foundations of quantum mechanics between March and June 1969. In the same year, as a member of the Directive board of the Italian Physical Society, he brought up the proposal of organizing a summer school on Foundations of quantum mechanics within the international school of physics “E. Fermi” in Varenna. The present work aims at highlighting the contribution of Franco Selleri to the starting of the critical studies on foundations of quantum mechanics, in the triennium 1969-1971.

Keywords: Foundations of quantum mechanics, Varenna School on foundations of quantum mechanics, Franco Selleri.

1. From Particle Physics to Foundations of Quantum Mechanics

A more detailed description of the Italian physicist Franco Selleri’s life, which also includes his research in particle physics (hereinafter referred to as PP) is portrayed in another paper submitted by the present authors in this same proceeding¹.

Selleri started moving his activity from PP to foundations of quantum mechanics (herein after FQM) in his passage from Bologna University to Bari University in November 1967, even if, as Selleri himself recalled in an interview to Olival Freire Jr. held in Bari in 2003²:

[...] In the beginning I thought that I would have made research both in particle physics and in quantum mechanics, but slowly I was completely attracted by the foundational problems. (AIP 2003)

¹ Romano L., Garuccio A., “Franco Selleri and his research on Particle Physics 1958-1970: Peripheral model and One Pion Exchange model”.

² The interview is currently in the Archive of the American Institute of Physics (AIP), see the URLs’ in the Bibliography at the end of the present paper.

It is possible to bear witnesses of several interrelated connections between PP and FQM carried forward together as well as the fact that his full transition to FQM seemed yet in progress after 3 years.

Selleri was a tutor of 39 graduation thesis and PhD dissertations from 1962 to 2004. Some of them show his interest in the two fields (PP and FQM) during the years 1967-1970:

1. **PP** Brunini P. (1967), *Teoria dei poli di Regge e confronto fra diverse reazioni*, Bologna Univ **FQM** Giglietto Antonio (1968), *Meccanica quantistica e processi markoviani*, Bari Univ.
2. **PP** Murro Onofrio (1968), *Produzione di particelle strane in urti di alta energia*, Bari Univ.
3. **PP** Fortunato Donato (1969), *Violazione di CP nel decadimento del K^0* , Bari Univ.
4. **FQM** Petrone Giovanni (1970), *Approssimazione stocastica della meccanica quantistica e sua formulazione lagrangiana*, Bari Univ.
5. **FQM** Calò Carducci Carmelo (1970), *Meccanica quantistica e variabili nascoste*, Bari Univ.

A critical step for Selleri's transition to FQM was the discovery of a book by the French theoretical physicist, philosopher of science, and author Bernard d'Espagnat. Always according to Freire's interview, Selleri claimed that:

[...] perhaps in 1971 or 1972 I was in Sweden. And it was in the library of the physics department of the University of Gothenbourg that I found in French the book by Bernard d'Espagnat, *Conceptions de la physique contemporaine*³. (AIP, 2003)

But Selleri spent in Sweden a period as a Visiting Professor on summer 1966. These hypotheses could be confirmed by the following excerpt taken by a list of his trips abroad for research, as found in several CV made by Selleri himself and common to different folders in distinct archives (FSPA):

- 1963/65 - Research Associate at Cornell University
- 1966 (summer) - Visiting professor at Göteborgs Universitet⁴
- 1968 (summer) - Visiting professor University of Notre Dame, Indiana
- 1970/1971 - Visiting professor University of Nebraska
- 1971 (summer) - Visiting professor Universidade de Sao Paulo

A further confirmation about his stay in Sweden comes from two letters sent by Kark Erik Eriksson at the Gothenbourg University to Selleri.

I have suggested to the Faculty of Science that you be invited as visiting professor for the time 01 February-30 June 1966. [...] Our research activities are mainly the

³ The book was published in 1965!

⁴ Gothenbourg and Göteborg represent the same city, respectively in English, as in Freire's interview, and in Swedish, like in Selleri's CV. Bold is ours.

following: i) Group theory in elementary particle physics (Lorentz group and symmetry groups); ii) Quantum electrodynamics (of course); iii) Field theory, more precisely gauge theories of interaction; iv) π -mesic atoms (in connection with experiments at CERN); v) Solid state physics. [...] I think that your experience would be very valuable for the activities i), iii) and iv) (Karl Erik Eriksson to Selleri, February 18th, 1966).

[...] You will be guest professor at our institute for four months (Karl Erik Eriksson to Selleri, April 6th, 1966).

In the nine months spent at University of Nebraska in 1970-71, Selleri had the responsibility for research in High energy theory and for teaching one introductory physics course, namely, quantum theory. So, both interests are still cultivated after 3 years. Looking at the teaching practice Selleri experienced abroad, there is unambiguous evidence that PP and FQM are standing together even in 1971 (FSPA):

- 1964/65: Cornell University: Electromagnetism
- 1966: University of Goteborg: Elementary particle physics
- 1970/71: University of Nebraska: Quantum Theory
- 1971: Universidade de Sao Paulo: Elementary particle physics

Moreover, as a further confirmation of Selleri's knowledge of d'Espagnat's book before 1971, there is an unpublished work titled *Quantum theory and hidden variables*, (Selleri 1969b), in which Selleri underlined:

[...] The philosophical prejudice in favour of a realistic philosophy is strong in the large majority of physicists. This prejudice did not turn against QM simply because very few people knew its real implications. The book of d'Espagnat should hopefully contribute to give a better comprehension of them. (Selleri 1969b)

The importance of the book by d'Espagnat on Selleri is undeniable, as he pointed out:

It was a revelation. It was something fantastic to see how many problems were open in quantum mechanics. [...] Reading that book was a great discovery. There was a new field possible to create and a lot of research to do. [...] It was fascinating to see that so many possibilities were open. So it was clear that the Copenhagen approach was not unique, was not obligatory. We had a philosophical freedom. (AIP, 2003)

2. Varenna as a turning point in the widening of FQM

In 1969, as a member of the directive board of Italian physical society⁵, Selleri brought up the proposal of organizing, within the International school of physics "E. Fermi", a summer school on Foundations of quantum mechanics in Varenna, on lake Como from

⁵ Selleri attended at least twenty SIF Presidency Council meetings (from number 140 to 160, being absent in two of them) during the period January 11th, 1969-July 18th, 1970. Selleri was actively participating in several outstanding decision of SIF Presidency Council, really influential for the scientific and political debate of those years.

29th June to 11th July 1970. The school was lead by the French physicist Bernard D’Espagnat and divided into three thematic sessions (measurement and basic concepts, hidden variables and nonlocality, interpretation and proposals). It was attended by 84 participants and a lot of notable physicists and epistemologists took part to it. Along with Selleri and Bernard D’Espagnat, there were J.S. Bell, E.P. Wigner, H. Stein, K.E. Hellwig, A. Frenkel, J.M. Jauch, A. Shimony, G.M. Prosperi, J. Ehlers, M. Yanase, J. Kalckar, G. Ludwig, C.Piron, B.S. De Witt, M. Vigičić, H.D. Zeh, F. Herbut, H. Neumann, J. Andrade e Silva, L. Kasday. The summer school established the starting point for a wide debate on FQM, as confirmed by several historians, like Olival Freire Jr. Selleri played a key role in organizing as well as in participating to it with a talk on “Realism and wave-function of quantum mechanics”⁶. He also created a huge amount of basic contacts, really essential for his future research activity.

3. A small glimpse on Selleri’s early contributions on FQM

The first Selleri’s papers show better his clear attitude on a critic to the so-called subjectivism of QM, his acceptance of realism, the importance of empty waves, the impressive role of a realistic philosophical approach in FQM and a proposals of several experiments.

His first paper on FQM was “On the wave function of quantum mechanics” (Selleri 1969a). Being his first paper in a new area of physics, Selleri decided to sent the preprint of his article to Louis de Broglie, as we can see from the answer by De Broglie himself to Selleri, dated February 24th, 1969, quite early before the publication of the paper:

I received with great interest the article “On the Wave function of Quantum Mechanics” because I saw that you were coming up with ideas very similar to mine⁷.
(Louis de Broglie to Selleri, February 24th, 1969)

Since the beginning, it sounds noticeable how Selleri had a definite position on QM as well as a detailed confidence of the remarkable importance of experiments to check different theories in order to discriminate between them, even though he was a theoretical physicist. Some excerpts of the preprint are here showed:

No physical phenomenon is known which disagrees with the predictions of QM. Nevertheless, several physicists found it very hard to accept this theory as basically correct. [...] They [showed] a reaction to the abstractedness of the quantum-mechanical axioms and regarded QM itself not as a final description of phenomena but as a theory similar to classical thermodynamics which provides relations for statistical averages over unknown (hidden parameters). [...] It is the purpose of the present note to point out that is should be possible to check experimentally these theories [...] (Selleri 1969a, p. Even though the theories of hidden variables are not

⁶ Presented as (Selleri 1971) in the Bibliography at the end of this paper.

⁷ “J’ai reçu avec un très grand intérêt l’article “On the wave function of quantum mechanics” car j’ai vu que vous arriviez à des idées très voisines des miennes” (Louis De Broglie to Selleri, February 24th, 1969. FSPA)

completely developed, an important shift of philosophical attitude can be noticed: particles and waves are now objectively existing entities. (Selleri 1969a, p. 909)

Selleri suggested an experiment to detect the Empty Waves using neutrinos:

An experiment [...] can be the following: a continuous beam of neutrinos traverses a piece of matter in which unstable entities (nuclei, excited atoms or molecules) are contained. The lifetime of these entities is measured in such conditions and compared to the lifetime of the same entities in the absence of any passing beam. If a difference is observed, its only logical explanation is that it is due to the action of the wave function, since the neutrinos are extremely weakly interacting particles and only a few of them, at most, can have interacted in the piece of matter with presently available neutrinos intensities. (Selleri 1969a, p. 910)

In another letter, dated April 11th, 1969, the French physicist answered to the proposal concerning the above-mentioned experiment:

The experience you imagined to prove the existence of the [empty] wave [...] would be very interesting to prove the existence of this very weak wave that would transport the particles, but it would probably be very difficult to do with neutrinos. On the contrary, the improvement of the images for the apodization process is common in laboratories and I think that it already brings the advantage that the sustained photons are transported by a very weak wave that undergoes an absorption of a classical type when passing through a medium as I pointed out in one of the notes I sent you. (Louis de Broglie to Selleri, April 11th, 1969)

The letters sent by Selleri to de Broglie have not been found on Selleri's archive and therefore there are no confirmation at all that the experiment with neutrinos proposed by Selleri may have been introduced and/or developed also in one of his letters before April 1969, in addition to the preprint he sent to de Broglie. Even if, de Broglie started his answer giving thanks to Selleri for his "kind letter", implying the probable presence of another Selleri's letter.

Another basic paper is surely the aforementioned "Quantum Theory and Hidden Variables", based on the lectures he gave at Frascati National Laboratories in September 1969, and written between June and July 1969. Even though it is unpublished, it clarifies a lot Selleri's attitude and approach:

These lectures [...] are divided into five chapters. In the first two the FQM are reviewed critically. I made no effort to hide my dislike of the philosophical implications of QM (Selleri 1969b, p. 3).

In the incipit of his Varenna paper, *Realism and wave-function of quantum mechanics*, he explicitly expresses his views:

Let me state from the beginning that I accept the realistic philosophy. It seems to me very difficult to take seriously a different philosophical standpoint, although it is certainly logically possible. The point is that practically nobody in the society of which the physicist is a part has any doubt about the actual existence of an objective

reality outside the observer. By objective I mean existing independently on its being observed. [...] Some ideas must be taken as self-evident without the need for any explanation. These are *a priori* ideas, as is well known from philosophy, and the outside reality is one of them. [...] The foundations of physics (and in particular of quantum mechanics) should then better be based on a realistic philosophy (Selleri 1971, p. 398).

4. Conclusions

We addressed the transition of the Italian Physicist Franco Selleri from the research on Particle Physics to the investigation of the Foundations of Quantum Mechanics, showing how it has matured in at least three years, from 1969 to 1971. Furthermore, we showed some seminal papers which gave rise to his research on Foundations of Quantum Mechanics, as well as the remarkable correspondence with the French Nobel Prize in Physics Louis de Broglie.

The best way to articulate a conclusion related to the development of Selleri's research lines throughout his scientific career is to report directly his own words in an excerpt taken from "Weak Relativity", a book on Selleri's research activity in FRT, published posthumously for the English edition. Therein, he stated that:

By 1969 I had come to the conclusion that there was something basically wrong in the way theoretical physics was practiced: too much high mathematics and too little understanding in space and time. Therefore, I devoted myself to a critical study of the most fundamental theories, quantum mechanics and relativity. The rest of my scientific life is a consequence of these early decisions [...]. (Selleri 2015)

Acknowledgments

We are particularly indebted with Angela Selleri Pizzi and Diana Selleri, the wife and the daughter of Franco Selleri, for the opportunity of accessing Selleri's whole private collection, giving us a unique, privileged insight in Selleri's life inside and outside the physical research. One of the authors (L.R.) wish to express a special gratefulness to Dr. Flavio del Santo, with whom he exchanged material for the respective works. He has been always very close with concrete support, helpful discussions, and exhilarating suggestions in different periods.

References

AIP (2003). *Interview of Franco Selleri by Olival Freire on 2003 June 24* [online]. URL: <www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/28003-1> [access date: 10/06/2020].

- AIP (2003). *Interview of Franco Selleri by Olival Freire on 2003 June 25* [online]. URL: <www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/28003-2> [access date: 10/06/2020].
- Selleri F. (1969a). “On the Wave Function of Quantum Mechanics”. *Lettere al Nuovo Cimento*, 17 (1), pp. 908-910.
- Selleri F. (1969b). “Quantum Theory and Hidden Variables”. Lectures held in LNF 69/75, pp.1.25. Unpublished.
- Selleri F. (1971). *Realism and the wave-function of quantum mechanics*, in D’Espagnat B. (ed.), *Foundations of Quantum Mechanics. Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi”*, Course IL. Varenna sul Lago di Como, 29 Giugno -11 Luglio 1970. New York-London: Academic Press, pp. 398-406.
- Selleri F. (2015). *Weak relativity*, Barone M. (ed.). Athens: Kostarakis Scientific. ISBN: 978-618-81871-0-8.

Archival sources

Bari: Franco Selleri’s Private Archive (FSPA).

MUSEUMS AND SCIENTIFIC INSTRUMENTS

La pubblicistica di divulgazione nell'astronomia di fine Ottocento fra scienza popolare e scienza “per signora”

Giancarlo Albertini – CISO Piemonte - giancarlo.albertini@gmail.com

Anna Sicolo - Asl Na1 centro - anna.sicolo.pas@gmail.com

Abstract: The activism of astronomers in the dissemination of their own and others' discoveries is today very significant, as shown by recent surveys. This is not a characteristic out of the ordinary in the secular history of this science, even if there are different ways to spread scientific disclosure: here we consider the so-called popular astronomy and in particular the one commonly known as “for lady”. The popular publications of astronomy in Italian language between the end of the nineteenth and the beginning of the twentieth century are copious and, in this context, the Italian translations of the works of Camille Flammarion and his wife Gabrielle Renaudot take an important place. The language of astronomical popularization is still evolving, and a language of popular dissemination is born with its own characteristics in the general context of scientific language.

Keywords: popular astronomy, language of astronomy, scientific disclosure, astronomy for lady.

1. Ricercatori narratori

Tradizionalmente esistono da una parte scienziati e ricercatori e su un altro versante divulgatori che si occupano di mettere al corrente il grande pubblico delle nuove scoperte oppure fanno opera educativa su momenti topici della storia della scienza. Si tratta di figure differenti, separate sia per la funzione che svolgono sia per mentalità, rivolta verso l'interno gli uni e rivolta verso l'esterno gli altri, ovverosia rivolta verso il futuro gli uni, verso il presente e il passato gli altri.

Da qualche tempo capita sempre più spesso che i ricercatori, oltre a proseguire i contatti e i confronti con esperti loro pari, si occupino in prima persona di stabilire direttamente un contatto con il pubblico dei non esperti. Siamo di fronte ad una nuova figura, il ricercatore-divulgatore che si occupa di spiegare il merito e i progressi del proprio lavoro, di vendere, per così dire, la scienza. E gli astronomi e gli astrofisici sono molto attivi in questo campo e modificano anche il loro linguaggio.

Recenti ricerche hanno accumulato dati e informazioni sui modi con i quali gli astronomi sensibilizzano il pubblico alle proprie ricerche, mostrando una *stellar joie de vivre*. Basti per tutti leggere l'articolo di Aisling Irwin (Irwin 2018). Dice Nick Enfield, docente di linguistica presso l'Università di Sidney: “il nostro lavoro come scienziati è trovare la verità, ma dobbiamo anche essere narratori” (Enfield 2018).

Gli scienziati apprendono, come d'altronde hanno già fatto in passato, a mettere in relazione i dati, utilizzano la tecnica del raccontare storie, imparano a diventare *storyteller*. Non temono di cimentarsi, dal momento che lo stile narrativo accresce la diffusione dei risultati scientifici e ne accresce di conseguenza anche il valore.

Esiste in tutto ciò il rischio legato all'eccessiva semplificazione della complessità del discorso scientifico e il pericolo di non riuscire di conseguenza a fare educazione. Fare divulgazione in modo corretto non è un'operazione che si possa improvvisare, questa competenza dovrebbe essere patrimonio dei ricercatori e appresa correttamente.

E se si tratta di una istituzione scientifica, la divulgazione deve essere gestita da uno *staff* qualificato, dedicato alla comunicazione e con competenze diversificate. Siamo di fronte al superamento del concetto di di(vulga)zione, cioè della comunicazione dell'esperto verso il non esperto. Presa alla lettera la divulgazione presuppone che chi sa informi e educi chi non sa e che non sarebbe altrimenti in grado di apprendere contenuti scientifici da sé solo. Si vuole ora rifiutare l'atteggiamento paternalistico per il quale il volgo viene messo al corrente di saperi che sono patrimonio di altri, di saggi che comunicano, unidirezionalmente, solo se e quando vogliono e mettono in condizione gli ignoranti di smettere di esserlo.

Per quanto riguarda l'Italia, il centro studi Observa.it ha mappato un campione di 347 dipartimenti universitari ed ha verificato che Facebook è utilizzato dal 40% di essi, Twitter dal 20%, in misura minore Youtube e Instagram ed ha individuato cinque parole chiave nella comunicazione scientifica: oltre a *divulgazione*, c'è il *deficit* nei confronti della scienza e delle questioni poste dal suo sviluppo, fra l'opinione pubblica e i decisori politici, una distanza che denuncia un grave stato di disinformazione alimentato da una copertura mediatica inadeguata, spesso sensazionalistica. A ciò si aggiunge una scarsa preparazione scientifica di base e una generale disattenzione nei confronti della ricerca scientifica. Il *dialogo* è considerato un elemento fondamentale nell'avvicinamento fra scienza e società. Con l'*engagement* si vuol sottolineare l'importanza del coinvolgimento a tutti i livelli dei ricercatori con l'obiettivo finale di far sì che gli scienziati da *invisibili* divengano pubblici.

2. La divulgazione scientifica in Italia

Queste riflessioni rappresentano un versante di questo lavoro, mentre un altro stimolo proviene dalla frase di Gramsci nei *Quaderni dal carcere*, *Letteratura e vita nazionale*: "Perché non sorgono in Italia scrittori come il Flammarion? Perché non è nata una letteratura di divulgazione scientifica, come in Francia e negli altri paesi?" (Gramsci (1934-1935)).

Nella concezione gramsciana la responsabilità degli intellettuali è molto alta e non si limita ad un passaggio di informazioni da chi sa a chi non sa. Gli intellettuali sono parte del processo di egemonia e quindi condividono con politici, insegnanti, artisti il dovere di un'educazione alta verso le classi subalterne.

E per entrare nel merito della domanda di Gramsci, occorre una risposta sul piano dell'incontro fra il bisogno degli scienziati di comunicare e il bisogno di sapere commisurato con la situazione della società italiana.

La divulgazione scientifica nasce dall'incontro fra il bisogno degli scienziati di comunicare con il bisogno dei non sapienti di sapere e il tasso di alfabetizzazione è determinante per comprendere quale tipo di pubblico reale possa esistere per la scienza per tutti. Ma nel 1871, mentre la Francia e la Gran Bretagna avevano un tasso di analfabetismo rispettivamente del 30% e del 26%, l'Italia si trovava al 69%. E questa è una delle risposte al problema gramsciano del ritardo italiano nella divulgazione scientifica.

L'obbiettivo della divulgazione scientifica ottocentesca era di consentire una comunicazione tra specialisti di discipline diverse. Ricordiamo che il settimanale inglese *Nature* fu fondato nel 1869. Ci si proponeva di fornire ai nuovi ceti della borghesia e ad artigiani, operai e perfino alle donne gli strumenti adatti a un'istruzione pratica, utile al processo industriale e al miglioramento della vita degli individui e della comunità, anche in alternativa, se non in esplicito antagonismo, con la formazione religiosa. E si perseguiva il proposito di calare lo scienziato nella società cosicché egli potesse chiarire le proprie posizioni, guadagnare consensi e orientare di conseguenza il modo di presentare all'opinione pubblica i propri progetti di ricerca, aprendo così la strada alle risorse economiche. E fu un fiorire di opere di scienza popolare astronomica. Per quanto riguarda le pubblicazioni ottocentesche edite in Italia, possiamo ricordare (Quetelet 1829, Bernardi 1839).

E un esame, certo incompleto, delle pubblicazioni edite in Italia nella prima metà del 900 ci ha confermato un interesse crescente per la divulgazione astronomica (Del Giudice 1934; Loreta 1935; Maffi 1923; Meyer 1900; Porro 1920; Sacco 1918; Schiapparelli 1925; Zanotti Bianco 1913).

3. Astronomia per signore

Esiste un filone interessante di pubblicazioni di divulgazione scientifica e astronomica dedicata alle signore della borghesia e seguendone il filo passiamo da De Fontanelle a Algarotti a Lezioni di astronomia per le dame fino a Camillo Flammarion, *Astronomia per le signore*. Esse erano considerate dagli autori di quel periodo un pubblico privilegiato, simbolo di ignoranza, buona volontà e curiosità. E l'opera dei coniugi Flammarion fu appunto un vero motore di educazione astronomica anche in Italia. E qui si inserisce la riflessione gramsciana che prima abbiamo ricordato. Vogliamo sottolineare a questo proposito anche il filone di romanzi di fantascienza di Flammarion che, coniugando divulgazione scientifica e vicende romanzesche a carattere sentimentale, rappresentava una forte attrattiva per le lettrici dell'epoca.

I mutamenti nelle caratteristiche della divulgazione astronomica si possono osservare anche nell'uso della lingua, o per lo meno tracce di cambiamenti nell'uso soprattutto verbale.

In base a recenti, ma purtroppo ancora limitate indagini su scritti di argomento astrofisico, possiamo affermare che si tende oggi ad usare la prima persona plurale, il noi attivo per indicare momenti dello sviluppo logico nell'argomentazione, quando è stata fatta un'unica scelta procedurale; il passivo sembra essere usato quando si parla di ricerche future o progetti di ricerca oppure quando gli autori stanno semplicemente seguendo procedure prestabilite o standard oppure sono in contrasto con risultati di altre ricerche.

Chiudiamo il cerchio delle nostre considerazioni prendendo in esame i risultati degli ultimi test Invalsi di OCSE PISA con il pensiero rivolto a quanto già detto sull'analfabetismo in Italia che presentano una situazione estremamente preoccupante.

Nel 2019 il 35% degli studenti di terza media non capisce un testo d'Italiano, sa individuare singole informazioni date esplicitamente in parti solo circoscritte di un testo. Mentre per il livello superiore dell'istruzione, i risultati dell'indagine OCSE PISA 2015 sottolineano che in Lettura il punteggio medio italiano è risultato significativamente inferiore al dato OCSE di 8 punti (485 vs 493). Tra i paesi dell'Unione Europea, l'Italia ha ottenuto un punteggio superiore a Bulgaria, Romania, Repubblica Slovacca, Grecia e Lituania. La percentuale di studenti italiani che raggiunge il livello minimo di competenza (livello 2) è leggermente superiore alla media OCSE (25 vs 23). La percentuale di studenti al di sotto del livello 2 non si è discostata dalla media internazionale, mentre gli studenti che si collocano nei livelli più elevati sono in percentuale inferiore al dato internazionale (6 vs 8).

Bibliografia

- Bernardi A. (1839). *Nozioni d'astronomia compilate e in massima parte tradotte dall'astronomia popolare di Litrow*. Bologna: Tip. Nobili.
- Del Giudice I. (1934). *L'evoluzione del cosmo*. Firenze: Nerbini.
- Enfield N. (2018). "Our job as scientists is to find the truth. But we must also be storytellers". *The Guardian*, 20 July 2018 [online]. URL: <<https://www.theguardian.com/commentisfree/2018/jul/20/our-job-as-scientists-is-to-find-the-truth-but-we-must-also-be-storytellers>> [data di accesso: 29/06/2020].
- Gramsci A. (1934-1935). *Quaderni dal carcere, Quaderno 21, Problemi della cultura nazionale italiana. I. Letteratura popolare*, 5. Torino: Einaudi.
- Flammarion C. (1885). *L'astronomia popolare*. Milano: Sonzogno.
- Flammarion C. (1931). *Astronomia per le signore*. Milano: Sonzogno.
- Irwin A. (2018). "Astronomers have an outsize passion for outreach". *Nature*, News 26 November 2018 [online]. URL: <<https://www.nature.com/articles/d41586-018-07519-2>> [data di accesso: 29/06/2020].
- Loreta E. (1935). *Scalata agli astri. Libro di astronomia popolare*. Bologna: Cooperativa tipografica Azzoguidi.
- Maffi P. (1923). *Nei cieli. Pagine di astronomia popolare*. Torino-Milano: SEI.
- Meyer G. (1900). *L'universo stellato. Trattato di astronomia popolare*. Torino: UTET.

-
- Ortore M. (2014). *La lingua della divulgazione astronomica oggi*. Pisa-Roma: Fabrizio Serra Editore.
- Porro F. (1920). *Elementi di astronomia*. Milano: Biblioteca della Università Popolare di Milano.
- Quetelet A. (1829). *Dell'astronomia popolare*. Roma: Società tipografica.
- Sacco F. (1918). "Lo spessore della stratosfera" in *Saggi di astronomia popolare, anni VII-VIII*. Torino: Tipografia San Giuseppe degli artigianelli.
- Schiaparelli G. (1925). *Le più belle pagine di astronomia popolare*. Milano: Hoepli.
- Tarone E. (1981). *On the Use of the Passive and Active Voice*, in *Astrophysics Journal Papers: With Extension to Other Languages and Other Fields*, in "English for Specific Purposes", 17, pp. 113-132.
- Zanotti Bianco O. (1913). *Storia popolare dell'astronomia*. Torino: Società tipografico-editrice nazionale.

Sistema Museale Irpino

Gaetano Abate – Associazione *Scienza Viva*, Centro della Scienza, Calitri (AV) – gaetano51@gmail.com

Abstract: In agreement with Provincial Authority, public high schools *Pietro Colletta*, *F.De Sanctis*, *P.E. Imbriani* and *Scienza Viva* association, the Irpinian Scientific Museum opens its doors to visitors, located in the Bourbonic Prison in Avellino. A collection of instruments from the 18th and 19th centuries has been listed and restored by teachers, students and volunteers during curricular and extracurricular activities. The equipment is loaned free of charge to the Provincial Authority in order to promote pedagogical paths through science and technology and it is a part of a bigger project referred as “Sistema Museale Irpino” for Cultural enhancement of the territory. Thanks to work-related activities promoted by *P.S. Mancini* high school and Computer science Department of the University of Salerno, *Open-data* projects have been developed. Students supervised by many teachers made a database on exhibited instruments; datasets are currently available on the online platform *Hetor*. Efforts are being made in order to virtualize the collection, using photogrammetry as 3D modelling tool.

Keywords: Scienza Viva, Sistema Museale Irpino, Hetor.

1. Introduzione

Nel mese di luglio 2019 il Museo Irpino, nell’ambito del progetto *Sistema Museale Irpino*, mirato alla conoscenza e alla valorizzazione del patrimonio culturale della *Terra di Mezzo* (territorio interregionale tra l’Irpinia e il nord della Basilicata che sin dall’epoca romana era collegamento tra Napoli e la Puglia), ha arricchito la sua sede nell’ex Carcere Borbonico di Avellino, con una nuova sezione. Dopo i quattro settori *Risorgimentale*, *Irpinia-Memoria ed Evoluzione*, *Deposito Visitabile* e *Pinacoteca* è stata finalmente aperta al pubblico, infatti, la Sezione Scientifica.

2. La Sezione Scientifica del Museo Irpino

In due sale al secondo piano della ex struttura carceraria sono esposti strumenti antichi, databili tra la fine del XVIII secolo e l’inizio del XIX secolo, recuperati, catalogati, ripuliti, restaurati da alcuni insegnanti, aiutati dagli studenti, di tre antiche scuole avellinesi: il Liceo statale *Paolo Emilio Imbriani*, l’Istituto tecnico agrario *Francesco de Sanctis*, il Liceo classico *Pietro Colletta*, che hanno goduto dell’appoggio e della collaborazione dell’Associazione *Scienza Viva*.

Il percorso per la nascita del museo è stato abbastanza lungo, a partire dal dicembre 1993, quando è iniziata una collaborazione delle scuole con il Museo di Storia della Fisica di Firenze, in particolare con Paolo Brenni. Dal 1997 è stata coinvolta l'Amministrazione Provinciale di Avellino, grazie alla quale è stato possibile istituire un primo nucleo di Museo Scientifico, che comprendeva cinquanta strumenti. Nel 2015 è stato siglato un accordo tra la Provincia e le scuole interessate, che hanno ceduto in comodato d'uso alcuni strumenti antichi all'Amministrazione e l'esposizione si è così arricchita di altri cinquanta elementi: in tal modo sono stati valorizzati molti strumenti che negli anni, probabilmente, sarebbero stati mandati al macero, mentre oggi possono essere visti, studiati e ammirati e per la loro bellezza e per il loro valore scientifico, dato che con alcuni di essi si possono ancora eseguire esperienze significative.

L'obiettivo del nuovo museo è di valorizzare il patrimonio culturale scientifico del territorio e creare nei giovani un interesse per la storia della scienza e avvicinarli al "saper fare" e "all'imparare facendo" e a questo scopo i curatori dell'istituzione hanno promosso e appoggiato varie iniziative sul territorio.

Il Liceo Classico *P. Colletta* di Avellino e la sezione staccata di Pietradefusi hanno proposto agli studenti di "adottare uno strumento", per salvaguardare il notevole patrimonio conservato nelle due scuole e per far conoscere il valore dello strumento antico, l'importanza della conservazione e per ribadire il valore delle scienze sperimentali.

Attraverso le attività di *Alternanza scuola lavoro*, che hanno visto collaborare il Liceo Scientifico *Mancini* di Avellino, l'Amministrazione Provinciale e il Dipartimento di Informatica dell'Università degli Studi di Salerno, è stato sviluppato un progetto basato sugli *Open-data*. Gli studenti hanno contribuito alla costruzione di un dataset contenente una schedatura di tutti gli strumenti esposti. Il lavoro è stato reso disponibile su *Hetor*, una piattaforma digitale per gli *Open-data* del Patrimonio Culturale della Regione Campania, realizzata nell'ambito del Distretto ad Alta Tecnologia per i Beni Culturali (*DATABENC*). Più in particolare si sta procedendo anche ad una modellazione 3D degli oggetti esposti al fine di creare un museo virtuale.

Anche gli studenti di Fisica dell'Università degli Studi di Salerno, in seno al Consiglio didattico e alla Commissione paritetica, hanno chiesto l'inizio di una collaborazione con il Museo Irpino, che potrebbe essere riconosciuta loro come tirocinio e che sarebbe finalizzata al restauro, allo studio, alla rimessa in funzione e all'utilizzo per fini didattici di strumenti scientifici, nonché alla produzione di nuovi.

La presenza nel museo di una sala/laboratorio dotata di attrezzature necessarie al trattamento dei reperti, e la produzione di strumenti scientifici per la didattica della fisica, potrà contribuire alla promozione di iniziative culturali, alla replica di esperimenti famosi, nonché alla realizzazione di nuovi exhibit e potrebbe avvicinare le persone alla manualità e alle abilità specifiche per una diversa e nuova didattica della fisica. Potranno altresì essere realizzati video didattici, nei quali i docenti e gli allievi mostrino le fasi del loro lavoro - dal restauro al ripristino della funzionalità dello strumento, in modo che questi filmati possano essere utilizzati durante le lezioni o come approfondimenti.

Bibliografia

Abate G., Ambrosone A. (1993). *Mostra di Antichi Strumenti Scientifici*. Atripalda (AV): Arti Grafiche Pellecchia srl.

- Abate G., Francese E. (1994). *Mostra di Antichi Strumenti Scientifici – per le vie della scienza nella scuola con l'insegnamento di Francesco de Sanctis* (II Edizione). Atripalda (AV): Arti Grafiche Pellecchia srl.
- Abate G., Francese E. (1995). *Mostra di Antichi Strumenti Scientifici – Lungo le vie della storia del pensiero, il mondo delle scienze ieri e oggi* (III Edizione). Atripalda (AV): Arti Grafiche Pellecchia srl.
- Abate G. (1995). *Nuovo Meridionalismo – Mostra di strumenti scientifici all'Istituto Magistrale*. Anno XI, n.104. Avellino: Poligrafica Ruggiero.
- Abate G., Francese E. (1996). *Settimana Scientifica Nazionale – l'Irpinia con la scienza verso l'Europa*. Atripalda (AV): Arti Grafiche Pellecchia srl.
- Abate G., Francese E., Giuseppe Di Nardo (1997). *Il Tempo: dalla vita del tempo al tempo della vita*. Atripalda (AV): Arti Grafiche Pellecchia srl.
- Abate G., Acocella G., Aquino S., Cerreta P., De Feo V., De Simone A., Feoli A., Iannuzzi A., Toglia C. (2006). *La Provincia Irpina – adottiamo il passato*. Avellino: Poligrafica Ruggiero.
- Abate G., Garritano A., Landri S., La Sala R., Testa D. (2018). *Annuario 2017-2018 del Liceo Statale «P.E. Imbriani» – 150 anni – Formiamo il domani – Verso il Museo Scientifico Irpino: la Settimana Scientifica all'Imbriani*. Avellino: Edizioni Mephite.

Due strumenti scientifici italiani del XVI secolo, ritrovati nel 2014 nei magazzini del Castello Ursino di Catania

Fausto Casi – MUMEC, Museo dei Mezzi di Comunicazione di Arezzo – faustocasi@tiscali.it

Andrea Orlando – Istituto di Archeoastronomia Siciliana – orlando@archeoastronomia.com

Abstract: Analisi di due strumenti scientifici ritrovati nei pressi di Catania, rivelatisi due bussole topografiche del XVI secolo, entrambe italiane ed una delle quali firmata da Lorenzo Di Camillo Della Volpaia e datato 1560.

Keywords: Strumenti scientifici, bussola topografica.

1. Incontri, studio e collaborazioni

Durante la sessione dell'ultimo convegno SISFA di Messina 2018, dopo la presentazione di un magnifico astrolabio di Gualterus Arsenius, è stato proprio il relatore Andrea Orlando a parlarmi di altri strumenti ritrovati nei pressi di Catania, assieme a questo astrolabio del XVI secolo.

È così che Andrea, ai primi del 2019, mi ha inviato delle foto dei due pezzi: a prima vista ho dedotto che si trattava di due strumenti italiani di costruzione probabilmente fiorentina del XVI secolo, stessa epoca dell'astrolabio di Arsenius (1560) che, tra l'altro ha un timpano con latitudine *XXXIII gradi e $\frac{3}{4}$ di primi* (corrispondente alla latitudine di Firenze), dato che confermerebbe la provenienza fiorentina, finora ritenuta probabile, del blocco di strumenti ritrovati nel magazzino del Castello catanese.



Fig. 1. In fotografia le due bussole topografiche in esame A (sinistra) e B (destra).

Descrizione dei due strumenti: entrambi di forma circolare, si presentano ossidati e incompleti, mancando gli aghi delle rispettive bussole, poste in posizione centrale, ed altri

particolari che saranno individuati, anche nelle loro caratteristiche geometriche e funzionali, durante i singoli esami.

Appartengono, entrambi gli strumenti, alla categoria di **bussola topografica**, ovvero bussola per misure angolari orizzontali per rilevamenti in geodesia, con la quale è possibile misurare e ricavare le distanze nei terreni, le grandezze delle fortezze, dei palazzi, ecc...

2. Strumento A: Bussola Topografica

Facendo riferimento alla fotografia di sinistra, a prima vista, ci risulta uno strumento in ottone ben inciso con due corpi, mobili tra loro intorno allo stesso asse, che è anche l'asse di rotazione dell'ago della bussola centrale (ora mancante).

Il riferimento per la misura è la linea di appoggio sul lato esterno, quello che ha il corpo traforato, collegato con un indice, posto in quadratura ed operante nel quadrante opposto, con il quale è possibile effettuare la misura angolare.

Posto in posizione orizzontale, con i quattro piedini (uno mancante) nel piano di lavoro, lo strumento topografico, viene tarato con l'indice mobile parallelo all'ago della bussola che indicherà il Nord (*Tramontana*); spostando poi la riga di riferimento parallela al punto di cui si vuol conoscere la distanza angolare rispetto al Nord, facendo rotare poi la parte circolare (che contiene la *Rosa dei venti*), posizioneremo l'indice in un punto determinato della scala angolare. Tale lettura ci fornisce l'angolo di distanza che sarà necessario per disegnare la mappa del luogo soggetto alla misura.

Ciò che ha attirato la mia attenzione su questo strumento è stata la mancanza di:

1. Ago della bussola centrale; nel fondo bussola si nota l'incisione della freccia indicante la **declinazione magnetica** che corrisponde a 10° e $30'$ Est, rispetto al Nord magnetico naturale del meridiano astronomico (Sarran 1868, p. 84). Tale declinazione, incisa al tempo della costruzione dello strumento, ci fa riportare la data della sua presenza nel campo delle misure agrimenso-riche, verso la metà del XVI secolo.
2. Uno dei quattro piedini utili per il piazzamento prima della misura.

Ma è stata soprattutto la complessità di incisione della Rosa dei venti che mi ha incuriosito e che ora vale la pena di descrivere. Nella parte più esterna della circonferenza metallica è riportata la scala goniometrica nell'intero angolo giro dei 360° , con indicazioni di 10° in 10° e divisioni al grado; suddiviso con 32 indicazioni, quando normalmente sono 8 le rappresentazioni della Rosa dei venti.

La scala esterna ha indicato, secondo il sistema sessagesimale, gli archi di cerchio da 0 a 90° a 0 a 90° a 0 , corrispondenti ai quattro punti cardinali principali: Tramontana (0) – Levante (90°) – Mezzodi (0) – Ponente (90°) – Tramontana (0).

Intervallati a 45° sono riportati Greco (45°) – Sirocco (45°) – Libeccio (45°) – Maestro (45°), e queste diventano così le 8 indicazioni principali della Rosa dei venti italiana che normalmente si legge nelle bussole sia da terra sia per la marina mediterranea.

Ma vediamo ancora, tra ognuno degli 8 venti e l'altro, altre tre indicazioni che dividono in quattro parti ciascuno dei settori circolari di 45° ; partiamo dal punto (0) della Tramontana e percorriamo l'angolo giro ad esempio in senso orario:

- TRAMONTANA con il GIGLIO (0); Quarta di Tramontana verso Greco; Greco – Tramontana; Quarto di Greco verso Tramontana; GRECO (45°); Quarto di Greco verso Levante; Greco – Levante; Quarto di Levante verso Greco; LEVANTE (90°); Quarto di Levante verso Sirocco; Levante – Sirocco; Quarto di Sirocco verso Levante; SIROCCO (45°); Quarto di Sirocco verso Mezzodì; Sirocco – Mezzodì; Quarto di Mezzodì verso Sirocco; MEZZODÌ (0); Quarto di Mezzodì verso Libeccio; Mezzodì – Libeccio; Quarto di Libeccio verso Mezzodì;
- LIBECCIO (45°); Quarto di Libeccio verso Ponente; Libeccio – Ponente; Quarto di Ponente verso Libeccio;
- PONENTE (90°); Quarto di Ponente verso Maestro; Ponente – Maestro; Quarto di Maestro verso Ponente;
- MAESTRO (45°); Quarto di Maestro verso Tramontana; Maestro – Tramontana; Quarto di Tramontana verso Maestro; TRAMONTANA (0).

Come abbiamo visto gli 8 riferimenti della rosa dei venti corrispondono anche alla gradazione angolare del *sistema sessagesimale* 0 – 45° - 90° - 45° - 0 – 45° - 90° - 45° - 0; le altre quattro divisioni (quelle dei QUARTI) non sono leggibili nella scala goniometrica e, per questi viene usata la lettura di una scala interna divisa in 512 parti elementari. Le indicazioni intermedie (dei quarti) vanno lette ed interpretate nella scala interna a quella dei 360°, ovvero quella che ha invece 512 divisioni.

In questa nuova scala, non numerata ma facilmente identificabile nel conteggio, sono infatti riportati i QUARTI sopra elencati che comprendono ciascuno 16 divisioni, ovvero tra l'uno e l'altro si contano nella scala 16 valori ciascuno dei quali corrisponde ad 1/512 (un cinquecentodicesimo) della scala circolare interna che in questi casi viene definita in *centesimi*.

Il confronto tra le due scale può avvenire ogni 45°, all'intero delle quali sono visibili quattro scale interne contando in ciascuna (tra 1/4 e l'altro) 16 divisioni; essendo 4 i settori di scala interna (ogni 45°) saranno da contare 64 divisioni che, moltiplicate per le 8 indicazioni dei venti fanno contare 512 divisioni nell'angolo giro. Questa seconda scala consente perciò una lettura molto più precisa rispetto a quella del sistema sessagesimale che divide l'angolo giro in 512 linee anziché in 360 divisioni.

Dalle ricerche effettuate sulle collezioni di molti Musei scientifici si è potuto appurare che simili scale con rosa dei venti così suddivisa e rappresentata in 32 settori si ha solo in uno strumento appartenente alle “Collezioni Medicee”, conservato presso il Museo *Galileo Galilei* di Firenze, con numero d'inventario 3728. Lo strumento oggetto del nostro studio (Bussola topografica A) è, quindi, un interessante manufatto, sicuramente italiano, probabilmente fiorentino della seconda metà del XVI secolo.

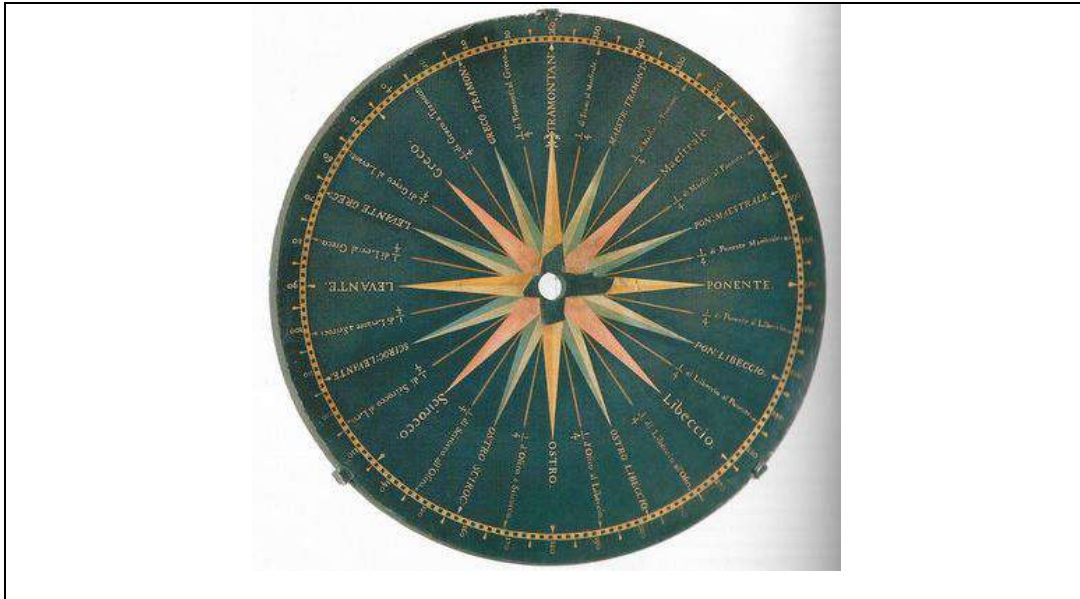


Fig. 2. Rosa dei venti italiana, conservata presso il Museo Galileo Galilei di Firenze (Miniati 1991, p. 168), riporta la divisione elementare in 32 direzioni, come è indicata nel nostro strumento. Di eccezionali dimensioni, con una circonferenza di ardesia di 80 cm di diametro, che supporta la carta stampata policroma (Camerota, Miniati 2008, p. 246).

3. Strumento B: Bussola Topografica

Facendo riferimento alla seconda figura di destra, lo strumento B, ci troviamo ad esaminare nei dettagli una scritta, appena leggibile, incisa a punzoni in caratteri maiuscoli, intorno al cerchio di ottone contenente la bussola, in posizione centrale dello strumento. Si tratta nientemeno che di un manufatto proveniente dalla famiglia dei Della Volpaia, i costruttori fiorentini tra i più famosi ed importanti che, dalla seconda metà del XV secolo fino al 1614, produssero bellissimi orologi e strumenti scientifici per le committenze più prestigiose a livello anche internazionale.

Con la massima attenzione sono arrivato al risultato di una completa lettura: parole:

LAURENT CAMILI VULPARI(A) FLORENTINUS FA. A. D. MCLX

che significa: “Lorenzo di Camillo della Volpaia, fiorentino, fabbrica nell’*Annus Domini* 1560”.



Fig. 3. Dettaglio della bussola topografica.

Stabilito che questa è la provenienza, per il sottoscritto è stato facile ricordare uno studio già fatto nel nascere del terzo millennio. Era infatti l'anno 2000 quando fui chiamato ad effettuare una visita alle soffitte del Convento dei Frati Francescani della Verna (Arezzo) onde effettuare ricerche tese al ritrovamento di materiali storici riguardante il convento di San Francesco. Da queste indagini risultarono importanti ritrovamenti e tra questi reperti evidenziai, assieme ad altri strumenti minori, il *Quadrante astronomico orario*, risultato poi di Lorenzo di Camillo della Volpaia, realizzato proprio nel 1560.; Oggi, alla luce di questa nuova e definitiva lettura dell'incisione circolare ritrovata attorno al cerchio bussola del nostro strumento catanese, possiamo asserire che abbiamo ora da indicare due strumenti scientifici costruiti da Lorenzo di Camillo, uno per uso astronomico (l'Orologio solare del Convento della Verna) e l'altro, l'ultimo, per uso in geodesia, come bussola topografica (quello del Castello Ursino).

A prima vista si nota lo strumento incompleto per la mancanza dell'ago magnetico della bussola centrale ma anche di un *braccio* o *alidada*, uguale identico a quello ancora esistente alla sinistra ma di forma speculare nella parte finale che va a costituire la *diottra* di puntamento dello strumento per la rilevazione delle misure. Questa doppia *alidada* ha la possibilità di ruotare, sull'asse centrale dell'ago della bussola, intorno alla circonferenza in ottone che costituisce il corpo dello strumento di misura.



Fig. 4. Visione superiore e inferiore dello strumento.

La scala principale dello strumento è riportata nel bordo esterno del cerchio ed è incisa secondo il sistema sessagesimale in gradi, ovvero le 360 divisioni del cerchio goniometrico sono tracciate al grado e sono indicate ogni 5° (di 5° in 5°) contando ognuno degli 8 settori circolari per ogni vento da 0° a 45° e ricominciando ancora da 0° fino a 45° per il successivo e così via per tutte le 8 direzioni, considerando la lettura in senso orario. La Rosa dei venti è incisa con 8 punti di direzione quanti sono gli 8 venti rappresentati normalmente nelle bussole italiane e mediterranee: partendo dal punto “0” “TR” (*Tramontana*) che, con l’ago funzionante rappresenterebbe la direzione Nord, andando in senso orario, incontriamo dopo 45° (nella scala di 5° in 5°) la successiva indicazione di direzione “GR” (*Greco*), poi dopo altri 45° “LE” (*Levante*), ancora leggendo da 0 a 45° “SI” (*Sirocco*), e quindi dopo altri 45° si incontra “ME” (*Mezzogiorno*), poi leggendo ancora da “0” a 45° si trova “GA” (*Garbino*), quindi, dopo altro settore angolare di 45° troviamo “PO” (*Ponente*) e ancora dopo altri 45° “MA” (*Maestro*) che ci riconduce dopo gli ultimi 45° all’inizio del nostro esame “TR”. Ma vediamo le funzioni dello strumento: il suo basamento di legno tornito consente di posizionarlo sopra un piano preventivamente “messo in bolla”, assicurandosi di orientare la bussola con l’ago libero, verso il Nord (*Tramontana*) che consentirà di tragaardare, attraverso le due pinnule (considerando che lo strumento sia completo come era sicuramente in origine), un punto “0” di riferimento angolare. Mantenendo fermo il cerchio in ottone (e quindi la bussola) spostiamo ora mediante rotazione il sistema delle due pinnule fino ad individuare il punto del quale vogliamo conoscere l’angolo di distanza dalla prima posizione di riferimento. Con questi strumenti topografici e con altri anche più complessi, come i *teodoliti*, venivano realizzate misure angolari e/o lineari per avere risultati abbastanza precisi da essere di riferimento per le costituzioni dei futuri “catasti”.

Bibliografia

- Camerota F., Miniati M. (2008). *I Medici e le Scienze, Strumenti e Macchine nelle Collezioni Granducali*. Firenze: Giunti edizioni.
- Casi F. (2010). *Gli Strumenti Scientifici*, in Gatta S., *Tesori in prestito – il museo della Verna e le sue raccolte*. San Giovanni (Arezzo): Industrie Grafiche Valdarnesi.
- Casi F. (2001). “Un quadrante astronomico orario (1560) di Lorenzo di Camillo Della Volpaia”. *La voce di Hora*, 11.
- Miniati M. (1991). *Catalogo – Museo di Storia della Scienza di Firenze*. Firenze: Giunti edizioni.
- Sarran M. E. (1868). *Manual du Geometre Souretrain*. Paris: Dunot Editeur.

The *Catoptrico-Gnomonicum Astrolabium* designed by Emanuele Maignan for the Palazzo Spada of Rome

Maria Luisa Tuscano – SISFA – mltuscano@gmail.com

Abstract: Emanuele Maignan (1601 - 1676), a significant personality of the Order of Minims in the scientific context of the '600, designs a gnomonic reflection instrument capable of providing indications and measurements for more articulated astronomical conditions than the traditional ones used for time measurement.

The *Catoptrico-Gnomonicum Astrolabium*, built starting from 1644 in the prestigious setting of Palazzo Spada, takes on a peculiar methodological value in the rational analysis of the phenomena of a complex system, joining choreographic effects that also enrich its artistic value.

The treatise *Perspectiva horaria* (1648) by the friar minimum allows, on the other hand, the study of the optical and projective principles that govern the functioning of the instrument, elevating it beyond the Kircherian *querelle* for the priority of the invention.

Keywords: Minimi, Palazzo Spada, Gnomonica, Catottrica.

1. Introduzione

L'attuale studio dello strumento, progettato dal frate minimo Emmanuel Maignan per la volta di una galleria del Palazzo Spada a Roma, scaturisce da una mia cooperazione con un gruppo di ricerca, coordinato dalla prof. Laura Farroni all'interno della Facoltà di Architettura dell'Ateneo Roma Tre, i cui risultati sono confluiti in uno specifico libro¹. In questa relazione intendo delineare il mio ruolo nella fase progettuale della ricerca, volto a ripercorrere i caposaldi culturali di riferimento per lo studio dell'*Astrolabium Catoptrico-Gnomonicum* nell'ambito del contesto secentesco dell'Urbe.

In particolare, mi propongo di evidenziare l'alta complessità informativa di questo strumento gnomonico che lo eleva al di sopra della più semplice connotazione di una meridiana, costituendo espressione di un approccio razionale alla realtà poliedrica dei fenomeni naturali, di cui nell'Ordine dei Minimi, istituito da San Francesco di Paola, alcuni esponenti furono peculiari fautori.

¹ Laura Farroni (2019). *L'arte del Disegno a Palazzo Spada. L'astrolabium catoptrico-Gnomonicum di Emmanuel Maignan*, con i contributi di Matteo Flavio Mancini, Giulia Tarei e Maria Luisa Tuscano. Roma: De Luca Editori D'Arte.

2. François Jacquier e la cultura scientifica nell'Ordine dei Minimi

Una testimonianza autorevole del ruolo dell'Ordine dei Minimi nella cultura scientifica europea post-rinascimentale è quella di François Jacquier (1711-1788), l'eminente matematico e fisico, che studiò l'opera di Newton e scrisse il commentario dei Principia insieme al confratello Thomas Le Seur (1703-1770). Il frate, infatti, fu anche autore dell'opuscolo *In Laudes Ordinis Minimorum Oratio* (Jacquier 1764), dedicando una sezione ai cultori delle Scienze, per i quali delineò i profili biografici senza ridondanze agiografiche, ma con brevi giudizi critici supportati dalle sue peculiari competenze. Jacquier non mancò di evidenziare la modesta considerazione in cui erano tenuti gli importanti studi scientifici in seno all'Ordine:

Verùm quamvis in hoc multiplici disciplinæ genere satis sese commendat Ordo noster, silentio tamem mimimè præterire licet haud mediocrem sano splendorem qui ex philosophicis mathematicisque disciplinis in nostram Societatem derivavit. Antiquiores quidem Annalium nostrorum tabulae eximios in rebus Mathematicis & Philosophicis viros referunt; at quis in historiâ litterariâ vel tantispèr verfatus ignorat magna sanè nomina. Merfenni, Maignani, Niceronii, Plumierii, Feuillei! (Jacquier 1764)

Tra i vari profili scritti da Jacquier, ai fini dell'attuale studio, si considerano quelli dei tre noti matematici che ebbero un ruolo peculiare nello scenario barocco dell'Urbe.

A Marin Mersenne (La Sultière 1588 - Parigi 1648), Jacquier riconosce un ruolo prioritario; ciò si evince dall'ampio spazio che gli riserva per ricordare la sua frequenza con Cartesio, i campi di studio e gli importanti contatti culturali che egli promosse a Parigi nel Convento dell'Annunziata durante riunioni scientifiche considerate nella storiografia come premesse per la futura costituzione dell'Accademie de France da parte di Colbert.

Di Emmanuel Maignan (Tolosa 1601-1676), egli evidenzia, l'alta formazione nella teologia, nella filosofia e nella matematica, segnalando i libri pubblicati e proseguendo:

Eandem methodum spirat cursus Philofophicus cui nonnullas adjunxit quaestiones Mathematicas quæ autoris doctrinam ostendunt. Sed reconditior ejusscientia in disciplinis Mathematicis, luculentius apparet in opere Catoptrico. Cæterum obfervari debet Mathefim eo tempore ad eum non perductam fuisse perfectionis gradum ad quem pervenit hac nostra ætatæ; fublmioris enim Analyseos auxilio destituti erant hujus disciplinæ sludiosi

Questo giudizio è lodevole se si tiene conto che lo stesso Jacquier si occuperà della materia pubblicando un libro sull'argomento se pur con il metodo più lineare di Brook Taylor.

A Jean-François Nicéron (Parigi 1613-1646), va il tributo di Jacquier per l'eccellenza nel campo dell'Ottica, per l'acuto ingegno e per la costruzione di strumenti scientifici.



Fig. 1. Ritratto di François Jacquier tra i frontespizi di due suoi libri.

3. Il Convento della SS. Trinità dei Monti

Caposaldo romano dell'Ordine dei Minimi, fondato nel corso del '400 in Francia da Francesco da Paola, il convento annesso alla chiesa della SS. Trinità dei Monti fu costruito su un terreno acquistato dal re di Francia, Carlo III, e ampliato nel corso del '500 con il sostegno di cardinali francesi. Nel 1618 vi fu fondata la scuola di perfezionamento per i professi, circostanza che richiamò a Roma i migliori docenti dell'Ordine.

Si costituì così nel convento un nucleo di studiosi in grado di proporsi da interlocutori ai Gesuiti del Collegio romano e agli Accademici dei Lincei, all'interno del circuito scientifico dell'Urbe.

Alcuni Minimi, come Mersenne e Maignan, si erano, peraltro, formati in Francia in scuole gesuitiche, acquisendone il metodo educativo e l'apertura agli studi matematici, secondo i canoni di Christopher Clavius. Il pensiero cartesiano, veicolato nell'Ordine da Mersenne, conferì, però, ai Minimi un tocco di modernità intellettuale e al contempo di rigore euristico rispetto alle contemporanee eccentricità di Athanasius Kircher.

I frati erano, inoltre, propensi alla condivisione degli studi con i confratelli come testimonia la cooperazione tra Maignan e Nicéron sui fenomeni ottici che portarono alla realizzazione delle anamorfosi nei corridoi dello stesso convento.

Maignan, dal canto suo, educava i professi ai fondamenti dell'ottica e dell'astronomia sperimentale realizzando, in continuità con le anamorfosi, un Astrolabio catoptriconomiconico (1637) al primo piano dell'edificio religioso. Ricerche recenti hanno individuato, al secondo piano del convento, tracce di un secondo astrolabio, a lui attribuibile (Fratini, Moriconi 2017, p. 88).

In questo contesto le periodiche presenze di Mersenne durante i frequenti viaggi in Europa erano garanti del mantenimento della direzione teologica e culturale dell'Ordine.



Fig. 2. Roma, Chiesa e Convento della SS. Trinità dei Monti.

Il Convento della Trinità era, comunque, un priorato francese e richiedeva una figura di lignaggio che lo coordinasse con il clero romano e lo tutelasse nella sua identità. Nel 1642 il Cardinale Bernardino Spada ne assunse il protettorato, aprendosi a un fecondo dialogo culturale con i Minimi, da cui scaturirà la realizzazione dell'astrolabio catottrico gnomonico in una galleria del suo palazzo romano.

4. L'Astrolabium catoptrico-gnomonicum nel Palazzo Spada

Gli studi storiografici sul Cardinale Bernardino Spada convergono nel riconoscergli una sensibilità culturale verso i percorsi evolutivi delle arti e delle scienze, non scevra di un certo spirito imprenditoriale². Gli interventi architettonici e decorativi sul palazzo acquistato nel 1632 dal Cardinale Girolamo Capodiferro ne sono una testimonianza (Farroni 2019, pp. 24-28; Tuscano 2019, pp. 45-53).

Se la galleria prospettica del Borromini nel grande atrio gode di maggiore notorietà ed evidenzia un progetto scientificamente virtuoso, anche le decorazioni degli ambienti del piano nobile, visitati a partire dal grande salone di Pompeo verso la galleria dell'Astrolabium, svelano una differente connotazione: mitologica e allegorica quella voluta da Capodiferro, speculativa e razionale quella dello Spada³. Questa lettura è stata condivisa e ha segnato una traccia per lo sviluppo della ricerca affrontata dalle diverse angolazioni. Un altro aspetto su cui ci si è concentrati è la complessità grafica dello strumento derivante dalle diverse informazioni che doveva fornire.

L'astrolabium catoptrico-gnomonicum fu progettato da Maignan per la volta a botte di una galleria successivamente destinata all'appartamento di Maria Veralli, sposa di Orazio, nipote di Bernardino. Il tracciato delle linee, insieme alle decorazioni e alle scritte, furono dipinti da Giovan Battista Magni (1591-1674).

I raggi solari raggiungono la volta della galleria grazie alla riflessione operata da uno specchio piano collocato in una finestra, ridimensionata e adattata a tal fine.

Malgrado sia denominato astrolabio, che è ottenuto con la proiezione stereografica, lo strumento di Palazzo Spada fu realizzato mediante proiezione gnomonica, quindi con proiezione dal centro della sfera terrestre. Ciò è confermato dallo studio frazionato delle

² La figura del fratello Virgilio fu fondamentale per le scelte operate da Bernardino.

³ Il piano nobile di Palazzo Spada è attualmente sede del Consiglio di Stato, pertanto, non liberamente visitabile se non per gruppi turistici o per singoli studiosi su autorizzazione.

diverse linee (Mancini in Farroni 2019, pp. 85-97); ma è soprattutto precisato dallo stesso Maignan nel trattato *Perspectiva Horaria*, che egli diede alle stampe nel 1648.



Fig. 3. Ritratto di Emmanuel Maignan, frontespizio e antiporta del suo trattato.

Costituito da quattro libri, la *Perspectiva Horaria sive de Horographia*, come dichiara l'autore nella pagina dedicata al *Lectori benevolo*, raccoglie i suoi scritti preparati durante la lunga attività didattica: i primi due libri dedicati alle regole generali della materia, il terzo alla Catottrica oraria con la descrizione delle fasi progettuali ed operative dell'astrolabio di palazzo Spada, il quarto alla Diottrica oraria.

La letteratura al riguardo è concorde nel considerare questo trattato una risposta indiretta ad una obiezione alzata da Kircher dopo il successo ottenuto dall'astrolabio della Trinità dei Monti, che a suo parere non poteva essere considerato il capostipite di questo tipo di strumenti, avendone lui stesso illustrato un altro nel 1635 in *Primitiae Gnomonices catoptricae* da lui realizzato ad Avignone⁴. Maignan con signorilità evitò il confronto diretto, ma scrivendo il trattato dimostrò la piena autonomia del suo lavoro rispetto a quello di Kircher, che, peraltro, non era adeguatamente documentato⁵.

⁴ In ogni caso si ha memoria di un orologio solare catoptrico realizzato da Nicolò Copernico tra il 1516 e il 1521 nel castello di Olsztin in Polonia, di cui, peraltro, sono state rinvenute tracce.

⁵ Nella *Tour de La Motte* del Collegio in cui aveva insegnato Kircher sono state trovate alcune linee orarie, ma il contesto non coincide con quello descritto dal gesuita.



Fig. 4. Palazzo Spada: l'*Astrolabium catoptrico-gnomonicum* nella volta della galleria e accanto la finestra con lo specchio da cui si diparte l'intreccio delle linee orarie.

L'osservazione del disegno dell'*Astrolabium* lascia inizialmente disorientati per il fitto intreccio di linee, ma la paziente osservazione delle foto svela che a ciascuna di esse è stata data una connotazione grafica diversa, in relazione alla propria funzione.

Per quanto riguarda le linee orarie, si ravvisano quattro tipi, di cui tre hanno lo stesso "passo" che si mantiene costante: astronomiche, all'italiana e babilonesi, in cui le 24 ore sono, però, computate rispettivamente dalla mezzanotte, dal tramonto del Sole (o mezz'ora dopo) e dal sorgere del Sole. Il quarto tipo è quello delle ore antiche o temporarie che hanno il passo, uguale a quelle citate soltanto negli equinozi, ma diverso e variabile negli altri giorni, derivando dalla divisione in dodici parti dei due periodi diurno e notturno. Per cogliere, pertanto, un incrocio tra le linee dei quattro tipi è necessario raggiungere la linea equinoziale individuandola con i segni dell'Ariete e della Bilancia. A queste linee, che sono tutte direzionali, si aggiungono poi quelle degli almucantarati, quindi d'altezza, e quelle degli azimut, e ancora quelle delle declinazioni solari e lunari. Il quadro informativo è, perciò, quello complessivo delle comuni effemeridi.

Affiora, allora, la funzionalità di un astrolabio sferico, che più si presta a giustificare tutte queste informazioni, che travalicano le sole indicazioni orarie e calendariali di un orologio solare pur mantenendone l'identità costruttiva. Se pur espressione di una razionale concezione osservativa dei fenomeni secondo diverse angolazioni, l'*Astrolabium* di Maignan non si sottrae a una certa ridondanza barocca e in questo senso verrebbero lette le case astrologiche, le affascinanti decorazioni, le scritte dedicatorie.



Fig. 5. Particolare dell' *Astrolabium catoptrico-gnomonicum*.

Bibliografia

- Catamo M. (2005). “La Meridiana di Palazzo Spada a Roma”. *Gnomonica italiana*, 8.
- Ferrari G. (2005). *Copernico e la prima meridiana a riflessione*, in *Atti del XIII Seminario nazionale di Gnomonica* (Lignano (UD), 8-10 Aprile, 2005). Aiello del Friuli: Circolo Culturale Navarca, pp. 88-95.
- Gunella A. (2016). “Perspectiva horaria, sive de horographia gnomonica... Il libro di Emmanuel Maignan”. *Orologi solari*, 12.
- Farroni L. (ed) (2019). *L'arte del Disegno a Palazzo Spada. L'astrolabium catoptrico-Gnomonicum di Emmanuel Maignan*, con i contributi di Mancini M.F., Tarei G., Tuscano M.L.. Roma: De Luca Editori D'Arte.
- Fratini G., Moriconi F. (2017). *Il Convento della Trinità dei Monti: le fasi della costruzione e delle successive modificazioni, dalla fondazione dei Minimi al '900*. Roma: De Luca Editori d'Arte.
- Jacquier K. (1764). *In Laudes Ordinis Minimorum Oratio*. Roma: Ex Typographia Marci Pelearini.
- Maignan E. (1648). *Perspectiva Horaria sive de Horographia Gnomonica tum theoretica tum pratica, libri quatuor*. Roma: Filippo Rubei.
- Tuscano M. L. (2019). *Emmanuel Maignan e il progetto scientifico dell'Astrolabium Catoptrico-Gnomonicum*, in Farroni L. (ed), *L'arte del Disegno a Palazzo Spada. L'astrolabium catoptrico-Gnomonicum di Emmanuel Maignan*. Roma: De Luca Editori D'Arte.

The improvement in lens grinding techniques for early refracting telescopes in XVII century

Lucia Lanfiuti Baldi – Sapienza University, Rome –
lucia.lanfiuti.baldi@gmail.com

Abstract: This study is focused on the evolution of the concept of the telescope along the XVII century: from the first exemplar in 1608 up to those instruments where the intrinsic limits on the optical performances – due to the state-of-the-art of lenses and available technology – were reached. It has been thoroughly investigated whether the basic optics knowledge of that time could provide theoretical foundation to the assembly of the first telescope. From the available literature we infer that only Galileo Galilei understood how to improve the instrument, based on his own experience as a mathematician and inventor. Moreover, Galilei was the first one who grinded lenses specifically made for telescopes. In the XVII century other figures of astronomers-artisans have refined the processing techniques in order to manufacture suitable lenses to be inserted in tubes, starting from glass slabs available on the market. We were able to retrace some steps of this process thanks to two treatises: *Telescopium* (1618) by Girolamo Sirtori and *L'occhiale all'occhio* (1660) by Carlo Antonio Manzini. We paid particular attention to the improvements of the practical processes in order to support the thesis that the evolution of the first refractors was not driven by theoretical reasoning.

Keywords: Telescope, Lens grinding, Galilei, Torricelli, Campani.

1. The invention of the telescope and Galilei's improvement

The telescope is believed to have been invented in 1608 (or just before) as the proper combination of two lenses made for eyeglasses. We can say that the first refracting telescope setup, called Galilean telescope, was obtained by chance, from a concave lens for short-sighted people as eyepiece and a convex lens for far-sighted people as objective. After many discussions about the paternity of the instrument, nowadays it is agreed that it was invented in the shop of a spectacle's seller, not a mathematician, but a craftsman (Van Helden 1975, pp. 251-263).

At the beginning of the XVII century, the peculiar behaviour of the lenses was not understood in term of an optical theory, similar to the modern geometrical optics, neither by mathematicians, nor by the makers. The dream of a device able to show what is too far to be seen by naked eye had spread way before 1608 among scholars interested in the science of vision. Some ideas, from the XVI century, seem to hint the correct setup to magnify distant objects (Van Helden 1977, pp. 9-24). But they remained for decades

without applications. Giovan Battista Della Porta, a Neapolitan mathematician, wrote about lenses in *Magia Naturalis* (printed as a unique volume in 1589). But he intended to correct, rather than improve, visual faculties. So, we should look at what kinds of lenses were available in the spectacles shop to evaluate the performances of early telescopes.

First of all, let us keep in mind that, in order to obtain an instrument for astronomical purpose, a greater magnifying power was needed. Nowadays the linear magnification is defined as the ratio between the objective's focal length and the eyepiece's focal length. Those terms were unknown to the XVII-century people: they did not know the concept of focal length, and they ignored that also concave lenses have one (Duprè 2005, p.173).

The focal lengths of available converging lenses were at most 50 or 60 cm; to correct eyesight defects, it was not necessary to grind weaker lenses. For instance, you need an eyepiece of focal length -15 cm, which is difficult to grind, to obtain a magnification of 3, close to the one of the first spyglass. Craftsmen learnt over time how to obtain such lenses. In fact, negative lenses for short-sighted people did not spread before the second half of the XVII century. It was quite easy to discover the potential of a device made with two lenses, once the appropriate ones become available in the spectacle's shops (Van Helden 1975, p. 236).

The theory behind telescope technology is a different story. The first step for the understanding of it was the application of the *punctum inversionis* (which is the focus of concave mirror) to convex lenses. That concept, with its properties, had been studied by Ettore Ausonio in *Theorica speculi concavi sphaerici* (c. 1560). This is the only optics book found in Galileo Galilei's library (Duprè 2005, pp. 160-170).

The Pisan mathematician had the merit of convert the spyglass in a powerful tool of astronomical survey to the point that he made the observations published in the *Sidereus Nuncius* in 1610. So, Galilei needed to improve telescope magnifying power, starting from a better comprehension of what features he could vary, in order to change the device performance. As a XVII-century man, Galilei mistakenly thought that the magnification depended only on the objective focal length – which is the distance of the *punctum inversionis* from the vertex of the convex lens. Behind the development of Galilei's telescope there were neither calculation nor “optical lens design”, but there was a well-defined project. From his private letters we know that at first the Pisan mathematician tried to select the lenses from the ones available on the market, mostly between the ones from Murano. Moreover, Galilei restricted the portion of the used lens with a diaphragm which reduce the aperture. In fact, making a lens for glasses is different from making a lens for telescope because in the second case the whole aperture of the objective lens is supposed to be without defects. Even the eyepiece is required to be well grinded, but the early telescopes makers understood that the objective lens grinding was of primary importance.

Galilei dealt with the low level of the lenses available, but he managed to improve the telescope in less than one year: the magnification increased from 3 or 8 at most, to 20 (Molesini, Greco 1996, p. 424). So, thanks to his efforts, and then to the efforts of the early telescope makers, the quality of the lenses grew a lot from 1610s to 1640s and the biggest improvement was in the objective lens quality (Van Helden 1976, p. 21).

2. What is needed to grind a lens

2.1. The glass

Glass is the raw material of a lens. First, if we want to follow the development of refracting telescopes at that time, it is necessary to understand which kind of glass was available in XVII century. Glass is basically made of four ingredients: the source of silica; the melting point reducer; stabilizer elements to avoid devitrification; and other substances which influence some features such as colour, for example. The best recipe was found by Venetian people in Murano. For centuries they had been holding the record in the glass making techniques in Europe. They invented the *vitrum cristallum*, and carefully kept the trade-secrets so that their product was the best on the market (Strano 2008, pp. 79-83). Not by chance, Galilei built and improved the telescope while he lived in Padua. The two cities, Venice and Padua, are so close that he could go there to select glass slabs made in Murano with only few defects.

The mixing ratios of the elements result in different kinds of glass and influence features such as dispersion and refractive index. In terms of image formation in a telescope, the lenses are supposed to be homogeneous in the refractive index and without defects which cause optical aberrations. Contaminations and inclusions are the consequences of the melting process and for centuries the glass makers ignored how to affect the products and the concept of tolerance limits for the refractive index and for the surface distortion (Ronchi 1949, pp. 10-11). As they could not have glass melt specifically for that purpose – nowadays called “optical glass” – they made big efforts to improve lens grinding techniques. From the spectacle invention in the XIV century, lens grinding techniques did not change in essence: the steps were the same, but makers improved the tools in use, and mathematicians began to study the procedure from a scientific point of view. So that the refinement of many details made possible the grinding of good lenses, with performances close to the “optical perfection”. It should be recalled that an optical system is “perfect” when it introduces a small distortion, less than $\frac{1}{4}$ of the wavelength, in the output wave front, which is ideally spherical.

2.2. The lens grinding techniques

The *Telescopium Sive Ars Perficiendi* (Sirtori 1618), written by a scholar from Milan in 1612, is the first treatise about the manual techniques and the devices to obtain good lenses. It came out just three years after the invention of the telescope. Until then we don't know in detail the procedures used by spectacle makers, except for the reconstructions made possible by the analysis of their work or by casual references in letters or manuscripts, and by drawings made by people who have had them in their hands (Bedini 1966, p. 689). The safekeeping of trade-secrets was a cornerstone of corporations and of the ethics of people who worked in that field. Even if the attitude towards secrets was somehow ambiguous and contradictory, in the XVII century there was a turnaround and slowly many people understood the importance of communicating knowledges sharing skills in both theoretical and practical fields. Sirtori's treatise started from the spectacle lens system, which he called *spicilla*, and the second part was about the grinding and polishing techniques for telescope lenses, *perspicilla* or *lenses* (Sirtori 1618, pp. 12-23). The author spoke about the proper

glass to use and ended his work with a summary of the defects that you can spot after finishing the lens. In this treatise only Galileo's telescopes are mentioned.

Another book, written in 1660, is much more complete, *L'occhiale all'occhio, dioptrica pratica* (Manzini 1660). The author, Carlo Antonio Manzini, a mathematician from Bologna, was a lens grinder and was also educated in the science of optics. From his private letters we know that he had a copy of 1611 Kepler's *Dioptrice*, fundamental book for the modern optics theory, which was different from the science of vision. Manzini started saying why is so important to write such a book and then the first chapters were about spectacle lenses, the invention of the telescope, the light properties, refraction and reflection phenomena and kind of glasses. Only in chapter 13 he introduced Galileo's telescope. But in the following chapter he explained all the new setups that had become popular in the previous years with more than two lenses. The mathematician showed in many places that he had understood the instrument functioning (Manzini 1660, pp. 143-148). On the other hand, from Sirtori's work it was clear that time was not ripe to a proper description of the telescope in terms of geometrical optics. Manzini then described the grinding and polishing phases, specifically regarding materials and trade tools. He often quoted the *Telescopium*, because clearly it was widely known, either for mentioning technical terms, either for blaming some position and underlining the progress which took place in the years between the two handbooks.

Let us recap the steps needed to obtain a good lens. We are speaking about a cold processing, that is to say: the glass is never heated so that it cannot experience any deformation. The general working consists in scrub the raw material with the help of abrasive powder much harder than glass. After the first step, called pre-grinding, the two fundamental steps are the grinding, to give the spherical shape, and the polishing, to finish the work. This last was very delicate and only after that you could know if the lens was good or if it was useless. XVII-century men could only test the lens as an objective, or as an ocular, in a telescope tube, and if it did not work well, they had to put it aside. Keep in mind that is not possible to grind aspherical lenses with this process, because of the mould they used. But from the start of XVII century, some mathematicians already knew that aspherical lenses could avoid some optical aberration, i.e. spherical aberration (Manzini 1660, p. 81).

At last, we can mention that many telescope-makers suggested the construction of lathes for a semi-automatic lens grinding (Bedini 1966, pp. 689-691). But the lenses suitable for telescope were manually worked, and it is meaningful that they tried to speed up the timing and improve the techniques.

3. Astronomers and craftsmen

In the XVII century, a new generation of astronomers appeared. They used to star-gaze, but primary they knew how to grind lenses for scientific instruments. They worked alongside craftsmen, they were craftsmen their self, and so they are the leaders of the great development of astronomy in that century. There were many schools of telescope-makers in Europe. After Galilei, we can mention Francesco Fontana in Naples, Evangelista Torricelli

in Florence, Antonio Maria Schirleus de Rheita in Austria, the Huygens brothers in Holland, and Eustachio Divini and Giuseppe Campani in Rome, between the most famous. Italian makers stood out between the others. Based on analysis on XVII-century lenses available in museums, we can say that telescope-makers from Florence and then from Rome reached level, in lens grinding, higher than their competitors (Miniati et al. 2002).

The good quality of the products was due to the manual skills that those astronomers/craftsmen had been developing in many years of hands-on experience, more than to their tools and their method. Most of all they improve in the grinding of objective lenses of long focal length. This practical development and the study of new setups were necessary steps to the switch from low-powered Galilean telescope, in use until 1630s, to the long and powerful telescopes for astronomical surveys which spread in the last decades of the century.

3.1. Evangelista Torricelli

Evangelista Torricelli is pretty famous for some mathematical results and for his well-known experiment about atmospheric pressure; but actually, from 1642, when he moved to Florence to become Galilei's assistant, he spent a lot of time and energies in learning how to grind lenses. He wanted to beat his rivals, for example Francesco Fontana. In February 1644 he was awarded from the Grand Duke "una collana di 300 scudi, havendo S.A. gradito in estremo una mia inventione di lavorar i vetri, trovata per via di speculazione geometrica e con la dottrina e cognizione di queste figure coniche e con la scienza della rifrazione" (Torricelli 1942, p. 100). The mathematician claimed that his work had a speculative basis, i.e. his argument had a mathematical and geometrical ground. Probably we are not allowed to trust him. After all, also Galilei had presented his telescope as it had resulted from "recondite speculazioni di prospettiva" (Galilei 1929, vol. X, p.199). It is agreed that he lied to gain acceptance and to find consensus on his instrument (Galluzzi 1976, pp.87-89). In any case, Torricelli was the one who thought, in a scientific way, the process of abrasion which give the "perfect" spherical shape to the mould on which the glass is grinded. Moreover, he knew the benefits in using a lead handle, covered by a leather, and in attaching the lens to it by using wax instead of pitch. Those little expedients and practical dictates, that we know from a private letter of December 1643 (Torricelli 1942, p. 99), are the reason because he gained the recognition and the award.

3.2. Giuseppe Campani

Giuseppe Campani is another important figure in this framework. He built clocks and telescopes and he worked in Rome since 1640s. He was at first pupil of Eustachio Divini, but then they become competitors. Both were engaged in telescope making and in star-gazing, and they were involved in true contests by the "Accademia del Cimento" in order to establish which one was the best telescope maker. Campani was very jealous of his secrets, so that he did not want any apprentice to avoid that someone stole them. He won the contests and from the results of today analyses on his lenses is confirmed that he achieved a remarkable level for those times (Miniati et al. 2002, p. 645). We don't know how he reached the "optical perfection" in lens grinding, but after his death the tools and the equipment he left in his office have been carefully preserved, because many people thought that his secret was related to them (the entire Campani's optical laboratory is today on display in the

University Museums in Bologna). Even if he didn't leave something written about the procedures he followed, studies on his remaining allow us to say that Campani's fortune is due to an accurate glass selection, to the method he used to cut the discs, and to the attention to details. For example, we think that Campani used many moulds to work one single lens, that was not a common thing (Bedini 1961, pp.10-11).

By the way, even if the outcomes of the contest were always in favour of Campani, is not this award that establish his superiority and the reputation he deserves. Campani went down in history mainly because his lenses and his telescopes were requested by Gian Domenico Cassini for the *Observatoire de Paris*. Thanks to the lenses came from Rome, the astronomer made incontrovertible observations; some of them were also impossible to be confirmed by his contemporaries, i.e. the Saturn's division and Teti and Dione satellites (Lozi *et al.* 2013, pp. 7-11). So, other telescope-makers, like Divini, could claim good quality for their lenses, but the history of astronomy is not forgiving, only discoveries count; for them, the quality of the instruments is important as much as the observer's skills (Van Helden, Righini Bonelli 1981, pp. 36-43).

References

- Bedini S. (1961). "The optical workshop equipment of Giuseppe Campani". *Journal of the History of Medicine and Allied Sciences*, 16, pp. 18-38.
- Bedini S. (1966). "Lens making for scientific instrumentation in the seventeenth century". *Applied optics*, 5, pp. 687-694.
- Dupré S. (2005). "Ausonio's mirrors and Galileo's lenses: the telescope and sixteenth century practical optical knowledge". *Galilaeana*, 2, pp. 145-180.
- Galilei G. (1929-1939). *Le opere di Galileo Galilei*. Ristampa dell'Edizione Nazionale a cura di Antonio Favaro, 20 Volumi. Firenze: G. Barbèra.
- Galluzzi P. (1976). "Evangelista Torricelli: concezione della matematica e segreto degli occhiali". *Annali dell'Istituto e Museo di storia della scienza di Firenze*, 1, pp. 71-95.
- Lozi J. *et al.* (2013). "Could Jean-Dominique Cassini see the famous division in Saturn's rings?", in Shaklan S. (ed.), *Proceedings SPIE: Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets VI* (San Diego, California, August 26-29, 2013), 8864 1M.
- Manzini C.A. (1660). *L'occhiale all'occhio, dioptrica pratica*. Bologna: Herede del Bernacci.
- Miniati M. *et al.* (2002). "Seventeenth century telescope optics of Torricelli, Divini and Campani". *Applied optics*, 41, pp. 644-647.
- Molesini G., Greco V. (1996). "Galileo Galilei: research and development of the telescope", in Consortini A. (ed.), *Trends in optics, Research, Development and Applications*. St. Louis: Academic., pp. 423-438.
- Ronchi V. (1949). "Galileo e Torricelli maestri di ottica fina". *Torricelliana*, pp. 6-23.
- Sirtori G. (1618). *Telescopium, siue Ars perficiendi nouum illud Galilaei visorium instrumentum ad sydera*. Francoforte: typis Pauli Iacobi, impensis Lucae Iennis.
- Strano G. (2008). *Galileo's Telescope. The Instrument that Changed the World*. Firenze: Giunti.

- Torricelli E. (1942). *Le opere dei discepoli di Galileo Galilei*. Edizione Nazionale. Firenze: G. Barbèra.
- Van Helden A. (1975). "The historical problem of the invention of the telescope". *History of Science*, 13, pp. 251-263.
- Van Helden A. (1976). "The astronomical telescope, 1611-1650". *Annali dell'Istituto e Museo di storia della scienza di Firenze*, 1, pp. 13-36.
- Van Helden A. (1977). *The invention of the telescope*. Philadelphia: American Philosophical Society.
- Van Helden A., Righini Bonelli M.R. (1981). "Divini and Campani: a forgotten chapter in the history of the Accademia del Cimento". *Annali dell'Istituto e Museo di storia della scienza di Firenze*, 6, pp. 3-176.

Paolo Anania de Luca e il sistema del suono attraverso lo studio di un cordometro e di un tonometro

Rosanna Del Monte - Museo di Fisica - Centro Musei delle Scienze Naturali e Fisiche - Università di Napoli Federico II - rdelmont@unina.it
Azzurra Auteri - SISFA - azzurra.auteri@gmail.com

Abstract: Paolo Anania de Luca's work in the field of Acoustics aimed at facilitating the dialogue among different professionals, who generally dealt with this particular branch of physics as, for instance, physicists themselves, musical instrument makers and musicians.

In this paper we illustrate the thorough educational work carried out by the Irpinian scientist on the division of the octave in equal steps (*equal temperament*), and his description of the possibility of measuring and relating the one with the string's length, by using two selfmade instruments: the *cordometer* and the *tonometer*.

Keywords: Paolo Anania de Luca, cordometer, tonometer, acoustics.

1. Premesse

Nato a Montefusco (AV) il 4 aprile 1778 e morto a Napoli il 26 gennaio 1864, Paolo Anania de Luca fu uomo dalla personalità poliedrica, giurista, patriota e scienziato; si dedicò principalmente agli studi di fisica rivolti alle applicazioni pratiche al mondo delle arti, realizzò personalmente prototipi di strumenti di sua invenzione.

La musica fu uno dei suoi principali interessi, che coltivò fin da ragazzo. Questa passione lo portò ad approfondire gli studi dell'acustica, in particolare della tonometria, con l'intento di trovare un sistema che potesse mettere d'accordo artisti e scienziati. Iniziò pertanto la stesura del suo primo lavoro di acustica (de Luca 1841), un ampio e lungo lavoro introduttivo a quella che sarà la sua opera generale sulla tonometria, che per una serie fortuita di eventi fu pubblicato solo nel 1841. Quindici anni prima, nel 1826, de Luca aveva inviato alla Società italiana delle Scienze di Modena una *Memoria*, al tempo inedita (de Luca 1828), nell'ambito di un concorso bandito nel 1824 dalla Società stessa. Il concorso richiedeva l'elaborazione di una teoria acustica che, partendo dal trattato di Giordano Riccati *Delle corde ovvero fibre elastiche* (Riccati 1767) e dal lavoro di Ernst Chladni *Trattato di acustica* (Chladni 1802), trovasse le giuste connessioni per fornire una solida base teorica alla pratica musicale. de Luca presentò la sua *Memoria* fuori concorso. Egli vi sosteneva che il sistema musicale potesse essere ricondotto a due scale, quella *naturale* e quella *temperata*. Da un'analisi del sistema musicale eseguita con quello che all'epoca era chiamato *tonometro*, risultò che nella scala naturale le diverse

lunghezze di corda che generavano i toni erano espresse da frazioni che per essere confrontabili tra loro dovevano necessariamente essere ridotte allo stesso denominatore. Il risultato era un numero enorme, quasi impronunciabile. Queste frazioni in realtà rappresentavano soltanto delle quantità di corda ma nulla dicevano sul tono che queste producevano. Nella scala temperata, essendo l'ottava divisa in 12 parti uguali, invece, le quantità tonometriche erano rappresentate da numeri irrazionali: sorgeva quindi il problema di individuare le quantità di corda che producevano queste 12 parti uguali di tono. Per risolvere questi inconvenienti lo scienziato irpino adottò come minimo comun divisore di tutti i sistemi possibili la 612^a parte dell'ottava, pari anche alla differenza tra la 5^a naturale e quella temperata. Quindi la scala tonometrica risultava divisa in 612 parti detti "microcommi" (de Luca 1828, p. 470). Nel caso in cui si fosse analizzato il tono, l'intervallo di ottava doveva essere diviso in 612 parti uguali, mentre quando si analizzava la corda bisognava dividerla in 612 parti geometricamente proporzionali.

Secondo il nostro autore l'attuale tonometria presentava molte inesattezze perché basata su un tonometro che altro non era se non un semplice cordometro. Si propose pertanto di costruire un cordometro, rivisto e corretto, ed un tonometro di sua invenzione entrambi con una scala divisa in 612 "microcommi".

2. Il cordometro

Il cordometro (Fig. 1), di forma prismatica rettangolare, realizzato totalmente in legno, era dotato di quattro corde di acciaio inglese (tetracordo) lunghe 1 m e accordate all'unisono su un do₃ (512 vibrazioni semplici corrispondenti a 256 Hz). Ogni corda, tesa da blocchetti scorrevoli azionati da vite senza fine, veniva fatta vibrare da un martelletto di bosso e tramite un ponticello mobile era possibile regolarne la lunghezza vibrante. Una scala, incisa su lastra di ottone, suddivideva geometricamente la semilunghezza delle corde in 612 unità detti "microcommi". Il cordometro divenne piuttosto noto a Napoli, molto richiesto e utilizzato ai fini dell'accordatura degli strumenti secondo il sistema temperato di cui il nostro autore era uno strenuo sostenitore. Nonostante questi continui spostamenti, le corde nell'arco di sei anni non subirono alcuna variazione, risultando sempre all'unisono. Molti costruttori di strumenti e musicisti si interessarono e apprezzarono lo strumento di de Luca, tra cui ricordiamo Bonaventura e Giovanni Bandieri, Gaetano Tenore, Antonio Battimelli, e persino il professore di fisica Giuliano Giordano (Barbieri 2002, p.111).

3. Il tonometro

Il tonometro (Fig. 2) da lui ideato era dotato di una scala suddivisa come quella del cordometro ma estesa anche alle ottave successive per la soluzione di problemi tonometrici, perciò per evitare di allungarla oltremodo ricorse all'espedito di costruirla circolare. Lo strumento quindi appariva costituito da un quadrante di ottone di 9 pollici di diametro in mezzo al quale girava un disco di ferro largo 7 pollici ma con un piano più piccolo di

circa $\frac{1}{4}$ di linea, corrispondente allo spessore di un altro disco di cartoncino che doveva esservi sovrapposto. La scala si trovava sul lembo interno del quadrante mentre all'esterno erano riportati i 612 “microcommi”, lo 0 e 612 coincidevano. Dischi di cartone fissati da perni erano detti “rappresentanti”, poiché rappresentavano la quantità di tono da misurarsi. Su questi, due *alidade* servivano a tracciare dei raggi corrispondenti alle gradazioni del quadrante.

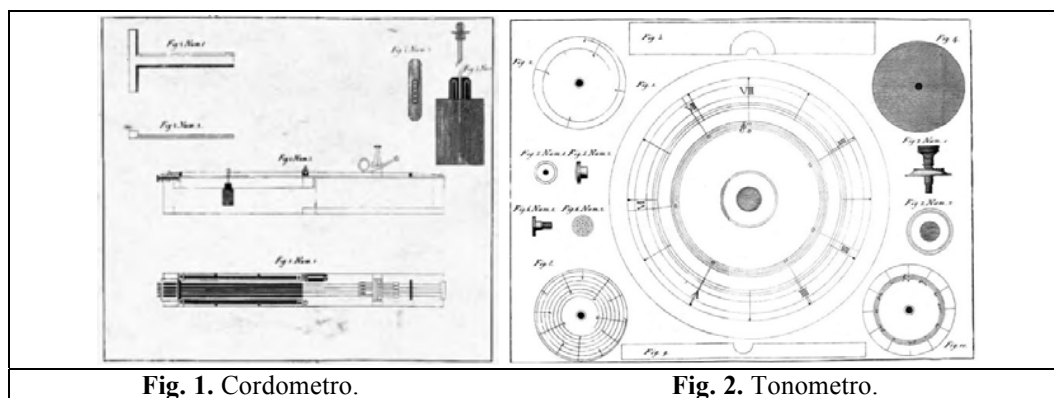


Fig. 1. Cordometro.

Fig. 2. Tonometro.

Ogni cerchio tracciato su un rappresentante era un intervallo di ottava, diviso nelle parti desiderate dall'intersezione dei raggi che andavano al corrispondente “microcomma” e che rappresentavano i dati. Le relazioni tra ottave diversamente divise erano evidenziate da più cerchi concentrici. Esso rappresentava quindi una sorta di regolo calcolatore che consentiva una visione immediata dell'ampiezza di qualsiasi intervallo armonico, anche trasposto (Barbieri 2002, p. 96). Questo strumento, secondo de Luca, poteva rispondere a tutti i quesiti della tonometria, non solo teorica, attraverso la conoscenza della quantità di tono, ma anche pratica attraverso l'applicazione alla melodia e all'armonia. Infatti, la stessa quantità di “microcommi” utilizzata per vedere e considerare l'effettiva quantità di tono sul tonometro veniva poi ritrovata sul cordometro posizionando i ponticelli mobili alle corrispondenti distanze, ottenendo così la quantità di corda che produceva quel determinato tono. Per superare le limitazioni imposte del cordometro, esteso ad una sola ottava e dotato di sole quattro corde, de Luca utilizzò un *gravicembalo*, accordato con il cordometro e funzionante da “ausiliare” (de Luca 1828, p. 480).

4. Nuovo sistema di Tonometria

Nel 1842 de Luca leggeva all'Accademia delle Scienze di Napoli una memoria (de Luca 1844) in cui approfondiva e spiegava le possibili applicazioni pratiche del cordometro e del tonometro anche dal punto di vista didattico.

All'epoca per tonometria si intendeva la misura dell'altezza (o acutezza o tono) del suono, ossia quella caratteristica che consente di distinguere i suoni acuti da quelli gravi. Il tono veniva misurato direttamente attraverso l'udito, mediante il confronto con altro tono noto, oppure indirettamente attraverso la causa che lo generava. Queste misure

venivano espresse da caratteri quantitativi, ora numerici ora musicali, detti valori. Quelli fino ad allora utilizzati erano due: il *cordometrico*, relativo alla lunghezza della corda che emetteva il tono, e il *vibratorio* relativo al numero di vibrazioni da cui il tono derivava. Attraverso l'uso del cordometro e del tonometro de Luca tentò di realizzare un sistema che potesse abbracciare scienza e arte musicale coordinando gli elementi dei due vecchi sistemi musicali con la sua scala tonometrica della massima estensione. Corredavano la memoria dieci tavole iconografiche e numeriche di cui la III (Fig. 3) rappresentava una tastiera con i tasti bianchi indicati con la loro lettera gregoriana. Al di sotto era riportata l'attuale scala musicale estesa per le 9 ottave con i propri numeri d'ordine, altre due serie numeriche servivano a coordinare questa tavola con le due successive. Seguivano poi una serie di linee orizzontali di lunghezza proporzionale all'estensione occupata da ciascuna voce e ciascun strumento da orchestra all'interno dell'estensione massima.

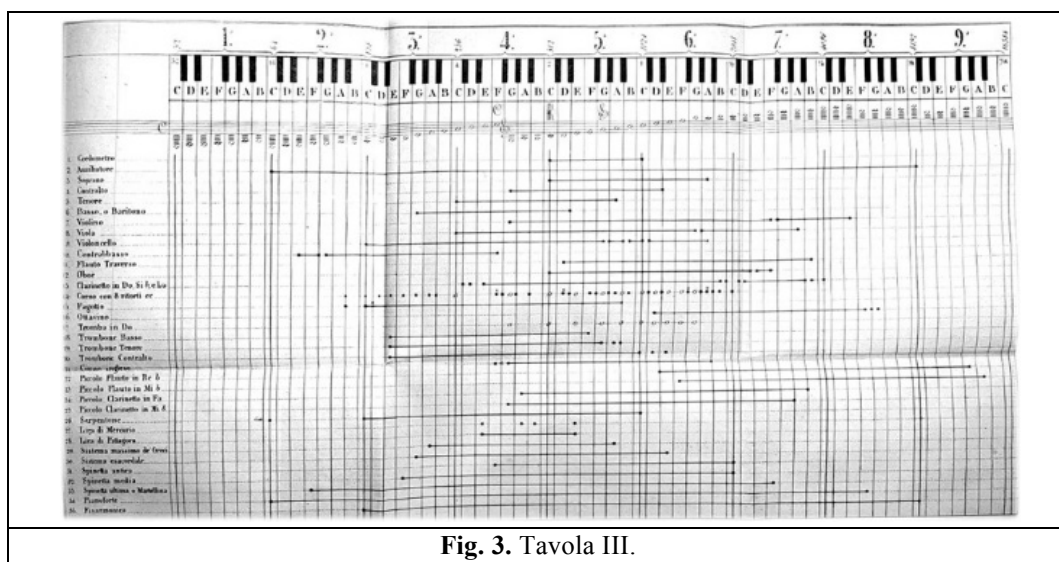


Fig. 3. Tavola III.

Le tavole IV e V erano formate da 10 colonne ciascuna di 613 versi, contenenti, “microcomma” per “microcomma”, rispettivamente il valore cordometrico assoluto e il valore vibratorio assoluto dei 5509 ($612 \times 9 + 100$) gradi in cui erano divise le 9 ottave della massima estensione. La tastiera di massima estensione però era dotata solo di 109 tasti, ciascuno con la sua corda. Per rappresentare i 5509 gradi di acutezza de Luca risolse il problema immaginando che ogni tasto potesse eccitare o la sua corda vera o una delle 50 corde false poste tra un tasto ed un altro, di cui 25 dalla parte grave e 25 dalla parte acuta. Il grado 0 era rappresentato per ciascuna ottava dai valori 32,16,8 ecc. riportati sui tasti C {do}, le corde vere erano indicate coi nomi delle note, gli asterischi rappresentavano l'ultima della 25 corde false appartenenti alla precedente corda vera e la prima delle 25 appartenenti alla successiva corda vera. L'espedito veniva adottato per coordinare esattamente ogni valore tonometrico con quello cordometrico e viceversa, e per conoscere esattamente quale corda andare ad eccitare per ottenere quel determinato tono.

Microcommi.	I. OTTAVA.	II. OTT. ^a	III. OTT. ^a	IV. OTT. ^a	V. OTT. ^a	VI. OTT. ^a	VII. OTT. ^a	VIII. OTT. ^a	IX. OTT. ^a
<i>Do</i> * 0	32, 00000	16, 00000	8, 00000	4, 00000	2, 00000	1, 00000	0, 50000	0, 25000	0, 12500
1	31, 96384	15, 98192	7, 99096	3, 99548	1, 99774	, 99887	, 49943	, 24971	, 12485
2	31, 92768	15, 96384	7, 98192	3, 99096	1, 99548	, 99774	, 49887	, 24943	, 12471
3	31, 89152	15, 94576	7, 97288	3, 98644	1, 99322	, 99661	, 49830	, 24915	, 12457
4	31, 85536	15, 92768	7, 96384	3, 98192	1, 99096	, 99548	, 49774	, 24887	, 12443
5	31, 81920	15, 90960	7, 95480	3, 97740	1, 98870	, 99435	, 49717	, 24858	, 12429
6	31, 78304	15, 89168	7, 94584	3, 97292	1, 98646	, 99323	, 49661	, 24830	, 12415
7	31, 74720	15, 87360	7, 93680	3, 96840	1, 98420	, 99210	, 49605	, 24802	, 12401
8	31, 71136	15, 85568	7, 92784	3, 96392	1, 98196	, 99098	, 49549	, 24774	, 12387
9	31, 67552	15, 83776	7, 91888	3, 95944	1, 97972	, 98986	, 49493	, 24746	, 12373
10	31, 63968	15, 81984	7, 90992	3, 95496	1, 97748	, 98874	, 49437	, 24718	, 12359
11	31, 60384	15, 80192	7, 90096	3, 95048	1, 97524	, 98762	, 49381	, 24690	, 12345
12	31, 56800	15, 78400	7, 89200	3, 94600	1, 97300	, 98650	, 49325	, 24662	, 12331
13	31, 53216	15, 76608	7, 88304	3, 94152	1, 97076	, 98538	, 49269	, 24634	, 12317
14	31, 49664	15, 74832	7, 87416	3, 93708	1, 96854	, 98427	, 49213	, 24606	, 12303
15	31, 46080	15, 73040	7, 86520	3, 93260	1, 96630	, 98315	, 49157	, 24578	, 12289
16	31, 42528	15, 71264	7, 85632	3, 92816	1, 96408	, 98204	, 49102	, 24551	, 12275
17	31, 38976	15, 69488	7, 84744	3, 92372	1, 96186	, 98093	, 49046	, 24523	, 12261
18	31, 35424	15, 67712	7, 83856	3, 91928	1, 95964	, 97982	, 48991	, 24495	, 12247
19	31, 31872	15, 65936	7, 82968	3, 91484	1, 95742	, 97871	, 48935	, 24467	, 12233
20	31, 28320	15, 64160	7, 82080	3, 91040	1, 95520	, 97760	, 48880	, 24440	, 12220
21	31, 24800	15, 62400	7, 81200	3, 90600	1, 95300	, 97650	, 48825	, 24412	, 12206
22	31, 21248	15, 60624	7, 80312	3, 90156	1, 95078	, 97539	, 48769	, 24384	, 12192
23	31, 17728	15, 58864	7, 79432	3, 89716	1, 94856	, 97429	, 48714	, 24357	, 12178
24	31, 14176	15, 57088	7, 78544	3, 89272	1, 94636	, 97318	, 48659	, 24329	, 12164
* 25	31, 10656	15, 55328	7, 77664	3, 88832	1, 94416	, 97208	, 48604	, 24302	, 12151
* 26	31, 07136	15, 53568	7, 76784	3, 88392	1, 94196	, 97098	, 48549	, 24274	, 12137
27	31, 03616	15, 51808	7, 75904	3, 87952	1, 93976	, 96988	, 48494	, 24247	, 12123

Fig. 4. Stralcio Tavola IV.

Dalla tavola IV (Fig. 4) infatti era possibile calcolare il valore tonometrico cercando il valore cordometrico dato o quello che più si avvicinava nella tavola e quindi calcolando il valore tonometrico che risultava pari al numero della colonna - 1 per rappresentare l'ottava e dal numero riportato nel rigo per esprimere i "microcommi". La stessa tavola tramite gli asterischi indicava quale corda produceva il tono trovato. Dato il valore tonometrico, il cordometrico invece era espresso dal numero delle ottave riportato nella colonna +1 e dal valore riportato nel rigo per i relativi "microcommi". La tavola V molto simile alla precedente conteneva tutti i valori vibratorii assoluti. Le successive tavole erano dei quadri sinottici di operazioni pratiche che servivano a facilitare gli allievi nello studio della tonometria propriamente detta che, per il nostro autore, si riduceva alla soluzione di 12 problemi generali e 4 speciali, che però non saranno trattati in questa sede (de Luca 1844, pp. 348-397). Se a questo corredo di strumenti e di tavole si aggiungeva un "corista d'acciaio", secondo de Luca, la tonometria aveva a disposizione tutti i mezzi per poter risolvere qualsiasi problema purché si sapesse mettere una corda all'unisono o all'ottava di un tono dato in natura.

5. Conclusioni

Tutti gli studi affrontati da de Luca sono stati caratterizzati da un approccio sistematico e dall'impiego delle sue capacità di abile meccanico nella realizzazione degli strumenti di cui necessitava per dimostrare le proprie teorie. Relativamente ai lavori di acustica e tonometria ebbe il merito di aver fornito una minuziosa analisi degli elementi relativi al suono e di aver introdotto termini tecnici specifici, facendo assumere all'acustica

l'aspetto di una scienza dotata di nomenclatura scientifica specifica, tanto che Luigi Palmieri a tal proposito scrisse:

[...] ma quello che ce lo ha fatto giudicare meritevole di stare a paro co' Chladni, co' Savart e co' de La Tour, è la sua accuratissima e profonda analisi del suono con la corrispondente nomenclatura (Palmieri 1841, p.166).

Con il suo *Novello sistema di tonometria* (de Luca 1844), inoltre, ha avuto il merito di aver riformato la tonometria facendola diventare teoria a supporto dell'arte musicale. Altro aspetto ricorrente, infatti, nelle opere dello scienziato irpino è la convinzione che scienza e arte siano un binomio indissolubile perché solo attraverso l'applicazione delle teorie scientifiche l'arte può elevarsi ai massimi livelli di perfezione.

Mentre l'autore elevasi alle più astratte generalità della scienza, tien sempre rivolto lo sguardo alle pratiche applicazioni ed a' servigi che le scienze devon rendere alle arti (Palmieri 1841, p. 167).

A Napoli de Luca contribuì con il suo lavoro, ma soprattutto con i suoi strumenti, all'affermazione di quello che all'epoca veniva definito come il "sistema dei fisici" ossia il *Temperamento equabile*, e fu il primo ad aver ipotizzato il *612 Equal Temperate System*, che verrà poi ripreso da numerosi teorici musicali fino ai giorni nostri. In tal senso l'opera del nostro autore può considerarsi pionieristica.

Bibliografia

- Barbieri P. (2002). "Il temperamento equabile nell'Ottocento napoletano: l'acustico di Paolo A. de Luca e i suoi manoscritti inediti". *L'Organo*, XXXV, pp. 93-122.
- Chladni E.F.F. (1802). *Die Akustik*. Leipzig: Breitkopf und Härtel.
- de Luca P.A. (1828). "Memoria sopra un tonometro e un cordometro". *Memorie di Matematica e Fisica della Società Italiana delle Scienze residente in Modena*, XX, pp. 468-481.
- de Luca P.A. (1841). *Esame e proposta di ciò che manca per la compilazione di un trattato di acustica completo applicabile alle arti*. Napoli: Stamperia del Fibreno Napoli, p. 152.
- de Luca P.A. (1844). "Novello sistema di tonometria proposto dal sig. P.A. de Luca". *Atti della Real accademia delle Scienze, sezione Società Reale Borbonica*, 7 (II), pp. 323-397.
- Palmieri L. (1841). "Esame dell'opera di P.A. de Luca 1841". *Il Lucifero*, IV (21), pp. 166-167.
- Riccati G. (1767). *Delle corde ovvero fibre elastiche. Schediasmi fisico-matematici*. Bologna: Nella stamperia di San Tommaso d'Aquino.

HISTORY OF ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS

The discovery of atmospheric neutrino oscillations

Paolo Lipari – INFN Roma “Sapienza” – paolo.lipari@roma1.infn.it

Abstract: The discovery that atmospheric neutrinos (created in the showers generated by cosmic rays in the Earth’s atmosphere) change their flavor during propagation between the creation and detection points (that can be separated by a distance as large as one Earth diameter) has received (one half of) the Nobel prize in physics in 2015. In this case the “process of discovery” lasted for more than one decade. The first hint for the existence of a new phenomenon appeared in the 1980s as a discrepancy between data and prediction in the observations of two large mass underground detectors (IMB in the US and Kamiokande in Japan) constructed to study proton decay. This so-called *atmospheric neutrino anomaly*, could be interpreted as: a) systematic effects in the observations; b) flaws in the theoretical predictions; or c) new physics, with neutrino flavor oscillations the simplest (but not unique) solution. The situation was complicated by the fact that not all data, and the observations of other detectors, were (or appeared to be) consistent. For approximately one decade the anomaly with its “hint for oscillations” was at the centre of an intense scientific discussion, that stimulated refinements in the data analysis and the construction of the predictions. Several theoretical models based on *new physics* were also proposed for the interpretation of the data. A generally accepted “solution” for the anomaly, and the recognition that it is the effect of flavor oscillations emerged after a decade of studies and the construction of a second generation, larger mass detector (Super-Kamiokande).

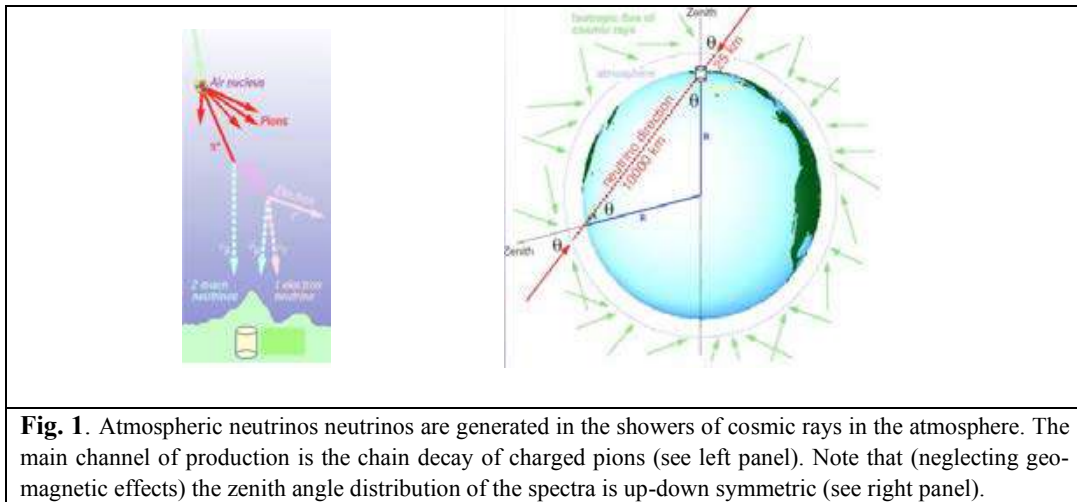
Keywords: Neutrino oscillations, Cosmic Rays.

1. Introduction

The 2015 Nobel prize in physics has been awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur McDonald for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass. The two winners of the prize are the leaders of two large experimental collaborations that performed observations of two different classes of naturally produced neutrinos. Kajita was the leader of the Super-Kamiokande experiment in Japan, which observed atmospheric neutrinos, while McDonald was the leader of the Sudbury Neutrino Observatory (SNO) in Canada, which observed solar neutrinos.

The experimental studies that were honored with the prize were first presented in papers published in August 1998 by Super-Kamiokande (Super-Kamiokande Collaboration 1998), and in July 2002 by SNO (SNO Collaboration 2002). These publications are in fact the conclusions of extended periods of discussions and controversy that started with

a first “hint” for the existence of the new phenomenon (*neutrino flavor oscillations*) up to the moment when the authors conclude that they have “evidence” (as stated in the titles of the two papers). For solar neutrinos the time required in this “process of discovery” lasted for more than three decades (from 1968 to 2002), for atmospheric neutrinos approximately 12 years (from 1986 to 1998).



2. Atmospheric neutrinos

The existence of cosmic rays was first inferred from the study of the altitude dependence of the rate of ionization in gases, measured observing the discharge of electroscopes, and it is common to associate the discovery with the studies of Victor F. Hess who took measurements of the ionization rate during balloon flights that reached a maximum altitude of 5000 m, and in 1912 arrived to the conclusion that a radiation of very great penetrating power enters our atmosphere from above.

For approximately two decades the commonly accepted theory was that this “cosmic radiation” (CR) was formed by high energy gamma rays. This dominant view started to be challenged when in 1928-1929, Walter Bothe and Werner Kolhorster performed their celebrated coincidence experiments using Geiger-Muller detectors, that suggested that the CR radiation was of corpuscular nature and had unexpected properties.

A crucial step in these developments was the discovery of the positron (Carl Anderson 1933). This new particle was soon identified with the antiparticle of the electron predicted by the Dirac. It was also understood that most of the particles that formed the (directly observable) secondary cosmic rays were in approximately equal number electrons and positrons.

The existence of neutrinos in cosmic ray showers was robustly inferred when the origin of the penetrating component in the secondary cosmic radiation was understood. The fundamental steps were the discovery of the muon and of the charged pions, and the identification of their decay modes into “invisible” particles.

Speculations about possible methods of direct detection of atmospheric neutrinos started very early. In the decade of the 1960s, the main motivation for this direct detection was the investigation of the properties of Weak Interactions at high energy (extrapolating from the measurements of atmospheric muons, the neutrino flux had to extend up and beyond energies of several TeV). The possible discovery of signatures for the existence of the intermediate W boson was in fact considered as a major goal for the planning and construction of atmospheric neutrino detectors. Two experiments located in deep mines in India (Achar 1965) and South Africa (Reines 1965) obtained the first direct observations of the flux of atmospheric neutrinos of muon flavor, detecting the μ^\pm generated by charged current neutrino interactions in the rock around the detector.

The experimental study of atmospheric neutrinos received an extraordinary boost from the development of Grand Unified theories in the 1970s. The interest exploded especially after the publication of the work of Georgi and Glashow in 1974 “Unity of All Elementary Particle Forces” (Georgi, Glashow 1974), where they make the fascinating conjecture that the strong, electromagnetic, and weak forces arise from a single fundamental interaction based on the gauge group $SU(5)$. This implies the existence of vector bosons that connect quarks and leptons and can therefore mediate the decay of the proton. The observation of proton decay emerged therefore as a crucial method to confirm the idea of unification. The estimate of the mass of the new, super-heavy vector bosons implied a proton lifetime of about 6×10^{31} yrs, setting a clear goal for the experimental searches.

This immediately stimulated new and more refined analyses of existing data, and the design and construction of new detectors of higher sensitivity.

The first “hint” of a discrepancy between data and predictions for the atmospheric neutrino flux appeared inside a paper of the IMB Collaboration (IMB 1986), that had as main goal the description of the modeling of the atmospheric neutrino background for nucleon decay searches. The paper reported a discrepancy between the measurement of the fraction of contained events with an identified muon decay, with the Monte-Carlo prediction. The simulation predicted that $(34 \pm 1)\%$ of the events should have an identified muon decay, while the IMB data gave the result: $(26 \pm 3)\%$ (the total number of contained events was 401, and 104 events had an observed muon decay). It can be interesting to state in full length the relevant paragraph in the IMB paper, which discusses possible interpretations for the *anomaly* in the flavor ratio:

This discrepancy could be a statistical fluctuation or a systematic error due to: (i) an incorrect assumption as to the ratio of muon ν 's to electron ν 's in the atmospheric fluxes, (ii) an incorrect estimate of the efficiency for our observing a muon decay, or (iii) some other as-yet-unaccounted-for physics (IMB Collaboration 1986).

One can immediately see that this indeed covers all possible explanations for the anomaly. The discrepancy between data and prediction was at the level of three standard deviations, and it was not entirely possible to exclude statistical fluctuations. Excluding the fluctuation hypothesis, one has indeed three possibilities to explain the result (i) some mistake in constructing the prediction for the flavor ratio, (ii) a systematic error in the modeling of the detector, and finally (iii) some new physics effect.

It is straightforward to see that neutrino oscillations could account in a very simple and economic way for the effect (both in the channels $\nu_\mu - \nu_\tau$ and $\nu_\mu - \nu_e$). This requires that a large fraction of the neutrinos must undergo a flavor transition, and therefore that the oscillation length of the neutrinos (with energy $E \approx 1\text{ GeV}$) had to be shorter than approximately 1000 km (some fraction of the Earth radius) and the mixing parameter ($\sin^2 2\theta$) of order unity.

The same flavor ratio anomaly was present also in the early Kamiokande (1986) data but the result received a more intense attention when the experiment published a study of atmospheric neutrino interactions in the detector with an exposure of 2.87 kton yr, with a total of 277 fully contained events (Kamiokande 1988). For “single ring” events (190 in total), the Kamiokande Collaboration was able to separate them into e -like and μ -like classes, and reported that the μ -like events were only $(59 \pm 7)\%$ (statistical error only) of the total, while the number of e -like events was in agreement with the prediction.

The abstract of the paper was stating clearly: “We are unable to explain the data as a result of systematic detector effects or uncertainties in the atmospheric neutrino fluxes”, explicitly pointing to an explanation in terms of some new, non-standard properties of neutrinos. The conclusion of the paper includes the terse statement: “Neutrino oscillations might be one of the possibilities which could account for the data.”

A few years later also the IMB detector presented results (IMB Collaboration 1992) on the flavor content of contained neutrino events from an exposure of 7.7 kton yr (for a total of 935 contained events), and confirmed a relative suppression of the non-showering events. Of the 610 single Cherenkov ring events the fraction of non-showering events was $0.36 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.02(\text{syst})$, while the expected fraction was $0.51 \pm 0.01(\text{stat}) \pm 0.05(\text{syst})$. This deficit of non-showering events was consistent with the analysis of muon decay signals reported previously and now repeated with larger statistics. In the same sample $33 \pm 2(\text{stat})$ of events were accompanied by a muon decay, with a prediction of $43 \pm 1(\text{stat})$. A complication in the interpretation of the data was the fact that the observations of the iron calorimeters NUSEX (NUSEX 1998) and Fréjus (Fréjus 1990) - while having smaller statistics - were reporting a muon/electron ratio of the contained events consistent with predictions, in significant tension (if not open conflict) with the results of the Water Cherenkov detectors.

The Kamiokande Collaboration in the following years released additional data (Kamiokande 1992, 1994) with larger exposures that strengthened the case for the flavor oscillations. Of particular interest was the presentation of *multi-GeV* events, for which the direction of the interacting neutrino can be reconstructed with a smaller error. The data showed indications of zenith angle dependence of the muon deficit, that supported an interpretation in terms of neutrino oscillations.

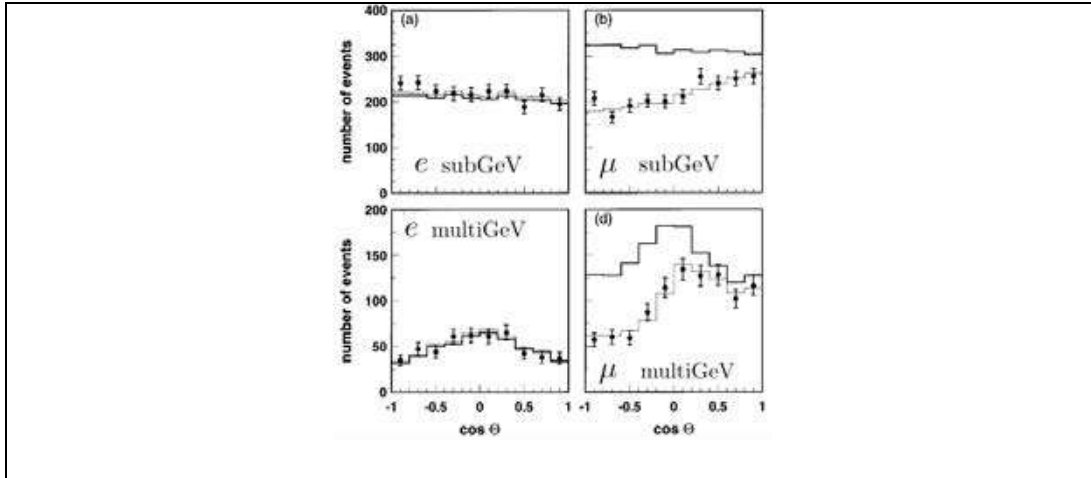


Fig. 2. Evidence for neutrino oscillations in Super-Kamiokande (1998). The left panel shows the zenith angle distribution of e -like events in the sub-GeV and multi-GeV energy ranges. The data is in good agreement with the theoretical prediction. The right panel shows the same distributions for muon-like events. Up-going neutrinos (negative $\cos\theta$) show a deficit.

Several physicists have also remarked that the skepticism encountered in accepting the explanation of the anomaly in terms of neutrino oscillations was the fact that it required very large mixing between neutrinos, in contrast with theoretical expectations (where the mixing between neutrinos had a similar structure to the one observed for quarks). The attitude of most theorists was essentially to “wait and see whether these claims are confirmed”, before starting to construct models of the neutrinos masses and mixings that had large mixing between different flavors.

On the other hand, several efforts were performed to interpret the results in terms of new physics. Standard flavor oscillations were a simple possibility. Given the uncertainties in the absolute normalization of the neutrino fluxes both (2-flavor mixing) channels (ν_μ - ν_τ and ν_μ - ν_e) were possible. On the other hand, several other possibilities were introduced such as oscillations into sterile neutrinos, neutrino decay, decoherence effects, violations of the equivalence principle. Another possibility was the existence of proton decay in the channel $p \rightarrow e \nu \nu$ with a lifetime of order 4×10^{31} yr (where the effect was understood as an excess of electron limited to the energy range $E < m_p/2$).

3. The Evidence

A generally accepted “solution” for the origin of the anomaly, and the recognition that it was the effect of flavor oscillations required more than a decade of studies and the construction of a second generation, larger mass water Cherenkov detector (Super-Kamiokande).

A review of the controversies, discussions, hypothesis making about the flavor anomaly in atmospheric neutrinos (and how this effect was a “hint” for oscillations or other forms of new physics in neutrino propagation) during the time interval 1986-1998 can in fact

be very interesting and instructive to study the “process of discovery” and see how Science is concretely made (the “flesh and blood” of research).

During the time interval 1986-1988 more data on atmospheric neutrinos were obtained (or made public), and more refined predictions were calculated. Some physicists became gradually convinced that new physics had been discovered, while others remained skeptical. In this case it is possible to identify quite clearly an *instant* when the “hint” became “evidence” (at least for physicists outside the collaboration), and this is the moment when the Super-Kamiokande experiment finally released its first 1.5 years of data taking (33 kton yrs of exposure) during the Neutrino-1998 conference in Toyama. The strength of the Super-Kamiokande result was not simply the smaller statistical errors, but also the broader range in energy that the larger exposure made possible. Neutrino flavor oscillations have very characteristic dependences of the ν path-length and energy, and this in principle allows a clear, unambiguous identification of the existence of this phenomenon, if the observations cover with sufficiently good resolution a sufficiently large part of the region in the plane $\{L, E_\nu\}$, where the flavor transition probabilities are significant.

The data of Super-Kamiokande (Super-Kamiokande 1998), in particular the zenith angle dependences of the muon events, were strikingly supporting the neutrino oscillation hypothesis. Additional support to the flavor oscillation hypothesis was also coming from the study of (ν -induced) up-going muons that showed a zenith angle dependence distorted with respect to the no-oscillation prediction, a result that was also independently confirmed by the MACRO detector data (MACRO 1998).

References

- Achar G.V. et al. (1965). “Detection of muons produced by cosmic ray neutrinos deep underground”. *Physics Letters*, 18 (65), p. 196.
- Cribier M., Dumarchez J., Vignaud D. (eds) (2018). *Proceedings of the International Conference on History of the Neutrino:1930-2018* (Paris, 5-7 September) [online]. URL: < <https://inspirehep.net/conferences/1650489> >
- Fréjus Collaboration (1990). “A Study of atmospheric neutrino oscillations in the Fréjus experiment”. *Physics Letters B*, 245, p. 305.
- Georgi H., Glashow S. L. (1974). “Unity of All Elementary Particle Forces”. *Physical Review Letters*, 32, p. 438.
- IMB Collaboration (1986). “Calculation of Atmospheric Neutrino Induced Backgrounds in a Nucleon Decay Search”. *Physical Review Letters*, p. 57.
- Kamiokande Collaboration (1986). “Atmospheric Neutrino Background and Pion Nuclear Effect for Kamioka Nucleon Decay Experiment”. *Journal of the Physical Society of Japan*, 55, p. 3786.
- Kamiokande Collaboration (1988). “Experimental Study of the Atmospheric Neutrino Flux”. *Physics Letters B*, 205, p. 416.

- Kamiokande Collaboration (1992). “Observation of a small atmospheric muon-neutrino / electron-neutrino ratio in Kamiokande”. *Physics Letters B*, 280, p. 146.
- Kamiokande Collaboration (1994). “Atmospheric muon-neutrino / electron-neutrino ratio in the multiGeV energy range”. *Physics Letters B*, 335, p. 237.
- MACRO Collaboration (1998). “Measurement of the atmospheric neutrino induced upgoing muon flux using MACRO”. *Physics Letters B*, 434, p. 451.
- NUSEX Collaboration (1989). “Experimental study of atmospheric neutrino flux in the NUSEX experiment”. *Europhysics Letters*, 8, p. 611.
- Reines F. et al. (1965). “Evidence for high-energy cosmic ray neutrino interactions”. *Physical Review Letters*, 15, p. 429.
- SNO Collaboration (2002). “Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in Sudbury Neutrino Observatory”. *Physical Review Letters*, 89, p. 011301.
- Super-Kamiokande Collaboration (1998). “Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos”. *Physical Review Letters*, 81, p. 1562.

[For a more complete set of references see the contribution of P.L. in Cribier et al (2018).]

Reading the Discoveries of Gravitational Waves as New History of Physics Frontier Research Programme Part two

Raffaele Pisano – IEMN, Lille University, Lille, France; CPNSS, LSE, UK – raf-faele.pisano@univ-lille.fr

Philippe Vincent – PhD Student, Lille University, Lille, France – philippe.vincent06@gmail.com

Abstract: The detection on September 14, 2015 at 09:50:45 UTC of the LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) Scientific Collaboration and Virgo (for the Virgo Cluster) Collaboration opened a scientific era towards a new cosmology (Moskowitz 2014; Castelvechi and Witze 2016; LIGO Scientific Collaboration 2016; Cervantes-Cota, Galindo-Uribarri 2016). This detection happened 100 years after their predicted existence by Albert Einstein's (1879-1955; Einstein 1916, 1920, 1937, 2005). The forthcoming Theory of Relativity on side and the incertitude of the frontiers of Physics on the other, essential concepts at the roots of this discovery can be traced back as far as Isaac Newton's theory of gravitation (1642-1727; Newton [1713] 1729; [1726; 1739–1742] 1822; Pisano, Bussotti 2014, 2016, 2017), and Bernhard Riemann's (1826-1866) geometry of curved spaces. Very interesting research were produced by Sir William Kingdon Clifford (1845–1879), with his intuitions about the ontology of physical space. Well-known for his mathematical works (Clifford's *algebra* in Clifford 1873a; Oziewicz, Sitarczyk 1992) and for his epistemological contributions described in *The Ethics of Belief* (1876) and in *The Common Sense of the Exact Sciences* (1885), Clifford addressed some interesting points in a lecture given for the Cambridge Philosophical Society on February 21st, 1870, titled *On the Space-Theory of Matter*. In fact, his intuition led him to embark on an expedition to observe a solar eclipse and make measurements of the shift in light polarization due to the passage of the Moon in front of the Sun. In this paper, we briefly present historical notes on Clifford's views and how the historical context is related to and was foreshadowing the paths and advancements that produced the theories that ultimately lead to the discovery of gravitational waves. This is part of a work in progress of a doctoral research program.

Keywords: Astronomy, History Physics, NoS, Gravitational waves, Physics–Mathematics Relationship, Intellectual, History of Science and Technology.

1. Bernhard Riemann's Influence on Clifford

1.1 1867. *On the Hypotheses which lie at the Bases of Geometry*

The great German mathematician Bernhard Riemann is very famous (just think of the “Riemann Hypothesis”—still unproven) for his works in many different mathematical fields, especially complex analysis, number theory and, probably more relevantly for our matter, differential geometry. In 1867, after Riemann's death, Richard Dedekind (1831-1916) published *Ueber die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen* in *Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, vol. 13 and some of Riemann's work (Riemann 1868), which was translated from German to English by Sir William Kingdon Clifford as *On the Hypotheses which lie at the Bases of Geometry* (Clifford 1867; Wilkins 1998). In order to better understand this production, a few keywords might be helpful to clarify:

- *Magnitude* refers to the measurable extent of something such as size, i.e. *dimension*, therefore a *triple extended magnitude* refers to a 3-dimensional space of any sort.
- *Measure-relationship* refers to the relation between mathematical objects, i.e. the mathematical notion of *distance* between points, *angles* between lines or segments, *volumes*, etc.

In this work Riemann (Riemann 1868) started by describing how he built general n-dimensional spaces from scratch through notions he redefined and stated how this reasoning lead him to the conclusion that physical space is in essence only a particular case of –mathematical 3-dimensional– spaces. For instance, Clifford translated Riemann's process:

I have in the first place, therefore, set myself the task of constructing the notion of a multiply extended magnitude out of general notions of magnitude. It will follow from this that a multiply extended magnitude is capable of different measure-relations, and consequently that *space is only a particular case of a triple extended magnitude* (Clifford 1873b, p. 14 – emphasis is ours).

Riemann then elaborates on his idea that (physical) space being a particular case, the axioms of geometry laid by Euclid are just hypotheses and not true for all 3-dimensional spaces. In fact, it is up to us to determine with which kind of 3-dimensional space we are working on and if these “traditional” axioms are usable, namely if we are in the particular case of a flat space. Indeed, in Clifford's translation Riemann stated:

But hence flows as a necessary consequence that *the propositions of geometry cannot be derived from general notions of magnitude*, but that the properties which distinguish space from other conceivable triple extended magnitudes are **only to be deduced by experience**. Thus arises the problem, to discover the simplest matters of fact from which the measure-relations of space may be determined; [...] the most important system for our present purpose being that which Euclid has laid down as foundation. These matters of fact are – like all matters of fact – not necessary, but only of empirical certainty; *they are hypotheses (ibidem)*.

In a later section of Riemann's dissertation (Clifford 1873b, p. 36), Riemann discussed the different possibilities related to the different kinds of *space-constructions* that one can consider and properties – the relevance of this passage will later become obvious to the reader (in the analysis of Clifford's conceptions for space). Indeed, Riemann stated:

In the extension of space-construction to the infinitely great, we must distinguish between unboundedness and infinite extent [...] That space is an unbounded three-fold manifoldness, is an assumption which is developed by every conception of the outer world; [...] The unboundedness of space possesses in this way a greater empirical certainty than any external experience. But its infinite extent by no means follows from this; on the other hand if we assume independence of bodies from position, and therefore ascribe to space constant curvature, it must necessarily be finite provided this curvature has ever so small a positive value. If we prolong all the geodesics starting in a given surface-element, we should obtain an unbounded surface of constant curvature, i.e., a surface which in a flat manifoldness of three dimensions would take the form of a sphere, and consequently be finite (Clifford 1873b, p. 14).

However, these considerations though interesting from an Epistemological point of view (cfr. Rahman et al. 2009) were of a limited interest to Riemann who dismisses them quickly after barely evoking an unlikely impact to keep in mind on practical phenomena if it helps explaining them:

The questions about the infinitely great are for the interpretation of nature useless questions. But this is not the case with the questions about the infinitely small. [...] the infinitely small do not conform to the hypotheses of geometry; and we ought in fact to suppose it, if we can thereby obtain a simpler explanation of phenomena. This leads us into the domain of another science, of physic, into which the object of this work does not allow us to go to-day (*Ibidem*).

2. Clifford's Concept of Space in Later Works

Sir William Kingdon Clifford is well-known for his mathematical works (Clifford's *algebra* in Clifford 1873a; Oziewicz, Sitarczyk 1992), his philosophical and epistemological contributions with his *The Ethics of Belief* of 1876 (Clifford 1901a) and *The Common Sense of the Exact Sciences* of 1885 (Clifford 1891) but less known for his research in Physics. Clifford was a geometer and according to him and his conceptions, geometry was a physical science (Clifford 1901b). Roughly three years after the publication of his translation of Riemann's work, on February 21st, 1870, Clifford made a few interesting points in his lecture titled *On the Space-Theory of Matter* given at the Cambridge Philosophical Society. In it, Clifford gave a very brief preview of his theory regarding physical space and how he believed that its intrinsic nature was non-Euclidean (Clifford 1870). Since he started by referencing Riemann's work on curved spaces and adding that we ought to find out by experience to which type of 3-dimensional space we live, it seems quite obvious that Clifford, if not influenced by Riemann, at least shared these ideas with him. Although short but captivating for the points made in this lecture, another interesting

element of this lecture is the statement of Clifford's intentions to demonstrate the validity of his speculations to explain "the laws of double refraction". In fact, Clifford did try to corroborate his assumptions by joining an expedition to observe an eclipse in December of the same year. Clifford's expectations were that the passing of the Moon in front of the Sun might produce a measurable change in the skylight polarisation thereby showing that space surrounding the Moon might be curved by its presence (Cervantes–Cota, Galindo–Uribarri 2018); which in retrospect to our current understanding resembles a lot the common notion that mass distorts spacetime. At this point, it seems necessary to add the precisions that Einstein's Theory of Relativity and the concept of spacetime are still a few decades away and that the previous statement is not an analogue of a psychological projection but merely pointing at similarities in Clifford's conceptions; whether they were the result of chance, a fluke, a contingency or something else is left aside since tensor calculus was not yet developed. Incidentally, this may well be this deficiency that lead Clifford to develop his own mathematical tools (Clifford 1882) in his *Preliminary Sketch of Biquaternions* (Clifford 1873a). Clifford's idea behind biquaternions was to model motion in a higher dimensional space which he used extensively in 1875 in *On the Free Motion Under No Forces of a Rigid System in an n-fold Homaloid* in which his idea was to find an equivalence between ordinary three-dimensional space and the motion on a surface of a sphere in order to study the rotation of an object:

In general, the problem of free motion in elliptic space of n dimensions is identical with that of free motion, or motion about a fixed point, in parabolic space of $n+1$ dimensions (Clifford 1875, p. 67).

Over the years his natural desire to do scientific mediation along with peer pressure lead him to expose his particular conception of space for the time in a lecture titled *The Postulates of the Science of Space* he delivered at the Royal Institution in March 1873 (Clifford 1901b). In the introduction he made epistemological and philosophical considerations about what "the geometer of to-day knows" (Clifford 1901b pp. 358-359) and about our position in space ("Here, with the consciousness of a There beyond it"; *Ivi*, p. 357) and time ("Now, with the consciousness of a Then before it"; *Ivi*, p. 358). After some clarifications about boundaries of solids in space, lines, surfaces, and points (*Ivi*, pp. 360-368), which he deemed necessary for a broad audience, Clifford shared his views and the postulates attached to this conception.

His first postulate was space continuity, the second elementary flatness, corresponding to the idea that the more one magnifies something the flatter it looks, the third superposition i.e. a body can be moved around in space without altering its size or shape and all parts of space are exactly alike (similar to our current understanding of space isotropy and homogeneity), the fourth and last one being similarity by which any figure may be magnified or diminished in any degree without altering its shape (*Ivi*, pp. 368-374). After he commented these postulates, Clifford decided to conclude by exploring the assumption that if the property of elementary flatness exist on the average and although the side of the very great appears flat, if "the deviations from it being, as we have supposed,

too small to be perceived” and if we suppose the “curvature of all space to be [is] nearly uniform and positive” then:

If you were to start in any direction whatever, and move in that direction in a perfect straight line [...], after a most prodigious distance to which the parallaxic unit—200.000 times the diameter of the earth’s orbit— would be only a few steps, you would arrive at—this place. Only, if you had started upwards, you would appear from below (*Ivi*, p. 387).

Finally, Clifford concluded with his own personal opinion on the matter:

In fact, I do not mind confessing that I personally have often found relief from the dreary infinities of homaloidal space in the consoling hope that, after all, this other may be the true state of things (*ibidem*).

In addition, added a note saying that “even the finite extent does not follow necessarily from uniform positive curvature: as Riemann seems to have supposed.” (*ibidem*)



Fig. 1. Clifford W.K. (1891) *The Common Sense of the Exact Sciences* by the late William Kingdon Clifford with one hundred figures. The International Scientific Series Volume L., D. Appleton and Company, New York, 1, 3 and 5 Bond Street. Source: Niels Bohr Library, courtesy of the *American Institute of Physics*, USA.

3. Concluding Remarks

While Clifford is often described as a Riemann’s follower, it should be noted that Clifford was his own man, not just Riemann’s disciple. However, Clifford agreed with Riemann’s ideas and was clearly greatly influenced by them. Clifford did not finish his Space-Theory of matter, however, taking into account his works after 1870 about his conception of space it is clear that either Clifford was developing his own tools for the production of his theory or preparing his audience to the ideas that he would have developed if he did not pass away at such a young age. Moreover, it should be noted that Clifford’s ideas about the relationship between mass and space, i.e. that the mass of the Moon could affect

the light during an eclipse (Cervantes–Cota, Galindo–Uribarri 2018) which is the reason for him joining the expedition of December 1870 (Clifford 1976).

Acknowledgements

We warmly thank *The Niels Bohr Library | American Institute of Physics* (AIP) for assisting and supporting our research on the history of gravitational waves by *AIP Grant-in-Aid from the Friends of the Center for History of Physics–2019*. We are particularly grateful to Prof. Gregory Good, Director of the AIP. Recently, one of us (PV) spent a term at the AIP on the subject.

References

- Castelvecchi D., Witze A. (2016). “Einstein’s gravitational waves found at last” [online]. URL: <<https://www.nature.com/news/einstein-s-gravitational-waves-found-at-last-1.19361>> [Retrieved 2016–02–11]. DOI:10.1038/nature.2016.19361.
- Cervantes–Cota J., Galindo–Uribarri S., Smoot G. (2016). “A Brief History of Gravitational Waves”. *Universe review* 2 (3), 22, pp. 1–30.
- Cervantes–Cota J., Galindo–Uribarri S. (2018). “Clifford’s attempt to test his gravitation hypothesis”. *Revista Mexicana de Física*, E 64, pp. 162–168.
- Clifford W.K. (1870). *Lecture delivered to the Cambridge Philosophical Society February 1870*, Abstract Reprint, in Tucker R. (ed.) *Mathematical Papers by W.K. Clifford*. London Macmillan & Co, 1882, pp. 21–22. Reproduced in Pesic P. *Beyond Geometry*, 2007, p. 73, Dover N.Y.
- Clifford W.K. (1873a). *Preliminary Sketch of Biquaternions*, in *Proceedings of the London Mathematical Society* (Read June 12th 1873). Vol s1-4 (1), pp. 381–395. DOI:10.1112/plms/s1-4.1.381
- Clifford W.K. (1873b). “On the Hypothesis which lie at the Bases of Geometry”. *Nature*, Vol 8, pp.14–17, pp.36–37.
- Clifford W.K. (1875). *On the Free Motion under no Forces of a Rigid System in an n-fold Homaloid*, in *Proceedings of the London Mathematical Society* (Read January 13th 1876). Vol s1-7 (1), pp. 67–70. DOI:10.1112/plms/s1-7.1.67
- Clifford W.K. (1882). *Mathematical Papers by William Kingdon Clifford*. Tucker R. (ed.). London: Macmillan & Co.
- Clifford W.K. (1976). *On the Space-Theory of Matter*, in Čapek M. (ed.) *The Concepts of Space and Time*. Boston Studies in the Philosophy of Science, 22. Dordrecht: Springer, pp. 157–158.
- Clifford W.K. (1901a). *The Ethics of Belief*, in F.R.S. Stephen L., Pollock F. (eds.), *Lectures and essays by the late William Kingdon Clifford*. New York: MacMillan and Co., pp. 163–205.

- Clifford W.K. (1901b). *The Postulates of the Science of Space*, in F.R.S. Stephen L., Pollock F. (eds.), *Lectures and essays by the late William Kingdon Clifford, Vol. 1*. New York: MacMillan and Co., pp. 352-388.
- Clifford W.K. (1891). *The Common Sense of the Exact Sciences by the late William Kingdon Clifford with one hundred figures*. The International Scientific Series Volume L. New York: D. Appleton and Company.
- Einstein A. (1916). “Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation”. *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math.Phys.)*, 22, pp. 688–696.
- Einstein A. (1920). *Relativity The Special and General Theory*, translated by Lawson R. W.. New York: Henry Holt and Company, pp. 135-137, 148-159.
- Einstein A., Rosen N. (1937). “On gravitational waves”. *Journal of the Franklin Institute*. 223 (1), pp. 43–54. Bibcode:1937FrInJ.223 | 43E. Retrieved: 2016–05–13 [see also “Näherungsweise Integration”, June 1916 and “Über Gravitationswellen”, 1918].
- Einstein A. (2005). *The Born–Einstein Letters: Friendship, Politics, and Physics in Uncertain Times*. New York: MacMillan, p. 122.
- LIGO Scientific Collaboration (2016). “Tests of General Relativity with GW150914”, *Phys. Rev. Lett.* 116, 221101. Retrieved: <https://arxiv.org/abs/1602.03841>
- Moskowitz C. (2014). “Gravity Waves from Big Bang Detected” [online], *Scientific American*. < <https://www.scientificamerican.com/article/gravity-waves-cmb-b-mode-polarization/> > [Retrieved 24/11/2019]
- Newton I. ([1713] 1729). *The Mathematical principles of natural philosophy*. Translated by Motte A.. London: Motte B.
- Newton I. ([1726; 1739–1742] 1822). *Philosophiae Naturalis Mathematica Principia, auctore Isaaco Newtono, Eq. Aurato, perpetuis commentariis illustrata, communi studio Pp. Thomae Le Seur et Francisci Jacquier ex Gallicana minimorum familia, matheseos professorum. Editio nova* (in three volumes). Glasgow: Duncan.
- Oziewicz Z., Sitarczyk C. (1992). *Parallel treatment of Riemannian and Symplectic Clifford algebras*, in Micali A., Boudet R., Helmstetter J. (eds.), *Clifford Algebras and their Applications in Mathematical Physics. Fundamental Theories of Physics*, Vol 47. Dordrecht: Springer, pp. 83-95.
- Pisano R., Bussotti P. (2014). “Newton’s Philosophiae Naturalis Principia Mathematica “Jesuit” Edition: The Tenor of a Huge Work”, *Accademia Nazionale Lincei–Rendiconti Matematica e Applicazioni*, 25 (4), pp. 413–444.
- Pisano R., Bussotti P. (2016). “A Newtonian Tale Details on Notes and Proofs in Geneva Edition of Newton’s Principia”, *Bulletin–Journal of the British Society for the History of Mathematics*, 31 (3), pp. 160-178.
- Pisano R., Bussotti P. (2017). *On the Conceptualization of Force in Johannes Kepler’s Corpus: an Interplay between Physics/Mathematics and Metaphysics*, in Pisano R., Agassi J. and Drozdova D. (eds.), *Hypothesis and Perspective in History and Philosophy of Science. Homage to Alexandre Koyré 1892-1964*. Dordrecht: Springer, pp. 295-346
- Rahman S., Symons J., Gabbay D.M., van Bendegem J.P. (eds.) (2009). *Logic, Epistemology, and the Unity of Science*. Dordrecht: Springer.

Riemann B. (1868). "Ueber die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen", *Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 13, pp. 133-150.

Via: http://www.deutschestextarchiv.de/riemann_hypothesen_1867/7

Wilkins D.R. (1998). "On the Hypotheses which lie at the Bases of Geometry. Bernhard Riemann Translated by William Kingdon Clifford", *Nature*, Vol. 8, N° 183, 184, pp. 14-17, 36, 37.

The time signal in Florence

Simone Bianchi – INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri –
sbianchi@arcetri.astro.it

Abstract: I review a century of time signal in Florence, starting from the 1850s, when true solar time from the clock on the tower of *Palazzo Vecchio* was transmitted telegraphically to the railway stations of the Grand Duchy of Tuscany. At the onset of Italian Unification, midday was signaled to the city by means of a flag lowered on the *Torrino*, the tower of the old Astronomical Observatory of Florence. In the short period when Florence was the Italian Capital (1865-1871), the time signal from the *Torrino* served to regulate communication and transport services in the nation; after that, it continued as a city service only. At the end of the 19th century, the flag was substituted by the firing of the *votapentole* cannon from the *Belvedere* Fortress. From the Great War, the service began to be regulated by the astronomers of the newer Arcetri Observatory. Except for a brief interruption during the Second World War, the time signal continued until the early 1950s.

Keywords: time signal, solar time, midday, Florence.

1. Introduction

From the mid of the 14th century, a mechanical clock on the tower of *Palazzo Vecchio* marked the rhythm of urban activities in Florence.¹ As usual, the clock was regulated on true solar time, given by a sundial (Barbolini, Garofalo 2017) on the square below the tower, *Piazza della Signoria* (Fig. 1). After the adoption of the 12-hour clock in the Grand Duchy of Tuscany in 1750, the clock bell was set to strike 12 o'clock, midday, when the Sun passed at the meridian, the direction of the South.

However, the duration of a true solar day changes over the year, due to the Earth elliptical orbit around the Sun, and to the inclination of the rotation axis on the orbital plane. Instead, clocks had a uniform motion, and even more so as they were becoming more and more precise. Thus, they had to be frequently adjusted to keep up with the uneven pace of true solar time, with the risk of damaging the mechanisms or introducing errors in the regulation.

The easiest solution to the problem was to adopt mean solar time, with days being made of 24 equal hours all year along – the mean Sun being a mathematical formula coinciding with the true Sun only four times in a year. The first city that adopted mean time was Geneva in 1780 - not by chance, being a site of important watch-making

¹ Apart from a few updates, this contribution abridges the research presented in Bianchi (2019), to which we refer for full details and references.

workshops. London followed in 1792, Berlin in 1810, Paris in 1812. The first city in Italy is said to be Naples, followed by Rome in 1847, and Turin and other towns in Piedmont in 1849.



Fig. 1. The clock on the Tower of *Palazzo Vecchio* (left) and the sundial in *Piazza della Signoria* in Florence (right).

Both true and mean time are local definitions, depending on the longitude. With the development of fast transportation and communication services spanning over a wide geographical area, it became necessary to adopt the time of a specific place along the service: in the UK, for example, most of the railway lines had adopted the Greenwich mean time by 1848 (Howse 1980).

2. The time of *Palazzo Vecchio*

By the beginning of the 1850s, Tuscany had a developed railway system, and a telegraph line along the path of the railway. The handbook for telegraph operators (Matteucci 1850) prescribed that each office clock had to be regulated weekly on the clock in the central office in *Palazzo Vecchio*, which presumably was regulated on that of the tower. However, there were frequent discrepancies between the telegraph (and railway) time and that of the civic clocks of towns hosting railway stations. As the curator of the clock of *Palazzo Vecchio* confessed to that of Lucca, “the clocks of the railway stations along the *Leopolda* line almost never agree with the Public Clock of Florence, and that of Leghorn very often differs by about 14^m from the real time, [...] which is shameful (Verità 1851).

Such a difference could not have been due to the use of local time by civic clocks: the maximum longitude extent of the railways was of about 1 degree, accounting for a delay of just 4^m in Leghorn with respect to Florence.

In 1858 a royal decree tried to fix the problem with a stricter regulation: the pendulum in *Palazzo Vecchio*'s telegraph office had to be regulated daily on the tower clock; the time had to be transmitted daily to other telegraph offices; private societies running the railway lines were compelled to use telegraph time (Giuntini 1991). Towns along railway lines were invited to use it for their public clocks. Still, *Palazzo Vecchio*'s clock was regulated on true solar time using the sundial of *Piazza della Signoria*, retraced on that occasion by the astronomers of Florence Observatory.



Fig. 2. The tower (*Torrino*) of the Florence Observatory (*Specola*) in Florence.

3. A flag for the mean time (1860-1899)

After the departure of the last Grand Duke, the Tuscan provisional government decided to switch to mean solar time “as used in Turin and in the most learned cities of Europe (Ridolfi 1860)”. The director of Florence Observatory, Giovan Battista Donati, wrote instructions on how to set clocks on mean time, which were published on the newspaper *Monitore Toscano* (Donati 1860) and sent to major municipalities in Tuscany. The switch became effective on 1860, December 24th (one of the four days in which true and mean time coincide). A signal was set on the tower of the Observatory (the *Torrino* of the *Specola*, Fig. 2): a national flag was raised 3^m before, and dropped at 12 o'clock; at the same time *Palazzo Vecchio*'s clock rang.

In the unified Kingdom of Italy, Florence mean time was used by the north sector of the railway line of the *Strade Ferrate Romane* (including the older grand-ducal lines of Tuscany) and, when the city became the capital in 1865, by the Italian telegraphs. For these services, time was transmitted from the *Specola* to the central office in *Palazzo Vecchio* via telegraph. From the end of 1866, a unique time standard was used for all the railway lines and other services in the Kingdom of Italy, Rome Mean Time (ahead of Florence time by about 5^m). While several cities adopted the railway time soon after, Florence kept its own local time until 1878.

In the first decade of the time signaling from the *Specola*, the time was measured by observing the transit of the stars with a passage instrument. At the end of the 1860s, however, the old astronomical observatory was dismantled and all instrumentation was moved to the newer observatory in Arcetri. The time signal remained nevertheless at the *Specola*, reduced to a meteorological observatory. Time measurements were conducted by observing the passage of the Sun on a meridian line. The flag continued to signal midday to the tower of *Palazzo Vecchio* (for the sole service of the city, after the transfer of the capital to Rome in 1871), using Rome mean time from 1878, and Central European time (about 10^m ahead of Rome time) from its adoption in Italy in 1893.

3. The *votapentole* (1899-1935)

On an initiative of military authorities, from May 1899 midday was announced by firing a cannon blank, from the Fortress *Belvedere* above the *Specola* (Fig. 3). A hand-controlled electric signal from the *Specola* commanded a bell next to the cannon, which rang at 1^m, then at 30^s before 12. At the third ring, at 12 o'clock, the cannon was fired and *Palazzo Vecchio*'s clock struck. With the cannon, the flag signal ceased. There were a few initial problems: the smoke and ejecta caused complaints from the neighborhood of the Fortress; also, after the fall of S. Marco bell tower in Venice in 1902, it was feared that the shock wave from the cannon could damage the tower of *Palazzo Vecchio*, but a detailed investigation found that the induced vibrations were uninfluential (Alfani 1904). The cannon continued its service and came to be known as *votapentole* (empty the pots!), a term jokingly indicating midday.

At the onset of the cannon signaling, the director of the Arcetri observatory, Antonio Abetti, offered to provide the exact time to the *Specola*. Later in 1912, Antonino Lo Surdo, director of the *Specola* meteorological and geophysical observatory, commented that "in Arcetri, time is determined with an exactness of 0.01s (Lo Surdo 1912)". Thus, it is likely that the reference time measurements came from the Arcetri Observatory, even if transferred to the Fortress through the *Specola*. During the Great War, Lo Surdo was called for military service and Abetti substituted him in directing the time signal. In that period, an artillery soldier in the Fortress received every day a direct telephone call from Arcetri at 11:00, during which a clock next to the cannon was set on exact time. This way, there was no hastiness when the same soldier had to fire the cannon at 12 o'clock. Abetti estimated an uncertainty of 1^s in the time signaling, after taking into account the delay due to the sound speed.

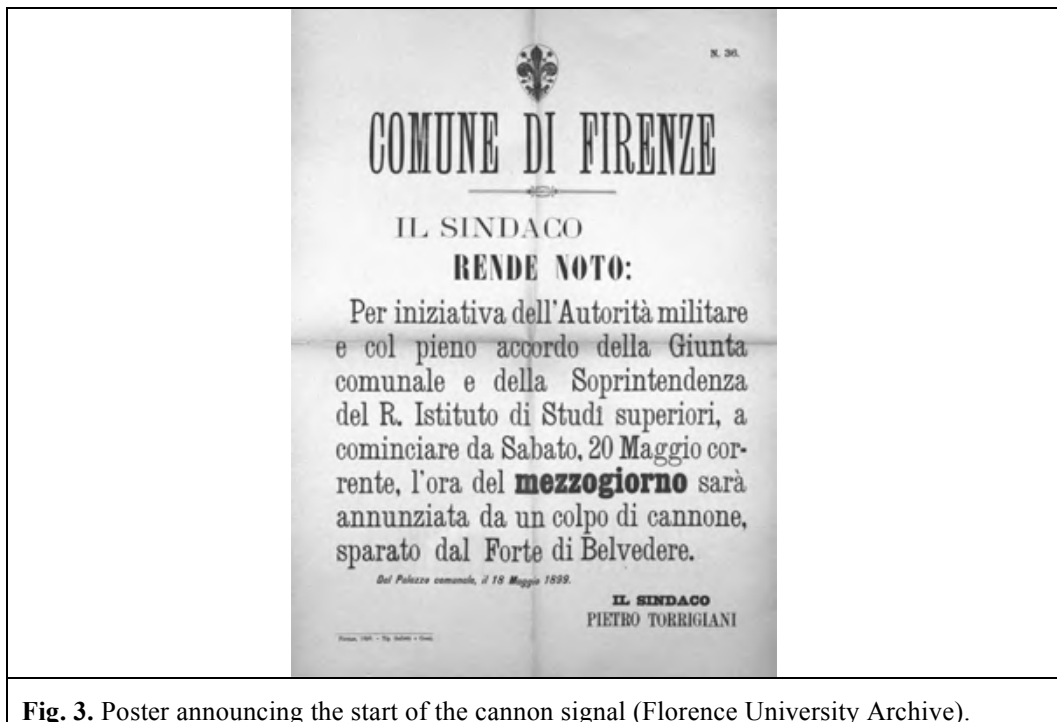


Fig. 3. Poster announcing the start of the cannon signal (Florence University Archive).

The article by Lo Surdo (1912) was a polemic answer to the emphasis given by the press to the experiments carried on by Father Guido Alfani, director of the Ximeniano Observatory of the Piarists in Florence city center. Alfani set up the first Italian radiotelegraphic station to receive the time and meteorological signal of the Paris Observatory, broadcasted from the Eiffel Tower from 1910. A master pendulum at the Ximeniano was synchronized electrically with other clocks in the Observatory, including one at its entrance, intended to be for public use (Alfani 1928).

From 1933 Giorgio Abetti, son of Antonio and director of Arcetri from 1921, became director of the geophysical observatory of the *Specola*. According to Abetti junior “the system used today to transmit the signal to the soldier who fires the cannon is the most antiquated one can imagine with respect to modern methods (Abetti 1935)”. Despite projects for a new method, the time transmission continued in the usual way, with a voice communication over a telephone line.

4. The last years of Florence time signal

From 1936 the midday was announced by the sound of anti-aircraft alarms. After the usual communication from the *Specola*, the main switch at *Belvedere* activated all city sirens from half a minute before midday till 12 o'clock. The signal continued until the harsher days of the Second World War in mid 1944. In the same period, the Arcetri Observatory provided the exact time to the public service broadcaster EIAR: the original supplier, the Brera Observatory in Milan, had been bombed in 1943.

The time signal with the *votapentole* cannon was restored on 1949, Nov. 4th. It did not last long, though. The *Specola* observatory was suppressed at the end of 1952. Abetti proposed to renew the service and transfer it to Arcetri, to no avail. The service employees signed their last timesheets at the *Specola* in May 1953. Probably the signal stopped shortly after, though it has not been possible to find the exact date of its end. The service could not have gone beyond the beginning of 1956, when the last soldiers, which could possibly fire the cannon, left the Fortress *Belvedere*, finally ceded by the Ministry of Defence of the Italian Republic to the Municipality of Florence.

References

- Alfani G. (1904). “Sui movimenti vibratorii di una torre”. *Pubblicazioni della Società cattolica italiana per gli studi scientifici*, V, pp. 146-164, 194-212.
- Alfani G. (1928). *L'Osservatorio Ximeniano e il suo materiale scientifico. Vol. IX: il servizio dell'ora*. Firenze: Tipografia Barbera.
- Barbolini S., Garofalo G. (2017). *La meridiana di Piazza della Signoria*. Firenze: Comune di Firenze (Quaderni dell'Archivio della città, 12).
- Bianchi S. (2019). *Il Segnale orario a Firenze*, in *Atti della Fondazione Giorgio Ronchi*, 74 (1), pp. 61-89.
- Donati G.B. (1860). “Del modo di regolare gli orologi sul tempo medio”. *Monitore Toscano*, 21 dicembre 1860.
- Giuntini A. (1991). *Leopoldo e il treno. Le ferrovie nel Granducato di Toscana (1824-1861)*, Collana di ricerche in storia economica, 4. Napoli: Edizioni Scientifiche Italiane.
- Howse D. (1980). *Greenwich time and the discovery of the longitude*. Oxford: Oxford University Press.
- Lo Surdo A. (1912). “La radiotelegrafia, l'ora esatta e la previsione del tempo”. *Il Nuovo Giornale di Firenze*, 17-18 aprile 1912.
- Matteucci C. (1850). *Manuale di telegrafia elettrica*. Pisa: Tip. Pieraccini.

Archival sources

- Abetti G. (1935). Letter to the rector of Florence University, 28/1/1935. Firenze, Archivio INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Fondo G. Abetti, Osservatorio Geofisico.
- Ridolfi C. (1860). Letter to the director of the department of public instruction, Firenze, 18/11/1860. Firenze, Museo Galileo, ARMU Copialettere 38.
- Verità L. (1851). Letter to Bertini G., 24/3/1851, cited in Bertini, G., letter to Gonfaloniere of Lucca, Lucca, 9/4/1851. Lucca, Archivio Storico del Comune di Lucca, Protocollo generale, anno 1851, n. 936.

Antonio Colla (1806-1857): osservatore astro- meteorologico dell'Università di Parma

Emanuela Colombi – Liceo delle Scienze Umane A. Sanvitale (Parma); Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche Enrico Fermi – e.colombi@googol.it

Abstract: Antonio Colla is a scientist who linked his life to Parma, where he was born on December 6th, 1806. He dedicated his entire existence to the sky: his observations of the sky begin in 1825 and continue until the premature death on March 22, 1857.

Through unpublished sources and archive documents, it is possible to trace his personal and scientific history, trying to reconstruct the difficulties of his academic path, due also to family problems. These difficulties are overcome thanks to his passion and to an assiduous work that will allow him, in 1831, to enter the University. The documents let us learn about the scientific instrumentation available at the physics cabinet in Parma, which over time he expanded to make increasingly precise observations and also the discovery of comets. The registers with the barometric, hygrometric, thermometric and anemometric observations, and the description of the sky during the day, with a series of explanatory symbols of the atmospheric conditions are evidences of his remarkable work which, however, was not limited to research. Colla had an intense scientific dissemination activity. He used different communication channels to reach different audiences: scientific papers and notes for experts in Italian and foreign specialist journals, but also articles in the local newspaper addressed to lay people. He was able to describe the observations and the results of his research activities with different *language registers*, referring especially to the study of comets, aurora borealis, magnetic perturbations, bolides, and aerolites and to the discoveries of new planets.

Colla's relevance among the scientific community is testified by his rich correspondence – including over 1900 letters – and especially by his connections to prominent European scientists.

Keywords: astronomy, comets, meteorological observations.

1. La specola di Parma

La specola di Parma, tra quelle italiane, fu una delle prime ad essere edificate. La costruzione è stata voluta dal padre gesuita Jacopo da Belgrado¹ in una delle due torri all'interno del Collegio di San Rocco, attuale sede dell'Università, che ha provveduto

¹ Jacopo da Belgrado (1704-1789), fisico e astronomo.

anche a dotarla di una adeguata strumentazione per le osservazioni astronomiche². Le attività della specola terminarono nel 1768 quando, come in altre parti d'Europa, venne soppresso l'ordine dei gesuiti.

Proseguirono l'opera di Belgrado gli ingegneri Droghi e Ballerini, mentre la cattedra di matematica venne assegnata a P. Tortosa e quella di Fisica a P. Andrea Bina, priore di S. Benedetto di Mantova (Rossi, 1933). L'arrivo del Chierico Teatino Pietro Cossali nel 1786, chiamato dal Duca Ferdinando di Borbone³, grande appassionato di astronomia, contribuì alla ripresa della specola parmense (Colombi, 2015). In seguito alle alterne vicende politiche ed alla creazione del Dipartimento del Taro, Cossali decise di tornare nella sua città natale a Verona. L'Osservatorio proseguì la sua attività sotto il monitoraggio dei docenti di fisica che si andarono alternando: tra questi ricordiamo Pietro Sgagnoni⁴ e Macedonio Melloni⁵. Bisognerà però aspettare l'arrivo di Antonio Colla per avere una nuova stagione di studi, osservazioni e scoperte.

La torre adattata ad osservatorio da Jacopo da Belgrado, anche se trasformata nella seconda metà dell'800 ad opera di P. Pigorini⁶, è ancora presente nel palazzo dell'Università (figura 1) e per la sua posizione e altezza permette una visuale aperta della volta celeste; all'epoca oscuravano la visuale del cielo solamente l'altra torre dell'Università, il campanile del Duomo e le cupole di alcune chiese del centro, come la chiesa di S. Maria della Steccata.

2. Antonio Colla e l'Università

La figura di Antonio Colla è decisamente poco conosciuta, anche in ambito locale, mentre il suo carteggio e il grande numero di corrispondenti da Stati del territorio italiano ed europeo lo collocano tra i protagonisti della cultura scientifica del tempo (Colombi, Perazzo, 2017).

Colla nasce a Parma il 6 dicembre 1806 da una famiglia agiata. Il padre Carlo, un negoziante, sembra fosse socio di una ditta che si occupava dell'illuminazione della città durante la dominazione francese. La prematura scomparsa del padre lascia la famiglia in situazioni di grave disagio e Antonio senza sostegno economico non riesce a proseguire gli studi⁷. Il podestà di Parma si interessa alle sorti di Colla che si stava già

² Gli strumenti usati da Jacopo da Belgrado sono stati inventariati nei giorni successivi la soppressione dell'ordine e figurano nell'*Inventario generale di tutti i mobili, suppellettili, macchine, libri, scritture a stampa che dal P. Stefano Luigi Cattanei altra volta procuratore di questo Collegio di san Rocco, sono stati separati dagli altri di spettanza del collegio medesimo*. Archivio di Stato di Parma (ASPR), Fondo Gesuiti Parma, b. 136.

³ Ferdinando I di Borbone (1751-1802), Duca di Parma, Piacenza e Guastalla, si fece allestire nel palazzo di Colorno, lontano dalle stanze di rappresentanza, un appartamento riservato in cui dedicarsi agli studi ed in particolare all'astronomia nel suo "osservatorio".

⁴ Pietro Sgagnoni (1760-1827), docente di Matematica e Fisica e poi di Fisica Teorica e Sperimentale.

⁵ Macedonio Melloni (1798-1854), successe nel 1827 al prof. Sgagnoni ma fu presto costretto a lasciare Parma in seguito alla sua partecipazione ai moti rivoluzionari del 1831 (Colombi, 2014).

⁶ Pietro Pigorini (1833-1891), successore di Colla alla direzione dell'Osservatorio.

⁷ Archivio di Stato di Parma, Presidenza dell'Interno, b. 48. Nota statistico personale del Signor Colla Antonio, del 22 maggio 1828, redatta dal Podestà di Parma L. Bolla.

facendo conoscere in città per le osservazioni meteorologiche che aveva iniziato ad eseguire a casa propria⁸. Forse la sua prima pubblicazione è un articolo sul quotidiano locale, la Gazzetta di Parma, sabato 29 aprile del 1826⁹, quando descrive la formazione di una corona luminosa formata da tre “paregli”, meteore luminose che come un falso Sole “splendono nelle vicinanze del Sole mostrando e mescolando tutti i colori dell’Iride”. Il successivo articolo del 1829 riposta una sintesi delle osservazioni fatte a Parma durante tutto il 1828; fa precedere alle osservazioni alcune sue considerazioni sull’utilità delle osservazioni meteorologiche e comunica che ha iniziato la registrazione dei dati nel 1824¹⁰. Nell’ampio articolo sono presenti le sezioni: *Osservazioni Barometriche*, *Temperatura*, *Osservazioni igrometriche*, *caduta della pioggia*, *Elettricità atmosferica*, *Venti dominanti*, *Stato del Cielo* e rimanda ad un articolo successivo la presentazione dei fenomeni particolari avvenuti nell’anno precedente.



Fig. 1. La torretta dell’Osservatorio vista dal cortile interno del Convento di San Rocco, sede dell’Università di Parma. L’immagine, conservato all’Osservatorio, è successiva ai lavori di restauro del 1933. Risultano visibili la saletta barometrica ottagonale e la cabina termometrica di forma rettangolare, nella parte Nord del fabbricato.

⁸ Abitava con la famiglia in centro città, in B.go Regale n. 15.

⁹ Archivio Storico dell’Università di Parma (ASUPR).

¹⁰ Le osservazioni del 1824, come lui dichiara, sono le sue prime osservazioni, citate anche da P. Pigorini nel necrologio a Colla pubblicato sulla Gazzetta di Parma n. 65 del 1857. Queste non erano tra i materiali visionati in occasione di precedenti studi: solamente le ultime ricognizioni hanno portato al ritrovamento, tra le carte dell’Osservatorio di questo piccolo libretto di cinque pagine, racchiuse da un sesto foglio di carta, che permette di datare l’inizio delle osservazioni sistematiche di Colla dal giugno del 1824.

Le parole del Podestà sono di lode e sostegno, auspica un aiuto e, se possibile, un lavoro come assistente al professore di Fisica per le misurazioni e la manutenzione degli strumenti. Accanto a questa accorata presentazione Colla aggiunge una supplica:

... mi sono adoperato ai nobili studi della Filosofia, nell'applicarmi all'Astronomia e specialmente alla Meteorologia di cui vado tenendo registri, e di cui posso darne al pubblico le tavole mensuali, che di fatto presento all'Università. Dopo l'ingenua confessione di tanto malore, che altro mi resta, se non gettarmi ai piedi della Maestà Vostra per implorarne il potente aiuto, e quella rara carità che tanto rifulge a render bella la dominazione di cui noi felicemente siamo parte. Si Augusta Donna io imploro un soccorso, e sulla lusinga di poterne essere graziato io lo prego, e caldamente nel prego. Possa la mia preghiera trovare accesso al Trono, mentre mi protesto colla più profonda emozione
 Della Maestà Vostra
 Devotissimo e Fedelissimo suddito
 Colla Antonio¹¹

L'anno successivo Colla presenta una nuova richiesta, che coincide però con un periodo di agitazioni e moti rivoluzionari che partiranno proprio dall'Università e dalle aule di fisica (Colombi, 2014). Solo al termine dei moti rivoluzionari, quando la Sovrana ritorna in città, viene concesso¹² a Colla l'aiuto economico sperato, la possibilità di continuare gli studi, ma soprattutto viene autorizzato l'ingresso nella specola universitaria dove resterà per tutta la vita. Inizia quindi alla fine del 1831 l'attività di Osservatore sotto la guida del professore di Fisica, il sussidio viene confermato nel 1833¹³ sottolineando che deve anche dedicarsi agli studi. Nel 1834 arriva la nomina ufficiale¹⁴ ad Osservatore con uno stipendio annuo di "lire nuove cinquecento", è una carica importante che segna l'inizio di una attività meteorologica sistematica presso il Convento di san Rocco in cui avrà per sé e la famiglia un alloggio vicino all'Osservatorio¹⁵. I successivi sono anni di grande lavoro sia nel campo meteorologico che in quello astronomico, mentre non ci sono tracce degli studi che presumibilmente sono stati sospesi. Colla si è particolarmente distinto per l'osservazione delle macchie solari e delle comete, ma anche per le osservazioni metereologiche che ha eseguito con rigore per tutta la vita.

Dopo numerosi riconoscimenti attribuitigli da accademie internazionali (Colombi, Pezzazzo, 2017), Colla diventerà nel 1841¹⁶ direttore dell'Osservatorio e nel 1844 "Professore Onorario di meteorologia" e addetto alla facoltà filosofica delle Scuole Superiori di Parma¹⁷. Colla manterrà la sua posizione all'interno dell'Università anche dopo la morte di Maria Luigia, con l'arrivo dei Borboni, fino alla sua prematura scomparsa il 22 marzo 1857.

¹¹ ASPR, Presidenza dell'Interno, b. 48, s.d., protocollo del 20 giugno 1828.

¹² ASUPR, Divisione unica, b. 28, fasc. 2, cc. 123 e 124.

¹³ ASUPR, Divisione unica, b. 30, fasc. 3, c. 265.

¹⁴ ASUPR, Divisione unica, b. 31, fasc. 4, c. 54.

¹⁵ ASUPR, Divisione unica, b. 55, fasc. 2/19, documento compilato il 3 aprile 1844 dal Vice Preside del Magistrato degli studi.

¹⁶ ASUPR, Divisione unica, b. 38, fasc. 4, c. 132, del 26 maggio 1841

¹⁷ ASUPR, Divisione unica, b. 41, fasc. 5.

Lo studio delle comete ha sicuramente assorbito gran parte delle sue notti. I pochi strumenti che gli sono stati consegnati nel 1834¹⁸, sono stati implementati nel tempo e gli hanno permesso di partecipare alla corsa alla scoperta di nuove comete, riuscendo addirittura nel 1847 a vincere la medaglia d'oro che il re di Danimarca aveva posto come premio per lo scopritore di ogni nuova “cometa telescopica”¹⁹. Diverse sono le lettere che Colla scambia con il Professor H. C. Schumacher, responsabile scientifico di questa singolare competizione e gli articoli sulle comete, nel 1845 (Colla, 1845) e poi altri negli anni successivi (Colla, 1847) fino al 1847 quando gli verrà riconosciuta la scoperta della cometa ora nota con il nome C/1847J1, cometa di Colla. La scoperta e le caratteristiche di questa cometa sono oggetto di numerose lettere scambiate con Santini, Bianchi, Littrow e con Le Verrier, che sottoporrà la cometa all'Accademia delle Scienze a Parigi nell'adunanza del 20 settembre 1847 (Le Verrier, 1847) e nell'anno successivo darà lettura del lavoro svolto da E. Gautier proprio sulla cometa di Colla (Gautier, 1848).



Fig. 2. Immagine di A. Colla conservata tra i materiali dell'Osservatorio meteorologico di Parma. Non sono state trovate altre immagini che lo ritraggano. Tra le mani ha un opuscolo di cui non si scorge il titolo, la grafica del frontespizio sembra del tipo di quelli stampati dall'università.

¹⁸ ASUPR, Divisione unica, b. 55, fasc. 2/13.

¹⁹ ASUPR, Volume del 1845, lettera n. 46.

3. Antonio Colla come *comunicatore*

Colla associa all'intensa attività di osservatore del cielo una altrettanto intensa e vasta produzione di comunicazioni scientifiche di vario tipo. Sicuramente la corrispondenza personale con scienziati ed astronomi è particolarmente curata e ne sono testimonianza le oltre 1900 lettere che ha ricevuto (Colombi, Perazzo, 2017). Sono numerosi anche gli articoli scientifici pubblicati a cura della Parmense Università, ma anche a cura della *Gazzetta Priv. di Milano* (Colla, 1842), della *Rivista Ligure* (Colla, 1843) e della *Raccolta Fisico-chimica Italiana* (Colla, 1847). Sicuramente la produzione più ampia è rivolta alla cittadinanza di Parma. Tralasciando i bollettini di osservazioni giornaliere a cui era tenuto come direttore dell'Osservatorio, possiamo raggruppare la sua produzione in tre blocchi. Il primo è legato al quotidiano locale, la "Gazzetta di Parma" su cui ha iniziato a scrivere all'età di venti anni ed ha continuato per tutta la vita a mandare informazioni scientifiche legate soprattutto alla meteorologia e alla astronomia segnalando osservazioni significative, passaggi cometari, eclissi e scoperte di nuovi pianeti. Il secondo è la pubblicazione del *Giornale Astronomico*²⁰, una sorta di riflessione scientifica sul tempo passato con in appendice osservazioni astronomiche, fisiche e meteorologiche, nato dalla necessità di rendere utili le osservazioni compiute nell'anno precedente cercando di renderle, con aggiunta di fatti interessanti e significativi, anche piacevoli al lettore. L'intento divulgativo è evidente, i termini astronomici vengono spiegati con cura e la trattazione della prima parte con le previsioni di eclissi e le posizioni dei pianeti per l'anno successivo è comprensibile al lettore colto, mentre alcuni articoli o descrizioni di eventi astronomici risultano meno accessibili. L'ultima tipologia di pubblicazione è il *Solitario Parmigiano* (Colombi, Magrini, 2013), un piccolo opuscolo, si potrebbe dire un lunario con uscita annuale, che racchiude le più svariate informazioni soprattutto di carattere meteorologico e astronomico. *Il Solitario Parmigiano – attento contemplatore delle stelle e del corso de' pianeti ossia il vero calendario astrometeorologico* vede la sua prima uscita nell'anno bisestile 1836 e non è firmato. Si tratta di una opera divulgativa che associa a notizie scientifiche informazioni varie e anche rimedi e ricette. L'uscita successiva è del 1840 e contiene il discorso astrometeorologico dell'anno, le eclissi di Sole e di Luna, l'ora del crepuscolo, del nascere e tramontare del Sole, l'ora dell'Ave Maria ma anche la tariffa dei posti sulla diligenza per le varie tratte. Nell'anno 1841 un avvertimento al lettore spiega che l'autore, ancora sconosciuto, decide di continuare nell'impresa per il grande successo avuto nell'anno precedente. Si afferma anche che il 1840 è stato il primo numero del *Solitario*; tale affermazione può fare pensare che il numero del 1836 sia da riferirsi ad altro autore, anche se in ambito locale non sono presenti altri scienziati con le competenze di Colla, oppure che Colla non voglia riconoscere la paternità della primissima prova. Nel 1841 tratta anche dei temporali:

... e uno meteorologico attorno ai temporali, nel quale trovasi una breve istruzione sulla costruzione dei parafulmini e indicate alcune avvertenze da aversi dalle persone

²⁰ La prima pubblicazione risale al 1830. *Giornale astronomico ad uso comune di Antonio Colla*, Parma, per Giuseppe Pagano, MDCCCXXX.

che trovansi in casa o per via in occasione dei temporali fulminanti. (Solitario Parmigiano, 1841)

La fortuna dell'opuscolo forse è anche nel mescolare notizie di diverso tipo, curiosità e applicazioni pratiche come le informazioni per la costruzione di un parafulmine. Nel 1846 si svela l'autore; l'opuscolo inizia parlando delle osservazioni cometary e a p. 6 si tradisce dicendo: "la terza cometa da me scoperta" e l'articolo è firmato con le iniziali, P.A.C.. Finalmente nel 1854, nella prima pagina l'avviso al lettore è firmato dal Prof. A. Colla.

La fortuna dell'opuscolo è stata tanto grande che dopo la morte di Colla *Il Solitario* continuerà ad uscire e l'autore sarà un non ben identificato "Vecchio della montagna".

4. Un nuovo Osservatorio meteorologico alle Terme di Tabiano

Un avvenimento eccezionale nel settembre 1837²¹; Sua maestà la Principessa Imperiale Maria Luigia, Duchessa di Parma, Piacenza e Guastalla si reca in visita a Tabiano, una località nota per la presenza di sorgenti di acque sulfuree dette "acque puzze". Agli inizi dell'anno successivo iniziano le indagini sulle acque della sorgente ai piedi del colle Pergoli, l'acquisto dei terreni e la donazione agli Ospizi Civili di Borgo San Donnino (ora Fidenza) assegnando al Dott. Lorenzo Berzieri²² la direzione medica dello Stabilimento Balneare.

Il carteggio tra Berzieri e Colla mette in luce la creazione di un nuovo Osservatorio presso lo Stabilimento di Tabiano. Berzieri ringrazia per gli strumenti fisici ricevuti²³, che permetteranno di praticare le osservazioni meteorologiche; la lista dettagliata²⁴ della strumentazione è redatta dall'Ispettore responsabile Gian Maria Cremonini:

1. Barometro a fondo mobile alla Fortin costruito dal meccanico Ulisse Fioruzzi di Piacenza e di proprietà del Sig. ingegnere Gioacchino Ferrari di Parma
2. Lente di 5 ½ di diametro
3. Termometro a mercurio con divisione reomuriana
4. Un termometro d'immersione di Bellani
5. Un igrometro a capello tipo Saussure con un termometro a mercurio a bulbo con divisione centigrada

Tra Colla e Berzieri si instaura una intensa collaborazione, i materiali sono appena arrivati e già iniziano le misure per determinare l'altezza sul livello del mare dello "stabilimento balneare di Tabiano", dedotta da osservazioni barometriche e termometriche fatte contemporaneamente allo stabilimento e nella Regia Università di Parma. Le misure proseguono dal 11 luglio al 10 settembre 1853, alle ore 9 antimeri-

²¹ Gazzetta di Pama, sabato 23 settembre 1837, n. 76.

²² Lorenzo Berzieri (1806-1888), medico. Per primo utilizzo le acque termali di Tabiano per scopi curativi, e fu direttore del nuovo istituto termale.

²³ ASPR, Carteggio Colla, anni 1853-53, lettera di L. Berzieri del 13 luglio 1853.

²⁴ ASPR, Carteggio Colla, anni 1853-54, lista dei materiali ad opera di Gian Maria Cremonini, il 12 luglio 1853.

diane, alle ore 3 pomeridiane e alle ore 9 della sera²⁵, nella specola lavorano Colla e il suo allievo P. Pigorini, che gli succederà.

6. Conclusioni

La breve trattazione, basata su ricerche archivistiche, ci consegna la ricostruzione delle vicende personali e scientifiche di Antonio Colla, osservatore astro meteorologico, nonché le attività da lui svolte nella specola dell'Università di Parma. Viene così delineandosi la figura di un appassionato osservatore del cielo, più incline alla pratica che non agli studi, e quella di un attento comunicatore, che attraverso diversi registri espositivi riesce a raggiungere e coinvolgere la cittadinanza di Parma.

Emerge anche la figura di uno scienziato inserito nel dibattito culturale del tempo, che collabora a progetti europei e nello stesso tempo si impegna su problematiche locali connesse alla costruzione di un nuovo stabilimento termale.

Bibliografia

- Autore ignoto (1841). *Il solitario Parmigiano – attento contemplatore delle stelle e del corso dei pianeti ossia il vero calendario astro-meteorologico per l'anno 1841*. Parma: Tipografia Ferrari.
- Baruzzi M. (1933). *L'Osservatorio Meteorologico della R. Università di Parma*, in *Ottavo Rapporto Annuale dell'Osservatorio Meteorologico della R. Università di Parma*. Parma: Tip. Godi.
- Colla A. (1844). "Agitazioni straordinarie dell'ago magnetico di declinazione - Osservate nella Ducale specola di Parma nel giorno 18 aprile 1842". *Gazzetta Priv. di Milano*, 5 luglio 1842, pp. 1-8.
- Colla A. (1843). "Aurora boreale, perturbazioni magnetiche, bolidi ed aeroliti". *Rivista Ligure*, Parma, 11 agosto 1843, pp. 1-4.
- Colla A. (1845). *Cenni sopra le quattro comete telescopiche apparse nel principio dell'anno MDCCCXLV*. Parma: Tipografia Ducale.
- Colla A. (1847). *Cenni sopra le otto comete telescopiche apparse nell'anno 1846*, IN *Raccolta fisico-chimico-italiana*, Vol. II, fasc. 1. Venezia: nell'I. R. Privil. Stab. Nazionale di G. Antonelli Ed., pp. 1-28
- Colombi E., Magrini S. (2013). *Cometographia Palatina, stelle erranti nei libri della Biblioteca Palatina di Parma*, Anversa A. M. (a cura di). Parma: MUP Editore.
- Colombi E. (2014). "Macedonio Melloni between physical and political commitment". *Il Nuovo Cimento C*, 37(4), pp. 285-303.
- Colombi E. (2015). *Pietro Cossali e il cielo visto da Parma*, in *Archivio storico per le province parmensi*, LXVI. Parma: Tipografie Riunite Donati.

²⁵ ASPR, Carteggio Colla, 1853.

- Colombi E., Perazzo M. G. (2017). *Antonio Colla – Carteggio dei corrispondenti*, Fonti e Studi, Serie prima XXI, Deputazione di Storia Patria per le Province Parmensi. Parma: Graphital Edizioni.
- Comi A. (1998). *Jacopo da Belgrado e la specola dello Studium parmense*, in *Archivio storico delle province parmensi*, XLIX. Parma: Tipografie Riunite Donati.
- Gautier E. (1848). “Determination de l’orbite de la comète de M. Colla, d’après l’ensemble des observations faites depuis le mois de Mai jusqu’au mois de Décembre 1847” (Présenté par M. Le Verrier). *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l’Académie des sciences*, 26. Paris: Bachelier Imprimeur-Libraire, pp. 45-48.
- Le Verrier U. J. J. (1847). “Lettre de M. Le Verrier contenant l’extrait d’une lettre de M. De Littrow sur les observations récentes de la comète de M. Colla [...]”. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l’Académie des sciences*, 26. Paris: Bachelier Imprimeur-Libraire, pp. 428-430.
- Rossi B. (1933). *Note storiche sull’Osservatorio Astronomico della R. Università di Parma*. Parma: Tipografie Riunite Donati.

Proving the false. Method and logic of Giovanni Battista Riccioli

Flavia Marcacci – Pontifical Lateran University – flaviamarcacci@gmail.com

Abstract: Seventeenth-century astronomy was working hard searching for the correct world-system before Newton. The big amount of telescopic data and observations, unimaginable earlier, were insufficient to prove that Copernicus was right. The same data and observations are used by the Jesuit Riccioli (1598-1671) to develop a geo-heliocentric system, an alternative to the heliocentrism. His system was “false” but obtained by means of a valid methodological system. So, he could qualify his own world-system *hypotheses* as “*absoluta*”: no other world-system was preferable. Why, if he declared also that the physical causes are inconstant, and it is difficult to provide general laws? First, astronomy is able to propose many well-founded hypotheses, because the experimental data give the base of every theory. Second, Riccioli organizes a strictly deductive astronomical system, which allows him to evaluate errors and differences among all the hypotheses. Third, he can choose the best hypothesis, that is the epicepicles (*epicepicycli*) system.

In this talk, we go into the terminological and conceptual background of the Jesuit astronomer (*argumenta, conclusiones, corollaria, definitiones, errores, exempla, hypotheses, hypotheses absolutas, methodo investigandi, modi, opiniones, probationes, problemata, propositiones, scholia*) to understand his methodology and logic.

References

- Heidelberg, M. and G. Schieman (eds.). 2009. *The Significance of the Hypothetical in the Natural Sciences*, Berlin-New York: W. De Gruyter.
- Marcacci, Flavia. 2018. *Cieli in contraddizione. Giovanni Battista riccioli e il terzo sistema del mondo*. Perugia-Modena: Aguaplano-Accademia delle Scienze lettere e arti di Modena.
- Marcacci, Flavia. 2019. Lo statuto dell’astronomia e il metodo delle ipotesi secondo Giovanni Battista Riccioli. *Syzethesis* (1), 9-24.
- Riccioli, Giovanni Battista. 1651. *Almagestum novum*. Bononiae: Ex Typographia Haeredis Victorij Benatij.

Un archivio virtuale per la corrispondenza di Annibale de Gasparis

Paolo Palma – Unione Astrofili Napoletani – paojut@live.it
Mauro Gargano – INAF, Osservatorio Astronomico di Capodimonte – mauro.gargano@inaf.it

Abstract: Annibale de Gasparis, a mathematician and astronomer from Abruzzo, was born two hundred years ago. Director of the Capodimonte Observatory for 25 years and senator of the Kingdom of Italy from 1861, de Gasparis was famous above all for his 9 discovered asteroids. He also played an important role into the mathematical developments related to celestial mechanics. Moreover, his scientific reputation went beyond the boundaries of astronomy, in fact he became also famous in the popular newspapers and humorous magazines of the time. His correspondence with scientists, politicians, and men of culture of his time is scattered in many Italian and European archives. The richness and relevance of these letters is evident from the work developed by the authors, who have created a virtual archive of Annibale de Gasparis' correspondence which, so far, has more than 460 letters exchanged with over 120 correspondents, including Herschel, Le Verrier, Airy, Secchi, and Sella. The study of these documents provides a wider summary of de Gasparis' relationships and scientific interests. Reading these letters it is possible to reconstruct the atmosphere of those years in more detail and, finally, to get a clearer view of de Gasparis's human sensitivity.

Keywords: Historical archives, Italian Astronomers, Asteroids.

1. Annibale de Gasparis, il misuratore del cielo

Tra le gole del fiume Sagittario, nell'Appennino abruzzese, nasceva a Bugnara nel 1819 Annibale de Gasparis, il matematico e astronomo che dalle cupole di Capodimonte arricchì il cielo con nuove scoperte. Egli era giunto a Napoli nel 1838 per frequentare la Scuola di Ponti e Strade; qui studiò geometria e analisi differenziale con Francesco Paolo Tucci (1790-1875) e Salvatore de Angelis (1789-1850), promotori di una scuola di tipo analitico-lagrangiano che si contrapponeva alla "Scuola sintetica" di Nicola Fergola (1753-1824), Felice Giannattasio (1759-1849) e Vincenzo Flauti (1782-1863) (Mancini 1892). Attratto dall'astronomia e apprezzato da Ernesto Capocci (1798-1864), direttore della specola napoletana, per la sua attitudine verso le matematiche, nel 1840 de Gasparis cominciò a frequentare l'Osservatorio di Capodimonte e dall'ottobre 1841 fu inquadrato come Alunno della Specola. Egli stabilì un rapporto di grande stima e amicizia con Ca-

pocci e la sua famiglia, animati dagli stessi sentimenti politici e dagli stessi interessi culturali. In Osservatorio si dedicò da subito agli studi di matematica e di meccanica celeste. Nel 1845 presentò al VII Congresso degli scienziati italiani una tavola per la risoluzione delle equazioni cubiche, ottenendo grande apprezzamento. L'anno successivo pubblicò una memoria sulla misura dell'orbita di Vesta e nel 1847 illustrò un lavoro sulle equazioni differenziali che richiamò l'attenzione di Cauchy a Parigi e che indusse gli accademici napoletani a chiedere al Re di accordargli la "laurea gratuita in Matematiche" che de Gasparis ottenne nel settembre dello stesso anno (Rendiconto 1847, p. 256 e 423).



Fig. 1. *Strenna di Tocco Casauria*, 1881. La cittadina abruzzese è stata la patria di Annibale de Gasparis, del pittore Francesco Paolo Michetti (1851-1929) e di Beniamino Toro, il farmacista creatore dell'amaro Centerbe (Cianci 1955).

Gli approfonditi studi in meccanica celeste, l'individuazione di semplici soluzioni per accordare le formule analitiche ai dati osservativi, nonché una paziente perseveranza nelle osservazioni astronomiche, fecero di Annibale de Gasparis un prolifico scopritore di asteroidi. Confidando nelle potenzialità tecniche di un telescopio del 1814, l'equatoriale di Reichenbach-Uttschneider con un obiettivo di soli 8,3 cm e con una focale di 120 cm tutt'altro che all'avanguardia a metà Ottocento (Gargano 2009), de Gasparis scoprì tra il 1849 e il 1865 ben nove asteroidi, al pari di un altro astronomo, John Russell Hind (1823-1895). Questi, però, nella specola privata di George Bishop nel Regent's Park di Londra, aveva a disposizione un telescopio di Dollond del 1836 con un obiettivo di 17,8 cm e una lunghezza focale di 327 (Howard-Duff), telescopio che nel 1878 fu donato dal figlio di Bishop all'Osservatorio di Capodimonte e alla cura di Annibale de Gasparis. I due astronomi condivisero, poi, la decima scoperta, l'asteroide *Irene*, scovato nel maggio 1851 prima da Hind e quattro giorni dopo dall'astronomo di Capodimonte (De Ritis 1852, pp. XVIII-XIX). Così commentava le conquiste celesti di Hind e de Gasparis il linceo e professore di fisica all'Università di Roma Salvatore Proja (1800-1871):

Si racconta che gli Ateniesi innalzarono ad Anassagora una statua per aver insegnato che i cieli erano di cristallo, e la luna un corpo splendente per metà: risum teneatis amici! Cosa avrebbero fatto per l'Hind e il De Gasparis, non io lo so). (Proja 1853).

La lunga sequenza di scoperte era cominciata il 12 aprile 1849 con l'asteroide *Hygiea*, quarantotto anni dopo la "Cerere Ferdinanda" di Piazzi. "Mentre attendeva a collazionare le stelline non registrate nelle carte componenti l'ora XII delle famose zone di Berlino, ebbe la suprema contentezza di scoprire il suo primo pianeta" (Mancini 1892, p. 47). Nel 1850 de Gasparis scoprì *Parthenope* ed *Egeria*; nel 1851 *Eunomia* e poi nel 1852 *Psyche* e *Massalia* seguiti da *Themis* nel 1853. L'impressionante sequenza fece esclamare a Giuseppe Bianchi (1791-1866), direttore della specola ducale di Modena, che il cielo di Napoli "per opera sua direbbesi quasi il prediletto giardino delle asteroidi" (Bianchi 1851, p. 310). Queste scoperte gli consentirono di meritare la stima dei più grandi scienziati dell'epoca, tra essi i francesi François Arago (1786-1853) e Urbain Le Verrier (1811-1877), il tedesco Heinrich Christian Schumacher (1780-1850) e l'inglese John Herschel (1792-1871), il quale, in occasione della scoperta di *Parthenope*, gli aveva augurato "di ben presto cingersi il crine di una triplice planetaria corona" (Del Re 1850). Dopo *Themis* l'investigazione del cielo da parte di de Gasparis si fermò. A causa del freddo e dell'umidità delle notti di Capodimonte, nonché per gli sforzi fisici nell'esplorare il cosmo, de Gasparis fu colpito da una forte infiammazione all'occhio sinistro che lo costrinse a interrompere qualsivoglia attività osservativa. Le scoperte ottenute fino a quell'epoca gli valsero numerosi riconoscimenti nazionali e internazionali. Nel 1851 ottenne la medaglia d'oro della Royal Astronomical Society, il secondo astronomo italiano su un totale di cinque che a tutt'oggi l'hanno ricevuta. De Gasparis è stato l'unico astronomo a essere premiato dall'Académie des Sciences di Parigi per cinque anni consecutivi, dal 1849 al 1853, con il Prix d'Astronomie, meglio noto come Premio Lalande. Nel 1854 Guglielmo di Prussia gli conferì il cavalierato dell'Aquila Rossa mentre l'imperatore del Brasile Pedro II, nel 1872, il titolo di cavaliere dell'Ordine imperiale della Rosa (Bianchi 2012, p. 5). In patria, nel 1851 l'Università di Napoli gli affidò la cattedra di astronomia, l'Accademia delle Scienze di Napoli gli tributò, nel 1852, il Premio in Astronomia Trascendente (Breve notizia 1852), mentre all'Osservatorio di Capodimonte continuò a essere Alunno fino al 1855, una posizione da precario ante litteram (de Gasparis 1855).

Per i successivi sette anni de Gasparis si dedicò quasi esclusivamente agli studi teorici di meccanica celeste sia per il calcolo delle orbite, sia per dare una soluzione al problema dei tre corpi. Inoltre, approfondì il tema del Problema di Keplero, ovvero il calcolo puntuale dell'anomalia eccentrica di un corpo celeste nella sua orbita attorno al Sole, computo che risultava di difficile e incerta soluzione per le orbite delle comete e degli asteroidi. Nel 1867 pubblicò un lavoro sulle funzioni trascendenti che gli valse nel 1881 i complimenti di Charles Hermite per l'eleganza e la semplicità di calcolo (Cianci 1955, p. 24 e 98).

Condividendo con Ernesto Capocci interessi scientifici e ideali liberali, de Gasparis già nel 1848 aveva partecipato ai moti napoletani del 27 gennaio: "I più animosi patrioti formarono il primo nucleo di dimostrazione. Erano tra questi in prima linea: Domenico Morelli, Saverio Altamura, Oscar Capocci con i suoi fratelli... Annibale de Gasparis [i quali] tirata fuori la coccarda tricolore, [gridarono]: Viva la Costituzione, viva la libertà!" (Anile 1910). Forse le sorti occorse a Capocci e Antonio Nobile (1794-1863), defe-

nestrati dai loro uffici, consigliarono a de Gasparis una esposizione pubblica defilata (Capaccioli 2009, p. 146-147). Francesco De Sanctis non mancò di stigmatizzare l'atteggiamento apparso ambiguo di Annibale de Gasparis, affermando: *“Alla filosofia non credo più, e mi sono fatto astronomo. De Gasparis l'ha indovinata: cavaliere, professore, e quattrini assai. Parliamo delle stelle, e lasciamo stare la terra”* (De Sanctis 1858, p. 370). Con l'unità d'Italia Capocci ottenne da Garibaldi la reintegrazione alla direzione dell'Osservatorio e insieme a de Gasparis fu nominato Senatore del Regno (Gargano 2011, p. 14). All'apertura del parlamento l'astronomo napoletano arrivò a Torino con una nuova scoperta planetaria: *Ausonia* (Gargano 2012). Infine, al 1865 risale la sua ultima scoperta, *Beatrix*, l'asteroide dedicato a Dante Alighieri.

Divenuto direttore della Specola di Capodimonte nel 1864, de Gasparis rivolse ogni sforzo al potenziamento dell'Osservatorio, senza trascurare i lavori teorici di matematica e meccanica celeste; inoltre diede nuovo impulso alle misure meteorologiche e geomagnetiche (de Gasparis 1884). Benché fosse un meccanico celeste puro, allargò gli orizzonti scientifici della Specola verso gli studi astrofisici delle stelle, sostenendo la fondazione della Società degli Spettroscopisti Italiani, la prima società scientifica dedicata alla nuova scienza (Chinnici 2008). Nel 1862 l'azione politica di Capocci e de Gasparis aveva persuaso il ministro della Pubblica Istruzione De Sanctis a destinare a Capodimonte i fondi necessari per l'acquisto di nuova strumentazione. Il primo telescopio “italiano”, un equatoriale di G&S Merz con obiettivo di 13,5 cm di apertura e una focale di 220 cm, arrivò a Napoli nel settembre 1863 per poi essere alloggiato nella cupola est agli inizi del 1865 (Gargano 2017, pp. 116-122). Il rinnovamento della strumentazione proseguì durante gli anni di direzione dell'Osservatorio. Nel 1869 de Gasparis riuscì a ottenere i finanziamenti per l'acquisto di un nuovo cerchio meridiano, dall'apertura di 165 cm e dalla focale di 202 cm, che commissionò alla ditta Repsold di Amburgo (Gargano 2017, pp. 128-130). Inoltre in sede parlamentare si spese non poco affinché l'aula di Palazzo Madama approvasse i fondi necessari all'acquisto di un telescopio equatoriale per l'Osservatorio di Brera e gli studi su Marte di Giovanni Virginio Schiaparelli (1835-1910). De Sanctis lodò l'astronomo di Capodimonte per aver tenuto un discorso così alto che gli sembrava - disse - di sentire la musica delle stelle di cui aveva parlato Pitagora e per aver trasformato la discussione su un progetto di legge in una festa scientifica:

Egli, vecchio astronomo, famoso già per antiche scoperte, non imitando i tempi tristi d'Italia... ha dato un nobile spettacolo pigliando sotto il suo patrocinio il giovane Schiaparelli... e gli ha detto: l'Italia non è abbastanza ricca per dare a te ed a me un telescopio che possa pareggiare quelli di cui si servono i popoli civili. Ebbene, abbi tu, giovane valoroso ... abbi tu e illustra l'Italia con nuove scoperte. (Taddei 1878)

I segni di paralisi progressiva lo indussero ad abbandonare ogni incarico pubblico nel 1889 ritirandosi in una villetta di campagna non lontana dal suo Osservatorio (Il professor de Gasparis 1889). Il giorno dopo la sua morte avvenuta il 21 marzo 1892, il presidente del Senato, Domenico Farini, rese omaggio ad Annibale de Gasparis, *“all'eleto suo ingegno, ai suoi calcoli sublimi... alla mente sua, mirabilmente adatta per le più astruse speculazioni, [allo] scienziato abituato ad appuntare in alto lo sguardo e l'intelletto”* (Farini 1892).

2. L'archivio virtuale della corrispondenza de Gasparis

L'archivio storico dell'Osservatorio di Capodimonte conserva un nucleo di lettere di Annibale de Gasparis, inventariato come Corrispondenza, Personale e Strumenti, che conta 32 documenti; un corpo di lettere piccolo che limita fortemente la comprensione della vita scientifica dell'astronomo. Attraverso il nostro studio di ricerca, però, l'archivio si è dimostrato essere un contenitore più ampio di corrispondenza. Da altri fondi archivistici sono emerse, infatti, altre lettere fino a poter contare circa 108 documenti epistolari. In particolare, nei faldoni relativi ai Conti e all'Amministrazione è stato rinvenuto un cospicuo corpo documentale mai analizzato in precedenza: per un certo numero di anni de Gasparis ha avuto la consuetudine di utilizzare il retro delle lettere per altro uso. La consultazione di questo materiale permette solo in parte di apprezzare l'insieme delle relazioni e degli interessi scientifici dell'astronomo durante una carriera di studi e scoperte lunga cinquant'anni. Al fine di comprendere la molteplicità delle relazioni di de Gasparis con gli astronomi italiani e stranieri, abbiamo esteso lo studio ricognitivo e catalografico del materiale documentario ad altre istituzioni nazionali ed estere. Il lavoro di riordino e inventariazione degli archivi storici degli Osservatori italiani (Mandrino 2007), nonché la creazione di una piattaforma digitale per l'accesso ai fondi archivistici ha consentito un'agevole identificazione di gran parte della corrispondenza dell'astronomo. Il lavoro di ricostruzione storica, fin qui realizzato, per la creazione di un archivio virtuale ha consentito di identificare circa 460 lettere, scambiate con oltre 120 corrispondenti, distribuite in circa 40 istituzioni archivistiche italiane e straniere. Tra gli archivi italiani che conservano un buon numero di lettere di de Gasparis ricordiamo la Pontificia Università Gregoriana, 39 lettere indirizzate ad Angelo Secchi (1818-1878), e gli osservatori di Roma (36), Brera (30), Palermo (29), Padova (18) e Arcetri (14). In Europa gli archivi che preservano un significativo numero di documenti dell'astronomo si trovano ad Amburgo (43), Parigi (20) e Londra (12). Inoltre, sono state censite le lettere stampate su riviste e giornali, in particolare la corrispondenza scientifica con i direttori dell'Astronomische Nachrichten (22), e quelle avute in copia dagli eredi dello scienziato (12).

Il criterio seguito per l'indicizzazione delle lettere è stato quello di considerare la corrispondenza scientifica e personale di Annibale de Gasparis e non il ragguardevole corpo di lettere e corrispondenza di ufficio, ben venticinque anni di direzione dell'Osservatorio sulla collina di Miradois. Ogni lettera è stata descritta indicando la data, il destinatario, il luogo di produzione e l'ente conservatore. È stato stilato un regesto, con una breve sintesi del contenuto della lettera, e sono stati elencati e indicizzati i nomi dei personaggi e dei luoghi citati. In molti casi i record catalografici sono corredati da una copia digitale della lettera; mentre in altri casi è stata riprodotta una trascrizione del documento. Tutti i materiali sono stati registrati sulla piattaforma digitale dell'Istituto Nazionale di Astrofisica con un software gestionale per la catalogazione della documentazione secondo gli standard per la descrizione archivistica (ISAD) approvati dal Ministero competente. Infine, l'archivio virtuale della "Corrispondenza Annibale de Gasparis" è consultabile in diverse forme su "Polvere di Stelle", il portale dell'INAF per il patrimonio storico-culturale dell'astronomia (www.beniculturali.inaf.it/archivi/napoli/#corrispondenza-annibale-de-gasparis).

3. Il contenuto delle lettere

Lo studio dell'intero corpo di corrispondenza, che siamo riusciti a ricomporre finora, permette di chiarire quali fossero le relazioni e gli interessi scientifici di de Gasparis, fornisce ulteriori tracce sulla sensibilità umana che caratterizzava il suo animo e consente di ricostruire in modo più dettagliato l'atmosfera degli anni delle scoperte astronomiche fatte a Napoli. Circa il 40% del *corpus* documentale ha come tema proprio le scoperte asteroidali. Ciò non può non stupire se si considera che nei 48 anni che intercorrono tra *Cere* e *Hygiea* furono scoperti solamente otto asteroidi, mentre Annibale de Gasparis ne scoprì otto (considerando anche *Irene*) in soli cinque anni. La sua fama crebbe anche tra i letterati che gli dedicarono numerosi componimenti poetici e tra la gente comune. Delle scoperte e della fama di de Gasparis si scriveva sul «Giornale del Regno delle due Sicilie» e sui giornali umoristici dell'epoca, come «Arlecchino», «Il lampione» e «Il palazzo di cristallo». Innumerevoli articoli testimoniano la sua popolarità: «De Gasparis ha trovato un pianeta in fondo alla sua calza» (Il palazzo di cristallo 1856, p. 154). Ritroviamo de Gasparis nell'elogio della zeppola: «*Tu sei, o zeppola, una scoperta patria come la bussola, la camera oscura, la Cerere e i sette pianeti di de Gasparis*» (Il palazzo di cristallo 1856, pp. 285-286), nei commenti per la costruzione di nuove strade ferrate: «*De Gasparis avrà il passaggio franco, col patto di scoprire dall'osservatorio della luna qualche pianeta da scriverarsi per prima donna a S. Carlo*» (Il palazzo di cristallo 1856, p. 114); o ancora tra le cose da fare a Napoli: «*12.° Abbattere il Museo per fare che da Toledo si veggia comodamente il cannocchiale di de Gasparis*» (Il palazzo di cristallo 1856, p. 126).

Se la lettura di queste riviste fa assaporare l'atmosfera che si respirava nella capitale borbonica negli anni delle scoperte di de Gasparis, la corrispondenza getta luce su molteplici circostanze della vita dell'astronomo. Lo studio delle lettere consente di identificare quattro principali argomenti di corrispondenza: le osservazioni e le scoperte astronomiche, il potenziamento strumentale dell'Osservatorio, gli studi di meccanica celeste e le lettere familiari.

Dallo studio delle lettere emerge sia l'interesse di de Gasparis per la nuova strumentazione utile al progresso della ricerca astronomica, sia la meticolosità con cui seguiva la costruzione degli apparati. All'alba dell'indagine astrofisica, ad esempio, de Gasparis decise di dotare il suo Osservatorio degli opportuni strumenti per l'analisi spettrale delle stelle. Si rivolse, quindi, a Giovan Battista Donati (1826-1873), direttore della Specola di Firenze, che per primo aveva usato uno spettroscopio per l'analisi della tenue luce di una cometa e che insieme al meccanico Giuseppe Poggiali (1820-1892) era tra i migliori costruttori di spettroscopi in Italia (Bianchi 2016). De Gasparis gli scrisse chiedendo di fare «*acquisto del prezioso apparato [e di] essere iniziato alle osservazioni collo spettroscopio*» (de Gasparis 1865). Il carteggio, poi, con la ditta Repsold evidenzia una ricchezza di dettagli per la miglior progettazione e realizzazione di ogni parte del nuovo cerchio meridiano acquistato sia con i fondi ministeriali, sia con il sostegno economico del Comune di Napoli a cui de Gasparis aveva indirizzato un accorato appello firmato dagli astronomi di Capodimonte (Sulle condizioni... 1869).

Un altro corpo di carte riguarda i suoi studi di meccanica celeste che lo portarono anche a ricoprire per gli anni 1862-1863, 1874 e 1881-1882 la presidenza della Facoltà di Scienze matematiche dell'Università di Napoli (Gatto 2000). Scrupoloso e attento, Annibale de Gasparis sviluppò raffinate formule per il calcolo dei parametri orbitali di pianeti, asteroidi e comete, meritando l'elogio di Hermite per gli studi sulla «*functio inexplica-*

bilis” e giovandosi del plauso di Wilhelm Klinkerfues (1827-1884), allievo e assistente di Gauss a Gottinga, per i suoi lavori sulla soluzione del Problema di Keplero. Commentando i giudizi dell’astronomo tedesco, de Gasparis scrisse di esserne talmente fiero che “*avrebbe donato volentieri 5 dei miei pianeti pur di ottenerlo!*” (Mancini 1892; de Gasparis 1871).

Le lettere astronomiche offrono numerosi dettagli sulle tecniche osservative, sulle scoperte e sulle relazioni con gli altri astronomi. Quando nel 1849 de Gasparis scoprì il primo asteroide, Herschel gli suggerì di dedicarlo alla sirena Parthenope in onore della sua città, ma Capocci aveva già scelto *Hygiea*, la dea della salute (de Gasparis 1849). Così con la scoperta del secondo asteroide l’11 maggio 1850, de Gasparis scrisse a Herschel per raccogliere la sua proposta: “*Vi devo confessare di essere in debito con il desiderio di realizzare una Parthenope nel cielo*” (de Gasparis 1850a). La lettera che inviò a Schumacher testimonia la soddisfazione per aver corrisposto agli auspici dell’astronomo inglese: “*Ho fatto tutti i miei sforzi per realizzare una Parthenope celeste per il sig. Herschel*” (de Gasparis 1850b). Quando poi nel 1851 Hind e de Gasparis scoprirono *Irene*, l’astronomo di Capodimonte scrisse all’amico d’oltremania sottolineando l’insolita simultaneità che “*arricchisce la scienza di un fatto unico nel suo genere*” (de Gasparis 1851).

Nella corrispondenza con l’astronomo olandese Frederik Kaiser (1808-1872) e con lo scienziato tedesco Alexander von Humboldt (1769-1856) de Gasparis descrisse con dovizia di dettagli i metodi usati per la scoperta dei nuovi astri: circa 130 notti l’anno passate a confrontare le mappe stellari in una zona di circa 30° quadrati a cavallo dell’eclittica. Grazie a tali osservazioni sistematiche, de Gasparis era riuscito a scoprire i nuovi asteroidi e a “riscoprire” quelli già conosciuti pur non essendone alla ricerca (de Gasparis 1852a). Inoltre, affermava di ritenere le zone più esterne del sistema solare ricche di pianeti e di lavorare duramente e incessantemente nella speranza “*di trovare un nuovo pianeta oltre Nettuno*” (de Gasparis 1852a); un pensiero che dinanzi all’Accademia delle Scienze di Napoli ebbe a definire un “*chiodo fisso*” (de Gasparis 1853b). Nella notte del 5 aprile 1853 pensava di esserci riuscito e scrivendo ad Angelo Secchi affermò di aver osservato un puntino luminoso che ipotizzava poter essere o un pianeta lontano, come Urano e Nettuno, oppure una stella variabile (de Gasparis 1853a). Oggetti, questi ultimi, che osservava con molta attenzione prendendone regolarmente nota, come scrisse a Kaiser nel giugno 1850 (de Gasparis 1850c). Le osservazioni “matte e disperate” indussero de Gasparis anche a prendere alcuni abbagli. L’8 dicembre 1851 confuse Giapeto con un nuovo astro, mentre la sera del 22 luglio 1864 non riuscì a comprendere come la macchia nera osservata su Giove altro non fosse che l’ombra di Ganimede sul pianeta (de Gasparis 1864).

Uomo dalla “*piccola statura che ho, ed [dalla] barba che porto quasi interamente*”, Annibale de Gasparis appare dalle poche lettere scambiate con il padre, i fratelli, la moglie e i figli, come un uomo affettuoso e molto legato alla famiglia, nonché riservato e discreto riguardo ai suoi pensieri. Anche nelle situazioni più tese non si lasciava andare a commenti o giudizi sopra le righe. In occasione della scoperta di *Massalia* nel 1852, rivendicata da Benjamin Valz (1787-1867), direttore dell’Osservatorio di Marsiglia, che si era espresso pubblicamente contro l’astronomo di Capodimonte, de Gasparis sottolineò di non voler alimentare alcuna polemica, preferendo “*godere perennemente d’una tranquilla pace dell’anima*”. In questa lettera a Secchi, molto intima e delicata, riflette anche sul suo modo di vivere, “*raccolto nella mia famigliola in cui, con cui e per cui vivo, non mi*

prendo affattissimo impaccio de' fatti altrui (fossero anche persone d'intensa conoscenza o parentela)" (de Gasparis 1852b). Le più belle parole scritte dall'astronomo sono certamente quelle che si trovano in una lettera che non parla né di asteroidi, né di matematica, bensì di amicizia e di amore. Era il 1848 e Oscarre Capocci (1825-1904) confidava al fraterno amico di essere combattuto dal fervore patriottico, che l'incitava a partire per il Lombardo-Veneto dove "*o mi sarò munito di gloria, o sarò rimasto steso sul campo*" (Capocci 1848), e dall'amore per Amalia, figlia del botanico tedesco Friedrich Dehnhardt (1787-1870). Deciso a seguire i fratelli e l'amore per la Patria, Oscarre confidò all'amico Annibale i suoi più intimi sentimenti di amicizia e di amore. Dopo gli abbracci e le lacrime, a de Gasparis spettò il difficile compito di comunicare ad Amalia la tempesta di sentimenti che attraversava Oscarre. La lettera che scrisse è di una delicatezza e dolcezza estreme:

[...] ei baciava, e baciava una piccola medaglietta e piangevamo insieme... È indicibile quanto amore, e quanta pietà egli risentisse nel fare il solenne saluto a voi, che forse nel vederlo allontanare, improvvida ed amorosa volgevate in mente la gioia del rivederlo il dì seguente! (de Gasparis 1848)

Il lavoro di ricerca e studio della corrispondenza di Annibale de Gasparis continuerà ad alimentare l'archivio virtuale al fine di approfondire il profilo scientifico e umano dell'astronomo, perché "*quando de Gasparis inalbera il terribile cannocchiale il firmamento trema e i pianeti si presentano essi stessi innanzi alle sue lenti*" (Il palazzo di cristallo 1856, p. 558).

Ringraziamenti

Il lavoro di ricerca e digitalizzazione delle lettere di Annibale de Gasparis non avrebbe prodotto la stessa mole di dati e non ci avrebbe permesso di conoscere molti dettagli della vita scientifica e familiare dell'astronomo senza l'aiuto di tanti colleghi e studiosi che ci hanno offerto la loro generosa assistenza: Gudrun Wolfschmidt (Amburgo); Elizabeth Garver (Austin); Stephan Fölske, Sigrid Krause ed Everardus Overgaauw (Berlino); Pasquale Tucci (Biella); Frank Bowles, Mirko Curti e Kathryn McKee (Cambridge); Caoimhe Ní Ghormáin (Dublino); Simone Bianchi, Daniele Galli e Antonella Gasperini (Firenze); Liliana Bertuzzi (Genova); Bärbel Mund (Göttingen); Jan Cramer (Leiden); Julie Carrington, Fiona Keates, Yoshika, Ferlier Louisiane, Sian Prosser e Amelia Walker (Londra); Agnese Mandrino (Milano); Nadia De Lutio ed Erica Vecchio (Modena); Emma Cavotti (Napoli); Valeria Zanini (Padova); Donata Randazzo (Palermo); Karim Benslama, Piercarlo Bonifacio, Elodie Delcambre-Maillard e Isabelle Maurin-Joffree (Parigi); Maria Grazia Perazzo (Parma); Michael P. Miller (Philadelphia); Maddalena Taglioli e Luigi Ambrosio (Pisa); Regina Berlepsch (Potsdam); Paola Cagiano de Azevedo, Fabrizio Alberti, Marco Ferrucci e Antonella Grandolini (Roma); Sean Rippington (St. Andrews); Mikaela Bernardoni (Siena); Elena Borgi (Torino); Tara Craig (Washington).

Bibliografia

- Anile A. (1910). *Oscar Capocci*, in *Atti dell'Accademia Pontaniana*, XL(2).
- Bianchi G. (1851). “Confronto dell'annua pioggia caduta in Roma e a Perugia con quella caduta in Modena”. *Annali di scienze matematiche e fisiche*, 2, pp. 308-311.
- Bianchi S. (2012). “Un imperatore ad Arcetri”. *Giornale di Astronomia*, 38(2), pp. 2-12.
- Bianchi S., Galli D., Gasperini A. (2016), *Le origini dell'astrofisica a Firenze*, in Chinnici I. (ed.), *Starlight*. Napoli: Arte'm, pp. 15-33.
- Breve notizia del premio conferito al sig. D. Annibale de Gasparis* (1852), *Rendiconto della reale accademia delle scienze*, n.s., 1, pp. 100-102.
- Capaccioli M., Longo G., Olostro Cirella E. (2009). *L'astronomia a Napoli dal Settecento ai giorni nostri*. Napoli: Guida Editori.
- Capocci O. (1848). *Lettera ad Angelo Giliberti*, in *Il Vapore*, I(54).
- Chinnici I. (2008). “The Società degli Spettroscopisti: birth and evolution”. *Annals of Science*, 65(3), pp. 393-438.
- Cianci C. (a cura di) (1955). *Annibale De Gasparis celebre astronomo e matematico abruzzese (1819-1892)*. Roma: Tip. Artistica A. Nardini.
- de Gasparis A. (1883). *Sullo stato del R. Osservatorio di Capodimonte e suoi lavori in esso eseguiti dal 1819 al 1883*. Napoli: Tipografia dell'Accademia reale delle Scienze.
- Del Re L. (1850). *Lettera a Filippo Scrugli, 14 giugno*, in *Giornale del Regno delle Due Sicilie*, n. 129, p. 514.
- De Ritis V. (1852). “Cenno de. lavori accademici e dell'azione governativa ne' reali domini continentali”. *Annali Civili del Regno delle Due Sicilie*, 46, pp. XIII-LXXII.
- De Sanctis F. (1858). “Schopenhauer e Leopardi”. *Rivista contemporanea*, 15, pp. 369-408.
- Farini D. (1892). *Commemorazione del senatore Annibale De Gasparis*, in *Atti parlamentari della Camera dei Senatori. Discussioni*, 1(22 marzo - 20 giugno), p. 2642.
- Fergola E. (1892). *Necrologio*, in *Rendiconti dell'Accademia delle Scienze di Napoli*, 6, pp. 65-66.
- Gargano M., Zanini V. (2009). *Telescopio equatoriale (Macchina parallattica)*, in Chinnici I. (ed.), *Astrum 2009*. Roma: Sillabe, p. 174.
- Gargano M. (2011). “Ausonia: il pianetino dell'Unità d'Italia”. *Giornale di Astronomia*, 37(4), pp. 10-20.
- Gargano M. (2012). “Annibale de Gasparis”. *Polvere di stelle*, <<https://bit.ly/39gBmTV>> [data di accesso: 06/06/2020].
- Gargano M. (2017). *On the collection of Merz instruments at the Naples Observatory*, in Chinnici I. (ed.), *Merz telescope*. Cham: Springer, p. 115-136.
- Gatto R. (2000). *Storia di una «anomalia». La Facoltà di scienze dell'Università di Napoli tra l'Unità d'Italia e la riforma Gentile (1860-1923)*. Napoli: Fridericiana editrice universitaria.
- Howard-Duff I. (1985). “George Bishop (1785-1861) and his South-Villa Observatory in Regent's-Park”. *Journal of the British Astronomical Association*, 96(1), pp. 20-26.
- Il Palazzo di Cristallo* (1856), I.
- Il professor de Gasparis* (1889). *Corriere di Napoli*, 18(233), 22-23 agosto.

- Mancini, C. (1892). *Annibale de Gasparis*, in *Atti dell'Accademia Pontaniana*, XXII, *Commemorazioni*, pp. 37-62.
- Mandrino A., Randazzo D., Schiavone L. (2007). *Specola 2000*, in Ricketts S., Birdie C., Isaksson E. (eds), *Common challenges, uncommon solutions*, San Francisco, Astronomical Society of Pacific, pp. 361-368.
- Proja S. (1853). "Storia dei nuovi pianeti dal 1801 al 1851". *L'album*, XIX(2), pp. 13-14. *Rendiconto delle adunanze e de' lavori della Reale accademia delle Scienze* (1847), VI.
- Taddei E. (1878). "Una festa scientifica in Senato". *L'illustrazione scientifica*, V(30), pp. 58-59.

Fonti archivistiche

- de Gasparis A. (1848). Lettera ad Amalia Dehnhardt, 4 aprile, Eredi Cassizzi de Gennaro, *Archivio privato*.
- de Gasparis A. (1849). Lettera a Ernesto Capocci, 8 maggio, Archivio di Stato di Napoli, *Ministero Pubblica Istruzione*. F. 428, f. 3.
- de Gasparis A. (1850a). Lettera a John Herschel, 13 maggio, Royal Society, *HS*, 8.
- de Gasparis A. (1850b). Lettera a Heinrich Schumacher, 13 maggio, Staatsbibliothek zu Berlin, *Nachl. Heinrich Christian Schumacher*.
- de Gasparis A. (1850c). Lettera a Frederik Kaiser, 25 giugno, Universiteit Leiden, *AFA FC FK*, 47.
- de Gasparis A. (1851). Lettera a John Russel Hind, 16 giugno, Royal Astronomical Society, *MSS Hind.*, B. 1, f. 2.
- de Gasparis A. (1852a). Lettera ad Angelo Secchi, 18 ottobre, Pontificia Università Gregoriana, *Secchi Angelo. Corrispondenza scientifica*.
- de Gasparis A. (1852b). Lettera ad Alexander von Humboldt, 23 marzo, Staatsbibliothek zu Berlin, *Alexander von Humboldt*, B. 8.
- de Gasparis A. (1853a). Lettera ad Angelo Secchi, 8 aprile, Pontificia Università Gregoriana, *Secchi Angelo. Corrispondenza scientifica*.
- de Gasparis A. (1853b). Lettera a Vincenzo Flauti, [aprile], *Rendiconto della Società reale borbonica. Accademia delle scienze*, n.s., II, pp. 72-76.
- de Gasparis A. (1855). Lettera a Francesco Sforza, 16 maggio, Archivio di Stato di Napoli, *Ministero Pubblica Istruzione*. F. 429, f. 1.
- de Gasparis A. (1864). Lettera a Urbain Leverrier, 23 luglio, Institut de France, *Ms 3711*
- de Gasparis A. (1865). Lettera a Giovan Battista Donati, 28 novembre, Biblioteca nazionale di Firenze, *Carteggi Vari*, 298.
- de Gasparis A. (1871). Lettera a Wilhelm Klinkerfues, 9 aprile, Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen, *Cod. Ms. Klinkerfues 91*.
- Kaiser F. (1850). Lettera ad A. de Gasparis, 3 giugno, Universiteit Leiden, *AFA FC FK* 47.
- Sulle condizioni della R. Specola di Capodimonte* (1869), Osservatorio Astronomico di Capodimonte, *Amministrazione. Relazioni*, B. 1, f. 1.

L'eredità scientifica e culturale di Giuseppe Toaldo, a 300 anni dalla nascita

Valeria Zanini – INAF – Osservatorio Astronomico di Padova – valeria.zanini@inaf.it

Abstract: One of the most important credits of Giuseppe Toaldo (1719-1797), first Director of the Astronomical Observatory of Padua, is undoubtedly the transformation of the main tower of the Old Castle of the city into *Specola*. The new scientific cabinet became operational between 1776 and 1777 and here the Paduan astronomy finally got in step with the technologies of that time.

The new Observatory was also a perfect place for educating a wider audience to know the science of the sky and its history. Even today, in fact, the full-figure images painted on the walls of the upper observatory allow us to capture, in a single glance, the evolution of astronomy from antiquity to the eighteenth century. Toaldo is regarded as being one of the founding fathers of the modern scientific meteorology. He collected and compiled several meteorological series, just preserved at the OAPd historical archive, precious material even today for researchers from all over the world.

The recent Historical Archive inventory reordering, now available online, and a first digitalization of the oldest material, have finally made the Toaldo cultural legacy, just 300 years after his birth, accessible.

Keywords: Padua Observatory, Astronomy, Meteorological Archive.

1. Giuseppe Toaldo e la fabbrica della Specola

L'11 luglio 2019 sono trascorsi 300 anni dalla nascita di Giuseppe Toaldo, fondatore e primo direttore dell'Osservatorio Astronomico di Padova. Era doveroso non far passare sotto silenzio quest'anniversario, anche se un importante convegno tenutosi a Padova nel 1997, nell'occasione dei duecento anni dalla morte, ne ha già messa ben in luce la figura scientifica, producendo un corposo volume di 'Atti' che è divenuto riferimento fondamentale per ogni studio toaldiano (Pigatto 2000).

Toaldo¹ nacque dunque a Pianezze di Marostica (VI) l'11 luglio 1719, figlio di Giovanni Battista e di Elena Barbieri. Intraprese gli studi sacerdotali nel Seminario Vescovile di Padova, dalla cui diocesi dipendeva Marostica, conseguendo la laurea in teologia nel 1742 e la consacrazione a sacerdote l'anno successivo; in un secondo tempo

¹ Per un'ampia e approfondita analisi della figura umana e scientifica di Giuseppe Toaldo si veda: Pigatto 2000, pp. 5-100 e Casellati, Sitran Rea 2002, 101-122.

cominciò a frequentare le lezioni di matematica tenute dall'abate Giuseppe Suzzi² all'Università di Padova, dando così seguito a una formazione scientifica che già aveva avviato in maniera autonoma sin dagli anni della sua educazione seminariale. Nel 1744 curò la stampa delle *Opere* di Galileo (Toaldo 1744), ottenendo di inserirvi, per la prima volta in Italia dalla messa all'Indice, anche il *Dialogo dei Massimi Sistemi*, corredato delle postille scritte a mano dallo stesso Galileo nella copia posseduta dalla biblioteca del Seminario Vescovile di Padova. Nel 1752 fu nominato arciprete a Montegalda, piccola comunità agricola in territorio vicentino; qui, nei ritagli di tempo dall'attività pastorale, approfondì lo studio dei filosofi antichi e delle opere di Bacone, Cartesio, Leibniz, Newton e iniziò a cimentarsi con lo studio e l'osservazione degli eventi meteorologici, stimolato in questo dalle necessità quotidiane della sua comunità.

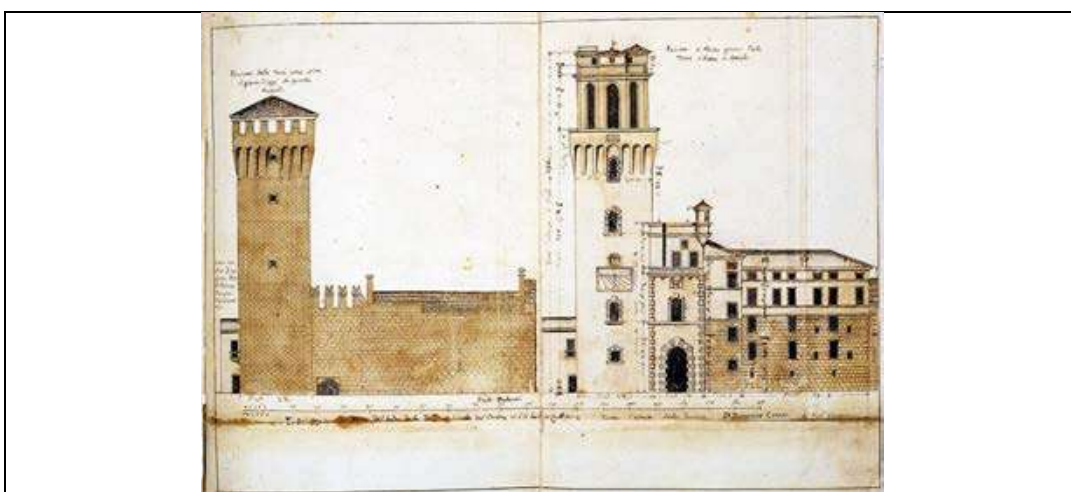


Fig. 1. Il progetto originale per la trasformazione della torre maggiore del Castelvecchio di Padova in Osservatorio Astronomico, firmato dall'architetto Domenico Cerato.

Nel 1764 fu chiamato a ricoprire la cattedra di Astronomia e meteore presso l'Università di Padova, in sostituzione dell'abate Gian Alberto Colombo,³ e in tale veste fu incaricato di sovrintendere alla fabbrica dell'Osservatorio astronomico, la cui costruzione era stata deliberata ancora nel 1761 con Decreto del Senato Veneto. Fu lui a scegliere la torre maggiore del Castelvecchio della città, da tempo in disuso, quale lu-

² Giuseppe Suzzi (1701-1764), matematico. Nel 1722 seguì a Padova i corsi privati di analisi matematica di Iacopo Riccati, incentrati sulle equazioni differenziali e negli anni successivi diede alle stampe alcuni lavori di geometria e di analisi. Nel 1744 gli fu assegnata la cattedra di Filosofia ordinaria a Padova, dove tenne corsi formalmente ancora aristotelici, ma nei quali dava ampio spazio alla meccanica generale e a tematiche cosmologiche, trasformando di fatto la cattedra in un insegnamento di fisica moderna (Casellati, Sitran Rea 2002, pp. 183-188).

³ Gian Alberto Colombo (1708-1777), fisico. Nel 1746 gli fu affidata all'Università di Padova la cattedra di Astronomia e meteore, poi denominata di Astronomia, geografia e meteore. Sin dal 1749 si fece interprete, presso le autorità della Serenissima, della necessità di dotare gli studi patavini di un osservatorio astronomico, ma le sue petizioni trovarono risposta solamente oltre un decennio più tardi, quando con decreto senatoriale del 2 maggio 1761 fu approvata l'erezione della Specola (Casellati, Sitran Rea 2002, pp. 85-99).

go ideale per l'erigenda Specola, e a chiamare l'architetto Domenico Cerato⁴ da Vicenza, suo compagno di studi al Seminario, per dar seguito al progetto. Sostanzialmente, si trattava di realizzare ex-novo due sale osservative: una denominata 'osservatorio inferiore', addossata alla parete est della torre, a un'altezza di 16 metri, e l'altra chiamata 'osservatorio superiore', sopra le merlature, a 35 metri d'altezza (Fig. 1). Nell'osservatorio inferiore, più noto come 'sala meridiana', si misurava il mezzogiorno locale e si osservava il transito delle stelle al meridiano celeste. L'osservatorio superiore, dotato di sei grandi finestroni, era invece destinato a osservazioni in ogni direzione del cielo. Al di sopra di questo, infine, furono realizzati anche tre cupolini minori: il primo dava accesso a una piccola terrazzina, il secondo era destinato ad accogliere la *macchina parallattica*⁵ mentre l'ultimo era stato pensato per ospitare un sestante.

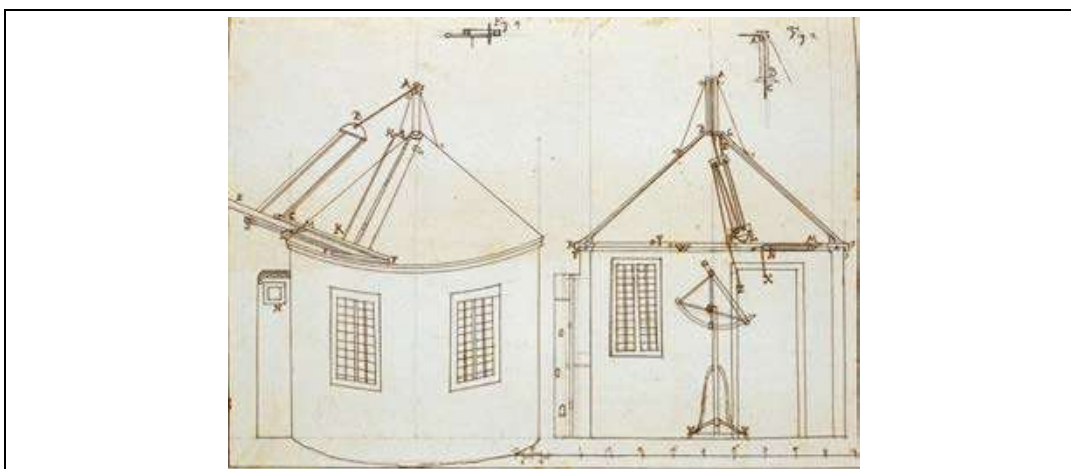


Fig. 2. Il progetto del cupolino per il sestante, riprodotto in uno dei disegni che si conservano nell'Archivio Storico dell'Osservatorio di Padova, all'interno dell'*Album Cerato* (ASOPd, Archivio Antico, *Disegni della Specola di Padova*).

La documentazione sopravvissuta fino a noi, relativa alla progettazione ed esecuzione originale di questi cupolini, che furono interamente rinnovati nella seconda metà dell'800, è molto scarna, ma sappiamo che Giambattista Rodella⁶, il meccanico della

⁴ Domenico Cerato (1715-1792), architetto. Adottato dal conte Francesco Cerato Loschi, studiò prima presso il seminario di Vicenza, poi presso quello di Padova, sviluppando un interesse per l'architettura. Dal 1749 è attivo come architetto a Vicenza e provincia, e negli anni successivi a Padova. Tra le sue opere, oltre alla Specola: il progetto del Seminario maggiore, quello per la trasformazione di Prato della Valle e il nuovo Ospedale civile di Padova (Casellati, Sitran Rea 2002, pp. 45-64).

⁵ La macchina equatoriale, o parallattica, serviva per osservare gli astri al di fuori del meridiano celeste (operazione per la quale si usavano invece i quadranti o cerchi murali e gli strumenti dei passaggi) e per seguirli nel loro moto da oriente a occidente lungo un parallelo. Per questo motivo essa doveva essere collocata in luoghi sopraelevati rispetto al resto dell'osservatorio, in modo che fosse possibile volgere lo sguardo in ogni direzione del cielo.

⁶ Giambattista Rodella (1749-1834). Fu assunto nel 1779 da Toaldo con l'incarico di custode e meccanico per la Specola ma prestava la sua opera anche per il gabinetto di Fisica sperimentale. Nel 1794, ottenuto il titolo di meccanico dell'Accademia di Padova, accompagnò il procuratore di S. Marco Alvise Pisani in un viaggio in Inghilterra, per vedere alcune macchine che la Serenissima pensava di introdurre nel Polesine. In tale occasione ebbe modo di visitare anche l'Osservatorio di Greenwich (Casellati, Sitran Rea 2002, pp. 699-712).

Specola, aveva costruito per l'ambiente della macchina parallattica un «coperto di lastra di rame cilindrico» e che questa cupola era «munita di quei stessi movimenti che [egli osservò] un anno dopo nella cupola della Paralattica dell'Osservatorio di Greenwich». ⁷ Probabilmente il «movimento» cui fa riferimento Rodella è quello a carrucole che egli ripropose anche per il cupolino del sestante (Fig. 2). Una tale cupola, assolutamente innovativa per l'epoca, era certamente stata realizzata grazie alla proficua collaborazione che si era instaurata tra l'astronomo, che possedeva il necessario *know-how* scientifico per l'ideazione, e il suo meccanico.

2. La 'sala delle figure' del nuovo Osservatorio

La costruzione dell'Osservatorio, nato come gabinetto scientifico dell'Università di Padova, fu avviata nel 1767 e terminò dieci anni più tardi, nel 1777. La nuova Specola, nelle intenzioni di Toaldo, doveva certamente essere il luogo ove l'astronomia accademica padovana poteva finalmente trovare adeguato spazio per svolgersi al passo con le conoscenze e le tecnologie del tempo, ma doveva anche divenire un luogo privilegiato per trasmettere nozioni didattiche e storiche della scienza a un pubblico ben più vasto. Proprio con questa finalità Toaldo affidò al pittore vicentino Giacomo Ciesa (1733-1822) l'incarico di affrescare le pareti e la volta dell'osservatorio superiore - che da allora in poi sarebbe stato denominato 'sala delle figure' - con una serie d'immagini inerenti l'astronomia: sulla volta «la fascia dello Zodiaco colle figure dei suoi dodici segni, e colle stelle che a questi appartengono: al di sopra il sistema di Copernico espresso per mezzo delle favole, ed attorno i muri inferiormente [...] questi otto celebri astronomi: Tolomeo, Copernico, Ticone, Galilei, Keplero, Newton, Montanari e Poleni» (Diario 1788, p. 74).

Nei primi decenni di vita dell'Osservatorio questi affreschi troneggiavano nella sala, richiamando l'ammirazione degli occasionali visitatori che raggiungevano la sommità della torre. ⁸ Purtroppo, in seguito ai danni causati da infiltrazioni d'acqua provenienti dalla terrazza sovrastante, a metà '800 gli affreschi erano già profondamente danneggiati e così la sala fu completamente ridipinta con dei nuovi soggetti. Si scelse, però, di decorare con delle nuove raffigurazioni solamente la volta, ⁹ mentre le figure alle pareti furono ricoperte da una pittura a tempera che simulava un effetto di finto marmo. Solo nel 1998 i grandi ritratti a grandezza naturale, interamente restaurati, sono stati restituiti

⁷ Archivio Storico dell'Osservatorio Astronomico di Padova (ASOPd), Archivio Antico, Atti, Officina Meccanica della Specola, «Giovan Battista Rodella», *Lettera all'Abate Francesconi*, s.d., b. XXVII, fasc. 1.

⁸ La bellezza delle pitture era lodata anche nelle guide padovane dell'epoca; Giovanbattista Rossetti, nella sua *Descrizione delle Pitture, Sculture ed Architetture di Padova*, scrive: «Nè passar voglio sotto silenzio le pitture a fresco dell'Osservatorio principale, ideate dal mentovato Sig. Ab. Professor Toaldo, e dipinte dal Sig. Giacomo Ciesa vicentino. Consistono queste nella Fascia del zodiaco co suoi dodici segni. Al di sopra evvi il sistema di Copernico. Vi sono eziandio dipinti di grandezza al naturale otto dei più celebri Astronomi, cioè Tolomeo, Copernico, Ticone, Galileo, Keplero, Newton, Montanari, e Poleni» (Rossetti 1780, p. 313).

⁹ Giovanni Santini (1787-1877), terzo direttore dell'Osservatorio, decise che la volta fosse ridipinta con una serie di cerchi concentrici di stelle su sfondo azzurro. Tutto attorno furono dipinte, in medaglioni, le effigi di sedici celebri astronomi e matematici: Ipparco, Tolomeo, Copernico, Galileo, Keplero, Cassini, Newton, Maraldi, Bradley, Herschel, Lagrange, Laplace, Bessel, Gauss, Piazzi, Oriani.

alla vista di chi raggiunge la cima della Specola, mentre la volta Settecentesca si può considerare ormai irrimediabilmente perduta sotto il rifacimento ottocentesco.

L'intera composizione della sala era stata pensata e voluta dal Toaldo, il quale sopra gli otto scienziati fece rappresentare anche, in chiaroscuro monocromatico, scene e figure tratte dalla mitologia greca e latina, il cui significato simbolico è strettamente correlato al personaggio sottostante. Una recente tesi di laurea (Zarantonello 2017) ha messo in luce la portata didattica e commemorativa del complesso di questi dipinti: ogni ritratto racconta, infatti, un momento storico particolare nell'evoluzione dell'astronomia, ma è soprattutto interpretando unitariamente tutti gli affreschi che si comprende lo sviluppo della conoscenza astronomica attraverso la Storia. E la lettura si svolge su due livelli: da un lato c'è l'ascolto del dialogo figurativo compiuto da ciascun personaggio con il riquadro mitologico di sua competenza, e dall'altro c'è l'interpretazione specifica di alcuni dettagli iconografici in ciascun ritratto. Era dunque la sala nella sua interezza che doveva trasmettere nozioni fondamentali della scienza astronomica e in questa direzione andavano anche i dipinti perduti della volta, con la rappresentazione dei segni zodiacali e del sistema copernicano.

Il visitatore che giungeva in Osservatorio e che s'impegnava a salire gli oltre 200 gradini che conducono all'alto della torre, terminava la sua fatica immergendosi in un ambiente dotato di una comunicazione figurativa a 360°, tanto più efficace quanto più l'ospite era supportato da conoscenze scientifiche e classiche. Egli poteva così apprezzare sia l'opera artistica del Ciesà, che proprio in quegli anni stava vivendo il suo periodo migliore, sia individuare a colpo d'occhio le tappe salienti dello sviluppo dell'astronomia attraverso i secoli, da un punto di vista teorico ma anche da un punto di vista tecnologico, come testimoniano ad esempio il cannocchiale di Galileo da un lato e di fronte quello di Montanari. I rimandi alla mitologia permettevano inoltre un aggancio con la cultura letteraria che permeava ancora fortemente il sapere del Settecento.

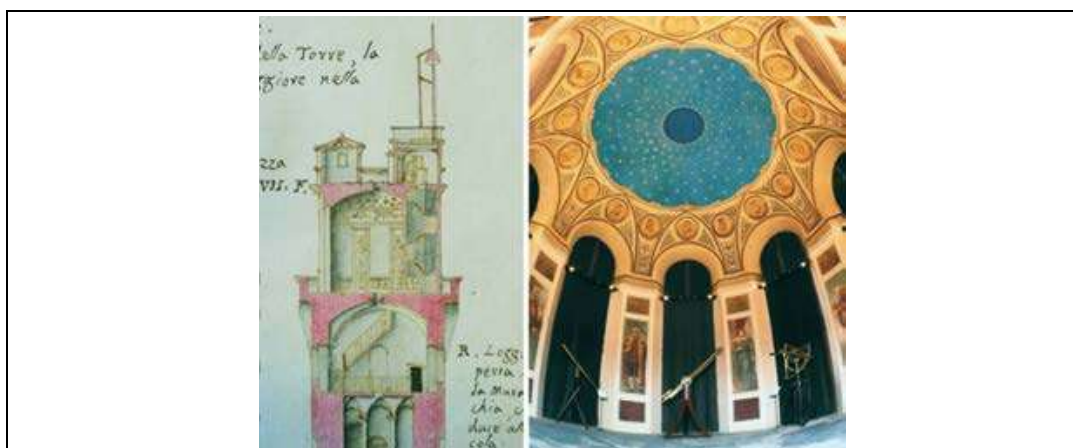


Fig. 3. A sinistra: particolare di una delle Tavole del *Progetto di riduzione della Torlonga a Specola* (Biblioteca Civica di Padova, RIP XVII 1444 - Cerato Domenico, *Disegni della Specola*. Su gentile concessione del Comune di Padova), nella quale si vede l'abbozzo delle pitture previste in Sala delle Figure. A destra: l'aspetto della Sala oggi.

La ‘sala delle figure’, dunque, forniva una vera e propria immersione nella totalità delle conoscenze astronomiche del tempo e rappresentava un mirabile connubio tra architettura e pittura, costituendo in questo, peraltro, un *unicum* al mondo all’interno di un Osservatorio Astronomico. Purtroppo, l’intero livello di lettura è stato compromesso dalla perdita delle pitture superiori, che oggi ci rimangono solamente nel loro aspetto ottocentesco, anche se in realtà, è possibile farsi un’idea di come esse dovessero presentarsi grazie a una delle varie tavole che il Cerato e i suoi scolari della Scuola di Architettura produssero ad uso dei Senatori Veneti incaricati di valutare la bontà del progetto e finanziarlo di conseguenza. Nella copia custodita presso la Biblioteca Civica di Padova, infatti, uno dei disegni relativi allo spaccato ovest della torre rende visibile proprio gli abbozzi delle pitture previste in ‘sala delle figure’ (Fig. 3).

3. Toaldo, uno scienziato *illuminato*

Pienamente inserito nello spirito illuminista della sua epoca e conscio del ruolo sociale che la scienza doveva rivestire ai fini della ‘pubblica utilità’, Toaldo era attento e aperto a ogni ramo dello scibile umano, sapendone cogliere le novità fin dal loro primo apparire. Ad esempio, fu tra i primi in Italia a interessarsi ai lavori di Benjamin Franklin (1706-1790), divenendo uno strenuo promotore dell’installazione dei parafulmini negli edifici pubblici e privati, a tutela dell’incolumità di persone e cose. In particolare, per difendere il nuovo osservatorio al quale stava dedicando così tante energie, nel 1773 egli fece installare alla Specola il primo parafulmine pubblico del Dominio veneziano, cui seguirono quello del campanile di S. Marco a Venezia e l’ingabbiamento della torre di Palazzo Bo, sede dell’Università patavina. Proprio grazie a questi esempi e alle pressanti sollecitazioni del Toaldo, nel 1778 la Serenissima, emanò un decreto che stabiliva l’installazione del parafulmine in tutti gli edifici pubblici del suo territorio (Lepschy 1998). Il parafulmine, più volte restaurato,¹⁰ è sempre rimasto una delle principali caratteristiche distintive della Specola, ben riconoscibile anche in tutte le sue rappresentazioni iconografiche o fotografiche Sette e Ottocentesche.

Nel 1776, nella Specola ormai completata e dove il neo-direttore aveva trasferito la sua residenza sin dall’anno precedente, si poté finalmente dare avvio alle osservazioni astronomiche. In parallelo, Toaldo proseguì anche le osservazioni meteorologiche che aveva iniziato circa un decennio prima e grazie alle quali aveva ottenuto i dati che stanno alla base del suo *Saggio meteorologico* (Toaldo 1770), l’opera che segna la nascita della meteorologia moderna. Il principale campo d’interesse scientifico di Toaldo, infatti, fu la meteorologia sperimentale, una disciplina che sul finire del XVIII secolo era ancora alla ricerca «dei propri principi e dei propri metodi, oscillante - come ogni disciplina esordiente - sull’incerto discrimine tra scienza e pseudoscienza» (Pigatto 2000, p. XVI). In particolare l’astronomo marosticense, forte del nuovo corso che aveva intra-

¹⁰ Il restauro più recente risale al 2004. In tale occasione, a causa del ripetersi dell’intrusione di fulmini attraverso cavi elettrici datati e mai rimossi, fonte d’ingenti danni all’apparato elettrico e informatico dell’istituto, si scelse di difendere l’edificio tramite una gabbia di Faraday, integrando lo storico parafulmine nel nuovo impianto.

preso la scienza grazie al cosiddetto ‘metodo galileiano’, colse l’importanza che aveva una raccolta sistematica e accurata dei dati nel corso del tempo, per elaborare una qualsiasi teoria previsionale di tipo meteorologico. E fondamentale era, egli comprese, anche il confronto costante con le rilevazioni compiute da altri studiosi in altri luoghi, distanti nello spazio o nel tempo. Per questo egli si premunì di conservare come preziosi tesori tutti i dati di cui poteva entrare in possesso, acquisendo quindi i *Registri* delle osservazioni compiute a Padova da Giovanni Poleni¹¹ negli anni 1725-1764 e da Giambattista Morgagni¹² nel periodo 1740-1768, oltre alla serie bolognese di Jacopo Bartolomeo Beccari¹³ (anni 1716-1774). Inoltre istituì una fitta rete di corrispondenti meteorologici, sparsi su di un territorio che spaziava dalla Dalmazia fino a Genova, attraversando la Slovenia, tutto il Triveneto e parte del centro-Italia. Questa gran massa di dati, assieme alle osservazioni meteorologiche proseguite a Padova da Toaldo stesso e dai suoi successori fino a metà del XX secolo, è tutt’oggi conservata presso l’Archivio Storico dell’Osservatorio Astronomico di Padova.

3. La digitalizzazione dei *Registri Meteorologici*

Il riordino dell’Archivio Storico dell’Osservatorio di Padova, cominciato all’inizio degli anni 2000, è stato lungo e complesso e ancora non può dirsi compiuto. Tuttavia la gran parte del materiale è stata sistemata, soprattutto quella relativa alle osservazioni meteorologiche, che sempre più spesso sono richieste in consultazione da studiosi di tutto il mondo. Proprio per questo, contestualmente al riordino fisico, si è avviato anche un progetto di digitalizzazione dei *Registri meteorologici*, con lo scopo di rendere fruibile online tutta questa immensa mole di dati, che abbracciano un arco temporale di circa 300 anni. Grazie al contributo messo a disposizione dal Servizio Biblioteche Musei e Terza Missione dell’INAF attraverso il finanziamento del 5 per mille, si è scelto di cominciare le riproduzioni partendo dalle osservazioni padovane più antiche, e cioè quelle dei *Registri* di Poleni, Morgagni e Toaldo stesso. Si è quindi eseguita la digitalizzazione ad alta risoluzione di tutte le pagine e delle legature, per conservare completamente i contenuti informativi del materiale. Le immagini delle carte sono state acquisite a colori (*truecolor*) in modalità RGB a 24 bit, con una risoluzione ottica effettiva e non interpolata di 600 o 400 ppi in formato TIFF *truecolor* versione 6.0 non compresso. Una copia JPEG compressa a 100/150 dpi è stata poi destinata alla pubblicazione su *Polvere di Stelle*, il portale dei beni culturali astronomici italiani

¹¹ Giovanni Poleni (1683-1761), fisico e ingegnere. Nel 1739 ottenne a Padova la prima cattedra di Fisica sperimentale, per la quale costituì il ‘Teatro di Filosofia Sperimentale’, di fatto il primo laboratorio di fisica in una università italiana (Casellati, Sitran Rea 2002, pp. 203-225).

¹² Giambattista Morgagni (1682-1771), medico e anatomista. Nel 1711 ottenne la cattedra di Medicina teorica a Padova e nel 1715 quella di Anatomia. Conquistò grandissima fama per la sua arte didattica e compì innumerevoli osservazioni originali sulla struttura e sulla funzione di numerose formazioni anatomiche, gettando le basi dell’anatomia patologica (Casellati, Sitran Rea 2002, pp. 21-30).

¹³ Jacopo Bartolomeo Beccari (1682-1766), medico, chimico e naturalista. Insegnò Logica, Medicina, Fisica sperimentale e Chimica all’Università di Bologna. Oltre che all’attività didattica, s’interessò ad una vasta gamma di discipline connesse con la medicina, tra cui la meteorologia, in rapporto alle manifestazioni morbose a ricorrenza stagionale (Crespi, Gaudiano 1970).

(www.beniculturali.inaf.it), che raccoglie i database archivistici, bibliografici e strumentali di tutto il patrimonio culturale dell'INAF (Gargano et al. 2016). Attraverso *Polvere di Stelle*, nella pagina dedicata all'Archivio Storico dell'Osservatorio di Padova, è possibile consultare le serie qui conservate e, scorrendo nelle diverse sotto-serie fino ad arrivare al *Registro* d'interesse, oltre alle informazioni descrittive dell'unità archivistica in oggetto si trova anche la possibilità di consultare direttamente il materiale digitalizzato.

Aver reso accessibile e fruibile l'eredità culturale che Toaldo ci ha lasciato, ci è parso il miglior modo per celebrare l'anniversario dei 300 anni della sua nascita.

Bibliografia

- Casellati S., Sitran Rea L. (a cura di) (2002). *Professori e scienziati a Padova nel Settecento*, in *Contributi del Centro per la Storia dell'Università di Padova*, Profili Biografici 3. Treviso: Antiglia ed.
- Crespi M., Gaudiano A. (1970). *BECCARI, Iacopo Bartolomeo*, in *Dizionario Biografico degli Italiani*, Vol. 7. Roma: Istituto dell'Enciclopedia Italiana Treccani.
- Diario (1788). *Diario ossia giornale per l'anno bisestile 1788*. Padova: Conzatti St.
- Gargano M., Gasperini A., Cirella E.O., Smareglia R., Zanini V. (2016). *The AstroBID: Preserving and Sharing the Italian Astronomical Heritage*. In: Calvanese D., De Nart D., Tasso C. (eds), *Digital Libraries on the Move. IRCDL 2015*, «Communications in Computer and Information Science», v. 612, Cham, Springer.
- Lepschy A. (1998). *Giuseppe Toaldo e il parafulmine*. «Padova e il Suo Territorio», anno XIII, n. 76, pp. 16-18.
- Pigatto L. (2000). *Giuseppe Toaldo e il suo tempo, Nel bicentenario della morte, Scienza e Lumi tra Veneto ed Europa, Atti del Convegno, Padova 10-13 novembre 1997*, «Contributi per la storia dell'Università di Padova», 33, 1033. Cittadella: Bertinello Artigrafiche.
- Rossetti G. B. (1780). *Descrizione delle Pitture, Sculture ed Architetture di Padova*. Padova: Stamperia del Seminario.
- Toaldo G. (a cura di) (1744). *Opere di Galileo Galilei, divise in quattro tomi, in questa nuova edizione accresciute di molte cose inedite*. Padova: Stamperia del Seminario, appresso Gio. Manfrè.
- Toaldo G. (1770). *Della vera influenza degli astri, delle stagioni e mutazioni di tempo. Saggio meteorologico*. Padova: Tipografia del Seminario.
- Zarantonello L. (2017). *Gli affreschi della Sala delle Figure alla Specola: iconografia e scienza* (Tesi di Laurea magistrale in Astronomia). Università di Padova.

VENEZUELA: HISTORICAL PERSPECTIVES ON PHYSICS AND PHYSICISTS

The Advances of the Investigation of the History of Physics in Venezuela since the 18th century: Tracking Physics in Venezuela (1827-1961)

Yajaira Freites – Associated Researcher – Center for Science Studies, Venezuelan Institute of Scientific Research (IVIC) Venezuela

Abstract: In 2004 I published *Tracing Physics in Venezuela (1827-1961)* (Saber and Time, No. 18: 7-40); was the first product, based on secondary source, of the reconstruction project of the history of physics in Venezuela whose institutionalization was the most recent among the basic sciences. New data has been added to that tracking. A doctoral thesis (Balza) has given information on the teaching of physics as part of the academies of mathematics and engineering outside the walls, organized by officers of the Spanish army in Venezuela at the end of the XVIII. Others (Peñaloza Morillo) have contributed data on the late discussion (19th century) in the country of characters such as Galileo. In the field of astronomy, information emerged about the construction of the first observatory that the country had, the Cajigal in 1888, thanks also to a thesis of degree (Chacón). In the same way works on radioactivity have allowed to track since its introduction in 1896 to the facts related to atomic energy (Pacheco and Freites, Ruiz Calderón, Ascanio, Martín Landrove). The work in progress of Professor Álvarez Cornett allows to establish the contribution of foreigners to the first school of physics at the UCV through their biographies.

Alba of violations, twilight of rights in the convulsed Venezuela

Alberto Sotillo – Biblical Institute of Telaviv (Israel) & Margarita University (Venezuela) – ait-italia@libero.it

Abstract: The purpose of the presentation is to provide a view about the constant violation of human rights in the field of the right of education, public health; freedom of expression, access to the information and free thought and political identity. Control and manipulation of the food supply. Violation of the right to peaceful protest about socioeconomic problems; Situation against the human rights of the common and political prisoners. Explain the massive repression practice by this criminal enterprise that keep the power with support and foreign intervention.

References

- “Convención Americana sobre Derechos Humanos (Pacto de San José)”. *Convención Americana sobre Derechos Humanos (Pacto de San José)*. Consultado el 28 de mayo de 2018
- “Manual para los Representantes legales: Representación de víctimas ante la Corte Penal Internacional”. *Oficina Pública de Defensa de las Víctimas*. Consultado el 13 junio de 2018
- “Convención Americana sobre Derechos Humanos”. *Sistema Bibliotecario de la Suprema Corte de Justicia de la Nación*. Consultado el 27 de junio de 2018

Evolution of Nuclear Science in Venezuela

Rafael Martín-Landrove – Escuela de Física. Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela – rmartinlandrove@yahoo.es

Delfin Moronta – Escuela de Física. Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela – moronta22@yahoo.com

David Verrilli – Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela Caracas, Venezuela – davidverrilli@gmail.com

Abstract: Based on a careful review and analysis of the peer-reviewed publications *in extenso* as an important complement to standard documentation, the impact of major events on the evolution of the nuclear science in Venezuela can be studied with arbitrary detail. Due to space requirements, in this work a brief account of the main results is shown.

Keywords: Nuclear Science, IVIC, IVNIC, RV-1, AsoVAC, LOCTI.

1. Introduction

Venezuela is a country with a privileged geographic location since its shores are a natural boundary at the northern region of South America and therefore it is a prime gateway in a global communication network. In an area of 912050 km² it is possible to find a very broad range of environments, going from vast plains to a highly diverse and dense rain forests as well as very high mountains with snow and deserts with dunes. On economic grounds, in the eighteenth-century cacao was the main exportation product and it was displaced in that particular role by coffee in the following century. In that sense, the twentieth century actually arrived at its third decade with the beginning of crude oil exploitation and during World War II, Venezuela was the second world producer and the first world exporter¹. Then, important investments in education and infrastructure were made and in post-war times they paved the way for a new stage in the country's scientific development and certainly nuclear science was part of it. Before 1940 it is possible to find outstanding researchers², but it was during the second half of the twentieth century when the scientific development was boosted and sustained in such a way that in 1994 the total weight of government expenditure for all levels in education reached its

¹ This situation changed at post-war times when other countries were able to resume their production.

² Among others, Carlos del Pozo y Sucre (1743-1814, instrumentist in physical sciences), Vicente Gabriel Marcano Echenique (1848-1898, anthropologist and chemist who studied fermentation in fruits), José María Vargas Ponce (1786-1854, first ophthalmologist in Latin America who developed his own techniques), Alfredo Jahn Hartman (1867-1940, civil engineer, geographer and botanist), Henri François Pittier de Fabrega (1857-1950, geographer and botanist) and Rafael Rangel (1877-1909, histologist and bacteriologist who discovered the ancylostomiasis or hookworm disease).

historical maximum of 28.78% (World Bank). In war times any documentation related to nuclear science was handled as classified information with a highly restricted access. Just at the end of the war that situation changed when short-lived isotopes were obtained as a byproduct of fission processes in nuclear reactors related to the Manhattan Project, making them available worldwide for research purposes mainly applied to life sciences. As it is going to be reviewed and analyzed in the following sections, this kind of research based on applied nuclear science was a natural starting point between late 1940s and early 1950s for the inception of world class research on medicine in Venezuela and it became a successful attempt to address important health issues. In the following years, the cross-disciplinary nature of that subject matter led to a broader and transversal development of basic and applied nuclear science related to general science including physics. To support the assertions made along this work, a careful analysis of peer-reviewed publications *in extenso*³ was done. Not surprisingly, this analysis showed that this collection of articles contains information that goes far beyond the one which is related to the scientific or technical matters found in their contents. In a remarkable way, the evolution of relevant parameters reveals a correlation between major socioeconomic events and the performance of the scientific community related to nuclear science.

2. Evolution in numbers

2.1. *The Beginning as a Challenge*

The first parameter to be examined is the number of peer-reviewed publications *in extenso* per year from 1949 to 2019 as it is shown in Fig. 1 and it will provide a natural framework for a review and analysis of events. The information collection was accomplished in a reasonable time thanks to the access to three databases (Web of Science, Scopus and Google Scholar). The use of independent sources is of paramount importance to eliminate the inconsistencies that might appear among these databases. It was also very important to set a boundary for the data universe to be considered. Although in the first half of twentieth century radioactive isotopes were used in Venezuela for radiumtherapy or curietherapy (Pacheco, Freites 2012), the true arrival of nuclear science with a deeper understanding of underlying phenomena came in post-war times. This beginning posed a big challenge mainly because there were changes in paradigms and then they demanded promoters with a clear vision of future. Interestingly enough, at the middle of twentieth century, the visionaries needed for this enterprise emerged in a natural and precise way. It began in 1949 when Francisco Antonio de Venanzi di Novi (1917-1987) was the first physician in Venezuela to be trained in the use of radioactive isotopes for medical purposes in the University of California (Roche 1981)⁴. De Venanzi was always a believer in the need of science for human development in general and for the advancement in medicine as a cross-disciplinary playground. Then in Fig. 1 a first important spike can be seen at 1950 and it marks the

³ As the available hard evidence.

⁴ This effort paid back in 1951 with the creation under his leadership of a laboratory in the Central University of Venezuela (UCV).

beginning of the Venezuelan Association for Advancement in Science (AsoVAC) and *Acta Científica Venezolana* (ACV) as the related scientific journal, which were promoted by de Venanzi⁵. In that year and in the first volume of ACV, Humberto Avelino Fernández-Morán Villalobos (1924-1999)⁶, published an article with a proposal for the creation of an institute for brain research under a cross-disciplinary approach (Fernández-Morán 1950)⁷. Unfortunately, all these initiatives were immediately followed by a time of political unrest and the UCV, the main university of the country, was closed by a de facto government in 1952. It was certainly a setback which put on hold many developments but at the same time it led, in that very same year, to the creation of the Institute for Medical Research “Luis Roche” (IMLR) promoted by de Venanzi and Marcel Roche Dugand (1920-2003)⁸. The new institute was sponsored by the Luis Roche Foundation⁹. The members of this institution, joined by researchers in the Municipal Blood Bank in Caracas, took the lead in the national scientific forefront until its end in 1958. Their background in applied nuclear science led to the production of world class research in biomedicine related to endemic goiter, hookworm disease, nutrition, and the development of techniques for genetic analysis¹⁰. A milestone for a take-off of nuclear science research in Venezuela was an Oak Ridge summer course on isotopes (Oak Ridge 1952), where 96 seasoned researchers from all over the world were invited to stay for three months. Three Venezuelans received this special invitation: Roche, Fernández-Morán and Clemencia García Villasmil (1925-2000), who was the only one lady in the entire program. Clemencia and Lia Kohn de Merinfeld (1933-2015)¹¹, shaped the development of medical physics in the second half of the twentieth century. The correlation of our statistics with all these developments is shown in Fig. 1 where a significant positive slope can be seen between 1952 and 1957 and it was basically the combined result of the scientific activity mostly related to the Luis Roche Foundation, some that was left at UCV after its closing, which eventually led to the formal foundation of its Faculty of Science in 1955¹², and some activity of the Venezuelan Institute for Neurobiology and Brain Research (IVNIC), founded on April 29th of 1954 with the sponsorship of the government and under the leadership of Fernández-Morán. In 1955 a signed agreement between the governments of United States and Venezuela had as a main goal the

⁵ It was in fact a first huge step towards the inception of new careers for this new stage of scientific development in Venezuela.

⁶ A Venezuelan polymath with a broad and deep knowledge in medicine, biophysics and electron microscopy, trained in Germany, United States and Sweden. In 1952 he developed the cryo-ultramicrotomy.

⁷ Although this proposal properly addressed the point of a national need for dedicated scientific institutions with high standards, it also brought the attention of a dictatorial government in an urgent need for national and international prestige and four years later it became a reality.

⁸ Marcel Roche Dugand had been trained in the United States, first in biology and chemistry, and later as a physician in endocrinology and nuclear medicine.

⁹ Luis Roche, Marcel's father, was a renowned architect, diplomat and philanthropist

¹⁰ The Diego blood factor in mongoloid human populations in Asia or those of mongoloid ancestry in America, was discovered by Miguel Angel Layrisse Marrero (1919-2002) and Tulio Ramón Arends Wever (1918-1990) in 1956 (Junqueira, Castilho 2002). Layrisse was rector/president of UCV (1976-1980) and director of IVIC (1980-1984).

¹¹ They were trained and mentored by Edith Quimby (1949 & 1954), a worldwide renowned medical physicist.

¹² At least on paper and it was not in effect until 1958 with the end of the dictatorial government. Its development was especially boosted when Francisco de Venanzi became rector/president of UCV for the term 1959-1963.

construction of a nuclear reactor, known as RV-1, as a research facility at IVNIC (Bourne 1955; Roche 1981; Soyano, Müller 2018). There was no interaction with IMLR.

2.2. Growing pains: The valleys and hills along the twentieth century

In 1958, the year which marks simultaneously the end of the dictatorial government, the IVNIC, the Luis Roche Foundation and Fernández-Morán as director of IVNIC, there is a drop in productivity which reaches a bottom in 1960, as it can be seen in Fig. 1. It is a natural consequence of a transition process with many uncertainties. A commission was appointed by the new government to evaluate the situation of IVNIC and made recommendations about its fate and Roche became its new director on February 12th of 1958. Despite of his previous history of scientific work in isolation and his search for a self-exile, Fernández-Morán was appointed as a consultant in electron microscopy until 1962 (Soyano, Müller 2018). Upon these recommendations a new institution with a broader scientific scope, the Venezuelan Institute for Scientific Research (IVIC), was created on January 9th of 1959.¹³ Roche became its first director and the following year the nuclear reactor became operative (Roche 1981) until its final shutdown in 1991.

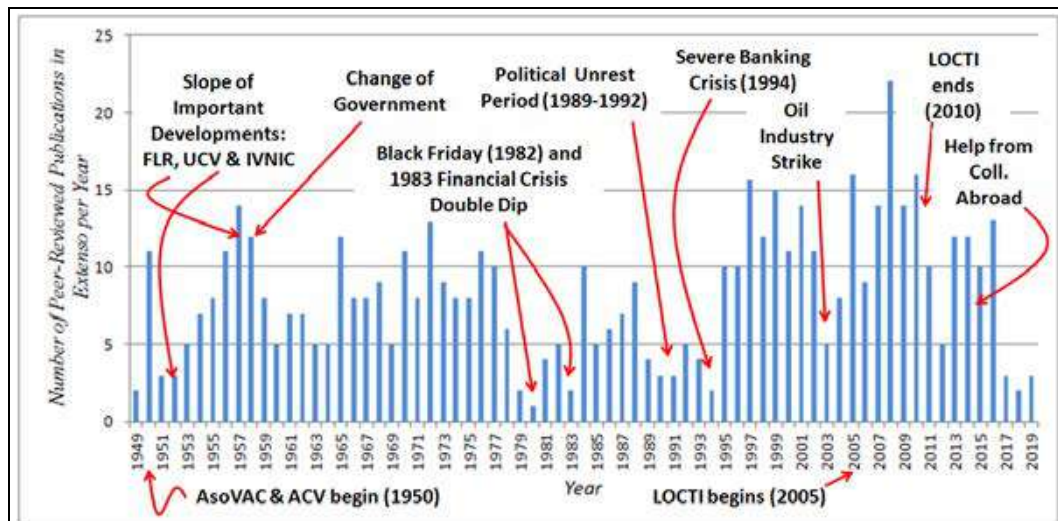


Fig. 1. The evolution of research work and its correlation with major events.

In Fig. 1 a valley between 1961 and 1965 with a bottom between 1963 and 1964 corresponds to a time span where the reactor facility was closed by an initiative of the IVIC Board of Directors, who also approved the creation of a scholarship program for the training in top universities abroad of five engineers and six physicists (three of them earned an undergraduate physics degree at UCV) in nuclear science as well as a physics department in 1963 (Roche 1981). The next valley with a bottom at 1969 marks the return of the beneficiaries of the scholarship program in nuclear science. It was then when they

¹³ On the IVNIC premises and almost all the members from the former Institute for Medical Research “Luis Roche” and some from the Municipal Blood Bank in Caracas became its initial research faculty. The others, following de Venanzi’s initiative, joined the Faculty of Science at UCV.

were informed that the physics department changed its mission and vision and then developments in nuclear physics were not part of it.¹⁴ As a result, these physicists became faculty members in two major universities, UCV and Universidad Simón Bolívar (USB) and it led to the development of research and graduate programs in both institutions in nuclear physics and related fields like medical physics. They were joined by groups with expertise in nuclear magnetic resonance and Mossbauer effect. The next valley, related to the creation of the Venezuelan Institute of Technology in Petroleum (INTEVEP), came between 1973 and 1975. It was a consequence of an attrition process underwent by IVIC where most of its research faculty in chemistry was transferred to the oil industry and it included the nuclear chemistry group (Lubkowitz 1981)¹⁵. The rest of the valleys in the twentieth century were related to major political and economic crises as they are highlighted in Fig. 1.

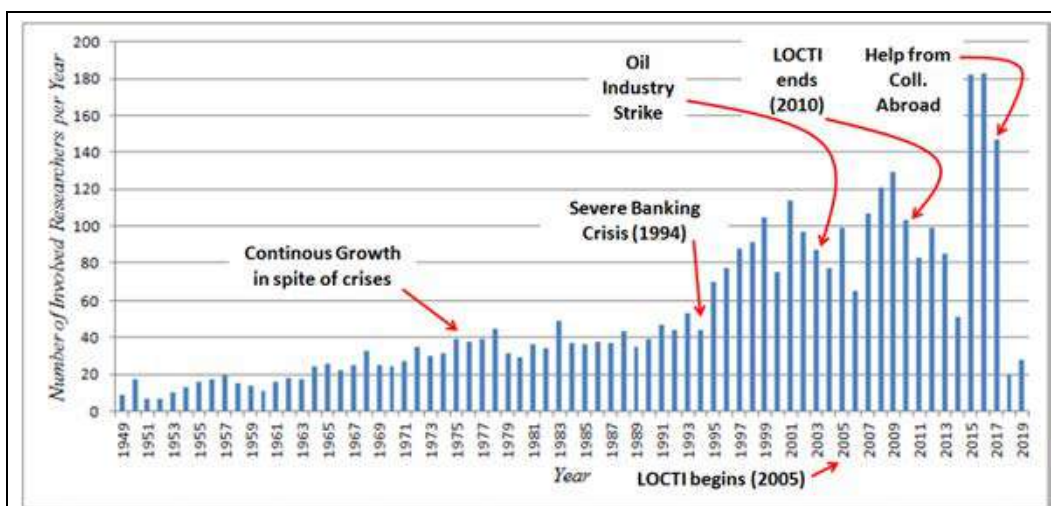


Fig. 2. The evolution of the number of involved researchers with important fluctuations in the last two decades.

2.3. Resilience as a distinctive signature of the twenty first century

The number of involved researchers per year, as it is shown in Fig. 2, can be obtained by defining a scientific lifetime for every researcher which begins with the year of his/her first article and ends with the year of the last one. It can be seen that there is a continuous growth in this number along the twentieth century in spite of all the political and

¹⁴ Information obtained by one of the authors when several beneficiaries of the scholarship program were interviewed about the subject. Moreover, a nuclear engineer accepted a conversion process and he became a solid-state physicist with expertise in electron paramagnetic resonance. This was a remarkable tendency of the local government institutions and Roche pointed out that it was perceived as a conflict of interest at different government levels between crude oil exploitation and any development in nuclear science (Roche 1981). Rafael Grossi from Argentina (oil producer) is today the head of the International Atomic Energy Agency.

¹⁵ There was an important shift in the goals to be pursued and it was reflected in the nature and number of peer-reviewed publications in extenso. In most cases they were replaced by patents as a research product.

economic crises and the remarkable feature is a disruption of this pattern with the arrival of the twenty first century. Beyond 2001 there is a general tendency to fall and the presence of two major sets of spikes makes the exceptions. It seems to mark the beginning of an important exodus of scientists and technical professionals. One of the spikes is related to the Organic Law of Science, Technology, and Information (LOCTI)¹⁶. After its inception it reversed the current trend, but unfortunately it could not last for very long since the economy of the country began to derail in a dramatic way. The other set of spikes is the result of the action of collaborators from abroad in response to the original ominous trend of a continuous fall in the number of involved researchers, which can be seen as a form of resilient resource. Nevertheless, beyond 2017 this resilient response lost its strength in a significant way.

2.4. *The legacy and the future*

In spite of all the difficulties and the worrisome trend shown in Fig. 2, the researchers in nuclear science were able to thrive and then, there is an important legacy. Their work in nuclear science along 70 years can be characterized by an impact parameter of 32.53, h-index of 74, w-index of 19, g-index of 124 and 694 is the maximum number of citations in a single article, as it should be expected for a world class research¹⁷. The exodus of scientists and technical professionals is taking an interesting turn with the formation of global networks. In the particular case of medical physics, one of these networks is providing professional technical support in several countries¹⁸. The next step is to create a geographically distributed and multinational institution for research, development, and graduate training programs. This model can be replicated in other disciplines and in that sense, it can be seen as the following big chapter to be written in the history of our development.

References

- Bourne G. (1955). "The Venezuelan Institute for Neurology and Brain Research". *Nature*, 4492, pp. 1049-1051.
- Fernández-Morán H. (1950). "Ideas generales sobre la fundación de un Instituto Venezolano para Investigaciones del Cerebro". *Acta Cient. Venez.*, 1, pp. 85-87.
- [Isotope Courses, Oak Ridge] <<https://pubs.rsna.org/doi/10.1148/58.3.429d>> [access date: 15/03/2019]
- Junqueira P. C., Castilho L. (2002). "The history of the Diego blood group". *Rev. Bras. Hematol. Hemater.*, 24(1), pp. 15-23.

¹⁶ It allowed a direct funding for scientific projects from the private productive sector without government mediation and it was in fact a novel and advanced approach to taxation policies looking for a real science development. LOCTI was in effect between 2005 and 2010.

¹⁷ Highlighted in fields like endocrinology, biophysics applied to physiology and parasitology, nutrition, genetics, radioecology, nuclear and atomic physics, nuclear physics applied to condensed matter physics, medical physics, nuclear chemistry, nuclear physics and chemistry applied to geology and oceanography.

¹⁸ They are: United States, United Kingdom, France, Spain, Brazil, Argentina, Chile, Dominican Republic, Colombia, Ecuador, Peru, Panamá, Netherlands Antilles and, of course, Venezuela as the country of origin.

- Lubkowitz J. A. (1981). "The radioanalytical bibliography of Venezuela (1963-1977)". *J. Radioanal. Chem.*, 66(1), pp. 11-14.
- Pacheco L., Freites Y. (2012). "Recepción de la Radiactividad en Venezuela (1896-1934)". *Bitácora-e* 1, pp.18-39.
- Roche M. (1981). "Reactor, Radioisótopos y Energía Nuclear: Sus Avatares en Venezuela". *Interciencia*, 6(2), pp. 86-92.
- Soyano A., Müller A. (2018). "Humberto Fernández Morán y la creación del Instituto Venezolano de Neurología e Investigaciones Cerebrales (IVNIC, 1954-1959)". 67(1-2), pp. 64-77.

Agustín de la Torre and the beginning of Physics in Venezuela: a historical approach to the beginnings of technical and scientific thought in Venezuela

Ruth Castillo Ochoa – Simón Bolívar University – chebichev@gmail.com/ruthcastillo@usb.ve

Abstract: Tracing the beginning of development scientific thought in Venezuela, particularly in Physics, allow to account imperative need to preserve academic-scientific formation of Venezuelan society in 21st century. The studies of the Venezuelan historians Rafael Balza and Yajaira Freites (Balza 2017) (Freites 1997) allow to account efforts of Agustín de la Torre to insert, in Venezuelan society of 18th century, teaching, research, divulgation and application of modern physical sciences initiated in Europe, marking the beginning of development of eighteenth-century Venezuelan technical and scientific thought. It should be noted that the historical study of Agustín de la Torre is a complicated due to scarce documentation and cultural complexity of eighteenth-century Venezuela. The contribution of the present study is to show the difficult origins of the physical sciences in Venezuela and the importance of their preservation today. If we observe the innumerable and tireless efforts of Agustín de la Torre to develop the study and application of research and teaching of experimental physics in Venezuela, and the Venezuelan physics success in the 20th and 21st centuries, we can understand the current importance of preserving physics in Venezuela. Unfortunately, Science in Venezuela is currently at risk. The historical analysis about Agustín de la Torre's contributions gives an account of the origin of physics studies in Venezuela and of the complex situation experienced in the the scientific and social context of the country to develop Science.

Keywords: De la Torre, Physics, Venezuela, Scientific thought.

1. Introduction

Mathematics is for Newton the language of nature that organizes the physical experience of the world. This Newtonian idea is followed by Agustín de la Torre (1750-1804) in his *Economic Speech: love of letters, agriculture and commerce* (1790) presented at the University cloister as rector of the Royal and Pontifical University of Caracas. In this speech, De la Torre show the importance of mathematics for the efficient mastery of the physical knowledge of the world. Now, what motivates Juan Agustín de la Torre to introduce scientific knowledge, namely physics and mathematics in the Venezuelan Society of the eighteenth century? A lot has to do with the motivation of man in doing science: the immanent desire for knowledge to respond to different problems.

2. Physics in Venezuela and its beginnings. Century XVIII

In the collection of “Medieval History Issues” by Gerardo Rodríguez (2015, p. 20) the ideas of French historian Jacques Le Goff are collected who argues that European Middle Ages does not culminate in 1500, otherwise continues until beginning of the Industrial Revolution around 1750. Following these ideas, we find as example the periphery of Spain’s colonial empire in Americas, namely, provinces of Venezuela or Caracas, Nueva Andalucía or Cumaná, Margarita, Guayana, Trinidad and Maracaibo where the development in physics and mathematics start late.

This languid interest, for knowledge of Science, is aroused in landowners and merchants for their search for useful knowledge for agricultural and commercial development of Venezuelan provinces. Rafael Balza (2017, pp.3-36) establish that beginnings of physics in Venezuela are of a purely experimental nature, oriented only to satisfy demands in the commercial, agricultural and economic activity. In this sense, physics as disciplinary study, found strong obstacles to be incorporated in eighteenth century inside of academic institutions of Caracas colonial culture, such as Royal and Pontifical University of Caracas, Franciscan Convent of Caracas or Academy of Geometry and Fortification. These institutions was under scholastics teachings.

Thus, for example, at Royal and Pontifical University of Caracas, the chairs taught were ethics, law, grammar, rhetoric, music, Latin and theology following the ideas of Aristotle, St. Thomas and Don Scouts. The teaching obeyed the orders of Dominicans and Franciscans where physics and mathematics were not part of instruction. In this way, the first university students, although knew Latin and Spanish grammar, and graduated in law or medicine, had few notions of mathematics and physics (Freites 2000, pp. 9-37).

This reaffirms the “ideological” and institutional context of 18th century Venezuela, where Catholic Church has academic-university power, Aristotelian-Thomistic study dominates the curricular contents around what is taught as *Physica*, and Spanish Crown has political-social control deciding what type of educational institution can be created (Balza 2017, pp. 3-36). However, we can distinguish two factors that minimize the intrusion of religion on issues of physical nature: 1) the new political project promoted by Bourbons and the critics of scholastic thinking, and 2) interest of some professors of Royal Pontifical University of Caracas in usefulness of experimental physics, promoted by presence of mathematical and physical studies at Academy of Geometry and Fortification of Nicolás de Castro (1710-1772) and greater access to modern or illustrated literature through specialized books or encyclopedias, knowledge and “construction” of technical instruments under physical principles (Kuethe 2018).

In this way, at end of 18th century, modern or enlightened thinking was gaining strength within university disputes. In many cases displacing the Aristotelian-Thomistic authority and taking distance from scholastic philosophy and religion. Thus, we find two facts that reaffirm this turn: 1) in 1763 the cloister authorized the doctor Lorenzo Campíns y Ballester (1726-1785) to found the first chair of Medicine, and 2) Carlos III in October 21, 1765 decreed the creation of the chair of mathematics. Although it was not established (due to problems of financial resources) the opening towards the incorporation of studies in science had taken a first step.

In 1788, the new philosophy or modern science arrived at University of Caracas through Chair of Philosophy that was governed by the religious Baltasar de los Reyes Marrero (1752-1809). Marrero studied philosophy and obtained his Doctor of Theology degree from the University of Caracas. He introduced, as part of studies of philosophy, the notions of arithmetic, algebra and geometry because they were considered indispensable so that students could intelligently face the studies of physics and theology. Soon Marrero's teachings aroused suspicion.

In 1789 he was involved in a complaint against the scholastics of the University who accused him of teaching doctrines contrary to the King and of not explaining the physics of Aristotle in accordance with the provisions of the constitutive acts of the University. Also, the against of the parents of his students denounced him and sued him before the King for explaining strange and incomprehensible matters. According to historical reconstructions made by Leal (1963, pp.144-151) and collected by Y. Freites (2000, pp.9-37), Caracas University was divided between those who considered that Marrero should teach mathematics as a prerequisite to understand modern philosophy, and those who thought that he should do it faithfully to Aristotle. At the same time, the usefulness or not of mathematics for the knowledge of philosophy was discussed.

The litigation against Marrero ended when the King of Spain determined in 1791 that the notions of algebra, geometry, and arithmetic were taught to students who wished to receive them. However, Marrero had separated from the Chair in 1789. His successors Francisco Pimentel, Rafael Escalona and Alejandro Echezuria continued with their ideal of making known the philosophical ideas of modern thinkers, studying mathematics and physics, and to familiarize Venezuelan students with the scientific instruments of the time (Limardo 1949, p.345). At same time, the rector of University of Caracas between 1790-1791 the Dr. Juan Agustín de la Torre (1750-1804), proposed the idea of creating or in any case re-founding a chair of mathematics. De la Torre wrote in 1790 a speech that constitutes one of the earliest manifestations of enlightened thought in Venezuela. In that speech, Torre said that "... no nation has made progress of consequences for weapons, for the arts, agriculture and commerce until it has been delivered to the indispensable cultivation of science" (De la Torre 1790).

3. Juan Agustín de la Torre and Experimental Physics in Venezuela

Juan Agustín de la Torre was born in 1750, at the beginning of the Industrial Revolution in a remote city west of the Province of Venezuela, called San Juan Bautista del Portillo de Carora (founded in 1569). Son of a native of Tenerife, Don Juan de la Torre Sánchez and a native from the first settlers and conquerors of Tierra Firme, Mrs. Juana Paula de Urrieta. On several occasions he held the position of Ordinary Mayor of the city. It was kept with two small farms of smaller cattle or also called "cattle of the poor". Very young he was sent to Caracas to study at Seminary of Santa Rosa. In 1766 he wore the scholarship for five years. In June 1772, Dr. Domingo de Berroterán requested for him to Rector of the Royal and Pontifical University of Caracas, one of the tassels (badge for graduates) only for the students that show virtue, poverty, literature, and acquaintance quality. When

he took possession of Rectorate of the University of Caracas in 1789 he defended the creation of new chairs based on the revolutionary ideas of Descartes (1596-1650), the experimental inductive method proposed by Francis Bacon in the *Novum Organum* (1620), the proposal for unification of physics of Galileo and Kepler by Isaac Newton (1642-1727). Following his ideas, De la Torre proposed the creation of a Mathematics Academy to teach useful sciences. On April 25, 1790, Dr. Juan Agustín delivered his very famous economic speech, "Love of Letters in relation to Agriculture and Commerce" (De la Torre 1790), sharing the most advanced ideas with Baltasar de los Reyes Marrero. Stresses De la Torre, the idea that the University educates people for functions other than priesthood and jurisprudence. He sustained the need to consider the different vocations of young students in the province who saw their study possibilities limited to the traditional careers. This argument was useful to propose the study of mathematics in the University.

4. Juan Agustín de la Torre and the Royal Consulate of Caracas: Establishment of Experimental Physics in Venezuela

The Royal Consulate of Caracas was created in 1785 but began operating in 1793. It was part of the administrative reforms of the Bourbons in Venezuelan territory. It was composed of merchants and landowners from the provinces of Caracas. This alliance - owners and merchants - led to the search for useful knowledge aimed at economic progress, which resulted in the institutionalization of experimental physics in Venezuela. Among many of its functions, the Consulate was responsible for improving communication channels for internal and external trade, monitoring the existence of skilled labor and tools for cultivation and land improvement. These issues raised that the Consulate had to face problems whose solution was associated with the domain and application of knowledge. In this way, some of the ideas raised by De la Torre in 1790 were well received (Freites 1997, pp.165-191). De la Torre was appointed by the King as Legal Advisor of the Royal Consulate of 1793-1801. In the Consulate Acts it is possible to see the concerns about the search for techniques and their use. The interest is focused on the management of tools and / or the knowledge of processes of elaboration of sugar cane and cotton products. These documents show the different instruments designed under physical principles, for example:

- a) request by the landowner Don Domingo Ascanio of a series of experiments on the methods of sugar cooking, under the construction of burners according to the method adopted in the West Indies
- b) in 1797, the Consulate convened those who used cotton presses in order to know details of the operation and learn about the qualities of the product
- c) the Consulate agreed in 1810 to build a water lift machine designed by the engineer Juan Pirés. (Leal 1954, pp.83-167)

The lack of men with useful knowledge, made that the members of Consulate considering creating an institution where youth were instructed in Mathematics and communicating the necessary knowledge related to agriculture, fortification, etc. Humboldt's visit to Caracas in 1799 would have helped the members of Consulate to give a definitive form to the idea of creating a math academy through several arguments in a letter written in January 1800 and addressed to Dr. José Antonio Montenegro. The letter dealt with the Consulate's project to financially support a mathematics chair, presented to the King. Humboldt indicated that, given the natural wealth of the province of Caracas, youth not only had to be instructed in mathematics, but also should be trained in knowledge related to agriculture and the arts, hence argues the need to include physics and chemistry. Later, Humboldt says that, given the needs of the province, the professor of chemistry and physics would be more necessary than that of mathematics. Finally, Humboldt advises that the best-known scientific instruments be bought in Europe without which the knowledge of the new professors would be useless. At the end of 1804, the Consulate asked the King to approve the creation of the Academy. In April 1805, the sovereign denied the request, based on the insufficient funds of the Consulate. The King did not ignore the importance of the Academy. What reason then the negativity? According to Freites, the King's behavior was due to the possible rivalry with another colonial institution: the Royal and Pontifical University of Caracas, which had a monopoly on knowledge and was not willing to lose it (Freites 1997, pp. 165-191). The failure of the project of Academy of Mathematics and Physics and Chemistry has been explained by many historians (Arcila Farías, Yajaira Freites and I. Leal). On the one hand, as a product of the game of intrigues and rivalries between colonial institutions, and on the other as a manifestation of different perceptions about education by the elite. Already at the end of the 18th century, the Enlightenment was perceived by the Spanish Crown as a double-edged sword. Carlo IV was a King who acted cautiously in following the reformist policies carried out by his father Carlos III, but at the same time he saw with restlessness the revolutionary events in neighboring France. Finally, in 1830, the Military Academy of Mathematics (1830-1870) was founded to study the applications of mathematics to civil works and the science of war. Its first director was Juan Manuel Cajigal (1803-1856) who had studied at the Alcalá de Henares Academy, thus forming the first engineering school in Venezuela, and starting the first technical elite in the country.

Bibliography

- Balza, R. (2017). "La Física Moderna en la Sociedad Caraqueña de finales del siglo XVIII entre la matemática y la técnica". *Revista Electrónica Latinoamericana de Estudios Sociales, Históricos y Culturales de la Ciencia y la Tecnología*, 1, pp. 3-36.
- Blanco, R. (1956). *El conquistador español del siglo XVI*. Madrid: Edime.

- Cañizales, F. (2007). "Vida y pensamiento de Juan Agustín de la Torre", in Torres H. (Comp.), *Juan Agustín de la Torre, un ilustrado venezolano: esbozo biográfico*, Barquisimeto: Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado.
- Cortés, L. (2007). *El universo conceptual del Doctor Juan Agustín de la Torre (1750-1804)*, in Torres H. (Comp.), *Juan Agustín de la Torre, un ilustrado venezolano: esbozo biográfico*, Barquisimeto: Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado.
- Cortés, L. (1997). *Del Colegio La Esperanza al Colegio Federal Carora (1890-1937)*. Carora: Buría.
- De la Torre, J. (1790). *Discurso económico, amor a las letras en relación con la agricultura y el comercio*. (1790). Leal I. (Comp.) *El primer periódico de Venezuela y el panorama de la cultura en el de siglo XVIII*. Caracas: Academia Nacional de la Historia.
- Freites, Y. (1997). "El problema del saber entre hacendados y comerciantes ilustrados de la provincia de Caracas-Venezuela (1793-1810)". *Dynamis*, 17, pp. 165-191.
- Leal, I. (2002). *El primer periódico de Venezuela y el panorama de la cultura en el de siglo XVIII*. Caracas: Academia Nacional de la Historia.
- MacIntyre, A. (2001). *Tras la virtud*. Barcelona: Crítica.
- Picón, G. (1968). *Nacimiento de Venezuela intelectual*. Mérida: Universidad de Los Andes.
- Picón, M. (1987). *De la conquista a la Independencia y otros estudios*. Caracas: Monte Ávila Editores.
- Unamuno, M. (1945). *En torno al casticismo*. Buenos Aires: Espasa-Calpe.

EDUCATIONAL AND OUTREACH ACTIVITIES IN HISTORY
OF PHYSICS AND ASTRONOMY

The role of place in engagement with science: the new seat of “Enrico Fermi Historical Museum of Physics and Study and Research Centre”

Miriam Focaccia – Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche ‘Enrico Fermi’, Roma – miriam.focaccia@cref.it

Abstract: The “Enrico Fermi” Historical Museum of Physics and Centre for Study and Research (Centro Ricerche Enrico Fermi-CREF) at the end of 2018 took possession of its new headquarters, the historical complex of via Panisperna, in which flourished since 1881 the Royal Physics Institute. Today, CREF represents what Enrico Fermi wanted to achieve in Italy: a center of studies and research in the most advanced sectors of modern Physics, able to promote and develop scientific research with excellent objectives, aimed at expanding knowledge and making original interdisciplinary applications. In virtue of its double soul, Research Institute and Museum, its mission is also to preserve and spread in Italy and in the world the memory of Enrico Fermi’s life and works and to favor a wide dissemination and communication of scientific culture.

Keywords: Via Panisperna, Museum, Viewlab laboratory, EEE project.

1. 1999-2019

The “Enrico Fermi” Historical Museum of Physics and Centre for Study and Research (Centro Ricerche Enrico Fermi-CREF) was founded in 1999 by the law 62/99 and it is the youngest Italian public Research Institute

Today, it represents what Enrico Fermi wanted to achieve in Italy: a center of studies and research in the most advanced sectors of modern Physics, able to promote and develop scientific research with excellent objectives, aimed at expanding knowledge and making original interdisciplinary applications.

Its activities are based on:

- Grants, for "New Talents" and for "Junior" and "Senior" researchers, in order to direct them towards original research of high interdisciplinary value;
- Scientific research projects, for the creation and promotion of advanced interdisciplinary research in the field of different topics;

Activities for the dissemination and communication of scientific culture and historical memory, in particular through the restoration of the monumental complex of Via

Panisperna, of extraordinary historical value, of which the CREF took possession at the end of 2018. Starting from 1881, here flourished the Royal Institute of Physics: a real “creative environment” where Enrico Fermi, who took the chair of Theoretical Physics in 1926, organized and prepared the conditions that led to the birth of that group of young scholars who, starting from the late 1920s, became famous as “i ragazzi di via Panisperna”. Here, under his scientific direction, within an exceptional season for Italian science, the first experiments on the phenomenon of neutron-induced radioactivity began, whose success was crowned in 1938 with the award to Fermi of the Nobel Prize for the Physics.



Fig. 1. The ‘palazzina’ on Via Panisperna: past and present.

2. At the origins

In 1872 the physicist Pietro Blaserna (1836-1918) was called in Rome on the chair of Experimental Physics and to the direction of the future Institute of Physics within a wider project for "Rome capital" advocated by Quintino Sella.

Since then Blaserna dedicated himself to the creation of an Institute based, either on the centrality of the laboratory and experimentation, or open and attentive to the programs and progress of international science.

Thanks to these peculiarities, the Roman Institute represented for decades a reference point for the most advanced Italian physical research and it became a real 'house for physics'.

From 1918, the year of Blaserna's death, Orso Mario Corbino directed the Institute: he, too, was a great organizer of research policy and, in 1926, he succeeded in creating the first chair of Theoretical Physics, for which he named the young Enrico Fermi.

Today as then, the main mission of CREF is to create cutting-edge research activities of an interdisciplinary nature, as well as the dissemination and promotion of scientific culture, by virtue of its ‘double soul’: Research Institute and Museum.

3. CREF’s research lines

There are two different Research Lines: The Interdisciplinary Lines that aim to develop projects with specific objectives; and the Strategic Lines that characterize the main activities of CREF also in relation to the new headquarters in Via Panisperna.

In particular:

- *Extreme Energy Events (EEE) - Science in Schools* corresponds to a single project that combines basic research on cosmic rays with an accurate "third mission" program in Italian secondary schools, using an infrastructure distributed throughout the country thanks to the use of school buildings.
- *Museum, Laboratories and Outreach* includes the *MuseoFermi Project*, dedicated to the creation of the Museo Fermiano, and the *ViewLab Project*, started in 2018, which will allow the development of scientific, informative and educational activities related to the research laboratories to be set up in the new venue of CREF.
- *Cultural and Environmental Heritage* mainly group Projects related to physical investigations into Cultural Heritage, with the possibility of strong collaborations with Italian and foreign Museums.
- *History of Physics* corresponds to Projects related to historical investigations, with a strong impact on the activities of the Museum and scientific dissemination.

The interdisciplinary Research Lines are articulated in various projects that cover areas of fundamental physics, biomedicine and energy, and are characterized by strong interactions with other research bodies or institutions. Often, due to their specificity, they have benefited from external funds, even from industries interested in research. These Projects are always part of national and international collaborations within which CREF contributes with original developments also linked to specific Grants. In addition to this category there are also some individual projects mainly of theoretical nature.

4. A Science Museum dedicated to Enrico Fermi

Starting from 2013, CREF established a multidisciplinary working group composed by physicists and historians, with the task of defining the scientific contents of the future Museum. The result has been the identification of a dozen of significant "steps" of Fermi's life and discoveries. Starting from these steps a path has been defined and enriched by modern technologies (touchscreen, graphic views, interactive panels and holographic screens), in order to involve and excite the visitor, regardless of his specific scientific knowledge.

To assess the validity of the solutions chosen, CREF set up a temporary exhibition entitled "Enrico Fermi - A creative balance between theories and experiments", which debuted in Genoa, as part of the 2015 Science Festival.

With the title "Enrico Fermi - A double genius between theories and experiments" and minor modifications, the exhibition was then moved to Bologna and opened to the public in 2016.

The two exhibitions enjoyed great success with almost 15,000 visitors each, including students from elementary to high school.

Based on these experiences, the final project of the Museum was defined and set up in the historical complex of Via Panisperna, which is naturally part of the museum route, along with the charming inner courtyard, the famous goldfish fountain, EPS historical site from 2012, and the famous stairway, immortalized in 1931 on the occasion of the first international Congress of Nuclear Physics.

Enrico Fermi's extraordinary figure as a teacher and as a giant of the XX century Physics is presented within this museum itinerary that is definitely an avant-garde and interactive museum, in which however also original documents, instruments and historical relics are preserved. The Museum was presented on October 28, 2018, and is now open by appointment.

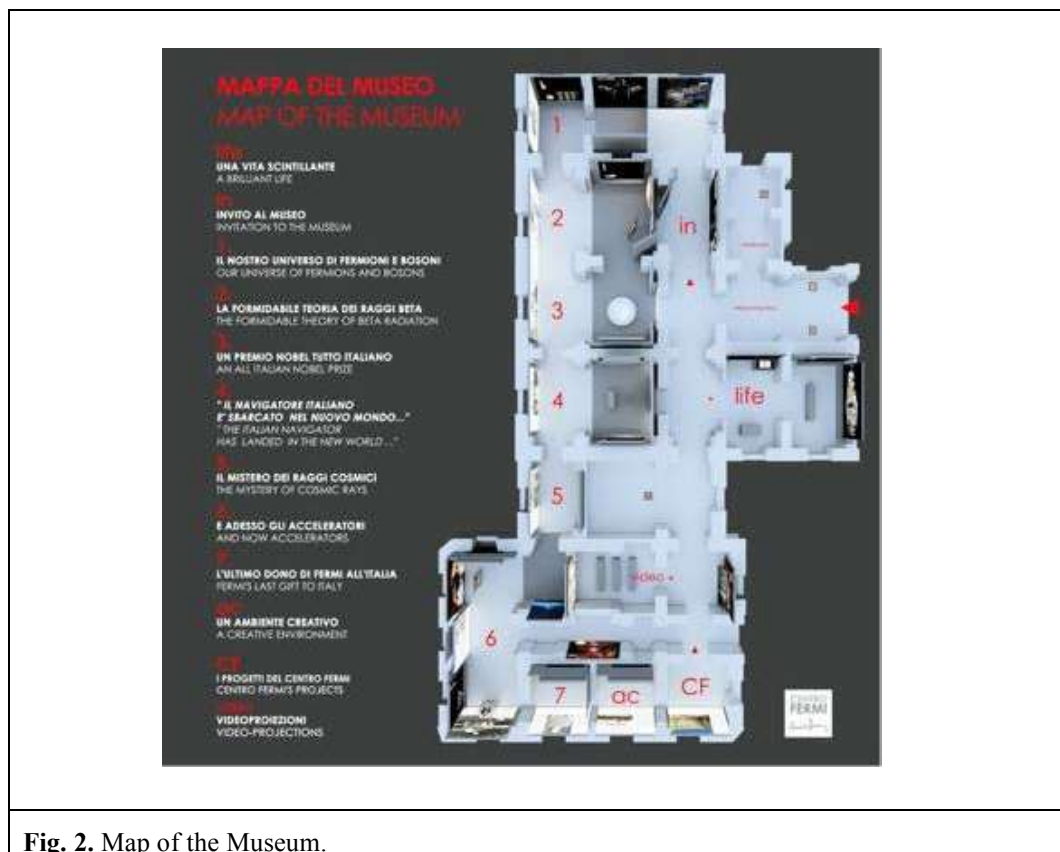


Fig. 2. Map of the Museum.

5. The mystery of Cosmic Rays and the EEE experiment

The *Extreme Energy Events Project (EEE) - Science in schools* is one of the largest experiments in the world for the study of secondary cosmic ground radiation, and the largest fully implemented with Multi-Gap Resistive Plate Chambers (MRPC). Currently, the EEE network consists of about sixty telescopes, each made up of three MRPC detectors, built at CERN by teams of teachers and students, and installed in higher education institutions, universities and INFN sections, throughout Italy. The primary cosmic rays (nuclei of the elements that constitute the Solar system and the known universe) interact with the atmosphere and produce cascades of secondary particles, the muons, called secondary cosmic rays, which thanks to relativistic effects reach the ground before decay. Studying the imprint on the ground it is possible to reconstruct the properties of the primary cosmic rays and the composition of the universe in terms of the known elements

The EEE Project aims to reconstruct the ground footprint of primary cosmic rays using a network of gas detectors, based on cutting-edge technology, distributed throughout the national territory: 59 telescopes are working, mostly managed by high school students and teachers

In addition to the construction of the detector at CERN and its maintenance, students also perform data analysis activities and participate in monthly meetings with the EEE Collaboration. Furthermore, once or twice a year, conferences are organized for the project where students and teachers are invited to present their works and discuss them with their classmates and researchers at CREF.

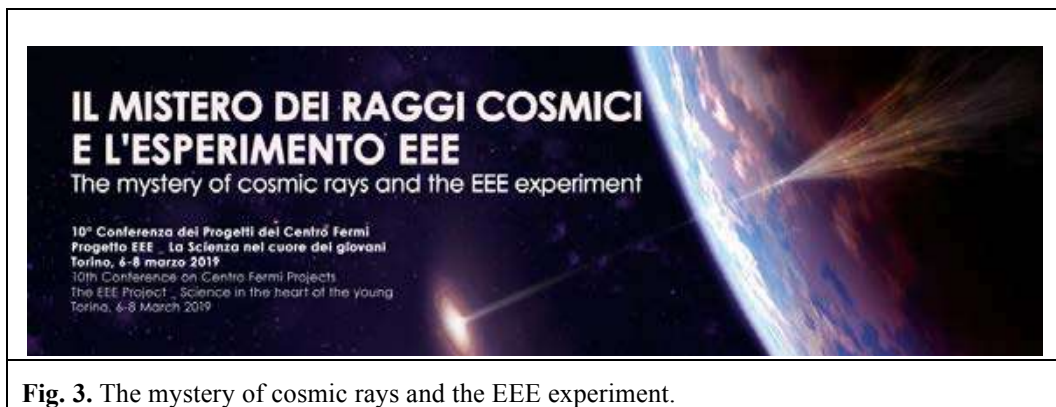


Fig. 3. The mystery of cosmic rays and the EEE experiment.

6. Viewlab – A new laboratory for Physics and Cultural Heritage – Science Dissemination

The VIEWLAB Project aims to develop, within the Palazzina di via Panisperna, some laboratories that can bring together scientific research activities and demonstrative and informative activities.

The VIEWLAB surveys will cover various areas: from the study of the composition and origin of cosmic rays of which the EEE project is concerned, to the scientific investigation of Cultural Heritage using the most modern chemical-physical techniques.

The vast artistic heritage that surrounds us conceals ancient and inviolate secrets. To allow the finds and the works to let us discover their whole history, archeology embraces cutting-edge scientific methodologies: archaeometry is born.

Many different tools will be integrated into VIEWLAB. With scientific investigations such as spectroscopies and tomography we will investigate inside objects, in their elementary structure and in their atomic and molecular composition.

These techniques, innocuous for the objects analyzed, are able to give us back their conformation, the nature of the constituent materials and the composition of the pigments, offering us a quantitative imprint that can reveal the origin and production methods or identify the artist's hand.

With tomographic techniques we can look inside objects without touching them; a micrometric scan reveals layer by layer the construction techniques and production methods, the impact that time and climate have had on their state of preservation.

Scanning and developing graphical simulations and three-dimensional reconstructions of the analyzed objects will make it possible to "touch art with hand", in a stimulating and entertaining way, making us virtually immerse in the past.

Visitors and students will experience with researchers the experience of scientific discovery by accessing the control room of the VIEWLAB experiments; they will show the secrets and methods of diagnostic analysis and applied technologies; they will interact with multimedia installations and holographic reconstructions.

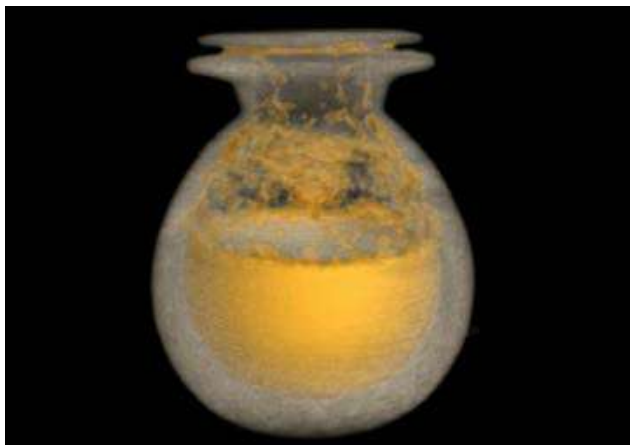


Fig. 4. Neutron tomography of an ancient Egyptian jar.

7. History of Physics

This Research Line initially focused on the birth of the Institute of Physics of Rome, starting from the fundamental interest about the history of research institutes born in Italy in the aftermath of the Unit. Particular attention was paid to the personality of the founder of the Institute, Pietro Blaserna, and, obviously, to his greatest protagonist, Enrico Fermi, and his team of collaborators.

Studies are currently carried on three different topics, connected with the Historical Museum, which seek to clarify and make known the numerous contributions to research, society and politics of Italian physicists in the last two centuries.

The Frascati National Laboratory Visitor Centre: a journey through the history of particle physics

Susanna Bertelli – INFN Laboratori Nazionali di Frascati – susanna.bertelli@lnf.infn.it
Danilo Domenici – INFN Laboratori Nazionali di Frascati – danilo.domenici@lnf.infn.it
Emiliano Danè – INFN Laboratori Nazionali di Frascati – emiliano.dane@lnf.infn.it
Vincenzo Napolano – INFN Ufficio Comunicazione – vincenzo.napolano@presid.infn.it

Abstract: The Visitor Centre of the Frascati National Laboratory is a permanent exhibition dedicated to the history of particle physics, starting from AdA, the first storage ring accelerating matter and antimatter, designed and built in Frascati, up to the future perspectives in particle acceleration. The narrative path combines the exposition of instruments made in Frascati and employed in either local or international experiments, with interactive exhibits and an immersive fruition. The Centre is conceived as a public engagement hub to promote the scientific culture and to enhance the historical-scientific heritage. We wish to present here a selection of the exposed instruments and the associated milestones in history of particle physics.

Keywords: particle physics, accelerators, detectors, public engagement, informal learning.

1. Frascati National Laboratory

The Frascati National Laboratory (LNF) was built in 1955, being the first Italian research facility for the study of nuclear and subnuclear physics with accelerators. Nowadays, it is the largest laboratory of the National Institute for Nuclear Physics (INFN) specialised in the construction of particle detectors and accelerators [INFN-LNF]. The Laboratory is continuously committed to putting cutting-edge technical and scientific expertise at the service of research and society. In addition to performing experiments on site, LNF contributes significantly to the implementation of national and international projects, in collaboration with other research centres, universities and companies.

1.1. LNF and the society

Besides the research activities, in the last twenty years LNF has been fostering the scientific literacy, to familiarize society with its research programs and their results, through a large variety of public engagement initiatives addressed to students, teachers and general public. Special emphasis is placed on creating opportunities for young people to express their potential, encouraging them to pursue scientific careers and studies in science at the university level. The growing interest in bridging science and society led to reach, in the last years, more than 10000 visitors per year. In this framework arose the idea and the need of a Visitor Centre as a place where the interaction between science and society takes place, enhancing the knowledge transfer. The Visitor Centre has been created in 2018 from the requalification of an existing hangar.

2. LNF Visitor Centre

The LNF Visitor Centre is a permanent exhibition addressed to the general audience and devoted to the evolution of particle physics and the connection between science results and impact in society [LNF Visitor Centre]. The visit itinerary winds through a tale of the big questions of contemporary physics and the presentation of the instruments used to find the answers. The exhibition is designed to combine an immersive fruition with the exposition of objects and interactive items in space and is it conceived both for individual and guided tours. The guided tours are conducted by LNF personnel. It is therefore an environment suitable for *informal* learning, where people and scientists can share the knowledge directly.

The exhibition itinerary is structured in four sections and one central room: *Accelerating particles*, *Seeing the invisible*, *Listening to the Cosmos* and *Future accelerators*, whereas the central room hosts an art installation called *The gift of mass*. The *file rouge* of the itinerary is the chronicle of the history of particle physics, with references to the main experiments carried out either at or in collaboration with LNF, and aimed at unfolding the fundamental constituents of matter, the matter-antimatter asymmetry, the origin of the Universe and dark energy and matter. Some of the instruments present in the exhibition are here described.

2.1. Accelerating particles

The first part of the itinerary is dedicated to a general presentation of INFN research fields coupled to an introduction to the essence of particle physics based on the question: what are we made of? To answer this question, researchers investigate the ultimate building block of matter using particle accelerators. In these machines, charged particles like protons and electrons are propelled close to the speed of light and bashed either into a target or in head-on collisions against other particles orbiting in opposite direction. Studying particles originated in these collisions allows us to increase our understanding of matter and the origin of the Universe. Furthermore, accelerators and technologies behind

them are tools to conduct advance research in other fields providing significant benefits for society like medical and environmental applications.

In the visit the evolution of accelerators is recalled since its origin in 1930s focusing on LNF activities in 1959 when LNF researchers, directed by Giorgio Salvini, built in record time an electron synchrotron and in 1961 when the first particle-antiparticle collider AdA was designed and built by a team guided by Bruno Touschek (Valente 2007; Salvini 2010). The narration is enriched by the AdA mockup displayed in Figure 1. AdA, Anello di Accumulazione, (storage ring) provided inside the same magnet, electrons and positrons circulate in opposite directions before bashing and transform their energy into new particles (Bonolis, Pancheri 2011). This technique allowed to reach energy more intense comparing to a single beam impinging on a fixed target and made AdA a milestone in the History of Science, thus in 2013 the National Laboratory of Frascati was declared an European Physical Society historic site [AdA].

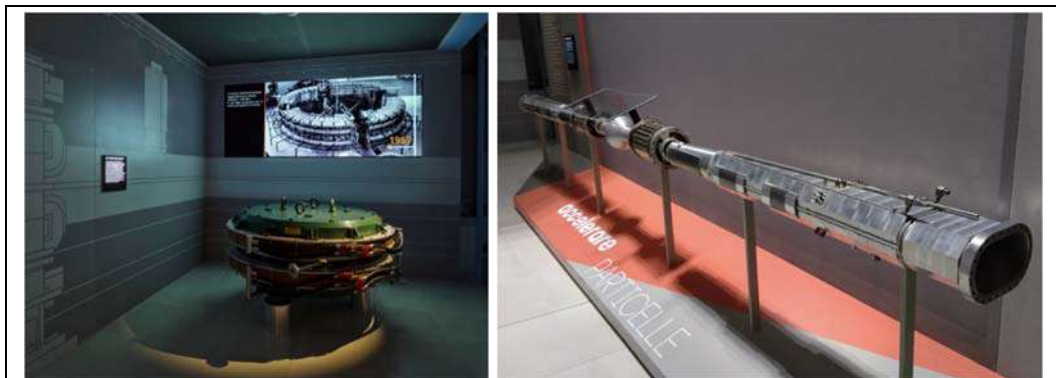


Fig. 1. The left picture displays the mockup of AdA, the first electron positron collider. The right picture shows the Dafne interaction point.

The timeline of particle accelerators marks the period of Adone (the heir of AdA) and focuses on Dafne, the electron positron collider in operation at LNF since 1997 (Valente 2007). The exhibition reproduces the path of particles inside the accelerator, showing devices that belonged to different experiments either carried out at LNF or with the contribution of LNF. After the acceleration, the particles collide in a defined interaction region. This section displays the interaction point of Dafne, installed inside the KLOE detector until 2005 (Valente 2007). It is a 5 meters long section composed by two arms and a central sphere made of an aluminum-beryllium alloy and vacuum chambers, kept at 10^{-11} bar, one hundred billion smaller than the atmospheric pressure. Around the sphere, the quadrupole magnets collimate the beams to maximize the collisions that in Dafne occur every 2,7 ns. KLOE was an experiment focused on the investigation of matter-antimatter asymmetry.

2.2. Seeing the invisible

The second area of the exhibition is devoted to particle detectors, the tools placed around the interaction point to record and identify all the properties of the particles generated

from the collisions. Each of them has a proper function in order to fill the “identity card” of particles. To let visitors visualize what happens inside an accelerator, a video mapping projects the collision of two impinging beams and the paths of outgoing particles (see Figure 2). This animation is coupled to the pieces displayed which are part of detectors used in different experiment. Following the trajectory of a particle, the first detector encountered is the vertex locator. In the exhibition one can see the vertex locator of the Aleph experiment (CERN). The second detector is the tracking system that allows the reconstruction of particles’ path. The triple GEM LHCb detector is here displayed as an example of tracking system. After this, a particle passes through the calorimeter that records the deposited energy. A module of the KLOE experiment calorimeter is thereby shown. A module of the MDT of the ATLAS experiment (CERN) is displayed to introduce the outer layer of the detector system dedicated to the identification of muons, particles with very high capability to penetrate through matter. Modules like the one exhibited, played a fundamental role in the detection of the Higgs boson.



Fig. 2. The video mapping is here displayed. Photo D. Lanzilao.

2.3. The gift of mass art installation

The central area of the itinerary is structured as an interactive installation, based on a system of motion sensors and projectors, that let the visitor experience the effect of particles that, passing through the Higgs field and interacting with it, gain mass.

2.4 Listening to the Cosmos

Gravitational waves and cosmic rays, messengers from the deep Universe, are the main characters of this section. To present cosmic rays and the experiments set up to investigate them, a spark chamber is shown; this detector contains tubes filled with low pressure gas that ionized when particles pass through it. The discharge makes visible the path of the particles produced by the impact of primary cosmic rays in the atmosphere

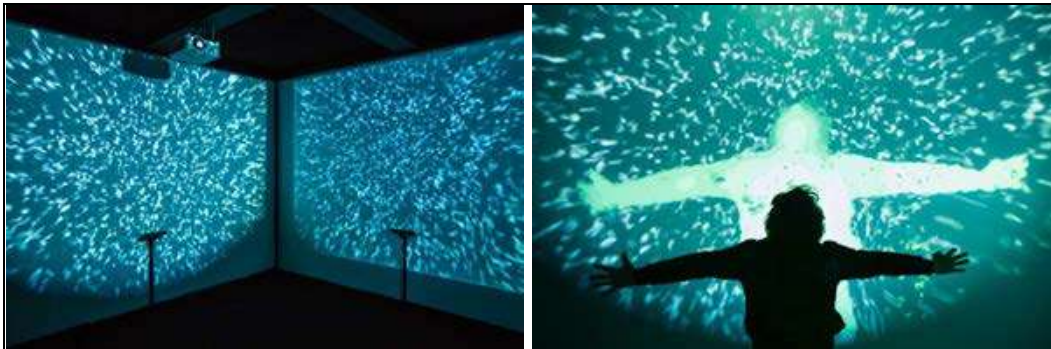


Fig. 3. The gift of mass is an art installation that simulates the interaction between particles and the Higgs field. Concept by V.Napolano, A.Varaschin, audiovisual project by Embrio.net and P.Scoppola. Photo D. Lanzilao.

which reach us. On the gravitational waves side, two experimental apparatus are displayed: Nautilus [Nautilus] and Tiga. The resonant-mass detector Nautilus operated in Frascati from 1995 to 2017. It is a 3 m long cylinder that weighs 2300 kg, with a diameter of 60 cm. It was cooled at the temperature of 0.1 K to reduce thermal noise and was seismically isolated from the ground, so to be capable of measuring a minimum variation in length of 10^{-18} m, possibly induced by the passage of a gravitational wave with frequency of about 1 kHz. Nautilus is placed outside the Visitor Centre. Tiga (Truncated Icosahedral Gravitational wave Antenna) is a prototype built at the end of the nineties characterized by a particular shape, that would have increased the sensibility of the instrument with respect to the cylindrical shaped ones.

2.5. Future accelerators

The conclusive section of the exhibition illustrates the future perspectives in particle acceleration technologies. The Large Hadron Collider at CERN is the world's largest and most powerful particle accelerator ever built. It has a circumference of 27 km and is able to accelerate protons to an energy of 6,5 TeV using the most powerful superconducting magnets ever built. For post-LHC, to reach higher energy a larger accelerator of 100 km of circumference has been proposed [Fcc]. Scientists are exploring an alternative acceleration technique, the Plasma Wakefield Acceleration based on the use of plasma that will lead to build accelerators 100 times smaller than the existing ones. LNF and other facilities around the world (USA, Germany, CERN) work at the cutting edge of the research and the development of this technique whose success could bring to a new generation of low cost and small size particle accelerators that could be used in medicine, industry and research in fundamental physics [Sparc_lab].

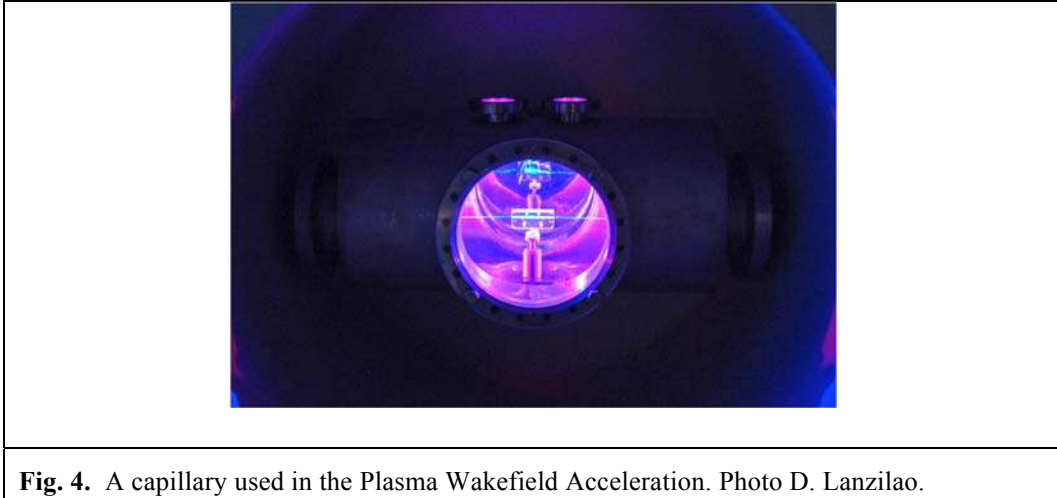


Fig. 4. A capillary used in the Plasma Wakefield Acceleration. Photo D. Lanzilao.

3. Conclusions

The LNF Visitor Centre is a permanent exhibition open to the general audience and devoted to the history of particle physics and to the connection between science results and society. It is thus a public engagement hub created to promote the scientific culture and to enhance the historical-scientific heritage. In the near future, the centre will host temporary exhibitions and educational museum activities for Primary and High Schools.

References

- Salvini G. (2010). *L'uomo, un insieme aperto*. Milano: Mondadori Università.
 Valente V. (2007). *Strada del Sincrotrone km 12. 50 anni di acceleratori e particelle nei laboratori di Frascati*. Limena (Pd): Imprimenda.

Webliography

- [INFN-LNF]. URL: http://inf.infn.it/wpcontent/uploads/2018/07/LNF_brochure_ITA_web1.pdf [access date 10/02/2020].
 [LNF Visitor Centre]. URL: <http://visitorcentre.lnf.infn.it> [access date 10/02/2020].
 [AdA]. URL: <http://inf.infn.it/ada-anello-di-accumulazione/> [access date 10/02/2020].
 [Nautilus]. URL: http://inf.infn.it/edu/materiale/Nautilus_ita.pdf [access date 10/02/2020].
 [Fcc]. URL: <http://fcc.web.cern.ch/Pages/default.aspx#> [access date 10/02/2020].
 [Sparc_lab]. URL: http://sparclab.lnf.infn.it/sparc_lab-home/sparc-linac/plasma-activities/plasma-experiments/ [access date 10/02/2020].

Percorsi educativi dedicati alla Fisica nel portale della Rete dei Musei Universitari Italiani

Elena Corradini – Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Ingegneria “Enzo Ferrari” – elena.corradini@unimore.it

Abstract: The first network of Italian university museums, coordinated by the universities of Modena and Reggio Emilia, was created for a specific project, approved and financed in 2013 by MIUR. One of the four themes to which the network decided to pay its attention was dedicated to the history of scientific instrumentation. About 3740 scientific instruments have been catalogued and the most important have been included in four paths, that have been published in the first section of the bilingual portal of the network set up for the project (www.retemuseiuniversitari.unimore.it). In 2014, the network presented a second project, approved and financed by MIUR in 2015, for the creation of formal and non-formal educational paths aimed at the permanent orientation to scientific method and culture, published in the second section of the web portal of the network. In two of the three general themes selected for the paths, *color* and *time*, there are two subthemes in which paths dedicated to physics have been set up: four paths have been dedicated to the concept of color in physics, and four to the measurement of time. Lastly, in the third section of the web portal dedicated to educational paths for the school-work alternation, four paths are related to physics.

Keywords: Permanent Orientation, University Museum Network, Scientific Method.

1. I progetti della Rete dei Musei Universitari Italiani

La prima Rete dei Musei Universitari Italiani è stata costituita dai musei, centri museali e sistemi museali di dodici università storiche italiane (Bari, Cagliari, Chieti-Pescara, Ferrara, Firenze, Modena e Reggio Emilia, Parma, Perugia, Roma “La Sapienza”, Salento, Siena, Toscana, con il Museo Regionale di Scienze Naturali di Torino) con un progetto specifico, approvato e finanziato nel 2013 dal Ministero dell’Università e della Ricerca ai sensi della legge 6/2000 per la diffusione della cultura scientifica e coordinato, attraverso chi scrive, dall’Università di Modena e Reggio Emilia (Corradini 2011, pp. 77-84).

Per il progetto 64 musei universitari, 38 collezioni e 9 orti botanici situati su tutto il territorio nazionale hanno predisposto contenuti e immagini su supporto informatico per la realizzazione di un portale web bilingue (www.retemuseiuniversitari.unimore.it) con l’intento di offrire gli strumenti necessari per aumentare l’interesse per la scienza attraverso la conoscenza delle collezioni dei musei e per creare contenuti interessanti e

multiformi al fine di stimolare curiosità, interesse e una partecipazione sempre più attiva (Corradini 2012, pp. 133-146).

Nella prima fase di lavoro sono stati scelti gli oggetti, reperti e strumenti più significativi in grado di rappresentare i temi principali cui la rete ha deciso di dedicare la propria attenzione: i paesaggi e gli ambienti di riferimento delle regioni delle diverse università, le storie degli atenei e di alcuni dei docenti più significativi per le ricerche da loro condotte e la storia dell'evoluzione della strumentazione scientifica, fondamentale per il progresso delle ricerche stesse (Corradini, Campanella 2013, pp. 283-297).

Grazie alla collaborazione con l'Istituto centrale per il catalogo e la documentazione (ICCD) del Ministero beni attività culturali e turismo, presso ciascuno dei 12 atenei e presso il Museo regionale di scienze naturali di Torino, è stato attivato un polo catalografico per la catalogazione degli oggetti, reperti e strumenti selezionati dai musei, attraverso l'utilizzo dei tracciati delle schede di catalogo gestiti dallo stesso ICCD all'interno del SIGECweb, il Sistema informativo generale del catalogo su web, per la realizzazione del Catalogo generale dei beni culturali (<http://www.iccd.beniculturali.it/it/per-catalogare>). Sono stati individuati e catalogati complessivamente 28.000 oggetti, reperti e strumenti che, utilizzando i tracciati standard del SIGECweb gestito dall'ICCD del MIBACT, sono stati inseriti nel Catalogo generale dei beni culturali e sono riferibili a molteplici ambiti disciplinari che nell'ambito del portale sono stati raggruppati in sette macro-aree disciplinari, tra cui figura la fisica, e in sotto aree: gli strumenti catalogati, per i quali è stato utilizzato il tracciato PST per il patrimonio scientifico-tecnologico, sono stati 3724 (Corradini 2013, pp. 33-39).

Successivamente i musei dei dodici atenei e il Museo regionale di Torino hanno realizzato 80 percorsi per illustrare, nella prima sezione bilingue del portale web, i quattro temi generali: 4 dedicati alle storie, 9 alla storia della strumentazione scientifica, 18 agli ambienti e 19 ai paesaggi (Corradini, Campanella 2014a, pp. 20-29). In ciascuno dei percorsi gli oggetti, reperti e strumenti vengono documentati, nel settore dedicato all'esplorazione delle collezioni, dalle voci principali delle schede di catalogo che, estratte dal Catalogo generale dei beni culturali, in cui sono state inserite attraverso il SIGECweb, è possibile consultare sul portale della rete in formato PDF.

La contestualizzazione degli oggetti, reperti, strumenti nei diversi percorsi realizzati dai musei della rete sui quattro temi generali e la loro fruizione on-line hanno voluto essere di stimolo a ritornare al museo, cui è dedicata una sezione del percorso, e a tracciare nuove visite sul territorio, di cui si occupa un'altra apposita sezione (Corradini, Campanella 2014b, pp. 42-49).

Nel 2014 la Rete italiana dei musei universitari, cui si sono aggiunte due università (Genova e Pavia) e i Musei civici di Reggio Emilia, con il coordinamento delle università di Modena e Reggio Emilia, attraverso chi scrive, hanno presentato al MIUR, ancora una volta nell'ambito della legge 6/2000 per la diffusione della cultura scientifica, un progetto per la realizzazione di percorsi formativi per l'orientamento permanente al metodo e alla cultura scientifica. Il progetto, approvato e finanziato nel 2015, ha consentito di sperimentare nuovi programmi educativi che combinano l'approccio generalista dell'educazione scolastica con quello dell'università, altamente specializzato, sperimentale e tecnicamente avanzato, per promuovere la cultura scientifica nelle IV, V

classi superiori mediante un migliore utilizzo di laboratori scientifici e strumenti multimediali (Corradini 2015a, pp. 489-494).

Secondo uno degli obiettivi strategici delle università italiane, il progetto ha inteso rispondere a una sollecitazione formulata a livello europeo per orientare i giovani verso studi o percorsi professionali adeguati (Consiglio europeo di Lisbona 23-24 marzo 2000, http://www.europarl.europa.eu/summits/lis1_en.html), aiutandoli specificamente a "sviluppare la loro identità, a prendere decisioni sulla loro vita personale e professionale", come previsto dalle Linee guida per l'orientamento permanente del MIUR (<http://www.istruzione.it/orientamento/>).

Per il progetto i Musei della rete (47 musei, 39 collezioni e 12 orti botanici/erbari) hanno organizzato 56 percorsi educativi di educazione formale e non formale (Corradini 2015b, pp. 105-111), secondo quanto previsto anche dal Piano nazionale per l'educazione al patrimonio culturale del MIBACT (https://www.beniculturali.it/mibac/export/MiBAC/sito-MiBAC/Contenuti/Avvisi/visualizza_asset.html_16280580.html): sono stati dedicati a tre macro-aree tematiche, 9 alla biodiversità e agro biodiversità, 20 al colore e 27 al tempo. Queste ultime due macroaree sono state articolate in sette sotto-temi: per il colore sono stati scelti il colore nella fisica, in natura, nell'arte e per il tempo la misura del tempo, l'evoluzione dell'uomo, l'evoluzione dell'Antartide, la geologia e i fossili. (Corradini, Campanella 2016, pp. 91-97).

I percorsi educativi sono stati caratterizzati dall'utilizzo, nelle varie attività proposte, di oggetti, reperti, strumenti scientifici, su cui costruire esperienze di osservazione scientifica diretta, ma anche altre pratiche culturali di letture e approfondimenti che consentano l'approccio al metodo sperimentale (formulazione di ipotesi, verifica e elaborazione di risultati) (Corradini 2016, pp. 131-142). Ogni macro-area viene introdotta da una mappa concettuale realizzata per sintetizzare lo svolgimento processuale del percorso, dalla quale vengono poi ricavate mappe dedicate ai rispettivi sottotemi; per ciascun percorso vengono messe a disposizione una bibliografia generale e una specifica e approfondimenti sia per gli studenti che per gli insegnanti, per i quali l'utilizzo delle tecnologie informatiche risulta fondamentale permettendo di fare ricorso a una molteplicità di supporti multimediali (Corradini 2017, pp. 43-47). In ogni percorso sono stati pubblicati in rete i risultati della valutazione del suo svolgimento, per la quale sono stati realizzati appositi questionari con specifiche domande, somministrati online sia agli insegnanti che agli studenti. In un altro settore di ogni percorso, alla voce restituzioni, sono stati inseriti una relazione finale sullo svolgimento, corredata di immagini, e gli elaborati realizzati dagli studenti (testi, immagini, filmati, siti web) (Corradini, Endrighi 2018, pp. 39-46).

I musei della rete, in considerazione della notevole esperienza acquisita per l'educazione museale e della loro capacità di lavorare in sinergia, hanno deciso di realizzare un terzo settore del portale web della rete in cui sono stati pubblicati 23 percorsi educativi dedicati all'alternanza scuola-lavoro, prevista dalla L. 107/2015, in grado di collegare la formazione in aula con l'esperienza museale, attuando modalità di apprendimento flessibili, come previsto dalla Guida operativa per l'alternanza scuola lavoro ([www. http://www.istruzione.it/allegati/2015/guidaASLinterattiva.pdf](http://www.istruzione.it/allegati/2015/guidaASLinterattiva.pdf)). La positiva sperimentazione dell'organizzazione dei percorsi di orientamento al metodo e alla cul-

tura scientifica ha indotto i musei a strutturare allo stesso modo i percorsi dell'alternanza scuola-lavoro, due dei quali sono stati dedicati alla strumentazione scientifica. Nello specifico sono state definite le competenze e le conoscenze che si intendevano fornire con ciascun percorso educativo: si è deciso di valutarle trasferendo on line il questionario pubblicato sulla Guida operativa per l'alternanza scuola lavoro per somministrarlo agli studenti (Corradini 2019, pp. 19-24): per tutti i percorsi sono stati realizzati materiali multimediali resi disponibili nella terza sezione del portale web della rete (www.retemuseiuniversitari.unimore.it).

2. Il primo progetto. Le tecnologie informatiche e le nuove realtà per la conoscenza, il networking e la valorizzazione del patrimonio culturale scientifico

Nel primo progetto il tema dedicato alla strumentazione scientifica è stato declinato con un percorso generale “Dall’armadio alla scatola... e viceversa: forme e dimensioni degli strumenti scientifici” e in altri sei percorsi di cui quattro dedicati alla Fisica. Il percorso generale suggerisce una lettura dell’evoluzione degli strumenti scientifici attraverso le variazioni delle loro dimensioni nell’ambito di una continua innovazione che, ai fini della ricerca, ha permesso applicazioni sempre nuove, con due finalità: da un lato mettere a disposizione di un’utenza più ampia la possibilità di effettuare misurazioni accurate, dall’altro ottenere informazioni sempre più dettagliate e strutturate.

I percorsi dedicati alla fisica sono stati organizzati, come tutti gli altri, in tre sezioni: una prima, l’introduzione, dedicata al contenuto generale del percorso, una seconda all’esplorazione delle collezioni, nella quale è pubblicata una selezione delle immagini più significative corredate da una scheda descrittiva. A questa è associato un link che consente di consultare l’intera scheda di catalogo redatta utilizzando il tracciato PST dedicato al patrimonio scientifico tecnologico nell’ambito del SIGECweb, gestito dall’ICCD del MIBACT per la realizzazione del Catalogo Generale del patrimonio culturale. Una terza sezione, dedicata alla visita al museo, consente di contestualizzare gli strumenti promuovendo la conoscenza del museo stesso, della sua storia, dei suoi allestimenti.

Il percorso che l’Università di Cagliari dedica a “Gli studi sulla fisica a Cagliari dal ‘700 alla fine del ‘900” è collegato al Museo di fisica di Sardegna, i cui strumenti più antichi sono riferibili al Gabinetto di fisica. La dotazione del Gabinetto fu assegnata a padre Cossu dal re Carlo Emanuele III di Savoia: gli strumenti più antichi dimostrano come si insegnassero e si dimostrassero le leggi fondamentali della meccanica e della meccanica dei fluidi. La costituzione del Museo, le cui collezioni si sono accresciute nel corso dell’800 e del ‘900, si deve, a partire dagli anni ‘70, al professor Franco Erdas, che nel 1997 ha redatto il catalogo degli strumenti più importanti. Il percorso dedicato a “Gli strumenti scientifici fra sperimentazione e didattica della scienza” del Museo Universitario dell’Università “G. d’Annunzio” di Chieti-Pescara è collegato alla sezione di Storia della scienza, inaugurata nel 2014 e si fonda su un’ampia raccolta di antichi strumenti provenienti dai gabinetti scientifici del Liceo classico “G. B. Vico”, dal Gabinetto di fisica dell’Istituto magistrale “I. Gonzaga” e dal

Seminario regionale “San Pio X” il cui Gabinetto scientifico si costituì negli anni '20 del secolo scorso.

Il percorso proposto dal SIMUS, Sistema museale dell'Università di Siena, attraverso una scelta delle “Macchine ed strumenti per lo studio della fisica” si propone di esemplificare come la fisica abbia contribuito con la sua applicazione all'evoluzione di saperi di altre discipline, a iniziare da quella medica. Il Gabinetto di fisica di Siena, che nel 1864 si affianca all'Osservatorio meteorologico, viene dotato progressivamente di strumentazione sempre più raffinata, utile per le osservazioni sull'elettricità atmosferica.

L'Università di Modena e Reggio Emilia ha proposto un percorso denominato “Uno sguardo fra la terra e il cielo: l'Osservatorio di Modena” per farne conoscere le fasi della storia e dello sviluppo e gli strumenti ad esso collegati. L'Osservatorio di Modena ha sede nel torrione orientale del seicentesco Palazzo ducale: dopo la Restaurazione il torrione venne ceduto all'Università dall'arciduca Francesco IV d'Austria Este nel 1826 per essere adibito a osservatorio. I lavori di adeguamento, diretti da Gussmano Soli (1788-1830), terminarono nel 1827 per accogliere il cerchio meridiano realizzato da Georg Friedrich von Reichenbach (1772-1826), lo strumento dei passaggi e il telescopio equatoriale, entrambi costruiti dal modenese Giovan Battista Amici (1786-1863). Dal 1° ottobre 1859 la direzione passò a Pietro Tacchini (1838-1905) e nel 1863 al modenese Domenico Ragona (1820-1892) che nel 1865 progettò e fece costruire la prima finestra meteorologica. A Ragona succedette nel 1892 Ciro Chistoni (1852-1927), che nel 1897 attribuì all'osservatorio il nome di Geofisico.

Un secondo percorso realizzato dall'Università di Modena e Reggio Emilia riguarda l' “Introduzione del sistema metrico decimale: il Gabinetto di Metrologia” per farne conoscere le specificità e gli utilizzi attraverso gli strumenti realizzati per la diffusione del sistema metrico decimale negli Stati Estensi per volontà dell'arciduca Francesco V d'Austria Este. L'Arciduca emise nel 1849 un decreto che stabiliva la creazione di una Commissione sui pesi e le misure che avrebbe dovuto procurarsi gli archetipi necessari, in particolare il metro e il chilo campione, che furono commissionati e acquistati a Parigi e nel 1850 arrivarono a Modena dove fu realizzato un Gabinetto di metrologia in locali attigui all'osservatorio. L'introduzione del sistema metrico decimale incontrò varie difficoltà, espresse in un decreto del 1855, tra cui le resistenze delle comunità locali. Nel 1856 fu affidato a Cesare Zoboli l'incarico di realizzare 72 strumenti standard per le 72 amministrazioni locali del Ducato Estense nell'Officina Metrica ma i lavori si interruppero quando nel 1858 la Commissione sui pesi e misure venne sciolta e l'Officina venne definitivamente chiusa.

3. Il secondo progetto. I percorsi educativi dedicati all'orientamento permanente al metodo e alla cultura scientifica e all'alternanza scuola-lavoro

I percorsi educativi del secondo progetto sono stati organizzati per far comprendere agli studenti, attraverso esperienze laboratoriali, l'efficacia del metodo scientifico, avvicinan-

doli al ruolo e alle attività dei ricercatori e per evidenziare l'importanza dei contesti storico-scientifici e sociali in cui le varie idee e scoperte si sono sviluppate.

Al tema *colore* nella fisica sono stati dedicati quattro percorsi.

L'intento del percorso della Sezione di Storia della Scienza del Museo Universitario dell'Università di Chieti-Pescara "Antichi strumenti per lo studio della luce e dei fenomeni ad essa connessi" è di avvicinare i ragazzi ad alcuni concetti di base dell'ottica attraverso esperienze pratiche di semplice interpretazione ed è strutturato in modo da realizzare una continua interazione tra elaborazione delle conoscenze e attività sperimentali.

Il percorso "Tutti i colori delle stelle" dei Musei civici di Reggio Emilia si propone come obiettivo di accostare gli studenti alla complessità dei temi riguardanti il colore indagandone gli aspetti fisici e, in particolare, attraverso l'illustrazione delle ricerche dello scienziato reggiano Angelo Secchi, pioniere dell'astrofisica, di presentare l'applicazione dello studio spettroscopico della radiazione luminosa a quello dei corpi celesti e far comprendere agli studenti come i colori vengano percepiti dal nostro apparato visivo.

L'obiettivo del percorso proposto dal Museo di fisica della Sapienza Università di Roma "La luce in laboratorio" è fare conoscere i principali fenomeni luminosi, ma anche illustrare come il progresso scientifico sia il frutto di interpretazioni, a volte audaci, dei fatti sperimentali. Gli studenti possono scoprire da quali fenomeni scaturisce la prima interpretazione della natura della luce come formata di particelle puntiformi in moto lungo linee rette. L'esecuzione di un esperimento, come l'effetto fotoelettrico, dimostra come sia necessario interpretare i fenomeni dovuti alla natura corpuscolare della luce: dalla riconciliazione delle diverse osservazioni nasce l'interpretazione quantistica del fenomeno.

Il percorso "Un'esplorazione colorata del mondo", organizzato dal SIMUS (Sistema museale dell'Università di Siena), si propone di spiegare quale caratteristica fisica della luce sia direttamente associata al colore e come scomponendo la luce nelle sue componenti colorate si possano scoprire nuovi fenomeni o comprenderne più approfonditamente alcuni aspetti. Il percorso prevede esplorazioni qualitative come analisi dello spettro di alcune sorgenti luminose, esplorazione di materiali con la luce polarizzata, (rifrazione e diffrazione, spettri atomici).

Altri quattro percorsi educativi dedicati alla Fisica sono stati organizzati sul tema della misura del tempo da alcuni musei della Rete, ciascuno dei quali lo ha coniugato secondo le specificità delle proprie collezioni. Diversi sono i concetti di tempo emersi nel corso della storia della scienza e non solo: il tempo relazionale, relativo al cambiamento, al movimento dei corpi; il tempo assoluto, che prescinde dai corpi e dai cambiamenti; il tempo come forma soggettiva a priori, relativa al soggetto che conosce più che agli oggetti da conoscere. E ancora un tempo ciclico, senza origine né fine; un tempo lineare, che scorre uniformemente da un'origine nel passato verso una fine nel futuro; un tempo reversibile e uno irreversibile, un tempo continuo e uno discreto.

Il Museo per la storia dell'Università di Pavia con un percorso dedicato alla "misura del tempo: meridiane e orologi a pendolo" e il SIMUS si sono concentrati sui modi che hanno caratterizzato la misura del tempo nelle società umane: dalle misure astro-

nomiche alle meridiane, dalle clessidre agli orologi ad acqua, dal pendolo di Galileo Galilei (1564-1642) a quello di Christiaan Huygens (1629-1685), dall'orologio al quarzo agli orologi atomici, fino alla presentazione di tecnologie oggi ampiamente diffuse, riconducibili allo spazio-tempo e alla teoria della relatività. L'isocronismo del pendolo, la cui scoperta ha segnato una svolta fondamentale nella storia della misura del tempo, può essere osservato, così come molti altri moti periodici, con apparati stroboscopici.

Il SIMA (Sistema museale dell'Università di Bari) propone un percorso dal titolo "Misure stroboscopiche di moti periodici a bassa e media frequenza", nell'ambito del quale, oltre al pendolo, è possibile osservare e misurare la frequenza di fenomeni come la vibrazione di un diapason, di un campanello, di una corda di violino.

Tecniche particolari sono invece utilizzate, sempre dal SIMA in un secondo percorso dal titolo "Misure stroboscopiche di moti periodici a bassa e media frequenza" organizzato per la misura di tempi brevissimi (dell'ordine di 10/8-10/9 secondi), come quelli di transito dei raggi cosmici tra due rivelatori montati all'estremità di una barra di 50 cm (che può ruotare di 180° in un piano verticale). Dalla misura del tempo è poi possibile risalire alla velocità del raggio e ricavare una stima della sua energia.

Nella terza sezione del portale web della Rete dedicata all'alternanza scuola-lavoro due significativi percorsi sono stati dedicati alla strumentazione scientifica: uno da parte del SIMUS, Sistema museale dell'Università di Siena, dal titolo "Catalogazione e valorizzazione dei beni culturali scientifici" con l'obiettivo di far comprendere ai giovani l'importanza della conservazione e valorizzazione del patrimonio storico-scientifico. L'altro percorso realizzato dall'Osservatorio dell'Università di Siena "A caccia di antichi fotoni" si propone di avvicinare gli studenti all'osservazione astronomica e all'utilizzo della strumentazione dell'Osservatorio affinché possano acquisire le conoscenze di base di astronomia, le competenze nell'utilizzo della strumentazione e la capacità, attraverso il metodo scientifico, di interpretare i risultati delle osservazioni.

Bibliografia

- Corradini E. (2011). "POMUI. The web portal of Italian University Museums", in Nyst N., Stanbury P., Weber C. (eds), *Proceedings of the 10th Conference UMAC* (Shanghai, November 7–12, 2010). *UMAC Journal*, 4, pp.77-84.
- Corradini E. (2012). "The new communication technologies for sharing and participatory Italian University Museums", in Nyst N., Stanbury P., Weber C. (eds), *Proceedings of the 11th Conference of UMAC* (Lisbon, September 2011). *UMAC Journal*, 5, pp.133-146.
- Corradini E., Campanella L. (2013). *The multimedia technologies and the new realities for knowledge networking and valorization of scientific cultural heritage. The role of the Italian University Museums Network*, in Marchegiani L. (a cura di), *Proceedings of the Conference on Sustainable Cultural Heritage Management*. Roma: Aracne, pp. 283-297.

- Corradini E. (2013). “La catalogazione e nuove tecnologie informatiche per l’accessibilità al patrimonio naturalistico”, in Mazzotti S., Malerba G. (a cura di), *Memorie del XX Congresso ANMS. Museologia Scientifica Memorie*, 9, pp. 33-39.
- Corradini E., Campanella L. (2014a). “A national project for the Italian University Museums Network”, in Nyst N., Stanbury P., Weber C. (eds), *Proceedings of the 13th Conference of UMAC* (Rio de Janeiro, August 2013). *UMAC Journal*, 7, pp. 20-29.
- Corradini E., Campanella L. (2014b). *Digital technologies for the first Network of the Italian University Museums. Annual Conference CIDOC, “Access and Understanding – Networking in the Digital Era”* (Dresden, September 2014), pp. 42-49. URL: <<http://network.icom.museum/cidoc/archive/past-conferences/2014-dresden/>>.
- Corradini E. (2015a). *Educational itineraries of the Italian University Museums Network for the lifelong guidance to the scientific culture and method*, in García Fernández I. (ed.) *Proceedings Congreso Internacional Museos Universitarios “Tradición y future”* (Madrid, December 2014), pp. 489- 494.
- Corradini E. (2015b). *The Common and Interdisciplinary Itineraries of the Italian University Museum Network: a Challenge for Sharing Scientific Education*, in Haggag M., Gesché-Koning N. (eds.), *Proceedings of the 13th ICOM-UMAC & 45th annual ICOM-CECA Conference* (Alexandria, October 2014), pp. 105-111.
- Corradini E., Campanella L. (2016). *The Italian University Museums Network for the Guidance of the Scientific Culture*, in Monaco G. (ed.), *Proceedings of the 46th annual ICOM-CECA Conference* (Washington, September 2015), pp. 91-97.
- Corradini E. (2016). *La Rete dei Musei Universitari: diffusione e contestualizzazione del patrimonio culturale degli atenei, orientamento al metodo e alla cultura scientifica*, in Magnani L. Stagno L. (a cura di), *Atti del Convegno “Valorizzare il patrimonio culturale delle Università. Focus su arte e architetture”*. Università di Genova, pp. 131-142.
- Corradini E. (2017). “Percorsi formativi della Rete dei Musei Universitari Italiani per l’orientamento permanente al metodo e alla cultura scientifica”, in Borzatti de Loewenstern A., Roselli A., Falchetti E. (a cura di), *Memorie del XXIV Congresso ANMS* (Livorno, novembre 2014). *Museologia Scientifica Memorie*, 16, pp. 43-47.
- Corradini E., Endrighi E. (2019). “I nuovi percorsi educativi della Rete dei Musei Universitari”, in Martellos S., Celi M. (a cura di), *Memorie del XXVI Congresso ANMS* (Trieste, novembre 2016). *Museologia Scientifica Memorie*, 18, pp. 39-44.
- Corradini E. (2019). “Attività di alternanza scuola-lavoro dei Musei Universitari della Rete Italiana con l’impiego delle tecnologie digitali”, in Doria G., Falchetti E. (a cura di), *Memorie del XXVII Congresso dell’ANMS “Il museo e i suoi contatti”* (Genova, ottobre 2017). *Museologia Scientifica Memorie*, 19, pp.19-24.

A novel approach to physics teaching exploiting new technologies in conjunction with historically relevant artefacts

Giovanni Organtini - Museo e Dipartimento di Fisica Sapienza Università di Roma
- giovanni.organtini@uniroma1.it

Abstract: Traditionally, both in high schools and in universities, physics courses are organised such that topics are presented in a sequence that somewhat follows what happened historically. The sequence clearly reflects the history of the discoveries in physics and many topics are still introduced presenting them from a historical point of view. In this paper we suggest a novel approach consisting in exploiting the availability of new technologies to raise the interest of students. For this approach to be more effective, a new role for “traditional” scientific museums is envisaged as the places where one can really appreciate “physics in action”.

Keywords: Inquiry Based Learning, Teaching, New Technologies, New Roles for Museums.

1. Introduction

All physics textbooks have more or less the same structure. The sequence of taught topics always starts with kinematics, then dynamics is presented as a set of principles. Gravitation usually follows, followed in turn by the study of thermodynamics. The sequence, then, continues with electricity and magnetism, to be unified in electromagnetism. The only exception to this scheme is represented by optics that can be found in different parts, depending on the textbook (still, never before kinematics).

Manifestly, the order reflects the history of the discoveries in the various fields. Gravitation was discovered by Newton in 1687, while thermodynamics was developed during the industrial revolution in the XIX century. Coulomb presented his first memoir on electricity and magnetism in 1784, but the pile was invented by Volta in 1800. Electromagnetism was discovered in 1819 and Maxwell equations were published in 1865.

The current structure of textbooks is manifestly a consequence of the fact that they were written upon those published before. Often, the authors usually limit their work to adding new chapters to include new topics, while reducing the details on previously published topics. This trend can be observed even nowadays, where new physics textbooks are appearing including what is often called “modern physics” (that, by the way, is more than 100 years old).

Chapters on modern physics are just added after those on electromagnetism, and relativity and quantum mechanics are described as astonishing and revolutionary.

In our opinion, this is not the only possible approach. Our proposal is strongly based on experimental grounds and we suggest to let the students to perform the experiments, if possible. It is worth noting that there is no need to really perform the whole set of possible experiments in the classroom, though the latter would be desirable. In many cases one can limit him/herself to show how the experiments are done in principle and just provide the experimental data collected during their execution, possibly including statistical and systematic errors. It must be noted that in what follows the complete list of experiments is missing. Only few of them, the very crucial ones, are highlighted.

3. A different approach

Indeed, there is a single example of a partially different approach, at least to our knowledge: the Feynman Lectures on Physics (Feynman, 1963). In its second volume, the author shows Maxwell's Equations with almost no experimental support. They are illustrated almost as axioms and used to derive all the known phenomena.

In this paper we describe an alternative approach in which theory is illustrated as a possible interpretation of experimentally observed phenomena, building a growing knowledge of physics in which all phenomena are linked to each other, much more than it appears in standard textbooks. By design, the proposed approach is not so different from the classical one in order to be supported by existing textbooks without too much effort. However, possible alternative learning paths can be designed starting from almost any physics phenomena, exploiting modern technologies that most students know before they can interpret them in a scientific way. As an example, it is not impossible to start the discussion on electricity from the observation of phenomena exploiting the usage of any electrical appliance commonly available like batteries, electrical sockets, piezoelectric lighters, and so on.

2. Example of a learning path

Being solidly based on experiments, our course starts with the discussion of the definition of a non-naive measurement process. There is not much to learn in measuring lengths or times, while providing an objective indication of the temperature of something is full of interesting observations and you need a transducer to obtain it.

Taking temperature measurements in various circumstances, we then try to provide an interpretation of the observed phenomena defining the nature of heat. We note that heat can be transferred in different ways and, in particular, by irradiation or hitting something or, again, by friction.

This observation is an excuse to raise the interest in new phenomena, like optics and kinematics. Understanding the nature of heat goes then through understanding the nature

of light and its connection with the movement of bodies, involved in collisions and friction. The study of the properties of light requires only simple algebra and trigonometry and leads to two possible interpretations of the observed phenomena: light can be interpreted as a beam of particles or as the propagation of a wave that, in turn, must be studied too.

The propagation of waves is the subject of interesting experiments that can be easily performed using *phyphox* (Staacks, 2018): an open source smartphone application developed by the RWTH Aachen University, freely available for both iOS and Android devices, that turns any smartphone into a precise instrument for physics measurements. With *phyphox*, experimenting waves interference and diffraction is as easy as making a phone call, but provides lot of quantitative information.

Waves, on the other hand, are used to describe the propagation of something in a medium that clearly “moves”. So, the fact that heat can be transported by light is consistent with the fact that heat can be transferred by collision or by friction. In both cases there is something “moving”, hence we need to characterise movements. We then have an excuse to introduce kinematics. From the study of motion one can infer the need for forces to change the state of motion of a point particle and introduce Newton’s Laws.

It is important to note that, at this stage, we should start introducing a key concept: the “state”. We can define the thermal state of a body and the kinematic state of a point particle, while we need forces to change their state. The first Newton’s principle can be reformulated such that any physics system remains in its state if no external action operates on it. Physics is then the study of the ultimate reasons that cause a change in the state of a system. It aims to describe observations by means of “operators” that, acting on a given state, transform it into a different state, eventually at a different time. At this stage the operators are just algebraic transformations of the state that can be represented, in the most complex case, by vectors. The above observation has its rationale in the fact that this prepares the students to the quantum mechanical “revolution”. Having introduced those key concepts rather early in the course, makes the transition from what we call “classical mechanics” to the modern view of interactions much less traumatic and preserves a uniform vision of physics as a discipline aiming at a consistent description of how the Universe works, avoiding the typical feeling of loss that arises when quantum physics is presented as a set of unconventional phenomena.

One can then starts experimenting various forces and studying them, like elastic forces, friction and weight. Experiments can be done using both smartphones or Arduino boards equipped with appropriate sensors (Kubínová, 2015). Arduino boards are cheap and easy to use programmable electronic devices allowing the execution of precise experiments whose performance is comparable, if not better, to that usually achieved in standard physics laboratories.

The study of friction, in particular, is a good starting point for rejoining with the initial goal of understanding the nature of heat. Work is defined by experimentally observing that the temperature of a body on which we exert friction raises linearly with the displacement and the intensity of the applied force in the direction of the movement. That way, the origin of its definition is very clear and does not lead to misinterpretations, common in standard approaches.

The concept of energy follows in a straightforward way from work. To understand the relationship between the work done on a system and its energy content one should start studying the simplest physics system beyond a single point like particle, i.e. a collection of them. We then introduce gas laws interpreting them from the very beginning as a collection of non-interacting particles.

The efforts to describe the whole system using the same concepts developed above and, in particular, the need to define a state for gases and study their state transformations, lead us to the formulation of the principles of thermodynamics, avoiding the complexities arising from their historical formulations.

On the other hand, the study of friction may lead to the observation of electrical phenomena that can be easily experimentally studied using Arduino. Experiments in electrostatics can be easily performed in the classroom with tabletop apparatus. So, the properties of the electrostatic field can easily be derived from observations, leading to the concept of “field” and to the formulation of Gauss’ Law.

The concept of field can then be applied to the only other force acting without any direct contact between objects till this stage: the weight. It is straightforward to observe that the field of the weight force is analogous to the field of a uniformly electrically charged plate and that a sphere can easily be approximated by a plane when seen at a very short distance with respect to its radius. Gauss’ Law, then, can be applied to weight, too. That leads to the discovery of gravity as a radial field, appearing uniform close to Earth surface. Gravity can be successfully tested to see if it explains the dynamics of celestial bodies arriving at a first unification of forces.

The above approach has a clear advantage: nowadays it is almost impossible to acquire an experimental knowledge of gravitation, due to the fact that processes are slow compared to our timescale and most of the planets cannot be seen in light polluted skies. As a result, no student has a clear perception of what are the gravitational effects, while electrostatic phenomena can be easily observed even in poorly equipped physics laboratories and even at home.

Turning back to the study of electricity, one can easily perform experiments on circuits using Arduino as a voltmeter, while, using a smartphone as a compass, electromagnetism can be easily discovered experimentally reproducing the famous Ørsted experiment. Despite the smallness of the fields that can be achieved with the current provided by a battery, the sensitivity of smartphones is more than enough to make quantitative observation leading to the phenomenological formulation of the Biot-Savart Law.

Even electromagnetic induction can be easily studied with Arduino measuring the emf developing in a coil through which the magnetic flux changes, leading to the formulation of Maxwell’s Laws.

It is worth noting that, in our course, we propose the study of the physics of rigid bodies while discussing electromagnetism, because of the need to study the dynamics of rigid coils.

In what we outlined above, we still often refer to the concept of state and operators. For example, one can talk of the electrical state of a body or of a capacitor, as well as the state of a magnetic needle including in that state the information needed to specify its

orientation. Operators are used to change the state modelling interactions with something. For example, the discharging process of a capacitor can be described as the state of the capacitor being transformed by an operator representing the effect of the resistor connecting its plates.

This allows the introduction of quantum mechanics in a very consistent formulation with respect to classical physics. In our approach, electrons cannot be regarded as point like particles due to the uncertainty principle. As a consequence, their state cannot be described in terms of position and velocity, that do not make sense, but in terms of quantities like energy and angular momentum that can be actually measured on them. The physics of electrons in atoms, then, starts with the description of their possible states and the transformations they can be subject to, represented as operators causing the transitions from a state to another, not differently from what happens to classical point like particles where forces cause their state to change from their initial state to another one.

4. A new role for museums

What outlined above may sound odd to people advocating the role of the history of science in physics education. However, with the introduction of modern digital technologies like Arduino and smartphones as tools to perform measurements, physics museums and the history of physics acquire much more importance than before. Indeed, we have observed that, teaching students how to use a smartphone to measure the frequency of a tone observing the shape of the waveform recorded by the microphone, causes them to appreciate much more the huge efforts made by our predecessors to perform the same measurements using Helmholtz resonators or Koenig analyzers.

The interest in understanding how ancient instruments work and knowing their stories is much raised. On the other hand, students have the opportunity to understand the principles of operation of modern tools, looking at the way in which ancient ones were operating. In fact, the principles of operation are often the same and what changes between a modern and an ancient instrument is just the technology adopted to realize a device. Just to give an example consistent with the above discussion, microphones are always realized as vibrating membranes, even if nowadays they are built out of microscopic piezoelectric crystals.

5. Summary

We presented a novel approach for physics teaching exploiting new pervasive technologies like Arduino and smartphones, in which the experiments precede their interpretation.

The learning path has been altered with respect to the traditional one, so to build a consistent and growing knowledge of the laws governing the Universe. Concepts typical

of quantum mechanics, like the one of state and the role of operators, are introduced early to favor a smooth transition from classical to modern physics.

As a result, a new role is envisaged for physics museums and history. The first, rather than being regarded as a collection of “old stuff”, acquire the status of a place where the physics of instruments can be really appreciated, while the interest in the history of the discoveries is raised by the curiosity generated by realising how difficult it could be in the past to take the measurements done with our new digital tools.

References

- Feynman R, Leighton R, Sands M (1963). *The Feynman Lectures on Physics*. USA. California Institute of Technology.
- Staaacks S, Hutz S, Heidrun H, Stampfer C (2018). *Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox*. *Physics Education*, 53 (4), 045009.
- Kubínová Š, Šlégr J (2015). “Physics demonstrations with the Arduino board”. *Physics Education*, 50 (4), pp. 472-474.

The LAB2GO project

Valentina Scotti* – Università degli Studi di Napoli Federico II & INFN Sezione di Napoli – scottiv@na.infn.it

Donatella Campana – INFN Sezione di Napoli

Stefano Mastroianni – INFN Sezione di Napoli

Giuseppe Osteria – INFN Sezione di Napoli

Beatrice Panico – INFN Sezione di Napoli

Francesco Perfetto – INFN Sezione di Napoli

Abstract. The LAB2GO project is aimed at building a deeper knowledge of the techniques and the instruments available in secondary schools' laboratories. The activity started at Università di Roma La Sapienza and INFN [1]. We implemented it in another region for the first time. The project consists of three phases. The goal of the first phase is repurposing scientific laboratories/museums, cataloguing and documentation. In this phase, students, coordinated by their teachers and helped by researchers, carry on an inventory of the instruments found in their school's laboratory. Then students meet at the University to develop wiki pages about the instruments found in their laboratory. Every page contains a short description of an instrument, followed by the main historical highlights and detailed information about its usage. In this way, each teacher knows what tool is available, which is the purpose for it and how to operate it exactly. All the information is stored on a dedicated web site open to everyone, and a geo-localizing tool can be used to request the loan of instruments from other schools. During the second phase specific experiments made with the catalogued instruments are tested and documented. In the third phase, the involved students could act as technicians or helpers during the execution of experiments and new skills can be easily transferred to other teachers. In 2018/2019 we successfully concluded the first phase in a pilot school: the laboratory practice was increased, students are more passionate about physics and they learned new technologies, such as the usage of online tools. In addition, we noticed a keen interest of all the participants in the history or Physics and Physics instruments. The enthusiasm of all participants (students, teachers, and headmaster) encourages us to bring the project forward and extend it to a larger number of schools.

References

- [1] G. Organtini et al., "Promoting the physics laboratory with LAB2GO", DOI: 10.21125/edulearn.2017.2185

The history of the cosmic ray discovery and their current role in the outreach activities

Carla Aramo – INFN Section of Naples – aramo@na.infn.it

Abstract: Cosmic radiation, invisible to human eyes, encompasses all the fundamental problems of modern physics: from the origins and evolution of the Universe to the current composition of known forces up to the intimate structure of matter. From the study of this radiation all the modern theories and knowledge of the world around us were born. On the other hand, cosmic radiation is easily intercepted and can be “made visible” through simple telescopes of particle detectors, so that it represents in itself an excellent educational laboratory to introduce non-experts, especially students, to the study of physics and fundamental phenomena of nature. The study of cosmic radiation is also closely related to other major themes of modern astrophysics, from dark matter to gravitational waves and neutrino oscillations and much more. To speak of cosmic rays therefore means to speak of the exploration of the Universe in all its forms.

In this talk it will be described the history of the cosmic ray discovery, with special attention to the actors of this history [1]: padre Wulf, Domenico Pacini, Victor Hesse, Bruno Rossi e Pierre Auger.

Moreover, an outreach activity “A scuola di astroparticelle” [2] will be presented as part of OCRA [3] – Outreach Cosmic Ray Activities, a national outreach project of INFN with the aim of collecting, within a national framework, the numerous public engagement activities in the field of cosmic ray physics already present at a local level in the divisions and laboratories.

References

- [1] “L’enigma dei raggi cosmici” - A. De Angelis - Springer 2011
- [2] C. Aramo et al., *Go to the astroparticle physics school with the Toledo Metro Station Totem-Telescope for cosmic rays*, *PoS(EPS-HEP2017)549* - <https://www.facebook.com/ascuoladiastroparticelleINFN/>
<https://www.primapagina.sif.it/article/975/dalle-astroparticelle-alle-nanotecnologie-a-scuola-di-fisica#.XS2VIZMzbBU> - <https://agenda.infn.it/event/19242/>
- [3] <https://web.infn.it/OCRA/>

To the Moon and beyond–HYPE Space Matters

Mattia Ivaldi – Università degli Studi di Torino – mattia.ivaldi@ai-sf.it

Martina Bocconi – Università degli Studi di Pavia

Abstract: Space, the final frontier. From the very first time our ancient ancestors gazed up into the sky, the Universe has been a source of dreams, speculation and heated debate. An ever increasing understanding of the space around us has played a key role in the development of contemporary Science and Philosophy. Today much of what was once dreamed is now a reality. In October 1957, from a small place in the Kazakh desert, the first artificial Earth satellite took flight. Twelve years later, the first man landed on the Moon. Space has become a fundamental resource for human society, a source of energy, of precious information, and fascinating questions. The second HYPE–HistorY and Physics Experience–took place in Rome, Italy, on 10-12 May 2019, jointly organized by the International Students of History Association (ISHA) and the Italian Association of Physics Students (AISF), the Italian National Committee of the International Association of Physics Students (IAPS). Gathering 34 international university students from the fields of History and Physics, the symposium enabled a stimulating exchange of ideas and experiences between participants, focusing on the history and techniques of Space exploration, Space Physics, Space politics and strategies. 2019 provides indeed a perfect focal point to appreciate and analyse some of the pivotal anniversaries in this field, such as the 100 years anniversary of the Eddington's experiment and the 50 years anniversary of the first Moon landing. While the theme of the first edition (Nuclear Physics and History) was quite specific and, from a students' perspective, very polarizing between Physics- and History-contributions, the *Space Matters* theme allowed a true intercultural interaction among the participants, including contributions from Geography. This talk will review the event program highlighting the discussion topics, and will open suggestions for the next possible collaborations between AISF and SISFA.

CONNECTIONS BETWEEN HISTORY AND DIDACTICS OF PHYSICS.
PLENARY SESSION OF THE SISFA CONGRESS WITH THE SISFA WORKSHOP
FOR SCHOOL TEACHERS

Il nuovo chilogrammo

Massa Enrico – Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), strada delle Cacce 91, 10135 Torino – e.massa@inrim.it

Abstract: Nel 2018, la Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (CGPM) ha riformato il Sistema Internazionale delle unità di misura adottando valori esatti per alcune costanti fondamentali della fisica. Il chilogrammo (o chilogrammo), storicamente definito e realizzato da un artefatto materiale, è oggi definito dal valore esatto della costante di Planck e realizzato da sofisticati esperimenti.

Keywords: chilogrammo, costante di Planck, costante di Avogadro, Sistema Internazionale delle unità di misura, Kibble balance, X-Ray Crystal Density.

1. Introduzione

Nel 2018, la Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure ha riformato il Sistema Internazionale delle unità di misura (SI) adottando valori esatti per alcune costanti fondamentali della fisica. Il chilogrammo, il kelvin, la mole e l'ampere sono oggi unità connesse alle costanti fisiche di Planck (h), Boltzmann (k), Avogadro (N_A) e alla carica dell'elettrone (e) rispettivamente.

I riferimenti delle unità di tempo, lunghezza e intensità luminosa, già definiti in termini di costanti e connessi rispettivamente alla frequenza della radiazione emessa nella transizione tra i livelli iperfini dello stato fondamentale del cesio-133 ($\Delta\nu_{Cs}$), alla velocità della luce in vuoto (c) e all'efficienza luminosa (K_{cd}), rimangono inalterati.

Il chilogrammo, definito e realizzato storicamente da un artefatto materiale, è oggi definito dal valore esatto della costante di Planck e realizzato da complessi esperimenti. Un primo esperimento, la bilancia elettrodinamica di Kibble (KB), consente di misurare il rapporto tra una massa di riferimento e la costante di Planck attraverso il confronto virtuale di potenze elettriche e meccaniche. Un secondo esperimento, noto come X-Ray Crystal Density (XRCD), utilizza il conteggio degli atomi in un volume macroscopico di forma sferica e la conoscenza della massa di un singolo atomo.

In generale, a seguito della ridefinizione, ogni esperimento in grado di mettere in relazione una massa di prova con la costante di Planck potrà essere considerato un metodo primario (al livello di incertezza raggiungibile dall'esperimento) per la realizzazione dell'unità di massa a qualsivoglia scala.

2. L'unità di massa

La massa, come intesa nella scienza della fisica, è definita per la prima volta nei *Principia* di Newton. Nella definizione I, “*quantitas materiae est mensura ejusdem orta ex illius densitate et magnitudine conjunctim*” Newton introduce la massa attraverso la densità di un corpo identificandola con la quantità di materia. Oggi la massa è indissolubilmente legata ai concetti di energia e frequenza attraverso le relazioni di Einstein e Planck $E = mc^2 = h\nu$.

Nel 1790, esperti dell'Accademia delle Scienze nominati dal Re Luigi XVI, formularono un sistema di unità definito da costanti naturali universali nel tentativo di uniformare pesi e misure nel regno di Francia. Essi proposero unità di lunghezza e di massa legati alla misura del meridiano terrestre passante per Parigi. Il metro fu definito suddividendo la lunghezza del quarto di meridiano terrestre in dieci milioni di parti e la massa dal volume di un decimetro cubo di acqua alla temperatura del ghiaccio fondente e alla pressione di una atmosfera. Successivamente, due prototipi materiali, una barra ed un cilindro di platino, vennero fusi per realizzare i campioni materiali di riferimento del metro e del chilogrammo e vennero custoditi presso gli Archivi della Repubblica. Occorrerà attendere quasi un secolo per estendere l'adozione di un sistema di unità comune tra le nazioni. Il 20 maggio 1875, i rappresentanti di diciassette nazioni, tra cui l'Italia, firmarono un accordo internazionale, la “Convenzione del Metro” [The Metre Convention], istituendo l'Ufficio Internazionale dei Pesi e delle Misure (Bureau International des Poids et Mesures - BIPM). Nel 1889, la I CGPM sancì la definizione del chilogrammo “ce prototype sera considéré désormais comme unité de masse” che nel 1901 diventa “Le kilogramme est l'unité de masse; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme”. Questa definizione è rimasta invariata sino alla XXVI CGPM del 2018.

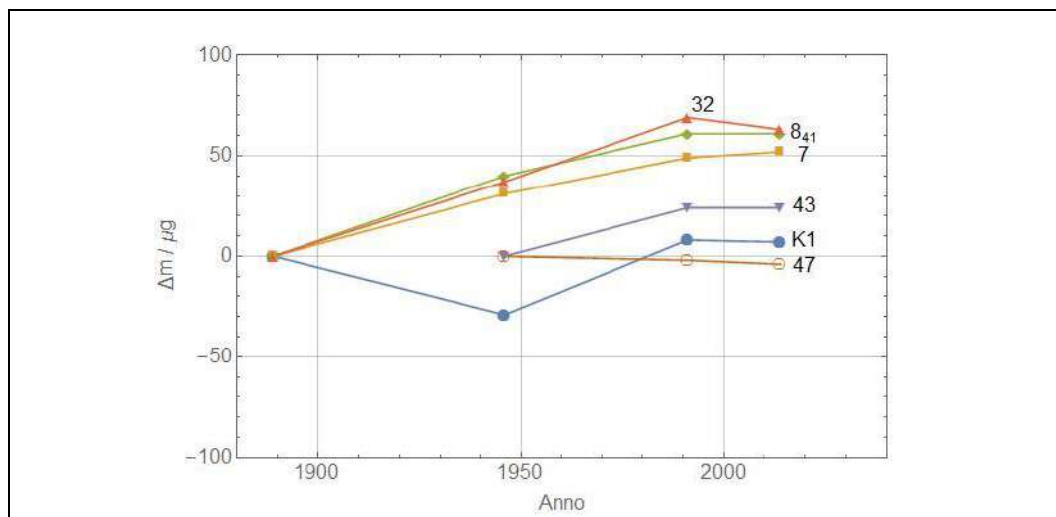


Fig. 1. Variazione temporale della massa delle copie ufficiali del chilogrammo denominate K1, 7, 8₄₁, 32, 43 e 47 rispetto al prototipo internazionale dell'unità di massa. La copia K1 è realizzata dalla stessa fusione in lega di Pt-Ir del prototipo internazionale. Le copie rimanenti sono state estratte da successive fusioni e numerate in ordine cronologico. La copia numero 8, erroneamente etichettata con il numero 41 è denominata 8₄₁.

Il prototipo internazionale del chilogrammo (International Prototype of the Kilogram - IPK) è un cilindro di platino-iridio, conservato al BIPM a Sèvres nei pressi di Parigi e ha permesso sino al 2018 la calibrazione delle copie campioni nazionali delle nazioni firmatarie della Convenzione del Metro.

Il prototipo è stato utilizzato in poche occasioni nel 1889, 1946, 1991 e nel 2014. La figura 1 mostra il risultato dei confronti con la massa delle copie ufficiali (testimoni) del BIPM. Durante le prime tre verifiche (Girard 1994, Davis 2003) le copie ufficiali, conservate nello stesso luogo e mantenute nelle stesse condizioni di temperatura e umidità, evidenziarono un cambiamento di massa medio di circa $50\mu\text{g}$ al secolo. Nel 2014 i testimoni sono stati nuovamente confrontati con il prototipo internazionale durante una campagna di misura straordinaria che ha visto la partecipazione delle nazioni impegnate nella revisione della definizione dell'unità di massa. Il risultato del confronto straordinario ha confermato i valori ottenuti nella campagna di misure del 1991 evidenziando al contempo un'ulteriore debolezza della definizione basata su un prototipo materiale. Infatti, l'insieme delle masse utilizzate per la disseminazione del chilogrammo al BIPM mostrò una deviazione di $35\mu\text{g}$ rispetto al valore assunto come riferimento (Stock *et al.* 2015, de Mirandés *et al.* 2016).

3. La ridefinizione dell'unità di massa

Nel 2005, un articolo pubblicato sulla rivista Metrologia dichiara “*Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come*” (Mills *et al.* 2005). La ridefinizione del chilogrammo era principalmente ostacolata dalla discrepanza dei risultati sperimentali ottenuti dalla bilancia di Kibble e il progetto XRCD. Questi esperimenti determinavano, con la migliore accuratezza, le costanti fisiche fondamentali di Planck e Avogadro rispettivamente. Attraverso il confronto di risultati sperimentali indipendenti che legano h con altre costanti della fisica è possibile verificare la compatibilità tra i valori di h ed N_A (Mana, Massa 2012). Nel 2005, la discrepanza, circa 1 parte per milione, non era ritenuta accettabile dalla comunità metrologica per un cambio di definizione. Infatti, le bilance più accurate possono confrontare masse alla frazione del micro-grammo. Inoltre, per garantire la continuità della scala di massa, il passaggio dalla vecchia alla nuova definizione non doveva alterare i valori delle masse presenti in ambito internazionale. In seguito agli avanzamenti scientifici e tecnologici nella determinazione delle costanti di Planck e Avogadro, nel 2013, il Comitato Consultivo per la Massa e le grandezze apparentate (CCM), del Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure (CIPM), sancisce le condizioni che devono essere soddisfatte per il cambio della definizione del chilogrammo.

La risoluzione CCM-G1 del 2013 “*On a new definition of the kilogram*” richiede:

1. almeno tre esperimenti indipendenti, che includano i lavori della bilancia di Kibble e XRCD, devono produrre valori della costante di Planck con un'incertezza relativa di 5 parti in 10^8 ;
2. almeno un esperimento deve avere un'incertezza relativa non superiore a 2 parti in 10^8 ;

3. i prototipi di massa del BIPM e le masse di riferimento nazionali utilizzate negli esperimenti della bilancia di Kibble e XRCD devono essere confrontate con il prototipo internazionale del chilogrammo;
4. la procedura per la futura realizzazione e disseminazione del chilogrammo descritta nella *mise en pratique* deve essere validata in accordo con i principi del CIPM-MRA (Mutual Recognition Arrangement).

Queste condizioni furono soddisfatte nel 2017 e ratificate dalla XVI riunione internazionale del CCM. Il percorso scientifico per la ridefinizione del chilogrammo era completato. Nel 2018, la XXVI CGPM, considerando le raccomandazioni fornite dal CIPM, ha riformato il SI. Il chilogrammo, ampere, kelvin e mole, unità precedentemente definite attraverso artefatti materiali o proprietà fisiche della materia, sono oggi ridefinite adottando valori esatti per alcune costanti fondamentali della fisica.

Per il chilogrammo la nuova definizione è la seguente:

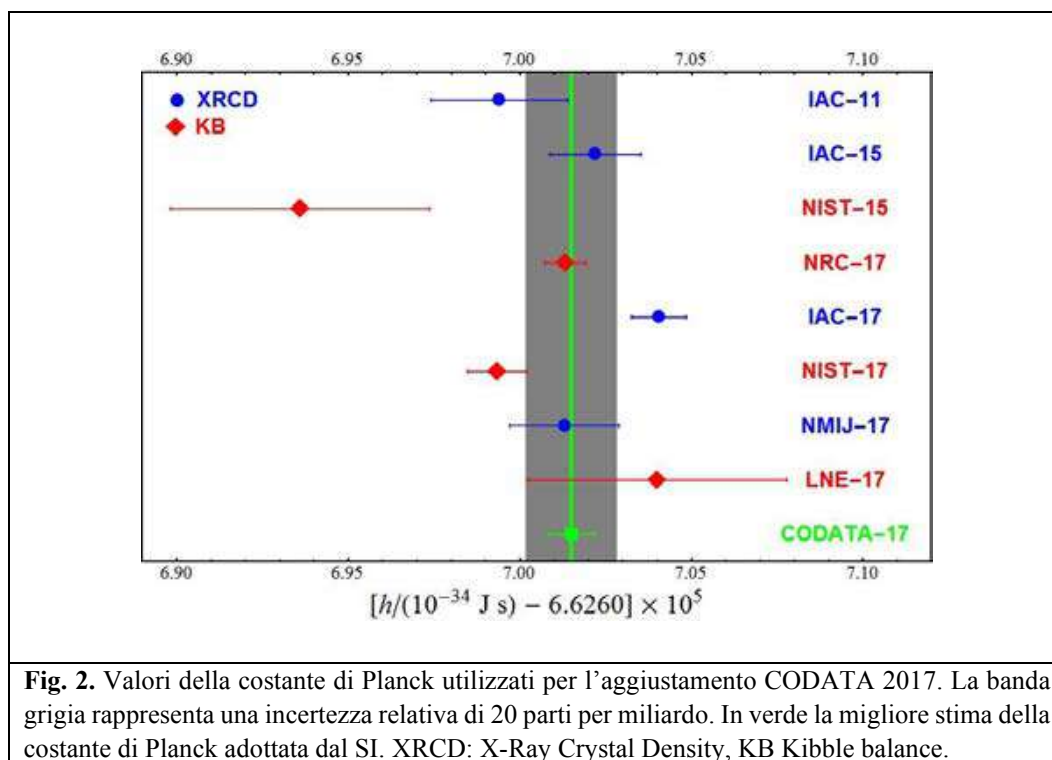
Il chilogrammo, simbolo kg, è l'unità di massa nel sistema SI. È definito dal valore numerico esatto della costante di Planck h , pari a $6.62607015 \times 10^{-34}$, quando espresso in J s, che equivale a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, quando il metro e il secondo sono definiti in termini di c e di $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ¹.

Il valore numerico di h stabilisce la “dimensione” del chilogrammo, in seguito alla ridefinizione la massa del prototipo internazionale possiede la stessa incertezza con cui si conosceva la costante prima della ridefinizione [Note-mass-calibration 2019]. In futuro, la massa del prototipo internazionale dovrà essere determinata sperimentalmente.

La scelta dei valori numerici delle costanti fondamentali del nuovo SI sono il risultato di una procedura di aggiustamento denominato “least-squares adjustment” (LSA). I dati sono elaborati dal Committee on Data for Science and Technology (CODATA) attraverso il gruppo di lavoro dedicato alle costanti fondamentali, il “Task Group on Fundamental Constants” (TGFC) di cui l'Italia è membro. Il TGFC, periodicamente, sulla base degli ultimi risultati, raccomanda un insieme di valori per le costanti fondamentali e fattori di conversione per la fisica e la chimica autoconsistenti tra loro.

La figura 2 mostra il valore numerico della costante di Planck raccomandato dall'aggiustamento CODATA 2017 e adottato dal SI (Newell *et al.* 2018, Mohr *et al.* 2018), il grafico riassume le migliori determinazioni sperimentali delle costanti di Avogadro e di Planck.

¹ Il secondo e il metro sono definiti rispettivamente dalla frequenza della radiazione emessa nella transizione tra i livelli iperfini dello stato fondamentale del cesio-133, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ e dalla velocità della luce in vuoto, c .



4. La realizzazione dell'unità di massa

La nuova definizione del chilogrammo non suggerisce alcun esperimento per la sua realizzazione pratica. Per questo motivo gli esperti del CCM hanno preparato un documento, la *mise en pratique*, indicando le tecnologie che consentono di realizzare con la migliore accuratezza l'unità [SI Brochure 9th edition Appendix 2, 2019]. I due esperimenti descritti in seguito, la bilancia di Kibble e il metodo XRCD, rappresentano lo stato dell'arte della realizzazione della massa a livello del chilogrammo. Questi stessi esperimenti hanno giocato un ruolo fondamentale nella ridefinizione dell'unità di massa e nelle determinazioni delle costanti di Avogadro e Planck, permettendo la riforma dell'intero SI.

4.1. La bilancia di Kibble

La misura diretta del rapporto h/m , dove m è la massa di un prototipo materiale, avviene con la bilancia di Kibble. La bilancia di Kibble venne inventata nel 1975 presso il National Physical Laboratory (NPL) del Regno Unito (Kibble *et al.* 1990). Inizialmente sviluppata per realizzare l'ampere, in seguito alla scoperta dell'effetto Hall quantistico, divenne il metodo sperimentale più accurato per la determinazione della costante di Planck. L'esperimento confronta "virtualmente" la potenza meccanica prodotta dal movimento di una massa nel campo gravitazionale terrestre con la potenza elettrica ottenuta dal movimento della bobina che la sorregge in un campo magnetico.

Come mostrato in figura 3, il confronto avviene attraverso due fasi sperimentali distinte. Nella fase statica, la bilancia confronta il peso del prototipo, mg , con la forza di Lorentz generata dall'iterazione di una corrente I che scorre nella bobina di lunghezza L immersa in un campo magnetico radiale esterno B . Quindi, in una formula,

$$mg = BLI.$$

Nella fase dinamica, la bobina L viene spostata con velocità u costante nel campo magnetico B inducendo ai capi della bobina la forza elettromotrice E . Quindi, in una formula,

$$E = BLu.$$

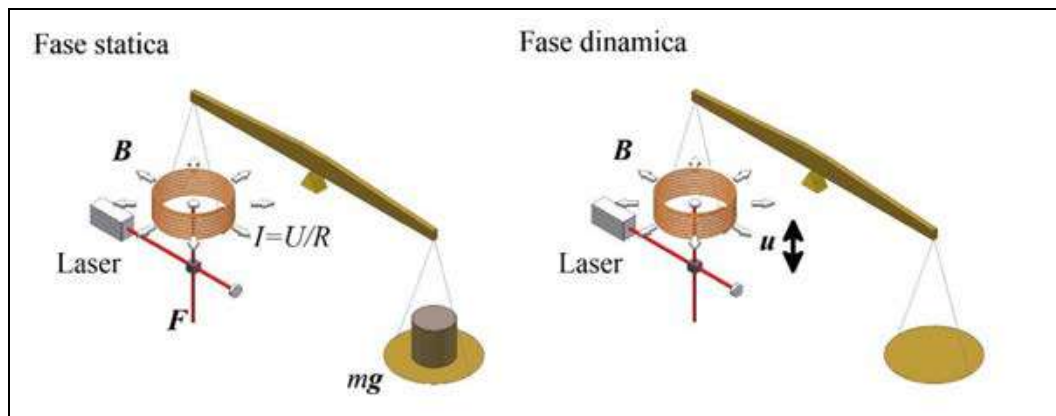


Fig. 3. Schema della bilancia di Kibble.

Fase statica: La forza F che agisce sulla bobina percorsa dalla corrente I è bilanciata dalla forza peso mg della massa di prova. La corrente $I = U/R$ è misurata attraverso la legge di Ohm in termini del campione quantistico di tensione basato sull'effetto Josephson ed il campione di resistenza elettrica basato sull'effetto Hall quantistico.

Fase dinamica: la bobina si muove alla velocità u in direzione verticale attraverso il campo magnetico B producendo una tensione indotta E misurata in termini del campione quantistico di tensione Josephson.

Il termine BL che appare nelle due equazioni è un fattore geometrico che non può essere misurato con incertezze relative di poche parti per miliardo. Mettendo a sistema le due equazioni ed eliminando il termine BL , supposto invariante tra le due fasi di misura, otteniamo l'equazione della bilancia di Kibble,

$$mgu = EI.$$

Il nome storico, "bilancia del watt", deriva dal fatto che entrambe le quantità a destra (meccanica) e a sinistra (elettrica) sono espresse in unità di potenza.

La forza elettromotrice E (fase dinamica), è misurata per confronto con il campione quantistico di tensione basato sull'effetto Josephson. Esprimendo in formule, $E = n_1 (h/2e) \nu_1$, dove n_1 è un intero e ν_1 è la frequenza che irradia il dispositivo superconduttore, $2e/h = K_J$ è la costante di Josephson con e la carica dell'elettrone. La corrente che scorre nella bobina L (fase statica) è ottenuta indirettamente applicando la legge di Ohm, $I = U/R$, attraverso misure di tensione U e di resistenza R riferite ai campioni quantistici di tensione Josephson e di resistenza Hall.

, $U = n_2 (h/2e) v_2$, $R = r (h/e^2)$, dove n_2 è un intero, r è un numero reale e v_2 è ancora la frequenza che irradia il dispositivo superconduttore. Il valore $R_K = h/e^2$ è la costante di von Klitzing.

Le quantità u e g sono misurate rispettivamente nelle unità SI, $m s^{-1}$ e $m s^{-2}$. Sostituendo le espressioni, il rapporto h/m , in unità del sistema internazionale risulta,

$$\frac{h}{m} = \frac{4r}{n_1 n_2} \frac{gu}{v_1 v_2}.$$

Questa equazione esprime la massa in funzione della costante di Planck. Tutte le quantità a destra nell'equazione devono essere determinate con incertezze inferiori all'incertezza attesa sulla massa di riferimento, a livello del chilogrammo, sono inferiori a 10 parti per miliardo. (Thomas *et al.* 2017, Wood *et al.* 2017, Haddad *et al.* 2017).

4.2. Il metodo XRCD

La costante di Avogadro è una costante fisica fondamentale che crea un collegamento tra la scala atomica e la scala macroscopica. La sua determinazione ha affascinato molti studiosi e una prima stima è stata effettuata da Loschmidt nel 1865 (Loschmidt 1865).

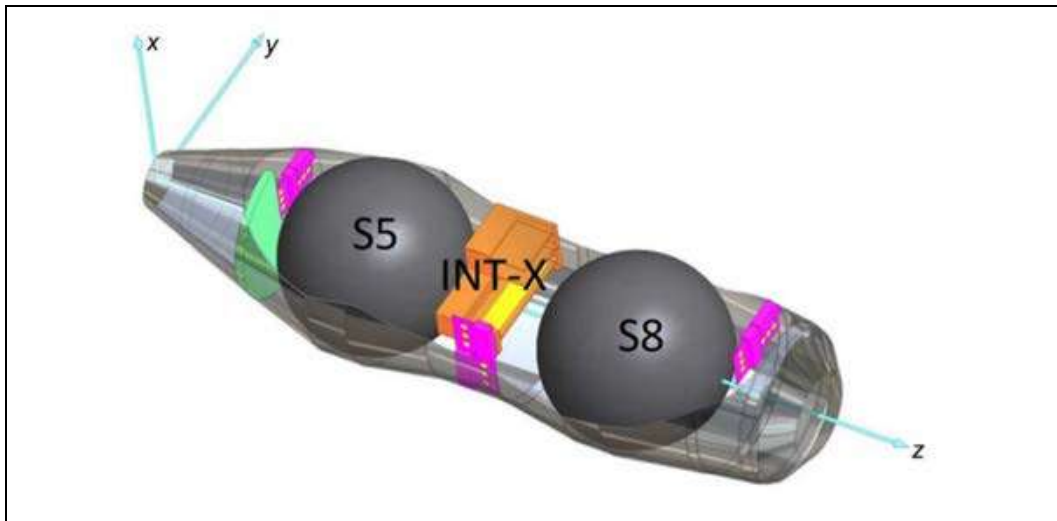


Fig. 4. Il cristallo AVO28, il materiale è arricchito al 99.995% con l'isotopo ^{28}Si . AVO28-S5 e AVO28-S8: sfere di silicio. INT-X: interferometro a raggi X.

La migliore determinazione della costante di Avogadro è stata ottenuta misurando i volumi macroscopici e microscopici in un cristallo di silicio quasi perfetto. Considerato che il numero di atomi per ogni cella elementare è noto, è possibile determinare N_A attraverso l'espressione,

$$N_A = \frac{8M}{\rho a^3},$$

dove 8 è il numero di atomi contenuto in una cella elementare, M , ρ e a sono la massa molare, la densità e il parametro reticolare del cristallo (la distanza interatomica). Questo

metodo è conosciuto con il nome di X-Ray Crystal Density. Fino al 2004, i cristalli di silicio utilizzati erano in composizione naturale, in natura il silicio presenta tre isotopi stabili, ^{28}Si , ^{29}Si e ^{30}Si , con frazioni molari del 92%, 5% e 3% rispettivamente (Fujii *et al.* 2005). La necessità di superare i limiti sperimentali nella determinazione della massa molare portarono all'arricchimento di un cristallo di silicio. Dal 2004, un progetto internazionale denominato International Avogadro Coordination (IAC)², ha riunito le migliori competenze per la determinazione della costante di Avogadro e ha realizzato il primo lingotto di silicio arricchito con l'isotopo ^{28}Si . La figura 4 mostra una rappresentazione grafica del cristallo arricchito AVO28. Il nuovo materiale e i progressi sperimentali hanno consentito raggiungere incertezze relative nella determinazione della costante di Avogadro inferiori a 30 parti per miliardo (Andreas *et al.* 2011a, Andreas *et al.* 2011b, Azuma *et al.* 2015, Kuramoto *et al.* 2017, Fujii *et al.* 2018) ottenendo nel 2017 una incertezza limite prossima a 10 parti per miliardo (Bartl *et al.* 2017).

In seguito alla ridefinizione del SI, il metodo XRCD diventa una realizzazione primaria per l'unità di massa. Infatti, la massa totale di una sfera di silicio, m_{sfera} , è ottenuta sommando la massa del puro silicio, m_{core} , con la massa presente in superficie, m_{SL} , formata da ossidi di silicio, acqua e contaminanti. La massa della sfera è quindi,

$$m_{sfera} = m_{core} + m_{SL},$$

dove

$$m_{core} = Nm(\text{Si}) = \frac{8V_{core}}{a^3} m(\text{Si}).$$

La massa del silicio si ottiene contando il numero di atomi N contenuti nella sfera e determinando la massa media dell'atomo di silicio $m(\text{Si})$ del lingotto utilizzato. La massa media è ottenuta dall'espressione:

$$m(\text{Si}) = \sum_{k=28}^{30} f(^k\text{Si})m(^k\text{Si}),$$

dove $f(^k\text{Si})$ è la frazione molare del k -esimo isotopo e $m(^k\text{Si})$ la sua massa. Considerando l'equivalenza tra i rapporti di masse molari e masse atomiche, possiamo esprimere la massa del k -esimo isotopo in funzione, ad esempio, della massa dell'elettrone:

$$m(^k\text{Si}) = \frac{A_r(^k\text{Si})}{A_r(e)} m(e).$$

La massa dell'elettrone è determinata attraverso misurazioni di precisione delle costanti di Rydberg, R_∞ e di struttura fine α :

$$m(e) = \frac{2hR_\infty}{c\alpha^2}.$$

² International Avogadro Coordination (IAC): Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Institute for Reference Material and Measurements - European Commission Joint Research Center (IRMM - Belgium), Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM - Italy), National Measurement Institute of Japan (NMIJ), National Measurement Laboratory (NML -Australia), National Physical Laboratory (NPL - UK), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB - Germany).

Combinando le equazioni precedenti, la massa della sfera di silicio, espressa in termini della costante di Planck è data dalla relazione,

$$m_{sphere} = \frac{8V_{core}}{a^3} \frac{2hR_{\infty}}{c\alpha^2} \left(\sum_{k=28}^{30} f(^kSi) \frac{A_r(^kSi)}{A_r(e)} \right) - m_{deficit} + m_{SL},$$

dove $m_{deficit}$, rappresenta una correzione che tiene conto dei difetti e delle impurità presenti nel cristallo. La massa della sfera è quindi funzione della costante di Planck.

5. Conclusioni

Questo contributo è una introduzione all'affascinante mondo delle misure di precisione. Molti articoli scientifici e informativi trattano la ridefinizione del chilogrammo, ma vorrei evidenziare quelli pubblicati dalla rivista *Metrologia* e collezionati in numeri speciali dedicati all'argomento (Massa, Nicolaus 2011, Robinson 2014, Bettin, Schlamminger 2016). Essi sono una fonte d'informazione completa e dettagliata sulle sfide affrontate dagli Istituti Metrologici Nazionali per determinare con la massima accuratezza le costanti di Planck e Avogadro. La ridefinizione del Sistema Internazionale delle unità di misura è una diretta conseguenza dei risultati ottenuti.

Bibliografia

- [The Metre Convention]. URL: <<https://www.bipm.org/en/worldwide-metrology/metre-convention/>> [data di accesso 31/12/2019].
- Girard G. (1994). "The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988- 1992)". *Metrologia*, 31, pp. 317-336.
- Davis R. (2003). "The SI unit of mass". *Metrologia*, 40, pp. 299-305c.
- Stock M. Barat P., Davis R., Picard A. and Milton M. J. T. (2015). "Calibration campaign against the international prototype of the kilogram in anticipation of the redefinition of the kilogram part I: comparison of the international prototype with its official copies". *Metrologia*, 52, pp. 310-316.
- de Mirandes E., Barat P., Stock M. and Milton M. J. T. (2016). "Calibration campaign against the international prototype of the kilogram in anticipation of the redefinition of the kilogram, part II: evolution of the BIPM as-maintained mass unit from the 3rd periodic verification to 2014". *Metrologia*, 53, pp.1204-1214.
- Mills I. M., Mohr P. J., Quinn T. J., Taylor B. N. and Williams E. (2005). "Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come". *Metrologia*, 42, pp. 71-80.
- Mana G., Massa E. (2012). "The Avogadro and the Planck constants for redefinition of the kilogram". *Rivista del Nuovo Cimento*, 35, pp 353-388.
- [Note-mass-calibration 2019]. URL: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CC/CCM/BIPM_Note-on-kilogram-redefinition.pdf> [data di accesso 31/12/2019].

- Newell D. B., Cabiati F., Fischer J., Fujii K., Karshenboim S. G., Margolis H. S., de Mirandés E., Mohr P. J., Nez F., Pachucki K., Quinn T. J., Taylor B. N., Wang M., Wood B. M. and Zhang Z., (2018). “The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI”. *Metrologia*, 55, pp. L13-L16.
- Mohr P. J., Newell D. B., Taylor B. N. and Tiesinga E. (2018). “Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment”. *Metrologia*, 55, pp. 125-146.
- [SI Brochure 9th edition Appendix 2, 2019]. URL: <<https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/SI-App2-kilogram.pdf>> [data di accesso 31/12/2019].
- Kibble B. P., Robinson I. A. and Belliss J. H. (1990). “A Realization of the SI Watt by the NPL Moving-coil Balance”. *Metrologia*, 27, pp. 173-192.
- Thomas M., Ziane D., Pinot P., Karcher R., Imanaliev A., Pereira F., Merlet S., Piquemal F. and Espel P. (2017). “A determination of the Planck constant using the LNE Kibble balance in air”. *Metrologia*, 54, pp. 468-480.
- Wood B.M., Sanchez C. A., Green R. G. and Liard J. O. (2017). “A summary of the Planck constant determinations using the NRC Kibble balance”. *Metrologia*, 54, pp. 399-409.
- Haddad D., Seifert F., Chao L. S., Possolo A., Newell D. B., Pratt J. R., Williams C. J. and Schlamminger S. (2017). “Measurement of the Planck constant at the National Institute of Standards and Technology from 2015 to 2017”. *Metrologia*, 54, pp. 633-641.
- Loschmidt J. (1865). “Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften Wien”. Proc. Acad. Sci. Vienna, 52, pp. 395-413.
- Fujii K., Waseda A., Kuramoto N., Mizushima S., Becker P., Bettin H., Nicolaus A., Kuetgens U., Valkiers S., Taylor P., De Bievre P., Mana G., Massa E., Matyi R., Kessler E. G. and Hanke M., (2005). “Present State of the Avogadro Constant Determination From Silicon Crystals With Natural Isotopic Compositions”. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 54, pp. 854-859.
- Andreas B., Azuma Y., Bartl G., Becker P., Bettin H., Borys M., Busch I., Fuchs P., Fujii K., Fujimoto H., Kessler E., Krumrey M., Kuetgens U., Kuramoto N., Mana G., Massa E., Mizushima S., Nicolaus A., Picard A., Pramann A., Rienitz O., Schiel D., Valkiers S., Waseda A. and Zakel S. (2011), “Determination of the Avogadro Constant by Counting the Atoms in a ^{28}Si Crystal”. *Phys. Rev. Lett.*, 106, pp. 030801-4.
- Andreas B., Azuma Y., Bartl G., Becker P., Bettin H., Borys M., Busch I., Gray M., Fuchs P., Fujii K., Fujimoto H., Kessler E., Krumrey M., Kuetgens U., Kuramoto N., Mana G., Manson P., Massa E., Mizushima S., Nicolaus A., Picard A., Pramann A., Rienitz O., Schiel D., Valkiers S., Waseda A. and Zakel S. (2011), “Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition”. *Metrologia*, 48, pp. S1-S13.
- Azuma Y., Barat P., Bartl G., Bettin H., Borys M., Busch I., Cibik L., D'Agostino G., Fujii K., Fujimoto H., Hioki A., Krumrey M., Kuetgens U., Kuramoto N., Mana G., Massa E., Mee R., Mizushima S., Narukawa T., Nicolaus A., Pramann A., Rabb S. A., Rienitz O., Sasso C., Stock M., Vocke R. D., Waseda A., Wundrack S. and Zakel S., (2015). “Improved measurement results for the Avogadro constant using a ^{28}Si -enriched crystal”. *Metrologia*, 52, pp. 360-375.

- Kuramoto N., Mizushima S., Zhang L., Fujita K., Azuma Y., Kurokawa A., Okubo S., Inaba h. and Fujii K. (2017). “Determination of the Avogadro constant by the XRCD method using a ^{28}Si -enriched sphere”. *Metrologia*, 54, pp. 716-729.
- Fujii K., Massa E., Bettin H., Kuramoto K. and Mana G. (2018). “Avogadro constant measurements using enriched ^{28}Si monocrystals”. *Metrologia*, 55, pp. L1-L4.
- Bartl G., Becker P., Beckhoff B., Bettin H., Beyer H., Borys M., Busch I., Cibik L., D'Agostino G., Darlatt E., Di Luzio M., Fujii K., Fujimoto H., Fujita K, Kolbe M., Krumrey M., Kuramoto N., Massa E., Mecke M., Mizushima S., Mueller M., Narukawa N., Nicolaus A., Pramann A., Rauch D., Rienitz O., Sasso C. P., Stopic A., Stosch R., Waseda A., Wundrack S., Zhang L. and Zhang X. W. (2017). “A new ^{28}Si single crystal: counting the atoms for the new kilogram definition”. *Metrologia*, 54, pp. 693-715.
- Massa E. and Nicolaus A., (2011). “International determination of the Avogadro constant” *Metrologia*, 48, pp. E01-E02.
- Robinson I. A., (2014). “Watt and joule balances”. *Metrologia*, 51, pp. S1-S3.
- Bettin H. and Schlamming S. (2016). “Realization, maintenance and dissemination of the kilogram in the revised SI”. *Metrologia*, 53, pp. A1-A5.

Il ruolo della massa efficace nella conduzione elettrica

Giuseppe Fera – Unità di Ricerca in Didattica della Fisica – Università di Udine
giuseppe.fera@uniud.it

Abstract: The dependence of the mass of a body on its interaction with the environment is described by the concept of effective mass, found in different areas of physics (Bessel 1826; Thomson 1881). In the context of the emerging quantum theory of the solid state, the concept is essential for describing the interactions between electrons and lattice in terms of wave mechanics (Bloch 1928): the free electrons in a crystal lattice have an effective mass different from their mass outside the solid. The definition of an effective electron mass, which can also be negative, rises educational difficulties. The concept of effective mass was introduced in secondary school through analogies with phenomena achievable in the laboratory. The discussion of mass measurements performed under different conditions leads students to consider mass as a concept that is not absolute but conditioned by the interactions between system and environment. This allows the student to approach the modern view of mass in physics, according to which a part of the mass (or the whole mass) of a body derives from a process of interaction with a field of different origin and nature. A possible educational path is outlined to overcome the local vision of students that does not recognize the system in interaction and is the root of learning difficulties.

Keywords: Effective mass, Electrical conduction, Physics education.

1. Introduzione

Il termine *stato solido*, reso popolare dai riferimenti ai dispositivi contenenti circuiti elettronici integrati, si riferisce a un campo di ricerca della fisica, sia teorica che sperimentale, che ha avuto un rapido sviluppo a partire dai primi decenni del Novecento.

Sebbene numerosi articoli e libri documentino l'ascesa della meccanica quantistica, della teoria della relatività, della tecnologia nucleare, della biologia molecolare, la fisica dello stato solido è rimasta invisibile al grande pubblico, forse per la mancanza di scoperte spettacolari, quali la fissione nucleare, la struttura del DNA, il Big Bang o i buchi neri. Ciò appare in contrasto con il fatto che la fisica dello stato solido fornisce risposte a molte domande semplici e antiche sulle proprietà di oggetti di uso comune. Perché, ad esempio, in condizioni ordinarie, il vetro è trasparente, fragile e cattivo conduttore di calore ed elettricità, mentre i metalli sono duttili, buoni conduttori di calore ed elettricità e riflettono la luce visibile? Le risposte a queste domande non sono di facile divulgazione, pongono difficoltà di carattere didattico a causa dell'astrattezza dei concetti trattati e

richiedono di integrare la visione microscopica in termini di particelle e campi con quella macroscopica in termini di percezione basata sui sensi o sulle misure.

La fisica dello stato solido nasce nel 1912 con gli esperimenti di Bragg sulla diffrazione dei raggi X che provarono l'esistenza del reticolo cristallino (Hoddeson *et al.* 1992). Tuttavia, una teoria sulle interazioni tra elettroni e reticolo nei metalli fu avanzata da Drude (1900), nel quadro della fisica classica, allo scopo di spiegare la fenomenologia osservata della conduzione elettrica. Le difficoltà della teoria di Drude vennero superate dalla nascente teoria quantistica dello stato solido, nel cui quadro il concetto di massa efficace risultò di fondamentale importanza per descrivere le interazioni tra elettroni e reticolo in termini di meccanica ondulatoria (Bloch 1928).

Nel seguito sarà trattata la nascita del concetto di massa efficace, che può farsi risalire alla soluzione del problema dei due corpi proposta da Newton (par. 2). Il primo utilizzo del concetto inteso in senso moderno si trova in Bessel (par. 3) che lo introduce per tener conto della presenza dell'aria nella discussione del moto del pendolo. Thomson (par. 4) tenta di ricondurre una parte della massa elettronica all'interazione con il campo elettromagnetico. Nel par. 5 sarà trattata la teoria classica (Drude-Lorentz), semiclassica (Sommerfeld) e quantistica (Bloch) della conduzione elettrica. Nei paragrafi 6 e 7 verrà delineato un possibile percorso didattico per introdurre il concetto di massa efficace nella scuola secondaria superiore.

2. La nascita del concetto di massa “ridotta”

Il problema dei due corpi consiste nel determinare le traiettorie spaziali di due corpi puntiformi di masse e velocità iniziali note. I due corpi sono soggetti solamente alla forza che ognuno esercita sull'altro. Newton discute il moto dei corpi (*De Motu Corporum*) nel libro I dei *Principia* (1686) ed apre il capitolo XI (*De Motu Corporum Sphaericorum viribus centripetis se mutuo petentium*) osservando che fino a quel punto ha trattato il moto dei corpi attratti da un centro di forza fisso, cosa che difficilmente si realizza nel mondo reale. Di seguito enuncia le sette proposizioni LVII-LXIII che presentano la soluzione del problema dei due corpi.

Abbandonando il metodo geometrico delle dimostrazioni newtoniane, si determina facilmente l'espressione moderna della massa ridotta μ di un sistema di due corpi. Si vede così che il moto del corpo 1 rispetto al corpo 2 è lo stesso di quello di un corpo avente massa $\mu = M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$ e soggetto alla forza che il corpo 2 esercita sul corpo 1. Tale massa è appunto la massa *ridotta*, così chiamata poiché minore della massa di entrambi i corpi. Pertanto, l'introduzione della massa ridotta consente di ricondurre il problema dei due corpi a quello del moto di un corpo singolo di massa μ rispetto ad un centro di forza fisso. L'idea, alla base della trattazione newtoniana, di semplificare il sistema in analisi attraverso un'opportuna ridefinizione dei parametri fisici, non solo riveste fondamentale importanza nello studio del moto dei corpi celesti, ma verrà ripresa nei secoli successivi anche in altri contesti della fisica.

3. La massa “aggiunta” nel moto di un corpo in un fluido

Alla fine del Settecento si era creata una forte convergenza internazionale sulla proposta di definire l'unità di misura della lunghezza come lunghezza di un pendolo che battesse il secondo (ossia con un periodo di 2 s) a una data latitudine (Agnoli, D'Agostini 2004). In questo contesto si inserisce il lavoro di Friedrich Wilhelm Bessel. Egli accettò l'incarico di determinare la lunghezza del pendolo che battesse il secondo a Königsberg, propostogli dall'Accademia delle Scienze di Berlino come parte del progetto di riforma dei pesi e delle misure in Prussia (Olesko 1991), e vi lavorò dal 1823 al 1826, data di pubblicazione della sua importante monografia sull'argomento.

Bessel fu il primo a tenere conto dell'inerzia dell'aria mossa dal pendolo, superando la trattazione della resistenza dell'aria formulata da Newton (*Principia* 1686, proposizioni XV e XVI). Bessel (1826, app. VI) dimostrò che l'aria non solo ritardava il movimento del pendolo, ma ne variava la massa, poiché l'aria spostata dal pendolo durante il moto «die Schwerkraft vermindert und das Moment der Trägheit vermehrt» (“riduce la forza di gravità e aumenta il momento d'inerzia”, Bessel 1826, p. 137).

Bessel deriva da questo risultato una correzione alla lunghezza misurata del pendolo, che quindi diventa, in linguaggio moderno, una lunghezza *efficace*. Qualche anno dopo, Poisson (1831), discutendo il lavoro di Bessel, richiama l'attenzione su Dubuat (1734-1809) che circa 50 anni prima aveva rappresentato con p il peso apparente del pendolo, con P quello del fluido spostato, e con $(n-1)P$ «le poids du fluide additif», essendo n un coefficiente incognito. Poisson (1831, pp. 569-571) cita tre esperimenti di Dubuat realizzati con palloncini molto leggeri di carta o di gomma sottile oscillanti nell'aria, da cui risulta che $n = 3/2$, un risultato che si accorda sia con la sua analisi teorica, sia con quella di Bessel. Con lui nasce quindi il concetto di massa *aggiunta* che serve a rappresentare in modo semplice l'influenza dell'aria sul moto del pendolo. Nella didattica, una riproposizione degli esperimenti sul moto di palloni leggeri in aria con cui gli studenti misurano il coefficiente $k = n-1$ è descritta nel paragrafo 7.

4. La massa “aggiunta” nel moto di un corpo carico

L'idea che l'interazione con l'aria potesse essere descritta da una massa aggiunta si rivelò fertile in un settore diverso dall'idrodinamica, quello dell'elettrodinamica dei corpi in movimento. Era noto che un elettrone in movimento genera nello spazio un campo magnetico in aggiunta a quello elettrostatico. Partendo da questa considerazione, Joseph John Thomson (1881) prese in esame il moto uniforme di una sfera carica in un mezzo di permeabilità magnetica μ nota. Poiché il calcolo dell'energia del campo elettromagnetico circostante la sfera in moto forniva un contributo aggiuntivo proporzionale al quadrato della velocità della sfera v , Thomson interpretò tale energia aggiuntiva in termini di un aumento della massa della sfera di $4\mu e^2/15a$, essendo e la carica, a il raggio della sfera, («increase in the mass of the charged moving sphere», Thomson 1881).

Richiamandosi a Newton, i fisici precedenti a Thomson aderivano, nel complesso, alla visione della massa come *Quantitas Materiae*, una visione sostanzialista della realtà

fisica. Un corpo fisico è, secondo questo punto di vista, in primo luogo ciò che è: esso agisce come agisce solo sulla base della sua natura intrinseca, invariabile e permanente, di cui la massa è l'espressione fisica. La teoria dell'origine elettromagnetica della massa proponeva invece di privare la materia della sua natura intrinseca. Sebbene la carica elettrica compia almeno in parte la funzione della massa, i fenomeni elettromagnetici non dipendono più dalle proprietà intrinseche dei corpi, ma, come dimostrarono Maxwell e Poynting, sono le proprietà del mezzo circostante a determinare queste ultime.

La teoria dell'origine elettromagnetica della massa non solo è stata una delle prime teorie dei campi, nel senso moderno del termine, ma ha anche pienamente espresso un principio fondamentale della fisica moderna e della moderna concezione filosofica della materia: la materia non agisce come agisce perché è ciò che è, ma è ciò che è perché interagisce con l'ambiente (Jammer 1974). Un concetto simile è stato espresso dagli studenti che hanno effettuato gli esperimenti descritti nel paragrafo 7.

5. Modelli della conduzione elettrica nei metalli

La crescente affermazione della teoria della relatività ristretta nei primi anni del XX secolo indusse i fisici a focalizzare la loro attenzione sul concetto di massa relativistica.

Tuttavia, la nascente teoria quantistica dello stato solido venne costruita tenendo conto di come il mezzo in cui si trova il portatore di carica elettrica ne influenzi le caratteristiche fisiche, in particolare la massa. Tale mezzo è un solido in cui altre particelle sono disposte sui nodi di una struttura periodica, il reticolo cristallino. Per descrivere il moto di un elettrone di conduzione nel reticolo ionico di un metallo, come il rame, cui è applicata una differenza di potenziale elettrico, risultò necessario introdurre il concetto di massa efficace (*effective*). Nel seguito sarà illustrato lo sviluppo delle idee che condussero alla formulazione di questo concetto.

Nel modello di Sommerfeld il metallo è rappresentato come una buca di potenziale rettangolare. Gli stati di N elettroni non interagenti si costruiscono riempiendo i livelli energetici fino ad un valore massimale: l'energia di Fermi E_F che dipende dalla concentrazione degli elettroni di conduzione e dalle peculiarità del reticolo cristallino.

Con questa impostazione il modello fornisce espressioni in accordo con le misure per il calore specifico, l'emissione termoionica, la conducibilità elettrica e termica e l'effetto Hall. Il modello di Sommerfeld tuttavia lascia irrisolto un problema fondamentale: se si calcola il cammino libero medio degli elettroni di conduzione del metallo a temperatura ambiente si trovano valori da 10 a 100 volte maggiori del passo reticolare.

A questo riguardo Bloch afferma:

The main problem was to explain how the electrons could sneak by all the ions in a metal so as to avoid a mean free path of the order of atomic distances. (cit. in Olesko 1991, p. 108)

Egli affronta il problema nella sua tesi di dottorato (1927) trattando l'interazione elettroni-reticolo in termini pienamente ondulatori; ammette che il potenziale all'interno del

metallo sia una funzione periodica con periodo uguale al passo reticolare e risolve l'equazione di Schrodinger trovando come funzione d'onda dell'elettrone con energia $E_{\mathbf{k}}$

$$\Psi_{\vec{k}}(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}} u(\vec{r}).$$

Questo è il prodotto di una funzione periodica $u(\mathbf{r})$ avente il periodo del potenziale reticolare per la funzione d'onda dell'elettrone libero $e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$. Bloch evidenzia che tale funzione d'onda non è un autostato dell'operatore quantità di moto e quindi \mathbf{k} non è il vettore d'onda dell'elettrone libero ma un vettore d'onda riferito al cristallo come un tutto (*crystal wavevector*). Di conseguenza, gli elettroni si muoverebbero liberamente attraverso un reticolo perfetto e la resistività elettrica di un reticolo perfetto di atomi identici sarebbe zero; pertanto, la resistività finita è causata solo da imperfezioni del reticolo e/o dall'agitazione termica degli ioni reticolari. Per determinare la resistività Bloch considera l'interazione delle onde elettroniche con le vibrazioni reticolari. Queste vengono descritte dalla sovrapposizione dei modi normali quantizzati di vibrazione (fononi) secondo un metodo già utilizzato da Debye per il calcolo del calore specifico.

Le oscillazioni reticolari, supposte piccole, perturbano il potenziale reticolare dando luogo alla diffusione delle onde elettroniche. Tale diffusione è descritta dalla sezione d'urto delle interazioni elettrone-reticolo che Bloch determina e correla alla resistività del metallo, trovando un andamento della resistività in funzione della temperatura in accordo con le misure, lineare in T per temperature alte rispetto alla temperatura di Debye del metallo e proporzionale a T^5 a basse temperature.

6. La massa efficace degli elettroni nei cristalli: un approccio didattico

Le considerazioni precedenti dimostrano la rilevanza della conduzione elettrica nella fisica dello stato solido, argomento spesso trascurato nella scuola secondaria superiore. Ma anche quando viene affrontato, spesso l'insegnamento è inteso in senso esclusivamente deduttivo, ossia come spiegazione dei fenomeni in base a leggi e principi astratti: ciò conduce gli studenti a fornire risposte mnemoniche a domande non poste, in disaccordo con la costruzione della conoscenza basata sulla sperimentazione in laboratorio e con aspetti importanti delle pratiche scientifiche, quali la costruzione di modelli partendo dalla fenomenologia, che consentirebbe agli studenti di svolgere un ruolo attivo. La ricerca didattica (Eylon, Ganiel 1990; Wittmann *et al.* 2002; Hart 2008) suggerisce che i modelli microscopici svolgono un ruolo di potenziale strumento di apprendimento. Nel contesto della conduzione elettrica ciò richiede di fondare presenza, proprietà e interazioni delle particelle cariche e il ruolo del campo elettrico, poiché il fenomeno della conduzione è il processo risultante dall'interazione degli elettroni liberi con un campo elettrico presente nel metallo e con gli ioni reticolari.

Semplici calcoli algebrici indicano che l'elettrone di conduzione non può comportarsi come una particella, poiché in tal caso il suo cammino libero medio sarebbe dell'ordine del passo reticolare.

In questo modo si fonda nella didattica la necessità di descrivere in termini ondulatori l'elettrone nei cristalli. Ora, la quantità di moto \mathbf{p} dell'elettrone di conduzione non

può essere $\hbar\mathbf{k}$, perché non si tratta di un elettrone libero a causa della presenza del potenziale reticolare; quindi, la funzione d'onda che lo descrive deve essere una sovrapposizione di onde piane, che viene comunemente definito un *pacchetto* d'onde. Ma ciò pone dei problemi: se la velocità dell'elettrone libero (di massa m) si determina semplicemente come $v = p/m = \hbar\mathbf{k}/m$ (e di conseguenza la sua energia cinetica è $\hbar^2k^2/2m$), quale sarà la velocità dell'elettrone rappresentato dal pacchetto d'onde? Ogni onda piana presente nel pacchetto si muove con una propria velocità. Qui può essere di aiuto un'analogia con la velocità di *gruppo* introdotta in ottica ondulatoria $v_g = d\omega/dk$, sulla base della quale si definisce la velocità dell'elettrone di conduzione avente energia E_k come

$$\vec{v} = \frac{1}{\hbar} \nabla_{\vec{k}} E_{\vec{k}} .$$

La funzione E_k rappresenta le energie degli stati elettronici secondo la struttura delle bande di energia del cristallo. Può essere utile ridurre la discussione al caso unidimensionale in cui questa formula assume un aspetto più comune per gli studenti:

$$v = \frac{1}{\hbar} \frac{\Delta E_k}{\Delta k} ,$$

dove compare la derivata della funzione E_k .

Se si considera adesso una forza F applicata all'elettrone di conduzione, come quella del campo elettrico generato da una batteria cui è collegato il filo metallico, essa nell'intervallo di tempo Δt compie un lavoro $\Delta L = Fv\Delta t$ che causa una variazione dell'energia dell'elettrone data da $\Delta E_k = \hbar v \Delta k$. Uguagliando le due espressioni ricaviamo

$$F = \hbar \frac{\Delta k}{\Delta t} .$$

Ciò significa che l'azione di una forza su un elettrone di conduzione produce una variazione temporale del vettore d'onda \mathbf{k} che descrive lo stato dell'elettrone nel cristallo. L'accelerazione dell'elettrone è $a = \Delta v/\Delta t = (1/\hbar)(\Delta^2 E_k/\Delta k^2)(\Delta k/\Delta t) = (F/\hbar^2)(\Delta^2 E_k/\Delta k^2)$.

Se si vuole salvare il secondo principio di Newton $F = ma$, è necessario introdurre una massa *efficace* definita come

$$m^* = \frac{\hbar^2}{\frac{\Delta^2 E_k}{\Delta k^2}} .$$

Questa massa coincide con la massa dell'elettrone m ? Sono stati misurati i rapporti m^*/m per diversi materiali e risultano, per esempio, (*longitudinal mass*) 0,92 per il silicio, 1,59 per il germanio, 0,066 per AsGa (Kittel 2005). Altre misure mostrano che la massa efficace può dipendere dal vettore \mathbf{k} . Ciò accade perché la funzione che descrive l'energia dell'elettrone E_k può avere una forma complicata. Tuttavia, ci sono dei casi fisicamente significativi in cui tale funzione è relativamente semplice: quelli in cui lo stato dell'elettrone è vicino al margine superiore o inferiore della banda, e quindi la sua energia è vicina ad un valore massimo o minimo. In tali casi E_k può essere sviluppata in una serie di Taylor di potenze che comincia con il termine di secondo grado

$$E_{\vec{k}} = E_0 + \frac{1}{2} \frac{\Delta^2 E_k}{\Delta k^2} (\vec{k} - \vec{k}_0)^2 = E_0 + \frac{\hbar^2}{2m^*} (\vec{k} - \vec{k}_0)^2$$

e quindi assume una forma simile a quella della particella libera, per la quale la massa efficace non dipende da k . Pertanto, l'elettrone si comporta come se fosse libero ma avesse una massa diversa da quella che ha all'esterno del cristallo. Ciò comporta un'enorme semplificazione del problema.

Tuttavia, m^* è negativa per l'elettrone con energia in prossimità del massimo, poiché i massimi di una funzione sono caratterizzati da una derivata seconda negativa. Dal punto di vista ondulatorio ciò indica che l'onda elettronica è riflessa dal reticolo. Dal punto di vista corpuscolare si interpreta la massa negativa come una particella con massa positiva $-m^*$ ma con carica positiva $|e|$. La presenza di portatori di carica positivi in cima alla banda di valenza si può spiegare anche da un altro punto di vista. Nel cristallo semiconduttore elettricamente neutro, la banda di valenza è completamente piena. Il campo elettrico esterno eccita gli elettroni in cima alla banda di valenza che si spostano nella banda di conduzione, lasciando delle *lacune* che si muovono nel cristallo come se fossero particelle cariche positivamente con massa efficace $-m^*$. Sono stati misurati i rapporti $-m^*/m$ anche per le lacune (*heavy holes*) che risultano 0,52 per il silicio, 0,34 per il germanio, 0,5 per AsGa (Kittel 2005). Tutte queste misure confermano la realtà fisica della massa efficace.

Le misure sopra riportate derivano dalla frequenza di ciclotrone dei portatori di carica in risonanza in un campo magnetico statico noto ed evidentemente non possono essere effettuate a scuola. Però i riferimenti storici introdotti nei paragrafi precedenti suggeriscono delle esperienze possibili per introdurre il concetto di massa efficace attraverso l'analogia con fenomeni facili da riprodurre e misure alla portata degli studenti, superando i limiti dell'insegnamento tradizionale.

7. Misure di massa efficace in un laboratorio scolastico

Nel corso degli stage istituiti nell'ambito del PRLS-Fisica della regione Veneto, studenti del quarto anno di diverse scuole superiori utilizzavano una strumentazione RTL costituita da sensori di posizione, interfacce e computer, per analizzare alcuni tratti del moto verticale di palline da ping-pong e palloni da spiaggia, da fitness, da volley, gonfiati con aria.

L'analisi del grafico della legge oraria, in particolare dei primi 2-3 rimbalzi, consente agli studenti di misurare, mediante lo strumento di interpolazione del software, l'accelerazione dei palloni nella fase di salita, di discesa e vicino al punto di inversione del moto nei diversi rimbalzi.

Gli studenti prevedono inizialmente che l'accelerazione del pallone in caduta sia pari all'accelerazione di gravità g ; le misure evidenziano che l'accelerazione di quasi tutti i palloni non solo è diversa nella fase di salita e di discesa, ma è piuttosto lontana dal valore atteso al punto di inversione del moto.

Gli studenti allora mettono in discussione il modello primitivo del moto di caduta, che potremmo definire galileiano, basato sul secondo principio di Newton $F = Ma$. Sostituendo la forza peso $P = Mg$ al posto della forza risultante, si ricava appunto $a = g$. Come si corregge questo modello? Tenendo conto della presenza dell'aria.

Il pallone di volume V , in quiete, è immerso nel fluido circostante (aria) di densità d_{aria} . Una situazione di questo tipo si presenta all'inizio dell'esperimento quando si misura la massa del pallone utilizzando una bilancia a piatto. La forza risultante sul pallone durante una pesata è $\mathbf{F}_{ris} = \mathbf{P} + \mathbf{N} + \mathbf{F}_{s_{aria}} = 0$, dove la forza *statica* dell'aria, $\mathbf{F}_{s_{aria}}$, è la spinta di Archimede. Quindi $M_{pes} = N/g = M - d_{aria}V$. Gli studenti definiscono la massa del pallone $M = M_{pes} + d_{aria}V$ e compiono una prima revisione critica del concetto di massa: $M = P/g \neq M_{pes}$.

Ora gli studenti misurano, per interpolazione, l'accelerazione dei palloni vicino al punto di inversione del moto nei diversi rimbalzi, laddove $v \approx 0$. Le misure evidenziano che tale accelerazione $a_0 = a(v \approx 0)$ per quasi tutti i palloni è piuttosto lontana dal valore atteso $9,81 \text{ m/s}^2$. Di conseguenza, la massa misurata in condizioni statiche usando $\mathbf{F}_{ris}(v \approx 0)/a_0$ non coincide con la massa pesata del pallone! Quindi, $\mathbf{F}_{ris}(v \approx 0) \neq \mathbf{P} + \mathbf{F}_{s_{aria}}$.

Come si corregge il secondo principio di Newton? Gli studenti introducono una forza *dinamica* esercitata dall'aria $\mathbf{F}^{din_{aria}}(v \approx 0)$ per tener conto dell'interazione del pallone con l'aria anche quando il pallone è quasi fermo. Le misure mostrano che tale forza è legata solo all'inerzia dell'aria che viene accelerata dal pallone, cioè ha la forma $\mathbf{F}^{din_{aria}}(v \approx 0) = M_{idr}a_0$ dove M_{idr} rappresenta la massa *idrodinamica* che risulta proporzionale a $d_{aria}V$. La costante di proporzionalità $k = M_{idr}/d_{aria}V$ non varia durante il moto.

Infine, gli studenti introducono il concetto di massa efficace M_{eff} attraverso l'analogia tra la situazione statica e dinamica $M_{pes}g = M_{eff}a_0$ e dimostrano che $M_{eff} = M + M_{idr}$.

Il valore del coefficiente k (costante durante il moto, ma *a priori* differente da pallone a pallone) risulta invece indipendente dal pallone utilizzato in accordo con la teoria fisica che, per una sfera immersa in un oceano illimitato di fluido omogeneo incompressibile non viscoso in quiete, in situazioni di moto irrotazionale con velocità piccola rispetto alla velocità del suono nel fluido, prevede $k=1/2$.

Nei tre anni in cui è stato condotto il laboratorio, gli studenti hanno sempre trovato un discreto accordo con la teoria. Ma ciò che appare valido dal punto di vista didattico è la discussione critica del concetto di massa, tanto più convincente in quanto basata su un solido approccio sperimentale. Gli studenti ragionano sul fatto che la massa, lungi dall'essere una grandezza *intrinseca* di un corpo, può dipendere dalla sua interazione con l'ambiente.

8. Conclusioni

Che l'interazione con l'ambiente possa essere descritta attraverso una opportuna ridefinizione della massa di un corpo è un procedimento consolidato in fisica, ripreso come meccanismo di Higgs nel Modello Standard. A partire dall'intuizione di Newton, tale procedimento viene utilizzato nella trattazione del moto dei corpi in un fluido, del moto di una particella carica, del moto degli elettroni di conduzione in un reticolo cristallino ed anche in altri contesti. In tutti i casi le difficoltà della trattazione matematica sono

cospicue e l'astrattezza dei concetti coinvolti è alta. Per affrontare l'argomento nella scuola è stato allora utilizzato un approccio laboratoriale evitando estese esposizioni della teoria.

L'esperimento sul moto dei palloni in aria dal punto di vista storico riproduce delle misure che Poisson riferisce a Dubuat; dal punto di vista didattico consente di introdurre al livello di scuola secondaria il concetto di massa efficace che gli studenti incontreranno nei loro studi futuri di fisica. Il concetto viene costruito per spiegare perché la massa *misurata* del pallone è diversa in assenza o in presenza di interazione dinamica con l'aria. L'analogia con le misure di massa elettronica che danno esiti diversi se effettuate all'esterno ed all'interno del reticolo cristallino è evidente e rende l'esperimento particolarmente significativo.

Quindi gli studenti: 1) sono stati coinvolti attivamente nell'apprendimento attraverso il metodo sperimentale proprio della fisica; 2) hanno acquisito una visione globale in cui il pallone e l'aria sono un sistema interagente; 3) hanno giustificato l'introduzione del concetto di massa efficace per semplificare l'analisi del comportamento fisico di un sistema complesso.

Ringraziamenti

Si ringrazia la professoressa Marisa Michelini per le utili discussioni e per aver promosso questo studio nell'ambito del progetto IDIFO.

Bibliografia

- Agnoli P., D'Agostini G. (2004). *Why does the meter beat the second?* [online]. URL: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004physics..12078A>> [data di accesso: 11/02/2020].
- Bessel F.W. (1826). *Untersuchungen über die Länge des einfachen Secundenpendels*. Berlin; ristampa a cura di H. Bruns (1889). Leipzig: Engelmann.
- Bloch F. (1929). "Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern". *Zeitschrift für Physik*, 52 (7-8), pp. 555-600.
- Darrigol O. (2002). *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford: Oxford University Press.
- Drude P. (1900). "Zur Elektronentheorie der Metalle" *Annalen der Physik*, 306 (1), pp. 566-613, e 306(3), pp. 369-402.
- Eylon B., Ganiel U. (1990). "Macro-micro relationship: the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning". *International Journal of Science Education*, 12 (1), pp. 79-94.
- Hart C. (2008). "Models in Physics, Models for Physics Learning, and Why the Distinction may Matter in the Case of Electric Circuits". *Research in Science Education*, 38, pp. 529-544.

- Hoddeson L. *et al.* (eds.) (1992). *Out of the Crystal Maze*. New York: Oxford University Press.
- Jammer M. (1974). *Storia del concetto di massa nella fisica classica e moderna*. Milano: Feltrinelli.
- Kittel C. (2005). *Introduction to Solid State Physics*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Lorentz H.A. (1905). "The motion of electrons in metallic bodies III". *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings*, Series B, Physical Sciences, 7, pp. 684-691.
- Mizutani U. (2003). *Introduction to the Electron Theory of Metals*. London: Cambridge University Press.
- Newton I. (1686). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* [online]. URL: <www.gutenberg.org/files/28233/28233-pdf.pdf> [data di accesso: 11/02/2020].
- Olesko K. (1991). *Physics as a calling: Discipline and practice in the Königsberg seminar for physics*. Ithaca: Cornell University Press.
- Poisson S.D. (1831). "Mémoire sur les mouvements simultanés d'un pendule et de l'air environnant", *Mémoires de l'Académie des Sciences de l'Institut de France*, 11, pp. 521-582.
- Sommerfeld A. (1928). "Zur Elektronentheorie der Metalle auf Grund der Fermischen Statistik". *Zeitschrift für Physik*, 47 (1-2), pp. 1-32.
- Thomson J.J. (1881). "On the Electric and Magnetic Effects Produced by Motion of Electrified Bodies". *Philosophical Magazine*, 11, 229-249.
- Wilson A.H. (1953). *The Theory of Metals*. London: Cambridge University Press.
- Wittmann M.C., Steinberg R.N., Redish E.F. (2002). "Investigating student understanding of quantum physics: Spontaneous models of conductivity". *American Journal of Physics*, 70 (3) pp. 218-226.

Roland Eötvös: a key figure in modern physics, but also in geology and education

Vera Montalbano – Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell’Ambiente, Università di Siena; INFN, sezione di Pisa; Associazione per l’Insegnamento della Fisica, sezione di Siena – montalbano@unisi.it

Abstract: 2019 is the centenary of the death of Roland Eötvös (in Hungarian Eötvös Loránd, 1848-1919), a pioneer of high precision gravitational physics. His work, essential for modern physics, had significant consequences in geology and in education. The present work will show some aspects of his activity which reveal an innovator very close to the contemporary world.

Keywords: gravimetry, applied geology, physics teacher education.

1. Introduction

UNESCO celebrates in 2019 the 100th anniversary of the disappearance of Eötvös Loránd (Roland as he was called in German). Although well known, especially for results still useful in classical physics (the Eötvös rule, constant, and number, all related to surface tension of liquids) and in various fields of gravity (the Eötvös torsion balance, experiment, parameter, tensor, effect, and finally the Eötvös E physical unit¹), other aspects of his work are mostly unknown among physicists. In the next section, a short biography of Eötvös is recalled. In the following section, the scientist will be described, while in the next one the public roles he covered in Hungarian society will be examined. Finally, in the last section its scientific legacy is shown.

2. Eötvös’ life: an overview

Roland Eötvös was born in Buda, part of the city of Budapest in Hungary since 1873, during the most widespread revolutionary wave in European history. His family was an influential progressive aristocratic family, and his full name was Baron Loránd Eötvös de Vásárosnamény. The family traditions, deeply rooted in liberal thought, constantly influenced his ethics and social commitments. His father Baron József Eötvös (1813–1871), a well-known poet, writer, and liberal politician, played an important part in 19th

¹ The *Eötvös* unit (symbol E) is used in measuring the gradient in the acceleration of gravity with horizontal distance in CGS units ($1 E = 10^{-7}$ Gal/m). In SI units, $1 E = 10^{-9}$ s⁻². The largest component is the vertical gravity gradient, being about 3000 E on Earth (*gravity changes by $3 \cdot 10^{-6}$ m/s² per meter of elevation*). The horizontal components are approximately half this size; mixed gradients are below 100 E for the normal field. Gravity-gradient anomalies can be much larger and reach 1000 E in mountainous areas (ESA Earth Online).

century Hungarian intellectual and political life. His mother was Agnes Rosty de Barkócz (1825-1913), a member of an illustrious family with roots dating back to Middle Ages. His father served as Minister of Education and Cults of Hungary in the first independent Hungarian government in 1848, and again in 1867. His efforts led to the introduction of a general public school system and to laws on ethnic and religious emancipation.

Eötvös first studied law and science in parallel at the Pest University but soon switched to physics and went abroad in 1867 to study in Heidelberg where he attended physics lectures by Bunsen and Kirchhoff. Afterwards, he spent a year in Königsberg to follow Neumann's course on potential theory. In 1870, he took his Ph.D. in physics from the University of Heidelberg (doctoral advisor Hermann von Helmholtz) with a thesis on the relative motion of a light source, a problem due to Fizeau that constituted one of the first steps towards the theory of relativity. Returning to Hungary in 1871, he became professor of Experimental Physics in 1872 at the University of Budapest and the director of the Institute of Experimental Physics from 1878 until his death (Patkòs 2019, Kovács 2001 pp. 29-31).

Early works from 1876 to 1886 were dedicated to capillarity and surface tension, then his interests turned to terrestrial magnetism and finally to gravitation to which he dedicated his research for the rest of his life. In 1881 the Scientific Society in Hungary gave Eötvös the task to map the value of the gravitational acceleration in the Carpathian Basin. In his research on the spatial changes in gravitation, he developed special versions of Coulomb's torsion balance. Then, with a series of careful experiments started in 1909, he showed that the gravitational mass and the inertial mass are equivalent within one part on two hundred million (Bod *et al.* 1991). With this apparatus, the researchers of Eötvös' group reached the sensitivity level 10^{-9} and won the Benecke Prize awarded by the University of Götting in 1909 (Patkòs 2019, Kovács 2001 pp. 31-34).

Although Eötvös' original aim with his balance was the exact determination of the shape of the Earth through detailed investigation of the gravity field, his interest soon turned toward the use of the instrument in subsurface geological exploration. The impressive results obtained in geological exploration allowed him to find funds to foster a new field in geology: he became the founding father of applied geophysics. During his career, Eötvös received several awards (the French Cross of the Legion of Honour, the Serbian Saint Sava award, the Hungarian Franz Josef award, honorary doctorates from Jagiellonian University in Krakow, and Norwegian Royal Frederick University in Christiania/Oslo). Furthermore, he was nominated for the Nobel Prize in 1911, 1914, and 1917.

Following the socio-political traditions of his family, Eötvös served the case of science and education in several important boards and institutions (fig. 3). He was President of the Hungarian Academy of Sciences from 1889 till 1905. Eötvös played a role in establishing the International Bolyai Prize in Mathematics of the Academy, where he proposed to follow the rules of the then freshly established Nobel prize. The first prize went to the French mathematician Henri Poincaré in 1901. A student competition in physics and mathematics was started when Eötvös served as Minister of Education and Cults (1894/95). This was probably one of the first regularly organized student competitions in continental Europe and gave rise to the present International Physics Olympiad (IPhO).

Eötvös also gained renown lasting to the present day as a promoter of a new concept of teacher training, that is the idea of teacher-scholar.

Finally, Eötvös was a passionate high mountain climber and explorer. As an enthusiastic photographer, he took hundreds of pictures, also in 3D, during his mountaineering excursions. He was above all an excellent mountaineer. Together with his sisters Ilona and Rolanda, and the guides from Sesto Pusteria, Michel and Sepp Innerkofler, inaugurated mountaineering in the few explored Eastern Dolomites, opening new routes and also making first ascents to various summits. To remember his mountaineering achievements, the second summit of the Cadini group di Misurina was called the Eötvös summit.

3. Roland Eötvös, the scientist

3.1. On surface tension

As young assistant, Eötvös continued very thoroughly the study of the phenomenon of capillarity started already in Königsberg and discovered the so-called Eötvös reflection method for measuring surface tension. “He placed liquids into test tubes, which he kept sealed for years so that the surface tension of the liquids would remain constant. He employed light beams to measure the curvature of the liquid surface” (Kovács 2001, p. 47). His efforts resulted in the Eötvös rule for the temperature dependence of the surface tension, published in 1886 (Eötvös 1886): with increasing temperature, the surface tension of a liquid decreases until - at the critical temperature - it becomes zero

$$\gamma v^{2/3} = k(T_k - T)$$

where γ is the surface tension, v the molar volume of the liquid, $k = 2.1 \times 10^7 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol}^{2/3})$ the Eötvös constant, and T_k the critical temperature.

3.2. Testing the Equivalence Principle

3.2.1. A true challenge

The Equivalence Principle is one of the cornerstones of modern physics. The accuracy reached by Eötvös in his experiment practically made the equivalence of gravitational and centrifugal forces a well-established fact. He designed an ingenious new tool allowing to achieve a three orders of magnitude improvement over the previous experimental checks of the equivalence principle. The Eötvös-balance is an extremely sensitive equipment for comparing the effective force of weight exerted on different materials by the combined force of gravitational attraction and the inertial forces. It allows the preparation of maps of gravimetric anomalies, deviations in the effective gravitational acceleration from what is produced by a fully homogenous density distribution. Eötvös’ findings served as basis of Albert Einstein’s general theory of relativity, in which the principle of equivalence acts as the keystone.

The equality of bodies with different natures in the gravitational field was analyzed by Galileo in 1638 followed in 1687 by Newton, whose experiments with pendulums and different substances tested the principle with a precision of 10^{-3} . Bessel’s studies in 1830 improve to 10^{-5} by using similar experiments (Boniolo 1992, p. 461-464).

Such a research is desirable due to two reasons. First, this is due to the fact that Newton's supposition led to such a foundation, according to which we can find the mass of a body through its weight measured by a balance. It is required by the logic that the truth of this supposition should be proven up to at least such a precision, which can be reached in the weight, and this is much higher than $1/50,000$ part, even more than $1/1,000,000$ part. Second, this is due to the fact that the research produced by Newton and Bessel covered only bodies whose material structure was similar to each other, and manifested a small difference, while this problem is still remaining open for many liquid and gaseous bodies (Eötvös 2008, p. 7).

3.2.2. A new method: the Eötvös torsion balance

Let us start by the Eötvös considerations:

The force due to which the bodies located in the empty space fall onto the Earth, and which is known as gravity, is a sum of two components, namely — the gravitation of the Earth and the centrifugal force, which is due to the rotation of the Earth. These two components, in general, are neither equal to each other nor oppositely directed at each other; they create an angle with respect to each other, which is approximately the same as the angle of the geographical latitude. The direction of the resulting sum depends on these components; it is also clear that, at the same point on the Earth, since the centrifugal force of the same mass-bodies is the same, the gravity of these bodies should be different if the force of gravitation attracting each of these bodies is different (Eötvös 2008, p. 8).

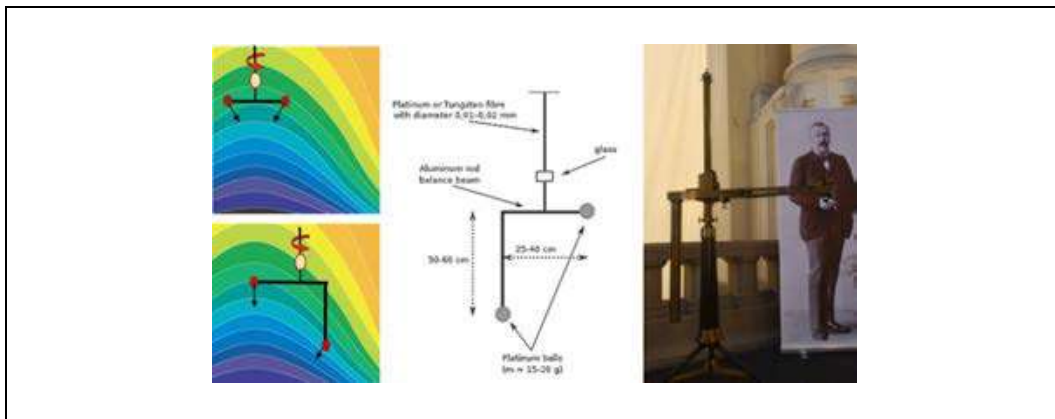


Fig. 1. On the left (top) it is shown a curvature variometer, in the bottom a horizontal variometer. In the middle, some details about the Eötvös torsion balance. On the right, a picture of a balance used in the geodesic measurement by Eötvös in geological exploration in the lobby of the Budapest Technical University (BME) exposed during the GIREP-ICPE-EPEC-MPTL 2019 Conference, Celebration of Eötvös Year 2019, Budapest 1-5 July 2019.

Eötvös' interest in gravity dates back to 1886 when he began his first experiments using the Coulomb/Cavendish balance. He improved the balance by "ageing" the torsion wire, thereby eliminating the inherent tensions introduced by the manufacturing process. This made the instrument capable of high precision measurements. He built two different types of torsion balance for carrying out his gravitational investigations: in the first type the

masses were at the same level (curvature variometer), in the second type (horizontal variometer), known as the Eötvös torsion balance, the masses were at different levels (Fig. 1) which measures the ‘gradient’ of gravity which is defined as the rate of change of gravity over a horizontal distance of 1 cm. This made the instrument capable of high precision measurements, performed before 1910 but fully published in 1922 (Eötvös *et al.* 1922), improving the accuracy to 10^{-9} . This accomplishment provided a solid experimental basis for fundamental assumptions of Einstein’s General Theory of Relativity in 1916.

3.2.3. Mapping gravitational anomalies

In 1881 a Europe-wide campaign for the determination of the gravitational force was the input for an accurate determination of the geoid geometry of the Earth surface.

The first regional survey on a larger area using the Eötvös balance took place in the winter of 1901 on the frozen Lake Balaton. Eötvös chose the mirror-like frozen surface of the lake to carry out his measurements so that he would not have to concern himself with the disturbing effect of topographic masses. From the results of his torsion balance survey, it was established that a tectonic line ran parallel to the axis of the lake. This is the first geological conclusion based on torsion balance measurements that became the standard technological history reference in textbooks of geodesy and applied geophysics for most part of the 20th century. Although Eötvös’ original aim with his balance was the exact determination of the shape of the Earth through detailed investigation of the gravity field, his interest turned toward the use of his instrument in subsurface geological exploration, developing geophysical equipment for searching for valuable minerals, oil, and other raw materials. A new branch of Applied Geophysics was born (Szabó 2016).

4. The public figure: institutional roles and political offices

In 1891 Eötvös founded the Mathematics and Physics Society and its periodical *Chronicle of Mathematics and Physics*. In the first number, he wrote: “*The school needs a good school system and good teachers. You might ask which is more important. Myself, I would prefer the latter*” (see Patkòs 2019). Then, he launched the idea of “teacher-scientist”, by continuing his previous statement: “*The quality of teaching depends in first place on the scientific preparedness of the teachers.*”

He expressed the same idea in his inaugural speech when he became rector of the University of Budapest in 1892: “*We have to educate high-school teachers as scientists in order they could teach their subject at the highest level*”. Moreover, he suggested that “*an activity full of enchantment will keep their ambitions awoken during a life career often lacking even the due recognition*” (Patkòs 2019).

Eötvös promoted a new concept of teacher training by suggesting already in 1878 to establish a teacher-training college modelled on the *École Normale*. When it served as Minister of Education and Cults he increased the budget of education, sextupled financial support for elementary school teachers, and organized the first in-service teacher training seminar in 1895, and physics teachers’ meetings have been operating for the last one

hundred years. In the same year, he founded József Eötvös College, an independent, self-governing teacher's training boarding-school (100 students/year, 30 stipends for students from poor families) with a high-intensity educational program (best library of the country, foreign language courses), with strict performance requirements. Until 1950, there were 400 high-school teachers and 81 members of the Hungarian Academy of Sciences educated there.

5. Legacy of Roland Eötvös

The sensitivity of the Eötvös balance could be exceeded only about half-century later by Dicke in 1964. The "Eöt-Wash Group" in the University of Washington reached the level 10^{-13} with a series of improved measurements started in 1987. Thus, he was a pioneer of high precision physics experiments, always stretching the accuracy to the actual limits of the measuring equipment, and the inventor of a method for the verification of the Weak Equivalence Principle, which for more than a century has determined the direction of research by its continuous adaptability to the progress of technology. The last step was in 2017, when the MICROSCOPE mission achieved a space test reaching the precision of 10^{-15} . Finally, he was a founder of institutions (Eötvös College) and organizations (Mathematical and Physical Society) of considerable social impact, and existing even today, thanks to their continuous adaptability to the changing social environment.

References

- Bod L., Fischbach E., Marx G., Náray-Ziegler M. (1991). "One hundred years of the Eötvös experiment". *Acta Physica Hungarica*, 69 (3-4), pp. 335-355.
- Boniolo G. (1992). "Theory and Experiment. The Case of Eötvös' Experiments". *The British Journal for the Philosophy of Science*, 43 (4), pp. 459-486.
- Eötvös R. (1886). "Ueber den Zusammenhang der Oberflächenspannung der Flüssigkeiten mit ihrem Molecularvolumen". *Annalen der Physik*, 263(3), 448-459.
- Eötvös (von), R., Pekár D., Fekete E. (1922). Beiträge zum gesetze der proportionalität von trägheit und gravität. *Annalen der Physik*, 373 (9), 11-66.
- Eötvös L. (2008). "On the gravitation produced by the Earth on different substances". *Abraham Zelmanov J*, 1 (6). (translation of the presentation held at the Hungarian Academy of Sciences on January 20, 1889)
- [ESA Earth Online]. URL: <<https://earth.esa.int/web/guest/-/gravity-in-detail-5728>> [access date: 30/12/2019].
- Kovács, L. (2001). *Eötvös Loránd, a tudós-tanár: Loránd Eötvös, Scientist-Teacher*. Szombathély: Studia Physica Savariensia, VIII.
- Patkòs A. (2019). "Scientist, educator, statesman – legacy of Roland Eötvös". GIREP-ICPE-EPEC-MPTL 2019 CONFERENCE, Teaching-learning contemporary physics, from research to practice, Budapest 1-5 July 2019.

Szabó, Z. (2016). “The history of the 125-year-old Eötvös torsion balance”. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 51 (2), pp. 273-293.

La storia della scienza nei curricula formativi preuniversitari

Carla Romagnino – Gruppo Nazionale di Storia della Fisica, AIF Cagliari –
carlaromagnino@tiscali.it

Abstract: The concept of a tenacious distinction between science and culture is still widespread. However, science should be part of our shared culture. A concrete contribution can be offered by introducing in pre-university studies an historical perspective and discussing the historical evolution of the technical and scientific disciplines and by presenting their protagonists.

The history of science may well help to show the unsustainability of the widespread stereotype of the contrast between cultural activities, on the one hand, and science, seen as purely utilitarian and instrumental knowledge, on the other. With historical perspective, scientific research highlights its interactions with other forms of cultural activity: philosophy, religion, literature, art, social sciences, etc. and shows how its complex languages were formed through interpolation with other forms of thought.

The author will discuss her own experience in the field, especially as a professor and a promoter - for many years (as long as eighteen) - of special schools devoted to high schools teachers, organized in the framework of the Physics History Group of the national Association for Physics Education (A.I.F.).

Keywords: Culture, History, Education, CGE models.

1. Introduzione

È di grande attualità il dibattito sull'importanza della storia nel curriculum scolastico. È noto l'allarme lanciato dagli storici dopo la scomparsa, nel 2018, della traccia di Storia dalle tipologie previste per l'esame di maturità. Si è temuto un percorso di marginalizzazione della storia, già iniziato con la diminuzione delle ore d'insegnamento negli istituti professionali. L'allarme sembra per ora rientrato in quanto l'attuale ministro alla Pubblica Istruzione ha dichiarato che tale tipologia sarà reintegrata. Ritengo tuttavia che non solo occorra vigilare per evitare che possano essere prese decisioni didatticamente dannose, ma che, anzi, di storia debbano nutrirsi tutte le discipline, comprese quelle scientifiche.

Esiste, infatti, una contraddizione che caratterizza la scuola italiana. Nelle discipline umanistiche si sente il bisogno di collegare le varie opere e i vari autori in un certo nesso cronologico. In generale insegniamo l'arte attraverso la storia dell'espressione artistica, la letteratura attraverso la storia degli scrittori e dei generi letterari, con una attenta lettura delle loro opere, insegniamo la filosofia attraverso la riflessione sui pensatori del passato.

Nelle discipline scientifiche, invece, è perseguito un obiettivo di informazione scientifica su teorie “vincenti”, per cui la scienza sembra essere un metodo certo e stabilizzato per descrivere i fenomeni. Per lo più si studiano le leggi e le teorie ufficialmente accreditate senza porsi il problema di capire quando, dove e perché sono nate. E si ritiene che un giovane possa fare a meno delle seppur minime nozioni sull’evoluzione storica della scienza e sulla personalità degli scienziati. Non si può non essere d’accordo con quanto scriveva il compianto Carlo Bernardini:

Nel contesto scolastico, le scienze appaiono come aspetti minori della formazione; soprattutto, come specialismi non obbligatori, non facenti parte di un patrimonio comune, non comunicanti con altri settori culturali.

2. Alcuni confronti tra le discipline scolastiche

Mi avventuro a fare qualche confronto. In letteratura italiana e in storia dell’arte si studia che, nel 1909 uscì il manifesto futurista di Filippo Marinetti. Giusto farlo, per la vasta risonanza che questo movimento ebbe in Europa aprendo la strada al rinnovamento in campo letterario, artistico e musicale. Ma giusto sarebbe anche sapere che, alcuni anni dopo, nel 1931, a Roma, promosso da Fermi e Corbino, ci fu il primo congresso di fisica nucleare cui parteciparono i maggiori fisici dell’epoca, e che fu importantissimo per gli sviluppi successivi della fisica nucleare e della scienza tutta.

Un altro esempio paradossale: gli studenti dell’ultimo anno del liceo sono obbligati a sapere che negli anni 1860-70 nacque il movimento letterario e artistico denominato Scapigliatura che peraltro ebbe una importanza abbastanza limitata per i successivi sviluppi letterari e per di più fu un fenomeno strettamente locale. Ebbene, negli stessi anni Maxwell, in Inghilterra, maturava la seconda grande unificazione teorica della storia della scienza portando a compimento, nel 1871, il suo Trattato in cui espone la teoria elettromagnetica della luce che portò, quella sì, a cambiamenti decisivi nella vita di ciascuno di noi. Per come la fisica è insegnata a scuola a malapena si conosce il nome di Maxwell - giusto perché lo si accosta alle sue equazioni-, ma niente si sa della sua storia scientifica ed umana.

C’è quindi un modo di insegnare le discipline scientifiche che le discrimina fortemente rispetto agli altri saperi. Un approccio storico può contribuire a farle comunicare con le altre discipline e, nel contempo, a demolire il mito della diversità della scienza dalle altre forme di cultura. Sarebbe perciò necessario che non solo gli insegnanti, ma anche gli autori di manuali scolastici, si mettessero al lavoro per trovare le correlazioni trasversali tra l’area scientifica e l’area cosiddetta umanistica mettendo in luce le differenze e le analogie nelle strategie di conoscenza e negli approcci alla complessità del mondo reale. Correlazioni che è facile trovare con l’arte di Leonardo o Brunelleschi o Piero della Francesca, impregnata com’è di cultura scientifica. Ma anche nelle opere di alcuni autori moderni vediamo che certi processi utilizzati, come l’astrazione, la semplificazione, la sperimentazione, la strutturazione, pur portando a risultati diversi, sono processi in perfetta analogia coi meccanismi fondamentali della fisica teorica. In letteratura gli esempi possono essere tanti, cito soltanto due nomi tra i più noti l’uno in campo scientifico e l’altro in campo umanistico.

Galileo Galilei è noto come il padre della scienza moderna, ma egli fu definito “*Uno dei più potenti artefici della parola italiana*”. Il ricorso alla lingua “volgare” invece che al latino, fu una scelta di campo che permetterà l’uso dell’italiano come lingua della nuova scienza. In particolare, nel suo *Dialogo sopra i due massimi sistemi* viene creata la prosa scientifica italiana: Galilei “inventa” e utilizza una lingua comprensibile ma precisa, pur utilizzando parole della lingua comune alle quali dà significato fisico. Tutto questo accompagnato da scorrevolezza, facilità di lettura, gradevole ricorso all’ironia. L’altro grande esempio è Giacomo Leopardi. Nell’immaginario comune il suo nome è legato soltanto alla sua attività di letterato e di poeta. Ma le radici del pensiero leopardiano vanno cercate nella sua ampia ed eclettica formazione culturale, in cui trovano notevole spazio le scienze antiche e contemporanee. Pochi sanno che il quindicenne Leopardi ha scritto un saggio di astronomia e che in alcune sue *Operette morali* e nello *Zibaldone* si parla di scienza.

Altra disciplina strettamente correlata alla scienza è la storia, intesa come disciplina umanistica. Mi chiedo come si possa pensare di insegnare la storia delle civiltà senza fare continuo riferimento alla storia delle scienze e delle tecniche.

Negli ultimi decenni si è posto l’accento sulla storia del Novecento. Bene, ma per gli studenti questo secolo è caratterizzato, soltanto da guerre e gravi rivolgimenti sociali e politici. Ma sul versante scientifico questo arco di tempo fu ricchissimo di scoperte e nuove teorie: la crisi della meccanica newtoniana con la nascita della relatività e della meccanica quantistica; la scoperta dell’atomo e dei suoi costituenti; la scoperta della fissione nucleare e le terribili conseguenze nei rapporti fra i popoli. E ci fu una vera *escalation* di invenzioni e applicazioni tecnologiche: gli esperimenti di Guglielmo Marconi sulla telegrafia senza fili e il conseguente sviluppo delle radiocomunicazioni e del radar.

Da questo semplice elenco è allora ovvio che i rivolgimenti sociali non furono determinati soltanto dai nuovi assetti politici, ma erano legati anche allo sviluppo tecnologico e quindi la storia dell’umanità deve comprendere la storia dello sviluppo scientifico e tecnologico. Quanto scritto finora pone l’accento sulle ragioni culturali a favore di un utilizzo della storia nell’insegnamento delle discipline scientifiche. Vale la pena esplicitare anche le ragioni didattiche di un approccio storico.

3. Il ruolo della storia nell’insegnamento delle discipline scientifiche

I giovani trovano noioso imparare una sfilza di informazioni e concetti e usare le formule “giuste” per risolvere esercizi su questioni che niente hanno a che fare con le loro esperienze quotidiane e che, la maggior parte delle volte, non sono legate agli altri argomenti trattati a scuola. E i libri di testo non aiutano: spesso sono troppo pedanti, utilizzano per lo più un linguaggio pomposo e propongono esperimenti improbabili. Nella maggior parte fanno una esposizione apodittica del sapere della scienza, sapere dal quale sono cancellate le controversie e le ragioni per cui una teoria viene sostituita da un’altra. La tendenza è

quella di coltivare una immagine statica ed estremamente semplificata della scienza con l'unica preoccupazione di trattare un numero enorme di argomenti¹.

Può allora essere d'aiuto sostituire problemi a nozioni e parlare di come l'indagine scientifica ha affrontato e risolto tali problemi. Inoltre, la storia della scienza può contribuire a superare, quelli che Bachelard² definisce gli "ostacoli epistemologici" connessi con l'apprendimento delle varie discipline.

Per alcuni concetti, ben chiariti e interpretati dagli storici, la storia fornisce un termine di paragone e suggerisce ipotesi per il superamento di tali ostacoli. Alcune idee di senso comune, infatti, formatesi nella mente degli studenti in modo spontaneo, persistono anche dopo aver affrontato studi di fisica o di chimica o di qualsivoglia altra disciplina scientifica. Questo fatto è accertato da numerose indagini condotte sia a livello di scuola secondaria sia a livello universitario. Buona parte degli studenti, cioè, sembra convivere con due paradigmi paralleli, del tutto indipendenti: uno per la scuola, utile a prendere un bel voto e essere promossi, l'altro utile a vivere la vita di tutti i giorni. Quel che più è grave è che, nella maggior parte dei casi, tali paradigmi non solo non si integrano a vicenda, ma non sembrano neppure essere in conflitto fra loro. Alcuni esempi storici permettono di fare riconoscere l'inadeguatezza di queste idee ingenue, chiarendo come i fisici del passato hanno dovuto affrontare il cambiamento e consentendo di trarre insegnamento dalle loro reazioni.

Allo stesso tempo, il far vedere che molti dei "misconcetti" posseduti dagli studenti sono stati rispettabili concetti posseduti dalla comunità scientifica nel passato, conforta lo studente dal punto di vista psicologico e lo prepara alla flessibilità³. E aiuta gli insegnanti in quanto essi, nel rendersi conto che alcuni concetti, che oggi nessuno più mette in dubbio, si sono fatti strada con molta lentezza presso la comunità scientifica; li rende consapevoli del fatto che cambiare la propria visione del mondo non è né semplice, né indolore⁴.

Si pone dunque il problema di come insegnare le discipline scientifiche con la storia affinché l'approccio storico possa risultare uno strumento metodologico efficace. Naturalmente ci sono approcci diversi alla storia della scienza. C'è chi considera la crescita del sapere come una evoluzione lenta e continua, e tutto ciò che gli scienziati fanno è continuare lo sforzo di chi li ha preceduti. Altri invece mettono l'accento sulla discontinuità: a un certo punto ci si trova costretti a rompere con la scienza fino ad allora accreditata e così sorgono le nuove teorie. E ancora: alcuni storici si occupano della storia interna alla disciplina. Cioè semplicemente si chiedono come si è sviluppato un concetto cercandone le radici unicamente riflettendo sulla disciplina, altri invece vedono nello sviluppo del sapere una continua interazione con le esigenze della società in cui lo scienziato si trova a vivere.

¹ Sul dogmatismo che spesso caratterizza l'insegnamento delle discipline scientifiche è molto interessante la trascrizione di una conferenza tenuta da Paul Langevin nel 1926. Essa è reperibile su <https://www.academie-sciences.fr/fr/Pratiques-scientifiques-et-epistemologie/la-valeur-educative-de-l-histoire-des-sciences-par-paul-langevin.html>.

² Gaston Bachelard, filosofo della scienza ed epistemologo (1884-1962).

³ Secondo Jean Piaget, lo sviluppo del pensiero scientifico nel bambino fino alla sua maturità di ragionamento ricapitolerebbe la storia della scienza.

⁴ Pensiamo alla lentezza con cui è stata accettata in Italia la relatività speciale di Einstein. L'articolo è del 1905. Le prime adesioni cominciano ad aversi nel 1918. Ma solo nel 1928 possiamo dire che l'intera comunità scientifica l'aveva accolta in pieno.

È chiaro che un insegnante privilegerà questo o quel modo di fare storia a seconda della propria visione di scienza, ma nell'insegnamento sarebbe bene utilizzare, in occasioni diverse, i diversi tipi di approccio.

Sgombriamo subito il campo dalla possibilità che la storia della scienza possa essere usata per organizzare il curriculum, delineando lo sviluppo storico, a partire dai primordi, delle principali conoscenze scientifiche attuali. A qualunque livello non si può pensare di convertire l'insegnamento della disciplina in un insegnamento della storia. Ma non si deve arrivare all'eccesso opposto utilizzando la storia come arricchimento aneddotico, come a volte si fa al fine di far prendere fiato agli studenti al termine di uno studio complesso. Raccontare ad esempio che Galilei trasse ispirazione dal dondolio della lampada del Duomo di Pisa o che Newton formulò la legge di gravitazione osservando la caduta di una mela può essere divertente, ma per i ragazzi può soltanto essere una distrazione momentanea, non è un modo per trovare soluzione ai problemi dell'insegnamento / apprendimento delle discipline scientifiche. Ciò che può essere utile è riflettere sul modo in cui si costruisce la conoscenza scientifica.

Per ottenere questo si possono fare diverse cose che possono essere suddivise per tipologia solo per semplicità di ragionamento, ma che, lungo il corso di studi di una qualsiasi disciplina scientifica, dovrebbero essere utilizzate e integrarsi a vicenda. Di ciascuna tipologia saranno dati alcuni esempi.

- Fare piccole ricerche storiche sull'origine delle parole della scienza.
- Arricchire un corso sistematico disciplinare con lo studio di casi storici particolarmente significativi avendo l'accortezza di scegliere situazioni il cui excursus storico non sia troppo vasto, per evitare dispersioni didatticamente dannose.
- Raccontare le vicende umane e scientifiche di singoli scienziati.
- Utilizzare le memorie originali.
- Ricostruire esperimenti storici o recuperare strumenti antichi

Con la prima tipologia si intende ricostruire il contesto sociale e scientifico in cui nascono alcune parole della scienza e scoprire come i "termini" non sono strumenti asettici, ma seguono da vicino le trasformazioni della "visione del mondo", registrando il passaggio da una visione qualitativa ad una quantitativa, risentendo di contingenze culturali e sociali. Mettere in evidenza da dove proviene il vocabolario della scienza può essere un buon punto di partenza per aiutare gli studenti a capire meglio il concetto e allo stesso tempo scoprire lo stretto legame tra scienza e società, osservando che la condizione sociale dello scopritore determina il modo di comunicare la sua scoperta.

Come esempio prendiamo la parola "carica" elettrica. Benjamin Franklin (1706 – 1799), oltre che scienziato, era un uomo politico statunitense dalla multiforme attività. Come amministratore ed economista aveva acquisito una mentalità da contabile. Nello studio dei fenomeni elettrici (era stato particolarmente colpito dai fenomeni legati alla bottiglia di Leyda), si convinse che, quando un corpo manifesta uno stato elettrico, c'è in esso qualcosa in più o qualcosa in meno. La parola carica, charge in inglese, indica, anche in italiano, l'operazione del caricare, del porre qualcosa sopra o dentro un qualcos'altro. Ecco che nasce una nuova espressione "carica elettrica" in riferimento a qualcosa che andava ad

aggiungersi alla bottiglia. Scriveva Franklin: “Quando uso i termini “caricare o scaricare” la bottiglia, lo faccio in conformità al significato delle parole, in mancanza di altre più adatte”.

Altra parola ricca di significato è la parola entropia. Scriveva Rupert Clausius (1822-1888):

Se vogliamo indicare “S” con un nome appropriato, possiamo dire che essa è “il contenuto di trasformazione” di un corpo, nello stesso modo in cui diciamo che la quantità “U” è il “contenuto di calore e lavoro” di un corpo. [...] poiché ritengo che sia meglio trarre i nomi di quantità come queste ... dal linguaggio degli antichi, così che possano essere introdotti senza modificazioni in tutte le lingue moderne, propongo ... entropia dal termine greco..., trasformazione”. [...] Ho intenzionalmente formato la parola “entropia” affinché fosse il più possibile simile ad energia, in quanto entrambe queste quantità ... sono così strettamente connesse l’una all’altra per quanto riguarda il loro significato fisico che mi è parsa utile una certa analogia nei loro nomi.

D’altra parte, quando non si riesce a trovare subito una terminologia appropriata per la spiegazione di fatti nuovi, si rischia di creare seri problemi di comprensione dei fenomeni. Come successe coi termini “dualismo onda-corpuscolo”, la cui ambiguità Feynman descrisse così

Qualche bello spirito dichiarò che la luce era onda di lunedì, mercoledì e venerdì, e particelle di martedì, giovedì e sabato; quanto alla domenica bisognava pensarci su.

L’ambiguità cessò quando, con l’assunto che la luce è costituita da fotoni, parola utilizzata a partire dal 1926, si riuscì a spiegarne il comportamento.

Riguardo alla seconda tipologia, ritengo sia utile ricorrere allo “studio di casi storici”, per integrare le conoscenze di oggi con la riflessione su come sono nate, quali sono state le motivazioni degli scienziati, quali i loro strumenti concettuali o, perché no, i loro stati d’animo.

Come esempio mi riferirò al fenomeno dell’induzione elettromagnetica, che comporta la comprensione di concetti complessi non facili per gli studenti. Già, perché l’elettromagnetismo normalmente lo si fa studiare attraverso una serie di leggi che non vengono concatenate fra loro se non nei passaggi matematici o nel controllo dimensionale: la legge di Coulomb, la definizione di campo, il teorema di Gauss, le leggi di Ohm e poi l’esperimento di Ørsted, le leggi di Ampère e infine le leggi dell’induzione. Tutto, la maggior parte delle volte, senza far cenno che Coulomb, alla fine del ‘700, identificava l’interazione tra cariche all’interazione newtoniana tra masse, al fatto che le sue convinzioni furono messe in crisi dall’esperimento di Ørsted del 1820, cui Ørsted giunse perché, studioso di Shelling e dei principi della Naturphilosophie, aveva una fede quasi mistica nell’unità della natura e dunque era alla ricerca di una relazione tra fenomeni elettrici e fenomeni magnetici.

E ancora senza far cenno che all'esperimento di Ørsted si cercava di dare spiegazione nei modi più differenti, a seconda delle convinzioni degli scienziati in gioco, con Ampère, fervente newtoniano e Faraday che, rifuggendo dalle teorie a priori, si appella all'esperimento e arriva prima al concetto di linee di forza e poi alla comprensione del fenomeno dell'induzione elettromagnetica. È interessante capire come e perché Faraday ci arrivò, sapere che negli anni in cui lo fece (siamo nel 1831) l'uso sempre più diffuso delle macchine a vapore lo portò a studiare la possibilità di produrre elettricità mediante il magnetismo. Partì dall'idea che come un corpo carico induce cariche elettriche su un altro conduttore, così una corrente circolante in un circuito deve indurre una corrente su un altro circuito. Realizzò il famoso esperimento con due circuiti avvolti in un anello di legno [inserir figura], per il quale si era ispirato alla teoria ondulatoria della luce, essendosi occupato anche di ottica⁵ e infine, sempre sulla base degli esperimenti fatti, arrivò alla comprensione del fenomeno dell'induzione elettromagnetica

Questa storia, che poi prosegue con Maxwell, fatta bene, con tutti i passaggi necessari, permette di rendersi conto che la scienza, nel suo continuo divenire, non ha punti di arrivo, ma punti di partenza; che in essa non ci sono certezze e stabilità ma interpretazioni e teorie sempre suscettibili di modifiche; che studiare fisica vuole dire anche conoscere il travaglio che precede le conquiste, le difficoltà che ne accompagnano il cammino, i successi e i fallimenti che segnano il suo progredire e che anche la formazione filosofica dello scienziato è importante nel determinare l'impostazione del lavoro di ricerca.

In altri casi una "ricerca storica" può permetterci di discutere di questioni di carattere etico o sociale e di collocare quindi la scienza in un contesto corretto. Si consideri come esempio una ricerca sulla nascita del nucleare. Nel 1964, in piena guerra fredda, gli storici della scienza Rupert Hall e Marie Boas Hall scrivevano:

La più drammatica e affascinante delle avventure scientifiche, alla quale sono stati dedicati i migliori sforzi dell'uomo, è finita nella minaccia che il genere umano possa venire estinto. Tuttavia, fino al 1945, quale avventura splendida, lineare vi è stata! [...]

Far rivivere agli studenti questa avventura serve anche a farli riflettere sull'uso "buono o cattivo" delle scoperte scientifiche o su altri problemi, come per esempio quello delle donne nella scienza. Nel percorrere la storia del nucleare si vengono a conoscere gruppi o movimenti pacifisti come il Pugwash, o l'USPID e possiamo parlare di cultura della pace o ci si imbatte in Lise Meitner e può essere interessante discutere sul perché il numero delle scienziate ancora oggi sia di gran lunga inferiore rispetto agli scienziati. Si tratta di argomenti trasversali che uniscono i saperi invece che separarli e il loro sviluppo permette agli studenti di imparare assai più che un'arida sequenza di formule.

Un altro modo di utilizzare la storia della fisica è ricostruire assieme agli studenti la biografia degli scienziati, ponendo l'attenzione sul processo creativo e sulla fatica dell'uomo o della donna scienziato nel portare avanti la propria ricerca. Non è chiaro il motivo per cui tutti debbano sapere che Alessandro Manzoni impiegò vent'anni a stendere

⁵ Si aspettava che, chiudendo il circuito, un'onda di elettricità si propagasse attraverso l'anello fino.

la versione definitiva dei Promessi Sposi e non sia necessario sapere che, per dirla alla Max Perutz, anche “*la ricerca scientifica è un’impresa piena di passione*” che comporta impegno, dedizione e fatica quotidiani, come può chiaramente evincersi dalla narrazione delle storie dei protagonisti dell’avventura scientifica. Ovvio che quindi che “biografia” non deve essere scambiata per “agiografia” con la quale lo scienziato appare come un benefattore dell’umanità che improvvisamente esclama il suo *Eureka!*

Un altro modo di aiutare gli studenti a comprendere il sapere scientifico è quello di utilizzare criticamente le informazioni usando documenti originali quali: memorie storiche, articoli scientifici, articoli divulgativi, ecc...

La lettura dei documenti è un aspetto purtroppo del tutto trascurato nell’insegnamento scientifico, anche se in realtà sia nei vecchi programmi sia nelle attuali indicazioni ministeriali se ne raccomanda l’uso. Studiando i documenti, infatti, lo studente impara la scienza dal punto di vista del ricercatore, ne riconosce i metodi e apprende come, sulla base di una conoscenza stabilizzata, nasce un nuovo paradigma. Ancora una volta si deve constatare la dicotomia tra l’insegnamento umanistico e quello scientifico. Si leggono i classici greci e latini, le opere dei grandi letterati e poeti, da Dante a Quasimodo, le commedie e le tragedie che hanno dato vita al teatro ma neanche una pagina di Galileo o di Einstein.

È difficile che i ragazzi apprendano con chiarezza il principio d’inerzia. La concezione aristotelica di “moto violento” è assai diffusa nell’opinione comune, così come resta l’idea che se un corpo pian piano si ferma “*è perché la sua forza si è esaurita*”. La lettura e il commento della descrizione dell’esperimento ideale con i piani inclinati fatta da Galileo nel *Dialogo intorno a due massimi sistemi* può essere utile a chiarire sia il concetto d’inerzia sia quello di attrito, in modo efficace. E, sempre a proposito di Galilei, non possiamo non leggere in classe il famosissimo brano “*Rinserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coperta di alcun gran naviglio ...*” tratto dal *Dialogo sopra i due massimi sistemi* con la sua prosa elegante e armoniosa, permettendoci di fare fisica anche con un occhio alla letteratura.

Da questo punto di vista Galilei è una vera miniera. Non dovrebbe mancare nel bagaglio culturale di ciascun giovane la lettura del *Sidereus Nuncius*. Nel leggerne alcuni brani si può passare allo studio della evoluzione del telescopio e capire come esso fu il primo vero strumento che estese i sensi dell’uomo, permettendo di vedere cose che l’occhio umano non poteva distinguere. La sua invenzione non solo permise a Galilei di scoprire “cose mirabili”, aprendo la strada alla conoscenza dell’universo fisico, ma influenzò grandemente altri campi del sapere. Si può allora riflettere sul ruolo della tecnologia nello sviluppo della scienza.

La lettura dei documenti, il loro esame ci aiuta anche a capire perché lo scienziato si è interessato di questo o quel problema. E quindi accorgerci che anche quando tratta di caduta dei gravi, Galilei ha come scopo la confutazione della visione aristotelica del mondo. O scoprire che Einstein arriva a rivoluzionare i concetti di spazio e tempo e a introdurre il principio di relatività partendo dalla necessità di eliminare l’asimmetria insita nella descrizione dei fenomeni di interazione tra magneti e conduttori o che introduce il quanto di luce avendo fatto una lucida riflessione sulla antinomia continuo/discreto in riferimento all’esistenza di “*una profonda differenza formale*” tra i due quadri teorici disponibili per descrivere i processi di generazione e trasformazione della luce. O, infine, che si

occupò dei moti browniani anche per convincere il mondo scientifico della validità della teoria atomica.

Nelle righe precedenti si è scritto di come possa essere utile “raccontare” uno scienziato. Ebbene, è bello leggere come Galilei, nella lettera alla granduchessa Cristina di Lorena, difende in modo appassionato, oltre che con logica stringente, la sua visione del mondo, oppure con quale ironia risponde ai suoi detrattori nella lettera del maggio del 1611 in difesa dei Pianeti Medicei:

Ma quel dire che non influischino perché sono così piccoli, per dedurne poi (per quanto mi immagino) che, come superflui ed inefficaci, non siano degni di esser considerati e stimati [...]”Chi di sano intelletto misurerà dalla sola mole la virtù e perfezione delle cose? E chi dirà che le zucche vinchino di nobiltà il pepe o i garofani, o che le oche tolghino il pregio a i rosignuoli? (Galilei 1984a)

Oppure venire a sapere che quando Einstein capì che la relatività generale era in grado di spiegare la rotazione secolare dell’orbita di Mercurio scrisse a Ehrenfest (1916):

Per alcuni giorni sono rimasto fuori di me per l’eccitazione e la gioia

o leggerne il turbamento quando nella lettera a Born del 1920, scrive

La faccenda della causalità tormenta anche me... Mi dispiacerebbe moltissimo dover rinunciare alla causalità.

Ma c’è un problema che porta a una grande domanda. Gli insegnanti hanno la possibilità di organizzare un curriculum che preveda, almeno per alcuni argomenti, un approccio storico come descritto prima?

In generale, purtroppo, temo di no. E mentre negli anni in cui esistevano le Scuole di Specializzazione per l’Insegnamento, le SSIS, anche per le discipline scientifiche era previsto un corso di storia della disciplina, ora non più. La storia non si studia nei corsi di laurea e non si fa nei corsi di formazione per l’abilitazione all’insegnamento. Tuttavia, ritengo che gli insegnanti, nel momento in cui decidono di dedicarsi all’insegnamento di una certa disciplina debbano porsi il problema di conoscerne la storia, i suoi presupposti epistemologici, le opere storiche più importanti per capirne la portata culturale e chiarirne i concetti di base. E questo indipendentemente dall’età degli studenti cui rivolge e dall’indirizzo della scuola ove deve insegnare. In questo modo arriverà a possedere il bagaglio culturale indispensabile perché l’insegnamento abbia la credibilità necessaria e desti interesse presso i propri allievi. Poi, è chiaro, uno non può essere autodidatta: si farà aiutare frequentando corsi di formazione, leggendo libri, scambiando opinioni con colleghi ecc., come si fa normalmente per “imparare” a insegnare. Tra le varie iniziative sono da citare *le Scuole di Storia della Fisica* portate avanti annualmente dall’AIF fin dal 2001. Queste scuole vedono riuniti per cinque o sei intense giornate, insegnanti della scuola media superiore, docenti universitari, dottorandi e specializzandi, per una riflessione alta e serrata su argomenti di storia della fisica. L’esigenza di istituire queste scuole è nata appunto dalla

convinzione che gli insegnanti, per avere piena consapevolezza della propria disciplina, devono poterne riconoscere il suo valore culturale anche attraverso la sua storia, per abituare i giovani a guardare al passato per sapere dove andare ed essere attenti al presente. Le scuole sono organizzate in lezioni, prevalentemente al mattino, e lavori di gruppo nel pomeriggio. Le lezioni, grazie alla diversa personalità e ai diversi interessi dei docenti, si integrano fra loro in quanto alcuni prediligono la cosiddetta storia interna della disciplina nel senso di mostrare come i modelli conoscitivi della realtà cambiano per leggi intrinseche allo sviluppo scientifico, altri descrivono l'evoluzione storica della scienza inserendola nel contesto culturale e sociale dei luoghi in cui appare. I lavori di gruppo si svolgono sotto la guida di un coordinatore e, spesso, alla presenza dei docenti relatori. In essi si fanno gli approfondimenti necessari dal punto di vista disciplinare e didattico attraverso la lettura critica di memorie originali legate al tema generale della scuola, si presentano esperienze didattiche o si visionano e si commentano film. In questo modo si prende coscienza di come condurre una ricerca storica, di come affrontare alcuni nodi concettuali, di come organizzare attività trasferibili nella didattica.

La prossima scuola di storia della fisica si terrà a Novara dal 2 al 6 marzo 2020 su *Le grandezze fisiche e la loro misura*. Si approfondirà la genesi e lo sviluppo dei concetti relativi alle grandezze fisiche e alla loro misura, concetti indispensabili da un punto di vista disciplinare e importanti per meglio comprendere le dinamiche che legano ricerca scientifica e contesto sociale.

Bibliografia

- Dibattista L., Morgese F. (2012). *Il racconto della scienza. Digital storytelling in classe*. Roma: Armando Editore.
- Dibattista L. (2004). *Storia della scienza e didattica delle discipline scientifiche*. Roma: Armando Editore.
- Einstein A. (1988). *L'elettrodinamica dei corpi in movimento (1905)*, in *Opere scelte*, Bellone E. (a cura di). Torino: Bollati-Boringhieri, pp. 148-177.
- Einstein A. (1988). *Un punto di vista euristico relativo alla generazione e alla trasformazione della luce (1905)*, in *Opere scelte*, Bellone E. (a cura di). Torino: Bollati-Boringhieri, pp. 118-135.
- Einstein A. (1988). *Il moto in sospensione nei fluidi in quiete (1905)*, in *Opere scelte*, Bellone E. (a cura di). Torino: Bollati-Boringhieri, pp. 136-147.
- Galilei G. (1974a). *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano*, Giornata seconda, in *Galileo Galilei*, Collana Classici della Scienza, Vol. II. Torino: UTET, pp. 236-238.
- Galilei G. (1974b). *Discorsi e Dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Giornata terza, in *Galileo Galilei*, Collana Classici della Scienza, Vol. II, Torino: UTET, pp. 727-745.
- Galilei G. (1984a). *Lettera alla Granduchessa Cristina di Lorena e Lettera in difesa dei pianeti medicei*, in Del Lungo-Favaro (a cura di), *Galileo Galilei*. Firenze: Sansoni.
- Galilei G. (1984b). *Sidereus Nuncius*, in Del Lungo-Favaro (a cura di), *Galileo Galilei*. Firenze: Sansoni.

- Garin E., Lombardo Radice L. (1977). *Specializzazione scientifica e unità della cultura*. Firenze: Guaraldi.
- Hall R., Boas Hall M. (1979). *Storia della Scienza*, Bologna: il Mulino.
- Holton G. (1983). *L'immaginazione scientifica*, Torino: Einaudi.
- Marazzini P. (1996). *Nuove radiazioni, quanti e relatività in-Italia 1896-1925*. Pavia: La Goliardica Pavese.
- Pais A. (1986). *Sottile è il signore*. Torino: Boringhieri.
- Pallottino G. V. (2001). *Sfogliando i libri di testo di scienze per la scuola*, Il Principio di Precauzione: i costi della non-scienza. Milano: Associazione Galileo.
- Perutz M. (1989). *È necessaria la scienza?* Milano: Garzanti editore.
- Romagnino C. (1997). “Fascino ed efficacia dell’approccio storico nella didattica della fisica”, *Il Giornale di Fisica*, XXXVIII, 3, pp. 163-169.

A Logical analysis of the Newtonian concept of mass and modern applications

Angelo Pagano – INFN sezione di Catania – angelo.pagano@ct.infn.it
Emanuele V. Pagano – INFN Laboratori nazionali del Sud-Catania –
epagano@lns.infn.it

Abstract: The Newtonian concept of mass (NCM) is revisited. It is shown that Mach's early criticism against NCM, well known to a general reader, was erroneous. However, the Newtonian concept of *quantitas materiae* is found to be different from the concept of *inertial mass*, in contrast with Newton's hypothesis. The two concepts are discussed in the frame of modern applications, such as, nuclear reactions. The reaction Q value equations deduced in agreement with the Newtonian paradigm are formally identical to the ones used in the special-relativistic mass-energy equivalence formula.

Keywords: physical quantities, Newtonian mass, nuclear reactions.

1. Introduction

Newton's mass-definition as *quantitas materiae* takes into account, historically, Boyle's experiences on compressible gases (Jammer 1961, preface vii). Newton's basic mass definition:

Quantitas materiae est mensura ejusdem orta ex illius densitate et magnitudine conjunctim. Corpus duplo densius in duplo spatio quadruplum est. Hanc quantitatem per nomen *corporis* vel *massae* designo

is reported in the *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* and in the references (Newton 1947; Newton 1962, p. 241). His re-examination is also useful for didactic purposes in view of Burniston Brown's early observation:

....one of the most surprising facts in the history of physics it is the confusion that surrounds the definition of the fundamental concept of dynamics: the mass. (Brown 1960, p. 475)

Philosopher and Physicist Ernest Mach criticized Newton's definition (1883). Mach's reasoning is (partially) reported, for the clarity of the presentation, as follows:

With regard to the concept of "mass" it is to be observed that the formulation of Newton, which defines mass to be the quantity of mass of a body as defined by the product of its volume and density, is unfortunate. As we can only define density as

the mass of unit of volume, the circle is manifest. ... The concept of mass is not made clearer by describing mass as the product of the volume into the density, as density itself denotes simply the mass of unit of volume. The true definition of mass can be deduced only from the dynamical relations of bodies. (Mach 1942, chap. 2, sec.3)

Mach's main remarks states that Newton's definition was a circular tautology. The paper is organized as follows. In paragraph 2, the logical interpretation of NCM within the accepted theory of physical quantities is discussed and, consequently, Mach's early criticism is examined. In paragraph 3, the two historical Newtonian concepts of *quantitas materiae* and *inertial mass* are compared. The concept of *internal energy* of a body is deduced from NCM and some basic applications are discussed within the modern phenomenology of nuclear reactions. In paragraph 4, some examples of mass determinations as *quantitas materiae* are deduced for different atomic species. In paragraph 5, conclusive remarks are summarized.

2. Logical interpretation of NCM

Let us interpret Newton's definition by analyzing it in the frame of accepted theory of the physical quantities and related experimental methods (Bassière and Gaignebet 1966). The mass m , is (according to Newton's definition) a physical quantity Q satisfying the following relation (a):

$$(a) \quad m, m_0 \in Q; \exists \beta \in R : m = \beta m_0$$

(m and m_0 are two homogenous quantities, i.e., they both belong to the same class and R is the class of the real numbers). The quantity m_0 is the unitary quantity and β it the measure of m with respect to m_0 . Relation (a) corresponds to Newton's definition:

Quantitas materiae est mensura ejusdem....

Entities having volume and mass are called bodies, according Newton's terminology. The volume and the Newtonian mass are extensive quantities. For the Newtonian mass (as it is for the volume) additivity is fulfilled. The density measurements is an intensive quantity (like the temperature) and it was introduced by Newton to characterize bodies, as *porous* (Newton's terminology) or sensible bodies against *solid* or impenetrable bodies. The density has not the additivity property. The same paradigm was assumed by d'Alembert in his *Traité de Dynamique*. According to Newton, sensible bodies are a mixture of solids and vacuum (vacuum is used in the classical meaning of empty space).

Since the measured volume, W of a sensible body is an extensive quantity, it can be decomposed into n (arbitrary) parts, in such a way that:

$$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n .$$

Definition: If, whatever is $n \in N$, all the entities ($i = 1, n$, of volume W_i , are bodies (i. e., they have mass), then the body is a solid.

Sensible bodies are bounded (or confined) inside a sensible volume, satisfying the properties *i) – iv)* :

- i)* $W_{sensible-body} \geq W_{solid}$
- ii)* $W_{sensible-body} \geq W_{solid} + W_{vacuum}$
- iii)* $m_{vacuum} = 0$
- iv)* $m_{sensible-body} = m_{solid}$

It follows, necessarily, that for a (homogeneous) solid, the mass is a quantity proportional to the volume W ; let be : $W = \alpha W_0$ it follows:

$$b) m(\alpha W_0) = \alpha m(W_0) = \frac{W}{W_0} m(W_0) = \frac{m(W_0)}{W_0} W = \rho_S W.$$

The unitary volume of solids is W_0 and the universal constant of proportionality, ρ_S , is called the *solid density*.

We further analyze the concept of mass-density from the logical point of view and we abstract, in a first step, from the notion of time evolution (dynamics) by fixing a time t_0 (photogram).

Given the relations *(i)-(iv)* and *(b)* for the solid and sensitive body, the following Eq. (1) (Newton formulation) and Eq (2) are easily deduced:

$$mass_{sensible-body} = \rho_{sensible-body} \times W_{sensible-body} \quad (1)$$

with:

$$\rho_{sensible-body} = \rho_S (1 - W_{vacuum}/W_{sensible-body}) \quad (2)$$

or the ratio:

$$\rho_{sensible-body}/\rho_S = (1 - W_{vacuum}/W_{sensible-body}) \quad (2')$$

Therefore, a density of matter, given by Eq.(2), is associated to each sensible (bounded) body (left side of Eq.(1)). Eq. (1) represents the relation as it was given by Newton's basic definition (see above).

The relations in Eq. (1) and Eq. (2) are largely sufficient to justify all empirical observations, as in a context of classical macroscopic systems. It was largely used by Archimedes (Dijksterhuis 2014). It has to be noted that $W_{sensible-body}$ is a quantity determined by the boundary conditions corresponding to a given sensible body. In principle, it can be different at different times, following the dynamical evolution of the body. It is important to account for the following observation: in macroscopic physics, the density determination of a sensible body is obtained under well controlled boundary conditions and, as commonly understood, it is given by a proper time-averaging evaluation $\langle W \rangle$, as it is true for any given measurable quantity θ (Bassière and Gaignebet 1966, Blanc-Lapierre, Casal and Tortrat 1959):

$$\langle \theta \rangle = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \int \theta(t) dt \quad (3)$$

The applicability of the linear operator of Eq. (3) to the quantities, $W(t)$, $m(t)$ and $\rho(t)$, assures that Eq. (1) and Eq. (2) are also valid for the corresponding time-averaged quantities. The Eq. (1) (with the operation in Eq. 3) represents a fundamental property of the NCM, assuming the fundamental Newtonian concept of solid. As result of our logical analysis, no defective tautology is found in Newton's early formulation of mass as *quantity of matter*. Consequently, Mach's criticism has to be rejected. This latter conclusion is in agreement with the one given in the past by Enriques' classical work (Enriques 1914). However, as noticed by M. Jammer, Enriques' vindication of Newton's definition, although logically unimpeachable, «*sounds too artificial and too much ad hoc to be acceptable as historically true*» (Jammer 1961 p. 68). Our analysis of Eq. (1) avoids this latter criticism and it is more adherent to a didactic purpose. It also satisfies the requirement of the operational methods (Bridgman 1955); Eq.(2) establishing the necessary connection between empirically-measurable entities with the corresponding abstract-logical Newtonian elements. Evidently, as it is well known, the distinction between measurable entities and abstract-logical entities is a fundamental pre-requirement in Newton's work. In the following section we show that the NCM is also a valuable concept in the context of modern microscopic low-energy nuclear physics and it is the essential ingredient to support the notion of *inertial mass*.

3. Application of the NCM to nuclear reactions

It is a common opinion that some of the so-called "crucial" experiments performed in the first decades of 20th century in the field of atomic physics have triggered scientists to abandon the NCM in favor of the concept of *inertial mass* [see, as an example, the large debate at the beginning of the last century as promoted by the Italian Physical Society (Piola-Maggi 1907, p. 80)], m'_0 , as a quantity measuring the ratio between the applied force to a point-particle body (i.e., body of vanishing volume) and its acceleration, as obtained at vanishing velocity, i.e., the so called *rest mass* in the context of modern relativistic paradigm. As matter of fact, with the advent of relativistic theory, the total energy content of a body (as a whole), has been related to the inertial rest mass, m'_0 , by the relativistic equation:

$$E = m'_0 c^2 + K \quad (4)$$

In the right side of Eq. (4) the first term is interpreted as the energy content of the body at rest and the second term is the kinetic energy associated to the motion of the body as a whole (the motion of the center of mass system). The universal constant c is equal, as in the usual relativistic computation, to the speed of light in *vacuum* (in the sense of classical concept of empty space). For an isolated system undergoing a transition between two asymptotic configurations (e.g., a radioactive decay of a parent nucleus in two daughter nuclei), assuming (as a fundamental theorem) energy conservation,

the relativistic variation of the total kinetic energy in the decay is proportional to the total variation in the transition of the inertial mass at rest.

From Eq. (4), applied between the two asymptotic states of the decay, one obtains:

$$\Delta m'_0 c^2 = -\Delta K \quad (5)$$

Historically, at the atomic level, the first validation of formula Eq.5), within statistical errors of the order of $< 5\%$, was provided by K.T. Bainbridge in 1933 by reporting nuclear reaction experiments of Cockcroft- Walton and Lewis-Livingston-Lawrence between two light ions (Bainbridge 1939, p.123) . Formula Eq. 5) is nowadays largely used in describing and interpreting nuclear reactions and it is commonly used (together with data from magnetic deflection experiments) as the basic equation for inertial mass evaluation in nuclear reaction data (Audi, Wapstra 1995, p. 409).

In Newton's model the total energy (kinetics + potential) of a composite body a , i.e., a body thought as an ensemble of elements confined in a volume, E_a , is written as it follows:

$$E_a = K_a + \delta_a + const \quad (6)$$

In Eq.(6) K_a represents the kinetic energy of the Center of Mass (CM) of the body and δ_a is the internal energy of the body (that includes the internal Kinetic energy and the interaction-potential energy), relative to the CM System. The total energy is evaluated with respect to an arbitrary constant, $const$. In fact, only the variation in E_a assumes a measurable physical meaning and it is common to set $const = 0$. As it is expected, a variation of the internal energy of the body is univocally determined by the corresponding density variation, and vice-versa. Therefore, the kinetic energy variation of an isolated system undergoing a reaction is explained by the rearrangement of the internal structure of the bodies and the corresponding variation of the mass-density. In atomic physics, δ_a represents the well-known concept of the binding energy. Evidently, the value of δ_a , (assuming the value $const = 0$) is negative for bound systems.

To compare our results with the usual relativistic mass-energy relation equivalence, it is also useful to introduce, starting from the Newtonian mass, an effective mass m'' of the composite body a , by the formula:

$$m''_a = m_a + \frac{\delta_a}{c^2} \quad (7)$$

The universal energy-mass conversion constant c is taken to be equal to the light velocity in vacuum (as in Eq. (5)). A remarkable determination of formula Eq.(7) is given by the Von Weizsäcker-Bethe-Bacher mass formula for atomic nuclei (Preston-Bhaduri 1982, p. 202) in the frame of the Nuclear Liquid Drop Model (Myers-Swiatecki 1966, p.1) , i.e., the equation:

$$\begin{aligned} m''(N,Z) = & Zm_p + Nm_n \\ & - \left(15.68A - 18.56A^{\frac{2}{3}} - 0.717Z^2A^{-\frac{1}{3}} - 28.06(N-Z)^2A^{-1} \right. \\ & \left. + 33.22(N-Z)^2A^{-\frac{4}{3}} + \Delta_{pairing} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Equation Eq. (8) is a function of the proton (p) number Z , neutron (n) number N and baryonic number $A = Z+N$ of an atomic nucleus. Evidently, the term: $Zm_p + Nm_n$ plays the same role of the mass m in right side of Eq.(7) and it follows the additivity property of the *quantity of matter*, in the Newtonian interpretation.

In the semi-empirical mass formula Eq. (8), the proton (m_p) and neutron (m_n) inertial masses are given in units of MeV/c^2 , as it usual in nuclear physics. Their experimental values are $m_p \cong 938.28 MeV$ and $m_n \cong 939.57$, respectively. The numerical coefficients of Eq. (8) have been obtained by fitting experimental data. The three terms:

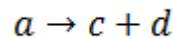
$$-28.06(N - Z)^2 A^{-1} + 33.22(N - Z)^2 A^{-\frac{4}{3}} + \Delta_{pairing}$$

were introduced to take into account the nature of quantal statistical effects for fermions (Myers-Swiatecki 1966). For an exhaustive discussion of formula Eq. (8) the reader is referred to chapter 6 in (Preston 1982, p. 202). Formula Eq. (8) represents a remarkable historical and powerful example of *effective mass* evaluation in modern nuclear physics, where it is commonly interpreted as *inertial mass*. The concept of effective mass, as it is given in Eq. (7), is interpreted, in this paper, to be equivalent to the notion of inertial mass at rest (Eq. (4)). Effective mass, m'' , differs from inertial mass at rest, m' , only by the way to be conceived. Definition of effective mass does not require any external force to be applied to the body at vanishing velocity. In the following, we consider, for simplicity, two relevant classical applications in which the role of *internal energy*, as introduced in Eq. (6), plays a decisive role.

An atomic nucleus is interpreted as a microscopic system of two kinds of elementary nucleons: neutrons (n) and protons (p). In this contribution, evidently, a nuclear reaction is interpreted as a rearrangement of nucleons in different configurations with respect to a given initial configuration.

Case 1: Disintegration of a nucleus into two separate parts

An atomic nucleus a spontaneously undergoes a splitting into two nuclei b and c . It is usual to schematize the phenomenon by the symbolic equation:



By applying the conservation law of the total energy in the asymptotic state, we can write (total energies of the bodies a, b, c : $E_i, i = a, b, c$):

$$E_a = E_b + E_c \quad (9)$$

Inserting Eq.(7) in Eq.(9) , the variation in kinetic energy (the Q value of the reaction, in nuclear terminology) is easily deduced:

$$Q = \Delta K_{(a \rightarrow b+c)} = (K_b + K_c) - K_a = \delta_a - (\delta_b + \delta_c) \quad (10)$$

or

$$Q = \Delta K_{(a \rightarrow b+c)} = [m''_a - (m''_b + m''_c)] c^2 = \Delta m''_{(a \rightarrow b+c)} c^2 \quad (10')$$

The first member of the equality Eq.(10) (or Eq.(10')) is the *energy gain* of the reaction. It must be noted that the simple formula Eq. (10) is formally identical to the

one usually written in the frame of modern physics in describing Q values in nuclear reactions and/or decays. Due to the quantal character of atomic nuclei, the final decay is often characterized by the presence of *quanta* (like γ , leptons, etc.), produced by electromagnetic and/or weak interactions that cannot be included in our elementary analysis of NCM. However, in these decays, the transition energy associated with the quanta have to be added to the left side (kinetic energy term variation) of Eq.(10) or Eq.(10'), in order to account for energy conservation.

There are two relevant cases for the Q value equation:

$$\alpha) \delta_a \geq (\delta_b + \delta_c)$$

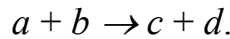
In this case (α) the disintegration would be energetically possible, and the variation of the internal energy would appear as kinetic energy in the final state. A well-known example comes from the spontaneous two body fission of heavy nuclei (Vandenbosh, Huzenga 1973, p.45) or in radioactive alpha particle decays (Evans 1955, p. 511). In these cases, the body (nucleus) is said to be unstable. Its exponential decay with the time is characterized by a well-defined decay time constant τ .

$$\beta) \delta_a \leq (\delta_b + \delta_c)$$

In this case (β) the disintegration takes place only by the trigger given by an external energy source providing at least a minimum of energy transfer that should be equal to the difference between the internal energies of the two states linked by the transition.

Case 2: Binary reactions

Two bodies a and b , are placed in contact (shocks, etc.). The bodies modify their internal motions, so that a rearrangement of the internal composition of the bodies could happens. It is usual to schematize the phenomenon by the usual symbols:



As already discussed in case 1) we obtain the equation:

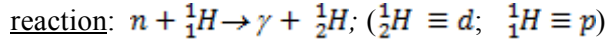
$$Q = \Delta K_{(a+b \rightarrow c+d)} = (K_c + K_d) - (K_a + K_b) = \delta_a + \delta_b - (\delta_c + \delta_d) \quad (11)$$

or

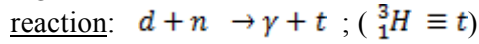
$$Q = \Delta K_{(a+b \rightarrow c+d)} = ((m''_a + m''_b) - (m''_c + m''_d)) c^2 = \Delta m'' c^2_{(a+b \rightarrow c+d)} \quad (11')$$

Similarly, to case 1) phenomena will be distinguished in exothermic processes and endothermic ones. Experimentally, Eq. (10) and Eq. (11) give us a way to measure the quantities of internal energy associated with a given microscopic body (e.g., such an atomic nucleus). The measurements of the internal energies of the composite bodies can be measured and tabulated. Therefore, these tabulations can be used to predict the energy gain of nuclear reactions in stable or unknown (exotic) nuclei. In the following we show some examples of internal energy determination, starting from well-established available reaction data for light nuclei. Also, as in case 1), the final transition is often characterized by the presence of *quanta* and the corresponding transition energies are added to the first kinetic energy term of Eq. (11).

Using experimental Q values (first member of Eq. (11)), as given in reaction data tables (Audi, Wapstra 1995, p. 409), a chain of internal energies (or binding energies, using the convention in nuclear structure) could be determined, as it shown by the following two examples:



The experimental Q value for this (fusion) reaction is $Q \cong + 2.224 \text{ MeV}$ (exothermic process). In our context the only composite particle is the deuteron d , consequently, it is assumed $\delta_p=0$. and $\delta_n=0$. By using Eq. (11), we get the equation: $(E_\gamma + K_d) - (K_n + K_p) = Q = \delta_d$; so that, the internal deuteron energy is determined, i.e., $\delta_d = -2.224 \text{ MeV}$



The experimental Q value for this (fusion) reaction is $Q \cong + 6.251 \text{ MeV}$; we get the equation: $(E_\gamma + K_t) - (K_d + K_n) = Q = \delta_d - \delta_t$; consequently (having determined δ_d) we obtain: $\delta_t = -7.713 \text{ MeV}$.

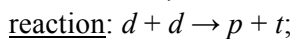
By extending the above procedure to the known tabulated reaction Q values, results are obtained and shown in the Table of Fig. 1, for a few examples.

<i>Isotope</i>	$\delta_a(\text{Mev})$	<i>Isotope</i>	$\delta_a(\text{MeV})$	<i>Isotope</i>	$\delta_a(\text{MeV})$
n	0.	${}^5_3\text{Li}$	-26.297	${}^{10}_4\text{Be}$	-64.770
p	0.	${}^6_3\text{Li}$	-31.884	${}^8_5\text{B}$	-29.910
d	-2.224	${}^7_3\text{Li}$	-34.104	${}^9_5\text{B}$	-56.104
t	-8.475	${}^8_3\text{Li}$	-36.136	${}^{10}_5\text{B}$	-59.513
${}^3_2\text{He}$	-7.713	${}^6_4\text{Be}$	-26.823	${}^{11}_5\text{B}$	-70.964
${}^4_2\text{He}$	-28.196	${}^7_4\text{Be}$	-32.460	${}^{10}_6\text{C}$	-55.120
${}^5_2\text{He}$	-27.090	${}^9_4\text{Be}$	-57.954	${}^{12}_6\text{C}$	-86.825

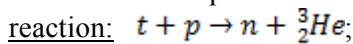
Fig. 1. Internal energy obtained by formula Eq.(10)

Evidently, internal energy can be used, as in the Table of Fig. 1, to predict Q values for new reactions, when all the internal energies of the binary reaction : $a+b \rightarrow c+d$ are known.

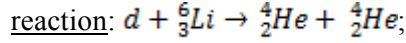
In the following (few examples are reported), comparisons with predictions of formula Eq.(11) and experimental values (Audi, Wapstra 1995, p. 409) are given for few test reactions, as relevant examples:



the Q value = $+ 4.027 \text{ MeV}$ is predicted from the Table in Fig. 1. It is in good agreement with the experimental value $Q_{exp.} = + 4.034 \text{ MeV}$



the Q value = -0.762 MeV is predicted from the Table in Fig.1. It is in good agreement with the experimental value $Q_{exp.} = -0.764 \text{ MeV}$



the Q value = $+22.286 \text{ MeV}$ is predicted from the Table in Fig.1. It is in good agreement with the experimental value $Q_{exp.} = +22.376 \text{ MeV}$. The experimental Q value is reported within an accuracy of 2% in the literature (Audi, Wapstra 1995, p. 409).

Formulas Eq. (10) and Eq. (11) are formally identical to the common reaction Q value equations largely used in modern nuclear physics; so it is not surprising that the experimental results on Q reactions systematics are easily obtained in our classical analysis, that is based on internal energy concept of a composite body, as relevant application of NCM. Evidently, as it is also indicated in the Table of Figure 1, internal energies corresponding to elementary neutrons and protons constituents are assumed to be the ones for solid bodies ($\delta_a = 0$). One should note that these latter assumptions are valid for nuclear phenomena (low energy limit) where sub-nucleonic degrees of freedom are to be considered as being frozen. Consequently, this model is not suitable to predict results involving sub-nucleonic degrees of freedom and (evidently) concepts such as, creation or annihilation of particles, are out of the present analysis.

4. Quantity of matter determination for atomic nuclei

As it is evident from Eq. (10) and Eq. (11), the internal energy determinations, as shown in the Table of Fig.1, are the consequence of the additivity of the classical energy concept, as given in Eq(6). However, starting from the relation Eq. (7), it is possible to evaluate the *quantitas materiae*, m , if the *effective* (or, equivalently, inertial mass m') mass, m'' , is known by nuclear experiments. Starting from Eq. (7), by inverting Eq.(7), it is deduced:

$$m_a = m''_a - \frac{\delta_a}{c^2} \quad (7')$$

Evidently, for bounded systems (see analysis above) $\delta_a \leq 0$. As a consequence, $m_a \geq m''_a$, i.e., mass as *quantity of matter* is larger than the mass as *effective or inertial mass*; the equality being valid only for an ensemble of non-interacting elementary masses, like the system of the free nucleons: $Zm_p + Nm_n$ in Eq.(8).

Experimental nuclear reaction data, during the last century, produced a large number of inertial masses, m' , for many nuclear species (Audi, Wapstra 1995). In nuclear physics, the evaluation of the nuclear mass (inertial mass) of a given nuclide with $A = Z + N$ nucleons is obtained by the experimental (indeed empirically determined) concept of *Mass Excess* formula $\Delta = m' - A$, given in MeV unit (or in atomic mass unit, $u = \frac{1}{NA} = 931.4943228 \text{ MeV}$; NA is Avogadro's number) with $\Delta({}^{12}\text{C}) = 0$, by definition. The inertial mass is easily calculated by each nuclide, as follows:

$$m(N, Z)_{exp.} = A(N, Z) + \Delta(N, Z)_{exp.} \text{ (exp. = experimental)}.$$

Consequently, using the tabulated values of Δ (Audi, Wapstra 1995), we evaluated the Newtonian mass, m , according to Eq.(7') , as follows:

$$m(N, Z)_{exp.} = m'(Z, N)_{exp.} - \frac{\delta_{(Z, N)}}{c^2}$$

where $\frac{\delta_{(Z, N)}}{c^2}$ is taken by the Table of Fig. 1., for each nuclide.

As an important result, the Newtonian masses for the isotopes included in the Table of Fig. 1 as extracted from the experimental data by using Eq. (7'), are equal (within the experimental errors) to the determination of the mass as evaluated by the free-nucleon mass formula: $Zm_p + Nm_n$ (see Eq.(8)). The differences between our empirical mass evaluations and the additive formula $Zm_p + Nm_n$ are included in the accuracy parameter:

$$\|(m(N, Z) - (Zm_p + Nm_n)) / (Zm_p + Nm_n)\| \leq 0.05\%$$

and the values of $m(N, Z)$ have been found systematically, slightly lower than $(Zm_p + Nm_n)$, for any nuclide. However, at this stage, it has to be noted that experimental inertial masses, as in (Audi, Wapstra 1995), have been obtained by complex statistical mixing of nuclear data extracted both by electro-magnetic methods or nuclear reaction data. Our empirical analysis based on Eq. (7') supports the idea that the variation of the inertial mass of a body a undergoing a transition from bounded constituents to unbounded free constituents is simple related by Eq. (7), as follows:

$$\Delta m'_a c^2 = \delta_a \quad (12)$$

which has similarity (although a different interpretation) with the relativistic mass-energy equivalence equation Eq. (5). It has to be noted that Newton did not distinguish between *quantitas materiae* and *inertial mass*, although, from the operational point of view (Bridgman 1955), the two quantities, m and m' , should be different. The first one has no logical relation with the status of internal motion of the complex body: it is an absolute quantity; while the second one, as empirically determined above by Eq. (7'), is related to the internal energy content of the body (kinetic + potential): it is a relative quantity and it does not satisfy the additivity properties. Consequently, inertial mass could be locally changed, according to our observations, by the action of strong (relatively to internal forces) external forces acting upon the individual constituents or by violent two (or more) body collisions inducing excitation energy in the internal structure, and, so, modifying their status of motion (indeed the ground state Fermi Motion, in the case of nuclei). We have shown how the Newtonian mass could be reconstructed starting from inertial mass determination.

5. Conclusion

In this paper, the Newtonian concept of mass (NCM), as *quantitas materiae* has been revisited. The paper presents some logical and historical considerations that are very useful for a presentation of the concept of mass for both didactic and research purposes. The crucial role of *internal energy* has been also discussed and the useful concept of *effective mass* (as distinct from *quantitas materiae*) was derived, as a natural consequence of the NCM. It is argued that the *effective mass* plays the same role of *inertial*

mass in modern nuclear reaction Q values determinations. In contrast with Newton's assumption *inertial mass* is not quantitatively equivalent to *quantitas materiae*. In particular, the physics case of nuclear reactions in atomic nuclei is examined. It is shown that in the contest of Newtonian physics, the kinetic energy variation in specific transitions (gain or loss of kinetic energy) between initial and final nuclear states in nuclear reactions are due to the rearrangement of the internal structure of the nuclei, changing their internal energy (kinetic plus interaction potential). In this Newtonian interpretation the relativistic energy-mass equivalence concept is not required.

However, a proportionality (similar to the relativistic energy-mass equivalence relation) between the variation of kinetic energy and variation of inertial mass is deduced. Newtonian masses as *quantitas materiae* have been determined at microscopic level, for the first time, by using modern reaction data. The elemental constituents of a nucleus (protons and neutrons) have to be considered as *indestructible bodies* or solids in agreement with the Newtonian model. It must be noted that the Newtonian assumption of *indestructibility* of elementary solid bodies has strong analogy with the modern concept of conservation of baryons number in a nuclear reaction. However, the phenomenology of reactions involving particle annihilations and creations is out of the present analysis. Besides, we do not make, at this stage of our investigation, specific analysis to pin-down other different concepts of masses such as, e.g., electromagnetic mass, gravitational mass. These latter concepts would require the notion of *field-interaction* that is not mentioned in our paper. Furthermore, sub-nucleonic degrees of freedom, e.g., annihilations and creations of elementary particles and variation of the *inertial mass* against velocity are not examined.

Acknowledgements

We are grateful to the SISFA 2019 organizers for the opportunity to discuss the paper as an invited talk.

References

- Aston F. W. (1922). *Isotopes*. London: Ed. Edward Arnold and Co..
- Audi G., Wapstra A.H. (1995). "The 1995 update to the atomic mass evaluation". *Nuclear Physics A*, 595, Issue 4, 25.
- Bainbridge K.T. (1939). "The Equivalence of Mass and Energy". *Physical Review*, 44, p. 123.
- Bassière M., Gaignebet E. (1966). *M rologie Générale - Th orie de la mesure - Les Instruments et leur employ*. Paris: Ed. DUNOD.
- Blanc-Lapierre A., Casal P. et Tortrat A. (1959). *Méthodes Mathématiques de la Mécanique Statistique*. Paris: Masson et Cie  diteurs.
- Bridgman P.W. (1955). *Reflections of a Physicist*. New York: Phil. Library (2nd Edition).

- Burniston Brown G. (1960). "Gravitational and Inertial mass". *Am. J. of Physics*, 28.
- Dijksterhuis E. J. (2014). *Archimedes*. Princeton, New Jersey: Princeton Legacy Library.
- Enriques F. (1914). *Problems of science*. Transl. by Royce K.. Chicago: The Open Court Pub. Co..
- Evans D. (1955). *The atomic nucleus*. New York: Ed. McGraw Hill Book Company.
- I. Newton (1947). *Sir Isaac Newton's Mathematical principles of natural philosophy and his system of the world*. Transl. Motte A., Cajori F.. Berkeley: University of California Press.
- Jammer M. (1961). *Concept of Mass in Classical and Modern Physics*. Harvard University Press.
- Mach E. (1942). *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Leipzig, ed. I, 1883. Transl. McCormack T.J., *The science of mechanics*, La Salle: The Open Court Pb. Co..
- Myers W. D., Swiatecki W.J. (1966). "Nuclear masses and deformations", *Nuclear Physics*, 81.
- Newton I. (1962). *Unpublished Scientific Paper collection of Isaac Newton*. Hall A. R., Hall M. B. (eds). Cambridge: Cambridge University Press.
- Piola F., Maggi G.A. (1907). "Il concetto di massa nell'insegnamento elementare della Meccanica". *Il Nuovo Cimento*, 14(80), 1.
- Preston M. A., Bhaduri R.K. (1982). *Structure of the nucleus*. USA: Westview Press (2nd Edition).
- Vandenbosh D., Huzenga J.R. (1973). *Nuclear Fission*. New York, London: Academic Press.

Studenti di scuola secondaria studiano la gravità usando APP su mobile ed emergono problemi storici

Daniele Buongiorno – URDF, Università degli Studi di Udine –
buongiornodaniele@gmail.com

Marisa Michelini – URDF, Università degli Studi di Udine –
marisa.michelini@uniud.it

Abstract: La nostra Unità di Ricerca ha proposto agli studenti di sei classi di liceo scientifico di svolgere la funzione di consulenti per la realizzazione di esperimenti utili alla scuola e basati su APP per dispositivi mobili sul tema del moto. La sfida comprendeva la richiesta di analisi, valutazione ed eventuale progettazione di APP utili a misure su grandezze cinematiche o dinamiche, in particolare utilizzando le potenzialità offerte dagli accelerometri, proponendo esperimenti. I concetti di massa e peso, così come il ruolo del sistema di riferimento, sono stati oggetto di discussione.

Keywords: APP, smartphone, gravità, alternanza scuola-lavoro.

1. Introduzione

Con lo scopo di promuovere le competenze lavorative, l'autonomia nello studio e le capacità di orientamento degli studenti dell'ultimo triennio delle scuole superiori, il MIUR ha previsto, tramite la legge 107/2015 un'integrazione obbligatoria nei programmi scolastici di 200 ore di collaborazione tra scuola e realtà lavorative: l'alternanza scuola-lavoro (ASL). Nell'ambito del progetto PLS-IDIFO62 l'Unità di Ricerca in Didattica della Fisica (URDF) dell'Università di Udine ha offerto un accordo attuativo alle scuole del territorio, in una prospettiva in cui l'Università rappresenta un ambiente di lavoro per sfide di ricerca e sviluppo basate su acquisizione di responsabilità degli studenti, sia come singoli, che in gruppi. Si sono proposte attività con APP per dispositivi mobili come contesto per integrare le nuove tecnologie nell'insegnamento/apprendimento della fisica nella scuola superiore (Hammond, Assefa 2007; Kuhn et al. 2011), offrendo allo stesso tempo agli studenti un'esperienza di lavoro (Buongiorno et al. 2018). Si è promossa l'analisi di caratteristiche tecniche di differenti APP per smartphone, si sono stimolati gli studenti a lavorare su campagne di raccolta dati ed esperimenti da loro giudicati significativi. Le competenze liceali dei ragazzi coinvolti sono state messe in gioco nel caso dello studio della gravità (Vogt et

¹ Legge 107/2015 "La Buona Scuola", <https://labuonascuola.gov.it/>.

² Progetto IDIFO, <http://www.fisica.uniud.it/URDF/laurea/idifo6.htm>.

al. 2011; Schwarz et al. 2013). Gli studenti hanno identificato e posto le stesse problematiche interpretative che troviamo nel dibattito tra scienziati nella storia della scienza.

2. L'impostazione dell'attività

L'idea di base è stata quella di proporre una sfida e insieme un compito lavorativo, che implicasse lo studio di un problema, l'analisi, la programmazione di fasi operative, l'indagine, la valutazione e il confronto oltre che la progettazione e la realizzazione di prototipi ed esperimenti. La scelta ha riguardato il favorire l'innovazione didattica mediante l'integrazione delle nuove tecnologie nell'insegnamento tradizionale promuovendo il paradigma BYOD "Bring Your Own Device" e le APP per dispositivi mobili come contesto.

In particolare, il compito assegnato agli studenti ha riguardato lo studio di fattibilità per l'obiettivo di sviluppare APP migliori di quelle esistenti in commercio, che fossero utili all'apprendimento per lo studio del moto, a seguito di un'analisi critica delle APP esistenti e un collaudo delle stesse tramite esperimenti per lo studio dei moti accelerati.

3. Contesto, campione e attuazione delle attività

L'attività è stata svolta nell'arco di sei mesi (da dicembre 2018 a maggio 2019) coinvolgendo 145 studenti e 4 insegnanti di fisica di 6 classi terze del Liceo Scientifico L. da Vinci di Treviso. I sei incontri mensili si sono caratterizzati con un contributo dell'Università per discussioni con gli studenti di contenuti di fisica, delle modalità con cui descrivere ed utilizzare le APP da loro stessi studiate, per effettuare misure ed esperimenti significativi. È stata fatta consulenza agli studenti in merito a come migliorare le raccolte dei dati, la presentazione degli stessi e la pianificazione degli esperimenti, perché fossero significativi rispetto al problema di fisica da studiare. I ragazzi hanno progettato e lavorato in autonomia tra un incontro e l'altro, in cui si discuteva dei materiali consegnanti e si affidava un nuovo compito/obiettivo/sfida, come in un incontro tra professionisti e datori di lavoro.

Gli impegni richiesti agli studenti sono stati di diversa natura: analisi e valutazione di APP disponibili per lo studio dei moti, studio delle modalità di redazione di un report tecnico e di un manuale, collaudo di APP su esperimenti, eventuale progettazione di APP utili a misure di grandezze dinamiche o cinematiche, mediante proposte motivate degli esperimenti da condurre, messa a punto di una serie di esperimenti motivati dalla loro utilità per l'apprendimento e loro esecuzione tramite l'utilizzo delle APP con relativa documentazione e descrizione.

Gli studenti hanno parallelamente lavorato individualmente, per trovare le APP e le relative prestazioni, confrontare le caratteristiche tecniche e le possibilità operative delle stesse, testando semplici esperimenti, da noi proposti o trovati in letteratura. Hanno confrontato in gruppo le proposte individuali, scrivendo un manuale tecnico che fungesse da "manuale d'uso" per ogni APP, discutendo la scelta degli esperimenti da effettuare e delle APP da utilizzare ed hanno prodotto report finali degli esperimenti condotti.

4. Gli accelerometri, la caduta libera e l'accelerazione di gravità

Ogni smartphone è equipaggiato con tre accelerometri indipendenti che misurano le accelerazioni lungo i tre assi ortogonali x , y e z . Ogni accelerometro consiste in una massa inerziale attaccata ad una molla, l'allungamento di questa molla viene convertito in un segnale elettrico proporzionale all'accelerazione subita dalla massa stessa e quindi dallo smartphone medesimo, normalizzata rispetto alla massa del dispositivo.

Dall'osservazione che diverse APP mostravano distintamente tre misurazioni (Fig.1) chiamate rispettivamente *accelerazione*, *accelerometro* e *accelerazione di gravità*³ è nata una discussione con gli studenti per capirne la specifica funzione. Si è fatta un'analisi operativa: le misure riferite al *campo di gravità* erano non nulle anche se il dispositivo era fermo e non variavano con le condizioni di moto dello stesso. Viceversa, le misure riferite alla grandezza *accelerazione* variavano solo se il dispositivo si muoveva di moto non rettilineo uniforme, così come le misurazioni della grandezza *accelerometro*. In particolare, si osservava che quando il dispositivo era fermo gli accelerometri misuravano un'accelerazione di circa 9.8 m/s^2 che poteva essere variata variando lo stato di moto del dispositivo, che non influiva invece sulle misure del *campo di gravità*. Ciò ha permesso di discutere il ruolo della massa come proprietà dei corpi di interagire con un'entità chiamata *campo di gravità*, che ha natura vettoriale e che è presente in ogni punto dello spazio. Questa esperienza li ha posti di fronte all'analisi del significato di interpretazioni storicamente conflittuali e contemporaneamente presenti nei libri di testo: il modello di interazione con forze a distanza e quello di campo. L'evidenza che tutte le masse cadono con la stessa accelerazione ha permesso di dare senso alla presenza del campo come ente presente nello spazio di valore ben definito e con le dimensioni di un'accelerazione. È stato utile discutere l'evidenza, inizialmente inaspettata dagli studenti, che le misurazioni riferite alla grandezza *accelerometro* fossero nulle in caduta libera, conseguenza del fatto che una massa in caduta libera non possiede peso trovandosi in un sistema non inerziale in caduta libera. La questione dell'importanza del sistema di riferimento è stata affrontata suggerendo agli studenti di orientare lo smartphone (da fermo) in modo che il valore misurato del campo di gravità fosse identicamente nullo su due dei tre assi e massimo sul terzo. Il segno algebrico ha permesso di determinare il verso degli assi.

Per studiare il moto di caduta libera è stato suggerito agli studenti di condurre la seguente osservazione preliminare: con il dispositivo stazionario su un tavolo, viene restituita la misura del campo gravitazionale $g_x=g_y=0$ e $g_z=-g$, che permette di concludere che tutti gli strumenti di misura sono immersi in un campo di gravità uniforme di intensità 9.81 N/kg orientato verso il basso. Un modo adatto per esaminare il moto di caduta libera è quello di sospendere lo smartphone ad una certa altezza e poi farlo cade. Per evitare di danneggiare il dispositivo un oggetto morbido viene posizionato alla fine del tratto di caduta. In questo caso lo smartphone ha una duplice funzione: funge sia da corpo in caduta libera che da strumento di misura, consentendo di determinare il tempo di caduta

³APP diverse si riferiscono alla grandezza *accelerazione* con i termini *acceleration*, *linear acceleration* e alla grandezza *campo di gravità* con i termini *g-force*, *gravity*, *gravity acceleration*.

durante il quale l'accelerazione apparente misurata è nulla. È possibile quindi determinare il valore dell'accelerazione g o l'altezza di caduta utilizzando le leggi del moto uniformemente accelerato.



Fig. 1. Interfaccia utente dell'APP *AndroSensor*. Da notare come la lettura dei dati raccolti in tempo reale dagli accelerometri è tradotta nelle tre grandezze chiamate rispettivamente ACCELEROMETER, GRAVITY e LINEAR ACCELERATION. L'interpretazione di cosa viene effettivamente misurato è stato oggetto di discussione con gli studenti.

Questo ha aperto un altro nodo storico alla discussione: la dinamica e i sistemi di riferimento.



Fig. 3. Esperimento di caduta libera di uno smartphone. Analisi dati dai lavori degli studenti.

Si riportano alcune osservazioni tratte dai report degli studenti stessi, in merito alla caduta libera:

“L’accelerometro misura l’accelerazione lungo tre assi ortogonali x, y e z. L’unità di misura del sensore è espressa in m/s^2 e la misurazione dell’accelerazione **include la gravità terrestre**, tanto che quando il dispositivo è collocato fermo su una superficie orizzontale, dovrebbe visualizzare circa $-9,81 m/s^2$ lungo l’asse z e 0 lungo gli assi x e y.”; “Mentre il telefono è fermo l’accelerazione lungo l’asse y misura circa $-9,8 m/s^2$, quando il telefono viene lasciato, invece, l’accelerazione misura circa $0 m/s^2$ in quanto **il telefono si muove in un riferimento in caduta libera**.”; “Questo esperimento è significativo perché ci mostra come un corpo in caduta libera abbia un’**accelerazione nulla** se il sistema di riferimento è posto sul dispositivo e quindi si muove con esso.”; “Nel momento di inizio della caduta l’accelerometro rileva un’accelerazione pari a 0, quanto tocca il cuscino l’accelerazione è $9,81 m/s^2$. Otteniamo questi dati poiché **un oggetto in caduta libera non risente dell’accelerazione gravitazionale**.”; “Quando il cellulare è fermo, l’asse z riporta il valore $9,81 N/kg$ ossia la forza di gravità, mentre quando viene lasciato cadere, **l’accelerazione lungo l’asse z invece segna 0**; nel momento in cui atterra, infine, l’asse z riporta nuovamente il valore $9,81 N/kg$.”

Le misure di accelerazione nulla in caduta libera fondano l’interpretazione che un oggetto non risente di alcuna forza peso in tale condizione, pur mantenendo una massa. L’accelerazione come forza per unità di massa è promossa dall’uso dell’unità di misura N/kg implementata in alcune APP.

5. Conclusioni

La nostra Unità di Ricerca si è proposta come contesto lavorativo a sei classi di terzo anno del Liceo Scientifico *Leonardo da Vinci* di Treviso, per una sfida di consulenza alla realizzazione di esperimenti utili alla scuola basati su APP su mobile. È stato scelto il tema del moto e la sfida comprendeva la richiesta di analisi, valutazione ed eventuale progettazione di APP utili a misure su grandezze cinematiche o dinamiche, in particolare l’accelerazione e comprendeva altresì la proposta motivata di esperimenti da condurre. L’utilizzo di accelerometri e di interfacce digitali per la misura dell’accelerazione di gravità ha portato gli studenti alla riflessione sul significato delle leggi della dinamica e alla loro collocazione storica: il significato di campo gravitazionale a confronto con l’idea di azione a distanza, nonché il ruolo del sistema di riferimento ed in particolare del principio d’inerzia. La *sorpresa* di accelerazione nulla per i corpi in caduta libera ha di fatto attivato la discussione del significato di questo risultato. Gli studenti hanno realizzato diversi altri esperimenti con le APP, ma l’esperimento di caduta libera è stato quello di maggiore successo, perché ha stimolato la necessità di indagare il significato del risultato sperimentale dell’accelerazione nulla nel sistema in moto accelerato, e del ruolo del sistema di riferimento nello studio del moto. L’attività si è rivelata fertile nell’ottica di promuovere la discussione, l’approfondimento e la chiarificazione della distinzione concettuale tra massa e peso (in particolare peso

apparente) di un corpo, oltre ad attivare riflessioni sui concetti di forza, campo gravitazionale, massa gravitazionale e inerziale, e sui metodi stessi di misura di massa. L'apprendimento di una tematica in fisica è realizzato quando è raggiunta quella consapevolezza interpretativa e competenza di impiego dei concetti che rende gli studenti capaci di utilizzarli in contesti diversi (*conceptual understanding*). Gli studenti, che svolgono direttamente attività sperimentali, incontrano nei loro ragionamenti, in modo intuitivo e non profondo, le difficoltà interpretative e le idee che sono state alla base di interpretazioni nella storia della scienza. Un approfondimento storico dei modelli interpretativi, integrato nell'insegnamento porta un grande contributo all'apprendimento, perché offre risposte a domande poste ed è in grado di contribuire alla chiarificazione delle idee e a quell'acquisizione di metodo, in un processo interpretativo, che sta alla base di quella che chiamiamo cultura di base in fisica.

Ringraziamenti. Ci è gradito ringraziare per la collaborazione il liceo Scientifico *Leonardo da Vinci* di Treviso ed in particolare la prof. Antonella Archidiacono. Ringraziamo altresì il Progetto IDIFO del PLS-Fisica.

Bibliografia

- Buongiorno D., Michelini M., Pagotto S., Ricci D. (2018). *Alternanza scuola-lavoro nella prospettiva di ricerca con APP sul suono*, in *Proceedings of XXXII Convegno DIDAMATICA* [online]. URL: http://www.aicanet.it/documents/10776/2101882/didamatica2018_paper_72.pdf.
- Hammond E.C., Assefa M. (2007). "Cell phones in the classroom". *Phys. Teach.* 45, p.312.
- Kuhn J., Vogt P., Müller S. (2011). "Cellphones and Smartphones Capabilities and Examples of Experiments in Physics Classroom Education". *PdN-PhiS*, 7(60), pp. 5-11.
- Vogt P., Kuhn J., Müller S. (2011). "Experiments Using Cell Phones in Physics Classroom Education: The Computer Aided g-Determination". *Phys. Teach.* 49, pp. 383-384.
- Schwarz O., Vogt P., Kuhn, J. (2013). "Acoustic measurements of bouncing balls and the determination of gravitational acceleration". *Phys. Teach.* 51, pp. 312-313.

ROUNDTABLE:
THE CONTRIBUTION OF HISTORY TO THE TEACHING
OF PHYSICS AND ASTRONOMY

Un progetto per le “eccellenze”

Salvatore Esposito - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Napoli -
salvatore.esposito@na.infn.it

Abstract: Viene presentato un progetto avanzato, ideato per studenti eccellenti delle scuole superiori (o universitari), incentrato sul noto caso storico della teoria della luce e dei colori di Newton. Esso ha lo scopo di consentire agli studenti coinvolti di: 1) *pensare* come Newton, costruendo passo dopo passo tutte le sue conoscenze e ragionamenti; 2) *lavorare* come Newton, eseguendo l'intera serie dei suoi esperimenti originali con i prismi; 3) *dedurre* come Newton riguardo la natura della luce e dei colori; 4) *presentare* i risultati della loro attività (comprese le dimostrazioni di fisica) al grande pubblico, al fine di testare le abilità nel comunicare quanto appreso e scoperto.

Keywords: Isaac Newton, esperimenti con i prismi, didattica laboratoriale.

1. Introduzione

La necessità di divulgare, nel modo più soddisfacente possibile, i principi fondamentali e le applicazioni della scienza a studenti di diversa estrazione (così come pure al grande pubblico) ha portato, negli ultimi anni, ad una proliferazione di progetti didattici e di attività di indubbio valore educativo e didattico. Tuttavia, l'obiettivo di coinvolgere il maggior numero possibile di studenti, unito alla ovvia esigenza di chiarezza, ha spesso portato a sacrificare la prospettiva storica dell'argomento scelto, nonché allo sviluppo di progetti per studenti di livello medio, non sempre molto interessati (almeno all'inizio) a scoprire di più e meglio. Di fatto, progetti finalizzati a studenti eccellenti sono rari, e attività che includono una prospettiva storica sono ancora più rare. Qui di seguito viene allora presentato un progetto avanzato, espressamente sviluppato per tali studenti (tipicamente di Liceo Scientifico), le cui abilità e curiosità non sempre sono appropriatamente valorizzate, dati i ben noti problemi di didattica scientifica.

2. Il progetto

Il tema scelto per il progetto, fantasiosamente intitolato “I colori nell’Ottica di Newton”, è stato quello della teoria newtoniana dei colori, così come dedotta dallo scienziato inglese dai suoi famosi esperimenti sui prismi. Tale argomento, infatti, ha un interesse storico preminente, rivelando per la prima volta la genialità del giovane Newton come seguace del metodo sperimentale galileiano. Inoltre, non richiedendo alcuna preparazione particolare di matematica (o altra formazione avanzata), requisito che spesso sfavorisce

lo sviluppo di progetti più coinvolgenti per gli studenti, è anche particolarmente adatto per lo scopo prefissato.

L'obiettivo didattico primario non era dichiaratamente quello di presentare il lavoro di Newton in una qualche forma avvincente, ma piuttosto quello di permettere agli studenti coinvolti di *ragionare* come Newton, per poter poi permettere loro di *dedurre* autonomamente gli stessi risultati di Newton. Esplicitamente (e ripetutamente) veniva richiesto agli studenti di *dimenticare* le loro (presunte) conoscenze pregresse, e di comportarsi come bambini "ignoranti" desiderosi di scoprire. Tutto il sapere e il relativo ragionamento riguardo al tema principale andava, dunque, costruito passo dopo passo, senza dare nulla per scontato.

Un tale programma – indubbiamente molto pretenzioso – è stato strutturato in due grandi parti, solo la seconda delle quali concerneva direttamente le ricerche di Newton. La prima parte, invece, era volta ad acquisire la stessa mentalità di un qualsiasi ricercatore scienziato moderno del XVII secolo, il cui ragionare "filosofico" affondava le radici nell'antica tradizione greca, poi evoluta attraverso il pensiero medievale e rinascimentale, per approdare alla fine a Galilei e ai suoi precursori e seguaci.

L'intero progetto ha avuto una durata di circa sei mesi, con un incontro settimanale di due ore. In ogni incontro della prima parte del progetto, agli studenti veniva proposto un dato argomento così come affrontato dai filosofi naturali del passato e, di norma, l'insegnante presente si limitava a svolgere il ruolo di coordinatore o "provocatore", solo a volte il ruolo di guida, ponendo il problema ed incoraggiando gli studenti a ragionare secondo le linee tracciate dal filosofo in esame, spesso aiutati dallo svolgimento di semplici osservazioni sperimentali (compiute o immaginate dal dato autore). Di quando in quando, specialmente per autori medievali, la lettura di testi originali si rivelava cruciale per la piena comprensione dello sviluppo del ragionamento filosofico, non disgiunto da come tale ragionamento veniva presentato (a persone "colte").

Per la seconda parte del progetto, invece, dopo una breve presentazione del problema e alla sua contestualizzazione storica, ci si è focalizzati principalmente sui fondamentali esperimenti compiuti e descritti da Newton (Giudice 2006). Tale fase è seguita ad una ricostruzione dell'intera serie di esperimenti, senza alterarne la loro successione originale (Esposito 2019b). In particolare, l'insegnante si limitava a leggere il manoscritto dove Newton spiegava il dato esperimento (qualche volta spiegandone il senso, a causa del linguaggio arcaico utilizzato), dopodiché gli studenti dovevano riprodurre l'esperimento facendo ricorso alle attrezzature presenti nel laboratorio scolastico. Seguiva, quindi, l'interpretazione personale dei risultati dell'esperimento, poi confrontata con quella riportata nei manoscritti di Newton. Terminati tutti gli esperimenti, si sono poi tratte le conclusioni che condussero Newton a formulare la sua teoria sulla luce e i colori (Newton 1672).

3. *Sulle spalle dei giganti: il sostrato "filosofico"*

La prima parte del progetto (Esposito 2019b), tesa a ricostruire la tipica mentalità "filosofica" di uno scienziato del '600 (limitandoci agli argomenti principali del progetto), ha preso in considerazione i seguenti temi e autori (nella stessa successione cronologica):

1. Empedocle di Agrigento;
2. Aristotele di Stagira;
3. Euclide di Alessandria;
4. Tito Lucrezio Caro;
5. Claudio Tolomeo;
6. Avicenna;
7. Alhazen;
8. Scolastica medievale (R. Grosseteste, R. Bacon);
9. Rinascimento (F. Maurolico, G. della Porta) e Johannes Kepler;
10. Meccanicismo (G. Galilei, P. Gassendi, W. Charleton, R. Boyle);
11. Renè Descartes;
12. Ricapitolazione sulla luce e i colori prima di Newton; introduzione a Newton.

Per alcuni dei dodici temi, si è reso necessario tipicamente più di un incontro, sia per l'estensione degli argomenti trattati, che per la maggiore difficoltà incontrata da parte degli studenti nel ricostruire (o, meglio, costruire) il pensiero filosofico.

4. I “famosi fenomeni dei colori”: gli esperimenti con i prismi

Alla lunga preparazione filosofica ha fatto poi seguito una altrettanto lunga serie di incontri dedicati alla realizzazione di tutti gli esperimenti rilevanti compiuti da Newton sui prismi, dal più semplice al più famoso *experimentum crucis* (Giudice 2006). La ricostruzione qui compiuta (Esposito 2019b) include anche alcuni esperimenti apparentemente *spuri*: lo scopo del progetto, infatti, non era quello di provare qualche dato risultato (anche già noto), ma piuttosto di sperimentare come fatto da Newton, per poter far costruire proprio agli studenti gli stessi risultati, senza alcuna “facilitazione”. Gli esperimenti sono i seguenti:

Esperimento 1: una linea spezzata

Su un pezzo di carta nera tracciai una linea OPQ, di cui una metà OP era di un bell'azzurro e l'altra PQ di un bel rosso scuro [...]. E guardandolo attraverso il prisma ADF, essa appariva spezzata in due tra i colori, essendo la parte azzurra più vicina al vertice del prisma che la parte rossa. Così i raggi azzurri subiscono una rifrazione maggiore di quelli rossi.

Esperimento 2: una forma inaspettata

Ponendo un prisma in una camera oscura in cui il Sole splendeva soltanto attraverso un piccolo foro rotondo, e tenendolo vicino al foro in modo tale che i raggi, essendo ugualmente rifratti nell'entrare e nell'uscire, proiettano i colori sulla parete opposta; i colori avrebbero dovuto essere in un circolo rotondo se tutti i raggi fossero rifratti ugualmente, ma la loro forma era oblunga, delimitata ai loro lati da linee rette.

Esperimento 3: il cerchio ritorna

Se si pongono accanto due prismi simili paralleli nelle loro lunghezze [...] e se il Sole risplende attraverso entrambi nel luogo Z, dove si contrappone direttamente alla luce

un corpo opaco, purché i suoi raggi siano prima passati per il foro circolare F, la luce incidente nel detto luogo Z apparirà distintamente circolare, appunto come se giungesse direttamente da F, senza l'interposizione dei prismi.

Esperimento 4: colore su colore

Dipingendo su un pezzo di carta un bel colore azzurro e rosso nessuno dei quali era molto più luminoso dell'altro [...] se l'azzurro prismatico cadeva sui colori, entrambi apparivano perfettamente azzurri, ma la parte dipinta di rosso produceva l'azzurro molto più debole e oscuro, mentre se il rosso prismatico cadeva sui colori, entrambi apparivano perfettamente rossi ma la parte dipinta d'azzurro produceva il rosso molto più debole.

Esperimento 5: linee di separazione

Se il foglio ABCDSR è dipinto con due colori qualsiasi e ABCD è il colore più luminoso, la linea di divisione dei colori apparirà attraverso il prisma di colore rosso, ma se CRDS è il colore più luminoso, la linea comune CD apparirà azzurra attraverso un prisma. [...] Ma se in una camera oscura l'azzurro o il rosso prismatico cadono su un foglio, i bordi della carta non appariranno altrimenti colorati attraverso un altro prisma di quanto non appaiano a occhio nudo, ossia saranno dello stesso colore del resto della carta.

I colori prismatici appariranno nell'occhio in un ordine inverso rispetto a quello in cui cadono su un foglio di carta.

Esperimento 6: una doppia rifrazione¹

Rifrangendo i raggi attraverso un prisma in una camera oscura e tenendo un altro prisma a 5 o 6 iarde dal primo per rifrangere di nuovo i raggi, ho trovato, in primo luogo, che i raggi azzurri subiscono una rifrazione maggiore dal secondo prisma rispetto ai raggi rossi; e, in secondo luogo, che i raggi puramente rossi rifratti dal secondo prisma non producevano altri colori tranne il rosso, e quelli puramente azzurri nessun altro colore tranne l'azzurro.

Esperimento 7: rifrazioni sovrapposte

Se tre o più prismi A,B,C sono posti al sole, cosicché il colore rosso del prisma B cada sul colore verde o giallo del prisma A, e il colore rosso del prisma C cada sul colore verde o giallo del prisma B, e i detti colori cadano sullo schermo DE nei punti P,Q,R,S, qui apparirà un colore rosso in P e uno azzurro in S; ma tra Q e R. dove i rossi, i gialli, i verdi, gli azzurri e i porpora dei diversi prismi sono mescolati insieme, appare un bianco.

Esperimento 8: un solo prisma, molte rifrazioni

Se ponete sulla faccia del prisma un foglio di carta con parecchie fessure [...] dimodoché la luce, passando attraverso queste fessure, produca dei colori sul foglio di carta DE, se quest'ultimo è collocato vicino al prisma vi apparirà, per ogni fessura, una linea colorata. Se il foglio viene collocato più lontano, fino a che le suddette linee colorate siano mescolate insieme, vi apparirà il bianco laddove quei colori sono mescolati.

¹ I titoli degli esperimenti sono stati introdotti a scopo didattico dall'autore del presente contributo.

Esperimento 9: luce riflessa e luce rifratta

La superficie del prisma BC non rifrange tutti i raggi verso T ma ne riflette altresì moltissimi in P [...]. Ruota il prisma sul suo asse secondo l'ordine delle lettere ABCA, e vedrai sia l'estensione dei colori verso T sia la quantità di luce verso P aumentare continuamente [...], fino a quando i colori in T incominciano a svanire e sono riflessi verso P. [...] Vedrai il bianco in P mutare a poco a poco e tendere alquanto verso l'azzurro, a causa dell'ingresso del porpora e dell'azzurro che sono riflessi per primi; ma dopo che anche gli altri colori sono riflessi da T, il bianco sarà ristabilito in P.

Esperimento 10: experimentum crucis

[La luce rifratta da un primo prisma feci passare attraverso un piccolo foro, la quale veniva di nuovo rifratta attraverso un secondo prisma, dopo aver attraversato un secondo foro.] Fatto questo presi in mano il primo prisma, e lo girai lentamente di qua e di là intorno al proprio asse [...]. E vidi che la luce che tendeva a quell'estremità dell'immagine verso cui era avvenuta la rifrazione del primo prisma, subiva nel secondo prisma una rifrazione considerevolmente più grande della luce che tendeva all'altra estremità. [...] La luce consiste di raggi diversamente rifrangibili, i quali, senza alcun riferimento a una diversa incidenza, erano trasmessi verso diverse parti della parete, secondo i loro gradi di rifrangibilità. [Newton Papers]

5. Conclusioni

Al termine del progetto, come parte integrante di esso, l'intera serie di esperimenti ricostruiti è stata anche filmata (ancora emergendo innumerevoli punti di notevole interesse didattico durante tale fase), e presentata in diversi eventi di divulgazione scientifica. Essa è pure visibile sulla piattaforma YouTube (Esposito2019a). L'accoglienza estremamente favorevole del progetto (in tutte le sue parti) da parte degli studenti coinvolti, insieme all'enorme successo registrato durante eventi pubblici, incoraggia certamente a proporre nuovi progetti avanzati volti a formare una classe ben preparata di futuri scienziati.

Bibliografia

- Esposito S. (2019a). *I colori nell'Ottica di Newton* [online]. URL: <<https://www.youtube.com/playlist?list=PLTGvK6jMx5QCt7yMUJNhWJOEuC1-8zEiR>> [data di accesso: 14/01/2020]
- Esposito S. (2019b). "The colours of Newton's Opticks: a high-performance project for motivated students". *European Journal of Physics*, in press. [online]. URL: <<http://iopscience.iop.org/10.1088/1361-6404/ab9892>> [data di accesso: 21/06/2020].
- Giudice F. (2006). *Isaac Newton: Scritti sulla luce e i colori*. Milano: BUR.
- Newton I. (1672). "New theory about light and colours". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 80, pp. 3075-3087.
- [Newton Papers]. URL: <<https://cudl.lib.cam.ac.uk/collections/newton/5>> [data di accesso: 14/01/2020].

Il contributo della storia della fisica alla ricerca

Marisa Michelini – Unità di Ricerca in Didattica della Fisica, Università degli Studi di Udine – marisa.michelini@uniud.it

Abstract: Il contributo della storia della fisica alla didattica è molto ampio se lo si guarda dal punto di vista della ricerca didattica ed ha un ruolo dalla prima formazione dei concetti nella scuola primaria all'acquisizione di quella cultura di base in fisica, che racchiude le radici epistemiche della disciplina e che chiamiamo "identità fisica". Nelle nostre ricerche in didattica della fisica abbiamo avuto occasione di sperimentare diversi ruoli che la storia della fisica svolge nei processi di apprendimento, come la costruzione di un quadro culturale rispetto ai modelli interpretativi nei vari campi tematici, l'identificazione dei nodi concettuali nei degli studenti nel confronto con l'evoluzione dei modelli e delle teorie nel pensiero scientifico, che hanno prodotto strategie di cambiamento concettuale, di appropriazione di rappresentazioni e di argomentazioni, di processi di costruzione del pensiero formale. Vengono discussi qui i principali ruoli da noi identificati e presentati esempi di ricerca.

Keywords: Storia, Fisica, ricerca didattica, formazione.

1. Introduzione

Quando si pensa ad un contributo della storia della fisica alla didattica si apre un mondo di prospettive differenziate. Esse sono *in primis* legate ai diversi tipi di ricerca in storia della fisica. Quale storia della fisica è la prima domanda. Vediamo i principali tipi di ricerca che rispondono a questa domanda. La storia delle idee e delle teorie su uno specifico tema, che apre al pensiero critico sui problemi interpretativi in relazione all'ambito, ma apre anche la riflessione su aspetti epistemologici della disciplina. La storia degli strumenti e delle collezioni che hanno determinato le prospettive di analisi e ruolo dei musei, che raccordano scienza e tecnologia, che rappresentano un patrimonio culturale e offrono occasioni interdisciplinari di analisi. La storia dei grandi personaggi che hanno costruito nuove spiegazioni/interpretazioni/teorie e permettono uno spaccato sul mondo in cui vivevano, sull'esame dello sviluppo scientifico come impresa umana. La storia in un contesto storico: i programmi di ricerca o società come contesto complesso di abitudini, idee, etiche, mondo del lavoro, relazioni interne ed esterne, locali internazionali. L'epistemologia come prospettiva in cui guardare allo sviluppo del pensiero scientifico ed ai metodi di studio della fisica.

Si deve poi individuare a quale didattica ci si vuole riferire, perché il ruolo della storia della fisica può essere molto diverso a seconda dei contesti. Il contesto determina l'impostazione, gli obiettivi di apprendimento, le strategie e i metodi (Dewey 1985; Salomon

1993) nella progettazione didattica basata sulla ricerca (Anderson et al. 2012; Duit et al. 2012). I principali contesti sono i seguenti: 1) quello degli studenti dell'istruzione pre-universitaria, in cui la storia della fisica contribuisce in modo importante secondo tre prospettive: la formazione culturale del cittadino (Osborne 2000), l'acquisizione di una consapevolezza epistemica della disciplina (Solomon 1991) e l'aiuto ai processi di apprendimento; 2) quello universitario dell'insegnamento della storia della fisica e 3) quello della formazione degli insegnanti secondari e primari in cui la storia della fisica contribuisce giocando sia un ruolo culturale che professionale. Discuto in questa sede alcuni dei principali ruoli della storia della fisica nella didattica, con esempi maturati nel contesto della ricerca didattica, con particolare attenzione al contributo ai processi di apprendimento degli studenti pre-universitari e all'insegnamento di storia della fisica per gli studenti del corso di laurea in fisica.

2. Una riflessione sui ruoli della Storia della fisica nella sua didattica

La scienza è sempre presentata nel suo insegnamento senza storia. La sua natura di ricerca del miglior modo per pensare il mondo, con una continua individuazione di modelli e mondi che possono essere diversi e che sono cambiati nel corso della storia offre uno straordinario contributo didattico. La storia diventa una palestra per allenare l'immaginazione a costruire mondi interpretativi e permette di allargare la visione dei temi e dei contenuti. L'analisi concettuale e l'argomentazione promuovono conoscenza e appropriazione della natura della fisica come disciplina (Lederman et al. 1998). Andando oltre agli aspetti conoscitivi si identificano quindi i seguenti diversi contributi della storia della fisica alla didattica della disciplina.

Il contributo globale concettuale e metodologico (*History as Conceptual tools for learning*). Esso si identifica in due principali aspetti. Il pensiero analogico (*Analogical thinking*), che è quello che fa crescere la conoscenza ed è spontaneo nei bambini, che hanno grandi capacità di astrazione (Vigotsky 1987; Mecacci 1994). La conoscenza storica di interpretazioni attiva analogie. L'altro aspetto è legato all'efficacia della narrazione e i contributi della storia in forma di *storie, che catturano per il potere emozionale e diventano motivanti, fondatrici di aspetti culturali e rilevanti nella costruzione di teorie* (Morgan 2013).

Il contributo formativo di esempi storici (*History offers example*). Vi è ormai evidenza che la trasmissione delle informazioni, soprattutto quando riguarda interpretazioni di fenomeni, non produce quella appropriazione di ipotesi interpretative che si consolida in conoscenza e competenza (Greca et al. 2000; Michelini 2018). Si devono svolgere attività in cui il personale coinvolgimento nell'apprendente orienta verso la costruzione di spiegazioni e interpretazioni per la costruzione del pensiero argomentativo (Toulmin 1958; Kuhn 1991; Wells 1999; Zohar et al. 2001; von Aufschnaiter 2004). Parallelamente al pensiero argomentativo si costruiscono metodi di studio e strategie di pensiero che producono etiche, ecologie, competenze. La storia per la formazione culturale scientifica aiuta a fondare l'idea di una cultura che evolve associata alla tecnologia, come ad esempio la storia della ruota (dal neolitico – 5000 ac all'invenzione del pneumatico – Dalton

1888), anche in prospettive diverse, come nel caso dell'evoluzione nell'uso (vasellame, trasporto, macina, spremitura, mulino) oppure nei materiali (pietra, legno, ferro, pelle...), oppure nella struttura (disco intero, assemblato, vuoto, con raggi...) o nei rivestimenti (ferro, pelle, gomma). Aiuta a gestire il cambiamento concettuale in un gioco che fonda l'epistemologia della fisica e insieme i caratteri metodologici propri come il rigore, il ruolo ed il valore dei dati, la visione globale rispetto a quella locale e contingente.

3. Il contributo al cambiamento concettuale: *History for conceptual change*

Il più importante compito della didattica della fisica è quello di far evolvere le idee degli studenti da quelle di senso comune a quelle scientifiche (Michellini 2006; Heron 2018). Come raccogliere esempi dalla storia della fisica per il cambiamento concettuale? Le ricerche in didattica della fisica ci offrono diverse prospettive. Posner & Strike (1982) con la loro teoria del conflitto cognitivo propongono di discutere le contraddizioni nelle interpretazioni e creare insoddisfazioni, favorire raccordi con analogie e metafore per costruire nuove idee, creare il bisogno di armonia, per una ecologia mentale basata sulla coerenza e semplicità e costruire il gusto dell'interpretazione sempre più ampia. Vosniadou (1992, 2008) invece sostiene che si deve favorire la ristrutturazione delle idee come evoluzione della rete interpretativa. Di Sessa (2008; 2014) rinnova il modo di pensare al cambiamento concettuale proponendo un'attenzione alle idee frammentarie dalle esperienze, che devono trovare un raccordo con enti specifici fondati disciplinarmente. La storia può essere allora un referente degli enti fondanti con cui confrontarsi. Tamir Amin (2018) con la sua focalizzazione sull'*embodied cognition* sposta il cambiamento concettuale sul vivere esperienze che costruiscono ed in questo senso sembra che si allontani dal possibile contributo della storia della fisica, ma non è così perché tra le esperienze che giocano un ruolo emotivo importante vi sono anche letture storiche e discussioni su idee interpretative.

I cognitivisti si pongono soprattutto il problema di cosa succeda alle idee spontanee. Il tema degli stati di aggregazione della materia e cambiamenti di stato fisico a partire dall'analisi dei liquidi è quello che offre maggiori risorse storiche per le discussioni di idee interpretative (da Talete, Empedocle, Anassagora, Leucippo, alchimisti, Bacon, Gilbert, Cabeo, Franklin, Coulomb, Lavoisier, Prust, Dalton e la spettroscopia). In astronomia troviamo gli ostacoli epistemologici più noti, come la distinzione tra moto celeste e terrestre, la visione geocentrica, la convinzione che la quiete non va spiegata, ma solo il moto, la separazione tra ipotesi fisiche e matematiche (v Tolomeo e gli epicicli per giustificare la teoria dominante). La discussione sulla sfericità della Terra è interessante perché la più spontanea convinzione della Terra piatta viene attribuita ad antiche affermazioni, mentre è un ostacolo concettuale. Qui troviamo possibili proposte di relazione tra storia e didattica, come le *storie di epistemologie*: proprie e della disciplina. Sono gli elementi comuni riconosciuti nella storia della fisica o nel proprio pensiero rispetto a quello di altri. Il processo comporta la loro identificazione, l'analisi delle stesse per il loro superamento e qui si innescano le proposte di favorire il conflitto cognitivo piuttosto che la continuità e si produce il *cambio dello stato ontologico degli enti*. Ne sono alcuni esempi di natura diversa: 1) lo studio del moto del sole dal nostro sistema altazimutale che viene reinquadrato nei moti relativi; 2)

l'*impetus* ed il *calore*, che perdono una propria natura ed esistono solo in una storia dello sviluppo dei concetti, muoiono con il superamento della filosofia naturale e la fisica di Galilei il primo e con la termodinamica il secondo, ma li troviamo sempre vivissimi nelle idee spontanee degli studenti e non è banale gestire strategie didattiche che ne facciano superare l'idea interpretativa; 3) la trasformazione di idee generali, come quella dell'*horror vacui*.

L'idea di ostacolo epistemologico di Gaston Bachelard (1985) trova ampio spazio in alcune strategie didattiche in cui si propone di discutere gli ostacoli epistemologici. La letteratura di ricerca didattica segnala come nella storia della fisica si trovino molti dei nodi concettuali degli studenti ed esplicitarli offre l'occasione per la chiarificazione degli stessi, la discussione per il loro superamento e la fiducia nella propria capacità di interpretare, superando l'abitudine a riportare nozioni (Galili, Hazan 2001; Matthews 2007; Taşar 2009). Un campo in cui gli ostacoli epistemologici sono stati usati per studiare i problemi di apprendimento e proporre attività didattiche è quello dell'ottica: la natura della luce, i colori, le ombre, con proposte su tre piani: quello della natura della luce, quello delle immagini prodotte dai diversi fenomeni ottici e quello del cammino ottico (Heron 1998; Fredlund et al. 2012; Viennot 2016).

Sono esempi noti di ostacoli epistemologici il moto dei corpi ed in particolare le convinzioni in cui si correla la velocità di caduta al peso del corpo o si giustifica come moto naturale verso la terra, oppure che la velocità con cui si muove un corpo è proporzionale alla forza agente, sicché il corpo si ferma quando la forza cessa di agire, oppure ancora si ritiene che non esista il vuoto nel quale la velocità di un corpo si immagina infinita, mentre la velocità deve essere inversamente proporzionale alla densità del mezzo in cui il corpo si muove.

Un esempio di proposta didattica di ispirazione "storica" per lo studio del moto di caduta libera e del ruolo del sistema di riferimento è stato realizzato con la situazione di Fig. 1 in cui una scatola trasparente, contenente un sistema appeso massa-molla, vari oggetti ed un pendolo, viene lasciata cadere e ne viene filmata l'immagine nelle varie fasi di caduta libera della scatola.



Fig. 1. La scatola trasparente come ascensore realizzata nell'ambito del progetto *Gravity and Free Fall* (Bradamante F et al. 2006).

Aspetti rilevanti nel processo di apprendimento sono le rappresentazioni (Tytler et al. 2013): il tipo di rappresentazione e la multi-rappresentazione favorisce la personale costruzione ed il confronto di modelli interpretativi ed aiuta a superare ostacoli epistemologici. Le linee di campo magnetico di Ampere sono rappresentazioni fertili per la didattica della fisica: uno strumento didattico per far comprendere il concetto di campo ed in particolare la differenza tra forza e campo magnetico, che troviamo maltrattata anche in moltissimi libri di testo (Michelini et al. 2014; Guisasola et al. 2016).

Nelle nostre ricerche (Michelini et al. 2007), ci siamo avvalsi delle rappresentazioni spontanee di fenomeni e processi per guardare ai ragionamenti e discutere le diverse prospettive nello sviluppo del pensiero formale. La storia offre moltissime rappresentazioni sulle quali costruire processi di apprendimento con attività didattiche, come nel caso della rappresentazione di Newton della messa in orbita di un oggetto.

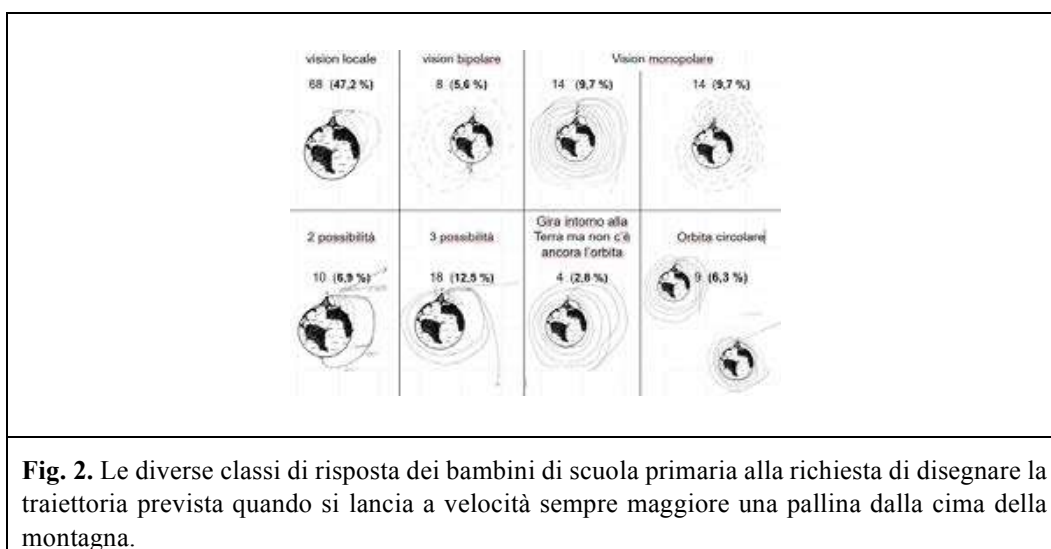


Fig. 2. Le diverse classi di risposta dei bambini di scuola primaria alla richiesta di disegnare la traiettoria prevista quando si lancia a velocità sempre maggiore una pallina dalla cima della montagna.

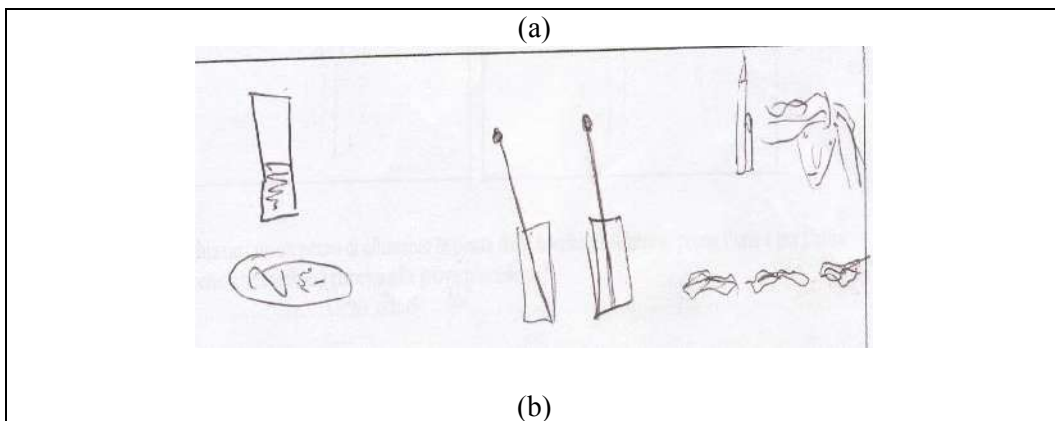
Per una significativa attività didattica abbiamo rubato l'idea di Newton con una strategia *Inquiry Based Learning (IBL)*: dopo aver giocato a lasciar cadere palline tenute in mano o lanciate dal tavolo con velocità diverse ed osservate le traiettorie paraboliche di queste ultime, abbiamo invitato i bambini della scuola primaria a rappresentare le traiettorie delle palline lanciate con velocità crescente da una grande montagna posta sulla terra. Le categorie di risposta della Figura 2 ci hanno permesso di discutere i nodi concettuali di chi pensa che la caduta sia sempre verso il basso, di chi pensa che ci sia una velocità di fuga, di chi immagina la gravità terrestre in termini bipolari (e faccia implicita analogia tra campo gravitazionale e magnetico) e di chi arriva a prevedere l'orbita, producendo un apprendimento tra pari rapido e profondo, perché considera le diverse idee degli apprendenti a confronto durante la costruzione della conoscenza (Bradamante et al. 2006).



Fig. 3. Modello oggettivo per studiare la caduta dei corpi.

Abbiamo riletto il modello di spazio-tempo di Arthur Eddington in termini oggettuali (modello oggettivo di Fig. 3 per rappresentare il campo gravitazionale con un telo elastico inchiodato a una cassetta al centro del quale abbiamo messo una grande massa e dai bordi del quale abbiamo lanciato palline con diversa velocità iniziale. I bambini si sono confrontati con la caduta libera e la pallina che orbita intorno alla grande massa, riguardando la caduta di un oggetto in termini globali.

Un bell'esempio di intreccio tra storia e didattica che sfrutta le rappresentazioni per costruire concetti lo abbiamo ottenuto con lo studio dell'elettrostatica. Abbiamo strofinato sulla stoffa di una sedia una pallina di metallo attaccata ad una bacchetta di legno e poi abbiamo chiesto di fare un disegno di ciò che avevamo fatto (Fig. 4).



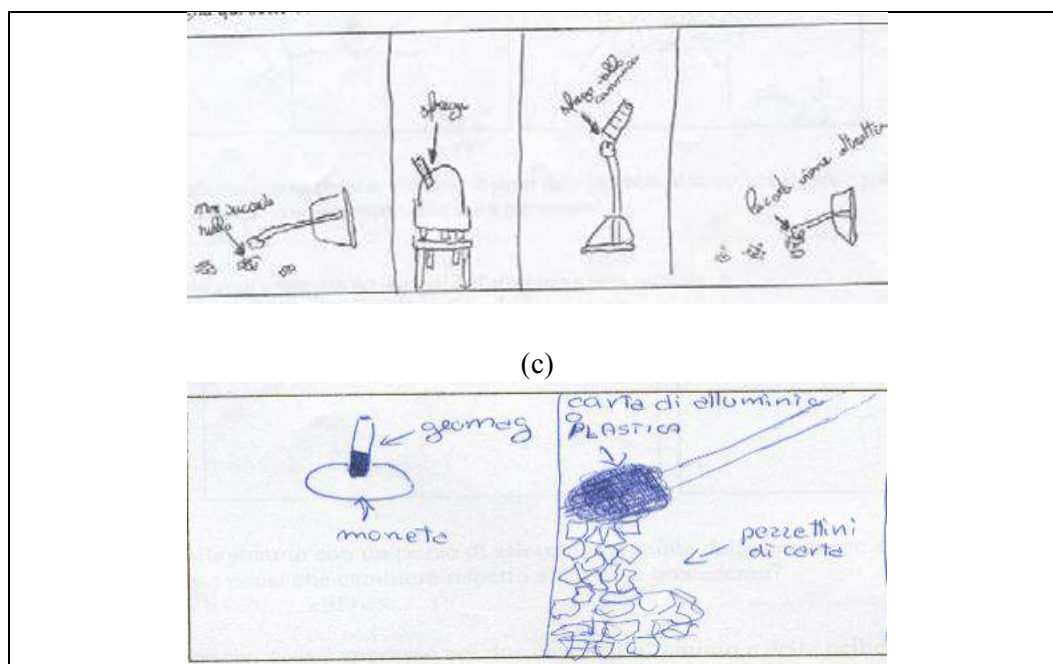


Fig. 4. a) Esposizione dei materiali usati. b) Narrativa. c) Caratterizzazione e spiegazione solo di situazioni “risultato”. Tre categorie di disegni che gli studenti hanno fatto per rappresentare il lavoro svolto. Si vede bene come sia totalmente assente il fenomeno nel caso a) in cui sono disegnati solo gli oggetti usati, siano identificate le fasi dell’attività in b) ed invece ci si concentri sui soli elementi importanti del fenomeno in c).

Successivamente abbiamo chiesto di rappresentare come si immaginavano l’interno dell’oggetto strofinato prima e dopo averlo strofinato (Fig. 5).

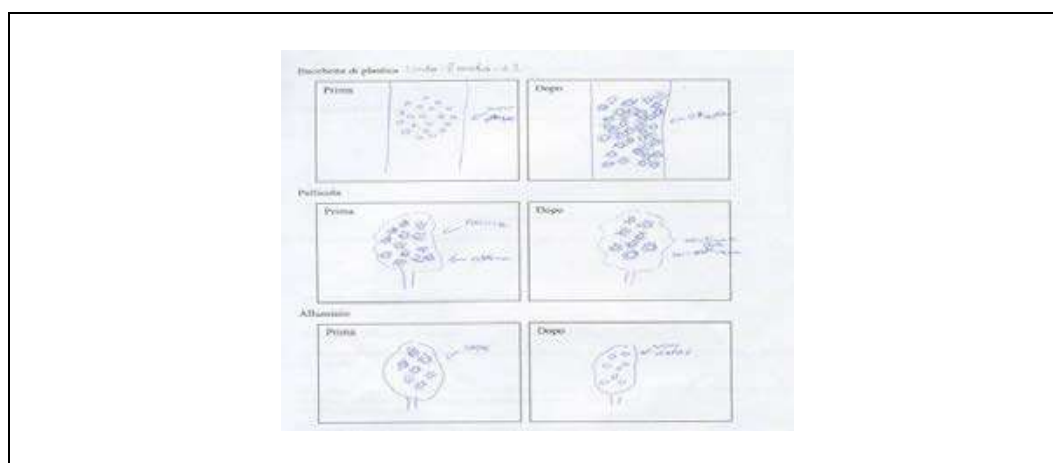


Fig. 5. Le rappresentazioni di come gli studenti si immaginano cambiare l’interno di tre palline di plastica, carta e alluminio poste in fondo alla bacchetta prima e dopo lo strofinio.

Siamo rimasti sorpresi di come le ipotesi portate dai bambini siano quelle che si trovano nella storia delle interpretazioni scientifiche dell'elettrizzazione: particelle che si eccitano o si ordinano o cambiano in numero. La costruzione di modelli ed il tipo di modello (macroscopico, mesoscopico e microscopico), oltre che il ruolo del modello stesso nel processo interpretativo sono fortemente influenzati dal linguaggio grafico ed iconografico, come del resto la letteratura pedagogica (Damiano 1999) ci insegna essere i mediatori culturali.

Il tipo di spiegazioni piuttosto che interpretazioni (Etkina 2006; 2015), nonché i modelli (van der Berg et al. 2006), riconosciuti con il loro ruolo nelle teorie, sono determinate dalle strategie didattiche e nello stesso tempo determinano il tipo di apprendimento (Michelini 2014). Esse sono il fulcro della ricerca in didattica della fisica e favoriscono la costruzione di un personale metodo di studio, ma anche orientano l'epistemologia personale verso la disciplina, per questo motivo la storia della fisica può dare un fondamentale contributo verso una visione globale, offrendo esempi diversi di tipo metodologico. Per questa finalità è spesso necessario curvare il contributo della storia a scopo didattico e non è un qualunque tipo di storia della fisica, che possa essere utile: serve quella linea di ricerca storica che guarda all'evoluzione delle idee e dei concetti. Si apre così la necessità di studi integrati di storia e didattica.

Il Rapporto della fisica con la matematica è insieme un problema ed un contenuto della conquista di una cultura in fisica per ogni studente (Pospiech et al. 2019). La fisica come scienza formalizzata non può dirsi appresa se, oltre alla conoscenza concettuale, non comprende il linguaggio della matematica. La sola narrazione non costruisce fisica: ecco allora che l'esplorazione del modo in cui nella storia della scienza è stata usata la matematica aiuta a maturare questa dimensione della conoscenza fisica. Il farlo però implica uno studio integrato di ricerca in didattica e in storia. Lo abbiamo vissuto in una ricerca sulla conduzione del calore in cui abbiamo costruito il difficile formalismo della legge di diffusione alle differenze finite usando i ragionamenti di Fourier (Girardini et al. 1991).

4. La storia integrata nella didattica

Esempi espliciti esperiti in cui la storia della fisica è entrata nella didattica sono letture storiche e discussioni critiche utilizzando testi originali di scienziati, oppure la realizzazione in sede didattica di esperimenti storici da discutere e da rivivere, anche per realizzare strategie di problematizzazione nell'indagine conoscitiva e nell'analisi di spiegazioni (*problem solving*).

Un magistrale esempio lo ha portato Elio Fabbri al Congresso AIF di Pisa in cui si mise ad utilizzare le osservazioni originali di Galileo Galilei sui satelliti di Giove per ricostruire come dalle immagini statiche in tempi noti abbia riconosciuto un moto armonico e lo abbia guardato come proiezione di un moto circolare uniforme scoprendo così che stava guardando dei satelliti.

Un altro esempio lo abbiamo recentemente inserito in un percorso didattico sulla spettroscopia ottica (Buongiorno et al. 2017), in cui abbiamo usato l'articolo originale di Balmer (1885) per la costruzione concettuale del significato di riga spettrale rispetto al processo

di emissione.

Un capitolo a parte merita il discorso delle modalità con cui offrire agli studenti l'appropriazione della natura della scienza nel suo profondo senso epistemologico: una vasta letteratura propone attività differenziate, che spesso si confrontano con quelle di costruzione concettuale qui discusse. Mi limito in questa sede all'esempio dell'insegnamento della storia della fisica all'università.

5. La storia della fisica per i fisici all'università

Nel mio insegnamento di storia della fisica al IV anno del Corso di Laurea in Fisica del vecchio ordinamento ad indirizzo teorico (1990), feci una scelta di approfondimenti di tipo epistemologico e di due teorie: la termodinamica e la meccanica quantistica. Ciascuna parte ebbe peso rilevante rispetto alla durata del corso: 40% del tempo per la parte epistemologica e 30% ciascuna delle altre due parti. La parte di epistemologia è consistita in una discussione critica piuttosto approfondita dei modelli epistemici in fisica, dall'empirismo al modello induttivo, al realismo, al positivismo, i modelli falsificazionista e verificazionista, le teorie come strutture, la rappresentazione di Lakatos e Kuhn, discutendo le rivoluzioni scientifiche e le continuità nelle teorie, il rapporto tra teoria ed esperimento fino alla visione per programmi di ricerca. Abbiamo discusso prima un piccolo ed interessante libretto (Chalmers 1979) ripercorrendo come le più moderne teorie studiate siano state guardate dagli studenti in termini epistemici rispetto alla fisica classica. Ciò ha contribuito alla formazione di un'identità fisica mediante esplorazione della natura della scienza (Solomon 1991). Abbiamo poi trattato la termodinamica, affrontando con tutto il suo formalismo la teoria termodinamica di De Cartes: i fisici teorici hanno imparato molto in questo esempio delle basi epistemiche del loro lavoro. Il ruolo della storia della fisica è stato di tipo formativo per imparare a guardare la fisica in termini globali e culturali ed anche esemplificativo di contesti in cui identificare modelli epistemologici. La meccanica quantistica è stata una nuova sfida per loro. L'avevano affrontata in due modi: nel corso di struttura della materia con il percorso storico di tipo quantitativo (Born 1969), che dal problema del corpo nero sviluppa il lungo e sofferto percorso di quantizzazione delle grandezze fisiche, con l'esame dei fenomeni critici dal punto di vista interpretativo (esperimenti di Millikan, Frank ed Hertz, effetti fotoelettrico, Compton, Zeeman normale ed anomalo) e poi con un approccio di tipo ondulatorio in fisica teorica. Ne ho proposto l'esame secondo una prospettiva completamente diversa, di tipo vettoriale (Dirac 1958), con un approccio mutuato da Toraldo di Francia (1975). La mia proposta è stata ricostruire i fondamenti concettuali nei tre approcci, facendone un esame comparato ed una discussione critica: è stato un ruolo della storia di tipo concettuale, che ha fatto ricostruire agli studenti, in chiave diversa, principi che sapevano applicare in esercizi, ma al cui profondo significato nella teoria non avevano pensato e spesso non erano consapevoli. Anche il confronto di alcuni concetti che cambiano significato dalla fisica classica a quella quantistica è stato importante: si sono resi conto che lo stato nel caso quantistico ha significato molto diverso che nel caso classico, così come la misura cambia

di ruolo e significato, che i principi di sovrapposizione per onde e per stati quantici sono diversi non solo formalmente e che il formalismo in meccanica quantistica assume un ruolo fondante delle idee, anche leggendo i primi capitoli di altri testi di meccanica quantistica (Sakurai 1985). La commutatività per esempio fa distinguere tra proprietà mutualmente esclusive ed incompatibili. Leggendo Feynman (Feynman 1985) hanno consolidato una visione culturale della storia della fisica moderna ed hanno avuto piacere di effettuare anche una riflessione di tipo filosofico (Shimony 1989).

Questo esempio di un corso di storia della fisica molto orientato alla ricostruzione della conoscenza in termini operativi, con quella visione di ricostruzione critica dei concetti nel contesto storico serve alla formazione culturale globale (Lederman et al. 1998) e offre anche l'occasione per svolgere una personale indagine storica. L'argomentazione (Toulmin 1958) in questo approccio assume ruolo fondante ed ha valenza in termini di apprendimento, come diversi studi evidenziano (Kuhn 1991; Osborn 2005). Per i fisici teorici è stata fondamentale nel ripercorrere e consolidare molti concetti e prepararsi a quello che allora era il colloquio pre-laurea. Quella presentata è stata una scelta del ruolo della storia della fisica mirato a processi di apprendimento e culturali. Molte altre qualificate impostazioni per un obiettivo culturale nell'identità dei fisici sono percorribili, ma in quanti corsi di laurea magistrale in fisica vi è oggi un corso di storia della fisica?

6. Conclusioni

Il contributo della storia della fisica nella didattica della stessa disciplina è molteplice in termini di prospettiva così come in termini di contesti. Nella ricerca didattica la storia della fisica ha un ruolo importante già nell'individuazione delle strategie di costruzione concettuale nella scuola primaria ed assume sempre più un ruolo funzionale alla conoscenza, metodologico e culturale nell'istruzione secondaria per diventare palestra disciplinare e formazione epistemologica all'università. A partire dalle ricerche in didattica della fisica si sono discussi in questa sede i contributi: conoscitivo, metodologico, concettuale, epistemologico ed etico, disciplinare e funzionale all'apprendimento dei concetti: la storia che ispira l'azione didattica. Un'attenzione particolare è riservata al suo contributo nella lettura delle idee dei ragazzi. Nell'analisi e negli esempi si indicano anche le corrispondenti modalità didattiche: narrazioni, letture, *problem solving* critici, la rievocazione di ricerche, studi e indagini, esperimenti storici e la meta-riflessione sulle proprie idee.

Bibliografia

- Abd-El-Khalick, F. (2005). "Developing deeper understandings of nature of science: The impact of a philosophy of science course on preservice science teachers' views and instructional planning". *International Journal of Science Education*, 27(1), pp. 15–42.
- Amin T. G. (2009). "Conceptual Metaphor Meets Conceptual Change". *Human Development*, 52(3), pp. 165–197.

- Anderson T., Shattuck, J. (2012). “Design-Based Research: A Decade of Progress in Education Research?”. *Educational Researcher*, 41 (1), pp. 16-25.
- Bachelard G. (1986). *L'attività razionalistica nella fisica contemporanea*. Milano: Jaca book.
- Born M. (1969). *Atomic Physics*. Glasgow: Blackie&Son Ltd.
- Bradamante F., Michelini M. (2006). *Cognitive Laboratory: Gravity and Free Fall from Local to Global Situations*, in *Informal Learning And Public Understanding Of Physics*, Planinsic G., Mohoric A. (eds), selected papers in Girep Book. Ljubijana (SLO): Ljubljana University press, pp. 359-365.
- Buongiorno D., Michelini M. (2019). *The conceptual contribution of the history in learning physics: the case of optical spectroscopy*, in *Atti del XXXVII Convegno SISFA (Bari 26-29 settembre 2017)* [online]. URL: <<http://www.sisfa.org/pubblicazioni/atti-del-xxxvii-convegno-annuale-sisfa/>>.
- Chalmers A. F. (1979). *Che cos'è questa scienza?*. Milano: Mondadori.
- Damiano E. (1999). *L'azione didattica. Per una teoria dell'insegnamento*. Roma: Armando Editore.
- Dewey J. (1985). *Context and Thought*, in *The Later Works, 1925-1953*, Vol. 6 (1931-1932), Boydston J. A. (ed), Carbondale: Southern Illinois University Press.
- Dirac P. A. M. (1958). *The Principles of Quantum Mechanics*. Oxford: Calderon Press.
- diSessa A. A. (2008). “A «theory bite» on the meaning of scientific inquiry: A companion to Kuhn and Pease”. *Cognition and Instruction*, 26(4), pp. 560-566.
- diSessa A. A. (2014). *A history of conceptual change research: Threads and fault lines*, in K. Sawyer (ed), *Cambridge handbook of the learning sciences* (second edition). Cambridge (UK): Cambridge University Press, pp. 88-108.
- Duit R., Gropengießer H., Kattmann U., Komorek M. and Parchmann I. (2012). *The Model of Educational Reconstruction - a framework for improving teaching and learning science*, in Jorde D., Dillon J. (eds), *Science Education Research and Practice in Europe*. Rotterdam: Sense Publishers, pp. 13-37.
- Etkina E., Van Heuvelen A., White-Brahmia S., Brookes D. T., Gentile M., Murthy S. (2006). “Developing and assessing student scientific abilities”. *Physical Review. Special Topics, Physics Education Research*. 2, 020103.
- Etkina, E. (2015). “Millikan award lecture: Students of physics - Listeners, observers, or collaborative participants in physics scientific practices?”. *American Journal of Physics*, 83(8), pp. 669-679.
- Feynman R. P. (1985). *QED: The Strange Theory of Light and Matter*. Princeton: University Press.
- Fredlund, T., Airey, J., Linder, C. (2012). “Exploring the role of physics representations: an illustrative example from students sharing knowledge about refraction”. *European journal of physics*, 33(3), pp. 657-666.
- Galili I, Hazan A (2001). “Experts’ Views on Using History and Philosophy of Science in the Practice of Physics Instruction”. *Science & Education*, 10, pp. 345–367. Kluwer Academic Publishers: the Netherlands.
- Girardini D., Sconza A., Mazzega E., Michelini M. (1991). “Studio della conduzione del calore con l'utilizzo del computer on-line”. *La Fisica nella Scuola*, XXIV, 2, p.71
- Greca I. M., Moreira M. A. (2000). “Mental models, conceptual models and modelling”. *IJSE* 22, pp. 1-11.
- Guisasola, J., Hartlapp M., Hazelton R., Heron P., Lawrence I., Michelini M., Peeters W., Pospiech G., Stefanel A., Vercellati S., Zuza K. (2016). *Content-Focused Research for*

- Innovation in Teaching/Learning Electromagnetism: Approaches from GIREP Community*, in Papadouris N. et al. (eds), *Insights from Research in Science Teaching and Learning. Contributions from Science Education Research*, Volume 2 of the series *Contributions from Science Education Research*, pp. 89-105.
- Heron P. R. L., McDermott L. C. (1998). "Bridging the Gap Between Teaching and Learning in Geometrical Optics: The Role of Research". *Optics and Photonics News*, 9.
- Heron P. R. L. (2018). *Identifying and Addressing Difficulties: Reflections on the empirical and theoretical basis of an influential approach to improving physics education*, in Henderson C., Harper K. A. (eds), *Getting Started in PER, Reviews in PER Vol. 2 (Vol. 2)*. College Park, MD: American Association of Physics Teachers.
- Kuhn, D. (1991). *The Skills of Argument*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lederman, N., Abd-el-Khalick, F. (1998). *Avoiding the De-natured Science: Activities that promote understandings of the Nature of Science*, in McComas W. F. (ed), *The Nature of Science in Science Education: Rationales and Strategies*. Dordrecht: Kluwer, pp. 83–126.
- Matthews M. (2007). "Grit: perseverance and passion for long-term goals". *J Pers Soc Psychol*, 92(6), pp. 1087-101.
- Mecacci L. (1994). *Storia della psicologia del Novecento*. Bari: Laterza.
- Michelini M. (2006). *The Learning Challenge: A Bridge Between Everyday Experience And Scientific Knowledge*, in Planinsic G., Mohoric A. (eds), *Informal Learning And Public Understanding Of Physics*, selected papers in Girep book. Ljubljana (SLO): Ljubljana University press, pp. 18-39.
- Michelini M. (2014). "La ricerca didattica italiana nei progetti Europei e non solo: una Tavola Rotonda al Congresso SIF di Trieste, 2013". *Il Giornale di fisica*, 3, p. 213-216
- Michelini M. (2018). *Labs in building a modern physics way of thinking*, in Sokolowska D., Michelini M. (eds), *The role of Laboratory Work in Improving Physics Teaching and Learning*. Cham, Switzerland: Springer Natureham.
- Michelini M., Mossenta A. (2007). *Role play as a strategy to discuss spontaneous interpreting models of electric properties of matter: an informal educational model*, in Van den Berg E., Ellermeijer T., Slooten O. (eds), *Modelling in Physics and Physics Education*, selected papers in GIREP publication. Amsterdam: University of Amsterdam, pp. 940-948 [online]. URL: <www.girep2006.nl>.
- Michelini M., Vercellati S. (2014). *Exploring the sources of magnetic field and the interactions between them to interpret electromagnetic induction: a proposal of conceptual laboratory*, in Kaminski W., Michelini M. (eds), *Teaching and Learning Physics today: Challenges? Benefits?*, selected paper books of the International Conference GIREP-ICPE-MPTL 2010, Reims 22-27 August 2010. Udine: Lithostampa, pp. 229-234.
- Morgan M. S. (2013). *The world in the model. How economics work and think*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Osborn J. (2005). *The role of argument in science education*, in Boersma K. et al. (eds), *Research and the Quality of Science Education*. Netherlands: Springer, pp. 367-380.
- Osborne J. F. (2000). *Science for Citizenship*, in Monk M., Osborne J. F. (eds), *Good Practice in Science Teaching: What Research Has to Say*. Buckingham: Open University Press, pp. 225–240.
- Posner G.J., Strike K.A., Hewson P.W., Gertzog W.A. (1982). "Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change". *Science Education*, 66, pp. 211-227.

- Pospiech G., Michelini M., Bat-Sheva Eylon (eds) (2019). *Mathematics in Physics Education*. Springer Nature Switzerland AG.
- Sakurai J. J. (1990). *Modern Quantum Physics*. Reading: Addison-Wesley.
- Salomon G. (1993). *Distributed Cognitions. Psychological and Educational Considerations*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Shimony A. (1989). *Search for a worldview which can accommodate our knowledge of microphysics*, in Cushing J. T., Mullin E. M. (eds), *Philosophical consequences of quantum theory*. Paris: University of Notre Dame Press.
- Solomon J. (1991). *Exploring the Nature of Science: Key Stage 3*. Glasgow: Blackie.
- Taşar M. F., Çakmakçı G. (eds) (2009). *Contemporary science education research: teaching* [online]. URL: <<https://silo.tips/download/editors-m-f-taar-g-akmakci>>.
- Toraldo Di Francia G. (1975). *Teaching Formal Quantum Physics*, in Loria A., Thomsen P. (eds), *Seminar on the teaching of physics in schools 2*. Gyldendal: GIREP, pp. 318-329.
- Toulmin S. (1958). *The Uses of Argument*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tytler R., Prain V., Hubber P., Waldrip B. (2013). *Constructing representations to learn in science*. Boston: SensePublishers [online]. URL: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=578379>>.
- Van der Berg E., Ellermeijer T., Sloten O. (2006). *Modelling in Physics and Physics Education*, Girep book of selected papers, AMSTEL: Amsterdam.
- Viennot L. (2016). *Thinking in Physics. The pleasure of reasoning and understanding*. Switzerland: Springer.
- Vigosky L. S. (1987). *Il processo cognitivo*. Torino: Boringhieri.
- von Aufschnaiter C. (2004). *Argumentation and Cognitive Processes in Science Education*. Paper presented at the Annual Conference of the National Association for Research in Science Teaching. Vancouver.
- Vosniadou S. (2008). *International handbook of research on conceptual change*. New York: Routledge.
- Wells G. (1999). *Dialogic Inquiry: Towards a sociocultural theory and practice of education*. New York: Cambridge University Press.
- Zohar A., Nemet F. (2002). “Fostering Students’ Knowledge and Argumentation Skills Through Dilemmas in Human Genetics”. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(1), pp. 35–62.

Il contributo della storia nell'insegnamento della fisica e dell'astronomia: i musei degli osservatori astronomici e l'esperienza padovana

Valeria Zanini – INAF - Osservatorio Astronomico di Padova - valeria.zanini@inaf.it

Abstract: L'intervento presenta alcune esperienze messe in atto dai musei astronomici italiani, e in particolare dal Museo *La Specola* di Padova, per la didattica e la diffusione dell'astronomia.

Keywords: musei astronomici, strumentazione scientifica, apprendimento.

1. Introduzione

Ringrazio gli organizzatori per l'invito a partecipare a questa tavola rotonda, nella quale mi sento coinvolta in un duplice ruolo: sia come 'addetta ai lavori', in quanto responsabile del museo dell'Osservatorio Astronomico di Padova e docente di Storia dell'astronomia per il corso di laurea in Astronomia dell'Università di Padova, in collaborazione con il Prof. Peruzzi, titolare dell'insegnamento, sia come madre di due adolescenti che frequentano il liceo e affrontano quindi lo studio della fisica in classe.

Vorrei aprire questo contributo con un piccolo aneddoto proprio su questo secondo fronte. Un'amica delle mie figlie, che non ha un grande rapporto con la fisica, si lamentava: "Io ho bisogno di capire il perché; se mi spiegano il perché le cose funzionano in un certo modo, allora capisco, ma se mi dicono 'perché è così', allora vado fuori di testa!". In effetti, la risposta 'perché è così' è spesso abusata da chi (sovente i compagni più brillanti) i concetti li ha assimilati e fatti propri e non ha mai incontrato difficoltà nel capirli. Ecco, io credo che lo studio della storia di una disciplina scientifica possa essere uno strumento utilissimo proprio per quei ragazzi che più faticano a entrare in sintonia con la materia. Attraverso la storia, infatti, si evidenzia come lo sviluppo delle conoscenze scientifiche non sia stato un processo lineare e fluido, ma piuttosto un percorso ad ostacoli, sempre strettamente interconnesso con il parallelo sviluppo delle vicende politiche, sociali e culturali in senso lato dell'ambiente. In fin dei conti, lo stesso processo di acquisizione della conoscenza scientifica nel ragazzo in crescita riflette, pur se in scala molto ridotta, proprio quello che è stato il cammino umano verso la conquista della scienza moderna. Trasmettere dunque l'idea che le conoscenze scientifiche odierne non sono riservate ai pochi eletti in grado di comprenderle, ma sono il frutto di un lungo e difficoltoso cammino di apprendimento che l'intera umanità ha compiuto, può essere di stimolo soprattutto per quei ragazzi che più hanno difficoltà con la materia, così che possano sentirsi meno frustrati e meno 'incapaci' di quanto si ritengano in

genere nei confronti dei compagni brillanti e possa anche creare in loro una sorta di empatia con i nostri predecessori, riconoscendosi parte della Storia.

2. I musei astronomici e il Museo *La Specola* di Padova

Il patrimonio storico-strumentale conservato presso gli Osservatori Astronomici italiani, divenuti oggi strutture di ricerca dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), comprende oltre un migliaio di pezzi, tra cannocchiali, orologi, globi, strumenti matematici e meteorologici, che spaziano dal XVI secolo alla prima metà del '900. Le diverse collezioni strumentali si sono costituite presso i singoli Osservatori man mano che gli strumenti divenivano obsoleti per la quotidiana attività di ricerca ed erano perciò accantonati. Alcune di queste collezioni, ora restaurate, sono aperte al pubblico e visitabili negli spazi museali allestiti all'interno del proprio Osservatorio di origine.¹



Fig. 1. L'equinozio di primavera 2019 osservato alla linea meridiana dell'Osservatorio Astronomico di Padova.

Come ben sappiamo, il museo che raccoglie strumentazione scientifica è, per antonomasia, il luogo ove è più facile sviluppare un approccio storico alla scienza e questo è vero anche per i musei astronomici. In particolare, molti musei dell'INAF hanno la peculiarità di essere delle cosiddette 'case-museo', cioè luoghi in cui gli oggetti sono ancora collocati negli stessi ambienti in cui operavano quando erano utilizzati per la ricerca, divenendo ambienti di alta suggestione in grado di ricreare, quando si visitano, un legame palpabile tra il visitatore e l'oggetto, tra la storia e la scienza, tra il presente e il passato. In questo modo il museo, inteso come l'insieme degli strumenti musealizzati e dei locali che li ospitano, divenuti essi stessi 'oggetti museali', è fonte primaria e diretta d'informazione multidisciplinare: storica, scientifica, tecnologica, sociale.

Nel Museo *La Specola* di Padova ogni singolo oggetto può essere preso come spunto per sviluppare un argomento correlato: la linea meridiana, ad esempio, osservata possibilmente proprio nel momento del passaggio del disco solare al mezzogiorno locale (Fig. 1), permette di introdurre i concetti di sfera celeste e di sistemi di riferimento, ma dà modo anche di affrontare la tematica della misura del tempo e di come questa sia mutata nel corso dei secoli, sia per esigenze scientifiche che per esigenze sociali. Attra-

¹ Il sito www.beniculturali.inaf.it raccoglie le pagine web e le schede catalografiche di tutte le collezioni.

verso la spiegazione del funzionamento del gran quadrante murale settecentesco si possono invece trattare argomenti di ottica, come la legge della rifrazione o le aberrazioni, ma è possibile anche parlare di errori e di precisione della misura, illustrando le divisioni della scala graduata, il nonio e il reticolo filare. Ancora, si possono introdurre i sistemi di coordinate sferiche e le misure di posizioni stellari, finalizzate alla composizione dei cataloghi.



Fig. 2. Un momento della visita laboratoriale durante la quale i ragazzi in visita al museo hanno riprodotto in cartoncino il quadrante murale settecentesco.

Attorno a questo strumento in particolare, in occasione della Kids University 2016 è stata modulata una visita-laboratorio durante la quale i ragazzi, con materiale fornito in loco, hanno avuto modo di costruire un piccolo quadrante in cartoncino, utilizzato poi per prendere alcune misure di altezza (Fig. 2).

La visita al museo costituisce ovviamente solo una delle diverse fasi dell'intero processo di apprendimento ed è auspicabile che essa sia sempre programmata all'interno di un processo cognitivo già in atto, o come input iniziale, per tematiche da svilupparsi successivamente, oppure come punto terminale di un percorso già effettuato in classe. In qualsiasi caso, essa ha il pregio di stimolare la curiosità dello studente e di metterlo in contatto dal vivo con strumenti e ambienti di cui egli ha al massimo una conoscenza solo teorica. Fondamentale è quindi la preparazione di chi accompagna alla visita: la guida deve, infatti, conoscere bene l'oggetto storico che presenta, sapere quale sia stato il suo utilizzo scientifico, quali erano le conoscenze teoriche di chi lo utilizzava e il tipo di risultati che esso ha prodotto. Soprattutto, è fondamentale che l'oggetto non sia mai decontestualizzato o utilizzato per mostrare al pubblico le osservazioni e le conoscenze moderne, banalizzando di conseguenza il raggiungimento dei traguardi scientifici nella Storia. Sarebbe deleterio, quindi, motorizzare i telescopi antichi, dotarli di moderni CCD ed eseguire fotografie per spiegare quanto si può vedere ora con uno strumento ottocentesco, prescindendo dalla differenza di conoscenze teoriche tra le diverse epoche. Si passerebbe così il messaggio che i nostri predecessori non erano 'bravi' come noi ad osservare il cielo, aumentando il divario tra chi si sente portato verso la materia e chi invece si sente inadeguato.

3. Il teatro al museo

Da diversi anni l'attività teatrale è entrata di diritto tra le forme della comunicazione non formale della scienza, grazie soprattutto al potente coinvolgimento emotivo che si riesce a instaurare tra attori e spettatori. Anche all'Osservatorio Astronomico di Padova abbiamo sperimentato questa forma comunicativa alternativa nell'ambito delle attività museali: inizialmente si sono realizzate delle 'visite animate' all'interno del percorso museale, durante le quali attori in abiti d'epoca impersonavano gli astronomi dei secoli passati intenti a descrivere i loro strumenti. Successivamente si è promossa una intera rappresentazione teatrale incentrata sulla figura storica di Giuseppe Lorenzoni (1843-1914), direttore dell'Osservatorio nell'800. A partire da queste esperienze è nato poi lo spettacolo "Starlight, settemillimetri di universo", prodotto da Filippo Tognazzo di Zeldà – Compagnia teatrale professionale, affiancato alla mostra diffusa "Starlight: la nascita dell'astrofisica in Italia", realizzata e ospitata dalle sedi INAF di Firenze, Napoli, Padova, Palermo e Roma.² Lo spettacolo, in particolare, ha voluto raccontare attraverso le vicissitudini e la passione di uomini che dedicarono la loro vita alla scienza del cielo, come sia avvenuta la trasformazione dell'astronomia in astrofisica in Italia, in un'epoca cruciale come fu quella a cavallo tra il Risorgimento e l'Unità. Gli astronomi dei secoli passati, gli studi e i documenti da loro prodotti, i libri e gli strumenti da loro utilizzati sono così divenuti il soggetto principale del testo teatrale e, grazie all'interpretazione di un attore professionista, hanno 'preso vita', raccontando i progressi compiuti in questo campo in modo alternativo, innovativo e appassionante. Proposto a classi di scuole medie e superiori, lo spettacolo si è dimostrato multidisciplinare e coinvolgente e, per dirlo con le parole di una giovane spettatrice tredicenne, "è piaciuto molto perché ha unito materie così diverse come la storia e le scienze, e le ha rese belle e divertenti, non noiose come in classe!"

4. Il museo nella didattica universitaria

Come curatrice del Museo dell'Osservatorio di Padova, ho vissuto un primo coinvolgimento nella didattica universitaria nell'A.A. 2013-14, grazie ad una collaborazione con la Prof.ssa Ornella Pantano, docente di Didattica della fisica per il corso di laurea in Scienze della formazione primaria. In tale occasione, assieme anche al Museo di Storia della Fisica dell'Università di Padova, è stato sviluppato un progetto educativo per stimolare nei futuri insegnanti una riflessione su come i musei scientifici possano essere utilizzati per proporre esperienze scientifiche efficaci e motivanti all'interno dei curricula della scuola primaria e per far sperimentare e riconoscere i vantaggi di un approccio storico e narrativo nell'apprendimento di una nuova materia (Pantano 2015).

² La versione online della mostra è disponibile all'indirizzo: www.starlight.inaf.it. Lo spettacolo, presentato al Festival della Scienza di Genova nel 2015, è stato trasmesso da Rai Scuola ed è ancora in programmazione su Raiplay. Informazioni dettagliate sullo spettacolo, che è tutt'oggi presentato nelle scuole italiane, si trovano qui: www.zeldateatro.com/spettacoli/starlight.

Dal 2015, invece, sono docente a contratto a titolo gratuito per una frazione dell'insegnamento di Storia dell'astronomia. L'Università di Padova è stata la prima in Italia a istituire il corso di laurea in Astronomia e quasi da subito tra gli insegnamenti proposti fu inserito anche quello di Storia. Attualmente l'insegnamento del corso padovano mira a presentare le principali idee da cui si sono sviluppate l'astronomia e l'astrofisica contemporanee, analizzando in parallelo i progressi in altri settori disciplinari quali la fisica e la strumentazione scientifica. Proprio per questo motivo la seconda metà del corso ripercorre la storia dell'astronomia attraverso lo sviluppo della strumentazione astronomica pre- e post-telescopica. È innegabile, infatti, che nel corso dei secoli implementazioni strumentali importanti abbiano permesso di cambiare le teorie astronomiche e cosmologiche dominanti (si pensi ad esempio al fondamentale contributo apportato dalla strumentazione di Tycho Brahe per ottenere le misure di posizione necessarie a Keplero per riconoscere l'orbita di Marte come ellittica), così come linee di ricerca teoriche hanno dato l'input all'implementazione di nuova strumentazione tecnologica (p.e. l'eliometro a lente divisa di Dollond, nato per misurare il diametro solare, fu migliorato su impulso di Friedrich Bessel e divenne un micrometro di altissima precisione per la ricerca della parallasse stellare). All'interno del corso è prevista quindi anche la visita al museo, durante la quale si osserva e, nei limiti del possibile, si vede all'opera parte della strumentazione spiegata teoricamente durante le lezioni frontali. Questa esperienza si è rivelata tra le più efficaci del corso, stimolando negli studenti quell'interazione e quel coinvolgimento che in altri momenti sono rimasti latenti.

5. Conclusioni

Come visto, l'esperienza museale si presta a una molteplicità di fruizioni diverse, ognuna modellabile, a seconda delle esigenze e delle aspettative, su di una specifica tipologia di visitatore, anche se ancora molti ambiti restano da esplorare, soprattutto nel campo della didattica. Auspico quindi che occasioni d'incontro e di confronto come la presente tavola rotonda siano di stimolo allo sviluppo di nuove modalità di collaborazione anche tra il mondo dei musei astronomici e il mondo dei docenti, per favorire l'elaborazione di idee e percorsi che permettano a tutti i ragazzi, anche i più fragili, la scoperta della bellezza del mondo della scienza.

Bibliografia

- Baldin L. (a cura di) (2003). *L'attività didattica nel cuore del museo. Gli attori e i modelli di gestione*, in *Atti della VI giornata regionale di studio sulla didattica museale*. Venezia: Ed. Regione del Veneto.
- Baldin L., Paro L. (a cura di) (2004). *Il museo come luogo dell'incontro. La didattica museale delle identità e delle differenze*, in *Atti della VII giornata regionale di studio sulla didattica museale*. Vicenza: Ed. Regione del Veneto.

Pantano O., Talas S., Zanini V. (2015). *The role of scientific museums in physics and astronomy education courses for pre-service primary school teachers*, in Fazio C., Sperandeo Mineo R. M. (eds), *Teaching/learning physics: integrating research into practice. Proceedings of the GIREP-MPTL 2014 International Conference* (Palermo, Italy, July 7 - 12, 2014). Palermo: Ed. Università di Palermo, pp. 129-136.