



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DILEF
DIPARTIMENTO DI
LETTERE E FILOSOFIA

Reading the Book of Nature Across Sciences, History and Philosophy

Proceedings of the Conference
to celebrate 400th anniversary
of Galilei's *Il Saggiatore*

edited by
Davide Pietrini



FILOSOFIA

Studi e ricerche del Dipartimento di Lettere e Filosofia

direttore responsabile

Simone Magherini

direttore

Marco Biffi

Filosofia / 4



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DILEF
DIPARTIMENTO DI
LETTERE E FILOSOFIA

La collana «**Studi e ricerche del Dipartimento di Lettere e Filosofia**» dell'Università degli Studi di Firenze nasce, insieme a «DILEF. Rivista digitale del Dipartimento di Lettere e Filosofia», nel quadro delle attività condotte come Dipartimento di Eccellenza 2018-2022 sul Fondo assegnato dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca.

La collana si articola in quattro sezioni, che rispecchiano gli interessi e gli ambiti di studio delle rispettive sezioni dipartimentali: Antichità e Filologia, Filosofia, Letteratura italiana e Romanistica, Linguistica.

La pubblicazione in rete, in formato PDF, è ad accesso aperto; l'edizione a stampa è disponibile a pagamento.

Comitato direttivo

Benedetta Baldi, Giovanni Alberto Cecconi,
Simone Magherini, Mariagrazia Portera, Anna Rodolfi,
Salomé Vuelta García, Giovanni Zago

Comitato scientifico

Valentina Arena (University College, London)
Barbara Carnevali (École des Hautes Études en Sciences Sociales, Paris)
Mario Citroni (Scuola Normale Superiore di Pisa)
Matthias Heinz (Paris Lodron Universität Salzburg)
Susan Kozel (Università di Malmö)
Adam Ledgeway (University of Cambridge)
José María Micó (Università Pompeu Fabra, Barcellona)
Marco Petoletti (Università Cattolica di Milano)
Alessandro Polcri (Fordham University, NY)
Tommaso Raso (Universidade Federal del Minas Gerais)
Carole Talon-Hugon (Université de Nice-Sophia Antipolis)
Fabio Zinelli (École Pratique des Hautes Études, Paris)

Reading the Book of Nature Across Sciences, History and Philosophy

Proceedings of the Conference
to celebrate 400th anniversary
of Galilei's *Il Saggiatore*

(28th-30th of June 2023,
Museo Galileo - Istituto
e Museo di Storia della Scienza, Florence)

edited by
Davide Pietrini

© 2026 Società Editrice Fiorentina, per le edizioni a stampa
© 2026 The Authors, per i testi

via Capo di Mondo, 78 - 50136 Firenze
info@sefeditrice.it
edu.sefeditrice.it

E-ISSN 2974-6876
ISBN 978-88-6032-826-7
E-ISBN 978-88-6032-827-4
DOI 10.35948/DILEF/978-88-6032-827-4



La Collana è pubblicata ad Accesso Aperto con licenza Creative Commons
Licence CC-BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.it>

Crediti fotografici

© 2026 crediti dichiarati in didascalia.
Riproduzione in qualsiasi forma, intera o parziale, vietata

Progetto grafico e impaginazione
Francesco Sensoli

Copertina
Studio Grafico Norfini

Font
Alegreya ht e Alegreya Sans ht
(Juan Pablo del Peral, Huerta Tipográfica)

Indice

- 7 *Philosophy, history and science.*
Interdisciplinary paths on multiple faces of nature
Davide Pietrini
- 13 *Heaven is a Space on Earth: Geometry in sacred spaces*
in early modern Europe and Japan
Antonia Karaisl
- 35 *Dis-robing the Guardaroba:*
The Arctic as viewed from Florence
Elisa Palomino, John Cloud
- 67 *Mathematics, Language Games, and Black Boxes*
from Galileo to Wittgenstein
Giovanni Galli
- 93 *Galilei's Strategy of Subjectivisation*
Mario Schärli
- 119 *Galileo Galilei: non solo scienza.*
Per una rivisitazione della lettura husserliana
Sara Drioli
- 141 *"Tutto è Dao". Una riformulazione delle nostre idee e del nostro approccio*
nei confronti dell'ambiente attraverso una prospettiva daoista
Sara Francescato

- 159 *Più largo campo di filosofare: John Wheeler, il Liber Naturae e l'ingegneria*
Stefano Furlan
- 187 *Sul concetto di simmetria, da Galileo alla teoria quantistica dei campi*
Luciano Boi
- 239 *Historians of Science, Creators. Philosophical Perspectives*
on the History of Science on the light of Il Saggiatore by Galileo Galilei
Flavia Marcacci
- 271 *Indice dei nomi*

Philosophy, history and science.

Interdisciplinary paths

on multiple faces of nature

Davide Pietrini

Il Saggiatore (1623) by Galileo Galilei was one of the most influential books of the 17th century. In recent years, many authors have written about *Il Saggiatore* and its context, explaining its content and the reasons for its publication. In the book, based on arguments, partially based on empirical observations and always elaborated within epistemic remarks, against his opponent's syllogistic arguments, Galileo confronts Orazio Grassi's views on the origin of comets. The title, indeed, recalls the precision balance, known as the *saggiatore*, with which goldsmiths weighed gold. Although *Il Saggiatore* contains some inaccurate statements by Galileo about the nature of comets, the book is a milestone in the history of scientific thought, as it declares the way nature should be investigated with the famous statement:

La filosofia [della natura] è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto dinanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscere i caratteri ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi [sic] è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto¹.

¹ GALILEO GALILEI, *Il saggiatore*, in *Le opere di Galileo Galilei. Ristampa della Edizione Nazionale*, Antonio Favaro (ed.), vol. VI, Firenze, Tipografia di Barbera, 1933, p. 232.

From a literary point of view, the work is considered highly effervescent. Galileo uses multiple linguistic registers and explanatory devices from different disciplines, such as rhetorical figures, images from the world of art, philosophical quotations, physical and thought experiments.

To celebrate the 400th anniversary of Galilei's *Il Saggiatore*, the councils of SFI (Italian Society of Philosophy), SILFS (Italian Society for Logic and Philosophy of Science) and SISS (Italian Society for the History of Science), under the auspices of the Museo Galileo - Istituto e Museo di Storia della Scienza, The Department of Humanities and Philosophy (DILEF) of the University of Florence and World Congress Philosophy Rome 2024, organized a conference entirely devoted to young researchers with the participation of three invited speakers: the philosopher of science Luciano Boi, the historian of science Flavia Marcacci and the logician Massimo Mugnai. The conference was held at Museo Galileo in Florence from the 28th to 30th of June 2023 (<https://sites.google.com/uniurb.it/sfi-silfs-siss-conference/home?authuser=0>). On behalf of the organising committee, I would like to thank Museo Galileo, which hosted the event and enabled us to organise this initiative in an evocative setting.

The conference aimed to gather young researchers working in philosophy, philosophy of science and history of science and offer them the opportunity to present and discuss their papers in an informal and stimulating environment. The papers were followed by a lively debate and interesting insights enriched by the participation of members of the organising societies and Museo Galileo: Ferdinando Abbri, Francesco Bianchini, Filippo Camerota, Elena Canadelli, Gustavo Cevolani, Natacha Fabbri, Vincenzo Fano, Roberto Ferrari, Matteo Galletti, Paolo Galluzzi, Pierluigi Graziani, Alessandra Lenzi, Matteo Martelli, Stefano Poggi, Gaspare Polizzi and Fiorenza Toccafondi.

Like Galileo's work, the conference was also strongly interdisciplinary, giving voice to the most important research by young scholars and currently characterising the scientific disciplinary field of philosophy and the history of science.

In this volume, we publish some lectures of the conference. The fil-rouge is the evolution of knowledge and the scientific thought without

neglecting their relation to nature, techniques and technology. Different approaches are analysed.

In *Heaven is a Space on Earth: Geometry in sacred spaces in early modern Europe and Japan* Antonia Karaisl shows that not only the practical problems precipitated mathematical advances in diverse technical fields that fostered the progress of mathematics in the Early Modern context, but also Wasan, a mathematical tradition developed in Japan as an intellectual pursuit with a social dimension. In *Dis-robing the Guardaroba: The Arctic as viewed from Florence* Elisa Palomino and John Cloud examine the representation of the Arctic region, as depicted in the four ‘Polar Lands’ maps in Palazzo Vecchio’s *Guardaroba*, inspired by Mercator’s azimuthal projection of the North Pole, and the circulation of objects during the early modern period as trade goods and diplomatic gifts. In *Mathematics, Language Games, and Black Boxes from Galileo to Wittgenstein* Giovanni Galli explores the conceptual implications of language modelling in artificial intelligence, particularly the role of mathematics in natural language processing systems and Large Language Models (LLMs). It juxtaposes the perspectives of Galileo and Wittgenstein on the nature of mathematics and its connection to the ability of LLMs to understand language. In *Galilei’s Strategy of Subjectivisation* Mario Schärli explicates and critically examines the Strategy of Subjectivisation, interpreted as transition from metaphysical thesis that things have no sensory qualities to the thesis that sensory qualities are located in the experiencing subject in Galilei’s *Il Saggiatore*. In *Galileo Galilei: non solo scienza. Per una rivisitazione della lettura husserliana* Sara Drioli reviews the interpretation provided by Husserl on the figure of Galileo that emerges also and above all in his last work. In *“Tutto è Dao”. Una riformulazione delle nostre idee e del nostro approccio nei confronti dell’ambiente attraverso una prospettiva daoista* Sara Francescato reformulates the traditional conceptions of nature through a comparison with ideas developed within the different frame of the Chinese culture, analysing the human-nature relationship from a daoist perspective. In *Più largo campo di filosofare: John Wheeler, il Liber Naturae e l’ingegneria* Stefano Furlan examines the methodological analysis by John A. Wheeler on the engineering and the more practical dimension of science, giving

particular attention to the Galilean celebrations of 1964 and contextualizing some Wheeler's reflections inspired by that anniversary.

At the end of the volume, essays by two invited speakers are published. In *Sul concetto di simmetria, da Galileo alla teoria quantistica dei campi* Luciano Boi offers an in-depth historical and philosophical excursus on the development of the concept of relativity, starting from the scientific revolution of the seventeenth century up to Einstein's theory of general relativity. He examines the contributions of scientists and philosophers who have shaped our current way of understanding space, time and the laws of physics. In *Historians of Science, Creators. Philosophical Perspectives on the History of Science on the light of The Assayer by Galileo Galilei* Flavia Marcacci offers an interpretation of Galileo's *Il Saggiatore*, emphasizing its literary and narrative dimensions, the role of scientific instruments and the rhetorical-dialogical dispute. Her analysis highlights the enduring relevance of Galileo's work and underscores the value of interdisciplinarity in philosophical and historiographical inquiry.

All essays of this volume focus on a particular field of knowledge and highlight the complex relationship between history, philosophy and science, to investigate the evolution of knowledge and its relationship with the many faces of nature.

Acknowledgements

I would like to thank the conference organising committee, particularly Fiorenza Toccafondi, for allowing me to coordinate this volume, from whose papers I have learned a great deal.

This work was partly carried out within the PRIN 2017 program "The Manifest Image and the Scientific Image" prot. 2017ZNNW7F_004, funded by the Italian Ministry of Education, University and Research, and the public notice for the submission of capacity-building project proposals for cultural operators, within the framework of the PNRR, MISSIONE 1 - Digitalizzazione, innovazione, competitività, cultura e turismo, COMPONENTE 3 - Turismo e cultura 4.0, MISURA 3 - In-

dustrie culturali e creative, INVESTIMENTO 3.3 – “Capacity building per gli operatori della cultura per gestire la transizione digitale e verde”, funded by the European Union – NextGenerationEU and managed by the Italian Ministry of Culture: PNRR, Missione 1, “Progetto 2- Servizi per eventi verdi” (CUP C31B23000400004 – ID PNRR-BI20230003368388/2).

The present publication is realized within the framework of the PNRR, Missione 1 – Digitalizzazione, innovazione, competitività e cultura, Componente 3 – Turismo e Cultura 4.0 (M1C3), Misura 3 “Industrie culturali e creative, INVESTIMENTO 3.3 – “Capacity building per gli operatori della cultura per gestire la transizione digitale e verde”, funded by the European Union – NextGenerationEU and managed by the Italian Ministry of Culture: PNRR, Missione 1: “Progetto 4- Empower eventi verdi” (CUP C31B23000420004 – ID PNRR-BI20230003368388/4), and it constitutes an output of the aforementioned project “Progetto 4- Empower eventi verdi”.

Heaven is a Space on Earth: Geometry in sacred spaces in early modern Europe and Japan

Antonia Karaisl

1. Introduction

The progress of mathematics in Early Modern Europe is closely entwined with the Scientific Revolution and often enough, practical problems precipitated mathematical advance in diverse fields, be that navigation, astronomy, optics, or mechanics¹. *Wasan* (和算), the mathematical discourse that developed in Japan throughout the Edo period (1603-1867), provides a striking contrast. Originally catalysed by the drip-drop influx of ancient Chinese treatises, *wasan's* origins playfully reflect the material reality of a merchant or farmer; its development, however, was not necessarily driven by practical considerations. At its peak, *wasan* prospered in splendid abstraction: as mathematics for mathematics' sake, an intellectual pursuit with a social dimension. This is not to say that there was no such thing as applied mathematics in Edo Japan. Yet quite apart from utilitarian considerations, a nation-wide network of mathematics scholars emerged that valued the discipline as an art, akin to calligraphy, tea ceremony or ikebana².

¹ WILBUR R. KNORR *et al.*, *Mathematics*, in «Encyclopedia Britannica», 28 Jan. 2024, <https://www.britannica.com/science/mathematics>. Accessed 29 January 2024.

² Consider e.g. the preface to the *Sanpo koren* (算法瑣璣) (1836) where Tadayoshi Kobayashi defends the lack of practical motivation to his *sangaku* problems, in NOBUYA NAKAMURA, TETSUO SEKIGUCHI, *Sanpo-Koren & Kankai-No-Utsuwa. Problems and Solutions*, Nagano City, Kyoikushokan, 2014, pp. 42-43.

East Asian scholars first got a taste of Europe's mathematical tradition in the sixteenth century when Jesuit missionaries brought their astronomy and geometry to China and Japan. Yet whilst the Aristotelian-Ptolemaic cosmos experienced an afterlife on Japanese shores, Euclid, Europe's poster child, seems to have fallen flat. Even with the introduction of a Chinese translation of the work at a later stage, Japanese mathematicians did not seem to assign any value to it³. The reason could simply have been that Euclid's *Elements* did not offer anything conducive to the discourse inherited from Chinese predecessors; in fact, said Chinese predecessors seem to have reacted rather coldly to said Chinese translation of the work themselves⁴.

There is, however, a faint analogy in practice linking *wasan* with the Jesuits' reception of Euclid in Portugal: the display of geometric themes and problems in religious spaces. In the Jesuit college of Coimbra, tiles with Euclidean theorems adorned select classroom walls; in an eighteenth century mathematics auditorium in the Jesuit college in Sant'Antão, a cycle of decorative tiles depict mathematical disciplines in allegorical form, with a chosen theorem by Archimedes embedded in an emblematic detail⁵. In Japan meanwhile, *wasan* gave rise to the medium of *sangaku* (算額), beautifully illustrated votive tablets containing mathematical problems in word and image. *Sangaku* were

3 OSAMU KOTA, *Western Mathematics on Japanese Soil – A History of Teaching and Learning of Mathematics in Modern Japan*, in «Advanced Studies in Pure Mathematics», vol. 79, 2018, pp. 337-346: p. 337.

4 JEAN-CLAUDE MARTZLOFF, *Geometry in Chinese Mathematics*, in Helaine Selin (ed.), «Encyclopaedia of the History of Science, Technology, and Medicine in Non-Western Cultures», Dordrecht, Springer, 2008, pp. 1005-1011: p. 1009.

5 HENRIQUE LEITÃO, SAMUEL GESSNER, *Euclid in Tiles: The Mathematical Azulejos of the Jesuit College in Coimbra*, in «Mathematische Semesterberichte», vol. 61, No. 1, 2014, pp. 1-5; HENRIQUE LEITÃO, SAMUEL GESSNER, *Una tribus ratio: Ikonographie der Wissensvermittlung und Selbstdarstellung der Jesuiten im Mathematiksaal des Kollegs Santo Antão in Lissabon*, in «Mathematische Semesterberichte», vol. 62, 2015, pp. 1-6. Photographs and more detailed descriptions of the mathematical tiles in Coimbra and Sant'Antão can be found in Carlota Simões, António Leal Duarte (eds.), *Azulejos Que Ensinam*, Coimbra, Universidade de Coimbra, 2007.

dedicated in temples and shrines throughout the country, ostensibly to thank the Gods for the successful solution of a problem⁶. The custom flourished throughout Japan's Edo period, only to founder in the first decades of the 20th century. Today, approximately 900 extant tablets are still kept in temples and shrines throughout the country.



Fig. 1 Sangaku from Yamatotakeru Shrine, Koriyama, Fukushima Prefecture (dedicated 1881)

Whilst print publications tended to be the domain of established scholars, *sangaku* provided a medium for figures of lesser prominence to take part in the conversation. Beyond voice and paper, therefore, they presented an alternative form of dissemination from a broader range of contributors to a wider audience, benefiting from the footfall of temples and shrines⁷. Each *sangaku* typically contains one or more illustrated problems providing question, answer, and technique, alongside the dedicatees' name and affiliation. The problem's full solution, however, is not revealed, challenging punters to find their own. *Sangaku* typically solicit the calculation of lengths, areas, or volumes of geometric figures. *Prima facie*, the illustrations provided on each tablet seem reminiscent of the diagrams familiar from Euclid's *Elements* – in fact, they occasion-

⁶ SUJATHA RAMDORAI, *Interview with Hidetoshi Fukagawa*, in «Asia Pacific Mathematics Newsletter», vol. 3, No. 4, 2013, pp. 30-36: see p. 32.

⁷ ANNICK HORIUCHI, *Japanese Mathematics in the Edo Period (1600-1868)*, trans. by Silke Wimmer-Zagier, Basel, Springer, 2010, p. 21.

ally have been described as “Euclidean”⁸. A closer inspection of the techniques employed, however, reveals that classic trappings of Euclidean geometry (for example, the use of angles, parallelism or perpendicular lines) are mostly absent, nor do the tablets signal the existence of an axiomatic knowledge system. Generally speaking, *wasan*’s formulae seem to derive from complex equations, not deductive logic.

In spite of the close chronological range – the rise of *wasan* coincides with the tail end of the Jesuit mission in Japan – there is no reason to assume that an actual link exists between the mathematical tiles in Portugal and *sangaku* in Japan. Yet both cases, though oceans apart, hint at an elevated role reserved for mathematics within the realm of human thought – elevated enough, in fact, to merit a space within religious contexts, too. The following article takes this observation as the point of departure for a comparative review of the relationship between mathematical thinking and spirituality in Christian philosophy and in Japan respectively. The argument will first cover the links between Euclidean geometry and Christian cosmology in Jesuit discourse, to then investigate the role of mathematics within Japan’s multi-faith landscape.

2.1. Euclid and the Jesuits: A Royal Road to Heaven?

Euclid was a stable component of the *Quadrivium*, the curriculum for mathematical sciences fundamental to the study of Liberal Arts in Europe’s universities throughout the Middle Ages. The rise of printing technology in the fifteenth century helped to release geometry’s power beyond curricular confines, as the *Elements* were republished in translations old and new. Euclid’s subsequent spread on the European continent sparked a quiet Renaissance of his work, with the result that «it crossed every intellectual, religious, linguistic, and disciplinary

⁸ SUJATHA RAMDORAI, *Interview with Hidetoshi Fukagawa*, cit., p. 34.

boundary», providing a «common language of space»⁹. The conceptual power of Euclid's *Elements* not only appealed to science in theory and practice, but inspired epistemological admiration from religious camps besides, judging from the Protestant scholar Philipp Melancthon's preface to a 1536 edition of the *Elements*:

No one without some knowledge sees enough of this art, which is life demonstrated. No one without it will be a maker of method [...]. There is here great praise of geometry, which did not cling to inadequate and inferior [human] constructions, but flew into heaven and transported human minds, which were stuck in the mud, back up to the heavenly throne¹⁰.

Here, geometry is felt to exceed the boundaries of earth-bound science, providing glimpses of a higher-level order in the universe. This sentiment not only struck home with the Protestants but found a particular form of expression within the science and pedagogy promoted by the Jesuits. Founded in 1534, the Jesuit Order established a network of educational institutions across the world to support their proselytization efforts. Considerable care was invested in compiling one curriculum according to Humanist principles, the *Ratio Studiorum*, which was published in 1599 in an effort to ensure pedagogical consistency and intellectual rigour throughout Jesuit schooling¹¹. Parts of Euclid's *Elements* were taught to students of natural philosophy, presumably thanks to the lobbying efforts of Christopher Clavius, eminent mathematician and astronomer based at the Jesuit College in Rome¹².

⁹ MICHAEL J. SAUTER, *For the Love of Geometry. The Rise of Euclidism in the Early Modern World, 1450-1850*, in Jason Coy, Benjamin Marschke, Jared Poley, Claudia Verhoeven (eds.), *Kinship, Community and Self*, New York, Berghahn Books, 2015, pp. 185-201: see pp. 185-186.

¹⁰ Quoted in MICHAEL J. SAUTER, *For the Love of Geometry*, cit., p. 191.

¹¹ CLAUDE PAVUR, S.J. (ed.), *The Ratio Studiorum. The Official Plan for Jesuit Education*, Saint Louis, The Institute of Jesuit Sources, 2005, p. VII.

¹² Ivi, p. 109; JAMES M. LATTIS, *Between Copernicus and Galileo. Christoph Clavius and the Collapse of Ptolemaic Cosmology*, Chicago and London, The University of Chicago Press, 1994, p. 32.

Clavius himself published extensively on mathematics, most notably commentaries on Euclid's *Elements* and Sacrobosco's *Sphaera*, and commended the discipline for its epistemological certainty and its utility for other fields¹³. The first edition of his commentary on the *Elements*, in that vein, praises Euclid as the portal to other mathematical sciences¹⁴. The dedicatory letter to the commentary's revised edition of 1607, moreover, touches upon said transcendent dimension of geometry:

Et [...] si nihil aliud, hoc sane nostrum illud studium artemque abundantissime commendabit, laudibusque accumulabit multifariis, quod Plato dicit, Deum semper γεωμετρεῖν, hoc est, certissimo motu omnia metientem gubernare haec inferiora. [...] Cum itaque huius summi artificis lineas non considerare, hacque pulcherrima Geometria, quae diuinitatem nobis ostendit, Deumque monstrat, non delectari, nec illius tam luculentia vestigia aspicere aut inquirere, summa & manifesta sit impietas, nemo me hercle [...] vitio unquam vertet [...].

And [...] if nothing else, then surely this will amply commend our effort and our discipline, and bestow manifold praise, namely, that Plato claims God to always *geometrize*, that is, to govern the things below by measuring everything with steadiest movement. [...] Since it would therefore be an egregious and manifest impiety not to contemplate the lines of the sublime craftsman, and not to delight in this beautiful Geometry, which reveals divinity to us and shows us God, and not to behold or investigate his traces so splendid, surely nobody will ever find fault with me [...]¹⁵.

Clavius thus brands regular patterns in the cosmos as a deliberate trait of divine agency – and geometry, the tool to their discovery, as a connective tissue to God as the world's creator. The Jesuit mathematician himself followed his own precept to the letter: his commentary on

¹³ Ivi, p. 35.

¹⁴ CHRISTOPHER CLAVIUS, *Euclidis Elementorum Libri XV*, Rome, Accoltus, 1574, see 'Ad Lectorem'.

¹⁵ CHRISTOPHER CLAVIUS, *Euclidis Elementorum Libri XV*, Frankfurt, Hoffmann, 1607, sig^a 4v–*5 (translation added by author).

Johannes Sacrobosco's *Sphaera*, a widely used astronomy primer, inserts numerous geometric diagrams to aid the conceptual grasp of the universe, and an additional chapter on isoperimetric figures¹⁶.

The geometric tiles installed in Coimbra College more than a century later testify to a shared enthusiasm for Euclid. In his own days, however, Clavius faced an uphill battle convincing his brethren of the benefits of a mathematically bent curriculum. Contrary to his lobbying efforts, the *Ratio Studiorum* of 1599 eked out a minimal role for the discipline. Instead of a three-year course on mathematics suggested in a draft of 1586, the final version merely prescribed lessons on Euclid and astronomy to students of natural philosophy. In the judgment of Karp and Schubring, «[f]or their ultimate goal, the formation of faithful priests, mathematics clearly played no integral role for the Jesuits»¹⁷. This may have been the consequence of epistemological snobbery – natural philosophers and theologians still considered the syllogism's demonstrative powers superior to the deductive proofs used in Euclid's *Elements*¹⁸. Yet even then, the appeal of mathematics' practical utility provided the Jesuit enterprise with a considerable pull factor in Europe and abroad, Japan being a notable example¹⁹. Thus, if education was a means to an end – proselytization – then mathematics provided a means to the means.

Particularly in Portugal, where maritime exploration and training of skilled navigators was a national concern, applied mathematics posed a strong asset to Jesuit education. The tiles depicting Euclidean geometry in Coimbra College fit well within this branding programme.

- ¹⁶ CHRISTOPHER CLAVIUS, *In Sphaeram Ioannis de Sacro Bosco Commentarius*, Rome, Victorius Helianus, 1570, pp. 81-104.
- ¹⁷ Alexander Karp, Gert Schubring (eds.), *Handbook on the History of Mathematics Education*, New York, Heidelberg, Dordrecht, London, Springer, 2014, pp. 134-135.
- ¹⁸ JAMES M. LATTIS, *Between Copernicus and Galileo*, cit., p. 33.
- ¹⁹ D. MAX MOERMAN, *The Epistemology of Vision: Buddhist versus Jesuit Cosmology in Early Modern Japan*, in Angelo Cattaneo, Alexandra Curvelo (eds.), *Interactions between Rivals: The Christian Mission and Buddhist Sects in Japan (c.1549-c.1647)*, Berlin, Peter Lang, 2021, pp. 319-357: see pp. 319-320.

Although decorated classrooms were not unusual for Jesuit colleges, mathematical tiles have to date only been found in Portugal²⁰. Apart from Euclidean theorems, the tiles in Coimbra also feature schematic drawings from astronomy and hydraulics; the wall decoration in the Colégio de Santo Antão, at that time Portugal's foremost institution teaching applied mathematics, depicts personifications of nautical sciences, geometry, astronomy, and military architecture. Both cases exemplify the interplay between mathematical theory and practical application and the unity of the Jesuits' pedagogical ideal incorporating mathematics in a curriculum otherwise dedicated to theology, oratory, and philology²¹.

This transmigration of geometric themes into the service of other disciplines not only shows up on Jesuit classroom walls, but also in print. The Jesuit curriculum may not have yielded to Clavius' interests all the way, but the idea of the rational universe and the spiritual dimension of science pervades elsewhere. The Jesuit teaching edifice rested on Aristotle's philosophy and Thomas Aquinas' theology – in fact, it had been explicitly and doctrinally vested in these two authorities from the very beginning onwards by the Order's founder Ignatius Loyola in his *Constitutions of the Society of Jesus*²². As scholars have argued, Aristotle's works were not simply adopted to the letter but rather served as a framework; the content could be modified and adapted to provide new vantage points for natural philosophy²³. This strategy also transpires in the Coimbra Commentaries, the authoritative work of Aristotelian exegesis compiled by Jesuit scholars in Coimbra over several decades and published 1593 onwards. Issued at the tail end of a century where Medieval cosmology had come under terse review, it presents a recon-

²⁰ HENRIQUE LEITÃO, SAMUEL GESSNER, *Una tribus ratio*, cit., p.1.

²¹ Ivi, p. 5.

²² LUÍS MIGUEL CAROLINO, *Astronomy, Cosmology and Jesuit Discipline, 1540-1758*, in Ines G. Županov (ed.), *The Oxford Handbook of the Jesuits*, Oxford, Oxford University Press, 2019, pp. 670-707: see p. 673.

²³ SHEILA J. RABIN, *Early Modern Jesuit Science. A Historiographical Essay*, in «Journal of Jesuit Studies», vol. 1, 2014, pp. 88-104: see p. 93.

solidation of the Aristotelian knowledge system and proffers new arguments defending central tenets that had come under fire²⁴. Geometry had a role to play in this context – more so than arithmetic, in fact. There are several references to Euclid in Coimbra's commentary on Aristotle's *De Coelo*, also referring to Clavius' works²⁵. Yet unlike the latter, Mário Santiago de Carvalho notes, the Coimbran exposition «did not mathematize the world nor did it try to make up for it by promoting geometry» – it aimed to provide a rational framework incorporating heaven and earth within one consistent system²⁶. In that sense, we do not find actual calculations or diagrams. Yet a number of geometric thought experiments appear in tandem with what de Carvalho terms a sort of «experientialism» whereby «pseudo-empirical» methods were used to substantiate Aristotelian dogma²⁷. To cite one such example, the finitude of elements that make up the Earth is explained in analogy to the dissection of a geometric figure or body into component parts, which, so the Jesuit theory goes, must be in finite number²⁸.

This mode of argument also travelled to Japan with Pedro Gomez, who had taught in Coimbra and whose lecture notes fed into the compilation of the Coimbra Commentaries after his departure²⁹. Appointed superior of the Bungo area in Japan, Gomez initiated a seminar for philosophy and theology in the college of Finai and authored a manual on the Catholic Faith in 1593, combined in a tripartite compendium with one treatise each on astronomy (*De Sphaera*) and on the soul (*De*

²⁴ EDWARD GRANT, *The Partial Transformation of Medieval Cosmology by Jesuits in the Sixteenth and Seventeenth Century*, in Mordechai Feingold (ed.), *Jesuit Science and the Republic of Letters*, Cambridge, MA, MIT Press, 2003, pp. 127-155: see pp. 127-129.

²⁵ See e.g. COLLEGIUM CONIMBRICENSE, *Commentarii Collegii Conimbricensis Societatis Iesu in Quatuor Libros de Coelo Aristotelis Stagiritae*, Lyon, Giunta, 1594, pp. 7 and 450.

²⁶ MÁRIO SANTIAGO DE CARVALHO, *The Coimbra Jesuit Aristotelian Course*, Coimbra, Coimbra University Press, 2018, pp. 89-90.

²⁷ Ivi, cit., p. 87.

²⁸ COLLEGIUM CONIMBRICENSE, *Commentarii Collegii Conimbricensis Societatis Iesu in Quatuor Libros de Coelo Aristotelis Stagiritae*, cit., p. 419.

²⁹ MÁRIO SANTIAGO DE CARVALHO, *The Coimbra Jesuit Aristotelian Course*, cit., p. 17.

Anima)³⁰. The *Sphaera* is not an autograph nor signed by Gomez, but the responsibility for the content is commonly ascribed to him³¹. The astronomy it presents shows some affinity to the Coimbra Commentaries insofar as it interweaves philosophical argument, theological dogma and spatial projection – akin to said «pseudo-empirical» thinking. The perhaps most daring feature shared between the *Commentaries* and Gomez' manual is the square shape of the so-called Empyrean Heaven. The Empyrean Heaven is a theological concept, not a scientific one; it denotes a realm up above where the blessed dwell in the afterlife. Although a purely imagined entity, the Empyrean found its way into scientific depictions of the Medieval cosmos, in analogy to the spheres containing planets and fixed stars³². Drawn as the outermost sphere in the geocentric universe, the Empyrean Heaven underwent a geometric transformation in the hands of the Coimbra Jesuits: unlike the mobile orbs carrying planets and fixed stars, they argued, it was probably square, since a square shape is more conducive to immobility as the realm of the blessed was imagined to be³³.

The Square Empyrean Heaven is not merely the visual projection of a spiritual thought (or faith) experiment. It is symptomatic for the rationalistic blending of theology and science, exemplified by the spatial reconciliation of the real and the imagined rendition of their shared sphere of interest: Heaven. In that sense, the geometric tiles in Coim-

³⁰ See Vatican Library, Reg.lat.426; JOSEPH SCHÜTTE, (S.J.), *Drei Unterrichtsbücher für japanische Jesuitenprediger aus dem XVI. Jahrhundert*, in «Archivum Historicum Societatis Iesu», vol. 8, 1939, pp. 223-256: see pp. 225-228.

³¹ HIRAOKA RYUJI, AKIHIKO WATANABE, *A Jesuit Cosmological Textbook in "Christian Century" Japan: De Sphaera of Pedro Gomez (Part II)*, in «SCIAMVS», vol. 16, 2015, pp. 125-223: see pp. 127-128.

³² JOHN NORTH, *Astronomy and Astrology*, in David C. Lindberg, Michael H. Shank (eds.), *The Cambridge History of Science*, Cambridge, Cambridge University Press, 2013, II, pp. 456-844: see p. 456.

³³ COLLEGIUM CONIMBRICENSE, *Commentarii Collegii Conimbricensis Societatis Iesu in Quatuor Libros de Coelo Aristotelis Stagiritae*, cit., p. 245; RYUJI HIRAOKA, *Jesuit Cosmological Textbook in "the Christian Century" Japan: De Sphaera of Pedro Gomez (Part I)*, in «SCIAMVS», 6, 2005, pp. 99-175: see p. 112.

bra not only make a point on the certainty and utility of mathematics. They expound something more fundamental and perhaps fundamentally Christian: the belief in a rational universe which can be rationally explored by a rational mind, to the point of knocking on the door of the ineffable. The very unity created between science and theology is fuelled by the idea that the rational exploration of the universe would bring the mind closer to God. It therefore opens a vast field for logic-based proselytization, starting with Clavius' *luculenta vestigia* and rising to the heights of Coimbra's square Empyrean heaven. What this unity of science and faith achieves, moreover, is the link between logic and faith-based articles: the "true" religion, as the Christians conceived of it, can now be proven "true" through scientific argument – and defended against "false" contenders.

2.2. Mathematics in Edo Japan: Pursuit, not projection

In Japan, the Jesuits invested considerable effort in proving Buddhism and Shintoism "false", supporting their monotheistic worldview with a bedrock of scientific knowledge³⁴. This attitude differed considerably to that of their host country, which had historically persisted in a multi-faith environment where Buddhism, Shintoism and later Neo-Confucianism co-existed or even blended. Unlike Christendom, Japan's spiritual landscape did not rest on a cosmogonical narrative precipitated by God's deliberate agency³⁵. The *Kojiki*, for example, Japan's mytho-historical account of "Ancient things" predates the existence of the gods with spontaneous formation of matter, expressed in deliberately vague terms:

³⁴ CHARLES BOXER. *The Christian Century in Japan, 1549-1650*, Manchester, Carcanet, 1993, pp. 220-221; YOSHIHISA YAMAMOTO, *Scholasticism in Early Modern Japan*, in «Mediaevalia. Textos e Estudos», vol. 31, 2012, pp. 251-279: see p. 262.

³⁵ ANGELO CATTANEO, *Spatial and Linguistic Patterns in Early Modern Global History*, in Angelo Cattaneo, Alexandra Curvelo (eds.), *Interactions between Rivals: The Christian Mission and Buddhist Sects in Japan (c.1549-c.1647)*, Berlin, Peter Lang, 2021, pp. 277-318: see pp. 297-298.

2: When the primeval matter had congealed but breath and form had not yet appeared, there were no names and no action. Who can know its form?

3: However, when heaven and earth were first divided, the three deities became the first of all creation. The Male and Female here began, and the two spirits were the ancestors of all creation³⁶.

As Philippi explains, the *Kojiki*'s potpourri of myths, genealogies and tales has to be understood as an attempt to justify existing social hierarchies and to locate them within this socio-mythological structure³⁷. As that, the work does not bear any cosmogonic pretences. In fact, the vagueness concerning the very beginning of it all is instructive: if we believe the *Kojiki*, the origin of the universe better be beyond human understanding. And just as the coming-to-be of the world is not presented as an orderly, willed creation, there is no single God responsible for the world's design – and no conceptual link between regularities observed in the universe and a divine masterplan.

As of the beginning of the eighteenth century, a number of Buddhist scholars did attempt to map the universe using geometric diagrams, in close combat with their rationalist rivals from Europe³⁸. Yet these projections are not drawn from techniques familiar from *sangaku* nor is there a particular link between Buddhism and *wasan*. In fact, *sangaku* do not appear to be tied to a specific religion or belief; they were dedicated in Buddhist temples and Shinto shrines alike, across a whole country featuring a variety of creeds and traditions. As that, they are the collective product of a decentralized network of people varied in faith and practice; their common denominator is their pursuit of mathematics.

Some *sangaku* problems playfully reflect on applied mathematics, such as the measurement of mountain tops or the area or volume of physical objects; one problem from a *sangaku* dedicated at Manpukuji in Date, Fukushima Prefecture, even maps the sun, the moon and two

³⁶ DONALD PHILIPPI (ed.), *Kojiki*, Tokyo, University of Tokyo Press, 1968, p. 37.

³⁷ Ivi, p. 13.

³⁸ D. MAX MOERMAN, *The Epistemology of Vision*, pp. 326ff.

stars in a miniature cosmos³⁹. But even though material realities may have provided attractive backdrops for calculation problems, *wasan* scholars were not primarily driven by practical concerns, and on occasion even signal a self-conscious distance thereof⁴⁰.

The following is an attempt to locate the role of *sangaku* within Edo Japan's intellectual landscape to understand whether we can speak of a spiritual dimension at all – or whether the presence of *sangaku* in temples and shrines is merely an accident of location.

The earliest mention of *sangaku* places the custom in the middle of the 17th century⁴¹. From the point of timing, this postdates the Jesuit presence in Japan and the official commencement of Edo Japan's isolationist policy, decreed through four *sakoku* laws issued from 1633 to 1636⁴². More poignantly, the rise of *wasan* and of *sangaku* follows in the wake of a new influx of Chinese mathematical treatises around 1600⁴³. *Wasan* not only spread as a consequence of imported knowledge; as Terence Jackson argues, the Tokugawa period brought political and socioeconomic changes, the political unification of the country not the least of them, which spurred an outright information revolution «systematized in part around extensive social networks and the expanding demand for information among all classes»⁴⁴. For one, a decree by Toyotomi Hideyoshi in 1591 officially divided society into four hierarchical classes: samurai, farmers, artisans and merchants. In the

³⁹ Many thanks to Kansei Hirabayashi, Chief Priest of Manpukuji in Date, Fukushima, for showing me this unique problem.

⁴⁰ MARK RAVINA, *Wasan and the Physics That Wasn't. Mathematics in the Tokugawa Period*, in «Monumenta Nipponica», vol. 48, No. 2, 1993, 205-224: see p. 206.

⁴¹ SUJATHA RAMDORAI, *Interview with Hidetoshi Fukagawa*, cit., p. 34.

⁴² DANIELE FRISON, *Contextual Chronology of the Christian Mission in Japan c.1540-c.1640*, in Angelo Cattaneo, Alexandra Curvelo (eds.), *Interactions between Rivals: The Christian Mission and Buddhist Sects in Japan (c.1549-c.1647)*, Berlin, Peter Lang, 2021, pp. 46-59: see p. 58.

⁴³ RICHARD RUBINGER, *Private Academies of the Tokugawa Era*, Princeton (NJ), Princeton University Press, 1982, p. 183.

⁴⁴ TERRENCE JACKSON, *Network of Knowledge: Western Science and the Tokugawa Information Revolution*, Honolulu, University of Hawaii Press, 2016, p. 11.

absence of war, the samurai were reinvented as a class of noble bureaucrats with access to formal education in governmental schools. Besides that, however, two types of schools existed that were open to all social strata: temple schools (*terakoya*), and private academies (*juku* or *shiju-ku*), which offered a wide range of disciplines from practical skills like reading and writing to cultural pursuits like philosophy, calligraphy and martial arts⁴⁵. By the end of the 19th century, some 80.000 *juku* are thought to have existed throughout Japan⁴⁶.

The country presumably profited from literacy trickling down the ranks. Still, it seems that Edo Japan's diversified educational landscape was less a nod to necessity than a curious peacetime dividend. In a land newly pacified, the former warrior class still functioned as the country's aristocracy. With trade burgeoning during the Edo period, however, social status and concomitant obligations were not always matched by financial security; in fact, the rising income of commoners stood in contrast to the static stipend paid to the samurai in service of the government. The rise of real wages meant many samurai families had to let go their servants, and lower-ranking nobles even took on part-time jobs to supplement their income⁴⁷. Running a *juku* hence provided an additional source of income for well-educated but cash-strapped samurai.

A *juku's* curriculum depended on the headmaster's specialization, and the disciplinary and institutional boundaries were by no means hard and fast. Many Confucian or "National Studies" *juku* included lessons in mathematics and writing alongside their headline subjects. Granted most *terakoya* also focused on these two skills, there must have been a considerable overlap with the lower-level *juku* if we judge

⁴⁵ KRISTINA HMELJAK SANGAWA, *Confucian Learning and Literacy in Japan's Schools of the Edo Period*, in «Asian Studies», vol. 5, No. 2, 2017, pp. 153-166: see pp. 155-156; RICHARD RUBINGER, *Private Academies of the Tokugawa Era*, cit., *passim*.

⁴⁶ ANNICK HORIUCHI, *Japanese Mathematics in the Edo Period (1600-1868)*, cit., p. 20.

⁴⁷ SUSAN B. HANLEY, *Tokugawa Society: Material Culture, Standard of Living, and Life-Styles*, in John Whitney Hall, James McClain (eds.), *The Cambridge History of Japan*, Cambridge, Cambridge University Press, 1991, pp. 660-705: see p. 703.

the school by its content⁴⁸. It was the *juku*, however, and their affiliation with renowned masters which fostered a nationwide exchange of scholars at a time when travel of people and knowledge was officially restricted⁴⁹. Two programmes received governmental sanction, *yuureki* (遊歴) and *yuugaku* (遊学), which allowed scholars or promising students to go on educational journeys or study at schools in a different jurisdiction or fiefdom. This movement of people promoted considerable exchange of knowledge and growth of networks across Japan⁵⁰. *Sangaku*, which typically record the problem author's educational affiliation, pay testament to the size and spread of these networks: some tablets cite a school or master at a veritable distance from the author's location⁵¹.

The custom of *sangaku* therefore creates a visible surface for two different stimuli alive in *wasan*'s social dimension: relationships and bonds within intellectual circles, and rivalry between competing schools and scholars. Arguably, this (largely) friendly fire did more to foster *wasan* as a discourse than the ambition to solve real life problems. As that, it makes more sense to interpret *wasan* as a cultural pursuit with a social rather than a utilitarian dimension, particularly if we consider it in the context of other *juku* where more ostensibly disinterested arts like *ikebana* or calligraphy were practiced.

Revisiting *sangaku* in the context of *wasan*'s print publications provides further hints as to their origin. Annick Horiuchi credits the *Jinkoki*, a popular Japanese language manual first published 1627 by Yoshida Mitsuyoshi, with the provision of a common mathematical

⁴⁸ RICHARD RUBINGER, *Private Academies of the Tokugawa Era*, cit., p. 182.

⁴⁹ Ivi, p. 15.

⁵⁰ Ivi, pp. 24-26.

⁵¹ The *Shinpeki Sanpo* (神壁算法, or «Mathematics of God's Wall»), a collection of *sangaku* problems published in the Edo period, records *sangaku* problems dedicated by members of the Seki Takakazu school in the whole country, from Hokkaido down to Kyushu, see ROSALIE HOSKING, *Solving Sangaku: A Traditional Solution to a Nineteenth Century Japanese Temple Problem*, in «Journal for History of Mathematics», vol. 30, No. 2, 2017, pp 53-69: see pp. 58-59.

vocabulary and solid instructions for abacus computation – which, in her view, «very likely favored the constitution of a wide and unified community of mathematical specialists across the country»⁵². In 1641, Yoshida published a new edition (*Shinpen jinkoki*, 新編塵劫記), which poignantly introduced the practice of *idai*, or “Bequeathed questions”: a set of unsolved problems in the appendix, designed to test the skills of mathematics masters. Yoshida’s first set of “Bequeathed questions” duly sparked off a response in kind where mathematicians strove to publish their solutions combined with new unsolved problems⁵³. *Sangaku* problems mirror this practice on wood; and incidentally, the earliest ones are thought to have been dedicated around the time when the fashion of *idai* consolidated⁵⁴. Without a doubt, Yoshida not merely used this strategy to throw out a gauntlet, but also as a means of advertising. Often enough, *wasan* publications did not disclose the full extent of the author’s knowledge so as to attract students rather than fully satisfy readers, also in the understanding that the proper place to transmit such knowledge was the classroom, from person to person⁵⁵. *Sangaku*, likewise, do not showcase solutions but only problems, answers, and techniques – and the name of the school with the curriculum to match. Intentional or not, they quite naturally served as colourful advertising boards.

Judging from the above, it is possible to view *sangaku* as items promoting a purely secular concern with no explicit reference to divine worship, a deeper philosophical portent or spirituality. Considering them as material manifestations of *wasan* as a practice, however, allows us to revisit *sangaku* in the context of Edo Japan’s intellectual landscape, at a time when Neo-Confucian thinking rapidly spread and

⁵² ANNICK HORIUCHI, *The Jinkōki Phenomenon: The Story of a Longstanding Calculation Manual in Tokugawa Japan*, in «Listen, Copy, Read: Popular Learning in Early Modern Japan», Leiden and Boston, Brill, 2014, pp 253–287: see p. 266.

⁵³ Ivi, pp. 274–275.

⁵⁴ NOBUYA NAKAMURA, TETSUO SEKIGUCHI, *Sanpo-Koren & Kankai-No-Utsuwa*, cit., p. 13.

⁵⁵ ANNICK HORIUCHI, *The Jinkōki Phenomenon*, cit., pp. 272–273.

consolidated across Japanese society⁵⁶. As it is, the Chinese mathematical tradition *wasan* hailed from bore Confucian undertones that seem to have taken root on Early Modern Japanese soil – unsurprisingly perhaps, granted that in the world of Edo *juku*, *wasan* and Confucian learning lived at close quarters. For one, mathematics was considered one of the “Six Arts” in Confucian philosophy, a curriculum of disciplines including chariot-driving, literature, music, archery, and the performance of rites besides. Education of this kind was expected to make a man not merely well-rounded, but also more virtuous⁵⁷. The “Six Arts” are also referenced in the preface to the *Sangaku Kochi* (算学鉤致), a compilation of *sangaku* problems published in 1819 by Ishiguro Nobuyoshi, and the *Sanpo Koren* (算法瑠璣), published by Tadayoshi Kobayashi⁵⁸.

Content and presentation of mathematical knowledge, moreover, suggest an interplay with Confucian and Daoist ideas from Chinese roots onwards. Commentaries on the *Jiuzhang suanshu*, for example, a Chinese mathematics book of major influence in early Edo Japan, feature numerous quotations from the classics of Confucianism, such as the *Analects*, and the *I ching*. *Sangaku* as a medium, moreover, exemplify strategies of Confucian pedagogy, which stressed the stimulation of effort and deeper understanding through partial presentation of knowledge. With a healthy distrust towards discursive, exclusively language-based reasoning, «non-linguistic modes of communication such as those based on computations or figurative techniques» were considered preferable⁵⁹. Both are regular features of *sangaku* problems. Some

⁵⁶ PETER NOSCO, *Introduction: Neo-Confucianism and Tokugawa Discourse*, in Peter Nosco (ed.), *Confucianism and Tokugawa Culture*, Princeton, NJ, Princeton University Press, 1989, pp 3-26: see p. 8.

⁵⁷ MARINA WONG, *A Comparison between the Philosophies of Confucius and Plato as Applied to Music Education*, in «The Journal of Aesthetic Education», 32.3 (1998), 109-112: see p. 110.

⁵⁸ TADAYOSHI ISHIGURO (石黒信由), *Sangaku Kochi* (算学鉤致), 加州, 鹽屋與三兵衛, 1819; NOBUYA NAKAMURA, TETSUO SEKIGUCHI, cit., p. 42.

⁵⁹ JEAN-CLAUDE MARTZLOFF, *Geometry in Chinese Mathematics*, cit., p. 1008.

wasan problems even reference Confucian thought quite literally: the *Kankai-no-Utsuwa-Zusetsu* by Tadayoshi Kobayashi, for example, solicits the calculation of the volume of *Kankai-no-Utsuwa*, a cup with a rounded bottom which tips over when filled beyond measure, serving as a metaphor for moderation⁶⁰.

Tadayoshi's book signals the vicinity of Confucian discourse and mathematical practice. There is, moreover, one example which bears direct witness to the role of mathematics for the kind of self-development central to Neo-Confucian thinking. In an essay known as "One Chapter on a Theory of Proper Character", the famous Edo mathematician Takebe Katahiro recounts his dawning recognition that the truthful pursuit of mathematics depends on the acceptance of one's own character:

A person at one with the Way of mathematics and active in its practices is honest and true. The truth of what it means to be at one with the Way is not something that can be reasoned about. But in our training for this truth that is not to be reasoned about, one rule that can be affirmed is the need to follow the character one was born with⁶¹.

As Tsukane Ogawa argues, Takebe's pronouncements have to be understood against the Neo-Confucian backdrop of his own time⁶². In the context of his argument, Takebe describes how he came to accept his own character and develop his own style of mathematics, emancipating from the techniques used by his famous master, Seki Takakazu. In the process, a reciprocal relationship between the "Way of Mathematics" and the ideal of "Know Thyself" develops which, in the opinion

⁶⁰ NOBUYA NAKAMURA, TETSUO SEKIGUCHI, *Sanpo-Koren & Kankai-No-Utsuwa*, cit., pp. 58-61.

⁶¹ TSUKANE OGAWA, *Takebe Katahiro – A Man of His Times: A Survey of His Life and Mathematical Thought*, in Tsukane Ogawa, Mitsuo Morimoto (eds.), *Mathematics of Takebe Katahiro and History of Mathematics in East Asia*, Tokyo, Mathematical Society of Japan, 2018, pp. 3-28; see pp. 24-26.

⁶² Ivi, *passim*.

of Takebe, ideally leads a person to be «honest and true». Mathematical practice, self-development and moral betterment are cast in direct correlation with each other.

Strictly speaking, Neo-Confucianism, although often blended with Shinto and Buddhism in Edo Japan, is not a religious but a moral, a philosophical framework. Yet it is a framework extending across religious and secular concerns alike, interweaving the social and the political sphere, alongside ritual practice and self-cultivation⁶³. In Mary Evelyn Tucker's interpretation, if we generally accept religion as a means and impulse for self-transformation, through a deeper understanding – and understanding of the limits thereof – of phenomenal reality, then «Confucianism can certainly be regarded as religious in the sense that the primary activity of Confucians is the establishing of moral reflection and spiritual awareness within the changes of cosmological processes»⁶⁴. The Confucian context does not speak of a personal God as Christianity would; heaven is not imagined as a pseudo-physical realm but as a creative principle sustaining the order of the cosmos and immanent within human nature. Thus, participation in the cosmological order of things does not require divine intervention or salvation, but the will and effort to understand and actualize one's own true nature⁶⁵.

If we consider Takebe's confession in this context, then *wasan* as a practice demonstrably carries the potential for spiritual experience within, in the Confucian sense. *Sangaku* as material manifestations of *wasan* signal mastery and self-development of the individual, and emulation and competition amongst a likeminded community. A spiritual experience may not be the prime intention nor are *sangaku* a deliberate product of Edo Japan's Neo-Confucian makeover. Yet the ideological backdrop does help to appreciate the revaluation of mathematics for the sake of practice rather than outcome, and its potential for aiding personal growth – and

⁶³ MARY EVELYN TUCKER, *Religious Dimensions of Confucianism: Cosmology and Cultivation*, in «Philosophy East and West», vol. 48, No. 1, 1998, pp. 5-45: see p. 21.

⁶⁴ Ivi, p. 14.

⁶⁵ Ivi, pp.14-15.

why, although perhaps not in reference to their location in temples and shrines, *sangaku* could bear a spiritual implication within.

3. Conclusion

If we return to the initial question concerning spiritual connotations of geometry on display in sacred spaces in Europe and Japan, the most immediate observation may also be the most telling in that regard: the Euclidean tiles portray theorems – stable truths. *Sangaku* do not purport facts – they pose questions. Seen as a medium of communication, either type of object symbolizes the heuristics particular to its mathematical discourse, and by extension the epistemology inherent in its spiritual backdrop.

Europe prized Euclid's system for its stability, universality, and utility manifest through practical application, including proselytization. Axiomatic thinking is shared by theological and scientific discourse alike, and perhaps it is the over-arching quest for certainty that renders geometry fertile for mapping the scientific-theological universe we encounter in Jesuit discourse. The utility Western mathematicians hailed, *wasan* scholars more or less deliberately distanced themselves from: *wasan* generally styled itself a discipline apart from practical thinking, and all the nobler thereby. In that sense, *sangaku* do not pay homage to the orderly universe and man's penetration thereof, like the Euclidean tiles would – *sangaku* signal human achievement, prowess more than progress, endogenous transformation more than exogenous truth, and a continuous interplay within the social fabric besides. Spiritually speaking, therefore, Western and Eastern mathematics point in opposite directions, seeking the order of the cosmos in the external world or within human nature, respectively. What is more so, either realm seems to identify different moving targets: for Christian morality, understanding the world as a stable framework of rules and regularities warrants character adjustment; if we believe Takebe as spokesman for Confucian mathematics, the character is stable, but the mathematics can be adjusted.

All that said, a poignant similarity remains: the joy that mathematics can render to those who master it. Christopher Clavius praised the

pleasure we perceive when gaining clarity through mathematics⁶⁶. Takebe, too, speaks of a peace of mind palpable when embarked on the “Way” of mathematics⁶⁷. Perhaps mathematics is not the universal language it is sometimes made out to be; but the psychological experience of a calculation clean-cut may be a feeling shared across the globe.

Acknowledgments

The Sangaku Archive Project is generously supported by a 2024 KAKENHI Early Career Researchers Grant (Project number 24K15964). Many thanks to Tianle Yang for deciphering and translating *sangaku* and related content and to the reviewers of this article for their help in improving this piece. I would also like to thank Yamatotakeru Shrine in Koriyama, Fukushima, for allowing me to include a picture of their *sangaku*. My warmest gratitude to Masako Watanabe, Chief Priestess of Kashima Daijingu in Koriyama, Fukushima, for her tireless efforts and kindness acting as intermediary and guide in the Miharu area.

Riassunto Durante il periodo di isolamento, il Giappone dell'epoca Edo vide l'emergere di *wasan* come discorso matematico idiosincratico. Il presente studio giustappone *wasan* come fenomeno culturale alla ricezione della geometria euclidea da parte dei Gesuiti, considerando le implicazioni epistemologiche della matematica nel contesto della spiritualità nel Giappone e nell'Europa della prima età moderna.

Abstract During its period of seclusion, Edo Japan witnessed the emergence of *wasan*, an idiosyncratic mathematical discourse. Following study juxtaposes *wasan* as a cultural phenomenon with the Jesuits' reception of Euclidean geometry, to then consider the epistemological implication of mathematics within the context of spirituality in Edo Japan and early modern Europe.

⁶⁶ CHRISTOPHER CLAVIUS, *Euclidis Elementorum Libri XV*, 1574, sig a3.

⁶⁷ TSUKANE OGAWA, *Takebe Katahiro*, cit., pp. 24-25.

Dis-robing the Guardaroba: The Arctic as viewed from Florence

Elisa Palomino, John Cloud

In the *Guardaroba* of Palazzo Vecchio, Cosimo I de' Medici commissioned maps of the known world on doors opening onto *Wunderkammern* containing artefacts from those regions. The four “Polar Lands” maps depicted areas inhabited by Indigenous cultures before Arctic exploration. They represent the earliest evidence of Arctic cartography and recognition at the Medici court of Boreal worlds that thrived prior European colonialism. This study draws on early modern cartography, Arctic exploration, pre-modern race and Indigenous studies, anthropology and material culture. It examines the myth of the North Pole, geographical depictions made before formal exploration, and the exchange of information among cartographers and explorers who relied on earlier sources to map regions with limited data. The paper traces the journey of Arctic animal skin artefacts from Alaska, Canada, Greenland, and Siberia to Florence. Although these objects arrived after the *Guardaroba* project ended, they could have been displayed behind the doors of the “Polar Lands”. Considering relations between Arctic Native communities and the natural world informs discussion about these lands and seas, now under climate pressure, globalisation, and resource exploitation.

1. The cartographic representation of the North during the Renaissance

To the ancient Greeks, the Arctic was more of a cosmological concept than a physical place. The term *artici* identified by Ptolemy referred to

© The Author(s); sottoposto a peer review - pubblicato con licenza CC-BY-NC-ND 4.0
DOI 10.35948/DILEF/978-88-6032-827-4.03

Elisa Palomino, Ca' Foscari University, DSAAM, elisa.palomino@unive.it,
Smithsonian Arctic Studies Center, palominopereze@si.edu; 0000-0002-4496-3701
John Cloud, Smithsonian Arctic Studies Center, cloudj@si.edu

regions beneath the stars in the *arktos* constellation (meaning “near the bear”). The Ursa Major signalled an area where stars moved in tight circles around a fixed point in the sky. Euclid described these “ever-visible” bodies, distinct from constellations that moved across the horizon over weeks and months¹.

During the Renaissance, the Arctic remained a largely mysterious region, but it was present on maps inspiring new experiments in navigation, and cartography². As one of the last frontiers to be reached, the knowledge gap spurred the growth of cartographic imagery, the search for the Northwest and Northeast Passages, and the conquest of land in the Arctic Ocean.

1.1 Arctic explorations

Arctic exploration dates back to the voyage of the Greek Pytheas to Thule around 2,400 years ago. By the year 1000, Vikings had already established settlements along the coasts of Greenland and Canada, although Native Peoples had long inhabited these regions³. Prior to Mercator’s 1595 map, numerous cartographers, including Contarini and Rosselli (1506), Waldseemüller (1507), and Ortelius (1570), had produced maps depicting the northern margins beyond the known continents. The Renaissance idea of an ice-free and navigable Arctic Ocean was reinforced by maps such as Forlani’s (1565) and Barents’ (1598).

The ancient frozen sea concept, described by Pliny as *mare concretum*, was echoed by later writers who referred to the Arctic as *mare glaciale* or *mare congelatum*. Fridtjof Nansen in 1897 verified that the northernmost part of the Arctic Ocean was covered in floating ice. The navigability of the

¹ CHRISTOPHER HEUER, *Into the White: The Renaissance Arctic and the End of the Image*, Brooklyn, Zone Books, 2019.

² DJOEKE VAN NETTEN, *Known unknowns in the North. Uncertain maps of the Arctic in early modern times*, «International Journal of Cartography», 11, 4, 2025, pp.489-508.

³ PATRICK PLUMET, *Peuples du Grand Nord*, Paris: Éditions Errance, 2004; LOUIS-EDMOND HAMELIN, STEFANO BIONDO, JOE BOUCHARD, *L’Apparition Du Nord Selon Gérard Mercator*, Québec: Éditions du Septentrion, 2013.

passage between Asia and America was later confirmed by the Danish explorer Vitus Bering in the 18th century and was named the Bering Strait⁴.

2. Gerard Mercator

Gerardus Mercator (1512-1594), a Flemish cartographer and mathematician, lived during a period of significant discoveries, alongside figures like Leonardo da Vinci, Michelangelo, and Shakespeare. He was orphaned at sixteen but benefited from the support of his uncle Gisbert, a priest. His early education in Hertogenbosch (fig. 1), under the progressive Brethren of the Common Life, exposed him to influential figures like Erasmus, Albrecht Dürer, the visionary painter Hieronymus Bosch and the Dutch explorer Jacobus Cnoyen, known for his accounts of Arctic explorations⁵. He was introduced to cartography in Louvain and began his career under the reign of Emperor Charles V, whose empire spanned much of Europe and the Americas.



Fig. 1 Georg Braun; Frans Hogenberg: *Civitates Orbis Terrarum*, Band 1, 1572. Panorama of 's-Hertogenbosch. Archived in the Library of Congress Web Archives at www.loc.gov.

He is renowned for his Mercator projection, a system that revolutionised navigation and is still in use today. Facilitated by the advent of typography, map producers and distributors, he created maps, globes

⁴ *Ibidem*.

⁵ JOHN CLOUD, ELISA PALOMINO, *Mercator, the Medici and the past and future of the Arctic*, Smithsonian Institution National Museum of natural History, in «Arctic Studies Center Newsletter», May N.30, 2023, pp. 68-69.

and astronomical instruments, earning a reputation as one of history's greatest cartographers. He is also considered the father of the modern globe-making industry. Under the mentorship of cartographer Gemma Frisius, he produced his first terrestrial globe in 1541, dedicating it to Charles V⁶.

2.1 Mercator maps the Arctic

Mercator (fig. 2) studied the possibility of a northern sea passage through North America to Asia, and his azimuthal projection of the North Pole (fig. 3) indicates his belief in its existence. His *Septentrionalium Terrarum Descriptio* (Description of the Northern Lands) (fig. 3) is considered the earliest map of the polar regions. It places the North at the centre, representing the extremities of Europe, Asia, and America, with the Arctic Ocean and a central circular area. The term "*Terrarum*" refers to the planet as a universe and "*Septentrionalium*" refers to the Ursa Major constellation and the Arctic as the region beneath it. The map highlights the Arctic, as "*terra-aqua-glacia*": a land, sea and ice area⁷. Virtually all portraits of Mercator (fig. 2) show him, not with a map, but with one of his globes, always tilted to emphasize the Arctic lands.

His projection drew from ancient texts from Strabo, Pliny and from Ptolemy's *Geography*⁸; accounts from explorers such as Martin Frobisher and John Davis; correspondence with scholars like Richard Hakluyt⁹

⁶ JOE BOUCHARD, *The Mercator Project: Innovative Enhancement of a Founding Document for Polar Studies*, 25th Polar Libraries Colloquy, Cambridge: Scott Polar Research Institute, 2016, pp. 12-21; LOUIS-EDMOND HAMELIN, STEFANO BIONDO, JOE BOUCHARD, *L'Apparition Du Nord Selon Gérard Mercator*, cit.

⁷ *Ibidem*.

⁸ GERARD MERCATOR, *Tabulae geographicae Cl. Ptolemei ad mentem auctoris repositae et emendatae*, 1578.

⁹ GERARD MERCATOR, *A letter of Gerardus Mercator, written to M. Richard Hakluyt of Oxford, touching the intended discovery of the Northeast passage*, 1580.



Fig. 2 Mercator with his globe noting the Arctic lands, *Atlas*, 1574. Library of Congress, Rare Book and Special Collections Division. Archived in the Library of Congress Web Archives at www.loc.gov.



Fig. 3 Mercator's Arctic Map. 1595. *Septentrionalium Terrarum Descriptio*. Library of Congress, Rare Book and Special Collections. Archived in the Library of Congress Web Archives at www.loc.gov.

and John Dee¹⁰; the work of cartographers like Abraham Ortelius (1570); and information from sailors, travellers, churchmen, and emissaries¹¹. He followed the work of Giacomo Gastaldi (1561), clearly separating the New World from Asia using the Strait of Anian. He also drew on medieval sources, including the *Itinarium* of Jacques Cnoyen, whose sources were the *Inventio Fortunata* by Nicholas of Lynn, an English mathematician from Oxford who used a map and astrolabe to chart the Arctic

10 EVA GERMAINE RIMINGTON TAYLOR, *A Letter Dated 1577 from Mercator to John Dee*, *Imago Mundi*, v.13, 1956, pp. 56-68.

11 JOE BOUCHARD, *The Mercator Project: Innovative Enhancement of a Founding Document for Polar Studies*, cit. ; LOUIS-EDMOND HAMELIN, STEFANO BIONDO, JOE BOUCHARD, *L'Apparition Du Nord Selon Gérard Mercator*, cit.

coast. Mercator translated these ideas in his 1569 world map (fig. 4). After his death, his partner Hondius (1607) published a revised version of this polar map in 1595 (fig. 3).

2.2 Mercator's Polar Lands and the Medieval Warm Period

There was an ancient cosmology behind the concept of the polar lands and rivers, but what Mercator was mapping was the historic extent of the polar ice cap centuries before his lifetime. The explorations described in *Inventio Fortunata* were made at the end of the Medieval Warm Period, when many ocean passages were at least seasonally ice-free. Mercator lived in the depths of the Little Ice Age (circa 1300-1850), a very different climate regime¹². But the traces of *Inventio Fortunata* allowed Mercator to map the four major indigenous circum-polar concentrations, a major contribution to northern ethnography. Hence, Mercator's Polar Lands is a synthesis of the state of the Arctic Ocean from centuries earlier, during the end of what is now called the Medieval Climate Anomaly. By Mercator's era, Europe and the Atlantic and Arctic were in the middle of the Little Ice Age. The top part of the polar ice cap in the Arctic Ocean is frozen fresh water, as the original salt in the water migrated down lower. Hence, all explorers of this era thought there must be "land" underneath the polar ice cap, although there is not. Hence, Mercator's mapping of the polar lands is a mapping of the extent of the polar ice cap, at a given climactic era.

2.3 Inventio fortunata

Mercator became close friends with the English polymath John Dee (1527-1609) when they were both living in Leuven in 1548 and corresponded with him for the rest of his life. When Dee wrote to Mercator

¹² BRIAN FAGAN, *The Little Ice Age: How Climate Made History, 1300-1850*, New York, Basic Books, 2000.

in 1577 asking for his sources for the North Pole projection, Mercator returned a letter¹³ with information for the entire part of the world within 12 degrees of the North Pole:

In the midst of the four countries is a Whirlpool, into which there empty these four indrawing Seas which divide the North. And the water rushes round and descends into the Earth just as if one were pouring it through a filter funnel. It is four degrees wide on every side of the Pole, that is to say eight degrees altogether. Except that right under the Pole there lies a bare Rock in the midst of the Sea. Its circumference is almost 33 French miles, and it is all of magnetic Stone.

Mercator mentions that this is what he copied out of Jacobus Cnoyen van Herzogenbusch's *Inventio Fortunata*, an account of his travels around 1360 in northern lands such as Iceland, Greenland, Norway and possibly even Labrador. This volume, completed in the 14th century and now unfortunately lost, was a notorious resource for 15th and 16th century cartographers. The author of this work, Nicholas of Lynn, was a Carmelite friar at Merton College, of Oxford when Merton was a major centre for mathematics and science. The *Inventio* itself refers to a much older and also lost work, the *Gestae Arthuri*, which adds further chapter to the King Arthur tradition, claiming that his army conquered Iceland, Greenland, the Faroe Islands and parts of Norway¹⁴. On the back of his polar map of 1569, Mercator wrote: «having produced the document according to the information collected by an English mathematician monk from Oxford who, with a map and an astrolabe, is believed to have measured the areas circling the pole»¹⁵.

A Norwegian priest informed James Cnoyen that in 1360 an English Carmelite came to the northern island. He then departed, and moving

¹³ EVA GERMAINE RIMINGTON TAYLOR, *A Letter Dated 1577 from Mercator to John Dee, Imago Mundi*, cit.

¹⁴ *Ibidem*; THOMAS GREEN, *John Dee, King Arthur, and the Conquest of the Arctic*, in «The Heroic Age», 15, 2012.

¹⁵ JOE BOUCHARD, *The Mercator Project: Innovative Enhancement of a Founding Document for Polar Studies*, cit.

forward with his ‘magical arts’¹⁶ described all the places he saw and took their heights with his astrolabe. The friar wrote the *Inventio Fortunata*, and he presented it to King Edward III of England¹⁷. Nicholas of Lynn received his information, most likely from the priest Ivar Bárðarson, a clergyman from Trondheim, who administered the church from Garðar in Greenland, acquiring much information about the Arctic. Ivar returned to Norway in 1364, and it is possible that there the Oxford friar met him personally and wrote the *Inventio Fortunata*.

Nicholas of Lynn was also a contemporary of Geoffrey Chaucer, who, after being sent as a representative to Italy in 1372 by King Edward III, became acquainted in Florence with the writings of Dante, Petrarch and Boccaccio, author of the Decameron. On his return to England, Chaucer wrote the *Canterbury Tales*. The hero of Chaucer’s “*The Miller’s Tale*” was Nicholas of Lynn, a Carmelite friar, mathematician and astronomer from Oxford with his astrolabe.

2.4 The waters

There are two different projections on Mercator’s 1569 world map (fig. 4). The small map on the bottom left, centered on the North Pole, is a polar azimuthal projection, which allows the northern polar regions of ocean, ice, and land to be presented with minimal distortion. The larger projection, which fills most of the map, is a great advance in mapmaking of the era. It is based on Mercator’s cylindrical projection, which can be considered like a piece of enormous paper wrapped around the earth. Details from the earth’s features are projected out-

¹⁶ The term “magical arts”, used by Mercator and his contemporaries, has often led to misunderstandings. The concept of *arte magica* was, and remains, ambiguous due to its blend of scientific and mystical elements. For some, the term emphasizes purely magical or astrological practices, while for others, it marks the early stages of empirical knowledge (LOUIS-EDMOND HAMELIN, STEFANO BIONDO, JOE BOUCHARD, *L’Apparition Du Nord Selon Gérard Mercator*, cit.).

¹⁷ TRYGGVI JULIUS OLESON, *Early Voyages and Northern Approaches, 1000-1632*, Toronto, McClelland and Stewart, 1963.



Fig. 4 Mercator's 1569 World Map. Library of Congress Geography and Map Division. Archived in the Library of Congress Web Archives at www.loc.gov.

wards on to the paper. If the paper cylinder is cut anywhere, north to south, the paper cylinder can be unrolled to form a flat map. The map projection is conformal, which means everywhere an east-west line of latitude crosses a north-west line of longitude, the two lines cross at precisely right angles. On a globe, all intersections of latitude and longitude cross at right angles. This is one of several reasons why Mercator and his colleagues were generally pictured with their globes, not their maps (fig. 2)¹⁸. In the Mercator's Arctic Map (fig. 3), the North Pole features the *Rupes Nigra*, a great black rock of magnetized iron, which accounted for the behaviour of compasses. The rock is surrounded by a whirlpool into which four mighty rivers flow, dividing a continental landmass into four distinct islands. Mercator envisioned the waters of the Earth flowing towards the pole, where they seemingly disappear

¹⁸ STEPHAN HALIKOWSKI SMITH, *Cartography. Encyclopedia of Western Colonialism since 1450*, Ed. Thomas Benjamin, vol. 1, Detroit, Macmillan Reference USA, 2007, pp. 185-191.

into the Earth's central fire, a path to hell, with water evaporating upon contact with magma inside the Earth¹⁹. He believed that the flow of water between the Earth's four solid fields rushed toward the pole, making the true North Sea the globe's hydrographic tomb. These discharges into the Arctic Ocean were thought to be essential for maintaining eustatic equilibrium, given the vast amounts of marine and freshwater moving northward. This idea resonates with Ecclesiastes: «All the rivers flow towards the sea, yet the sea is not full»²⁰.

Mercator's 1569 map (fig.4) features the main water networks flowing north: the Dwina, Petzora, Oby, and Oechardes on the Russian side, and the Yukon, Cogib, Obila, and Hic Mare (Hudson Bay) on the American side. Each arm's upstream section fans out into multiple channels, resembling delta formations. Unlike modern cartographic conventions, Mercator's depiction reversed the direction of these channels. Contemporary knowledge has identified seasonal ice-free clearings (polynyas) in these areas²¹. The ocean rivers begin at boreal latitudes and flow north, then are cut off. But since the map is conformal before it cuts off, it means that the four "deltas" of ocean rivers are directly north of four important regions to the south.

2.5 Indigenous Lands

Mercator's 1595 Arctic map (fig.3) is rich with details about Russia, Scandinavia, Iceland and the North Atlantic. A number of occupations like Lappia (Sápmi) in the northern part of the Finnish-Scandinavian peninsulas, Island (Iceland), and Russia are indicated on the map. There is also specific mention of Indigenous nomadic inhabitants including

¹⁹ LOUIS-EDMOND HAMELIN, STEFANO BIONDO, JOE BOUCHARD, *L'Apparition Du Nord Selon Gérard Mercator*, cit.

²⁰ ÉCOLE BIBLIQUE DE JERUSALEM, *La Bible de Jérusalem*, Paris, Les éditions du Cerf, p. 1101, 1998.

²¹ LOUIS-EDMOND HAMELIN, STEFANO BIONDO, JOE BOUCHARD, *L'Apparition Du Nord Selon Gérard Mercator*, cit.

Lapps (Sámi), Samogedi (Nenets), Screlingers (hunters) in Greenland, Canadenses and Saguenaiensium (Indians) at Hic mare (Hudson Bay).

Mercator already considered the presence of Native Peoples, who existed long before classical antiquity. Greek and Latin authors like Herodotus and Pliny wrote extensively about the northern regions and Pytheas travelled to Thule, the northernmost known region. The navigation of Native Peoples in the American North's icy channels is evidenced by symbols of small settlements on Mercator's map²².

The Mercator Projection map, published in 1569, shows at the very top of the map (fig. 6) the southern entrances of four rivers – each presented as flowing north from places of high human cultural salience, as had been recognized two centuries earlier by Cnoyen's sources. The four maps reference: 'the lands above: Greenland, the Bay of Hudson, the Bering Strait, and Siberia'. These four southern regions are areas of great ecological and cultural significance, which we argue preserve the knowledge and history of life during the Medieval Climate Anomaly, as recalled by Mercator with the use of the resources available to him in-s Hertogenbosch, through cultural legacies preserved for centuries.

Hence, the 'lands above' had to involve European communications with Native Boreal/Polar Peoples all the way around the Arctic about what was up there²³.

All of this was condensed on Mercator's 1569 map (fig.4), created the same year Cosimo I was crowned Grand Duke of Florence, and the start of the *Guardaroba* project.

3. Cosimo I and the *Guardaroba*

Cosimo I (fig. 5) wished to convey the image of his power, so he undertook a comprehensive restoration of the former Palazzo dei Priori,

²² *Ibidem*.

²³ ELISA PALOMINO, JOHN CLOUD, *The Arctic as viewed from Florence*, in «Arctic Studies Center Newsletter», Washington, DC, Smithsonian National Museum of Natural History, May, N.29, 2022, pp. 51-53.



Fig. 5 Bronzino, Portrait of Cosimo I de' Medici in Armour, c. 1545, Uffizi Galleries, Florence.

By permission of the Ministry of Culture, any reproduction or duplication by any means is prohibited..



Fig. 6 Sala delle Carte Geografiche, Palazzo Vecchio, Florence. Image free of copyright under commons.wikimedia.org

known as Palazzo Vecchio in Florence. All the artworks and diplomatic gifts that the family had collected in the Medici palace on Via Larga²⁴, were to be brought together in a chamber of the Palazzo Vecchio. Cosimo commissioned Giorgio Vasari, author of the *Lives of the Artists* and the leading architect, artist and art historian of the Medici court, to create the Sala delle Carte Geografiche. Playing on the words 'Cosimo/Kosmos', Vasari celebrated Cosimo's identity through a grandiose cartography arrangement that reproduced on the walls of the room the pages of the Geography, also called Cosmography from the Alexandrian cartographer Claudius Ptolemy (2nd century AD)²⁵.

²⁴ SAN, *Guardaroba medicea*, Sistema Informatico dell'Archivio di Stato di Firenze, 2022.

²⁵ MARA MINIATI, *Birth and life of Scientific Collections in Florence*, in «Museologia & Interdisciplinaridade», 5 (9), 2017, pp. 14-41.



Fig. 7 Domenico Remps, The cabinet of curiosities. By permission of the Opificio delle Pietre Dure, Florence.

The geography of the late Renaissance was represented in different formats. While manuscripts and printed maps were easily carried, wall atlases were fixed in confined spaces and accessible only to very select, illustrious visitors²⁶. At Palazzo Vecchio, depending on their position, guests were welcomed at the top of the steps, or at the *Guardaroba* a chamber reflecting both contemporary cosmographic knowledge and Cosimo's position of power²⁷.

Humanists, mathematicians, geographers, and artists wonderfully qualified to portray the cosmography of the known world were called

²⁶ ANDREA M. GALDY, *Con Bellissimo Ordine: Antiquities in the Collection of Cosimo I De' Medici and Renaissance Archaeology*, Manchester, 2002.

²⁷ ID., *Che Sopra Queste Ossa Con Nuovo Ordine Si Vadiano Accommodanto in Più Luoghi Appartamenti: Thoughts on the Organisation of the Florentine Ducal Apartments in the Palazzo Vecchio in 1553*, Firenze, Edizioni Tassinari, 2002.



Fig. 8 Cabinet door at the Guardaroba, Palazzo Vecchio, Florence. Image free of copyright under commons.wikimedia.org.

upon to create the Guardaroba (fig. 6)²⁸. As a testament to the Medici's geographical knowledge and as a theatre for displaying their dynastic power and their finest treasures, a set of painted maps was created and hung on cabinet doors. Each door opened to reveal both hidden passages (fig. 8) and cupboards containing objects, plants, animals and minerals²⁹ related to the lands painted on the panels and collected from around the world beyond Florence³⁰.

28 MARK ROSEN, *The Mapping of Power in Renaissance Italy: Painted Cartographic Cycles in Social and Intellectual Context*, New York, NY, Cambridge University Press, 2015.

29 ANNA GUARDUCCI, *Egnazio Danti and the maps of Theatrum Mundi in the Guardaroba nuova in Palazzo Vecchio (Florence). Le fonti geocartografiche*, in «Geostorie, Bollettino e Notiziario del Centro Italiano per gli Studi Storico-Geografici», Roma, vol. 27 (1) 2019, pp. 5-30.

30 GEMMA LEVI-DONATI, *Le trentacinque cartelle della Guardaroba Medicea di Palazzo Vecchio*, Perugia, Grafiche Benucci, 2002.

Vasari in his *Life* of Egnazio Danti describes how under Cosimo's orders, Danti executed, on the basis of Ptolemy's *Geography*, maps of all the then known regions of the world on the doors of the *Guardaroba*³¹:

[...] sua eccellenzia con l'ordine del Vasari, sul secondo piano delle stanze del suo palazzo ducale, ha di nuovo murato a posta et aggiunto alla guardaroba una sala assai grande, et intorno a quella ha accomodata di armari alti braccia sette con ricchi intagli di legnami di noce, per riporvi dentro le più importanti cose e di pregio e di bellezza che abbi sua eccellenzia; questi ha nelle porte di detti armari spartito dentro agl'ornamenti di quegli cinquantasette quadri d'altezza di braccia due incirca e larghi a proporzione, dentro a' quali sono con grandissima diligenza fatte in sul legname a uso di minii dipinte a olio le tavole di Tolomeo misurate perfettamente tutte, e ricorrette secondo gli autori nuovi e con le carte giuste delle navigazioni, con somma diligenza fatte le scale loro da misurare, et i gradi dove sono in quelle, e' nomi antichi e moderni.

3.1 The *Guardaroba* maps

Cosimo's passion for the natural sciences flourished in this room. The maps offered depictions of animals and plants indigenous to the countries represented on the charts. Vasari mentions that the aim of the room was to «place together simultaneously [all] these things of heaven and earth» in a coherent space and in an orderly fashion³². As the owner of the treasures in this *Wunderkammer* (fig. 7), Cosimo perceived to be the master of all things, places and the destiny of mankind in the name of God to perfect the original creation and to organise it according to modern science³³.

³¹ GIORGIO VASARI, *Le vite dei più eccellenti pittori, scultori e architetti*, Roma, Newton Compton, 1991.

³² MARK ROSEN, *The Mapping of Power in Renaissance Italy: Painted Cartographic Cycles in Social and Intellectual Context*, cit.

³³ ANDREA M. GALDY, *Con Bellissimo Ordine: Antiquities in the Collection of Cosimo I De' Medici and Renaissance Archaeology*, cit.; FAUSTO BARBAGLI, *Natura Collecta Natura*

Between 1560 and 1563, the Florentine monk Miniato Pitti, abbot of San Miniato al Monte, cosmographer at the Medici court, drew up the project for the *Guardaroba*³⁴. The maps were not all based on the same sources or on a single book, or atlas, and the original maps from Ptolemy were expanded to include the newly discovered Americas³⁵. Thirty of the maps were painted by Fra Egnazio Danti, a Perugian Dominican monk, astronomer and cosmographer³⁶ between 1563 and 1575. The remaining twenty-three of Europe and Africa were executed by the Olivetan Stefano Bonsignori (1575-86) based on Ortelius' *Theatrum orbis terrarum*³⁷.

In addition to Ptolemy's original maps, there are nine maps of America, fifteen of Asia, four of the Polar Lands, one of Greenland and twelve of Europe and Africa from more recent sources. Antarctica does not appear in the *Guardaroba*.

3.2 The four Polar Region Maps

The unique set of four maps of 'Polar Lands' (fig. 10 – 13) dated between 1586 and 1589 were made later and separately³⁸. It is uncertain whether these maps are attributed to Danti or Bonsignori, and possibly they were added at the end of the 16th century by Antonio Santucci, who

Exhibita: Il collezionismo naturalistico a Firenze dai Medici al Museo di Storia Naturale, «Collana scienze naturali», 3, 2021.

³⁴ ANNA GUARDUCCI, *Egnazio Danti and the maps of Theatrum Mundi in the Guardaroba nuova in Palazzo Vecchio (Florence). Le fonti geocartografiche*, cit.

³⁵ ETTORI ALLEGRI, ALESSANDRO CECCHI, *Palazzo Vecchio e i Medici: guida storica*, S.P.E.S., 1980.

³⁶ GEMMA LEVI-DONATI, *Le trentacinque cartelle della Guardaroba Medicea di Palazzo Vecchio*, cit.

³⁷ MARK ROSEN, *Charismatic Cosmography in Late Cinquecento Florence*, in «Archives Internationales d'Histoire des Sciences», 59 (163), pp. 575-590, 2009.

³⁸ FRANCESCO VOSILLA, *Il duca della repubblica e la prima Guardaroba di palazzo*, in Carlo Francini (ed.), *Palazzo Vecchio: Officina di opere e di ingegni*, Cinisello Balsamo, Florence, Silvana Banca Toscana, 2006, pp. 149-69.

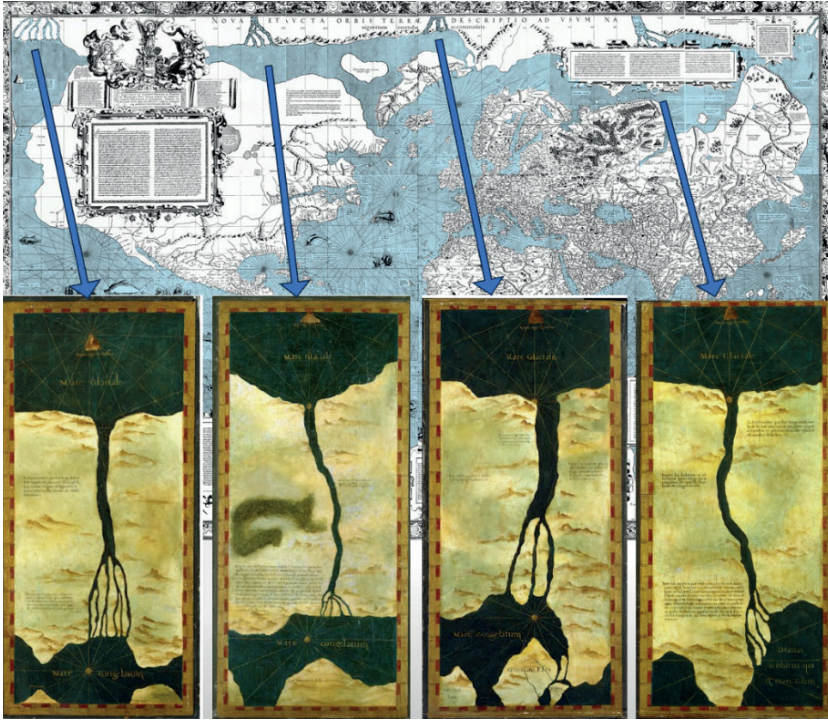


Fig. 9 Mercator's 1569 World Map. Library of Congress Geography and Map Division. Archived in the Library of Congress Web Archives at www.loc.gov.

Fig. 10 Sala delle Carte Geografiche, Palazzo Vecchio, Florence. Polar lands above the Bering Strait. Image free of copyright under commons.wikimedia.org.

Fig. 11 Sala delle Carte Geografiche, Palazzo Vecchio, Florence. Polar lands above Hudson Bay. Image free of copyright under commons.wikimedia.org.

Fig. 12 Sala delle Carte Geografiche, Palazzo Vecchio, Florence. Polar lands above Greenland. Image free of copyright under commons.wikimedia.org.

Fig. 13 Sala delle Carte Geografiche, Palazzo Vecchio, Florence. Polar lands above Siberia. Image free of copyright under commons.wikimedia.org.

also restored Danti's globe, although these maps were not part of the original plan as Vasari does not mention them³⁹. According to Pog-

39 FRANCESCA FIORANI, *The Marvel of Maps: Art, Cartography and Politics in Renaissance Italy*, New Haven, Yale University Press, 2005.

gi (2009) they were made by inexperienced hands or by Bonsignori's assistants as he was engaged in other cartographic work from 1584. Rosen (2015) claims that in order to complete the room and fill the narrow cupboard spaces on the east and west walls, Buonsignori painted four almost identical maps, each representing a quarter of the Arctic surrounding the North Pole. This is not the case; the four 'Polar Lands' were inspired by Mercator's polar regions in his 1569 world map (fig. 9), but in the *Guardaroba* they were divided into four distinctive panels. As we have already explained above, they are not by any means identical but rather they depict specific lands above Greenland, the Bay of Hudson, the Bering Strait and Siberia. Details of the four lands are suitably vague, but the maps' text notes indicate that the lands were north of very real places from four of the most important areas of Indigenous Arctic cultures.

All four maps have inscriptions about the sites. The scroll of the polar lands above the Bering Strait mentions (fig. 10): «In the northern parts there are the islands of Bargu that Marco Polo states are looking north so much that the pole star is seen to go down towards the south». The map refers to the area between Asia and America, the Anian Strait (Bering Strait) on Mercator's *map*. An offshore island on the Asian side corresponds to today's Wrangel Island⁴⁰.

The lands above Hudson Bay (fig. 11) state: «This channel has five accesses and due to its narrowness and the rapidity of its flow it never freezes» and «The Northern parts are so far from us that few are those who wrote about them. They say the King of Norway having heard about it, sent people there to live». The text refers to Ivar Bárðarson, the Norwegian priest that served in Garðar, Greenland, from around 1340 to 1360. He travelled widely, and later returned to Norway with information about the eastern Canadian Arctic⁴¹.

⁴⁰ LOUIS-EDMOND HAMELIN, STEFANO BIONDO, JOE BOUCHARD, *L'Apparition Du Nord Selon Gérard Mercator*, cit.

⁴¹ JARED DIAMOND, *Collapse How Societies Choose to Fail or Succeed*, Penguin Publishing Group, 2011.

For lands above the Greenland (fig. 12) reads: «This channel has three accesses, every year it remains frozen for about three months» and «Here are the Pygmy who are four feet tall, as those that in Greenland are called *Screlirgi*». The text refers to Mercator's Arctic map description of the northern Pygmies, similar to the *Screlingers* of Greenland, who fished and hunted from skin boats around *chorbacks* (ice openings) and *aglous* (seal breathing holes), most likely referencing the Inuit.

For the lands above Siberia (fig. 13) «The Ocean, entering these islands with 19 accesses, creates four channels flowing north without interruption and here it gets absorbed by the bowels of the earth». Here the text refers to Mercator's mapping of the main Russian water networks flowing northwards: the Dwina, the Petzora, the Ob and the Oecharde⁴².

4. Accuracy of Mercator's and Medici's Arctic cartographic knowledge

The geography of the Arctic was not clear until the 19th century, however, the geographic features represented by Mercator are only slightly shifted to the south (about one degree). While the northern limits of the continents depicted by Mercator were not exact, areas like the Finnish-Scandinavian peninsulas, northern Russia, the Davis Strait between Greenland and present-day Nunavut and Alaskan shorelines were impressively accurate⁴³. The persistence of place names since 1595 varies; regions like Greenland, Siberia, and Russia remain, while names like Anian, Obila, and Tabin have disappeared. Later names like Spitzbergen, Laptev, and Alaska emerged⁴⁴.

⁴² LOUIS-EDMOND HAMELIN, STEFANO BIONDO, JOE BOUCHARD, *L'Apparition Du Nord Selon Gérard Mercator*, cit.

⁴³ RAYMOND FISHER, *The Early Cartography of the Bering Strait Region*, in «Arctic», vol. 37, no 4, 1984, p. 574.

⁴⁴ LOUIS-EDMOND HAMELIN, STEFANO BIONDO, JOE BOUCHARD, *L'Apparition Du Nord Selon Gérard Mercator*, cit.

Mercator and the Medici cartographers used compasses and astrolabes, mathematical methods, logic, and deduction. They may have had more knowledge of the North than is commonly believed. Their work might reflect not just the cooling of the 1500s but a warmer medieval period that enabled European voyages to Greenland and eastern North America. Despite gaps in documentation, and the ideological restrictions of the Inquisition, Mercator's and the Medici's maps were far from unrecognizable. Their work reflected a sophisticated understanding of geography and offered significant contributions to the 16th-century Polar knowledge.

5. The Medici Wunderkammer or Guardaroba

Considered the first museum collection of the 16th century, the compilation of valuables of the Medici family followed the medieval tradition of collecting treasures⁴⁵, an important strategy, where scientific knowledge and technological control of nature would confer political power. The Medici designed womb-like studios for aesthetic contemplation of their collections⁴⁶ and the *Guardaroba* became a sort of *Kunst- und Wunderkammer* (fig.7)⁴⁷. These “cabinets of curiosities” constituted a room or cabinet full of artefacts - natural and artificial. They were arranged according to the epistemic codes of “The Four Elements”, “The Four Continents” or “The Seven Virtues”⁴⁸. A “museum” containing small

⁴⁵ TIFFANY JENKINS, *Keeping Their Marbles. How the Treasures of the Past ended up in Museums – and why they should stay there*, Oxford, Oxford University Press, 2016.

⁴⁶ FAUSTO BARBAGLI, *Natura Collecta Natura Exhibita: Il collezionismo naturalistico a Firenze dai Medici al Museo di Storia Naturale*, cit.

⁴⁷ JUERGEN SCHULZ *Maps as metaphors: Mural map cycles of the Italian Renaissance*, in David Woodward (ed.), *Art and Geography: Six Historical Essays*, Chicago, University of Chicago Press, 1987, pp. 97-122.

⁴⁸ TIFFANY JENKINS, *Keeping Their Marbles. How the Treasures of the Past ended up in Museums – and why they should stay there*, cit.

precious objects classified as *sacralia*, *naturalia* and *mirabilia*⁴⁹. The recording of the geographical origin of an object by placing it behind a cabinet with a map of the corresponding place reflects the interest in documenting its rare and valuable provenance, helping to describe the Medici as prominent art collectors.

5.1 The *Guardaroba* meets America

The Medici did not physically participate in the conquest of America. For the Italians, the institutional laws of Spain and Portugal made it impossible to undertake journeys there. However, Cosimo I, Eleonora di Toledo, and their offspring Francesco I and Ferdinando I were fascinated by these new lands, plants, animals and precious materials and they became both documenters and producers of culture by commissioning explorers to search for treasures such as masks, plumage and codices, constituting the largest collection of New World artefacts of their time. The prominence given to exotic objects in the *Guardaroba* was groundbreaking⁵⁰, where Aztec masks and feather works shared space with masterpieces of painting, changing forever the approach to the exhibition of the collections⁵¹. Vasari marked the evolution of museum culture with such proto museology and the *Guardaroba* paved the way for the first national museums, which emerged a few centuries later, exhibiting modern works alongside ancient ones⁵².

Cosimo's heir, Ferdinand I, entertained the idea of venturing to the Americas and founding a commercial emporium there. The project

⁴⁹ ANDREA M. GALDY, *Con Bellissimo Ordine: Antiquities in the Collection of Cosimo I De' Medici and Renaissance Archaeology*, cit.

⁵⁰ FRANCESCA FIORANI, *The Marvel of Maps: Art, Cartography and Politics in Renaissance Italy*, cit.

⁵¹ LIA MARKEY, *Imagining the Americas in Medici Florence*, The Pennsylvania State University Press, 2016.

⁵² MAIA WELLINGTON GATHAN, *Giorgio Vasari and the Birth of the Museum*, Routledge, 2016.

failed with his death, but in this very room, he could fantasize about this newly discovered continent, which produced marvellous items, most of which are preserved today in the Museum of Natural History, Anthropology and Ethnology in Florence. Florence has never been the capital of colonial empires, but the collecting zeal of the Medici family, resulted in the collection of North America's Arctic artefacts since the 16th century.

6. Mantegazza's first Museum of Anthropology and Ethnology

The Galleria degli Uffizi was also founded by Francesco I, where the Medici family stood out as private collectors. The idea of gathering together in one place the “natural productions” present in the Uffizzi dates back to 1763, when the Florentine naturalist and scientist Giovanni Targioni Tozzetti, on behalf of the Grand Ducal government, drew up the first catalogue of all the naturalistic exhibits in the Galleria degli Uffizi. At the end of the Medici era, the Lorraine dynasty inaugurated the new Imperial and Royal Museum of Physics and Natural History in 1775 (one of the world's first scientific museums). The new institution reorganised the collections, regrouping scientific artefacts, permanently separating them from artistic ones, embodying the novel appreciation of scientific material⁵³. The rise of disciplinary specialists in botany, geology and ethnology led eventually to the fission of the mega-collections, into more focused thematic assemblages. In the following years, the collections of Palazzo Torrigiani, were moved to different Florentine palaces.

6.1 Arctic Artefacts reach Florence

Leopold of Lorraine, then Grand Duke of Tuscany and a fervent supporter of the Natural Sciences sent in the mid-19th century Felice Fon-

⁵³ MARA MINIATI, *Birth and life of Scientific Collections in Florence*, cit.

tana, the Royal Museum of Physics' director, and Giovanni Fabbroni, his assistant, to visit the main European cities in search of scientific instruments and artefacts to enrich the new institution⁵⁴. In 1780 they arrived in London and, thanks to the friendship between Fabbroni and Joseph Banks, some objects collected by British naval Capt. James Cook during his third voyage to the Pacific were transferred to the Florentine Museum⁵⁵. Sir Joseph Banks had accompanied Cook on his first voyage and was also a keen collector of "natural and artificial curiosities". Other artefacts purchased for the Florentine Museum came from the sale of the Leverian museum in London in 1806 through Atkinson, a dealer working with Banks. The acquisitions were taken to Florence, deposited in a small room at the Royal Museum of Physics next to the custodian's door and listed as "various Indian things".

In the 1860s Italy was conceived as a nation-state and, at the same time, specialised museums were opened in Florence, including the museum created by Paolo Mantegazza in 1869, the first in the world to refer to its domain as "anthropology". The bulk of this museum was the ethnographic collection kept in the former Museum of Physics and Natural History. The collection was moved to the galleries of the new Museum in Via Gino Capponi and then to Via Proconsolo in 1924⁵⁶ where they remained on display in wooden and glass showcases. The exhibits are extensive and sophisticated and remain a marvel of the variety of human cultures and their arts.

⁵⁴ ADRIENNE KAEPLER, *Cook voyage artifacts in Leningrad, Berne, and Florence museums*, Honolulu, Hawaii, Bishop Museum Press, 1978.

⁵⁵ MONICA ZAVATTARO, *Gli oggetti americani della raccolta James Cook*, in Jacopo Moggi Cecchi, Stanyon Roscoe (eds.), *Il Museo di Storia Naturale dell'Università degli Studi di Firenze*, v: Le Collezioni Antropologiche ed Etnologiche, Firenze, University Press, pp. 148-151, 2014b.

⁵⁶ ADRIENNE KAEPLER, *Cook voyage artifacts in Leningrad, Berne, and Florence museums*, cit.



Fig. 14 Polar lands above Greenland. Image free of copyright under commons. [wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org/).



Fig. 15 Pair of Inuit Greenlandic shoes. Museum of Anthropology, Florence. By permission of the Sistema Museale dell'Università degli Studi di Firenze.

6.2 Arctic indigenous material culture represented in the *Guardaroba*

Centuries after the creation of the four maps of the Polar Lands in the *Guardaroba*, the Florentine collections of the Museum of Anthropology and Ethnology would display the rich Native material culture of the Arctic regions represented in the *Guardaroba*. The collections documenting the Arctic regions of North America include some 30 objects collected among the Native Peoples of the west coast of Canada and Alaska during the third voyage to the Pacific by captain Cook, providing evidence of the interest that they aroused in European cultural circles⁵⁷.

⁵⁷ MONICA ZAVATTARO, *Gli oggetti americani della raccolta James Cook*, cit.



Fig. 16 Polar lands above Hudson Bay. Image free of copyright under commons. wikimedia.org



Fig. 17 Wood and copper Ulu. Coppermine Region, Northwest Hudson Bay, Canada. Museum of Anthropology, Florence. By permission of the Sistema Museale dell'Università degli Studi di Firenze.

Adrienne Kaepler, anthropologist at the Smithsonian Institution, in her anthology of *Cook Voyage artifacts* of 1978, states that among the objects from Cook's collection is a pair of Inuit shoes (fig. 15) collected during his four-day stay in Norton Sound, an inlet of the Bering Sea on the west coast of Alaska, home to Yup'ik and Inupiat Peoples. The shoes are made from seal skin. They have a front and back cut, with stitching at the toe and heel and a lace around the edge made of plant fibre⁵⁸. Judging by their size, they could have been made for a woman. However, in the general inventory of the Royal Museum, Vol. XIX, p. 5, they are listed as slippers from Greenland made before 1791. Its shape closely resembles that of Icelandic wolffish skin shoes preserved

58 ADRIENNE KAEPLER, *Cook voyage artifacts in Leningrad, Berne, and Florence museums*, cit.



Fig. 18 Polar lands above the Bering Strait. Image free of copyright under commons. [wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org)



Fig. 19 Walrus gutskin parka from the Aleutian Islands, Alaska. Museum of Anthropology, Florence. By permission of the Sistema Museale dell'Università degli Studi di Firenze.

in many Icelandic museums⁵⁹, suggesting a Greenlandic provenance. These shoes, although they arrived in Florence long after the *Guardaroba* project was abandoned, could have been exhibited behind the doors of the map of the Polar Lands over Greenland.

In the Museum's collections can be found an Ulu (fig. 17), donated to the Museum by Borg de Balzan in 1894. Ulus are traditional knives used by Arctic women for cutting and scraping skins, for making fur

⁵⁹ ELISA PALOMINO, *Indigenous Arctic Fish Skin Heritage: Sustainability, Craft and Material Innovation*, PhD Thesis, University of the Arts, London, 2022.



Fig. 20 Polar lands above Siberia. Image free of copyright under commons. wikimedia.org

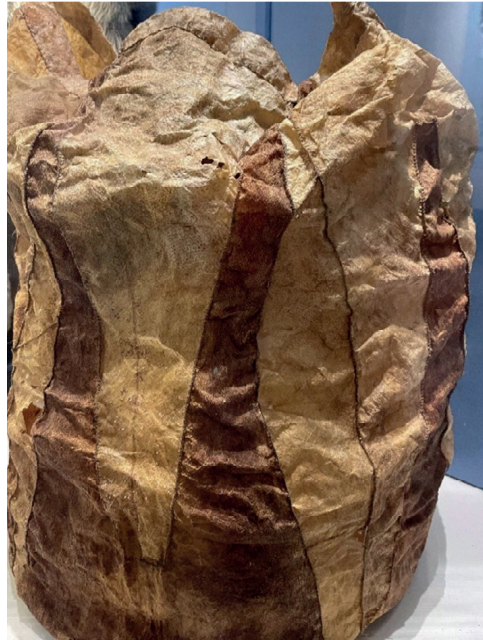


Fig. 21 Siberian Fish skin bag from the Ob River. Museum of Anthropology, Florence. By permission of the Sistema Museale dell'Università degli Studi di Firenze.

garments and for food preparation. This Ulu from the Coppermine region of northwestern Hudson Bay, Canada, has a wooden handle and a copper blade curved at the bottom, with a bevelled edge and straight edges. Men made ulus with great attention to detail, sometimes with beautiful carvings, to give to women as wedding gifts. They were passed down from generation to generation, and mothers taught their daughters to produce food and make clothes using them. The Ulu may have been displayed in the Polar Lands above the Hudson's Bay cabinet.

In addition to the objects collected during Cook's third voyage, the earliest Arctic artefacts at the Museum are three gutskin parkas (fig. 19) made from walrus intestine by the Unangax̂ and Sugpiaq inhabit-

ants of the Aleutian Islands, an archipelago that separates the Bering Sea from the main portion of the Pacific Ocean from southern Alaska. The lightness, strength and impermeability of the intestine, an inner membrane, becomes an outer skin, making these parkas ideal for protecting the body from the elements⁶⁰. The parka is decorated along the seams with short wool tufts, musk ox hair and Arctic loon feathers. The parkas were purchased in 1871 by Giuseppe Bellenghi, a Tuscan musician from the late 1800s⁶¹. This gutskin parka could have been placed behind the door of the polar land above the Bering Strait map.

The fish skin bag (fig. 21) in the Museum was most probably brought by anthropologist Stefano Sommier and Mantegazza during their travels across the Siberian plateau along the Ob River. According to Hatt⁶², a Danish ethnologist and the first to inventory Arctic clothing in Eurasia and America, the Ostyak peoples along the Ob River wore clothing sewn from the skins of pike and burbot. In addition to clothing, Sommier and Mantegazza collected shamanism specimens from the Sámi, Khanty (Ostyak), Nenets (Samoyed) and Tartar Peoples⁶³. The fish skin bag could have been displayed behind the Polar Lands map above Siberia.

6.3 Provenance of Arctic artefacts held in Western museums

Museums of Natural History, Ethnography, and Anthropology have long curated collections of Arctic artefacts, including ritual objects, cloth-

⁶⁰ PAT HICKMAN, *Innerskins/Outerskins, gut and fishskin*, San Francisco, San Francisco Craft and Folk Art Museum, 1987.

⁶¹ MONICA ZAVATTARO, *Inuit*, in Jacopo Moggi Cecchi, Stanyon Roscoe (eds.), *Il Museo di Storia Naturale dell'Università degli Studi di Firenze*, v: Le Collezioni Antropologiche ed Etnologiche vol. v, Firenze, University Press, pp. 145-147, 2014.

⁶² GUDMUND HATT, KIRSTEN TAYLOR, *Arctic Skin Clothing in Eurasia and America an Ethnographic Study*, in «Arctic Anthropology», University of Wisconsin Press, vol. 5, No. 2. 1969, pp. 3-132.

⁶³ PAOLO MANTEGAZZA, *Un Viaggio in Lapponia, coll'Amico Stephen Sommier*, Milano, G. Brigola, 1881; STEFANO SOMMIER, *Un'estate in Siberia, Tra Ostiaci, Samoiedi, Sirièni, Tartari, Kirghisi e Baskiri*, Firenze, 1885.

ing, and tools from Native communities, aimed to document what was wrongly believed to be vanishing cultures. Over time, the focus of these museums has evolved from categorisation to environmental awareness while facilitating Natives access to their cultural heritage. The provenance of Arctic artefacts in Western museums is linked to colonial legacies, exploitation and raw material extraction⁶⁴. These artefacts were collected by explorers and missionaries, resulting in a disconnect between Native communities and their material heritage.

The practice of inter-museum trade, such as those noted in this paper, further dispersed these items, severing links to their original contexts. In recent years, there has been a growing need to reassess museum collections and undertake the decolonisation of these institutions. This involves examining the acquisition processes, display methods, and the intended audience for these artefacts, reimagining them while honouring the cultures they represent⁶⁵.

These artefacts also highlight the rich cultural ecologies of Indigenous groups, and their interactions with nature. Despite the common perception of the Arctic as a place of mere survival, the abundance of archaeological material recently unearthed in Alaska suggests the historical wealth of the region and the flourishing of transcontinental trade among Arctic Native Nations long before European contact in Alaska in the 18th century⁶⁶.

⁶⁴ ADRIENNE KAEPLER, L. SARAH STONE, *Holophusicon-the Leverian Museum: An Eighteenth-Century English Institution of Science, Curiosity, and Art*, Altenstadt, Germany, Honolulu, HI: ZKF Publishers; Distributed in the United States by Bishop Museum Press, 2011.

⁶⁵ VERA-SIMON SCHUTZ, *Decentering the Renaissance: Afro-Eurasian Itineraries of Mamluk Metalwork*, in Stephen Campbell, Stephanie Porras (eds.), *The Routledge Companion to Global Renaissance Art*, Routledge, pp.190-206, 2024.

⁶⁶ BART PUSHAW, *Otter offerings Indigenous Art History and Extractive Ecologies in the Circumpolar North*, in Stephen Campbell, Stephanie Porras (eds.), *The Routledge Companion to Global Renaissance Art*, New York: Routledge, 2024.

7. Conclusions

The paper is based on personal observations made in the *Sala delle Carte Geografiche* and in the Museum of Anthropology in Florence, while drawing on existing literature. The *Guardaroba* is a masterpiece of Renaissance geographical knowledge placed on the doors of specific cabinets containing objects related to the regions of the maps. The four 'Polar Land' maps represent Cosimo's interest in Nordic curiosities. The maps are the definitive linkage between the Medici and Mercator, and a signal step in western conceptions of the Arctic. The research has identified Mercator's "construction of the Arctic" through his 1569 World Map, its reception in the *Cosmographica* of the Medici collections and the evolution of scientific museums in Florence.

The four 'Polar Lands' maps illuminate the migration from the south to the north where Europeans realised further expansion into Arctic climates recognising that the Peoples of the North's cultures, were much more complex than they had been perceived in medieval times. Explorers noted the superb adaptations that Arctic Natives had made with clothes designed for Nordic climates. At the same time, the success of any polar exploration was contingent on the relations developed with Native Peoples—or the lack of them. And it is not coincidental that the very specific longitudes of the four ocean rivers mapped by Mercator were north of four areas of great salience to Indigenous Peoples of the pan-boreal arc. Mercator's major guide to the North of the ocean rivers was a cluster of narratives culminating in the *Inventio Fortunata*, written in the 14th century, and recopied later. Not a single copy of most of these documents has survived intact. Yet Mercator references them, and his Arctic map present his synthesis of their contents. The sources were a chain of very real and very salient people from the late medieval period, who played roles in constructing an Arctic, linking Mercator to the Medici, to the world.

Centuries after the creation of the *Guardaroba*, the Florentine collections would hold rich Indigenous material culture from the Arctic regions of the four oceanic rivers flowing: north of the strait between Greenland and Nunavut; north of Hudson Bay; north of the Bering Sea;

and north of the Ob River. This paper has also analysed that much can be experienced and learned about “the Arctic” from the evolution of museum collections in Florence and the system of contemporary museums of Anthropology and Ethnology, thematically defined.

There has been substantial recent work on the Cosmography of the *Guardaroba*, but our research is the first to acknowledge the subject of the evocative Polar Rivers Maps in its full range and complexity. Their seemingly stark and simple appearance points to the maelstrom of the geographical and cultural frontiers in the age of Mercator and the Medici, on the cusp between Arctic projections and discoveries.

8. Acknowledgements

The research by Elisa Palomino was conducted under the postdoctoral fellowships: Ca' Foscari University. DSAAM: Department of Asian and African Mediterranean Studies; International Institute for Asian Studies (IIAS) Leiden University, Kunsthistorisches Institut in Florenz, Max-Planck-Institute; Koç University ANAMED; Max Planck Institute for the History of Science; Fondazione Cini, Centre for Comparative Studies of Civilisations and Spiritualities; Kluge fellowship at the Library of Congress. Additional research was carried out at Biblioteca del Museo Galileo, the Dutch University Institute for Art History NIKI, I Tatti Renaissance Library, Dumbarton Oaks Library, Biblioteca Nazionale Marciana, Biblioteca del Museo Civico Correr, Biblioteca del Centro Tedesco di Studi Veneziani and Fondazione Scientifica Querini Stampalia. The research by John Cloud was funded by the Kluge Center Lee Phillips Society Fellowship at the Library of Congress at the Geography and Map Division's collections. The authors would like to thank William Fitzhugh, Stephen Loring and Igor Krupnik at the Smithsonian Arctic Studies Center and Prof. Monica Zavattaro and Prof. Gloria Roselli at the Anthropological and Ethnological Collections in Florence. Our gratitude also goes to Dr. Imre Josef Demhardt for introducing us to the subject.

Elisa Palomino, John Cloud

Riassunto Questo studio esamina le mappe delle “Terre Polari” della Guardaroba di Palazzo Vecchio come primi esempi di cartografie artiche, riconoscendo i mondi boreali indigeni precedenti all'esplorazione europea. Ripercorre lo scambio di conoscenze cartografiche sotto Cosimo I e i manufatti in pelle di animali artici nei musei fiorentini, collegando l'immaginario rinascimentale alle ecologie indigene sottoposte attualmente a pressione ambientali.

Abstract This study examines the “Polar Lands” maps of the Guardaroba of Palazzo Vecchio as early Arctic cartography, recognising Indigenous Boreal worlds before European exploration. It traces cartographic knowledge exchange under Cosimo I and Arctic animal skin artefacts in Florentine museums, linking early modern imaginaries to Indigenous ecologies currently under environmental pressure.

Mathematics, Language Games, and Black Boxes from Galileo to Wittgenstein

Giovanni Galli

1. Introduction

With the advent of *Large Language Models* (LLMs) like ChatGPT and Bard, there has been a surge of interest in whether these systems can truly understand the words they use, akin to human skills. This curiosity extends to whether such models can replicate human-like cognitive abilities. The development of LLMs also prompts more profound questions about the relationship between language and mathematics, particularly concerning how meaning can be encoded algorithmically. While the debate over machine understanding of language is not new, it is gained renewed importance as AI systems grow with a more sophisticated architecture. Some developers now claim that these systems exhibit a form of understanding, a perspective that merits closer philosophical scrutiny. Mathematics plays a pivotal role in the architecture of LLMs, embedding foundational assumptions within these models. This paper argues that those who advocate for LLMs' capacity to understand meaning implicitly adopt a Galilean view of mathematics. This view is at odds with the later Wittgenstein's philosophy, which posits that mathematics is not merely a reflection of the world's ontological structure but is fundamentally a human activity. The shift from Galileo's to Wittgenstein's views on mathematics provides crucial insights into the intersections of mathematics, language, and the limits of AI. These insights are especially relevant when considering Wittgenstein's private language argument (PLA), which challenges the possibility of a private language and has significant im-

plications for the development of NLP systems. In particular, the problem addressed here is that of the LLMs' ability to understand and create meanings with the same human-like features. The discussion about the private language pivots this issue insofar as it is a case limit for human understanding and meaning formation. The underlying assumption is that if a LLM is able to model private language, then it understands and uses meaningfully words in language. The analysis I propose is that we can distinguish two mathematical frameworks grounding the LLMs' ability to understand meaning and model private language, namely the Galilean and the Wittgensteinian. The Galilean framework is implied in defending the ability of LLMs to understand, while the Wittgensteinian accommodates the claim that the LLMs ability to manipulate meaning are different from human practices. Wittgenstein's ideas, especially his concept of language games, are foundational in the design of many natural language processing (NLP) systems and LLMs¹. In recent years, these systems have achieved unprecedented levels of performance in tasks such as question answering, textual entailment, and machine translation, utilizing deep learning neural networks (DLNNs) to learn from vast amounts of data. Examples of these advancements include works by Devlin *et al.* (2019), Kitaev, Cao, and Klein (2019), and Wang *et al.* (2019)².

- 1 STEPHEN MILLS, *Wittgenstein and Connectionism: A Significant Complementarity?*, in «Royal Institute of Philosophy Supplement», 34, 1993, pp. 137-157; CHARLES W. LOWNY, SIMON D. LEVY, WILLIAM MERONEY, ROSS W. GAYLER, *Connecting Twenty-First Century Connectionism and Wittgenstein*, in «Philosophia», 48, 2020, pp. 643-671; INES SKELAC, ANDREJ JANDRIĆ, *Meaning as Use: From Wittgenstein to Google's Word2vec*, in Sandro Skansi (ed.), *Guide to Deep Learning Basics. Logical, Historical and Philosophical Perspective*, Berlin, Springer, 2020, pp. 41-53.
- 2 JACOB DEVLIN, MING-WEI CHANG, KENTON LEE, AND KRISTINA TOUTANOVA, *BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding*, In Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1 (Long and Short Papers), pages 4171-4186, Minneapolis, Minnesota, Association for Computational Linguistics, 2019; NIKITA KITAIEV, STEVEN CAO, AND DAN KLEIN, *Multilingual Constituency Parsing with Self-Attention and Pre-Training*, In Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, pages 3499-3505, Florence, Italy, Association for Computational Linguistics, 2019;

This paper examines Wittgensteinian concepts that influence the architecture of many deep learning NLP systems, with a particular focus on efforts to model a private language. By dissecting these concepts, I aim to uncover the assumptions that underpin AI systems' language modeling capabilities. Specifically, I will explore key features of NLP systems³ used for word embedding and evaluate a proposal by Lowney *et al.* (2020) to manipulate a form of private language through a vector symbolic architecture.

In the following section §2, I will compare the fundamental issues of Galilei and Wittgenstein's philosophy of mathematics. In §3, the private language argument (PLA) is described. In §4, I will discuss connectionist language models and introduce some notions about NLP systems' architecture on the light of Wittgenstein's and Galilei's views about mathematics. An overview of this model helps introduce the work of Lowney, Levy, Meroney, and Gayler (2020). They submit that their model can respond to the issues raised by Wittgenstein in the notorious Beetle in the box case, used to illustrate Private Language Argument (PLA). This argument unexpectedly turned out to be relevant not only for the philosophy of language but also for NLP modelers. I will describe the language game concept in NLP, how it is embedded, and its role in inductive systems development. This central concept in Wittgenstein's work is relevant to describing context's role in understanding word meanings. In §5, I criticize Lowney and colleagues' claim, whose model does not successfully capture Wittgenstein's Beetle in the Box case. Moreover, I argue that even if we can distinguish

ALEX WANG, YADA PRUKSACHATKUN, NIKITA NANGIA, AMANPREET SINGH, JULIAN MICHAEL, FELIX HILL, OMER LEVY, AND SAMUEL R. BOWMAN, *SuperGLUE: a stickier benchmark for general-purpose language understanding systems*, Proceedings of the 33rd International Conference on Neural Information Processing Systems. Curran Associates Inc., Red Hook, NY, USA, 2019, Article 294, 3266–3280.

3 For a discussion about language acquisition models, instead, see JORDI POVEDA, ALFREDO VELLIDO, *Neural Network Models for Language Acquisition: A Brief Survey*, in Emilio Corchado, Hujun Yin, Vicente Botti, Colin Fyfe (eds.), *IDEAL Intelligent Data Engineering and Automated Learning*, Berlin, Springer, 2006. In these pages, the focus will be on the only NLP models.

a strong and a weak definition of a private language, Wittgenstein's argument also holds for deep-learning models, and his worries are still a good guide for NLP and LLMs developers.

2. Galilei and Wittgenstein's Philosophy of Mathematics

The 400th anniversary of Galileo Galilei's *The Assayer* provides an opportunity to revisit its philosophical significance, particularly in relation to mathematics and scientific methodology. The Galilean dialogic style expresses a new, cutting-edge conception of mathematics and epistemology. His work presents a realist view of mathematics⁴, where mathematical structures are seen as intrinsic to the physical world. In contrast, Wittgenstein⁵, especially in his later work, adopts an anti-

⁴ There is no space here to dig into the intricacies of Galilei and Wittgenstein's thoughts about mathematics. For a more detailed study about the former, see PAOLO GALLUZZI, *Il "platonismo" del tardo Cinquecento e la filosofia di Galileo*, in Paola Zambelli (ed.), *Ricerche sulla cultura dell'Italia moderna*, Roma-Bari, Laterza, 1973, pp. 39-79; MARK A. PETERSON, *Galileo's new mathematical philosophy*, in «Forum Italicum», 49(1), 2015, pp. 119-138; CARLA RITA PALMERINO, *Reading the book of nature: the ontological and epistemological underpinnings of Galileo's mathematical realism*, in Geoffrey Gorham, Benjamin Hill, Edward Slowik (eds.), *The language of nature: reassessing the mathematization of natural philosophy in the seventeenth century*, University of Minnesota Press, Minneapolis, 2016, pp. 29-50.

⁵ We can distinguish different phases in the development of the philosophy of mathematics in Wittgenstein's work. I will only focus on the later Wittgenstein in these pages. For an in-depth analysis on Wittgenstein's philosophy of mathematics, see CRISPIN WRIGHT, *Wittgenstein on the Foundations of Mathematics*, London, Duckworth, 1980; MICHAEL WRIGLEY, *Wittgenstein on Inconsistency*, in «Philosophy», 55(214), 1980, pp. 471-484; CARLO PENCO, *Matematica e gioco linguistico. Wittgenstein e la filosofia della matematica del '900*, Firenze, La Nuova Scuola, 1981; MICHAEL DUMMETT, *Reckonings: Wittgenstein on Mathematics*, in «Encounter», 50(3), 1978, pp. 63-68; JACQUES BOUVERESSE, *Le pays des possibles, Wittgenstein, les mathématiques et le monde réel*, Paris, Les Editions de Minuit, 1988; DIEGO MARCONI, *Wittgenstein on Contradiction and the Philosophy of Paraconsistent Logic*, in «History of Philosophy Quarterly», 1(3), 1984, pp. 333-352; PASQUALE FRASCOLLA, *Wittgenstein's Philosophy of Mathematics*, London and New York, Routledge, 1994; CHRISTINE REDECKER,

realist stance, viewing mathematics as a product of human activity rather than as a discovery of pre-existing truths. The comparison between Galilean realism and Wittgensteinian antirealism about mathematics could lead to an intriguing debate about the objects, nature, and specific features of mathematics. However, we must distinguish the differences in the particular contexts and philosophical purpose. Indeed, Wittgenstein's thoughts about mathematics were essential in determining his view about the meaning and the understanding of language, built on the notion of the "language game." In contrast, Galileo's view and use of mathematics had a fundamental impact on the future development of science. Galilei's view of mathematics is bound to a new conception of matter, which can be studied by measuring its primary qualities while discharging the secondary quality to the subjective and private sphere of experience. The view of mathematics proposed by Wittgenstein is closely tied to his beliefs about language. According to Galileo, language boundaries are defined by private objects, such as the secondary qualities of things. Therefore, I suggest that the connection between Galileo's and Wittgenstein's ideas about mathematics and the meaning of private objects is a significant topic that has yet to be thoroughly investigated.

The representation of the universe as a whole «written in a mathematical language» was not merely a metaphor to emphasize the epistemic role of mathematics. Still, it concerns Galilei's conception of maths as revealing the ontological fabric of reality:

Wittgensteins Philosophie der Mathematik: Eine Neubewertung im Ausgang von der Kritik an Cantors Beweis der Überabzählbarkeit der reellen Zahlen [Wittgenstein's Philosophy of Mathematics: A Reassessment Starting From the Critique of Cantor's Proof of the Uncountability of the Real Numbers], Frankfurt-Hausenstamm, Ontos Verlag, 2006; MATHIEU MARION, MITSUHIRO OKADA, *Wittgenstein et le lien entre la signification d'un énoncé mathématique et sa preuve*, in «Philosophiques» 39 (1), 2012, pp. 101-124; MICHAEL POTTER, *Reason's Nearest Kin: Philosophies of Arithmetic from Kant to Carnap*, Oxford, Oxford University Press, 2000; SIMO SÄÄTELÄ, *From logical method to 'messaging about': Wittgenstein on 'open problems' in mathematics*, in Oskari Kuusela, Marie McGinn (eds.), *The Oxford Handbook of Wittgenstein*, Oxford, Oxford University Press, 2011.

La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile intenderne umana parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto⁶.

According to Galilei, through mathematics, scientists gained the ability to capture the fundamental proprieties of natural phenomena to unveil the universe's structure underlying the subjective perceptions generated by our senses⁷. The image of mathematics as a language is a description that will travel the time from Galilei to Wittgenstein, shifting from the realist idea of a distinctive mathematical ontology of the universe to the anti-realist contemporary idea that it is a result of human activity. Given the ontological feature of mathematics, characterizing the objective structure of the universe, Galilei claims that we should distinguish objective from subjective properties of objects. This distinction discriminates between the qualities behold to the physical objects and the ones that reside in the perceiving subjects⁸. The relation between the secondary qualities of objects and the world is still much debated. This issue raises a seduction that connects many crucial turning points in the history of philosophy. It begins with Gorgia's nihilism about the possible connection between language and the world. It con-

⁶ I propose this translation: «Philosophy is written in this grand book, the universe, which stands continually open to our gaze. But the book cannot be understood unless one first learns to comprehend the language and interpret the characters in which it is written. It is written in the language of mathematics, and its characters are triangles, circles, and other geometric figures, without which it is humanly impossible to understand a single word of it; without these, one is wandering about in a dark labyrinth» (GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*, Michele Camerota, Franco Giudice (eds.), Milano, Hoepli, 2023, pp. 46-47).

⁷ MICHELE CAMEROTA, FRANCO GIUDICE, *Introduzione. «La strada al ritrovamento del vero», Il Saggiatore come manifesto del nuovo sapere*, in *Il Saggiatore*, Michele Camerota, Franco Giudice (eds.), Milano, Hoepli, 2023, pp. XIX.

⁸ GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*, cit., pp. 246-247.

tinues with Galilei's discussion about the secondary quality of objects in *The Assayer* (1623). Moreover, of course, it also touches on Wittgenstein's work. According to Galilei⁹, the doctrine of secondary qualities (SQs) differs from primary accidents in size, shape, motion, rest, and location. Galileo claimed that primary accidents exist in external bodies, which we attribute to them. We give public ontology to the primary accidents by using a public language. On the other hand, we assign a private ontology to the secondary quality since these qualities «appear to exist in the objects we perceive around us and reside only in us»¹⁰. If the SQs reside exclusively in us, they can be considered private objects in a Wittgensteinian sense. Wittgenstein critiques the concept of a private ontology, offering an alternative perspective on how language operates about ourselves and the world. In PI §256 and §258–60, Wittgenstein claims that a private language is impossible in which meanings are derived by ostensive internal relation to private objects. The conclusion is that a meaningful discussion about private sensation is impossible.

In his preface to the Italian edition of Wittgenstein's *On Certainty*, Aldo Gargani writes:

Sembra giusto ritenere che la scienza, soprattutto a partire dal secolo XVII, con la sua strutturazione meccanicistica, abbia scisso il sapere dal senso comune. La tesi di Galilei, Descartes, Hobbes e di altri sulla soggettività delle qualità sensibili ha espropriato dall'universo fisico oggettivo sapori, odori, colori (e insieme anche valori etici ed estetici) con i quali il senso comune produce la sua percezione del mondo fisico. La scienza avrebbe così svalutato i canali ordinari attraverso i quali il senso comune stabilisce il proprio contatto con gli oggetti fisici¹¹.

⁹ See GALILEO GALILEI, *Two Kinds of Properties. Selection from Il Saggiatore*, in *Philosophy of Science*, Arthur C. Danto, Sidney Morgenbesser (eds.), New York, Meridian Books, [1623] 1960, p. 28.

¹⁰ EUGEN FISHER, *Philosophical Pictures and Secondary Qualities*, in «Synthese», 171(1), pp. 77–110: 93.

¹¹ ALDO GARGANI, *Scienza, filosofia e senso comune*, in LUDWING WITTGENSTEIN, *Della Certezza*, Aldo Gargani (ed), Mario Trinchero, (translation), Torino, Einaudi, 1999, p. VII.

The Galilean view implies a twist of the traditional conception of sensitive qualities. The expressions of individual sensations seem to imply privacy of language; this is the «primitive seduction of the private language»¹². These qualities, which Galileo relegated to the private sphere, align with Wittgenstein's critique of private language, i.e. the idea that meanings derived from internal, private experiences are incommunicable. The discussion about private sensations then found its acme in Wittgenstein's treatment of the PLA, which explores this idea further, asserting that a language grounded in private sensations is inherently flawed because such sensations cannot be meaningfully expressed or understood by others. This argument, central to Wittgenstein's later philosophy, has significant implications for AI, particularly in the development of LLMs that aim to model human language. It also has a vital role in developing the reflection about the nature and features of mathematical propositions and objects. According to Wittgenstein, «the mathematician is not a discoverer: he is an inventor» (RFM, Appendix II, par 2; LFM 22, 82). Anything exists mathematically before we humans have invented it. In the context of LLMs, the contrast between Galileo and Wittgenstein's views highlights the limitations of current AI models. While LLMs can process and generate text based on statistical patterns in data, they lack the ability to grasp the contextual nuances that are central to human language. This limitation is closely tied to Wittgenstein's critique of private language: just as a private language is impossible and cannot convey meaning to others, LLMs struggle to model the context-dependent understanding that humans naturally possess.

Moreover, Wittgenstein's notion of language games emphasizes that meaning is not fixed but is shaped by use within specific contexts. This idea challenges the premise that LLMs can achieve genuine understanding, as these models operate primarily through pattern recognition rather than through an appreciation of the contextual factors that give language its meaning. Consequently, while LLMs may simulate understanding, they do not possess the human-like capability to fully

¹² ROBERT J. FOGELIN, *Wittgenstein*, London and Boston, Routledge, 1976, pp. 156.

engage with the complexities of language. The attempt by Lowney *et al.* (2020) to model a private language using neural networks is particularly illustrative of these challenges. Despite their claims, this paper argues that their model fails to capture the essence of Wittgenstein's beetle in the box analogy, which illustrates the impossibility of private language. Wittgenstein's argument remains relevant, suggesting that the challenges he identified continue to pose significant obstacles for AI developers.

In conclusion, this paper argues that the mathematical underpinnings of LLMs, rooted in a Galilean view of mathematics, are inadequate for capturing the full richness of human language. Wittgenstein's insights into the nature of language and meaning offer a crucial counterpoint, highlighting the limitations of current AI approaches and suggesting that understanding remains beyond the reach of machines, as long as they lack the ability to engage with language in a genuinely contextual and human way.

3. The Private Language Argument

In this section, I present the PLA and characterize it as a language game. The PLA is one of the most famous contributions of the later Wittgenstein. According to Fogelin (1976, 153), PLA is Wittgenstein's most debated argument. The debate sparked by PLA, already broad in the 70s, even increased over subsequent years and is still one of the most discussed aspects of Wittgenstein's philosophy to date.

Furthermore, in *Philosophical Investigations* (PI), Wittgenstein offers two main scenarios¹³: the first is the example of the diary of the oc-

13 For a critical analysis about private language argument and LLMs, see GIOVANNI GALLI, *Language Models and the Private Language Argument: a Wittgensteinian Guide to Machine Learning*, in Brian Ball, Alice Helliwell, Alessandro Rossi (eds.), *Wittgenstein and Artificial Intelligence*, Vol. I, *Mind and Language*, London, Anthem Press, 2024, pp. 145-163.

currence of a private sensation (PI, §258), and the other is the well-known case of the beetle in the box (PI, §293). The argument sketch is presented in PI §243: «The words of this [private] language are to refer to what only the speaker can know – to his immediate private sensations. So another person cannot understand the language». His attack on the idea and the possibility of a private language is contained in the passages of PI §§244- 271. It is not here the place to disentangle the exegetical complexity and the interpretative genealogy of the PLA. It is highly controversial whether there is, or there at least could be, a specific private language argument (PLA) to be found in Wittgenstein. However, it will be enough to cite the four central positions: orthodox, Kripkean, substantial, and resolute. While the orthodox way¹⁴ claims that the PLA is a *reductio ad absurdum* argument, Kripke¹⁵ argues that the PLA is the consequence of the discussion on rule-following. In general, the substantial view argues that private language is impossible. In contrast, according to Mulhall (2007, 18), language limitation is simply nonsense: no sense can be given to the concept of a philosophically substantial private language.

Hacker states that the PLA is one of «he most original and significant philosophical reflections of the twentieth century. If the line of argument pursued in them is valid, their implications, both within philosophy and without, are considerable. Modern philosophical logic, theoretical linguistics, and empirical psychology branches would need

¹⁴ Norman Malcom is one of the founders of the PLA (see NORMAN MALCOM, *Wittgenstein's Philosophical Investigations*, in «Philosophical Review», 63(4), 1954, pp. 530-559) and one of the defenders of what lately was called the *orthodox view* of PLA. That is the idea that the paragraphs §§244-271 contain embedded an argument in the form of *reductio ad absurdum*.

¹⁵ Kripke argued that Wittgenstein introduced a new skeptical problem to which he gave a Humean solution. According to Kripke, PLA is connected to the logical and epistemological character of following a rule. I agree instead with Hacker's interpretation of the PLA (G. P. BACKER, P. M. S. HACKER, *On misunderstanding Wittgenstein: Kripke's private language argument*, in «Synthese», 58(3), 1984, pp. 407-450; PETER M. S. HACKER, *Wittgenstein: Connections and Controversies*, Oxford, Clarendon Press, 2001).

re-evaluation»¹⁶. Moreover, perhaps we can also add branches of artificial intelligence today. Lowney, Levy, Meroney, and Gayler (2020) intentionally selected the beetle in the box as a case study to demonstrate the integration of contextual information into a language model, even if it is sourced from a private ontology. The “beetle in the box” case describes a scenario in which everyone has a box with something in it. This “something” is called a “beetle”. Anyone can look inside each box, and everybody asserts that they know what a “beetle” is, only looking at his “something-beetle” in the box. The thing in the box is unlikely to be the same for all. Indeed, it could be that the box is empty. The point is that «the thing in the box has no place in the language game. [...] That is to say: if we construe the grammar of the expression of sensation on the model of ‘object and designation’, the object drops out of consideration as irrelevant» (PI, §293). The private “something” to which Wittgenstein refers is not a simple invention. It is an example of a private experience. It could be a private sensation, definition, or object¹⁷. I submit that §293 of Wittgenstein’s works can be interpreted as a scenario defining the limit for language games. Wittgenstein describes language as played through language games, and it is possible to argue that there is a specific limit to language and language games. The PLA identifies this limit precisely with the beetle in the box case. The “thing in the box”, or perhaps the same box being empty, falls outside the boundaries of the context where we can find the meaning of the words we use.

Wittgenstein’s dictum about language games, meaning use, family resemblance, context, and the tenets of connectionism all have similarities, and the powerful and flexible concepts discussed in PI lead to PLA being the primary hotspot of the discussion. Therefore, using PLA to understand the connection between Wittgenstein’s work and connectionism is more relevant than succumbing to simplistic interpretations. In the upcoming section, I will examine the connection between

¹⁶ PETER M. S. HACKER, *Wittgenstein: Connections and Controversies*, Oxford, Clarendon Press, 2001, p. 209.

¹⁷ CANDLISH STEWART, *Private Objects and Experimental Psychology*, in Annalisa Coliva, Eva Picardi (eds.), *Wittgenstein Today*, Padova, Poligrafo, 2004, pp. 297-317.

Galilei's and Wittgenstein's views and connectionism. I will specifically concentrate on two major NLP models, one used for word embedding and the other used to simulate the beetle-in-the-box scenario.

4. The Connectionist Framework of Machine-Learning Language Models

The shift from symbolic AI to connectionist models can be seen as a contemporary echo of the transition from Aristotelian to Galilean science. Galileo's rejection of purely qualitative descriptions in favour of quantitative, mathematical analysis parallels the move from rule-based symbolic systems to the data-driven, mathematically grounded approach of connectionism. Connectionist frameworks, which rely on distributed representations and pattern recognition, resonate with Galileo's emphasis on observation and mathematical description. Just as Galileo's mathematical formulations provided a new way to understand the natural world, connectionist models offer a new paradigm for understanding cognitive processes and language: «connectionist models provide a new paradigm for understanding how information might be represented in the brain»¹⁸. Both approaches highlight the importance of mathematics as a tool for revealing underlying structures, whether in the physical world or in the domain of language and cognition. In this context, Wittgenstein's emphasis on the use of language in context aligns with Galileo's approach to mathematics as a practical tool rather than an abstract, isolated system. The success of connectionist models in natural language processing is thus not just a triumph of computational power but also a reflection of the enduring power of mathematical descriptions to model and make sense of complex systems. By integrating Galileo's philosophy of mathematics into our understanding of propositions and connectionist models, we can appreciate how these frameworks continue the Galilean tradition of using mathematical structures to describe

¹⁸ CAMERON BUCKNER, JAMES GARSON, *Connectionism*, in Edward N. Zalta (ed.), «The Stanford Encyclopedia of Philosophy» (Fall 2019 Edition), URL = <https://plato.stanford.edu/archives/fall2019/entries/connectionism/>.

and understand the world. Whether in the realm of physical laws or linguistic patterns, the influence of Galileo's approach is evident in the ongoing evolution of how we model and understand reality.

4.1. What is a proposition?

What is a proposition? This is the central question that TLP, PI, and NLP connectionist methodologies aim to answer. Wittgenstein writes in the *Notebook*: «My whole task consists in explaining the nature of the proposition» (T, 22.1.15). From this line, we must begin to trace back to the work of Wittgenstein to enlighten the contemporary exercise of connectionist methodologies for natural language. Wittgenstein's main objective was to explain the nature of propositions in his work. However, it is essential to note that the nature or essence of a proposition should not be conceived as a platonic feature of an item existing in a detached realm of beings, happenings, and words and statements we express. Instead, the nature of a proposition is interwoven in the use of words in our language. This is why the first connection point between Wittgenstein's philosophy and connectionism can be found in *Notebook* and TPL, even before PI. Wittgenstein's exploration of the nature of propositions aligns with the methodological rigor seen in Galileo's approach to mathematics. For Galileo, mathematics was the language of the universe, and its propositions were not just abstract entities but reflections of physical reality. This perspective suggests that the nature of a proposition, while deeply rooted in linguistic usage, also has a structural integrity that mirrors the mathematical order of the world. In the same way that Galileo saw mathematical truths as inherent in the fabric of reality, Wittgenstein viewed propositions as inherently tied to the structure of language and its usage within the world. The connection between Wittgenstein's ideas and contemporary connectionist methodologies can be further understood through this Galilean lens. Just as Galileo redefined the understanding of natural phenomena through mathematical propositions, connectionist models like Word2Vec redefine language understanding through the mathematical embedding of

words. This redefinition echoes Galileo's mathematical realism, where propositions are seen as tools to decode and describe the world's order.

4.2. Word2Vec and the Philosophy of Language

The first connectionist NLP method to be studied under Wittgensteinian light is Word2Vec¹⁹. It is a group of models based on neural network systems that produce word embedding. It is one of the first machine learning methods used to represent words as vectors, but it now seems outdated due to the development of transformer models, i.e., ChatGPT and Bard.

The notion of Machine Learning (ML) concerns an algorithmic process that generates an estimator that, for given input elements in a data set, values a scoring function defined over the set of output elements. The estimator is represented as:

$$f : x_i \rightarrow p_i$$

The input elements are $\{x_i\}_{i \in N} \subset \Omega_X$; and the output elements are y -targets $y_i \in \Omega_Y$. Usually, to parametrize f is used a set of parameters which establishes a family of estimators for the given estimation. Training an ML estimator means to optimize the estimator using the parameter values, in order to fit the data at best according to a prescribed loss function. The process to find the optimal estimator for a given training set is to train the model.

The Word2Vec models produce word embedding, in which semantic structures, such as words, phrases, or similar entities from a specific vocabulary, are mapped to and mathematically modelled as Euclidean vectors of real numbers. It has a variety of applications,

¹⁹ One of the leading researchers which implemented firstly Word2Vec is Tomáš Mikolov, who introduced this technique in NLP in TOMAS MIKOLOV, KAI CHEN, GREG CORRADO, JEFFREY DEAN, *Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space*, 5 May 2022, <https://arxiv.org/abs/1301.3781>.

and it is helpful to generate text similarity, sentiment analysis, and recommendation systems. The system deploys vectorial distribution to assign a specific value to a word analysed in a context, a particular corpus. It will be likely to find in the vectorial space the word “cat” near “dog, pet, kitty, purr, paws, meow,” with a value far distant from a word that could be defined as an alcoholic drink, which establishes the surrounding of, say, “wine” and “beer.” Word2Vec can utilize either model architecture to produce a distributed representation of words. The representation of words defines the collocation of words and their interlinguistic connections. The two models in play are continuous bag-of-words (CBOW) and continuous Skip-gram. The CBOW model predicts the current word from a window of surrounding context words. The order of context words does not influence the prediction, which is the bag-of-words assumption. The Skip-gram model is the reverse. It uses the current word to predict the surrounding window of context words²⁰.

The CBOW model is similar to a feed-forward neural network. It aims to predict the current word from an output set of context words. If we input “The beetle is in the box,” choose the target word “beetle” and our context words to be [“The,” “is,” “in,” “the,” “box”], this model will deploy the distributed representation of context words to predict the target word.

Instead, skip-gram is a simple neural network with one hidden layer trained to predict the probability of a given word being a context word when given a specific input word. It works as the reverse of CBOW. The Skip-gram model takes the current word and predicts the words before and after it to form its context. Given some corpus, the starting move is to select a target word over a rolling window. The researchers use pairwise combinations of the target word and all other words in the window to have training data. After the training, the model assigns the probability of a word to be a context word for the given target. If we take the corpus “The beetle is in the box,” and we select the target word “beetle” in a rolling window of, say, three words

²⁰ *Ibidem*.

["The," "beetle," "is"], the model will predict the probability of "The" and "is" before and after the target word "beetle."

We can appreciate how context is crucial in such an NLP system. When analysing a corpus of texts, it is essential to consider the context in which the language is used. This includes the collocation of words and the extra-linguistic practices that shape our language. From Frege to Wittgenstein and modern linguistics, it is clear that both linguistic and contextual features are essential in forming the meaning of words in our language. I will dig a little into the notion of context in the next paragraph, but for now, it is essential to highlight the limitations of NLP systems about the context. In the Word2Vec system, every word is assigned a unique vector that codifies all its collocations and thus represents its meaning. Consequently, if two words are such that there is a context in which one of them cannot be substituted with the other, their Word2Vec vectors will be expectedly different. Another limitation concerns cases of synonymy relative to a context. Word2Vec does not operate with the notion of meaning in a particular context. Instead, it identifies the meaning of a word with a list of contexts conceived as collocations of words. An example could be run, taking some statements containing the most polysemous words, such as "run," "go," or "set". The system will struggle to predict the definition of the target word, which could be the same in different contexts and have different meanings that the NLP models cannot capture.

Word2Vec, as a mathematical model for word representation, reflects a Galilean approach to language: it seeks to quantify and map linguistic phenomena using mathematical structures. Galileo's philosophy emphasized that the universe is written in the language of mathematics, and Word2Vec embodies this idea by representing words as vectors in a mathematical space. This method parallels how Galileo used mathematical propositions to describe physical laws, suggesting that language, too, can be understood through a mathematical framework.

However, just as Galileo's mathematical descriptions were limited by the observational tools of his time, Word2Vec's capacity to fully capture meaning is constrained by its reliance on collocations and context within a given corpus. Galileo acknowledged the limitations of his

tools, recognizing that mathematical descriptions are approximations of a more complex reality. Similarly, Word2Vec's vectors are approximations, limited by the data they are trained on, and cannot fully encapsulate the multifaceted nature of language.

4.3. The Vector Symbolic Architecture

The second model to be scrutinized is the VSA, which Lowney and colleagues (2020) used to model the beetle-in-the-box case. VSA stands for Vector Symbolic Architecture, a connectionist model using high-dimensional vectors to encode systematic and compositional information as distributed representations²¹. VSA family of models follows the connectionist framework of Smolensky²², extending it into high-dimensional vector space. Lowney, Levy, Meroney, and Gayler set up a formalism comprising three operations on vectors²³: multiplication, addition, and permutation. According to them, «VSA provides a principled connectionist alternative to classical symbolic systems (predicate calculus, graph theory) for encoding and manipulating various useful structures». They suggest that «The biggest advantage of VSA representations over other connectionist approaches is that a sin-

21 PENTTI KANERVA, *The spatter code for encoding concepts at many levels*, in Maria Marina-ro, Pietro Morasso (eds.), *ICANN'94, Proceedings of the international conference on artificial neural networks*, London, Springer-Verlag, 1994, pp. 226-229; DANIEL RASMUSSEN, CHRIS ELIASMITH, *A Neural Model of Rule Generalization in Inductive Reasoning*, in «Topics in Cognitive Science», 3, 2011, pp. 140-153.

22 PAUL SMOLENSKY, 'Connectionism, constituency and the language of thought', In *Connectionism: Debates on psychological explanation* (Vol. 2), edited by MacDonald, Cynthia, and MacDonald, Graham, 164–198. Oxford: Blackwell, 1995; Paul Smolensky, 'Reply: Constituent structure and explanation in an integrated connectionist/symbolic cognitive architecture', In *Connectionism: Debates on psychological explanation* (Vol. 2), edited by MacDonald, Cynthia, and MacDonald, Graham, 223–90. Oxford: Blackwell, 1995.

23 CHARLES W. LOWNEY II, SIMON D. LEVY, WILLIAM MERONEY, ROSS W. GAYLER, *Connecting Twenty-First Century Connectionism and Wittgenstein*, «Philosophia», 48, 2020, pp. 643-671.

gle association (or set of associations) can be quickly recovered from a set (or larger set) of associations in a time that is independent of the number of associations». In that way, «VSA thus answers the scalability problem raised by classicists about biologically plausible real-time processing»²⁴. They chose this model to capture statements similar to the beetle case in PI. Their choice relies on «VSAs use multidimensional vectors and numerical weights, randomly assigned at the most basic level, in the actual processing of the networks constructed». The flexibility they attribute to the model is also based on the fact, which is the Wittgensteinian tenet against the ostensive relation to private objects, that «There is no one-to-one correspondence to an entity or item for representation. A symbol is represented in signs/vectors distributed across a vector space. Operations with symbols, in turn, use these distributed representations to establish proximity relations that model thought and language use»²⁵. To recognize the meaning of a word as a symbol that does not have an ostensive and one-to-one «correspondence to an entity or item for representation» is specifically to rely on the idea that «for Wittgenstein there is not typically an atomic content or correspondence that one can point to explicate the meaning of a term»²⁶. The meaning of a word, a symbol, is a product of «a complicated network of similarities overlapping and crisscrossing» (PI, §66;)²⁷. Following Goldfarb (1997), Strawson (1954), and Hintikka & Hintikka (1986)²⁸, Lowney and the other researchers agree with the Hintikkas' way of thinking, who believe that «Wittgenstein was not de-

²⁴ Ivi, p. 654.

²⁵ *Ibidem*.

²⁶ *Ibidem*.

²⁷ See also STEPHEN MILLS, *Wittgenstein and Connectionism: A Significant Complementarity?*, cit., p. 139.

²⁸ WARREN GOLDFARB, *Wittgenstein on the Fixity of Meaning*, In *Early analytical philosophy: Frege, Russell, Wittgenstein. Essays in honor of Leonard Linsky*, edited by Tait, William, W., 75-89. Chicago: Open Court, 1997; Peter Frederick Strawson, *Wittgenstein's "Philosophical Investigations"*, *Mind*, 63, 70-99, 1954; Jaakko Hintikka, and Merrill B. Hintikka, *Investigating Wittgenstein*. Cambridge: Basil Blackwell, 1986.

nying the possibility of referring to sensations nor a private language outright»²⁹. They use connectionism to shape a formalism in which Wittgensteinian assumptions about the nature of language are satisfied, namely that the VSA can capture some language features without assuming the connection with objects for meaning. However, the limitation of the beetle case remains fixed if we model it with a neural network model as VSA. Connectionist models cannot explain language and its meanings insofar as Wittgenstein stressed; we cannot give theories of language, only descriptions. Connectionist models, as mind models, can «help guide inquiry into the workings of the phenomena and can dispel some misconceptions, but as close as it may come to analogically portraying some important features, it should not be mistaken for the only or the actual way that language works»³⁰. Perhaps it is better to say that the VSA proposed to model the beetle case does not resolve the beetle puzzle, even if it models the case following the line of the Hintikkas' and Hacker's interpretation, according to which there is no literal claim against the possibility of using the language to talk about private objects, as private sensations. Still, it is possible to talk about these private items using a language made by public meanings construed through interactions in extra-linguistic contexts. These contexts are not yet encoded in systems such as Word2Vec or the Smolensky vectors. With these corrections to Lowney and colleagues' proposal, I agree with their conclusion that «by respecting Wittgenstein's insights and providing a VSA account that displays linguistic compositionality, integrates soft symbols, and develops analogical structures that can be systematic and advance productively, we have shown how twenty-first-century connectionism can address what appeared to be limitations in the functionality of its operation, limitations in learning, and limitations in biological plausibility that might have thwarted connectionism's ability to be a better mind-model for language and cog-

²⁹ CHARLES W. LOWNEY, SIMON D. LEVY, WILLIAM MERONEY, ROSS W. GAYLER, *Connecting Twenty-First Century Connectionism and Wittgenstein*, cit., p. 659.

³⁰ Ivi, p. 668.

nitive science»³¹. In this section, I have presented Word2Vec and the VSA proposed by Lowney and colleagues (2020). The two systems have underlying philosophical assumptions that Wittgenstein developed. Consequently, they show how Wittgenstein's ideas are deeply embedded in the deep-learning NLP models and how his ideas are integral to the breakthrough of AI language models. The following section will explore how the PLA is relevant for the problem of black box in LLMs.

5. The Private Language Argument and Algorithmic Black Boxes

The black box problem in large language models (LLMs) highlights a fundamental challenge in AI and machine learning: the difficulty of understanding how these systems process and generate output from the input data. This issue becomes even more intricate when viewed through the lens of the philosophy of mathematics and language, particularly as explored by Wittgenstein and Galileo. On one hand, for Wittgenstein, the meaning of a term is not derived from an isolated, atomic content or direct correspondence with reality. Instead, meaning emerges from its use within a language game, which is a complex interplay of social interactions, context, and cultural norms. Wittgenstein's private language argument (PLA), exemplified by his "beetle in a box" thought experiment, asserts that private, internal experiences (like the sensation of pain or seeing a beetle) cannot be meaningfully communicated or even understood by others if there is no public criterion for their use. The beetle, locked away in a private box, is inaccessible to others and, by extension, meaningless within a shared, public, language framework. This idea parallels the black box problem in LLMs. Just as the beetle is hidden from view in Wittgenstein's analogy, the internal workings of a neural network – how it processes input data and arrives at its output – are often opaque and inaccessible to human understanding. Even the designers of these models might not fully grasp how specific pre-

³¹ *Ibidem.*

dictions or decisions are made, as Rudin and Radin³² note: the algorithms combine variables in ways that are hidden from view, resulting in an output that is effectively a “black box.” On the other hand, Galileo’s contribution to this discourse lies in his mathematical treatment of the natural world. By abstracting phenomena into mathematical models, Galileo laid the groundwork for modern science’s approach to understanding reality through quantitative analysis. However, while these models can predict and describe natural phenomena with precision, they do not necessarily grasp the underlying fundamental features of the phenomena themselves. Similarly, LLMs can generate human-like text and solve complex problems, but they do so without a human-like understanding of the content they process – much like Galileo’s models, which describe but do not “understand” the world.

The black box problem comes from an overlapping of different issues: the opacity problem, the strangeness problem, the unpredictability problem, and the justification problem³³. The opacity problem is articulated in different issues, including the representation learning of hidden layers. One influential discussion about it is carried out by Bengio *et al.* (2013)³⁴, which describes how DLNNs models must learn to identify and disentangle the underlying explanatory factors hidden in the observed milieu of low-level sensory data. One example of the informative hidden layer representations is, as we have seen, the traditional word vectorization. Contemporary, more complex Transformer techniques, as Tamir and Shech note (2023: 337–38), use deeper pre-training of text embedding methods, which are adapted to embed chunks of text and individ-

32 CYNTHIA RUDIN & JOANNA RADIN, *Why Are We Using Black Box Models in AI When We Don’t Need To? A Lesson From an Explainable AI Competition*, in «Harvard Data Science Review», 1 (2), 2019.

33 BARTOSZ BROŻEK, MICHAŁ FURMAN, MAREK JAKUBIEC, BARTŁOMIEJ KUCHARZYK, *The black box problem revisited. Real and imaginary challenges for automated legal decision making*, in «Artif Intell Law 32», pp. 427–440 (2024), <https://doi.org/10.1007/s10506-023-09356-9>.

34 YOSHUA BENGIO, AARON COURVILLE, AND PASCAL VINCENT, *Representation Learning: A Review and New Perspectives*, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 35, 8 (August 2013), 1798–1828. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2013.50>.

ual terms in the context of surrounding text in which they are written³⁵. As the example of Word2Vec shows, Mikolov *et al.* (2013) use shallow neural networks to map indi«fill in the blank». According to Tamir and Shech (2023: 332), this vectorized word-embedding system is helpful for the original task. Still, the representations elaborated could be reused as pre-trained representations for novel text-based tasks. As we have seen, word embeddings have been used to study and use ostensible semantic relationships, i.e., analogies and synonymy clusters, manifested by the usage patterns for practical tasks and applications. I have then shown before that we must carefully consider the representation of the ostensible semantic relationships, given the limits the system exhibits under the test of the private language argument.

The opacity problem³⁶ in LLMs, as articulated by Bengio *et al.* (2013), involves the challenge of disentangling the hidden layers of neural networks to understand how they represent and manipulate data. This issue is particularly pertinent in advanced models like Transformers, which embed text within vast networks of interconnected representations, making it even harder to trace how specific outputs are generated. In this sense, the internal processes of LLMs are analogous to Wittgenstein's private objects: they are inaccessible and, therefore, difficult to ascribe meaning to.

³⁵ JACOB DEVLIN, MING-WEI CHANG, KENTON LEE, AND KRISTINA TOUTANOVA, *BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding*, in *Proceedings of the Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies (NAACL-HLT)*, Association for Computational Linguistic, 2019, pp. 1-16. ASHISH VASWANI, NOAM SHAZEER, NIKI PARMAR, JAKOB USZKOREIT, LLION JONES, AIDAN N. GOMEZ, ŁUKASZ KAISER, ILLIA POLOSUKHIN, *Attention Is All You Need*, 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Long Beach, CA, USA. pp. 1-15, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>.

³⁶ Interestingly, the creation of black boxes in algorithms is not always accidental but sometimes deliberate, as seen in proprietary systems like those of Google or Netflix. These systems intentionally obscure their processes to protect intellectual property, creating a situation where the “beetle” within the box is not entirely private but is still inaccessible to the user. This controlled opacity introduces another layer of complexity, where the inaccessibility is enforced rather than inherent, drawing a parallel to Wittgenstein's idea of language games being public and yet containing private elements.

Wittgenstein's philosophy suggests that language is inherently a shared, public activity, and any attempt to model private experiences (or private meanings) will inevitably fall short. This perspective aligns with the challenges faced by AI developers in creating systems with contextual intelligence, as noted by Hollister, Gonzalez, and Hollister (2017). To achieve human-like understanding, AI systems must incorporate contextual information, which precedes and shapes language use. However, when dealing with private, internal experiences – as in the case of the beetle or the black box – these systems encounter fundamental limitations.

The problem of PLA cannot be solved, and the limits of the language games are demarcated. According to Rudin and Radin (2019, 2): «In machine learning, these black box models are created directly from data by an algorithm, meaning that humans, even those who design them, cannot understand how variables are being combined to make predictions». Take all the Xs as processes within a black box, which seems to behold to the “privacy” of the machine – we cannot understand what is going on there. The analogy between Wittgenstein's scenarios and the black box property of algorithms does not want to play the role of anthropomorphizing the machines, «it makes no sense to ascribe thought or thoughtlessness, understanding, misunderstanding or failure of understanding to machines»³⁷, but to highlight similar features, similar boundaries in both cases. As Rudin and Radin say, the black box hides the algorithmic processes, so how the variables are combined cannot be understood to make the final prediction. Black boxes limit our ability to understand data processing. The black box contains information we cannot access, as in the beetle case. The VSA proposal we have seen does not overcome this limitation. Lowney, Levy, Meroney, and Gayler (2020) offer indeed an intriguing approach by proposing a method to shadow the meaning of a private object, effectively allowing for multiple interpretations of the “beetle” without a fixed, universal meaning. However, this approach, while innovative, does not fully resolve the Wittgensteinian problem. It acknowledges

37 PETER M. S. HACKER, *Human Nature: The Categorical Framework*, Oxford, Wiley-Blackwell, 2011, p. 34.

that the meaning of a term like “beetle” can vary between individuals, reflecting the private experiences that Wittgenstein argues are incommunicable. Yet, by attempting to model these variations, the approach highlights the limitations of trying to capture the essence of meaning within a computational framework.

The black box problem in LLMs can be seen, in conclusion, as a modern incarnation of the philosophical challenges explored by Wittgenstein and Galileo. Just as Wittgenstein’s PLA highlights the inaccessibility of private experiences within a public language, the black box problem underscores the difficulty of accessing and understanding the internal workings of AI models. Galileo’s approach to mathematical abstraction, while powerful, similarly reflects the limits of understanding that arise when dealing with complex, opaque systems. Together, these philosophical insights provide a framework for grappling with the challenges posed by contemporary AI and its implications for our understanding of language, meaning, and knowledge.

6. Conclusion

The beetle case, as explained by Wittgenstein and Lowney and colleagues (2020), highlights the importance of context in understanding the meaning of words. In the absence of context, words lose their meaning. Context plays a crucial role in explaining the meaning of words. Word2Vec, a sophisticated word embedding system created by humans, cannot capture the nuances of open concepts. The analogy of privacy illustrates the limitations of NLP systems in grasping the meaning of words. Word2Vec and VSA are language games lacking the contextual features inherent in our daily practices and life forms.

As we have seen, deep learning models are artificial intelligence that learns to perform tasks by analysing large amounts of data. These models are often used in natural language processing (NLP) applications. Deep learning models are trained on large datasets of text and code. The model learns to associate patterns in the data with specific outputs. We can perform tasks on new data once a deep learning mod-

el is trained. Indeed, deep learning models have been very successful in many NLP tasks. However, they cannot represent the contextual features of meaning essential for understanding the beetle-in-the-box case. The private language argument does raise important questions about the ability of deep learning models to understand the meaning of words and create private meanings. Overall, the private language argument is a reminder that we need to be careful about making claims about the ability of AI to understand human language. While deep learning models have succeeded in many NLP tasks, they still have limitations.

Wittgenstein's private language argument shows that the meaning of a word is not determined by its private reference to some internal object or state of mind but rather by its use in a particular language game. Deep learning models cannot represent the contextual features of meaning essential for understanding the limitations of the beetle-in-the-box case. Therefore, deep learning models cannot be used to describe the private language argument. They represent the limits of language games and the meaning that can be derived from them.

Riassunto Questo articolo analizza i presupposti filosofici dei sistemi contemporanei di elaborazione del linguaggio naturale e dei large language models (LLMs), concentrandosi sul ruolo della matematica nelle attribuzioni di comprensione alle macchine. Si sostiene che tali attribuzioni presuppongano implicitamente una concezione galileiana della matematica come linguaggio capace di rivelare la struttura oggettiva della realtà. Questa visione viene messa a confronto con la filosofia del secondo Wittgenstein, per il quale matematica e linguaggio sono pratiche umane fondate sull'uso, sul contesto e su criteri pubblici condivisi. L'articolo mostra la rilevanza diretta di questa divergenza per la ricerca sull'intelligenza artificiale. Al centro dell'analisi vi è l'argomento del linguaggio privato (PLA), interpretato come caso limite per la formazione del significato e per la possibilità di modellare computazionalmente la comprensione. Vengono esaminati approcci connessionisti dell'elaborazione del linguaggio naturale (NLP), incluse le tecniche di word embedding e le Vector Symbolic Architectures, come tentativi di codificare il significato in strutture matematiche. Particolare attenzione è dedicata ai modelli che pretendono di simulare fenomeni di linguaggio privato, come il caso del "coleottero nella scatola". Si conclude che tali sistemi, pur performanti, manipolano re-

golarità linguistiche senza catturare le dimensioni normative e contestuali che caratterizzano la comprensione umana nell'IA contemporanea e nello sviluppo dei sistemi intelligenti avanzati.

Abstract This paper examines the philosophical assumptions underlying contemporary natural language processing systems and large language models by focusing on the role of mathematics in claims about machine understanding. It argues that attributions of understanding to LLMs tacitly rely on a Galilean conception of mathematics as a realist language revealing the objective structure of reality. This framework is contrasted with the later Wittgenstein's view of mathematics and language as human practices grounded in use, context, and publicly shared criteria. The paper shows how this divergence is directly relevant to artificial intelligence research. Central to the analysis is Wittgenstein's Private Language Argument, interpreted as a limit case for meaning formation and for the possibility of modeling understanding computationally. Connectionist approaches in natural language processing (NLP), including word embedding techniques and Vector Symbolic Architectures, are examined as attempts to encode meaning through mathematical structures. Particular attention is given to proposals claiming to model private language phenomena, such as the “beetle in the box” scenario. The paper argues that, despite impressive performance, these models manipulate linguistic regularities without capturing the normative and contextual dimensions constitutive of human understanding, highlighting a fundamental gap between AI language systems and human cognition in contemporary machine learning research and AI development.

Galilei's Strategy of Subjectivisation

Mario Schärli

1. The Fundamental Principle of Modern Philosophy

Hume considered a doctrine of Galilean origin the «fundamental principle» of «the *modern philosophy*» (FPMP)¹. The FPMP concerns the status of the proper sensibles of the Aristotelian tradition², which I shall henceforth refer to as *sensible qualities*, and has two components. The first is *irrealist*: sensible qualities are «without any resemblance to the qualities of objects». The second is *subjectivist*: sensible qualities are «nothing but impressions in the mind» that result from an interaction of the sensory apparatus and the material world. The FPMP effectively buries the Aristotelian metaphysics of material objects while handing sensible qualities a lifeline as features of minds.

Before Boyle christened these qualities «secondary»³, Galilei gave the quintessential and first articulation of the FPMP in *Il Saggiatore*. It is commonly assumed – not least by Galilei's chief contemporary crit-

¹ DAVID HUME, *A Treatise of Human Nature. A Critical Edition*, David Fate Norton, Mary J. Norton (eds.), Oxford, Clarendon Press, 2007, 1.4.4.3.

² Colours, sounds, odours, flavours, and various tangible qualities, cf. ARISTOTLE, *De Anima*, Christopher Shields (trans.), Oxford, Oxford University Press, 2016, II.6; ID., *De Generatione et Corruptione*, C.J.F. Williams (trans.), Oxford, Clarendon Press, 2002, II.2, 329b.

³ ROBERT BOYLE, *The Origin of Forms and Qualities According to the Corpuscular Philosophy*, in Michael A. Stewart (ed.), *Selected Philosophical Papers of Robert Boyle*, Indianapolis, Hackett, 1991, pp. 1-96.

ic, Philipp Goff⁴ – that Galilei's irrealist metaphysics is the basis for his subjectivist conclusion. In other words, the irrealist component is more fundamental and grounds the transition to the subjectivist component. The aim of this paper is to explicate and critically examine this transition, which I call the *Strategy of Subjectivisation* (SoS), based on Galilei's views.

To get the SoS clearer into view, I will clarify Galilei's irrealism and subjectivism. (2.-4.) Assuming the correctness of Galilei's irrealist metaphysics, I will argue that two additional assumptions are needed for the SoS to work. (5.1.) First, that sensory qualities are properties of something rather than nothing. Second, that sensory states represent properties of objects by being like them. While the former can be supported by phenomenological considerations (5.2), the latter represents a blind spot in Galilei's thought – ironically Aristotelian in origin – that prevented him from revolutionising the nature of mental representation along with our conception of the natural world (5.3-7.).

2. A Subjectivist Manifesto

Galilei's «scientific manifesto»⁵ *Il Saggiatore* is the modern origin of the FPMP⁶. Surely, there are precedents of the view in ancient atomism, most clearly in Democritus⁷, and the rediscovery of Lucretius *De rerum natura* cannot be underestimated as an influence on Galilei's thought on these matters either⁸. But the articulation of the FPMP as part of

⁴ PHILIP GOFF, *Galileo's Error. Foundations for a New Science of Consciousness*, New York, Pantheon Books, 2019.

⁵ STILLMAN DRAKE, *Galileo at Work. His Scientific Biography*, Chicago and London, University of Chicago Press, 1978, p. 266.

⁶ EDWARD ARTHUR BURTT, *The metaphysical foundations of modern physical science*, London, Kegan Paul, Trench, Trubner & co., 1925, pp. 74-76.

⁷ LEUCIPPUS, AND DEMOCRITUS, *The Atomists: Leucippus and Democritus*, C. C. W. Taylor (trans.), Toronto, Buffalo, University of Toronto Press, 1999, D16.

⁸ LUCRETIVS, *On the Nature of Things*, Martin Ferguson Smith (trans.), Indianapolis, Hackett, 2001, pp. 730 sqq. For story of its rediscovery, see STEPHEN GREENBLATT, *The Swerve. How the World Became Modern*, New York, London, Norton & Co., 2012.

the purely quantitative description of the material world that came to dominate modernity is genuinely Galilei's.

To underscore the Florentine's inventiveness, consider that Kepler did not formulate the FPMP. Kepler, visionary in his mathematical description of planetary motions and presumably never swayed by a view for its outlandishness, took a sustained interest in optics, too. Although he radically altered our understanding of human vision by discovering that the retinal image is inverted, he still held that sensory qualities are properties *outside the subject*⁹. Galilei's invention and legacy thus consist in adding what is distinctive of the FPMP, i.e., a *link* between the quantitative description of reality and the subjectivity of sensory qualities. Galilei's scientific manifesto is at the same time a subjectivist manifesto, immortalised in the following passage from *Il Saggiatore*:

[4] Indeed, without the senses to guide us, reason or imagination alone would perhaps never arrive at such qualities. For that reason I think that tastes, odors, colors, and so forth [1] are no more than mere names so far as pertains to [2] the subject wherein they [appear to us to] reside, and [3] that they have their habitation only in the sensorium [*corpo sensitivo*]. Thus, if the living creature were removed, all these qualities would be removed and annihilated. [4] Yet since we have imposed upon them particular names which differ from the names of those other previous real attributes, we wish to believe that they should also be truly and really different from the latter¹⁰.

Let us begin with an overview of Galilei's claims.

[1]: *Irrealism* articulates the metaphysical basis of Galilei's view in semantic terms. As I will show, the thesis that predicates for sensory qualities, for short: sensory concepts, are «mere names» is to be read

⁹ JOHANNES KEPLER, *Optics. Paralipomena to Witelo & Optical Part of Astronomy*, William H. Donahue (trans.), Santa Fe, Green Lion, 2000. See GEORGE PAVLIDIS, *A Brief History of Colour Theory. Foundations of Colour Science*, Cham, Springer International Publishing, 2021, ch. 4.2.

¹⁰ GALILEO GALILEI, *The Assayer*, in *The Controversy on the Comets of 1618*, Stillman Drake (trans.), Philadelphia, University of Pennsylvania Press, 1960, p. 309.

as their failure to pick out a property of material objects because they do not have sensory qualities.

[2]: *Phenomenology* contrasts the fact that objects do not have sensory qualities with how they present themselves to us, namely as properties of the external objects we experience.

[3]: *Subjectivism* offers an alternative account of what sensory qualities are, namely properties of the experiencing subject. Importantly, this excludes the view that sensory qualities are *nothing*: they are *something*, but just not what they, naïvely, seem to be.

[4]: *Projectivism* explains why we *believe* that sensory qualities are properties of things. Our experience of sensory qualities leads us to introduce corresponding predicates. Availing ourselves of these conceptual resources, we go on to map differences in our experience of an object onto the object experienced. Evidently, this mechanism yields erroneous beliefs if no difference in the properties of the object corresponds to differences in how it appears. Because of *Irrealism*, this is the case for sensory qualities. We thus end up *projecting* appearance into reality¹¹.

How does the SoS relate to these theses? The SoS concerns the transition from a metaphysical thesis that things *have* no sensory qualities to the thesis that sensory qualities are located *in the experiencing subject*¹². *Projectivism* is irrelevant to this transition. What sensory qualities are, not what we believe them to be, is at stake. Our investigation must centre on the relation between *Irrealism* and *Subjectivism*, which I will clarify in what follows to then to then consider whether *Phenomenology* can serve as a bridge between the two.

¹¹ Projectivism is often traced back to HUME, *A Treatise of Human Nature. A Critical Edition*, cit. For a contemporary advocate, see SIMON BLACKBURN, *Spreading the Word. Groundings in the Philosophy of Language*, Oxford, Oxford University Press, 1984; ID., *Essays in Quasi-Realism*, New York, Oxford, Oxford University Press, 1993.

¹² The passage above clearly counts against Husserl's analysis, according to which the methodological decision to mathematically describe reality is responsible for the elimination of sensory qualities, see EDMUND HUSSERL, *Die Krisis der europäischen Wissenschaften und die transzendente Phänomenologie. Eine Einleitung in die phänomenologische Methode*, Husserliana, vol. VI, Walter Biemel (ed.), den Haag, Martinus Nijhoff, 1976.

3. Galilean Subjectivism

Subjectivism is the view that sensory qualities «have their habitation only in the sensorium [*corpo sensitivo*]». Sensory qualities are a property, an accident, of the sensory apparatus. This is a thesis about what sensory qualities *are*, not about what concepts designate, or experiences represent. For sensory qualities to be is for them to inhere in the sensory apparatus of a living being. That distinguishes them from the «real accidents» of objects, namely «shape, number, motion, penetration, and touch»¹³, which I shall call *physical properties*.

Galilei carefully qualifies his thesis by saying that sensory qualities «have their habitation *only* in the sensorium»¹⁴. The *only* does important work here. Otherwise, Subjectivism would be indistinguishable from the trivial thesis that all sensory states are *ipso facto* states of a subject's sensory apparatus. One may assume that sensory experiences involve a *change* in the subject, as they are temporally finite. The natural way to articulate this view is to hold that the subject acquires and then loses a property¹⁵. In this sense, *every* sensory state is a property of the sensory apparatus of a subject, even if it directly presents the world as it is.

Subjectivism differs from this trivial view in claiming that sensory qualities are *nothing but* states of the sensory body, as Galilei's counterfactual conditional confirms: «Thus, if the living creature were removed, all these qualities would be removed and annihilated». Drastically put, sensory qualities would not survive the extinction of life on earth because sensory qualities are *nothing beyond* the living creatures whose sensory apparatuses they inhere in. By contrast, shapes are not only present in the sensory experience of living beings, but also properties of the material objects they perceive. That is why physical properties would sur-

¹³ GALILEI, *The Assayer*, cit., p. 311.

¹⁴ Emphasis mine.

¹⁵ GALEN STRAWSON, *Real Direct Realism*, in Paul Coates, Sam Coleman (eds.), *Phenomenal Qualities. Sense, Perception, and Consciousness*, Oxford, Oxford University Press, 2015, pp. 223-225.

vive the extinction of living beings. Sensory qualities enter and leave the stage together with subjects because they are nothing but experiences.

In sum, Subjectivism is the view that sensory qualities are nothing beyond properties of sensory apparatuses. Sensory qualities are *mere* experiences while physical properties may *also* be experienced. Importantly, Galilei's view neither entails a wholesale elimination of sensory qualities, nor relegates them to a lower ontological rank¹⁶.

We now turn to our investigation of the SoS by clarifying Galilei's Irrealism to then investigate whether Subjectivism is a consequence of it.

4. Galilean Irrealism

Galilei articulates Irrealism in semantic terms, stating that sensory qualities are «no more than mere names» relative to the object they apparently belong to. The following passage clarifies Galilei's usage of the expression «mere name»:

I do not believe that for exciting in us tastes, odors, and sounds there are required in external bodies anything but sizes, shapes, numbers, and slow or fast movements; and I think that if ears, tongues, and noses were taken away, shapes and numbers and motions would remain but not odors or tastes or sounds. These, I believe, are nothing but names, apart from the living animal – just as tickling and titillation are nothing but names when armpits and the skin around the nose are absent¹⁷.

The locution «mere name» is used with the contextual restrictors «apart from the living animal» and «when armpits and the skin around the nose are absent». What role do they play? Consider the first occurrence, which relies on the contrast of *physical properties* and *sensory*

¹⁶ Parallel points are made by ROBERT E. BUTTS, *Some Tactics in Galileo's Propaganda for the Mathematization of Scientific Experience*, in Robert E. Butts, Joseph C. Pitt (eds.), *New Perspectives on Galileo*, Dordrecht, Springer Netherlands, 1978, pp. 66–69.

¹⁷ GALILEI, *The Assayer*, cit., p. 311.

qualities. Physical properties are causally sufficient for, but independent of, the instantiation of sensory qualities in a living body. Sensory qualities, on the other hand, depend on living bodies. Metaphysically speaking, it is constitutive of sensory qualities to belong to living beings. It follows that the extension of sensory concepts would be empty in a context devoid of living animals – which is just what Galilei calls being a «mere name». Hence, «mere name» designates that the extension of a concept is empty *relative to a context*.

This helps clarify Galilei's statement of the FPMP, which reads: «tastes, odors, colors, and so forth are no more than mere names *so far as pertains to the subject wherein they [appear to us to] reside*»¹⁸. The italicised phrase is the contextual restrictor in this case. As we know from *Phenomenology*, sensory qualities «appear to reside» in the material objects we experience. So, sensory concepts are mere names relative to material objects: they do not designate a property of them. In contrast, physical concepts designate «real accidents» in the same context. And the reason for this difference is clear: material objects have *only* physical, and *no sensory*, properties. It emerges that Irrealism is a metaphysical claim in semantic clothing.

Metaphysically speaking, it is noticeable that Galilei calls physical properties *accidents* of material objects. That usage is deliberate. While Galilei holds that the world is to be entirely described in terms of physical properties, he does not take himself to thereby articulate their essences. The metaphysical claims of Galilean science are more limited:

Similarly, I do not understand the true essence of earth or fire any more than that of the moon or the sun; this knowledge is reserved for our understanding when we reach the state of blessedness, not before¹⁹.

¹⁸ Emphasis mine.

¹⁹ Id., *Opere. Edizione Nazionale*, vol. v, Firenze, Tipografia di G. Barbèra, 1895, pp. 187-188. Translated in Id., *The Essential Galileo*, Maurice A. Finocchiaro (ed., trans.), Indianapolis, Cambridge, Hackett, 2008, p. 101.

Galilei expresses considerable humility as to the metaphysical status of his experimentally backed description of reality. Galilean science is not an account of what reality, ultimately, is. It describes the accidents of the objects that populate the universe, not their innermost nature²⁰.

Note also that Galilei's view, thus far, is consistent with *but does not imply that* sensory concepts refer to states of the sensory apparatus, contrary to what two recent commentators hold²¹. Surely, Galilei holds that sensory qualities *are* states of the sensory apparatus. But that view does neither imply nor require our concepts of sensory qualities to *designate* these states, too. For instance, Galilei may hold that sensory qualities are states of the sensory apparatus of a living being while assuming that colour concepts designate "Aristotelian colours," colours as they would be if the world were as it appears²². In fact, there are reasons that count in favour of this view. First, Galilei's account of how we form sensory concepts – based on how sensory properties appear to us – renders it *prima facie* plausible to think that they designate properties of objects. Barring an externalist construal according to which our sensory concepts would, behind our backs, come to designate states of our bodies, that view seems even inevitable²³. As such forms of externalism were not current in Galilei's day, that cannot have been his default position. And there is, as far as I can see, no textual evidence to the contrary. For these reasons, it is implausible to attribute the view that sensory concepts designate bodily states to Galilei.

²⁰ That Galilei takes mathematical properties to be essential to material objects has recently been articulated, but not textually justified, in ID., *Il Saggiatore. Edizione Commentata*, Michele Camerota, Franco Guidice (eds.), Milano, Ulrico Hoepli, 2023, p. XXXIX.

²¹ Ibid., p. XL.

²² For the description of such a scenario, see DAVID J. CHALMERS, *Perception and the Fall from Eden*, in Tamar Szabo Gendler, John Hawthorne (eds.), *Perceptual Experience*, Oxford-New York, Clarendon Press, 2006, pp. 49-125.

²³ For such a construal, see J.J.C. SMART, *Sensations and Brain Processes*, in «The Philosophical Review», 68, 2, pp. 141-156.

In this section, I have shown that Galilei's Irrealism semantically articulates the metaphysical view that no property of material objects corresponds to what we experience as their sensory qualities. Based on this metaphysical view, Galilei concludes that our concepts of sensory qualities are «mere names», which is to say: they fail to designate a property of objects in the actual world because these objects do not satisfy the content in question.

5. Phenomenology as a Bridge to Subjectivism?

5.1. Two Gaps

With *Irrealism* and *Subjectivism* clarified, we know where to start out from and where to go. We can now embark on our search for the SoS that explains the transition from the former to the latter.

Galilei requires an SoS because Subjectivism is not a consequence of Irrealism, or at least not straightforwardly so. Irrealism does little to indicate what sensory qualities are because it merely rules out that they are properties of the material objects we experience. Moreover, Subjectivism is not the only alternative to Irrealism. For one, it does not follow from Irrealism that sensory qualities are *anything at all*, a thesis entailed by Subjectivism. For another, Irrealism does nothing to rule out other accounts of *what* sensory qualities are, if they are something. The SoS must bridge these two gaps. Before I will set about asking which Galilean views could serve to bridge them, I will characterise them more precisely.

That sensory qualities must be properties of *anything* is far from obvious. An alternative view, held by Keith Frankish, casts our experience of sensory qualities as illusory, plain and simple²⁴. Like rainbows are no objects, sensory qualities are no properties. The merits of Frankish's

²⁴ KEITH FRANKISH, *Galileo's Real Error*, in «Journal of Consciousness Studies», 28, 9-10, 2021, pp. 141-146. This view goes back to Dan Dennett, *Consciousness Explained*, Boston, Little, Brown and Co., 1991.

view are of no concern for present purposes. What his view, henceforth: *Illusionism*, shows is important, though: that sensory qualities must be properties *at all* does not go without saying.

Let us bracket Illusionism to focus on the second gap. Does it follow from Irrealism, under the assumption that sensory qualities are properties of something, that they are mere properties of the subject's sensory apparatus? It does not. Even if material objects do not have sensory qualities in any literal sense of the term, they could still be analysed as properties of material objects, e.g., in the Lockean way as the «power to produce various sensations in us by their primary qualities»²⁵. On Locke's account, causal powers of material objects *as well as* the response of experiencing subjects to the exercise of these powers enter the constitution of sensory qualities. Consequently, they are exclusively properties of the object nor the experiencing subject²⁶. This view, call it *Dispositionalism*, shows that, even if sensory qualities are properties of something, and even if they are not categorical properties of objects *qua* Irrealism, it does not follow that they are mere properties of the experiencing subject²⁷.

What Galilean resources are available to bridge these gaps? The natural place to look is a thesis we have so far largely ignored: *Phenomenol-*

²⁵ JOHN LOCKE, *An Essay Concerning Human Understanding*, Pauline Phemister (ed.), Oxford, Oxford University Press, 2008, 2.8.10; MICHAEL AYERS, *Primary and Secondary Qualities in Locke's Essay*, in *Primary and Secondary Qualities*, Lawrence Nolan (ed.), Oxford, Oxford University Press, 2011, p. 137. A concise profile of the competing Galilean and Lockean accounts of sensory qualities is to be found in ANTONIA LOLORDO, *Gassendi and the Seventeenth-Century Atomists on Primary and Secondary Qualities*, in Lawrence Nolan (ed.), *Primary and Secondary Qualities*, Oxford, Oxford University Press, 2011, pp. 62–80.

²⁶ JOHN McDOWELL, *Values and Secondary Qualities*, in *Mind, Value, and Reality*, Cambridge (Mass.), London, Harvard University Press, 2002, p. 133. For a contemporary articulation for the case of colours, see PAUL A. BOGHOSSIAN, J. DAVID VELLEMAN, *Colour as a Secondary Quality*, in «Mind», 98, 389, 1989, pp. 81–103.

²⁷ Dispositionalism also shows that subjectivism is not a consequence of atomism or materialism, especially on Galilei's conception of atoms, which are not featureless. On Galilei's atomism, see FRED ABLONDI, *Reading Nature's Book. Galileo and the Birth of Modern Philosophy*, New York, Peter Lang, 2016, pp. 59–60.

ogy. I will first investigate whether it can serve to exclude Illusionism, to then ask whether it offers reasons against Dispositionalism.

5.2. Phenomenology *contra* Illusionism

To offer reasons against Illusionism, Phenomenology must support the view that sensory qualities are properties of something. How could it do so? As it is coherent to suppose that sensory qualities are not properties of anything, we should not expect Phenomenology to show that Illusionism is false. What we can expect, though, is a reason that renders Subjectivism more plausible than Illusionism. To see how Phenomenology can support a case against Illusionism, let us clarify Galilei's theses about our experience of sensory qualities.

Two points are salient in Galilei's discussion of how sensory qualities appear. First, Galilei presupposes that there are differences among sensory qualities, both on the level of types (colours and odours, say) and tokens (red and blue, say). Galilei further supposes that we would «never arrive at such qualities» if we did not have «the senses to guide us». This view requires that the difference between sensory qualities is drawn exclusively based on experience, which entails that it must be *present* in experience. Thus, we must assume that each sensory quality has a *distinctive experiential profile*. Second, Galilei's holds that sensory qualities «are no more than mere names so far as pertains to the subject wherein they [appear to us to] reside». As these «subjects» are the material objects our experience is about, Galilei must hold that we experience sensory qualities as parts of, as belonging to, material objects. Taken together, Galilei holds that sensible qualities are phenomenally distinct features that we experience as belonging to the denizens of the external world.

Phenomenology gets us closer to Subjectivism once we realise that Galilei holds (as part of Projectivism) that the experiential profile of sensory qualities is indispensable for our understanding and conceptualisation of them. As he puts it, reason and imagination would not be able

to grasp or form sensory concepts if we had no experience of them²⁸. But if we are dependent upon experience to have even the slightest inkling of a sensory quality, we are by the same token bound to conceptualise them *according to* experience. It follows that we form sensory concepts whose proper designation is a property, or accident, as opposed to a substance, say. So interpreted, *Phenomenology* lends plausibility to accounts of sensory qualities as properties of material objects.

Based on this reasoning, a case against Illusionism can be mounted. For an item whose understanding and conceptualisation constitutively depends on experience, experience also fixes the *kind* of item it is. That is because we have no other way of accessing what items of this kind could be. Correspondingly, concepts which we introduce to designate that item are also dependent on experience. So, they cannot but designate an item of the kind experienced. Now, sensory qualities do so depend on experience. And they are experienced not as substances, but as properties, or accidents, of material objects. So, candidate referents of concepts of sensory qualities must be properties of material objects, too. And for this reason, an account of sensory qualities that accounts for them as an instance of the same metaphysical category as they appear to belong to, is, other things equal, to be preferred. That is because an account that construes sensory qualities as items of a radically different sort than we experience them cannot account for the fact that we are dependent on experience to understand what this account is even about. Subjectivism has this advantage over Illusionism.

This train of thought lends plausibility to Galilei's disregard for Illusionism, the option that sensory qualities might not be properties of anything. The sketch of an argument I gave relies on Galilean theses, but is not formulated by him in this way. I do, of course, not want to suggest he had anything like this in mind. My goal is to indicate how one could rationally motivate Subjectivism. That is, it serves the purpose of understanding his view as rational based on theses he accepts.

²⁸ A thought reminiscent of the so-called «knowledge argument», see FRANK JACKSON, *Epiphenomenal Qualia*, in «The Philosophical Quarterly», 32, 127, 1982, pp. 127-136.

Let us grant that the case against Illusionism based on Phenomenology is successful. With that, we are at best half-way on the path to Subjectivism. We also need to rule out more complex analyses, such as *Dispositionalism*, which do respect the constraint that colours must be cast as properties.

5.3. Limits of Phenomenological Arguments in Metaphysics

Our phenomenological argument leaves room for all accounts that construe sensory qualities as properties of some sort, even if they do not agree with Subjectivism that they are properties of the experiencing subject. Consider Dispositionalism, which construes sensory qualities as an amalgam of the propensity of material objects to affect our sense organs and our response to such events. The Dispositionalist can well accept that material objects do so only by virtue of their physical qualities, while not endorsing full-blown Subjectivism. Clearly, more resources are needed for the SoS to succeed.

What are the prospects of pushing the argument based on Phenomenology further? Can we not argue, by the same token, that what appears to us when we experience, say, a red tomato, is certainly anything but a disposition? And does that not rule out an account of colours in terms of dispositions?

Matters are not as simple as that. Two points must be distinguished. First, it is one thing to argue that sensory qualities must be properties. It is another thing to hold that sensory qualities must a *specific kind* of property. Second, it is also not evident that for sensory qualities to be properties *at all*, these properties must be exactly as they appear.

Regarding the first point, we must ask whether Phenomenology rules out that what appears can be cast as a relational or dispositional property, say. This line of reasoning is not promising, however. On the contrary, we often experience that an object's intrinsic properties remain the same while its sensory qualities change: changing lighting conditions influence what colour we experience an object as having, wind-conditions influence whether we smell an odour at all, and the

direction of travel and speed of a source of sound relative to an observer (think of an ambulance driving past) influences the pitch experienced by that person. Hence, our experience of sensory qualities does not rule out that sensory qualities are relational, dispositional, or some other complex sort of property.

The second point requires addressing the role of Phenomenology in our metaphysical account of sensory qualities more broadly. To do so, let us distinguish between *reliable* and *faithful* representations, following Robert Pasnau²⁹:

Reliability: A perceptual experience is *reliable* if it presents *differences in the properties of the things on which it depends*.

Faithfulness: A perceptual experience is *faithful* if it is, one, reliable and, two, *presents a property of the object as it is*.

Reliability and faithfulness concern the relation between the *qualitative character* of an experience and its *content*. To experience a property faithfully is to have direct access to the property itself. E.g., the perception of shapes presents, perspectival distortions aside, the property itself³⁰. Therefore, a faithful experience of a property licenses the judgment that the world is as it appears.

Reliability, on the other hand, does not afford such direct access to properties³¹. E.g., Locke's account of sensory qualities is naturally construed in terms of reliable, but not faithful representation: sensory qualities represent differences in the powers of things by virtue

²⁹ ROBERT PASNAU, *After Certainty. A History of Our Epistemic Ideals and Illusions*, Oxford, Oxford University Press, 2017, p. 66.

³⁰ E.g., CHRISTOPHER PEACOCKE, *Truly Understood*, Oxford, Oxford University Press, 2008, pp. 29-35.

³¹ Reliability in this sense is not necessarily equivalent with the statistical phenomenon commonly so-called in contemporary epistemology, although it might be an admissible way of cashing the relevant notion out. For such an account of reliability, see ALVIN I. GOLDMAN, *What is Justified Belief?*, in George S. Pappas (ed.), *Justification and Knowledge. New Studies in Epistemology*, Dordrecht, Boston, Reidel, 1979, pp. 1-24. Thanks to Vincenzo Fano for pushing me to clarify this point.

of causing different experiences in us, but the powers they represent are nothing like the phenomenal character of a sensory quality. Consequently, merely reliable experiences do not come with an epistemic licence to judge that the world is as it appears.

The notion of a reliable experience helps us to spell out the consequences of *Irrealism* and *Phenomenology* more precisely. It shows that it may be perfectly legitimate to introduce concepts for properties of objects based on experiential differences even though their appearance does not present the *properties* we are confronted with. If differences in the world match differences in experience, we are still presented with properties of objects. It is just that experience itself puts us in no position to spell out *what in the world it latches onto*³².

Once the possibility of merely reliable experiences is granted, it is easily appreciated that Galilei can at best exclude, based on *Irrealism*, that sensory qualities are *faithful*. If objects do not have sensory qualities, objects cannot be as they appear in that respect. That part of his train of thought is sound. Yet, the conception of a reliable experience shows that sensory qualities could represent a property of the object without appearing as it is.

Where does that leave us with respect to the SoS? *Phenomenology* may be used to determine that sensory qualities should be construed as properties. That, in turn, may be used to rule out *Illusionism* as a plausible view. But *Irrealism* and *Phenomenology* alone are insufficient to underwrite the SoS for two reasons. First, phenomenological considerations are insufficient to rule out an account of sensory qualities in non-subjectivist terms, e.g., as dispositional or relational properties. Second, and more generally, the possibility that a property of an object may be given to us in experience without presenting itself

³² These considerations do not prevent us from respecting the phenomenological constraints we established in our discussion of *Illusionism*. It is consistent with an experience's mere reliability that any plausible account of sensory qualities must be in terms of properties because the specific changes we experience require such a construal.

considerably limits the weight of phenomenological considerations in a metaphysics of sensory qualities.

Phenomenology, therefore, is insufficient to close the second gap in Galilei's argument. He has to move from the *non-faithful* presentation of things in colour perception to the conclusion that colour perception does *in no way* present us with a property of material objects. Moreover, Galilei provides us with the ingredients we would need to construe sensory experiences as merely reliable, as he argues that physical properties are sufficient to «excite» sensory qualities in experiencing subjects³³. It remains to be explained what prevents Galilei from doing so.

6. Galilei's Blind Spot

Alas, our search for an explanation hits a blind spot in Galilei's thought. No set of theses explicitly endorsed in *Il Saggiatore* allows for a complete SoS. However, our considerations regarding faithfulness point to one way of bridging the remaining gap. If reliable, but not faithful experiences were ruled out in principle, Subjectivism would follow from Irrealism and Phenomenology. In this case, sensory experiences could only present properties of objects as they are. As Irrealism rules out that sensory qualities are faithful, Subjectivism appears to be the last resort. Do we find resources in Galilei to rule out reliable, but not faithful experiences?

I will put forward a conjecture that closes the remaining gap and completes the SoS: Galilei thought of representation in terms of likeness because he was influenced by the species view of perception. I am speaking of a «conjecture» because we have no definite proof that Galilei endorsed it when composing *Il Saggiatore*. If I am right, this view was an unquestioned background assumption of his, rather than a considered view. Still, I will do my best to render the conjecture plausible. But first, some detail about the conjecture.

³³ GALILEO GALILEI, *The Assayer*, cit., p. 311.

The species theory is a descendant of the Aristotelian account of perception as laid out in *de Anima*. One pivotal idea of this account matters for present purposes: that sensory experiences represent qualities of objects by means by being “like” them³⁴. This view does not leave room for a reliable, but not faithful presentation of a sensory quality³⁵. Paired with *Irrealism*, it severs our sensory qualities from the objects experienced. For if there are no sensory qualities in the objects we experience, our experience of sensory qualities is not “like” these objects in any reasonable sense and thus does not present features of them at all.

But what speaks in favour of attributing this sort of view to Galilei? In his day, standard accounts of perception were based on the *species theory*³⁶. Such accounts presuppose that sensory qualities are properties of material objects and explain their perceptual experience as follows:

First, the object sends its form through the medium to the perceiver – a form that would come to be known in the Latin tradition as a «species». Each sense organ is, in turn, affected by that species according to a particular intentional aspect, such as color, texture, or taste. The ensuing sense impressions are conveyed from each organ through the nerves to the *sensus communis* at the forefront of the brain, where they are combined into a composite intentional representation of the object. This representation comprises all of that object's perceptible attributes, including not only the proper sensibles (color, taste, feel, odor, and sound) but also the common sensibles (such as size, shape, and motion). Remanded to the imagination for short-term memory, this compos-

³⁴ ARISTOTLE, *De Anima*, cit., II, 5, 418a 5 sqq.

³⁵ This is independent of how likeness is cashed out. For a literal reading, see RICHARD SORABJI, *Body and Soul in Aristotle*, in «Philosophy», 49, 187, 1974, pp. 63-89. For a non-literal reading, see MYLES BURNYEAT, *De anima II 5*, in «Phronesis», 47, 1, 2002, pp. 28-90.

³⁶ I cannot cover the diverse elaborations of the species theory. For surveys, see DOMINIK PERLER, *Theorien der Intentionalität im Mittelalter*, Philosophische Abhandlungen, Frankfurt am Main, Klostermann, «Philosophische Abhandlungen» vol. 82, 2002; ROBERT PASNAU, *Theories of Cognition in the later Middle Ages*, Cambridge, Cambridge University Press, 1997.

ite form – which later comes to be known as the «sensible species» – constitutes an intentional representation of the object in all its physical and spatial particularity. As such, it stands proxy for the object itself and, bearing a host of ulterior intentions at the intelligible level, provides the wherewithal for a cognitive evaluation of what kind of object it is³⁷.

Two elements are worth highlighting in relation to Galilei's view. First, the species theory casts the experience of sensory qualities as involving a change in the experiencing subject that originates in the external object experienced. Galilei agrees with this part of the Aristotelian account, as he takes sensory qualities to be properties of the sensory apparatus caused by the object experienced.

Secondly, Galilei, qua Irrealism, does not share the view that the object has proper as well as common sensibles. Rather, he holds that objects possess only the latter. But the species theory requires that the form of the experienced object makes a second appearance in the soul of the experiencing subject, as it were. Galilei's Irrealism therefore prevents him from assuming that the causal process leading up to a subject's experience of a proper sensible is at the same time the transfer of a part of the object – its form – to the subject. Now, Galilei could accept that there is a sensible form of the object, but if he did, he would have to argue that it consists only of common sensibles. Thus, it is the transferral of the form of the object via species that bars the contents of sensory experience from being reliable.

But do we have reason to hold that Galilei thought of sensory experience in terms of a transferral of species? It is safe to assume that Galilei was familiar with Aristotelian accounts of perception as they were the standard of his day. Knowing about them was virtually unavoidable³⁸. Moreover, Galilei professes to have studied Aristotle care-

³⁷ A. MARK SMITH, *Perception*, in *The Cambridge History of Medieval Philosophy*, Robert Pasnau, Christina van Dyke (eds.), Cambridge, New York, Cambridge University Press, 2010, p. 337.

³⁸ DRAKE, *Galileo at Work. His Scientific Biography*, cit., p. XIX.

fully³⁹ and his logical treatises show close familiarity with contemporary commentaries of Aristotle's logical corpus⁴⁰. This is significant because sixteenth- and seventeenth-century commentaries drew close connections between logic and Aristotle's psychology in *De Anima*⁴¹. In particular, Galilei explicitly refers to *de Anima* II.6 in his manuscript *On Foreknowledge* – fittingly, the place where Aristotle puts forward his views on colour perception⁴². What is more, Galilei copies extensively from a treatise by Carbone, which outlines a variant of the species theory of cognition⁴³.

But not only is Galilei familiar with the Aristotelian account; he also *conceptualises* perception in terms of the Aristotelian idea of a transferal of species around 1610:

Exhibit A: When discussing the illusion of a straight stick appearing bent when half immersed in water, Galilei argues that the senses do not err. Rather, the error lies in our judgment because we do not know that «the *visible species* are refracted in different media»⁴⁴. This account crucially relies on the idea that something passes through a medium

³⁹ E.g., GALILEO GALILEI, *Opere. Edizione Nazionale*, vol. IV, Firenze, Tipografia di G. Barbèra, 1894, pp. 32–33.

⁴⁰ ID., *Galileo's Logical Treatises: A Translation, With Notes and Commentary, of His Appropriated Latin Questions on Aristotle's Posterior Analytics*, William A. Wallace (trans.), Dordrecht, Springer, 1992, pp. 6–7. For discussion, see ROBERT M. WALLACE, *The Dating and Significance of Galileo's Pisan Manuscripts*, in Trevor H. Levere, William R. Shea (eds.), *Nature, Experiment, and the Sciences*, Dordrecht, Springer Netherlands, 1990, pp. 3–50.

⁴¹ WILLIAM A. WALLACE, *Galileo's Logic of Discovery and Proof: The Background, Content, and Use of His Appropriated Treatises on Aristotle's Posterior Analytics Book I*, Dordrecht, Springer, 2011, p. 35.

⁴² GALILEI, *Galileo's Logical Treatises: A Translation, With Notes and Commentary, of His Appropriated Latin Questions on Aristotle's Posterior Analytics*, cit., p. 100.

⁴³ Ibid., p. 7; WILLIAM A. WALLACE, *Galileo's Logic of Discovery and Proof: The Background, Content, and Use of His Appropriated Treatises on Aristotle's Posterior Analytics Book I*, cit., ch. 2.

⁴⁴ GALILEO GALILEI, *Opere. Edizione Nazionale*, vol. III/1, Firenze, Tipografia di G. Barbèra, 1892, p. 398. Emphasis and translation mine.

(or prism) – the visible species, or the form of the object insofar as it is perceptible – and is refracted in the process.

Exhibit B: In a letter to Dini, Galilei sought to defend his sightings of Jupiter's satellites against the criticism that, even if they existed, their light could not arrive at the earth. This opens the possibility that Galilei's observations were mere optical illusions. Galilei uses the idea of a transferral of visible species to explain how a telescope functions and rule the possibility of an illusion out. He argues that the «visible species [...] do not spread without light, and where these species arrive, light does arrive». So, whatever quality of the visible the telescope augments «presupposes the existence» of that quality, concluding that it is indeed the «species of the four Medicean Planets» which are observed in through the telescope⁴⁵.

Exhibit C: In a letter to Grienberger, Galilei uses the species theory to confront the argument that the naked eye is the absolute and last measure of illuminated objects in their «true shape». He argues that «the telescope has no other effect but to bring the species of the visible objects closer»⁴⁶. Similar to Exhibit A, Galilei uses the species as a kind of substratum that serves to explain an optical effect.

Unquestionably, the species theory influenced Galilei's thought. However, I am not aware of conclusive textual evidence that points towards Galilei's adoption of a species-like theory around the time he composed *Il Saggiatore*, or later on. For instance, the discussion of the perception of sound in the *Discorsi* is vaguely reminiscent of a species-model but does not mention species at all⁴⁷. Moreover, this lack of references to species is not explained by a lack of discussion of perceptual phenomena in Galilei's writings. Galilei stresses the importance of empirical confirmation and often explains how observa-

⁴⁵ To Dini, 21 May 1611: ID., *Opere. Edizione Nazionale*, vol. XI, Firenze, Tipografia di G. Barbèra, 1901, p. 115. Translation mine.

⁴⁶ To Grienberger, 1 September 1611: *ibid.*, p. 195. Translation mine.

⁴⁷ GALILEO GALILEI, *Opere. Edizione Nazionale*, vol. VIII, Firenze, Tipografia di G. Barbèra, 1898, p. 144.

tions are to be properly interpreted⁴⁸. It is therefore not implausible that Galilei grew less convinced of the species account as time went on. Although Galilei's methodological views changed considerably in subsequent years⁴⁹, nothing goes to indicate that he possessed an alternative to the Aristotelian conception of mind or anything close to a metaphysics of perception to undergird his discussion of perceptual phenomena. And, most importantly for our purposes, nothing goes to show that he freed himself from a conception of representation as likeness of experience and object. The latter is the only part of the species theory that is essential to complete the SoS, according to my conjecture. And, needless to say, this part can be held independently of the species theory.

If my conjecture is on the right track, a narrow conception of representation as likeness is Galilei's blind spot and responsible for his Subjectivism. For if a sensory experience can only *represent* a property of the object by being *alike*, *Irrealism* rules out that our experience of sensory qualities presents properties of the object. From there on, assuming that all experiences involve a change in the subject undergoing them, it is natural to identify sensory qualities with states of the subject.

⁴⁸ For useful discussions, see FILIPPO CAMEROTA, *Galileo's Eye: Linear Perspective and Visual Astronomy*, in «Galilæana», 1, 2004, pp. 143-170; GABRIELE BARONCINI, *Galileo e l'esperienza sensata*, in Gabriele Baroncini (ed.), *Forme di esperienze e rivoluzione scientifica*, Firenze, Leo S. Olschki, 1992, pp. 63-101; MARCO PICCOLINO, NICHOLAS J. WADE, *Galileo's Eye: A New Vision of the Senses in the Work of Galileo Galilei*, in «Perception», 37, 9, 2008, pp. 1312-1340; MICHELE SINICO, *Galileo Perceptionist*, in «Perception», 41, 4, 2012, pp. 483-488; STILLMAN DRAKE, *Galileo on Sense Experience and Foundations of Physics*, in «Isis», 68, 1, 1977, pp. 108-110.

⁴⁹ For an overview, see MARCO SGARBI, *The Age of Epistemology. Aristotelian Logic in Early Modern Philosophy 1500-1700*, London-New York, Dublin, Bloomsbury, 2023, pp. 65-91.

7. Aristotle's Hand in the FPMP

This paper sought to assemble a coherent train of thought, based on Galilean views, which rationally (if not inevitably) leads from Irrealism to Subjectivism, thus grounding the FPMP in a metaphysical view. I have shown that an SoS is required because two gaps need to be bridged between *Irrealism* and *Subjectivism*. The first gap concerns the thesis that sensory qualities must be properties of something at all. I have argued that *Phenomenology* can motivate this thesis under the Galilean assumption that our conception of sensory qualities is essentially dependent upon experience.

As there are multiple ways of construing sensory qualities that are consistent with *Phenomenology*, a second gap needs to be bridged. By introducing the notion of a reliable presentation of properties in experience, I have shown that a gap between appearance and reality is consistent with our experience's latching onto properties of objects. That, in turn, opens our experience up to a wider range of properties. These considerations point to what Galilei needs to assume to rationally motivate Subjectivism, namely that sensory experience must present the world as it is, or faithfully, to present it at all.

Based on this reasoning, I have offered reasons to accept the conjecture that Galilei, under the spell of an Aristotelian account of mind, did not consider the possibility of a reliable, non-faithful presentation of a property in experience. Aristotle's philosophy was not only left behind in early modernity. Disguised as Galilei's blind spot, Aristotle's narrow conception of representation as likeness likely shaped philosophical modernity by leading to the formulation of the FPMP. From there on, Subjectivism emerges as the compelling view to endorse.

At this point, one may wonder how Galilei's views relate to his overall scientific programme⁵⁰. Galilei pioneers the unification of abstract mathematical description and empirical observation, thus shaping the

⁵⁰ I am grateful to an anonymous referee for prompting me to address this point.

scientific revolution and the sciences to this day⁵¹. Science, in Galilei's view, is achieved if mathematics and experience join forces to confirm «principles with sensory experiences»⁵². In this sense, Galilei's observation of the moons of Jupiter constituted crucial support for the Copernican over the Ptolemaic system because the mathematical predictions of the latter were not compatible with the empirical data⁵³. The trustworthiness of empirical observation therefore plays a crucial role in Galilean science. But to what extent is this role consistent with Galilei's Subjectivism and Irrealism? Why do these views not undermine the trust put in the deliverances of sensory experience for the purposes of scientific knowledge?

Sensory experience must represent properties of material objects if it is to play a role in our process of accounting for their nature. If the SoS applied, *mutatis mutandis*, to the mathematically describable properties of material objects which take centre stage in Galilean science, the latter would indeed stand on shaky ground. However, the SoS reconstructed in this paper does not threaten the role of observation in science because the path to the subjectivisation of properties it makes available is *based on* Irrealism. Although this metaphysical presupposition is, on its own, insufficient to subjectivise sensory qualities, it is an indispensable ingredient of the SoS. But Galilei's background metaphysics, according to which the universe is constituted only by mathematically and geometrically describable properties, provides no reason to extend Irrealism to the common sensibles because they can be

⁵¹ GALILEO GALILEI, *Two New Sciences. Including Centers of Gravity and Force of Percussion*, Stillman Drake (trans.), Toronto, Dayton, Wall & Emerson, 2000, p. 225.

⁵² Ibid., p. 169; DRAKE, *Galileo on Sense Experience and Foundations of Physics*, cit., p. 109. A discussion of Galilei's changing views on scientific methodology would lead too far afield. For an overview, see WINIFRED LOVELL WISAN, *Galileo's Scientific Method: A Reexamination*, in Robert E. Butts, Joseph C. Pitt (eds.), *New Perspectives on Galileo*, Dordrecht, Springer Netherlands, 1978, pp. 1-57.

⁵³ GALILEO GALILEI, *Sidereus nuncius, or, The Sidereal messenger*, Albert Van Helden (ed., trans.), Chicago, University of Chicago Press, 1989.

described in quantitative terms⁵⁴. As there is no motivation for Galilei to extend Irrealism to the common sensibles, the SoS cannot get a grip these properties. Their status as «real accidents»⁵⁵ of material objects remains intact and their faithful representation in sensory experience is readily explained by an Aristotelian account in terms of likeness. Therefore, the SoS does not threaten the role of sensory observation as lending abstract mathematical descriptions a foothold in empirical reality.

Still, our results leave us with a sense of disappointment. Galilei had all the ingredients to bring about a second revolution by dethroning and reconceptualising the Aristotelian paradigm of mind and representation. He could have cast the causal dependence of sensory experience as a determiner of the content of experience and the concepts formed on their basis. But rather than seeing causation without resemblance as opening up the world up to our experience, Galilei turns onto a road that leads inwards: the SoS. It will take another genius of this century so rich in geniuses, Descartes, to revolutionise how we understand our own minds⁵⁶.

The SoS harbours a general lesson. How we understand our minds and their relation to the material world may covertly play an outsized role in our metaphysical theorising. Metaphysical views are in constant danger of being no more than aberrations of our understanding of mind and perception. If we construe the presence of properties in experience too narrowly, we will be constrained to look for precise, literal analogues of our qualitative character of experience in the world. Fighting against this sort of naïveté is part of Galilei's enduring legacy and deserves to remain powerful today.

⁵⁴ That is one point of the famous book of nature-passage, see ID., *The Assayer*, cit., p. 184.

⁵⁵ Ibid., p. 311.

⁵⁶ RENÉ DESCARTES, *Principia philosophiæ*, Œuvres de Descartes, vol. VIII-1, Charles Adam, Paul Tannery (eds.), Paris, Cerf, 1905, I.70. For an excellent discussion of Descartes' views on sensory representation, see RAFFAELLA DE ROSA, *Descartes and the Puzzle of Sensory Representation*, Oxford, Oxford University Press, 2010.

We do not live in a world that is as it appears. One thing that we have learned since Galilei is that appearances can be a guide to reality, even if they do not faithfully present reality to us. The world does not need to be as it appears for appearances to disclose the world to us⁵⁷.

Riassunto Galilei sostiene che le qualità sensibili esistono solo come proprietà dei soggetti esperienti. Esamino se il suo soggettivismo possa basarsi su una metafisica austera del mondo materiale e considerazioni fenomenologiche. Sostengo che siano insufficienti e avanzo la congettura che Galilei non l'abbia visto perché aderiva a una concezione aristotelica della rappresentazione come somiglianza.

Abstract Galilei holds that sensible qualities exist only as properties of experiencing subjects. This paper examines whether Galilei's subjectivism can be based on an austere metaphysics of the material world together with phenomenological considerations. I argue these are insufficient and conjecture Galilei missed this because he adhered to an Aristotelian view of mental representation as likeness.

⁵⁷ Research for this article was generously supported by the Swiss National Science Foundation, grant no. 211174. This work was completed while the author was affiliated with Princeton University. I am grateful to Ralf Bader, Jelscha Schmid, and Gianfranco Soldati, for discussion of earlier versions of this material.

Galileo Galilei: non solo scienza.

Per una rivisitazione della lettura husserliana

Sara Drioli

1. Scopritore e occultatore: una definizione esaustiva?

«Un genio che scopre e insieme occulta»¹. Sono questi i termini con cui il padre della fenomenologia trascendentale Edmund Husserl definisce l'iniziatore della scienza moderna Galileo Galilei in un passaggio contenuto nella seconda parte de *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale* (1936) e intitolata *L'origine del contrasto moderno tra obiettivismo fiscalistico e soggettivismo trascendentale*.

Nonostante l'attenzione critica di Husserl all'impostazione scientifico-matematica di Galilei sia molto frequente nei suoi scritti, è la conferenza di Praga, confluita ne *La crisi delle scienze europee*, il lavoro in cui il pensatore di Prossnitz dedica al fisico le sue osservazioni più emblematiche:

Egli [Galilei] scopre la natura matematica, l'idea metodica, egli apre la strada a un'infinità di scopritori e di scoperte fisiche. Egli scopre, di fronte alla causalità universale del mondo intuitivo, ciò che da allora in poi si chiamerà senz'altro (in quanto sua forma invariante) legge causale, la «forma a priori» del «vero» mondo (idealizzato e matematico), la «legge della legalità esatta», secondo la quale qualsiasi accadimento della «natura» – della natura idealizzata – deve sottostare a leggi esatte.

¹ EDMUND HUSSERL, *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, Enrico Filippini (trad. it.), Milano, Il Saggiatore, 2015, p. 84.

Tutto ciò è una scoperta e insieme un occultamento, anche se fino a oggi l'abbiamo considerato una pura e semplice verità².

Seppure Husserl riconosca grandi meriti agli straordinari contributi scientifici determinati dalle scoperte di Galilei, il fenomenologo delucida al contempo quanto il processo di *matematizzazione* della natura, l'esito del metodo di logicizzazione del reale che viene elaborato dalla fisica galileiana, abbia provocato un adombramento fatale, un «occultamento» del principio di *senso*, ridotto da quel processo a mero ideale logico-formale, che sta a fondamento della realtà. Quest'ultima non viene più riconosciuta come imprevedibile e in costante divenire, ma presumibile e manipolabile in base alla «legge della legalità esatta» destinata a influenzare l'intero campo culturale della conoscenza composto tanto dalle scienze della natura quanto dalle scienze dello spirito. Come Ruggero Zanin ha sottolineato in riferimento alla visione fenomenologico-husserliana: «Galileo sarebbe a tal punto un uomo della crisi da poter essere addirittura considerato all'origine della crisi delle scienze europee. Così almeno pensava Edmund Husserl che, nella sua ultima opera, *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, imputa a Galileo di aver provocato, attraverso il suo obiettivismo e la matematizzazione della natura, la perdita dell'unità della ragione e il tragico disordine in cui l'umanità contemporanea sta dibattendosi»³.

Ora, ne *Il Saggiatore* (1623), il fisico toscano esplicita la mentalità scientifica che caratterizza il suo procedere metodologico, le acquisizioni da esso derivate nonché la propria idea di ricerca filosofica⁴.

² Ivi, pp. 84-85.

³ RUGGERO ZANIN, *Galileo Galilei. Tre lettere. Sulla vita, la scienza, la filosofia*, Treviso, Pagus, 1991, p. 12.

⁴ Anche l'opera galileiana del 1632, il *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, scritto sotto forma di *dialogo* che assieme alla *lettera* rappresenta un genere classico della letteratura filosofica di chiara derivazione platonica, è un trattato dagli interessi non solo scientifici ma pure filosofici dato che sono volti a sottolineare il valore e la forza del sapere umano e dell'uomo di cultura che rivendica una conoscenza propriamente autentica: «il contenuto del Dialogo non è soltanto scientifico, ma come si dichiara nel titolo anche filosofico. Ciò ha dato luogo ad alcune riserve da

Se quella di Husserl è la filosofia fenomenologica, che coglie e descrive i costituenti essenziali della vita trascendentale di coscienza, quella di Galilei è la filosofia naturale che indaga e spiega le leggi che governano la natura. Sotto quest'ultimo profilo, un esempio potrebbe essere costituito dalla scoperta galileiana della legge matematica del moto di caduta dei gravi riscontrabile in *Discorsi e dimostrazioni matematiche attorno a due nuove scienze* (1638). Opera in cui, come Ernst Cassirer ha sottolineato, «Galilei non solo espone fatti fisici nuovi e fondamentali, ma introdusse e stabilì saldamente un nuovo metodo generale di pensiero scientifico, un metodo di osservazione empirica e deduzione matematica. Comprendere questo metodo e interpretarlo nel suo vero senso divenne uno dei compiti principali della filosofia moderna»⁵. Punto, questo, precisa il filosofo tedesco, che conferma che anche «nel campo della filosofia [...] il pensiero di Galileo si rivelò rivoluzionario»⁶. Riguardo al moto di caduta dei gravi, Galilei ha fornito una descrizione in termini matematici corroborata dall'esperimento scientifico. Pertanto, per poter rispondere all'obiettivo dell'atteggiamento filosofico così come inteso da Galilei, si può e si deve adeguare la mente umana a quello che è il peculiare carattere con cui l'immenso libro della natura è stato scritto da Dio. Parallelamente a quanto osservato da Galilei nell'opera del 1623:

parte di moderni studiosi i quali giudicano che l'opera non ha il carattere di trattazione scientifica, ma essenzialmente pratica e polemica. [...] Nel contenuto, l'opera presenta non solo le tesi della nuova concezione astronomica ma il senso stesso della vita e del sapere quali si sono venuti determinando nel clima della civiltà rinascimentale raccolta e fatta propria dallo scienziato pisano» in FRANZ BRUNETTI, *Introduzione*, in GALILEO GALILEI, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, Opere, II, a cura di Franz Brunetti, Torino, UTET, 1964, p. 11.

- 5 ERNST CASSIRER, *Galileo: scienza nuova e spirito nuovo*, in ERNST CASSIRER, *Dall'Umanesimo all'Illuminismo*, a cura di F. Federici, Firenze, La Nuova Italia, 1995, p. 175. Cfr. ERNST CASSIRER, *Il concetto e il problema della verità in Galileo*, in ERNST CASSIRER, *Dall'Umanesimo all'Illuminismo*, cit., pp. 147-173; ERNST CASSIRER, *Il platonismo di Galileo*, in ERNST CASSIRER, *Dall'Umanesimo all'Illuminismo*, cit., pp. 193-220..
- 6 *Ibidem*: «For even in the field of philosophy Galileo's thought proved revolutionary».

La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto⁷.

E nella *Lettera a Fortunio Liceti* risalente al gennaio 1641, il fisico puntualizza la sua visione:

Ma io veramente stimo il libro della filosofia, esser quello che ripetutamente ci sta aperto dinanzi agli occhi; ma perché è scritto in caratteri diversi da quelli del nostro alfabeto, non può esser da tutti letto: e sono i caratteri di tal libro triangoli, quadrati, cerchi, sfere, con, piramidi et alte figure matematiche, attissime per tal lettura⁸.

Interpretando rigorosamente il dettato galileiano sopra riportato, si potrebbe riconoscere che se la matematica è il linguaggio specifico della filosofia della natura, che non tutti possono decifrare e comprendere, l'uomo di scienza debba interessarsi per lo più all'ordine matematico della realtà.

Il dominio a cui lo scienziato dovrebbe dedicare la propria attenzione sembrerebbe essere quello della Natura su cui viene applicato il ragionamento sperimentale-deduttivo che utilizza il codice matematico, coincidente con il carattere necessario della realtà naturale, mediante il quale gli esperimenti vengono iniziati e, auspicabilmente, portati a termine con successo. Le verità scientifiche poi formulate daranno delle indicazioni riguardo alla costituzione propria, ovverosia, fisica, dei fenomeni del mondo. Dunque, sembrerebbe del tutto evidente che l'atteggiamento di fondo del pensiero galileiano sia una rinuncia a quella inclinazione che comporta la formulazione di visioni del mondo di ca-

⁷ GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*, Opere, I, cit., pp. 631-632.

⁸ GALILEO GALILEI, *Epistolario*, II, a cura di Francesco Vigo, Livorno, F. Vigo editore, 1872, p. 227.

rattere filosofico-spirituale. Il pensiero di Galilei muove da premesse e giunge a conclusioni che sono del tutto interne al panorama di interessi scientifico-naturali che non potrebbero, per loro stessa origine, collimare con quelli di tipo intuitivo ed esistenziale quali sono quelli della fenomenologia husserliana. Ma pur continuando a tenere presente l'idea galileiana di filosofia, che analogamente a quella husserliana si interroga sul problema della costituzione del reale, un'indagine ermeneutica su precisi passaggi contenuti in alcune fonti di Galilei consente di riscoprire una rilevante disposizione filosofica e un interesse non secondario su questioni perlopiù extra-naturali a cui i contributi husserliani, che criticano i prodotti culturali del pensiero scientifico nel quadro complessivo degli obiettivi della fenomenologia trascendentale, sembrano non riconoscere il giusto ruolo.

2. Le idee filosofiche di Galilei e il copernicanesimo di Husserl

Circa il ruolo di Galilei nella storia della riflessione filosofica vale la pena riportare buona parte, perché molto rilevante, del commento di Giovanni Papini contenuto nella Prefazione alla raccolta di numerosi «frammenti filosofici» da lui scelti e ordinati per lo studio del pensiero galileiano:

Galileo non ha mai fatto di proposito quella che oggi si chiama filosofia, ovvero scienza dell'universale, e non ha mai avuto troppa simpatia per quelli spiriti metafisici azzardosi, come ad esempio Campanella, che lo eccitavano a metter fuori pensieri non proprio sicuri e dimostrabili. È vero che Galileo teneva al nome di filosofo, come lo prova un passo di una sua lettera a Belisario Vinta del 7 maggio 1610, nella quale, trattandosi di entrare al servizio del Gran Duca di Toscana, scriveva: «quanto al titolo et pretesto del mio servizio, io desidererei, oltre al nome di Matematico, che S. A. ci aggiugnesse quello di Filosofo, professando io di havere studiato più anni in filosofia, che mesi in matematica pura». (X, 353). Ma da tutti gli scritti del Galileo si ricava ch'egli intendeva Filosofia nel senso che, dopo, è stato detto inglese, cioè nel senso di Filosofia Naturale, o Fisica.

Nonostante ciò Galileo ha pieno diritto di entrare a far parte della storia della filosofia, non solo per l'influenza che le sue scoperte astronomiche e le sue teorie meccaniche hanno avuto sulle menti dei tempi suoi, ma anche per gli insegnamenti di metodo e le osservazioni psicologiche che si trovano abbastanza spesso ne' suoi scritti [...] Due sole idee, fra tante, si possono riavvicinare a quelle che i più soglion chiamare filosofiche: quella sulla distinzione tra qualità primarie e secondarie dei corpi, nella quale Galileo ha chiaramente percorso Locke e perciò aperta la strada all'idealismo berkeleyano – e quella sulla luce come principio delle cose, la quale ricorda in modo evidente alcune modernissime teorie sulla costituzione dell'universo.

Per tutto questo mi pare che il posto di Galileo nella storia della filosofia dovrebbe essere maggiore di quel che ora non è⁹.

Com'è noto, la questione sull'esistenza o meno in natura delle qualità oggettive, delle grandezze quantitative che affiancano le qualità soggettive ovvero le conseguenze dell'interazione delle qualità oggettive con il corpo senziente, è stata una delle più dibattute nella storia del pensiero filosofico, sulla quale lo scienziato Galilei ha avuto una posizione ben precisa che Husserl, già ne *La filosofia come scienza rigorosa* (1911), commentava in quanto “cattiva teoria” nonostante il suo buon procedimento metodico che attinge al mondo comune dell'esperienza vivente¹⁰. E ciò perché, come indicato da Guido Neri: «L'intero mon-

9 GIOVANNI PAPINI, *Il pensiero di Galileo Galilei*, Carabba, Lanciano, 1900, pp. 6-7.

10 Sul tema del rapporto fra scienziato e mondo-della-vita è interessante segnalare il contributo di DON IHDE, *Husserl's Galileo Needed a Telescope!*, «Philosophy & Technology», vol. 26, n.3, Berlin, Springer, 2013, p. 77, che evidenzia, da un lato, l'enfasi eccessiva di Husserl sul processo di matematizzazione e, dall'altro, la trascuratezza del fenomenologo circa le tecnologie che mediano la percezione. Per mezzo di un utilizzo *incorporato* o *incarnato* degli strumenti scientifici (come il telescopio) l'uomo di scienza resta completamente immerso nel mondo-della-vita: «If science is that human practice which yields new knowledge and knowledge which exceeds the bare or unaided senses, then only the science which is embodied in instruments which amplify and magnify ordinary capacities will qualify and that is the science produced by Galileo-with-his-telescope. And from even this scanty history, one should be able to see that much of the Galilean invention of early modern science took place only because Galileo did have a telescope, an artifact which receives no Husserlian mention».

do sensibile-intuitivo, sulla cui base le categorie scientifiche vengono prodotte mediante un processo di idealizzazione, viene svalorizzato a semplice apparenza¹¹.

Ne *Il Saggiatore*, Galilei dimostra accuratamente come poter affermare la realtà delle qualità oggettive che in quanto tali sono le uniche qualità da poter attribuire all'oggetto corporeo provocando, in tal modo, quella che Paolo Rossi ha definito essere una «*esclusione dell'uomo* dall'universo della fisica»¹², non per un effettivo disinteresse nei confronti della sfera soggettiva ma per consentire alla fisica di acquisire un modello scientifico finalmente svincolato da antropomorfismi e cause finali, pertanto, di guadagnare una effettiva autonomia dalle sovrastrutture culturali dominanti.

Al fine della sua spiegazione, Galilei prende in esame il senso del tatto. Infatti, basta toccare un ente per capire in modo indiscutibile la sua forma, sferica o cubica per esempio. Ma il contatto con l'oggetto provoca anche una risposta soggettiva quale è il solletico, che dipende dalla condizione dell'individuo, in modo particolare dalla reattività della sua cute e non dalla natura dell'ente:

Io vo movendo una mano ora sopra una statua di marmo, ora sopra un uomo vivo. Quanto all'azione che vien dalla mano, rispetto ad essa mano è la medesima sopra l'uno e l'altro soggetto, ch'è di quei primi accidenti, cioè moto e toccamento, né per altri nomi vien da noi chiamata: ma il corpo animato, che riceve tali operazioni, sente diverse affezioni secondo che in diverse parti vien tocco; e venendo toccato, verbigrazia, sotto le piante de' piedi, sopra le ginocchia o sotto l'ascelle, sente, oltre al commun toccamento, un'altra affezione, alla quale noi abbiamo imposto un nome particolare, chiamandola solletico: la quale affezione è tutta nostra, e non punto della mano¹³.

¹¹ GUIDO DAVIDE NERI, *L'«ouverture» della Crisi*, introduzione a EDMUND HUSSERL, *L'obiettivismo moderno. Riflessioni storico-critiche sul pensiero europeo dall'età di Galileo*, Milano, Il Saggiatore, 1976, p. 23.

¹² PAOLO ROSSI, *Il pensiero di Galileo Galilei*, Torino, Loescher, 1970, p. 66.

¹³ GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*, cit., pp. 778-779.

Oltre a quello del tatto, il fisico si serve di un argomento aggiuntivo per poter confermare la sussistenza di qualità misurabili. Sulla scia della tesi aristotelica, in base alla quale il moto è la causa del calore¹⁴, Galilei fa comprendere che quest'ultimo, come il sapore, l'odore, il colore, non sia una proprietà fattuale del corpo ma un'impressione soggettiva causata dall'effetto del moto vivacissimo delle particelle della sostanza fisica che agisce sugli organi di senso del soggetto:

Restami ora che, conforme alla promessa fatta di sopra a V.S. Illustrissima, io dica certo mio pensiero intorno alla proposizione «Il moto è causa di calore», mostrando in qual modo mi par ch'ella possa esser vera. Ma prima mi fa di bisogno fare alcuna considerazione sopra questo che noi chiamiamo caldo, del qual dubito grandemente che in universale ne venga formato concetto assai lontano dal vero, mentre vien creduto essere un vero accidente affezione e qualità che realmente risegga nella materia dalla quale noi sentiamo riscaldarci¹⁵.

Un'ulteriore tematica contenuta nel pensiero galileiano che è rilevante sotto il profilo non solo scientifico ma anche filosofico è quella della luce. Quest'ultima non è concepita da Galilei soltanto come principio atomico del reale, che al pari del calore risponderebbe, secondo la posizione del fisico, alla teoria corpuscolare, ma pure come *principio del mondo*, fondamento universale della natura, estrema espansione, ultima rarefazione in cui tutte le cose si condensano per potersi comporre. Secondo quanto riporta il commento di Orazio Rucellai, le tracce di questa idea si possono riscontrare già nel pensiero filosofico antico:

Voleva anche [Eraclito] che il fuoco si costipasse e insieme stringessesi non altrimenti che noi abbiam detto accadere dell'acqua e dell'aria, come dice anche Platone nel *Timeo*, il quale afferma un elemento passare in un altro e così via via. E voi non potete negare anche questo, e perché non vi paia miracolo vo' contarvi in simil proposito, come una cosa somigliante cadde parimente

¹⁴ ARISTOTELE, *Il cielo*, II, 7.

¹⁵ GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*, cit., p. 777.

in pensiero al Signor Galileo nostro, e pure egli era matematico, che vuol dire non essere di soperchio credulo¹⁶.

Oltre a concepire la luce come principio fisico del mondo, Galilei la valuta come *principio originario della vita*, uno spirito che si propaga nell'intero universo ed espande la condizione vitale degli esseri. In una lettera indirizzata a Piero Dini il 23 marzo 1615, Galilei afferma: «parermi che nella natura si trovi una sostanza spiritosissima, tenuissima e velocissima, la quale, diffondendosi per l'universo, penetra per tutto senza contrasto, riscalda, vivifica e rende feconde tutte le viventi creature; e di questo spirito par che 'l senso stesso ci dimostri il corpo del sole esserne ricetta principalissimo»¹⁷.

Nella continuazione della medesima lettera, il fisico chiama in causa la teoria eliocentrica affermando: «Onde molto verosimilmente possiamo affermare, questo spirito fecondante e questa luce diffusa per tutto il mondo concorrere ad unirsi e fortificarsi in esso corpo solare, per ciò nel centro dell'universo collocato, e quindi, poi, fatta più splendida e vigorosa, di nuovo diffondersi»¹⁸. Va da sé che la teoria dell'eliocentrismo sia stata rivoluzionaria non solo nel campo della scienza ma anche in quello della filosofia. Se prima numerosi filosofi e teologi contemporanei a Copernico la rifiutano, essa trova definitiva accettazione con l'uscita dei *Principia* di Isaac Newton nel 1687. E nel pensiero filosofico più vicino alla contemporaneità, Husserl è stato uno degli intellettuali che ha elaborato una delle interpretazioni più interessanti e filosoficamente significative dell'eliocentrismo. Nel maggio 1934 il padre della fenomenologia trascendentale redige un importante manoscritto intitolato *Umsturz der kopernikanischen Lehre in der gewöhnlichen weltanschaulichen Interpretation* ("Rovesciamento della dottrina copernicana nell'interpretazione della corrente visione del mondo") che verrà reso edito negli Stati Uniti da Marvin Farber. In questo scritto, Husserl riporta una considerazione in particolare che, di primo acchito, po-

¹⁶ GIOVANNI PAPINI, *Il pensiero di Galileo Galilei*, cit., p. 20.

¹⁷ GALILEO GALILEI, *Epistolario di Galileo Galilei*, I, cit., pp. 187-188.

¹⁸ Ivi, p. 188.

trebbe far inciampare in un equivoco ermeneutico: «la Terra [...], nella forma originaria di rappresentazione, non si muove [...]»¹⁹.

Se si analizza tale tesi sul piano scientifico-astronomico è del tutto evidente che essa sia completamente inaccettabile. Ma la dichiarazione husserliana dev'essere esaminata sul piano filosofico e, più distintamente, su quello fenomenologico-trascendentale che apre alle esperienze fenomenologiche del mondo, fra le quali, quelle della *spazialità* che in quanto costitutiva di esperienza inerisce alla fenomenologia genetica, la forma superiore della teoria della costituzione²⁰. Ora, poiché «ogni legittimazione trova il proprio punto di partenza soggettivo e il proprio ancoramento estremo nell'io»²¹ la tesi husserliana *la Terra non si muove* dev'essere letta riconducendola al tema centrale della fenomenologia: la soggettività. Husserl, che si colloca fra «noi copernicani»²², non vuole di certo affermare che la terra non si muova nel senso che «se ne stia in quiete nello spazio»²³ ma che, come Renato Cristin ha rilevato, «in quanto suolo originario (terreno della vita e della storia, della natura e dello spirito) la Terra immobile è analogo al *Leib*»²⁴, al corpo vivente del soggetto trascendentale, «che nell'esperienza primordiale [...] non conosce spostamento né quiete, ma solo moto interno e quiete interna»²⁵.

Come la Terra è la circostanza *primigenia*, che preserva la struttura di vita universale, tanto spirituale quanto materiale, e la alimenta,

¹⁹ EDMUND HUSSERL, *Rovesciamento della dottrina copernicana nell'interpretazione della corrente visione del mondo*, Guido Neri (trad. it.), in «aut aut», 245, 1991, p. 4.

²⁰ Cfr. EDMUND HUSSERL, *La cosa e lo spazio. Lineamenti fondamentale di fenomenologia e teoria della ragione*, Antonio Caputo (trad. it.), Soveria Mannelli, Rubbettino, 2008.

²¹ EDMUND HUSSERL, *Rovesciamento della dottrina copernicana nell'interpretazione della corrente visione del mondo*, cit., p. 6.

²² Ivi, p. 4.

²³ Ivi, p. 17.

²⁴ RENATO CRISTIN, *Dare senso*, in EDMUND HUSSERL, *Natura e Spirito*, Renato Cristin (trad. it.), Roma, Studium, 2022, p. 208.

²⁵ EDMUND HUSSERL, *Rovesciamento della dottrina copernicana nell'interpretazione della corrente visione del mondo*, cit., p. 9.

analogamente il corpo proprio, custode della corporeità vivente del soggetto che lo rende unico e irripetibile, è l'unità originaria di coscienza e di carne, nonché, il baricentro essenziale a cui appartengono le condizioni cinestetiche dalle quali dipende il processo di costituzione della spazialità che inaugura la fase di apertura al mondo poi conosciuto ed esperito.

Se la metodologia delle scienze naturali indaga la Terra secondo la sua struttura, morfologia, evoluzione e in base alle sue leggi, il metodo rigoroso della filosofia di carattere fenomenologico, *riducendo* la Terra a fenomeno, giunge al suo nucleo eidetico che può essere infine descritto come lo spazio identitario dell'abitare complessivo dell'essere umano. Prosegue Cristin: «la terra è l'arca originaria che trasmette all'uomo – a colui che la abita liberamente e non, come l'animale, che ne subisce soltanto la necessità – l'orientamento spaziotemporale e le coordinate del suo agire»²⁶. Ebbene, le scienze naturali che confinano l'originario a un livello extra-scientifico, da loro considerato alla stregua di un piano illusorio, nascondono una tale immagine primigenia della Terra e sulla stessa scia: «L'abito ideale che si chiama «matematica e scienza naturale matematica» [...] riveste tutto ciò che per gli scienziati e per le persone colte, in quanto «natura obiettivamente reale e vera», rappresenta il mondo-della-vita»²⁷. Quest'ultimo non è affatto assumibile come un *mondo di carta* bensì come l'orizzonte concreto della vita del soggetto. Un mondo che in quanto vitale è anche storico e culturale, «irriducibilmente reale»²⁸, non meno di quello scientifico, chiarisce David Soffer.

Ma il senso del mondo-della-vita, disvelato dalla conoscenza intuitiva, viene appreso da una coscienza dalla complessità storico-spirituale ormai trascurata dato che la coscienza è stata naturalizzata dalla scienza. Se quest'ultima non ricomincia a rispettare alcuni limiti di ca-

²⁶ RENATO CRISTIN, *Dare senso*, cit., p. 211.

²⁷ EDMUND HUSSERL, *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, cit., pp. 83-84.

²⁸ GAIL SOFFER, *Phenomenology and scientific realism: Husserl's critique of Galileo*, «The Review of Metaphysics», vol. 44, n.1, Washington, Philosophy Education Society, 1990, p. 94.

rattere gnoseologico l'effetto sarà dannoso sia per la sussistenza della cultura filosofica sia per la credibilità di quella scientifica che, così facendo, continuerà a escludere «di principio proprio quei problemi che sono i più scottanti per l'uomo, il quale, nei nostri tempi tormentati, si sente in balia del destino; i problemi del senso o del non-senso dell'esistenza umana nel suo complesso»²⁹.

3. La scienza del mondo-della-vita

Nella storia del pensiero, è un dato di fatto che «per la conoscenza della natura esterna il passo decisivo dall'esperienza ingenua a quella scientifica, dai vaghi concetti comuni ai concetti scientifici, fu compiuto in tutta chiarezza [...] soltanto da Galilei»³⁰ come Husserl riconosce nell'opera del 1911. Ma la scienza che si è sviluppata dalle intuizioni galileiane è incappata nella grave ingenuità «per cui ritiene che ciò che essa chiama mondo obiettivo sia l'universo di tutto ciò che è, senza badare al fatto che la soggettività che produce la scienza non può venir conosciuta da nessuna scienza obiettiva»³¹.

Proprio a partire da Galilei, la soggettività, regista di teoria e di prassi conoscitive, viene resa anonima sicché l'originario rimane completamente sottaciuto. Obliando il senso primigenio, dell'essere in generale e della vita, che in quanto a priori precede lo stesso metodo scientifico, la ricerca galileiana ha continuato a implicare una trascuratezza estremamente rilevante:

Fu una deplorable omissione il fatto che *Galileo* non interrogò quell'operazione che costituiva l'originario conferimento di senso, la quale, in quanto

²⁹ EDMUND HUSSERL, *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, cit., p. 44.

³⁰ ID., *La filosofia come scienza rigorosa*, Corrado Sinigaglia (trad. it.), Roma-Bari, Laterza, 2005, p. 40.

³¹ EDMUND HUSSERL, *La crisi dell'umanità europea e la filosofia*, Dissertazioni, in *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, cit., pp. 331-332.

idealizzazione attuata sul terreno originario della vita teorica o pratica – del mondo immediatamente intuitivo (e qui, in particolare, del mondo corporeo empiricamente intuitivo) – produce le formazioni geometriche ideali. Più precisamente egli non considerò con attenzione il fatto che una libera riplasmazione fantastica di questo mondo e delle sue forme produce soltanto forme possibili empirico-intuitive e non forme esatte; non si chiese quali motivazioni e quali nuove operazioni fossero propriamente richieste dall'idealizzazione geometrica³².

In forza di un procedimento metodologico operativamente valido ma senza una descrizione rigorosa riguardo al senso delle idealizzazioni, la cui elaborazione ha come punto di partenza il mondo della percezione originaria, Galilei attribuisce loro un cosiddetto valore in sé, tale per cui si arriva non solo ad affermare la concezione dualistica del reale che contrappone il soggettivo e l'oggettivo, l'orizzonte da cui vengono attinte le esperienze a priori e il mondo matematico, ma anche una subordinazione del primo termine a favore del secondo. Per Husserl, quella di Galilei è un'operazione restrittiva del reale, giacché provoca «la sovrapposizione della natura idealizzata a quella intuitiva pre-scientifica»³³ decretando la prima come la sola espressione di veridicità:

Così ogni riconsiderazione occasionale (e anche «filosofica») che risalga al di là delle regole d'arte secondo cui si svolge un certo lavoro, al suo senso proprio, si arrestò sempre alla natura idealizzata, senza penetrare radicalmente fino al fine ultimo che la nuova scienza e la geometria da essa inseparabile, procedendo dalla vita pre-scientifica e dal mondo circostante, doveva fin dall'inizio perseguire un fine che pure rientrava in questa stessa vita e che non poteva che riferirsi al mondo-della-vita³⁴.

³² EDMUND HUSSERL, *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, cit., pp. 81-82.

³³ Ivi, p. 81.

³⁴ Ivi, p. 82.

Il mondo-della-vita, il «terreno su cui si fonda il mondo scientificamente vero» in quanto «regno delle evidenze originarie» è un enigma, per la cui soluzione è richiesta una scientificità nuova che non può modellarsi sul metodo della scienza obbiettiva, il cui mancato riferimento al mondo intuitivo l'ha resa indecifrabile. È richiesta la fenomenologia trascendentale, la quale, analogamente alla filosofia naturale di Galilei che esercita il *dubbio* su ogni eccesso di metafisica tipica dei filosofi *in libris*, ma anche ciò che Antonio Banfi ha definito essere «una scepsi metodica che è negazione del senso dogmatico della verità»³⁵, promuove in questo caso l'*epochè* della scienza obbiettiva, sospende il giudizio su «interessi», «finalità», «azioni» che vengono prodotti dall'atteggiamento naturale. Tuttavia, come Husserl riconosce:

Anche se le operazioni della scienza obbiettiva moderna continuano a rimanere incomprensibili, essa rimanda per il mondo-della-vita una struttura di validità, sorta da attività specifiche, e rientra nella sua stessa concrezione. [...] per chiarire la scienza obbiettiva, e tutte le altre attività umane, dev'essere dapprima considerato il concreto mondo-della-vita, e dev'essere considerato nell'universalità realmente concreta in cui esso, in quanto attualità e in quanto orizzonte, include in sé tutti i complessi di validità raggiunti dagli uomini

35 ANTONIO BANFI, *Galileo Galilei*, Il Saggiatore, Milano, 1961, p. 329. Viene qui riportata una lettera di risposta di Husserl a Banfi in cui, oltre all'ammirazione per il pensatore italiano, il fenomenologo segnala il suo approccio germinale allo studio della lingua italiana, il che può far intuire che la critica husserliana di Galilei si basi più sulla ricezione che sulla letteratura: EDMUND HUSSERL, *Husserl an Banfi*, 27. II., 1927, *Briefwechsel*, vol. III, Dordrecht-Boston, Kluwer, 1993, p. 3: «Lieber Herr College! Die gütige Zusendung Ihres ersten grossen Werkes *Principi di una Teoria della Ragione* bereitete mir eine grosse Freude. Ich beglückwünsche Sie herzlich u. wünsche Ihnen einen schönsten Erfolg. Dr. Becker, mein trefflicher Mitarbeiter, muss mir mit seiner Kenntnis der ital<ienischen> Sprache aushelfen u. mir ausführlich referiren. Das geht freilich langsam. Ich bin im voraus sicher viel zu lernen. Seit wir uns sahen, habe ich mit allen Kräften fortgearbeitet u. wie ich glaube mit Erfolg: Schliesslich habe ich die ganze Grundlegung der Ph<änomenologie> neu durchdacht, vertieft, erweitert. Endlich kann ich an mein Publicum denken u. an literar<ische> Darstellung. Der neue Jahrbuchband bringt ein sehr originelles u. bedeutendes Werk von Heidegger, "Sein u. Zeit". Herzliche Grüsse, in Hochschätzung von Ihrem EHusserl».

rispetto al mondo della loro vita in comune, e in cui, in definitiva, li riferisce nel loro complesso a un nucleo del mondo che dev'essere dipanato in via astrattiva: il mondo delle dirette esperienze intersoggettive³⁶.

La dimensione della *Lebenswelt*, che può riassumersi nello spazio della vita storico-culturale, viene a mostrarsi come molto ampia. Una caratteristica paradigmatica del mondo-della-vita, che emerge dalla lettura dell'ultimo passo riportato, è quella di un'unitarietà che si incontra con la pluralità: il mondo-della-vita, infatti, è «*die eine Welt*» e allo stesso tempo si compone in molte «*Sonderwelten*». Seppure sia di certo possibile scomporre la *Lebenswelt* nei suoi piani costitutivi, ciò è attuabile solo in un secondo momento. Nella sua immediatezza, essa si profila in una sua forma unica, contenente in sé ogni formazione della cultura, sia essa spirituale sia essa naturale, e ciascuna attività, teorica e pratica. Nonostante la sua incessante evoluzione, il mondo-della-vita conserva la propria «tipologia essenziale» a cui restano vincolate «la vita e tutte le scienze di cui essa è terreno».

La fenomenologia, anche e proprio in quanto nuova *praxis*, reclama l'urgenza di ritornare al mondo-della-vita in quanto «problema filosofico universale» e unità originaria di senso, spezzata dalla sovrapposizione della «natura idealizzata» a quella «intuitiva pre-scientifica», quel mondo delle evidenze prime da cui tutti i soggetti che elaborano teorie e conducono prassi, immersi nella quotidianità, non possono prescindere. Ogni domanda implica dapprima «il mondo circostante, quotidiano della vita, in cui tutti noi, e anch'io in quanto filosofo, esistiamo coscientialmente: non meno le scienze, in quanto fatti culturali inclusi in questo mondo, e gli scienziati e le loro teorie»³⁷. Nei termini che sono propri della quotidianità, ovvero, della stessa *Lebenswelt*, questa viene esperita, pensata e valutata da «soggetti egologici» che a essa conferiscono un senso d'essere adeguato alla propria condizione di agenti storici. Ebbene, occultando la radice di senso soggettivo dalla quale esse si sono sviluppate, le scienze, che si pongono necessaria-

³⁶ Ivi, pp. 156-157.

³⁷ Ivi, p. 132.

mente sulla scia dei precetti scientifici galileiani, entrano in uno stadio di crisi e, con esse, subiscono una piena situazione di sconvolgimento tutte «le sfere dell'essere a cui queste scienze si riferiscono»³⁸.

La denuncia husserliana non concerne soltanto la scienza naturale ma anche la sapienza filosofica, di cui le scienze sono ramificazioni, che ha perso la spinta nei confronti del proprio ruolo *arcontico*, di guida per l'umanità europea, e della sua funzione originaria che la porta ad assegnare unitarietà alla cultura. Si richiede così non una rigida separazione ma un vero e proprio rapporto di dialogo, così com'è stato sin dalla loro nascita, fra scienza e filosofia, possibile grazie a un medesimo *fondamento di senso*. E questo perché, come riporta Husserl:

Il mondo-della-vita [...] c'è sempre stato, prima di qualsiasi scienza, qualunque sia il modo d'essere che esso ha nell'epoca della scienza. Si può quindi porre il problema del modo d'essere del mondo-della-vita in sé e per sé; ci si può porre completamente sul terreno di questo mondo direttamente intuitivo [...] si può considerare in generale quali siano i compiti «scientifici», e quindi da assolvere nella prospettiva di una validità generale, che si pongono riguardo al proprio modo d'essere. Tutto ciò non costituisce forse un grande tema di lavoro?³⁹

4. Alcuni cenni conclusivi: il rapporto fra scienza e filosofia

Nel quadro presentato da Husserl, quanto determinato dall'opera galileiana ha provocato uno sconvolgimento complessivo dell'assetto culturale dell'Occidente. Già negli anni Venti Husserl getta luce sulla situazione problematica in cui versa la cultura europea:

Le singole scienze prosperano nel loro isolamento; la filosofia che era chiamata a dar loro unità, è disprezzata. Le scienze, che si rendono autonome, credono di non averne bisogno; e l'uomo pratico, che vive alla giornata, utiliz-

³⁸ *Ibidem*.

³⁹ *Ivi*, p. 148.

za le scienze là dove lo aiutano tecnicamente e gli offrono mezzi per la realizzazione di scopi pratici accidentali. Del resto, l'idea che ha dominato i secoli precedenti, quella di un'umanità che debba essere formata in modo nuovo, e di una cultura razionale che venga modellata in linea di principio sulla base delle idee di ragione, ha perduto la propria forza⁴⁰.

La scoperta della natura matematica del mondo e dell'idea di metodo a esso applicato da parte di Galilei, per quanto necessarie al progresso del sapere, hanno significato identificare l'ovvietà apparente, l'intero matematizzabile, con l'evidenza autentica, il regno intuibile. Pertanto, lo sviluppo della scienza, da Galilei in poi, ha portato la cultura occidentale a elaborare una scienza dell'essere fallace, una scienza della realtà umana che, fondandosi sul modello delle scienze naturali, ha implicato una reificazione della coscienza. Pertanto, quest'ultima non è più in grado di rilevare il contenuto essenziale, il senso che risiede nell'esperienza soggettivo-spirituale, che dev'essere colto e tematizzato secondo un rigoroso approccio metodico, quello di una ricerca dei principi: «una fenomenologia realmente radicata e sistematica, esercitata non accidentalmente e in riflessioni isolate, ma dedita esclusivamente ai problemi estremamente complessi ed intricati della coscienza, e praticata con uno spirito del tutto libero, non accecato da alcun pregiudizio naturalistico»⁴¹.

Secondo la posizione di Husserl, un esempio della scienza successiva a Galilei che ha acuito la crisi del senso dell'essere del mondo è stata la fisica di Albert Einstein, protagonista di un'epoca in cui, come José Sanguinetti ha indicato: «L'orizzonte della natura si è allontanato dallo sguardo epistemico. La scienza sembra [...] più *lógos* oggettivo che

⁴⁰ EDMUND HUSSERL, *Sulla fallita realizzazione nello sviluppo della cultura e della scienza moderne del telos dell'umanità europea*, Appendice V, in EDMUND HUSSERL, *L'idea di Europa*, Corrado Sinigaglia (trad. it.), Milano, Cortina, 1999, p. 135.

⁴¹ ID., *La filosofia come scienza rigorosa*, Corrado Sinigaglia (trad. it.), Roma-Bari, Laterza, 2005, pp. 66-67.

dialogo comprensivo con la *physis*»⁴². L'osservazione husserliana è inequivocabile: «La rivoluzione di Einstein investe le formule della fisica idealizzata e ingenuamente obiettiva. Ma non ci dice nulla sul modo in cui le formule in generale, l'obiettivazione matematica in generale, assumono un senso sullo sfondo della vita e del mondo circostante intuitivo; perciò Einstein non riforma lo spazio e il tempo entro cui si svolge la nostra vita vivente»⁴³. Analogamente al caso galileiano, ciò non significa che il pensiero di Einstein non presenti nessuna traccia di interesse circa il campo di matrice filosofica, senza contare il mondo storico-culturale nel suo complesso come attestano i suoi *Pensieri degli anni difficili* (1950)⁴⁴. Alcuni studi recenti, utili anche a rinnovare la tematizzazione del rapporto fra scienza e filosofia, hanno messo in luce quello che è stato un interesse significativo da parte di Einstein nei riguardi della stessa fenomenologia.

In una lettera del 30 ottobre 1929 indirizzata al dottor Hermann Vollmer, il fisico di Ulma dichiara di «aver cercato in qualche modo di familiarizzare con l'opera di Edmund Husserl»⁴⁵. Impresa che deve essersi rivelata poco agevole dato che aggiunge: «la visione d'essenza (*Wesensschau*) è come un accessorio, qualcosa che mi rimane completamente sconosciuto»⁴⁶.

⁴² JUAN JOSÉ SANGUINETI, *Crisi di senso nella tecno-scienza contemporanea*, in *Crisi di senso e pensiero metafisico*, a cura di Gabriel Chalmeta, Roma, Armando, 1993, p. 37.

⁴³ EDMUND HUSSERL, *La crisi dell'umanità europea e la filosofia*, Dissertazioni, in ID., *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, cit., p. 332.

⁴⁴ Cfr. ALBERT EINSTEIN, *Pensieri degli anni difficili*, Luigi Bianchi (trad. it.), Torino, Bollati Boringhieri, 2014.

⁴⁵ ALBERT EINSTEIN, *Letter to Hermann Vollmer 30.10.1929*, in «Ruth and Hermann Vollmer papers. Manuscripts and Archives Division. The New York Public Library. Astor, Lenox, and Tilden Foundations». Lettera citata in GIORGIO JULES MASTROBISI, *Il virtuale della fenomenologia nella fisica: temporalità e cinestesi alla prova della teoria della relatività. Dai manoscritti di Einstein e Husserl*, «Scienza e Filosofia», n.18, a. 2017, p. 35. Come segnalato dall'autore dell'articolo, probabilmente qui Einstein si riferisce alle *Idee* di Husserl.

⁴⁶ *Ibidem*.

La difficoltà incontrata da Einstein per la comprensione del ruolo dell'intuizione eidetica, che come Husserl dichiara in *Idee I* (1913) esprime il principio di tutti i principi, ovverosia, che «ogni intuizione (*Anschauung*) originalmente offerente è una sorgente legittima di conoscenza, che tutto ciò che si dà originalmente “nell’intuizione” (per così dire in carne e ossa) è da assumere come esso si dà, ma anche soltanto nei limiti in cui si dà»⁴⁷, lo stimola a un confronto maggiore con la fenomenologia. L'impegno si dimostra produttivo dato che, qualche anno successivo, Einstein riconoscerà l'importanza da parte dell'uomo di scienza di soffermarsi sui principi inconfutabili delle proprie elaborazioni scientifiche: «nel cercare un nuovo fondamento, egli deve sforzarsi di chiarire a se stesso fino a che punto i concetti che egli usa sono fondati e costituiscono qualcosa di insostituibile»⁴⁸. Come Giorgio Mastrobisi ha indicato: «L'inevitabile ricerca del significato nascosto della «visione d'essenza» husserliana, lo sforzo diuturno per cercare di afferrare quell'elemento teoretico indispensabile alla propria opera, indirizzarono Einstein a ingaggiare un confronto-scontro proprio con la Fenomenologia husserliana, dando corpo a una serie di considerazioni, che dal punto di vista della struttura concettuale e terminologica di base, sembrano seguire da vicino quelle proposte da Husserl»⁴⁹. A questa altezza, è interessante segnalare che se Einstein esorta negli anni Trenta a non lasciarsi confondere dalla fiducia che «l'essere nella sua struttura sia in completa armonia»⁵⁰, sottendendo, forse, quella condizione dinamica, poiché vitale, che Husserl riconosceva alla *Leben-*

⁴⁷ EDMUND HUSSERL, *Idee per una fenomenologia pura e per una filosofia fenomenologica*, I, Vincenzo Costa (trad. it.), Torino, Einaudi, 2002, pp. 52-53.

⁴⁸ ALBERT EINSTEIN, *Fisica e realtà*, in *Pensieri degli anni difficili*, cit., p. 37.

⁴⁹ GIORGIO JULES MASTROBISI, *Il virtuale della fenomenologia nella fisica: temporalità e cinestesi alla prova della teoria della relatività. Dai manoscritti di Einstein e Husserl*, cit., p. 35.

⁵⁰ ALBERT EINSTEIN, Ms 02-110 in Albert Einstein Archives, Israel, The Hebrew University of Jerusalem, The Jewish National and University Library, ff. 2-3, citato in G.J Mastrobisi, *Fenomenologia e Relatività. Studi su possibilità ed essenza nella fisica contemporanea*, Roma, Stamen, 2015, pp. 16-17.

swelt, è negli anni Quaranta che il fisico pare adottare una posizione di natura fenomenologica:

credo che porre una realtà (fisica) indipendente da qualsiasi soggetto percipiente con rigide leggi fisiche di struttura (Materialismo?), non sia stato mai un qualcosa di duraturo. [...] nel nostro tempo si sta facendo strada un pensiero nuovo ed originale. Questo tempo ha prodotto un progresso della sfera epistemologica; così infatti mi pare si possa delineare nella conoscenza il fatto che non sia concessa alcuna via plausibile che porti dal semplice esperire (*Erleben*) al concettuale comprendere (*Erfassen*) le cose, poiché ogni pensiero alla fine è controllato da una libera costruzione, che deriva sistematicamente attraverso vissuti sensoriali (*sinnlichen Erlebnisse*), anche dai più remoti⁵¹.

La messa su carta di una consapevolezza degna di nota, che emerge però in seguito alla morte di Husserl, la quale riconosce il ruolo della soggettività che intrattiene una vivenza (*Erlebnis*) con il mondo esperito e conosciuto, avrebbe sperabilmente potuto smorzare quello che è stato il duro giudizio husserliano sugli uomini di scienza e sullo «spregio» di ciò che per loro sarebbe «meramente soggettivo-relativo», senza conoscere il mondo-della-vita nella rispettiva strutturazione eidetica. All'interno del quadro galileiano, il cui pensiero si sviluppa in un'epoca nella quale proprio la filosofia veniva considerata essere la prima fra le scienze, il compito di edificare un sapere scevro di rimandi a sovrastrutture fuorvianti è affidato al modello scientifico che decrittica il linguaggio matematico del «gran libro della natura» e stabilisce il primato del pensiero della matematica. Ma quest'ultimo, vincolato alla idealizzazione, si tramuta in un pensiero meramente tecnico rispetto a cui, come Nicoletta Ghigi ha precisato, «va completamente perduta [...] la caducità o imprevedibilità di ogni manifestazione degli accadimenti nel mondo, ovvero di quello che, come constatiamo quotidiana-

⁵¹ ALBERT EINSTEIN, Ms 02-136-10, in Albert Einstein Archives, Israel, The Hebrew University of Jerusalem, The Jewish National and University Library, pp.1-2, citato in GIORGIO JULES MASTROBISI, *Lessenza fenomenologica della relatività. Questioni di confine tra Husserl e Einstein*, in «Scienza e Filosofia», n. 15, a. 2016, p. 78.

mente, è una sua caratteristica e parte essenziale della costituzione del suo senso»⁵².

Va da sé che Husserl ponga «*in tutta serietà Galileo alla testa dei grandi scopritori dell'epoca moderna*» e così, naturalmente, ammira «in tutta serietà i grandi scopritori della fisica classica e post-classica, le loro *attuazioni teoretiche* che non sono affatto meramente *meccaniche*, che sono, anzi, *sbalorditive*»⁵³. Ma Galilei, dimentico del terreno su cui la scienza obiettiva costruisce il complesso delle sue verità «definitive», non si rende conto di ciò che il suo metodo, perfezionato poi dalla scienza posteriore, determina: l'oblio del senso originario e autentico anche delle stesse teorie fisiche.

Si badi bene che il senso indicato da Husserl non è un senso «contrabbandato metafisicamente» bensì un senso che gode di «un'evidenza vincolante», la quale può essere, di nuovo e a ogni passo, disvelata e rinnovata dalla descrizione elaborata dalla fenomenologia che esorta a una presa di coscienza del senso originario dell'essere del mondo: operazione di vitale importanza per assicurare un futuro prospero alla conoscenza e, più estesamente, alla cultura. Obiettivo, questo, capitale anche nella ricerca filosofico-naturale promossa da Galilei che al pari della fenomenologia trascendentale di Husserl non teme ma anzi esorta a *mettere fra parentesi* i prodotti vuoti e sterili della tradizione. Nell'ottica di Galilei, però, l'atteggiamento da applicare di fronte al mondo culturale per assicurarne durata e attendibilità non attinge dall'unità teoretico-trascendentale, che è al contempo anche normativa, ma dalla sintesi scientifico-matematica: due posizioni diverse che tuttavia condividono una medesima volontà di verità che contrassegna le menti libere e rivoluzionarie delle quali Husserl e Galilei sono stati rappresentanti straordinari, anime immortali della storia del pensiero.

⁵² NICOLETTA GHIGI, *Il Galileo di Husserl ne La crisi delle scienze europee*, in «Aoristo», vol. 4, n. 2, Toledo, 2021, p. 133.

⁵³ Ivi, p. 85.

Riassunto Il saggio analizza ma rilegge la critica di Edmund Husserl a Galileo Galilei, “genio che scopre e nasconde”. L’idealizzazione galileiana, fondando la scienza sulla natura matematica, ha occultato la *Lebenswelt* (mondo-della-vita); la matematizzazione, riducendo la realtà a quantità calcolabile, ne ha rimosso il senso soggettivo originario. La fenomenologia trascendentale è invocata da Husserl come unica possibilità per riscoprire l’evidenza della *Lebenswelt* e affrontare la crisi delle scienze europee.

Abstract The essay analyses and reinterprets Edmund Husserl’s criticism of Galileo Galilei, “the genius who discovers and conceals”. Galileo’s idealisation, basing science on mathematics, obscured the *Lebenswelt* (world-of-life); mathematisation, reducing reality to calculable quantities, removed its original subjective meaning. Transcendental phenomenology is invoked by Husserl as the only possibility for rediscovering the evidence of the *Lebenswelt* and addressing the crisis in European science.

“Tutto è Dao”. Una riformulazione delle nostre idee e del nostro approccio nei confronti dell’ambiente attraverso una prospettiva daoista

Sara Francescato

1. Introduzione: il ruolo della filosofia nella sfida ambientale

La questione ambientale è senza dubbio una tra le più pressanti e complesse del nostro tempo. È ormai assodato dalla comunità scientifica che l’attività antropica rivesta un ruolo cruciale nell’insorgenza di fenomeni climatici sempre più estremi e nel degrado ambientale¹. Simili fenomeni scaturiscono dallo sfruttamento delle risorse e dall’inquinamento dell’ambiente naturale, pratiche che hanno raggiunto un livello di scala planetaria nell’ultimo secolo. Per usare le parole di Martin Heidegger (1889-1976), l’uomo oggi giorno ha ridotto la natura a «un gigantesco distributore di benzina, una fonte di energia per la moderna tecnologia e l’industria»². Su tali logiche di sfruttamento è radicato il nostro vivere quotidiano, nonché lo sviluppo e il mantenimento della nostra società, in una dinamica paradossale che trova nello sfruttamento e deterioramento dell’ambiente le ragioni della sua stabilità

¹ Gli studi più recenti al riguardo sono: KRISTA F. MYERS, PETER T. DORAN, JOHN COOK, JOHN E. KOTCHER AND TERESA A. MYERS, *Consensus revisited: quantifying scientific agreement on climate change and climate expertise among Earth scientists 10 years later*, in «Environmental Research Letters», XVI, 10, 2021, pp. 1-10: 8-9; MARK LYNAS, BENJAMIN Z. HOULTON, SIMON PERRY, *Greater than 99% consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific literature*, in «Environmental Research Letters», XVI, 11, 2021, pp. 1-7: 6.

² MARTIN HEIDEGGER, *Gelassenheit*, Pfullingen, Günther Neske, 1960, p. 20, traduzione mia.

e sviluppo. Come, dunque, possiamo affrontare una crisi come quella ambientale, la più pressante e complessa del nostro tempo, che coinvolge l'esistenza umana a tutto tondo e le cui dinamiche dannose risultano, al contempo, fortemente radicate nella nostra quotidianità? E soprattutto, che contributo può dare la filosofia in tal senso?

L'analisi che qui di seguito viene proposta prende in esame il problema ambientale da un punto di vista prettamente filosofico e intende agire a livello di quell'ambito che pertiene alla filosofia, ovvero l'ambito dei concetti e delle idee. L'operazione così condotta intende situarsi a monte del pensiero, e non a valle, come accade quando alla filosofia viene riservato un ruolo di mero supporto e chiarificazione di ciò che le scienze hanno già espresso. L'obiettivo dell'analisi è quello di riflettere sui presupposti insiti nella nostra concezione di natura e della stessa relazione uomo-natura, che condizionano il nostro agire pratico nei confronti dell'ambiente in cui ci troviamo ad abitare³. Proprio attraverso quest'opera di riflessione e riformulazione di concetti, la filosofia può dare il proprio contributo rispetto alla crisi ambientale che affligge la nostra epoca.

Nello specifico, l'obiettivo di questo saggio è quello di problematizzare la prospettiva prettamente antropocentrica del nostro rapporto con la natura, supportata a sua volta da una concezione riduzionista della natura stessa, promuovendo l'assunzione di una prospettiva più consapevole ed efficace nell'affrontare la crisi ambientale. Durante il corso dell'analisi, viene avanzata l'argomentazione che le radici di tale concezione riduzionista si ritrovino all'interno sia della tradizione biblica sia nel pensiero scientifico di epoca moderna: sebbene antitetiche sotto alcuni punti di vista, entrambe le tradizioni di pensiero promuovono una concezione del rapporto uomo-natura di tipo antro-

3 «I concetti che regolano il nostro pensiero non riguardano solo il nostro intelletto, ma regolano anche le nostre attività quotidiane, fino nei minimi particolari; essi strutturano ciò che noi percepiamo, il modo in cui ci muoviamo nel mondo e in cui ci rapportiamo agli altri. Il nostro sistema concettuale gioca quindi un ruolo centrale nella definizione delle nostre realtà quotidiane», (cfr. GEORGE LAKOFF, MARK JOHNSON, *Metafora e vita quotidiana*, trad. it. Patrizia Violi, Milano, Bompiani, 2005, p. 22).

pocentrico, che riflette al suo interno la dicotomia soggetto-oggetto, concezione alla base dell'oggettificazione e allo sfruttamento della natura stessa da parte dell'uomo e dell'attuale crisi climatica. Al fine di riformulare tale concezione del rapporto uomo-natura, si intende ricorrere a risorse teoretiche provenienti da una cultura che ha conosciuto una storia e uno sviluppo *differenti* da quella europea occidentale – ovvero la cultura cinese – e in particolare alle risorse offerte dal daoismo filosofico, indagando se la diversa cornice concettuale e l'assenza dei medesimi presupposti riduzionistici che hanno condizionato la prospettiva occidentale fino ad oggi possano contribuire efficacemente alla ridefinizione del nostro rapporto con l'ambiente. Come *trait d'union* tra il campo orientale e occidentale, la presente analisi si sofferma sui concetti di *deep ecology* formulata dal filosofo Arne Næss (1912-2009) e di *mesologia* di Augustin Berque (1942-presente), attraverso i quali i due autori hanno tentato di riformulare la concezione antropocentrica della natura promuovendo un punto di vista su di essa più ampio e omnicomprensivo, ricorrendo a loro volta a risorse provenienti dalle sfere culturali cinese e giapponese.

Le logiche di sfruttamento dell'ambiente alle quali assistiamo, che proseguono tutt'ora nonostante contribuiscano in modo significativo all'alterazione degli equilibri ambientali che consentono la vita sul nostro pianeta, presuppongono una concezione della natura come oggetto di sfruttamento, distinta dal soggetto che opera questo sfruttamento, ovvero la razza umana. Il concetto di separazione di due ambiti chiaramente distinti – quello naturale e quello umano – è fondamentale in questa logica, in quanto permette di perpetrare lo sfruttamento con la convinzione che questo non influisca negativamente e in modo diretto nella sfera umana. Una simile prospettiva che si regge su una chiara logica di contrapposizione soggetto-oggetto, che identifica e astrae i due termini come due enti chiaramente definibili e distinguibili, e che piega l'uno alle logiche dell'altro, comporta un'inevitabile restrizione del punto di vista sul mondo, che si rivela inefficace e dannoso per affrontare problematiche ampie e interconnesse come quelle ambientali. Aprire e ampliare i concetti di “uomo” e “ambiente”, concepirli non come enti a sé stanti e autosufficienti, ma il primo come

“centro relazionale” che intrattiene relazioni di interdipendenza, influenza e adattamento con gli altri organismi, o “centri relazionali”, e il secondo come quel campo nel quale queste relazioni tra organismi si esplicano e che a sua volta si rapporta con essi, comporta lo sviluppo di un approccio più efficace nell'affrontare le radici alla base del problema ambientale. In questo senso, come viene illustrato nella sezione finale dell'articolo, il concetto di Dao si presta bene a quest'opera di riformulazione, in quanto attraverso di esso è possibile pensare in modo efficace il rapporto uomo-natura in senso interrelato e interdipendente.

2. Le radici della concezione riduzionistica della natura

A partire dalla logica di sfruttamento e di appropriazione che sta alla base dell'attuale sistema economico e che rappresenta la causa dell'odierna crisi climatica, emerge una concezione di “natura” appiattita contro i bisogni e le necessità umane. Essa viene intesa come una *commodity*, un bene esterno alla sfera dell'umano, da sfruttare e da cui trarre profitto o da modificare per meglio soddisfare le necessità dell'uomo. È qui ravvisabile una chiara dinamica tra due opposti, che vede un soggetto agente, l'uomo, che agisce sull'ambiente naturale in cui vive e l'oggetto del suo agire. Tale relazione è nettamente sbilanciata nei confronti dell'uomo, soggetto agente, il quale modifica la natura secondo i suoi bisogni e quindi interpreta la propria relazione con il mondo naturale, oggetto del suo agire, in termini di controllo, dominio, manipolazione. Senza avere pretese di esaustività riguardo a un argomento di così vasta portata come è quello della formazione del concetto di natura e del rapporto uomo-natura all'interno della cultura occidentale, è possibile individuare due ambiti principali entro cui la concezione riduzionistica della natura all'interno della relazione dicotomica uomo-natura si è sviluppata: la tradizione giudaico-cristiana e il pensiero scientifico moderno. Diversamente dalla concezione della relazione uomo-natura nel mondo greco antico, nella quale l'essere umano è concepito come parte integrante del mondo naturale, partecipe della ciclicità armonica della natura e colpevole di ὑβρις nel momento in

cui ne infrange i limiti, mentre la natura stessa viene concepita come quell'intero di cui l'uomo prende parte ma non ne è dominatore, nella tradizione giudaico-cristiana avviene un cambiamento fondamentale: in essa, l'uomo riveste un ruolo di primo piano nel creato, essendo colui a cui Dio conferisce la facoltà di governare su di esso. Come possiamo leggere nel primo dei due racconti della creazione presenti nel Libro della Genesi: «Dio disse: 'Facciamo l'uomo a nostra immagine, secondo la nostra somiglianza: dōmini sui pesci del mare e sugli uccelli del cielo, sul bestiame, su tutti gli animali selvatici e su tutti i rettili che strisciano sulla terra'»⁴.

Il secondo racconto della creazione, invece, pone l'accento sul procedere gerarchico della creazione da parte di Dio: partendo dall'uomo e procedendo con le piante, gli animali e infine la donna. Adamo viene collocato da Dio nel giardino dell'Eden, affinché se ne prenda cura e lo faccia prosperare. L'uomo è quindi il protagonista e ordinatore del creato, il primo nella gerarchia degli esseri e colui che ordina il creato dando nomi agli esseri creati da Dio:

Allora il Signore Dio plasmò dal suolo ogni sorta di animali selvatici e tutti gli uccelli del cielo e li condusse all'uomo, per vedere come li avrebbe chiamati: in qualunque modo l'uomo avesse chiamato ognuno degli esseri viventi, quello doveva essere il suo nome. Così l'uomo impose nomi a tutto il bestiame, a tutti gli uccelli del cielo e a tutti gli animali selvatici⁵.

Il passaggio illustra qui la forza ordinatrice e dominatrice della parola: l'atto di nominare non si dimostra un gesto neutro, ma gesto potentissimo di imposizione della propria prospettiva sulle cose. Dietro alle parole, all'uso del linguaggio si nasconde un intero portato culturale e *forma mentis*. In questo senso l'atto di nominare ha il potere di creare la cosa nominata, ovvero di crearla nell'universo di senso in

⁴ *La Sacra Bibbia*, a cura della Conferenza Episcopale Italiana (CEI 2008), Firenze, Edimedia, 2015, Gen. 1:26.

⁵ *Ivi*, Gen. 2:15-20.

cui la pone. Per citare le parole di George Steiner (1929-2020), scrittore saggista ebraista, nella sua opera intitolata *Dopo Babele* (1975):

La volgata dell'Eden conteneva, sebbene fosse solo in sordina, una sintassi divina: capacità di affermazione e di denominazioni analoghe alla dizione stessa di Dio, in cui il semplice nominare una cosa era la causa necessaria e sufficiente al suo essere. Ogni volta che l'uomo parlava egli ripeteva, mimava, il meccanismo nominalistico della creazione. Donde il significato allegorico dell'azione di Adamo che dà un nome a tutte le forme viventi: 'E in qualunque modo Adamo chiamasse ogni creatura vivente, quello era il suo nome'⁶.

Nelle storie della creazione presenti nel Libro della Genesi, l'uomo viene rappresentato come il sovrano e allo stesso tempo il pastore del creato, responsabile di fronte a Dio del suo operato. Il suo ruolo è centrale: egli è ritratto da una parte come dominatore della natura e dall'altra colui che gestisce la natura. Nonostante alcuni studiosi abbiano argomentato a favore di questo secondo ruolo attribuito all'uomo, ponendo l'accento sul concetto di *stewardship*⁷, che rimanda a

⁶ GEORGE STEINER, *Dopo Babele, Aspetti del linguaggio e della traduzione*, trad. it. Ruggero Bianchi e Claude Béguin, Milano, Garzanti, 2004, p. 95.

⁷ «A positive counterpart to the argument that the Genesis text does not itself promote aggressive human domination of nature is the proposal that the notion of dominion is properly understood as a call to responsible stewardship. Indeed, the theme of stewardship has become one of the most prominent motifs in attempts to recover a 'green' message from the Bible, to argue that the Bible itself promotes care of creation», DAVID G. HORRELL, *Ecological Hermeneutics: Origins, Approaches, and Prospects*, nell'opera collettiva *The Oxford Handbook of The Bible and Ecology*, a cura di Hilary Marlow, Mark Harris, New York, Oxford University Press, 2022, pp. 19-34: 21. Si veda anche la distinzione che Martin Meganck evidenzia tra i termini ebraici *radah* e *kabash*, presenti in Genesi 1:26-28, che rimandano a una dominazione oppressiva, e i termini *'avad* e *shamar*, presenti in Genesi 2:15, che rimandano invece all'atto di coltivare e preservare, (cfr. MARTIN MEGANCK, *Lynn White Revisited: Religious and Cultural Backgrounds for Technological Development*, nell'opera collettiva *Engineering, development and philosophy: American, Chinese, and European Perspectives*, a cura di Steen Hyldgaard Christensen, Carl Mitcham, Bocong Li, Yanming An Dordrecht, Springer Science & Business Media, 2012, pp. 379-395: 385).

concetti quali “amministrazione” e “custodia” della natura, al fine di dimostrare come anche nella Genesi emerga un appello alla salvaguardia dell’ambiente, non viene problematizzato il ruolo stesso di centralità che il testo biblico attribuisce all’uomo, sia esso declinato nella forma estrema di dominatore della natura o in quello più conciliante di amministratore del creato.

Con il sopraggiungere dell’epoca moderna e attraverso la rivoluzione scientifica, si afferma una concezione calcolante e quantificante del rapporto con il tempo e lo spazio, e di conseguenza muta anche la concezione che l’uomo ha della natura: essa viene interpretata come un meccanismo dotato di proprie leggi che all’uomo non resta che scoprire attraverso l’indagine scientifica rigorosa, per coglierne l’intimo funzionamento e giungere così a dominarla. «Che il genere umano si riappropri del diritto sulla natura che gli appartiene per lascito divino»⁸ scrive Francis Bacon nella sua opera *Novum Organum* (1620), ponendo l’attività scientifica di studio e dominio della natura in diretta continuità con il ruolo di dominio sulla natura attribuito all’uomo da Dio nella Genesi. Egli ritiene che l’uomo si stia ormai aprendo la via verso le «camere segrete»⁹ della natura, le leggi che ne regolano l’intimo funzionamento, attraverso l’indagine rigorosa e le scoperte dischiuse dalla scienza. Senza tali conoscenze scientifiche e la mancata padronanza del linguaggio matematico in cui è scritto l’Universo, l’uomo è altrimenti condannato – scrive Galileo Galilei (1564-1642) ne *Il Saggiatore* (1623) – ad «aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto»¹⁰. Pochi anni più tardi, nella sua opera *Discorso sul Metodo* (1637), Cartesio enuncia il progetto di conquista e dominio della natura da parte della scienza e della tecnica moderna:

8 «Let the human race recover that right over nature which belongs to it by divine bequest», FRANCIS BACON, *The New Organon*, trad. ing. James Spedding, Wokingham, Dodo Press, 2008, p. 67, traduzione mia.

9 Ivi, p. 74, traduzione mia.

10 GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*, prefazione di Giulio Giorello, a cura di Libero Sosio, Milano, Feltrinelli, 1992, p. 38.

Esse [le nozioni generali di fisica], infatti, mi han fatto vedere ch'è possibile pervenire a conoscenze utilissime alla vita; e che, invece di quella filosofia meramente speculativa che s'insegna nelle scuole, se ne può trovare una pratica, per la quale [...] renderci così quasi padroni e possessori della natura¹¹.

Da tutti questi passaggi, risulta così delineato uno specifico genere di rapporto tra l'uomo e la natura che vede da una parte la preminenza dell'uomo, soggetto agente che si serve della sua razionalità come strumento di dominio della natura, e dall'altra la natura ridotta ad oggetto, misurabile e quantificabile, attraverso un processo di riduzionismo che la scompone in nozioni semplici ed evidenti, e che fa capo all'esigenza di raggiungere una conoscenza certa ed esatta della natura. Presa coscienza di tali presupposti riduzionistici che operano alla base della tradizione del pensiero occidentale, l'intento è ora quello di metterli in discussione a partire dal confronto con un pensiero sviluppato sì a partire da premesse e un ambiente culturale differente.

3. "Onnicomprensività" e "così-è, da sé": riformulare l'idea di natura attraverso il concetto di Dao

La concezione che emerge del rapporto uomo-natura che abbiamo qui ricostruito, passando attraverso la tradizione giudaico-cristiana e il pensiero scientifico moderno, è caratterizzata da una marcata dicotomia soggetto-oggetto e da un approccio riduzionistico. È proprio tale concezione che Arne Næss (1912-2009) individua come uno dei presupposti alla base dell'odierna crisi ambientale. Nel riepilogo della lezione tenuta alla "3rd World Future Research Conference" a Bucharest nel 1972, intitolata *The Shallow and the Deep, Long-Range Ecology Movement*, Næss espone i punti che caratterizzano la *deep ecology*. Il primo punto recita:

¹¹ RENÉ DESCARTES, *Discorso sul Metodo*, a cura di Armando Carlini, Bari, Laterza, 1974, p. 124.

1) Rifiuto dell'immagine dell'“uomo collocato nell'ambiente” a favore dell'immagine relazionale del campo totale. Gli organismi [concepiti] come nodi della rete biosferica o campo di relazioni intrinseche. Una relazione intrinseca tra due cose A e B è tale per cui la relazione fa parte delle definizioni o costituzioni di base di A e B, cosicché, senza la relazione, A e B non sono più le stesse cose. Il modello del campo totale dissolve non solo il concetto di “uomo collocato nell'ambiente”, ma ogni concetto monolitico di “cosa collocata nell'ambiente”, ad eccezione di quando si parla a un livello superficiale o preliminare di comunicazione¹².

L'ecologia profonda rifiuta quindi l'immagine di una umanità che si percepisce semplicemente inserita nell'ambiente – rispetto al quale si individua come nettamente distinta – a favore dell'*immagine del campo totale e relazionale*, all'interno del quale gli organismi vengono concepiti come nodi di una rete di relazioni intrinseche e sono tali proprio in virtù delle relazioni che intrattengono tra di loro. In quest'ottica, ogni organismo non esiste in modo autosufficiente come ente individuato, ma direttamente come “centro di relazioni” a sua volta in un rapporto di scambio reciproco con gli altri organismi, o “centri di relazioni”, che abitano l'ambiente stesso, concepito come campo relazionale. Questo genere di relazioni sono da intendersi come rapporti di interdipendenza, influenza e reciproco adattamento, e concorrono a formare e modellare incessantemente gli organismi e l'ambiente. Ciò è riscontrabile, ad esempio, nel processo di adattamento di un organismo che si innesca quando esso si relaziona con l'ambiente che lo circonda e con gli altri organismi che lo abitano – pensiamo alla fisionomia di un pesce, dotato di branchie e pinne utili a muoversi nell'ambiente acqua-

12 «Rejection of the man-in-environment image in favour of the relational, total-field image. Organisms as knots in the biospherical net or field of intrinsic relations. An intrinsic relation between two things A and B is such that the relation belongs to the definitions or basic constitutions of A and B, so that without the relation, A and B are no longer the same things. The total-field model dissolves not only the man-in-environment concept, but every compact thing-in-milieu concept – except when talking at a superficial or preliminary level of communication» (ARNE NÆSS, *The Shallow and the Deep, Long-Range Ecology Movement*, in «Inquiry», XVI, 1, 1972, pp. 95-100: 95, traduzione mia).

tico – o se vogliamo nel tipo di sostentamento che un organismo trova nell'ambiente in cui vive, che può determinare mutamenti morfologici nello stesso organismo. Come lo stesso Næss afferma nel suo testo *Ecology, community and lifestyle*: «Gli organismi e l'ambiente non sono due cose separate – se un topo fosse collocato nel vuoto assoluto, non sarebbe più un topo. Gli organismi presuppongono l'ambiente»¹³.

In questo modo, viene a dissolversi l'idea di qualsiasi concetto monolitico di organismo “contenuto” inserito in un ambiente “contenitore”, a favore di una prospettiva che prende in considerazione assieme all'elemento stesso – sia esso un organismo o l'ambiente – anche le dinamiche relazionali di interdipendenza, influenza e adattamento, che concorrono a renderlo tale.

Alla posizione proposta dalla *deep ecology* di Næss, fa eco la proposta di Augustin Berque (1942-presente): egli, nel suo intervento intitolato *Subjecthood and Nature*, tratta il concetto di soggettività riferendosi al rapporto che i giapponesi intrattengono con il loro *milieu* (*fūdo* 風土). Entrando in dialogo con il pensatore giapponese Watsuji Tetsuro (1889-1960) e il suo concetto di *fudosei* (風土性), che Berque traduce con *médiance*, “medianza”, egli avverte il limite delle tradizionali categorie di pensiero occidentali nel concepire il rapporto uomo-natura:

Ben presto sentii che non potevo trattarlo all'interno della sola cornice del paradigma classico occidentale moderno, i cui due pilastri sacri sono la natura come macchinario oggettivo da un lato, e dall'altro il cogito trascendente (l'auto-istituentsi “penso, dunque sono” del soggetto moderno), con il correlativo dualismo tra soggetto e oggetto. Da qui, ho cercato di concepire nuovamente la relazione tra natura e soggettività dal punto di vista della mesologia ([*kansekaigaku*] 環世界学, che rispecchia la traduzione giapponese della *Umweltlehre* di Uexküll)¹⁴.

¹³ ID., *Ecology, community and lifestyle. Outline of an Ecosophy*, traduzione a cura di David Rothenberg, Cambridge, Cambridge University Press, 1989, p. 56.

¹⁴ «I soon felt that I could not handle it within the sole frame of the modern classical Western paradigm, the two sacred pillars of which are nature as an objective machinery on the one hand, and on the other hand a transcendent cogito (the self-instituting “I think, therefore I am” of the modern subject), with the correlative

Berque denuncia la rigidità entro cui il paradigma moderno occidentale costringe a concepire il rapporto uomo-natura, il primo identificato con il *cogito* cartesiano trascendente, il soggetto moderno auto-imponentesi, e la seconda interpretata come un meccanismo che segue regole oggettive. A questa rigida dicotomia soggetto-oggetto fa da contraltare la relazionalità che emerge dal concetto giapponese *fudosei*, che Watsuji definisce «momento strutturale dell'esistenza umana»¹⁵, ovvero quella relazione tra l'individuo e il suo *milieu* di cui l'esistenza umana è prodotto. Il carattere dinamico di questa relazione spinge Berque ad accostare al termine *médiance*, un ulteriore neologismo con cui rendere il concetto di *fudosei*, ovvero il termine “traiettoria”, volto ad esprimere quel processo tramite cui la medianza dell'esistenza umana trae origine¹⁶. Dal concetto di *fudosei* emergono riferimenti alle accezioni del “tra”, del “mezzo”, in merito al rapporto tra esseri viventi e il loro ambiente, e invitano così a concepire l'ambiente da un punto di vista non dicotomico, ma capace di considerare e “portare assieme” entrambi i termini della relazione concepéndoli in una dinamica di reciproca influenza e interdipendenza.

L'accento posto da questi autori sul tema della relazionalità che lega l'uomo all'ambiente ci consente di prefigurare un diverso rapporto tra uomo e natura, nonché di porre in discussione la concezione fortemente dicotomica di tale rapporto. Ponendoci sulla scia di questo percorso di riformulazione, risulta utile rivolgersi a una cultura sviluppata secondo presupposti del tutto diversi da quella occidentale, ovvero la cultura cinese, e servirsi delle risorse di pensiero che essa offre. Essa, come afferma François Jullien (1951-presente), filosofo francese che si

dualism between subject and object. From thereon, I set about trying to conceive anew of the relation between nature and subjecthood from the *point of view of mesology* (環世界学, as the Japanese translation of Uexküll's *Umweltlehre*)» (AUGUSTIN BERQUE, *Subjecthood and Nature*, International Symposium *Japanese ecology and its conflicting edges*, Centre européen d'études japonaises d'Alsace, Colmar, 21-23 novembre 2015, p. 3, traduzione mia).

¹⁵ *Ibidem.*

¹⁶ *Ibidem.*

è dedicato allo studio del pensiero greco e in seguito a quello cinese proprio per indagare l'impensato del pensiero greco, può rappresentare quell'*eterotopia*¹⁷, quella cornice differente, in grado di produrre uno spaesamento e farci uscire dai presupposti che determinano il nostro pensiero. In questo caso, essa potrebbe offrire una valida opportunità per ripensare al modo consueto in cui concepiamo il nostro rapporto con la natura. Scrive Jullien: «Anche se per me la “Cina” non è mai stata un luogo di utopia essa non cessa di tornarmi utile per la sua “eterotopia”: non perché quello che vi scopro sia necessariamente diverso (diffido particolarmente dalla tendenza troppo diffusa a voler relegare il cinese nel ruolo dell'Altro), *ma semplicemente perché la sua cornice di partenza è differente*»¹⁸.

Tenendo a mente le parole di Jullien, il proposito è quello di avvicinarci alle risorse che il pensiero cinese mette a disposizione senza instaurare una netta dicotomia tra il nostro campo e quello cinese, – ponendo la Cina nel ruolo dell'Altro per antonomasia – ma accostandoci ad esso in quanto ambito culturale determinatosi secondo presupposti differenti rispetto al nostro. Proprio in virtù di tale cornice differente, il pensiero cinese rappresenta una preziosa opportunità per indagare le possibilità di una riformulazione del nostro modo tradizionale di concepire il rapporto uomo-natura.

A questo proposito intendo riferirmi a un concetto in particolare, ovvero il concetto daoista di Dao (道), traducibile come “la Via”. Il Dao,

¹⁷ Il termine “eterotopia” deriva dalla riflessione di Michel Foucault in *Le parole e le cose*: «Le eterotopie inquietano, senz'altro perché minano segretamente il linguaggio, perché vietano di nominare questo e quello, perché spezzano e aggrovigliano i luoghi comuni, perché devastano anzi tempo la ‘sintassi’ e non soltanto quella che costruisce le frasi, ma quella meno manifesta che fa ‘tenere insieme’ (a fianco e di fronte le une alle altre) le parole e le cose», (MICHEL FOUCAULT, *Le parole e le cose. Un'archeologia delle scienze umane*, trad. it. a cura di Emilio Panaitescu, Milano, Rizzoli, 1967, pp. 7-8).

¹⁸ FRANÇOIS JULLIEN, *Processo o Creazione. Introduzione al pensiero dei letterati cinesi*, trad. it. Edi Pasini e Mario Porro, Parma, Pratiche, 1991, p. 278, cit. da R. RIGONI, *Tra Cina ed Europa. Filosofia dell'écart ed etica della traduzione nel pensiero di François Jullien*, Milano-Udine, Mimesis, 2014, p. 40.

formulato all'interno della dottrina del daoismo delle origini, i cui principali testi di riferimento sono il *Daodejing* e lo *Zhuangzi* (IV-III secolo a.C.), rappresenta il principio omnicomprensivo e immanente a partire dal quale tutti gli esseri, dotati di forma e quindi limitati e parziali, si generano per differenziazione, e all'interno del quale, allo stesso tempo, restano costantemente compresi e riuniti. Il Dao è descritto come il grande processo cosmico che si articola secondo una logica polare, che vede l'alternarsi di due termini opposti ma complementari, l'alternanza dinamica degli elementi *yin* (陰) e *yang* (陽). Anche gli esseri che costituiscono il reale si generano e mutano attraverso una serie di trasformazioni regolate dalla medesima alternanza dinamica: per questo vengono concepiti non come enti statici e oggettificati, ma come processi interrelati tra loro. L'idea di realtà che emerge dalla concezione daoista è quella di una realtà composta non da enti individuati, ma da un sistema di processi posti in continuità, in costante relazione e trasformazione:

Chiunque al mondo riconosce del bello la bellezza, ed ecco, dunque, la bruttezza; | chiunque riconosce la maestria di chi maestro è, ed ecco, allora, l'inettitudine. | È così che 'presenza' e 'assenza' l'un l'altra genera, 'difficile' e 'facile' l'un l'altro completa, | 'lungo' e 'breve' l'un l'altro misura, 'alto' e 'basso' l'uno l'altro compensa, | 'timbrì' e 'note' l'uno l'altro armonizza, 'avanti' e 'dietro' l'uno l'altro segue¹⁹.

In continuità con questo tema, nel *Daodejing* è presente una forte critica al linguaggio:

Nel principiare a 'dividere e controllare', s'hanno i nomi: | assegnati i nomi, | dovremmo pur sapere che il tempo di fermarsi è giunto, | [poiché] a sapere quando fermarsi, i pericoli si scansano. | Il Dao, diremmo, è per l'intero mondo, | quel che fiume e mare sono per il torrente, nel gorgo²⁰.

¹⁹ LAOZI, *Daodejing. Il Canone della Via e della Virtù*, a cura di Attilio Andreini, Torino, Einaudi, 2018, stanza II, p. 9.

²⁰ Ivi, stanza XIX, p. 51.

I nomi rompono la continuità tra le processualità del reale istituiscono divisioni, “ritagliano” in modo inevitabilmente arbitrario la realtà e vi impongono un punto di vista parziale. Una simile prospettiva si pone in contrasto con il racconto biblico della creazione, che ritrae l’atto della nominazione degli esseri compiuto da Adamo e promuove l’imposizione di un punto di vista parziale e riduttivo sulla natura. Il daoismo invita a prendere coscienza dell’intrinseca parzialità delle suddivisioni operate dalla logica umana e a non ipostatizzarle, al fine di mantenersi entro una prospettiva quanto più possibile omnicomprensiva che si avvicini alla dimensione Dao. Il procedere del Dao non è caratterizzato da alcuna regola o partito preso, bensì dal proprio agire spontaneo che dà la regola a se stesso. Tale “spontaneità” viene espressa in cinese dal termine *ziran* (自然), che richiama anche il concetto di “naturalezza”, e quindi di “natura”: «L’uomo fa della Terra il proprio modello, | la Terra lo fa del Cielo, | il Cielo, del Dao, | e il Dao ha per modello ciò che così-è, da sé»²¹. Il Dao è quella dimensione in cui si dà lo spontaneo e naturale generarsi dei fenomeni naturali, senza che vi siano scopi o leggi esterne a determinarne l’agire, e che abbraccia e racchiude allo stesso tempo uomo e natura (Terra-Cielo) in quella che è non una dicotomica contrapposizione, ma una dimensione armonica e unitaria. Allo stesso modo dei “nomi”, parziali e riduttivi, i termini della relazione uomo-natura non sono colti come realtà auto sussistenti e contrapposte, bensì come ripartizioni e allo stesso tempo elementi di quella realtà unitaria omnicomprensiva, priva di regole o comandi esterni, che è la dimensione del Dao. Onnicomprensività, non ipostatizzazione e spontaneità sono i concetti che la prospettiva daoista ci offre nella sua concezione del rapporto uomo-natura, una relazione concepita così non in modo dicotomico ma armonico, unitario e interrelato. Questa prospettiva si dimostra utile a ridefinire il nostro concetto di natura in un modo che ricalca più fedelmente il suo manifestarsi e coinvolge l’uomo in un modo del tutto diverso. La vita e l’agire umano, secondo la prospettiva daoista, non sono altro che uno tra i tanti processi che animano il reale e che fanno parte del più gran-

²¹ Ivi, stanza XXV, p. 67.

de processo della natura. Le uniche azioni umane che in fin dei conti hanno senso sono quelle che sono in accordo con il fluire della Natura – il Dao o la Via. Per questo, la prospettiva daoista rigetta i presupposti e le idee umane, per definizione parziali e che rompono con il fluire dei processi naturali. In quest'ottica, l'uomo è spinto ad armonizzarsi con la prospettiva omnicomprensiva del Dao e a conformarsi al suo agire spontaneo e incondizionato, senza focalizzarsi su punti di vista tipicamente umani, per definizione parziali e limitati.

Alcuni autori si pongono in modo critico verso la possibilità di ritrovare nozioni utili all'ambientalismo nel pensiero daoista, ad esempio esprimendo perplessità su come il pensiero daoista possa offrire un contributo nell'affrontare le problematiche ambientali odierne, che oggi hanno raggiunto una dimensione globale e che hanno determinato una consapevolezza dell'ambiente in cui viviamo radicalmente diversa da quella degli antichi²². Oppure, evidenziando come il daoismo non abbia molto da offrire nella ridefinizione del concetto di natura in relazione alle attuali problematiche ambientali, in quanto pensiero estraneo alla comprensione teleologica e scientifica del mondo che ha generato tali criticità²³. Tali critiche nei confronti della validità delle idee daoiste si rivolgono alla loro efficacia nell'affrontare direttamente le problematiche ambientali odierne, che detengono peculiarità del tutto straordinarie per ampiezza e novità nella storia umana. Sebbe-

²² «The solutions that we discover, whatever they may be, will have to be solutions that we discover for ourselves. We cannot ask thinkers of the past to help us with issues that they themselves never imagined» (PAUL R. GOLDIN, *Why Daoism is not environmentalism*, in «Journal of Chinese Philosophy», XXXII, 1, 2005, pp. 75-87: 83).

²³ «If we think about how we interact with nature instead of only trying to figure out what it is and how it is ethical, Daoist texts are able to contribute to environmentalism in a unique and valuable way. [...] But finding a clear conception of nature or ethics in either the Laozi or the Zhuangzi that would be relatable to the current environmental debate is not only difficult, but unnecessary. If we are now dealing with problems that have stemmed from an overly teleological scientific understanding of the world as being full of resources for humans to use up, then Daoism does not have much to offer» (PAUL D'AMBROSIO, *Rethinking environmental issues in a Daoist Context: Why Daoism Is and Is Not Environmentalism*, in «Environmental Ethics», XXXV, 4, 2013, pp. 407-417: 414).

ne l'utilizzo di idee daoiste possa lecitamente sollevare perplessità in questo senso al punto da venire anche rigettato, la possibilità che esso ci offre per un cambio di prospettiva su noi stessi, sull'ambiente, e sul modo di concepire il rapporto uomo-natura, in quanto si situa in una cornice culturale *diversa*, non va sottovalutata ai fini del confronto con la crisi ambientale. In altre parole, nonostante le critiche riguardo all'efficacia della prospettiva daoista come strumento diretto per affrontare le problematiche ambientali odierne, uniche nel loro genere, le idee daoiste possono comunque giocare un ruolo nel riformulare la *radice* da cui scaturiscono tali problematiche, agendo quindi non direttamente nel campo delle scienze ambientali, bensì a livello della sfera del pensiero umano e dei presupposti che determinano la prospettiva e l'agire dell'uomo sul mondo.

4. Conclusione

Concependo l'uomo come interrelato a tutti gli altri processi che animano il reale, nella prospettiva daoista viene così a mancare la centralità di un *soggetto*, l'uomo, che vede e percepisce l'ambiente che lo circonda come un *oggetto*, qualcosa di diverso e distaccato da lui, come avviene nella prospettiva antropocentrica. In questa prospettiva, non è più l'uomo a dominare sull'ambiente che lo circonda ma, al contrario, è la spontanea dinamicità del sistema che viene assunta come regola. In questo modo, vengono promossi aspetti determinanti per riformulare il rapporto dell'uomo con la natura: innanzitutto, il Dao è immanente, per cui non promuove alcun tipo di gerarchia nella realtà. Tutti gli enti del reale non sono concepiti come auto sussistenti, dotati di un nocciolo, di una propria essenza che li individua e li oggettifica, sui quali l'agire umano può facilmente fare presa. Al contrario, gli enti del reale e con essi l'uomo sono concepiti come una dinamica di processi interrelati per via del susseguirsi delle trasformazioni e per la comune appartenenza al Dao. Infine, secondo uno spostamento che potremmo definire simile a quello apportato dalla rivoluzione copernicana, l'uomo non è più posto al centro del creato ma, al contrario, si configura

come parte della realtà interrelata del Dao. Ciò che questo percorso di analisi ha voluto promuovere è il confronto con concetti e idee di culture differenti, nonché la riflessione sulle loro peculiarità e punti di forza, in modo da arricchire e modificare per il meglio il nostro agire. Attraverso la meditazione della nozione di Dao, non solo abbiamo avuto la possibilità di riformulare la nostra concezione della natura e il nostro agire verso di essa attraverso le risorse messe a disposizione da questo concetto, ma, attraverso il dialogo con una cultura differente dalla nostra – che implica apertura e una momentanea sospensione dei propri presupposti – abbiamo potuto arricchire e promuovere anche la “biodiversità culturale” che anima il nostro pianeta.

Riassunto Partendo dall'analisi delle concezioni della natura e del rapporto uomo-natura che emergono da due delle tradizioni più rilevanti del pensiero occidentale – la tradizione biblica e il pensiero scientifico dell'era moderna – il presente saggio mira a riformulare le nostre concezioni tradizionali della natura attraverso un confronto con le idee sviluppate nel diverso contesto della cultura cinese. L'analisi si concentra sull'idea di Dao legata al daoismo filosofico, in quanto essa trasmette una concezione della natura e del rapporto uomo-natura, basata sulle idee di “omnicomprensività” e “spontaneità”, che intercetta alcuni aspetti critici della concezione tradizionale del rapporto uomo-natura, ovvero il primato dell'essere umano sulla natura e l'ipostatizzazione del concetto di natura in un'entità oggettiva rispetto alla quale l'uomo è chiaramente separato. Questo saggio intende offrire un contributo nell'affrontare la crisi ambientale non agendo direttamente nel campo delle scienze ambientali, ma a livello dei preconcetti che determinano il modo di pensare umano.

Abstract Starting from the analysis of conceptions of nature and the human-nature relationship emerging from two of the most relevant traditions of Western thought – the biblical tradition and the scientific thought of the modern era – this essay aims to reformulate our traditional conceptions of nature through a comparison with ideas developed within the different frame of the Chinese culture. The analysis will focus on the idea of Dao related to the philosophical Daoism, as it provides a certain conception of nature and the human-nature relationship, based on the ideas of “all-inclusiveness” and “spontaneity”, that intercepts some critical aspects of the traditional conception of the the human-nature relationship, namely the primacy of the human being over nature

Sara Francescato

and the hypostatization of the concept of nature to an objective entity with respect to which man is clearly separated. This essay aims to contribute to dealing with the environmental crisis by acting not directly in the field of environmental sciences, but at the level of the preconceptions that determine the human way of thinking.

Più largo campo di filosofare: John Wheeler, il *Liber Naturae* e l'ingegneria

Stefano Furlan

... le Livre, persuadé qu'au fond il n'y en a qu'un,
tenté à son insu par quiconque a écrit...

Mallarmé

1. Introduzione

Le grandi celebrazioni galileiane nel settembre 1964, tra Pisa e Firenze, oltre a coinvolgere studiosi delle opere del grande pisano¹, videro la partecipazione, in un evento immediatamente successivo intitolato *Natural Philosophy To-day*, di alcuni fisici di primo piano che, in qualche modo, se ne riconoscevano eredi, da Murray Gell-Mann a Viki Weisskopf, da Richard Feynman a John Wheeler. Quest'ultimo (1911-2008) è oggi noto presso un ampio pubblico per aver battezzato qualcosa di esotico come i buchi neri e per le sue visionarie prospettive come *it from bit*; nondimeno, si tratta di una presentazione grossolana e quasi caricaturale, del tutto incapace di render conto del decisivo impatto sulla scienza del secolo scorso da parte di questa personalità, come specificheremo meglio nelle pagine che seguono. Risulta inoltre chiaro che gli argomenti di cui si occupavano figure come le suddette erano alquanto distanti da Galileo, sicché, a ragion veduta, si potrebbe pensare che la loro presenza alle celebrazioni fosse sì testimonianza di una tradizione nell'indagine della natura che, in qualche modo, riconosceva in se stessa una forma di continuità plurisecolare, ma, in termini di affermazioni contenutistiche, ci si può aspettare che non portassero molto

¹ Galileo nella storia e nella filosofia della scienza, Atti del simposio internazionale di storia, metodologia, logica e filosofia della scienza, Pisa-Firenze, 14-16 settembre 1964, Firenze, Barbera, 1967.

altro oltre alla retorica celebrativa o qualche commento sull'avvenire della fisica.

Se in una certa misura fu certo così, ciò che si intende suggerire in questo breve contributo è che invece l'esempio galileiano – al di là del generico appello al solito “metodo” – abbia delle risonanze non banali con alcuni aspetti del *modus operandi* adottato da Wheeler proprio in quegli anni. Come si può già evincere dal titolo che abbiamo scelto, con il rimando alle celebri parole di elogio, da parte di Galileo, per l'Arsenale di Venezia, è in particolar modo un senso pratico e ingegneristico, oltre che un dialogo con personalità più propriamente addentro ad alcuni settori dell'ingegneria, che in Wheeler si accompagna al teorico visionario, capace di offrire idee-guida a generazioni di allievi e collaboratori. In questa tensione o, se vogliamo, in questo delicato equilibrio, si cela probabilmente uno dei fattori della ripetuta fecondità dei suggerimenti wheeleriani e, pertanto, si tratta di una dimensione che merita un'attenzione non soltanto storico-celebrativa: in ambiti dove la speculazione fisica sembra oggi aver perso contatto con la dimensione sperimentale, anche il rischio di una riflessione filosofica eccessivamente “teoreticistica”, oltre che pomposamente astrusa ed epigonale, è assai concreto. Rendersi conto che uno dei principali ispiratori delle odierne indagini alle frontiere della fisica teorica – dalla gravità quantistica ai fondamenti della meccanica dei quanti e dei suoi legami con la teoria dell'informazione – mantenesse contatti vitali con un atteggiamento genuinamente *esplorativo* della sperimentazione (ossia non soltanto confinato alla verifica controllata di ipotesi²) ed enfatizzasse anche a livello teorico, senza falsi sensi di vergogna, il carattere euristico e *in fieri* delle sue speculazioni, intorno a questioni che non di rado sono ancora oggi aperte, può perciò risultare un utile correttivo; e, di riflesso, risulta omaggiare anche alcuni tratti dell'eredità galileiana.

² FRIEDRICH STEINLE, *Exploratory Experiments. Ampère, Faraday, and the Origins of Electrodynamics*, Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, 2016.

Come più estesamente articolato altrove³, le modalità con cui una componente ingegneristica si è spesso intrecciata con la spiccata *verve* speculativa di Wheeler si sono esplicitate principalmente su quelli che per semplicità possiamo considerare come due livelli distinti (sia pur non separati). Uno è la ricerca di meccanismi di visualizzazione e comprensione anche nelle questioni più remote e, direbbe il senso comune, astratte. L'altro è appunto il sapiente dosaggio di una teoremi audace, congiunta però all'avere il polso della situazione per quanto riguarda ciò che si può concretamente realizzare con la tecnologia a disposizione; punto, questo, che, come sarà meglio illustrato nel seguito, non va banalmente confuso con una mera attenzione alle conseguenze sperimentabili, in quanto coinvolse invece una sagace rifunzionalizzazione o *exaptation* di strumenti e risorse sviluppati in contesti più strettamente tecnici. Per mostrare questa vicinanza si prenderà in considerazione, in particolare, qualche tratto del complesso cammino euristico che, in una più che decennale avventura tra gli anni '50 e '60 (quando cadde anche il quattrocentesimo anniversario della nascita di Galileo), condusse Wheeler da oppositore dei primi pionieristici risultati sui buchi neri, ancora *ante litteram*, a loro entusiasta padrino; e in seguito, a come una serie di audaci speculazioni sia andata incontro ad una serie di metamorfosi che avrebbero condotto al celebre slogan *it from bit*. Mentre rinvieremo a recenti lavori di ricostruzione storico-epistemologica per maggiori dettagli tecnici, evidenzieremo nondimeno gli snodi essenziali e sottolineeremo come, tra gli esiti di quest'avventura intellettuale, ci sia anche una rivisitazione (sia pur non del tutto esplicitata) della celebre metafora del *Liber Naturae* e dei presupposti che via via essa è andata assumendo.

³ STEFANO FURLAN, *Aesthetics of Visionaries and Engineering: John Wheeler between Black Holes and It from Bit*, in «Physis», 59, 2024, pp. 209-240.

2. «If I can't make a picture, I don't understand»: Wheeler e la visualizzazione

In uno studio sulla visualizzazione scientifica, il noto storico K. Hentschel ha sostenuto di aver scovato un *pattern* grazie alla disamina di una varietà di scienziati di diverse discipline ed epoche: da Hooke a Wheeler, ciò che queste figure avrebbero in comune, a monte delle loro strategie di visualizzazione, sarebbe un *background* ingegneristico⁴, secondo anche quanto comunicato in un'occasione dall'autore stesso a chi scrive. Da una parte sarebbe facile obiettare che, in un'arcata temporale così ampia, il significato stesso di fisica e ingegneria è variato a tal punto da render alquanto discutibile un'asserzione di questo tipo. Dall'altra, nel caso di un fisico teorico come (e dei tempi di) Wheeler, si potrebbe far notare che, per inquadrare tendenze visualizzatrici, può esser sufficiente prender in considerazione il tipo di linguaggio matematico prediletto: in questo senso, la propensione a visualizzare da parte di un matematico o di un fisico si manifesta nella preferenza per un trattamento geometrico o topologico, di contro a gusti più algebrico-analitici. Entrambe queste obiezioni colgono punti importanti; nonostante ciò, nel caso di Wheeler si può effettivamente articolare meglio una tesi simile a quella di Hentschel.

La predilezione per la visualizzazione che sarà qui affrontata va intesa su vari piani. Uno, quello più ovvio e vicino a ciò che è suggerito da Hentschel, è l'impatto che studi ingegneristici ebbero sul *modus investigandi* di Wheeler. In secondo luogo, sottolineeremo come questa esperienza lo rese attento non soltanto alla collaborazione con valenti personaggi dal retroterra ingegneristico, ma anche alle potenzialità epistemiche che, in ambiti più teorici, strumentazioni e tecniche sviluppati dapprima a fini prettamente pratici potevano dischiudere: caso principe, come si avrà modo di dire, è stato il suo precoce e lungimirante riadattamento di strumenti informatici, originariamente con scopi militari, a questioni di astrofisica. Infine, o meglio in parallelo,

⁴ KLAUS HENTSCHEL, *Visual Cultures in Science and Technology: A Comparative History*, Oxford, Oxford University Press, 2014.

c'è un livello forse più elusivo ma non meno importante, che si traduce nel “fiuto” di Wheeler per affidare a studenti e collaboratori tematiche di ricerca in ultima analisi funzionali a questioni molto ambiziose e generali, ma anche formulabili in prima istanza come concreti problemi su cui lavorare con approssimazioni e poter costruire via via. Come dichiarò nella propria autobiografia⁵,

[f]orse perché sono cresciuto in un ambiente dove risolvere problemi e ottenere risultati (così come prestare servizio) erano le virtù rispettate, che comportavano che la mente facesse qualcosa, non solo sapesse qualcosa, nei primi tempi non distinguevo tra scienza e tecnica, tra matematica e strumentazione. Sebbene al college sia finito attratto dalla scienza e dalla matematica, non ho mai perso la mia fascinazione per la tecnica e gli strumenti.

E, non meno significativamente, in uno dei suoi quaderni di lavoro degli anni '50, oggi custoditi nei suoi archivi, annotò una volta in margine a considerazioni palesemente imperfette ed euristiche: «advant[age] of training in building things out of junk, not new lumber»⁶; al di là di espressioni che suonerebbero strane in una traduzione fuori contesto, si potrebbe anche dire: l'arte di sapersi arrangiare con quel che si ha.

Posto ciò, il modo più ovvio per asserire il primo dei suddetti livelli è semplicemente quello di andare a vedere il percorso di studi di Wheeler, dove si scopre che, effettivamente, nel 1927 si iscrisse alla Facoltà di ingegneria della Johns Hopkins University di Baltimora. Per usare le sue stesse parole⁷:

All'epoca ero tanto intrigato dai congegni meccanici quanto dalla teoria atomica. Avevo divorato libri su entrambi. L'ingegneria sembrava l'unica via

⁵ JOHN A. WHEELER, *Geons, Black Holes & Quantum Foam*, New York, W.W. Norton, 2000, p. 84.

⁶ *Relativity Notebook* 3, 1954, p. 63, in John A. Wheeler Papers, «American Philosophical Society Library», Philadelphia.

⁷ JOHN A. WHEELER, *Geons, Black Holes & Quantum Foam*, cit., p. 86.

per trasformare il mio interesse generale per la scienza e per la tecnica in un modo di guadagnarmi da vivere. Nei panni di un quindicenne impegnato a farsi la propria strada nel mondo, dire “fisica” sarebbe stato come dire “far ceramiche”.

È indubbio che la fisica, soprattutto nelle sue frange teoriche, avesse ancora, all'epoca, uno *status* istituzionale ben diverso da quello di tempi più recenti, ragion per cui giova evitare grossolane retroproiezioni. Tuttavia, non bisogna neppure, almeno in questo caso, cadere nell'estremo opposto e considerare quella scelta soltanto come un irrilevante periodo di transizione in cui Wheeler, fatta dapprima una concessione alle tendenze dello *Zeitgeist*, avrebbe poi trovato la propria autentica strada altrove.

Queste non sono considerazioni di ordine meramente psicologico, in quanto è possibile mostrare come gli interessi ingegneristici di Wheeler avessero radici più lontane e, ovviamente, permanessero in seguito nel suo lavoro militare e non solo. Semplicemente considerando la composizione della famiglia, si scopre come Wheeler avesse due zii, da parte di madre, che lavoravano nell'ingegneria mineraria, uno dei quali gli fece avere istruttive esperienze, nell'estate del 1928, presso le miniere d'argento a Zacatecas, in Messico. A ciò si aggiunga la passione di Wheeler, fin da fanciullo, per preparare e scatenare esplosioni: per quanto possa sembrare a prima vista una nota non priva di ironia, essa risulterà invece un filo conduttore nelle attività successive che saranno esaminate qui di seguito. Scavando ancora più indietro, è di nuovo Wheeler stesso⁸ a informare gli interessati dell'importanza che ebbe per lui, fin da bambino, un libro di congegni, munito di ricche illustrazioni che fecero presa sulla sua immaginazione e lo guidarono nelle sue prime sperimentazioni: *Mechanisms and Mechanical Movements* di Franklin Jones⁹. Questo può sembrare il solito luogo comune a

⁸ JOHN A. WHEELER, *Geons, Black Holes & Quantum Foam*, cit., p. 82; JEREMY BERNSTEIN, *Quantum Profiles*, Princeton, Princeton University Press, 1990.

⁹ È piuttosto interessante notare come questo aspetto sia stato enfatizzato anche da PETER GALISON, *Structure of Crystal, Bucket of Dust*, in Apostolos Doxiadis, Barry

buon mercato, sentito *ad nauseam* in particolare nelle biografie di fisici d'oltreoceano, ma è interessante notare, agli scopi delle presenti considerazioni sulla visualizzazione, come Wheeler stesso ritenesse necessario, in retrospettiva, integrare e aggiungere altro a quelle esperienze. Aggiunta, si potrebbe dire qui, che si può riferire anche alla tesi di Hentschel, che in realtà lo riconosce parzialmente¹⁰. Come Wheeler dichiarò in un'intervista a Kenneth W. Ford¹¹:

F: John, una caratteristica delle tue più tarde ricerche era la magnifica abilità di disegnare figure, farne quasi una forma d'arte per trasmettere informazioni. Tale caratteristica era presente anche nei tuoi primi lavori?

W: Be', sicuramente oggi ho la sensazione di non capire quello di cui parlo, se non riesco a renderlo in un'immagine. Ma a proposito del fare disegni: ebbi la grande fortuna di seguire un corso di disegno tecnico nel mio percorso

Mazur (eds.) *Circles Disturbed: The Interplay of Mathematics and Narrative*, Princeton, Princeton University Press, 2012, pp. 52-78. Senz'altro condivisibile è l'atteggiamento di fondo, efficacemente sintetizzato nella seguente frase: «Wheeler was, quintessentially, the scientist who insistently cycled philosophical questions of meaning through the technical work. This is a mathematics set deep in the hewn-out limestone caves, far below the luminous forms of Plato's heaven» (ivi, p. 58). Tuttavia, la tesi sostenuta risulta in parte compromessa da alcune non secondarie inesattezze storiche nello sviluppo del pensiero di Wheeler (per quanto vada riconosciuto che seri lavori di ricostruzione non erano ancora in atto una decina di anni fa) e da alcuni suggerimenti fuorvianti circa l'importanza di certe idee o proposte. In particolare, questa sorta di "meccanizzazione" del modo wheeleriano di concepire la matematica funziona piuttosto bene allorché si parla degli strumenti del calcolo differenziale o di altre nozioni già sistematizzate e del loro insegnamento, mentre non pare adeguata a cogliere il carattere evocativo-visionario delle più audaci proposte euristiche di Wheeler (STEFANO FURLAN, *The Smile of Mnemosyne: John Wheeler between the History of Science and Arts*, in «Scientia», 3, 2024, pp. 41-75), tant'è che in una fase di svolta della sua carriera egli giunse persino a negare che occorresse pensare in termini di una sorta di meccanismo centrale del mondo (ALEXANDER S. BLUM, STEFANO FURLAN, *How John Wheeler Lost His Faith in the Law*, in Yemima Ben-Menahem (ed.), *Rethinking the Concept of Laws of Nature: Natural Order in the Light of Contemporary Science*, Berlin, Springer, pp. 283-322).

¹⁰ KLAUS HENTSCHEL, *Visual Cultures*, cit., p. 111.

¹¹ Intervista a John Wheeler di Kenneth W. Ford, 3 gennaio 1994, <<https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/5908-3>>.

di studi ingegneristici. Quella, tuttavia, non è esattamente la sede per creare immagini. Ricordo poi che al sabato mattina venivo mandato alla galleria d'arte in Youngstown, Ohio per un corso di pittura e disegno, e fu divertente. Mi sarebbe piaciuto portarlo avanti. E poi nell'anno trascorso a Parigi, il 1949, prendevo lezioni da un artista francese, ma non si trattava di esprimere idee in immagini: semplicemente, facevamo disegni.

Del resto, anche la menzione del libro di Jones è subito affiancata¹² da un altro titolo, *Introduction to Science*, del naturalista Arthur Thomson. Questo procedere su doppi binari, per così dire, si può riscontrare anche in seguito, in particolare se si cerca di gettare un colpo d'occhio sull'intera arcata delle attività di Wheeler. Dopo che iniziò appieno a dedicarsi alla fisica, la prima parte della sua lunga carriera, all'incirca fino all'inizio degli anni '50, si svolse in ambito principalmente nucleare, con il quale aggettivo s'intendono però ambiti molto più vasti e di frontiera, ovviamente, di quanto il termine possa evocare oggi. Quel che interessa ricordare è come Freeman Dyson, amico di lunga data di Wheeler, parlasse una volta¹³ di due diversi aspetti di quest'ultimo, manifestatisi (anche) come stili di scrittura: c'è il Wheeler prosaico, artigiano, abile *problem solver*, e c'è il Wheeler poetico, visionario spregiudicato ed eterodosso. Per esemplificare il primo, Dyson menziona la famosa collaborazione del giovane Wheeler, negli anni '30, con Niels Bohr, con cui ottenne cruciali risultati sulla fissione. È proprio grazie alla compresenza di quelle due anime in Wheeler che si è potuto avere, come si sostiene qui, quel felice connubio tra audace speculazione e solide basi, il che trova riscontro anche nella metodologia euristica di Wheeler, chiamata con un ossimoro significativo *daring conservatism*: portare alle estreme conseguenze leggi fisiche ben consolidate prima di introdurre, se proprio inevitabile, qualcosa di nuovo¹⁴.

¹² JOHN A. WHEELER, *Geons, Black Holes & Quantum Foam*, cit., p. 82.

¹³ FREEMAN DYSON, *Birds and Frogs: Selected Papers, 1990-2014*, Singapore, World Scientific Publishing, 2015, pp. 140-141.

¹⁴ Per le sue varie declinazioni, si veda STEFANO FURLAN, *Pursuitworthiness between Daring Conservatism and Procrastination: Wheeler and the Path Towards Black Holes*, in

In quanto detto pare però già esserci, tra le righe, un ulteriore punto che non va trascurato, ossia una sorta di tensione tra la vena visualizzatrice di Wheeler e l'estrema cautela, nella meccanica quantistica versione Copenaghen, dell'uso di immagini e concetti classici e intuitivi (*anschaulich*), svianti e inadeguati ad affrontare il mondo della microfisica così distante dalla nostra esperienza quotidiana. Tale tensione, di fatto, svanisce facilmente se da un lato non si casca nella faciloneria superstiziosa che ritiene che le formule della fisica rivelino direttamente, *sic et simpliciter*, com'è la "realtà", e dall'altro si raffina leggermente la nozione di immagine. Avvalersi infatti di strumenti visivi per maneggiare una teoria o risolvere problemi non comporta necessariamente che tali strumenti siano una copia mimetica di una sorta di realtà là fuori: si tratta piuttosto di strategie efficaci e utili a conseguire una comprensione più profonda delle questioni in esame¹⁵. Una considerazione, questa, di semplice buonsenso, non sempre presente tra chi parla di questi argomenti, e che si accompagna nel recente volume appena citato a un'enfasi sulla necessità di acquisire delle abilità (forse qui l'inglese *skills*, malgrado l'abuso del termine, circoscrive meglio il significato) per padroneggiare e adoperare tali tecniche di visualizzazione. In effetti, quando Wheeler o chi altri trattava il nucleo atomico secondo il modello "a goccia", per esempio, stava ricorrendo a un'immagine evocativa, un'analogia che metteva in risalto certi tratti e via discorrendo, ma che senz'altro era anche una dichiarata approssimazione. In altri termini, nel trattare problemi ed equazioni pertinenti occorre tanto competenza tecnica, un'idea degli andamenti in vari regimi o in situazioni analoghe, quanto consapevolezza e sagacità nel fare approssimazioni, che siano utili nelle circostanze specifiche e che, trascurando certi aspetti, non sacrificino troppi dettagli rilevanti e risultino vantaggiose da adoperare affinché vi sia un guadagno di comprensione. Quand'anche gli strumenti di visualizzazione diventino standardizzati e di largo uso (l'esempio ovvio per questi ambiti

«Studies in History and Philosophy of Science», 96, 2022, pp. 174-185.

15 Come sottolineato anche da HENK DE REGT, *Understanding Scientific Understanding*, Oxford, Oxford University Press, 2020.

è costituito dai diagrammi di Feynman), essi richiedono nondimeno pratica e addestramento per imparare ad avvalersene: in tutti questi sensi, di fatto, occorre acquisire *skills* per avvalersi della visualizzazione, che non sempre è qualcosa di scontato che emerge da una teoria, soprattutto in aree dove ogni senso ingenuo di visualizzazione si rivela inadeguato. I vari tratti ingegneristici su indicati possono essere annoverati tra le competenze ed esperienze acquisite da parte di Wheeler, in seguito funzionali al suo ricorrere a immagini, o se non altro all'aspirare ad averne.

Com'è facile anticipare da quanto finora già detto, i primi risultati di spicco di Wheeler, come quelli sulla fissione, si rivelarono di notevole importanza, durante il secondo conflitto mondiale, nelle applicazioni militari la cui possibilità la recente fisica nucleare aveva appunto dischiuso. Tuttavia, se nel caso di Tomonaga, Schwinger o Feynman, ossia i principali futuri artefici (assieme al già menzionato Dyson) dell'elettrodinamica quantistica, l'esperienza pratica e ingegneristica che ebbero in quel periodo li familiarizzò con tecniche matematiche che si sarebbero poi rivelate di cruciale importanza per la teoria¹⁶, nel caso di Wheeler non è facile mettere il dito su qualcosa di specifico che gli risultasse determinante in seguito, in parte anche perché il suo impegno militare non fu limitato a quel periodo eccezionale, a differenza delle altre figure menzionate, ma proseguì intensamente negli anni successivi, date le sue convinzioni sulla minaccia sovietica e la necessità di sviluppare bombe a idrogeno. È però nel contesto di tali occupazioni che Wheeler ebbe modo di fare esperienze – con il che s'intendono anche semplici associazioni intuitive, come si vedrà tra poco – e di entrare in contatto con personaggi con un piede nell'ingegneria e uno nella fisica, i quali si sarebbero rivelati di grande importanza nelle sue successive ricerche in un ambito apparentemente più distante, ossia quello della relatività generale, che Wheeler considerava l'eredità principale dell'altra grande figura che, assieme a

¹⁶ SILVAN S. SCHWEBER, *QED and the Men Who Made It*, Princeton, Princeton University Press, 1994; ADRIAN WÜTHRICH, *The Exigencies of War and the Stink of a Theoretical Problem*, in «Perspectives on Science», 26, 4, 2018, pp. 501-520.

Bohr, fu per lui come un mentore: Albert Einstein, ovviamente. Anche il modo in cui trattò (e, con grande impatto, insegnò) la relatività generale, che ribattezzò “geometrodinamica”, aveva, come si evince dal nome, una fortissima enfasi sulla dimensione geometrica della teoria, che altri invece avrebbero considerato secondaria o persino sviante¹⁷. Lo scopo più ambizioso di Wheeler, anzi, era quello di derivare, anche in risposta alla confusione derivante dalla scoperta di nuove particelle (l’esplosione del *particle zoo*), tutte le specie elementari di queste ultime a partire dalla pura geometria della relatività generale, munita però di fluttuazioni quantistiche dello spazio stesso a distanze prossime alla lunghezza di Planck: un’altra delle celebri idee di Wheeler, la *quantum foam*. Anche questo visionario tentativo pangeometrico, mantenuto se non altro come idea regolativa ultima, ha palesamente un’enfasi visiva, quantomeno a livello evocativo¹⁸.

In un’altra intervista¹⁹, Wheeler racconta di come avvenne questo suo riorientamento di interessi, che lo avrebbe portato, nel corso del ventennio 1952-1972 circa, a diventare una delle principali autorità nel campo della fisica della gravitazione e dell’immagine che essa offre dell’universo:

Ricordo che stavo tornando su un aereo dal primo test della bomba a idrogeno nel Pacifico, a Eniwetok. E poi arrivai a Honolulu, rimasi lì qualche ora, e in quel momento arrivò un’onda anomala – che nulla aveva a che fare con la bomba a idrogeno, ma con il grande terremoto in Kamchatka. Ma ho pensato a quanto piccoli siano gli sforzi dell’uomo. Anche la più grande esplosione che gli Stati Uniti abbiano mai prodotto, di cui il mio gruppo a Princeton ha fatto

¹⁷ Questa, com’è noto, era la posizione di Weinberg, autore del libro di testo “rivale” di *Gravitation* di Misner, Thorne e Wheeler. Si veda DAVID I. KAISER, *A psi is just a psi? Pedagogy, Practice, and the Reconstitution of General Relativity, 1942-1975*, in «Studies in History and Philosophy of Modern Physics», 29, 1998, pp. 321-338.

¹⁸ STEFANO FURLAN, ROCCO GAUDENZI, *The Earth Vibrates with Analogies: The Dirac Sea and the Geology of the Vacuum*, in «Studies in History and Philosophy of Science», 93, 2022, pp.163-174; STEFANO FURLAN, *The Smile of Mnemosyne*, cit.

¹⁹ JIRI BICAK, *The Art of Science: Interview with Professor John Archibald Wheeler*, in «General Relativity and Gravitation», 41, 4, 2009, pp. 679-689: 681.

il lavoro di progettazione – lavorando per e con Los Alamos – anche quella massima esplosione era mille volte più piccola, in termini energetici, di un uragano, mille volte più piccola di un terremoto. E poi non ho potuto fare a meno di pensare al Big Bang e all'espansione dell'universo, tanto più grande, e mentre si vola sulle infinite distanze dell'Oceano Pacifico, sospesi tra il cielo di sopra e l'oceano di sotto, si sente di essere da qualche parte nello spazio tra le stelle, un po' come la posizione dell'uomo nell'universo, e ci si rende conto di quali grandi misteri ci circondano. Uno si chiede come si possa arrivare al cuore di questo mistero dell'universo. E io non ho mai visto una questione più centrale del collasso gravitazionale per arrivare al cuore di questo mistero.

Ora, rispetto a quanto verificatosi in seguito, si tratta in parte di una semplificazione e di un'anticipazione: altrove²⁰ è stata ricostruita, molto più dettagliatamente, la storia delle già menzionate resistenze di Wheeler ai primi risultati sui buchi neri, ottenuti subito prima della guerra da Oppenheimer e collaboratori. In ogni caso, non c'è ragione di dubitare di come le esplosioni offrissero a Wheeler simile materia di riflessione: tra il serio e il faceto, Tullio Regge, che proprio su questi nuovi argomenti general-relativistici avrebbe presto collaborato con Wheeler, pone la passione, se non l'ossessione, di quest'ultimo per le esplosioni come la “causa” della sua partecipazione ai progetti Manhattan e Matterhorn²¹.

Non meno inaspettatamente del tipo di riflessioni sopra citate, si può aggiungere che un modello di universo chiuso e ciclico, che va cioè incontro a espansioni e contrazioni come consentito, a certe condizioni, dalla relatività generale, rappresentò fino agli anni '70 un'idea guida per Wheeler, resa concreta (anzi, si dica pure concretamente visiva) da alcune fotografie di esplosioni subacquee, da lui viste durante un periodo di consulenza per la compagnia Convair, dove si vagliava tra le altre cose un progetto per sottomarini alimentati a energia nucleare²². Si tratta di ambiti che non hanno evidente connessione tra loro, per

²⁰ STEFANO FURLAN, *Pursuitworthiness*, cit.

²¹ TULLIO REGGE, *L'infinito cercare*, Torino, Einaudi, 2012, p. 37.

²² ALEXANDER S. BLUM, STEFANO FURLAN, *How John Wheeler Lost His Faith in the Law*, cit., p. 302.

usare un eufemismo, ma questo è in fin dei conti il potere che analogie e ispirazioni varie possono esercitare nell'euristica di personaggi versatili e creativi come Wheeler. A parte queste ultimissime considerazioni in parte laterali, è interessante evidenziare alcuni aspetti della lunga lotta di Wheeler con le sfide concettuali che gli ancora non battezzati "buchi neri" ponevano ai fisici degli anni '50: questo sarà l'oggetto della prossima sezione.

3. La lunga strada verso i buchi neri

A riprova di come le varie esperienze di Wheeler non venissero da lui accantonate, ma restassero a far parte del suo repertorio anche a seguito della sua immersione in nuovi ambiti, è importante precisare fin da subito che la questione dei buchi neri non venne da lui affrontata, come si potrebbe ingenuamente pensare retroproiettando l'odierno insegnamento standard con soluzione di Schwarzschild e via dicendo, come una questione per così dire geometrica. Il suo retroterra di fisico nucleare, oltre che il confronto con i risultati di Oppenheimer-Volkoff e di Oppenheimer-Snyder, lo portò a impostare la questione innanzitutto in termini di destino della materia che, durante il collasso gravitazionale, viene compressa oltre una certa soglia²³. In altri termini, di contro alle paradossali e difficilmente visualizzabili – per non dire in un certo senso inconcepibili – conclusioni che erano state raggiunte a fine anni '30 da Oppenheimer e collaboratori, con un collasso "senza fine" e masse che si isolavano dal resto dell'universo pur continuando ad avere un effetto gravitazionale, Wheeler cercò di impostare e visualizzare il problema in termini di un sistema a molti nucleoni. Negli atti dell'undicesima conferenza Solvay del '58 a Bruxelles, durante la quale Wheeler si oppose alle preliminari indagini di Oppenheimer, si trova un particolare *Gedankenexperiment*. Non è questa la sede per trattarlo nei suoi dettagli tecnici, per i quali abbiamo già indicato il riferimento bibliografico: quel che interessa qui è la forma del ragionamento.

²³ Ivi, pp. 286-292.

Wheeler si domanda cosa possa accadere se, a una stella, nel seguito semplicemente modellizzata come una sfera, che abbia raggiunto la massa critica discussa nel suo contributo, si aggiunga un'altra piccola massa. Nei suoi quaderni di lavoro si può vedere come, negli anni immediatamente precedenti, Wheeler abbia lottato con questo problema e considerato varie opzioni; tra queste, l'eventualità che la massa aggiunta non vada ad affastellarsi a quella della stella, ma venga radiata via. A questo punto²⁴,

Se il limite $M = M_{\text{crit}}$ potesse essere raggiunto, si potrebbe avere in linea di principio una macchina ideale capace di produrre materia senza alcun costo energetico, come segue. Un grammo di materia aggiunto alla sfera perderà la sua intera massa, che verrà emanata sotto forma di radiazione. Un grammo di antimateria aggiunto ad una simile ma distante sfera di antimateria, che abbia raggiunto il limite critico, perderà la sua intera massa sotto forma di radiazione. L'energia di radiazione da entrambe le sorgenti può allora essere catturata e usata per creare, nello spazio vuoto lontano dalle sfere, un altro grammo di materia, e un altro di antimateria, da lasciar cadere a loro volta sulle due sfere in modo da continuare ad alimentare il processo.

Al di là della fisica coinvolta, che in ogni caso andò in seguito incontro a grosse revisioni, l'aspetto curioso che qui si vuol sottolineare è come, in mezzo a quelle eteree speculazioni, Wheeler escogitasse in linea di principio e introducesse all'improvviso una "macchina" collegante la stella di materia ordinaria e l'analoga stella di antimateria, o meglio: *argomentasse* con una macchina siffatta, in una maniera non troppo differente da quella in cui ci si avvale, in meccanica classica, di situazioni che permetterebbero macchine generatrici di un *perpetuum mobile* e si arriva così a una sorta di *reductio ad absurdum*, come analizzato nel celebre lavoro di Mach sulla *Meccanica nel suo sviluppo storico-critico*²⁵. Quella immaginata da Wheeler (e, a proposito di ipo-

²⁴ *La structure et l'évolution de l'universe*, Onzième Conseil de Physique, Brussels, Stoop, 1958, p. 129.

²⁵ ERNST MACH, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig, F.A. Brockhaus, 1883.

tetiche macchine e buchi neri, in seguito sarà suo il conio del termine “ergosfera”), però, è una significativa variante, in quanto non si tratta di un macchinario da *perpetuum mobile*, quanto di uno capace di creare materia *ad libitum* senza costi energetici.

A prescindere da questo esperimento mentale, e per quanto le aspettative e i *desiderata* di Wheeler si sarebbero poi rivelati erronei, tale modo di impostare il problema ebbe grandi e importanti meriti. Innanzitutto, in questo modo questioni di fisica nucleare venivano profondamente intrecciate alla relatività generale, che, dopo i primi spettacolari successi che l'avevano consacrata, era rimasta in una sorta di isolamento dagli sviluppi della fisica, come una teoria elegante e stupenda ma slegata da altri settori, lasciata più ai matematici che ai fisici impegnati a esplorare i regimi quantistici. Così Wheeler portò nuovi problemi all'interno della relatività generale, problemi su cui era possibile concretamente lavorare, e non mancò di coinvolgere presto studenti e collaboratori, secondo il suo tipico modo di concepire e praticare la scienza in modo conviviale. Wheeler fece esplorare numericamente a Masami Wakano, grazie al computer voluto da von Neumann a Princeton, l'equazione di stato che riteneva dovesse regolare la materia stellare nelle fasi estreme del collasso; questi risultati, ai quali va aggiunto il nome di B. Kent Harrison, furono presentati da Wheeler stesso alla già menzionata conferenza Solvay²⁶. Non diversamente da figure come Fermi e ovviamente von Neumann, Wheeler si era presto reso conto delle potenzialità dei calcolatori ben al di là del loro impiego militare: quello appena citato è soltanto un precoce esempio di una pratica che, nei decenni seguenti, avrebbe sempre incentivato, fino a sviluppare negli anni '80 audaci idee persino sul cambiamento epistemologico segnato dai computer per l'attività scientifica, per la visualizzazione e per il significato stesso della ricerca delle leggi fisiche, come meglio spiegheremo in seguito²⁷.

²⁶ *La structure et l'évolution de l'universe*, cit.

²⁷ JOHN A. WHEELER, *On Recognizing «Law Without Law»*, in «American Journal of Physics», 51, 1983, pp. 398-404.

Inoltre, tornando agli anni '50, dato che il processo fisico al centro dell'attenzione di Wheeler era il collasso stellare, legato anche alle esplosioni di supernovae, ci si rese presto conto, tanto nel mondo occidentale quanto in quello sovietico, che gli strumenti informatici sviluppati nel contesto dei rispettivi progetti per bombe H si prestavano a una piuttosto agevole rifunzionalizzazione per capire appunto tali fasi violente dell'evoluzione stellare. Figura importante per Wheeler e non solo, ma che, in parte per il carattere *classified* del suo lavoro, non ha ancora ricevuto degna attenzione da parte degli storici, risultò Stirling Colgate, che dopo studi elettrotecnici e nucleari intercalati da esperienze su navi mercantili, incontrò Wheeler nel contesto del progetto Matterhorn e, sul finire degli anni '50, decise di riadattare quanto da lui sviluppato applicandolo non a bombe ma a *supernovae*²⁸. Avendo come base il laboratorio di Livermore, munito di un potente calcolatore, Colgate fu presto affiancato da alcuni collaboratori come Richard White, che nel corso di pochi anni giunsero non soltanto a importanti risultati sulle supernovae e sulle susseguenti fasi stellari, ma anche, a metà anni '60, alla simulazione della formazione di un buco nero. Al di là del dovere di cronaca, quanto ottenuto da Colgate e collaboratori fu uno dei fattori cruciali che, tra il 1961 e il 1962, portarono Wheeler ad abbandonare le sue precedenti resistenze concettuali nei confronti dei buchi neri²⁹. L'altro fattore cruciale, a ulteriore riprova dell'importanza per lui rivestita dalla visualizzazione, fu una più profonda comprensione geometrica delle soluzioni della relatività generale e lo sviluppo di un utile tipo di rappresentazioni, dette *embedding diagrams*, a seguito dei risultati ottenuti da David L. Beckedorff, studente di un altro stretto collaboratore di Wheeler, Charles W. Misner. Questo, comunque, mostra come vari progressi venissero fatti nella cerchia stessa di Wheeler: non un caso, ma merito anche di chi aveva impostato quelle direzioni di ricerca e quei problemi, *sapendoli collegare ad altri*. Convintosi ancor più dell'importanza di investire decisamente sull'argomento, a quel punto Wheeler non esitò a portare *from coast to coast*, da Princeton alla

²⁸ ARTHUR I. MILLER, *Empire of the Stars*, New York, Houghton Mifflin, 2005.

²⁹ STEFANO FURLAN, *Pursuitworthiness*, cit.

California, parte della propria cerchia, affinché chi lavorava a Livermore potesse venire istruito e aiutato a implementare nei programmi una più adeguata trattazione general-relativistica³⁰.

4. Il *Liber Naturae* e la fine della geometrodinamica

Avendo così tratteggiato per sommi capi uno dei filoni principali – se non il principale – delle ricerche di Wheeler nel ventennio dedicato alla geometrodinamica, possiamo meglio tematizzare le risonanze con il galileiano *Liber Naturae* scritto in caratteri geometrici e, in seguito, la metamorfosi di questa metafora. In un certo senso, alla luce di quanto si è detto a proposito del tipo di visualizzazione auspicato da Wheeler e delle sue ambizioni pangeometriche, è facile suggerire che la *summa* di questi anni di indagini, il celebre libro di testo *Gravitation*³¹, rappresenti in qualche modo una versione aggiornata, nel linguaggio della geometria differenziale e della relatività generale, del *liber* galileiano. Anche ad una breve scorsa, d'altronde, è facile rendersi conto di come

³⁰ C'è un altro episodio, in quegli anni, di cui vale la pena se non altro far cenno, in quanto mostra di nuovo l'intreccio tra le esplorazioni di frontiera di Wheeler e la collaborazione con figure di stampo maggiormente ingegneristico: è il caso delle onde gravitazionali. Persuaso della loro esistenza, Wheeler spinse Joseph ("Joe") Weber, che aveva alle spalle studi appunto di ingegneria e un'esperienza nella marina, a imbarcarsi nella loro ricerca. Weber, come noto, ideò rivelatori che diedero dei segnali che lo convinsero di aver trovato qualcosa, sebbene la rilevazione apparisse agli occhi di molti controversa; si trattava, d'altronde, di anni in cui la stessa possibilità delle onde gravitazionali non era terreno di universale accordo. Weber non demorse e perseverò a lungo, in una sorta di amarezza che forse solo la recente conferma, nel 2015, delle onde gravitazionali avrebbe potuto in parte alleviare, ma Weber si era ormai spento da tempo. Wheeler, a sua volta, non cambiò di certo idea e continuò a incoraggiarlo; anzi, nella propria autobiografia, avrebbe in seguito confessato: «I sometimes ask myself whether I imbued in Weber too great an enthusiasm for such a monumentally difficult task» (JOHN A. WHEELER, *Geons, Black Holes & Quantum Foam*, cit., p. 258).

³¹ CHARLES W. MISNER, KIP S. THORNE, JOHN A. WHEELER, *Gravitation*, San Francisco, W.H. Freeman, 1973.

non si tratti di un libro di testo qualsiasi, per vari aspetti. Innanzitutto, è palpabile l'intento di creare una sorta di oggetto di culto, o forse meglio – per evitare fraintendimenti – di raccogliere quasi in maniera talismanica una serie di suggestioni visive e citazionali dall'intera storia della fisica, dando vita ad un prodotto con uno stile unico e facilmente riconoscibile. Fin dal design piuttosto elegante della copertina, con l'iconica mela newtoniana alla quale si sovrappongono le geodetiche einsteiniane, si nota una cura di questi aspetti, con un esito accattivante, come del resto confermato dai documenti intorno alle discussioni tra autori ed editore riportate da David Kaiser nella prefazione all'ultima riedizione di pochi anni fa (e anche questa durata è qualcosa di inusuale, in tempi recenti, per tale genere di lavori)³². Queste impressioni sono poi confermate e anzi incrementate dal ricco apparato visivo – non meramente illustrativo, come abbiamo già commentato –, nonché dalle varie citazioni d'autore e dalle parti audacemente speculative in puro stile wheeleriano, come l'enigmatico ultimo capitolo. Tra i riferimenti, non manca ovviamente il passo galileiano dal *Saggiatore* sul libro della natura in caratteri geometrici³³.

Sarebbe tuttavia piuttosto generico limitarsi a suggerire che l'interesse e il coinvolgimento di Wheeler nelle celebrazioni galileiane si limitasse alla maturazione di questa visione di fondo. Anzi, non risulta neppure che ne abbia fatto esplicito cenno nel settembre 1964. La cautela di questo “non risulta” è d'obbligo, in quanto la sua partecipazione alla sessione *Natural Philosophy To-day*, che abbiamo menzionato in principio, avvenne in qualità di *discussant* e non di vero e proprio *speaker*. Tuttavia, se andiamo a vedere i quaderni inediti di Wheeler di quel periodo³⁴, possiamo vedere come avesse iniziato a riflettere per tempo, a seguito dell'invito di Gilberto Bernardini, su cosa dire, quali nessi sottolineare tra la ricerca attuale e i tempi andati, che narrazione

³² CHARLES W. MISNER, KIP S. THORNE, JOHN A. WHEELER, *Gravitation*, con prefazione di David I. Kaiser, Princeton, Princeton University Press, 2017.

³³ Ivi, p. 304.

³⁴ *Relativity Notebook 13*, 1964, pp. 23-ss., in John A. Wheeler Papers, American Philosophical Society Library, Philadelphia.

storica costruire. Si tratta di una caratteristica tipica di Wheeler e del suo peculiare modo di rapportarsi alla storia: questa, lungi dal ridursi ad un polveroso archivio con qualche informazione utile al più a scopi monumentali, era per lui un territorio di esplorazione alla ricerca di idee e analogie con un potenziale ancora in parte inespresso, o comunque in grado di suggerirgli, sia pur trasfigurate, nuovi modi di pensare alle questioni che stava affrontando³⁵. Gli anniversari non incarnavano dunque una mera retorica d'occasione per incensare genericamente i progressi della scienza, ma rappresentavano un'opportunità per approfondire e riflettere attivamente sulla figura che veniva ricordata, sulla distanza che da essa separava, sui mutamenti profondi di lunga durata, e così via. Tutto ciò non veniva ovviamente condotto da Wheeler con una puntigliosa analisi storico-filologica, ma piuttosto secondo quella modalità analogico-creativa, sempre originale e talvolta persino bizzarra, che lo contraddistingueva³⁶, e che andava ad alimentare la costruzione di grandiose narrative a supporto delle sue stesse ricerche più ambiziose. Veniva così a crearsi un singolare impasto di retorica, euristica e storia che non rimaneva ad un livello meramente comunicativo, ma s'intrecciava a fondo con le attività scientifiche di Wheeler. Nel caso di Galileo, possiamo notare per esempio rimandi ai test sperimentali della relatività generale messi a punto in quegli anni da Robert Dicke, collega di Wheeler a Princeton, inquadrati nella storia di lungo corso intorno alla relazione tra massa inerziale e massa gravitazionale, o più in generale della comprensione della gravità; ma possiamo anche notare – il che è forse più interessante, se opportunamente letto – una sorta di bozza narrativa che mette in fila Dante, Giotto e appunto Galileo. Si tratta semplicemente dei nomi che un fisico americano, interpellato per l'occasione, associava alla Toscana di secoli addietro? Forse, ma non è difficile notare in questa “rappresentanza” gli elementi peculiari del suddetto impasto retorico-euristico di Wheeler stesso: il potere evocativo della parola e della metafora, il ruolo del disegno e delle immagini, e l'indagine della natura secondo le “sensate esperienze e

³⁵ STEFANO FURLAN, *The Smile of Mnemosyne*, cit.

³⁶ STEFANO FURLAN, ROCCO GAUDENZI, *The Earth Vibrates with Analogies*, cit.

necessarie dimostrazioni”. Al di là del punto specifico, quest’esempio ci autorizza in qualche modo a guardare con largo respiro alle risonanze galileiane avvertite da Wheeler, come abbiamo già fatto, e perciò a suggerire anche un altro aspetto meritevole di attenzione.

Per scopi di semplicità ed esposizione, oltre che per via del focus individuale, ci siamo finora limitati a illustrare la “conversione” di Wheeler a inizio anni ’50, dando a intendere – come per certi versi indiscutibilmente fu – che si trattasse di una scelta piuttosto coraggiosa da parte di una figura versatile e che avrebbe attraversato altri campi ancora, in una traiettoria pressoché unica. Nondimeno, stemperando un poco le sue idiosincrasie geometrodinamiche, è possibile contestualizzare le sue attività di quel periodo e degli anni ’60 in un quadro più ampio, che tiene conto di altre poliedriche personalità che, in particolare dal dopoguerra in poi, iniziarono a riflettere sulle implicazioni astrofisiche o su grande scala dei principi ormai piuttosto consolidati della nuova fisica. Un passaggio piuttosto “spontaneo”, per esempio, era considerare i raggi cosmici, non come studio fine a se stesso, ovviamente, ma per avvalersene nella comprensione della struttura fondamentale della materia. Wheeler stesso passò per questa fase nella seconda metà degli anni ’40, favorendo la creazione di un laboratorio di raggi cosmici, e in fin dei conti lo stesso Gilberto Bernardini che nel ’64 lo avrebbe invitato operava in questi ambiti. Un analogo discorso si può fare per lo sviluppo delle nuove astronomie – *in primis* radio, X, gamma – che si svilupparono tra quel periodo e gli anni ’60. Non è secondario rendersi conto che non si trattava semplicemente dell’apertura di nuovi “canali” che avrebbero offerto informazioni in più: grazie ad essi ci fu un vero e proprio sconvolgimento dell’immagine dell’universo basata sull’astronomia ottica e di posizione. Si è parlato a tal proposito della scoperta dell’“universo violento”³⁷, in cui le vaste distese cosmiche non apparivano più vuote e inerti, ma fenomeni che coinvolgevano energie e scale di grandezza inimmaginabili sulla Terra risultavano responsabili del-

37 LUISA BONOLIS, STEFANO FURLAN, *Unveiling the Violent Universe (1950-1970), Part 1. New Cosmic Messengers, New Astronomies: Building a Transdisciplinary Research Culture*, in «The European Physical Journal History», 50, 2025, 15.

le più recenti osservazioni, non più limitate all'emissione termica, e nuove famiglie di entità "esotiche" – stelle di neutroni, quasar, pulsar, buchi neri – abitavano le profondità siderali e oltre. Non era dunque una fase di semplice accrescimento di informazioni astrofisiche, ma uno stravolgimento di assunti anteriori e il momento per tentativi di esplorazione dell'autenticamente ignoto.

Se per certi versi ciò rappresentava il superamento di una modalità di indagine – l'astronomia ottica – che simbolicamente si poteva far risalire a Galileo e al suo cannocchiale (riportato all'inizio del succitato *Relativity Notebook* 13 di Wheeler, accanto ovviamente alla Torre di Pisa), tuttavia le nuove sfide vennero affrontate con uno spirito che si potrebbe non a torto definire galileiano. Se da una parte le comunità astronomiche più "convenzionali" e tradizionali esprimevano scetticismo, chiusura o disinteresse nei confronti delle prospettive teoriche suggerite dalla fisica recente, dall'altra, per merito di figure versatili che avevano orizzonti teorici più ampi, padroneggiavano ambiti più "fondamentali" e, alla luce di questi, provavano a individuare e ricostruire meccanismi capaci di spiegare le nuove osservazioni, iniziò quella spettacolare confluenza di teoria e osservazione (come la nascita dell'astrofisica relativistica, solitamente datata al primo Texas Symposium del '63) e, quindi, dei diversi canali osservativi, che è andata avanti fino ad oggi. Che si tratti dei meccanismi di accelerazione proposti da Fermi piuttosto che di quello della radiazione di sincrotrone, o del ruolo del collasso gravitazionale nel mettere a disposizione le enormi energie rilasciate da quasar, in ciascuno di questi casi possiamo riscontrare personalità che avevano un *background* nucleare in senso lato come Wheeler – per esempio Fowler, Hoyle, Zel'dovich – e che, anziché postulare *sic et simpliciter* nuove entità o tipi di segnali, provavano a costruire e identificare i processi alla base di quei fenomeni partendo da principi fisici ben consolidati, in modo piuttosto simile al *daring conservatism*. Prima di invocare il bisogno di una fisica differente da quella "sublunare", provarono con successo ad applicare quest'ultima per iniziare a render unitariamente conto della nuova immagine dell'universo che si stava svelando. Non solo: i parallelismi piuttosto impressionanti, nel corso degli anni '60, tra Wheeler e Zel'dovich – il

suo omologo sovietico nella costruzione di bombe H e poi come leader di uno dei principali gruppi della neonata astrofisica relativistica – sono soltanto uno degli esempi di come questi progressi astrofisici si siano profondamente intrecciati agli sviluppi tecnologici e militari della Guerra Fredda³⁸: le nuove possibilità aperte da strumenti informatici, dalla corsa allo spazio e dai satelliti (con la possibilità di avere rivelatori al di sopra dell'atmosfera), così come dalla comprensione di certi meccanismi di esplosione, mostrano bene come il “largo campo di filosofare” risultò fecondo per i teorici che seppero mantenere aperto il dialogo su quei fronti applicativi e riadattarne gli strumenti a scopi di indagini più “pura”. Tale è dunque il contesto in cui dobbiamo immaginare Wheeler, nel '64, mentre riflette e prende note su Galileo, al contempo intento a perseguire ad un livello più fondamentale la propria visione pangeometrica.

Tuttavia, fu proprio l'indagine delle implicazioni ultime dell'“universo violento”, che trovava la sua più spettacolare manifestazione nei buchi neri, ad allontanare momentaneamente Wheeler dai presupposti di un qualsiasi *Liber Naturae* che fosse dato una volta per tutte e scritto geometricamente. Da un lato, la geometrodinamica, almeno nei suoi risvolti più ambiziosi, aveva iniziato a ristagnare nella seconda metà degli anni '60³⁹: derivare particelle dalla pura geometria presentava difficoltà per ora insormontabili, né si riusciva ad esprimere con il linguaggio della geometria differenziale quelle transizioni di fase nella topologia stessa dello spazio che Wheeler concepiva come l'incessante ribollire della sua *quantum foam*. Dall'altro, le indagini del suo gruppo sui buchi neri avevano mostrato come leggi fisiche quali la conservazione del numero barionico e del numero leptonico sembravano, in quel contesto, perdere di senso: non perché “violare”, ma perché, data l'impossibilità – detto semplicemente – di distinguere se la materia che ha varcato l'orizzonte degli eventi di un buco nero fosse costituita da

38 STEFANO FURLAN, LUISA BONOLIS, *Unveiling the Violent Universe (1950-1970), Part 2. The Rise of Relativistic Astrophysics and the New Astronomies in the Soviet World*, in «The European Physical Journal History», 50, 2025, 16.

39 ALEXANDER S. BLUM, STEFANO FURLAN, *How John Wheeler Lost His Faith in the Law*, cit.

barioni o da leptoni, le corrispondenti leggi di conservazioni vengono «transcended»⁴⁰. Il *daring conservatism*, spingendo alle estreme conseguenze le leggi fisiche, sembrava così, nel buco nero, togliersi il terreno da sotto i piedi. A quel punto Wheeler accettò che la visione che aveva perseguito necessitava di idee nuove e più profonde: iniziò così la sua ricerca di una «pregeometry», da cui lo spaziotempo della fisica familiare potesse emergere. Si convinse inoltre che l'atteggiamento «naturalistico» che fino ad allora aveva mantenuto, dando per buono che vi fosse un cosmo dato che obbedisse a leggi immutabili e del quale si cercava di individuare il «meccanismo centrale», andava messo in dubbio. Le leggi fisiche non erano più garanti eterne di un ordine metafisico; l'osservatore non era più espunto dall'immagine del mondo e concepito come uno spettatore dietro ad un vetro che non interferisce. «There may be no such thing as the “glittering central mechanism of the universe” to be seen behind a glass wall at the end of the trail»⁴¹. Tradotto in altri termini metaforici, forse non c'è un libro fondamentale con i segreti della natura scritti geometricamente, anzi non c'è un libro dato *sic et simpliciter*.

Possiamo riscontrare una qualche ironia storica nel fatto che, mentre usciva quella che abbiamo chiamato una versione aggiornata del *Liber Naturae* galileiano, Wheeler stesse provando a scardinare le fondamenta della stessa metafora. Il mondo non sarebbe finito racchiuso in un libro, come vagheggiato da Mallarmé – e, come quest'ultimo avrebbe sfidato le convenzioni della scrittura e anzi della stessa pagina scritta con il suo *Coup de dés*, così l'ultima fase di Wheeler avrebbe messo radicalmente in dubbio molti consolidati modi di pensare intorno alla natura e alla sua leggibilità⁴².

⁴⁰ JOHN A. WHEELER, *From Relativity to Mutability*, in Jagdish Mehra (ed.) *The Physicist's Conception of Nature*, Dordrecht, Springer, pp. 202-247.

⁴¹ Ivi, p. 203.

⁴² Il rimando di rito, quando si parla di leggibilità del mondo, è ovviamente a HANS BLUMENBERG, *Die Lesbarkeit der Welt*, Frankfurt am Main, Suhrkamp, 1979. Ma, al di là di citazioni di comodo, forse non è vano sottolineare, a differenza di quanto solitamente avviene, che questo testo non è semplicemente la storia o l'analisi di una metafora, ma, come si può facilmente evincere leggendone l'introduzione, un'indagine su illusioni perdute, a seguito di una delusione: cosa ci aspettavamo e

5. Monadi, computer e leggibilità del mondo

In questa fase a inizio anni '70, il delicato equilibrio tra speculazione e senso pratico di cui abbiamo parlato sembra sbilanciarsi a favore della prima. Rifacendosi alle posizioni epistemologiche di Bohr, ma ontologizzandole in maniera non proprio raffinata, Wheeler inizia ad esplorare un nuovo ordine di idee che lascia basiti vari ascoltatori⁴³. L'osservatore partecipante assume persino un ruolo cosmogonico; le riflessioni sui valori delle costanti fondamentali e le precondizioni per la vita, sollevate dal già menzionato Dicke e da Brandon Carter, a sua volta in contatto con Wheeler, danno a tutto ciò una forte tinta "antropica"⁴⁴. Per Wheeler è un periodo di svolta su molteplici piani: a livello di cosmologia, passa dalla sua visione ciclica anteriore a questo paradossale loop di un universo che dà necessariamente vita ad un osservatore che, guardando distante nello spazio cioè indietro nel tempo, imprime a sua volta il sigillo dell'essere sull'universo stesso. A livello di programma di ricerca in fisica, la rinnovata meditazione su Bohr e la ricerca di una pregeometria riorienta i suoi interessi verso i fondamenti della meccanica quantistica. A livello epistemologico-filosofico, passa gradualmente da una visione naturalistico-dogmatica a – *cum grano salis* – una "critica", ossia con particolare attenzione alle precondizioni della conoscenza, alla preparazione degli esperimenti e annesse scelte, e così via. Già verso fine anni '70, la "deriva" speculativa inizia ad apparire più sobria (per quanto questo aggettivo si possa applicare alle idee di Wheeler), complice il suo trasferimento in Texas, dopo il suo ritiro da Princeton nel '76. Un ruolo chiave è sicuramente giocato dal nuovo *milieu* che trova e contribuisce a creare lì, con un modo di investigare i fondamenti della fisica dei quanti più attento (rispetto all'osservato-

speravamo di conoscere? In *questo* senso, l'accostamento a questo preciso periodo di Wheeler può risultare suggestivo e non triviale.

43 JOHN A. WHEELER, *The Universe as Home for Man*, in Owen Gingerich (ed.), *The Nature of Scientific Discovery*, Washington, Smithsonian Institution Press, 1975, pp. 261-296. Dopo l'intervento di Wheeler sono riportate anche alcune reazioni dei partecipanti.

44 ALEXANDER S. BLUM, STEFANO FURLAN, *How John Wheeler Lost His Faith in the Law*, cit.

re cosmogonico!) al ruolo degli apparati di misura e a nozioni legate all'“informazione”. Pure in questo caso, inoltre, possiamo sottolineare, alla luce degli archivi, l'importanza dei suoi contatti con personalità dai tratti ingegneristici e di ampio respiro, quali John R. Pierce (anche nel contesto del Battelle Memorial Institute, focalizzato su scienza applicata e tecnologia), John W. Tukey (al quale spesso si ascrive il termine *bit*) e teorici dell'IBM come Charles H. Bennett e Rolf Landauer, che non si limitavano a considerare l'“informazione” in astratto, ma in riferimento a specifici canali fisici con annesse limitazioni.

Non è questa la sede per chiarire la genesi del celebre slogan *it from bit*, ma, alla luce di quanto specificato, possiamo se non altro dissipare alcuni frequenti equivoci che lo circondano⁴⁵. Innanzitutto, proprio per via del suo peculiare percorso e dell'interesse per lavori “concreti” come quelli appena menzionati, Wheeler *non* si limita affatto a reificare, semplicemente “importandola” per così dire, la teoria dell'informazione di Shannon, come potrebbe sembrare da certo *folklore*; anzi, se c'è un'assenza che spicca dai numerosi e quanto mai variegati rimandi bibliografici degli articoli di Wheeler in quegli anni, è proprio quella di Shannon, sebbene allievi o collaboratori ne avessero fatto o ne facessero uso. Ciò si ricollega al fatto che per Wheeler il *bit* non è meramente un'unità formale d'informazione, in qualche modo oggettivamente “dato”, ma è l'esito di un processo – di un «act of observer-participancy»⁴⁶. In altri termini, l'osservatore partecipante, che intorno alla metà degli anni '70 aveva palesi connotazioni antropomorfiche, viene via via pragmaticamente⁴⁷ “decoscienzializzato” da Wheeler, riconoscendo che il suo ruolo, nel processo di misurazione quantistica, può essere

⁴⁵ STEFANO FURLAN, *Aesthetics of Visionaries and Engineering*, cit.

⁴⁶ «We have to move the imposing structure of science over onto the foundation of elementary acts of observer-participancy» (JOHN A. WHEELER, WOJCIECH H. ZUREK, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, Princeton University Press, 1983, p. 210).

⁴⁷ Sia nel senso colloquiale del termine (a livello pragmatico, per trattare quei processi fisici) sia in quello filosofico (Peirce, William James, Royce vengono qua e là citati da Wheeler con interesse). Un qualche lavoro in un futuro prossimo sarà dedicato a questo tema.

svolto da un generico apparato di registrazione. E tuttavia, il loop reciprocamente costitutivo tra universo e osservatore partecipante, che Wheeler riteneva di aver individuato ad un livello più profondo delle apparenze *naturalisticamente date*, non venne abbandonato: arrivò anzi a formulare una propria “monadologia”, proprio ad indicare il rifiuto di una visione dell’universo dove si trovano “blocchetti” o particelle fondamentali e a sottolineare invece il ruolo di centri di rappresentazione (le monadi, appunto) o, se non altro, di registrazione nei processi costitutivi del tutto⁴⁸. Il più semplice atto di misurazione quantistica è quello in cui la risposta del sistema ha due possibilità, come “up” e “down” oppure “0” e “1”: ecco dunque il “bit” di Wheeler che, sebbene si possa trattare formalmente come una banale (e certo problematica) ipostatizzazione o reificazione del *bit* della teoria matematica dell’informazione, va inteso come l’esito di un processo fisico fondamentale innescato da un “osservatore” in senso lato (non a caso, una volta allontanate le sfumature antropomorfiche, o coscienzialiste alla maniera del suo amico Wigner⁴⁹, Wheeler promosse in Texas, nel suo circolo, lo sviluppo di idee che portarono alla decoerenza quantistica, in cui il “collasso” delle potenzialità non è dovuto all’intervento di un osservatore, ma dal contesto fisico con cui un sistema interagisce⁵⁰). «The building element is the elementary “yes, no” quantum phenomenon. It is an abstract entity. It is not localized in space and time. Its interior is inscrutable, untouchable. The combinatorics of such entities is a new and rich problem»⁵¹. La combinatoria di un numero enorme di questi processi quantistici darebbe quindi luogo alle “cose” come le co-

⁴⁸ STEFANO FURLAN, *Merging Labyrinths: Leibniz in J.A. Wheeler’s Quest*, in «Studia Leibnitiana», 52, 2020, pp. 123-155.

⁴⁹ JOHN A. WHEELER, *Not Consciousness but the Distinction between the Probe and the Probed as Central to the Elemental Quantum Act of Observation*, in R.G. Jahn (ed.), *The Role of Consciousness in the Physical World*, Boulder, Westview Press, 1981, pp. 87-111.

⁵⁰ STEFANO FURLAN, *Merging Labyrinths*, cit.

⁵¹ JOHN A. WHEELER, *The Computer and the Universe*, in «International Journal of Theoretical Physics», 21, 1982, pp. 557-572:570.

nosciamo, all'*it* – o, almeno, questa è la nuova visione guida che viene proposta.

Wheeler non stava pensando soltanto ad un cambiamento concettuale, ma anche ad un nuovo modo di indagare la natura grazie al computer: le leggi fisiche, perso il loro status metafisico, risultano regolarità statistiche che si *riconoscono visivamente* su uno schermo grazie alla simulazione di un gran numero di eventi⁵². La leggibilità del mondo pare così in qualche modo recuperata, e anzi espressa metaforicamente attraverso un nuovo *medium*. Quel che è interessante notare, però, alla luce delle specificazioni che abbiamo fatto, è che *non* si tratta, per così dire, della versione ebook del *Liber Naturae*, scritto in una stringa di *bits*, come potrebbero suggerire versioni “naturalisticamente ingenuie” dell'*it from bit* o dell'universo come computer. Wheeler non ha semplicemente cambiato l'ingrediente basilare nella piramide della fisica, ma ha scardinato lo schema di fondo, ha provato a mutare la metafisica soggiacente, ha tematizzato il ruolo dell'osservatore prima e della comunità di osservatori partecipanti poi (altra risonanza con il pragmatismo), e ha recuperato la leggibilità del mondo riflettendo sugli aspetti epistemologici di uno strumento che, fin dagli anni '50, fu tra i primi ad adoperare e promuovere per la ricerca teorica fondamentale. In termini più icastici, potremmo dire che non si è passati banalmente, nel pensiero di Wheeler, dalla metafora dell'universo come orologio a quella dell'universo come computer: in mezzo, a contestazione della prima e a precisazione della seconda, c'è nientemeno che una monadologia, che potrebbe apparire una “baroccaggine” ma che rappresenta a modo suo lo spontaneo confluire delle varie questioni su cui stava riflettendo, da un livello “pregeometrico” più profondo dello spazio e del tempo (*phenomena bene fundata*) ai centri di rappresentazione/registrazione in atti di misurazione quantistica⁵³. Il nuovo *Liber*

⁵² JOHN A. WHEELER, *On Recognizing Law without Law*, cit. Da notare fin dal titolo l'enfasi sul nuovo verbo chiave di questo *modus investigandi*.

⁵³ Ci sono in realtà almeno sei filoni di pensiero che, a partire dal '67, si intrecciano a costituire un originale Leibniz di Wheeler, come illustrato in dettaglio in STEFANO FURLAN, *Merging Labyrinths*, cit.

Naturae su schermo, molto più complesso e sfaccettato, include il ruolo degli osservatori ed emerge dai diversi punti di vista monadologici, con la loro *harmonia praestabilita*: fraseologia leibniziana che a Wheeler era giunta mediata dai grandi matematici di Göttingen e che egli adoperava per indicare quella fiducia nella comprensibilità del mondo appresa da Einstein⁵⁴. Una fiducia, però, innanzitutto “pragmatica”, autoalimentata dalla sua efficacia⁵⁵, che sa arrangiarsi nell’indagine euristica anziché limitarsi a calare rigidamente dall’alto forme geometriche iperuraniche. Anche lo slancio a fare ciò, in fondo, al di là delle unilaterali polarizzazioni tra Galileo “platonico” e Galileo “agrimensore”, è parte dell’eredità di quest’ultimo.

Riassunto La metafora del *Liber Naturae* scritto in caratteri geometrici trovò una concretizzazione nel libro di testo *Gravitation* (1973) di Wheeler, Misner e Thorne. Nel decennio successivo, tuttavia, Wheeler cercò di riconcettualizzare la fisica in una maniera che rende obsoleta la metafora di un libro oggettivamente dato, suggerendo invece quella di un ipertesto scritto da una comunità di osservatori attraverso lo spaziotempo.

Abstract The metaphor of the *Liber Naturae* written in geometrical characters found a concrete instantiation in the textbook *Gravitation* (1973) by Wheeler, Misner, and Thorne. Over the next decade, however, Wheeler tried to reconceptualize physics in a way that makes the metaphor of an objectively given book obsolete, suggesting instead a hypertext written by a community of observers across spacetime.

⁵⁴ Per una curiosa genealogia che passa per Leibniz e per Einstein si veda JOHN A. WHEELER, *Einstein's Second Century*, in Ernst Schmutzner (ed.), *Proceedings of the Ninth International Conference on General Relativity and Gravitation, Jena, 14-16 July 1980*, Cambridge, Cambridge University Press, 1983, pp. 23-28.

⁵⁵ JOHN A. WHEELER, *El Adelanto de la Ingeniería y la Configuración de Nuestro Futuro*, in «El Farol», 200, 1962, pp. 23-48.

Sul concetto di simmetria, da Galileo alla teoria quantistica dei campi

Luciano Boi

1. Osservazioni introduttive; il principio di relatività da Galileo a Einstein

In questo testo parleremo brevemente anzitutto del pensiero di Galileo Galilei in riferimento ad alcune sue idee e più in generale alla sua concezione della fisica, della matematica e dei loro rapporti, idee e concetti che peraltro variano in modo significativo nei suoi scritti; in seguito parleremo più diffusamente degli sviluppi successivi che questa concezione ha avuto, in particolare nei secoli XIX e XX.

Per la maggior parte degli storici e filosofi della scienza¹, l'immagine della natura costruita dalla nuova scienza dei secoli XVII e XVIII presenta alcune caratteristiche essenziali, che possono essere enunciate sinteticamente come segue: (i) la “rivoluzione scientifica” del 600 tentò di smantellare le basi della fisica qualitativa, che si devono perlopiù ad Aristotele ma che furono più tardi riprese da autori come Duns Scoto (1265-1308), Nicola Oresme (1325-1382) e Nicola Cusano (1401-1464), e costruì un universo corpuscolare-meccanico; (ii) essa sostituì all'apriorismo (cioè ai principi teorici e/o metafisici dati a priori), al principio di autorità e al vacuo verbalismo scolastico la lettura diretta, ovvero sia l'osservazione e l'indagine delle cause dei fenomeni, del “libro della natura”; (iii) essa affermò che l'esperimento doveva essere fondato su ipotesi teoriche e fattuali, sulla registrazione attenta dei fe-

¹ Si vedano, ad esempio: PAOLO ROSSI, *La scienza e la filosofia dei moderni*, Torino, Boringhieri, 1989; PAOLO CASINI, *La natura*, Milano, Mondadori, 1979.

nomeni e del loro ripetersi, la misurazione e il calcolo. Questi assunti, nelle intenzioni dei maggiori scienziati del '600, servivano a liquidare i pregiudizi e le categorie mentali che avevano sorretto per quindici secoli la scienza peripatetica insegnata da Aristotele e dai suoi allievi.

Dopo Copernico e Keplero, Galileo è quasi unanimemente considerato uno degli artefici della rivoluzione della scienza moderna che, secondo la maggior parte dei commentatori, avrebbe demolito la concezione della natura e della conoscenza che si era imposta per circa quindi secoli nelle accademie e nelle università, e le cui fonti di ispirazione erano essenzialmente due, entrambe originatesi nell'antica Grecia: quella platonica e quella aristotelica. La prima attribuiva agli enti matematici, in particolare a quelli geometrici, una natura ideale, cioè "esistenti" in un mondo di idee e proprietà perfette e incorruttibili, ai quali gli oggetti fisici si conformavano solo in modo parziale e approssimativo; e quella aristotelica, che sebbene riconoscesse alla matematica un ruolo importante nella conoscenza della natura, sottolineava il fatto che tra i concetti matematici e i fenomeni naturali non esiste solo una relazione ideale o astratta, logico-deduttiva, ma una reale interazione che può avere una certa incidenza causale e pertanto produrre effetti fisici. Un esempio importante di questa interazione è la teoria elaborata da Aristotele, che studia i rapporti tra forma e sostanza e cerca di mostrare che la (o il tipo di) forma, dove per "forma" si intende anche il *bordo* di un oggetto o di un corpo (oggi parliamo della "forma globale" di una varietà o di uno spazio e distinguiamo gli spazi che hanno un bordo da quelli che ne sono privi: ad esempio, il piano e la sfera sono varietà bidimensionali senza bordo, mentre il disco contiene un bordo e il cilindro due), può influenzare le qualità e il comportamento della sostanza – ossia di un determinato tipo di materia –, e, reciprocamente, il tipo di materia – cioè il suo stato e le sue proprietà – consente determinate variazioni della forma iniziale di un oggetto o di un corpo. Diversi autori, moderni e contemporanei, hanno ripreso la teoria di Aristotele migliorandola e riformulandola: basti pensare alle idee di Leibniz sulle proprietà dinamiche dei corpi o a quelle di Riemann sui rapporti tra le configurazioni geometriche degli oggetti e le loro proprietà fisiche (per esempio nei fluidi).

La parola “quasi” utilizzata all’inizio del precedente paragrafo sta a indicare il fatto che alcuni storici e filosofi della scienza hanno criticato una tale ricostruzione ritenendola troppo semplicistica e per molti aspetti infondata. Citiamo qui la ricostruzione storiografica accurata, fatta a partire dalle fonti e dai testi originali, condotta da Lucio Russo in particolare nella sua importante opera *La rivoluzione dimenticata* (prima ed., 1996; nuova ed.: Feltrinelli, 2021). Russo critica in modo sostanziale la ricostruzione storiografica, prevalente tra gli storici e i filosofi della scienza, della nascita e dello sviluppo della scienza moderna, che attribuisce essenzialmente a Galileo e Newton. Nella sua meticolosa indagine Russo mostra che, in realtà, le sue origini risalgono a più di 2000 anni prima, cioè al periodo ellenistico e alle importanti scoperte fatte tra il IV e II secolo a.C. da matematici e fisici come Euclide, Archimede, Eratostene, Aristarco di Samo e tanti altri. Fu grazie alle loro scoperte e teorie che nacque il metodo scientifico. Il ruolo svolto dal loro pensiero scientifico, fondato spesso su concetti filosofici e metafisici esposti con sorprendente rigore e immaginazione, in particolare nei campi della matematica, dell’astronomia e della fisica, della biologia e della medicina, è stato essenziale non solo per l’affermazione della “civiltà classica”, ma anche perché ha fornito le basi teoriche e sperimentali a molti degli sviluppi successivi ad opera degli scienziati e filosofi dei secoli XVI e XVII, in particolare grazie alle scoperte di Copernico, Bruno, Keplero, Galileo, Descartes, Newton e Leibniz.

Appoggiandosi su idee e risultati ottenuti da diversi autori nei secoli precedenti e in particolare sulla rivoluzione astronomica esposta da Niccolò Copernico nel *De revolutionibus orbium coelestium* (opera pubblicata in latino nel 1543), Galileo riuscì a dare una alquanto tormentata formulazione della legge matematica della caduta dei gravi, fece alcune scoperte astronomiche, enunciò il “principio di relatività”, i principi di inerzia e di scomposizione delle forze, e fu un convinto assertore dell’importanza e della validità del sistema copernicano, tant’è che molti dei suoi sforzi come scienziato furono rivolti a farne riconoscere il carattere di svolta radicale nella concezione dell’universo. Il principio di relatività sarà sviluppato nei secoli successivi e diventerà

uno dei principi fondamentali dell'intera fisica grazie soprattutto alle scoperte fatte da Einstein con la sua teoria della relatività ristretta del 1905.

Il *principio di relatività* lo troviamo enunciato in vari modi e anche in vari contesti empirici ma prevalentemente mediante “esperienze di pensiero” (*Gedankenexperimente*). Il *principio di relatività galileiano* afferma che nessuna esperienza eseguita all'interno di un sistema di riferimento può rivelarne un moto traslatorio rettilineo uniforme, rispetto a un riferimento fisso o, più genericamente, inerziale. In altri termini, qualsiasi esperienza od osservazione eseguita all'interno di un corpo è atta a rivelarne un moto rettilineo soltanto a patto che questo non sia un moto traslatorio rettilineo uniforme. Nella formulazione galileiana del principio, l'impossibilità appena espressa è limitata alle esperienze meccaniche.

Einstein affermerà che tale impossibilità sussiste per esperienze di qualsiasi natura, e tale asserzione costituisce, come vedremo più avanti, uno dei postulati fondamentali della teoria della relatività ristretta (o speciale) del 1905. Nella relatività generale (1915-16), le due fondamentali proprietà della materia che sono la gravitazione e l'inerzia venivano ad essere ricondotte da Einstein a uno stesso principio, potendosi considerare ambedue come dovute alle proprietà geometriche dello spazio-tempo o, fisicamente, alla distribuzione, variabile nel tempo, della materia e dell'energia.

Nella relatività ristretta si parla di principio di equivalenza tra massa ed energia: considerando che le due “quantità” fisiche si uguagliano, Einstein ha fatto compiere alla fisica un profondo cambiamento concettuale. Il *principio di equivalenza* di Einstein (relatività generale) ci dice che, dal punto di vista della meccanica classica, un sistema di riferimento situato in un campo gravitazionale è meccanicamente equivalente a un sistema di riferimento uniformemente accelerato. Il fatto che i due sistemi siano fisicamente equivalenti significa che tutti i processi fisici si svolgono nei due sistemi seguendo le stesse leggi. Alla base del principio di equivalenza c'è il fatto fondamentale che il campo gravitazionale imprime localmente a tutti i corpi la stessa accelerazione, data l'equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazio-

nale, e questo si spiega con il fatto che la massa inerziale e la massa gravitazionale sono equivalenti.

Va comunque detto che già alcuni teologi, filosofi e scienziati tardo medievali o “pre-moderni”, come Duns Scoto, Nicola Oresme e Nicola Cusano, studiarono quei fenomeni ed elaborarono idee e teorie di un profondo acume concettuale, alle quali, va aggiunto, Galileo non fece alcun preciso riferimento, anche se molto probabilmente egli era a conoscenza delle idee di Oresme poiché erano insegnate all'Università di Padova dove insegnava lo scienziato pisano. Il caso di Oresme, filosofo della Scolastica e tra i più originali pensatori del XIV secolo, è particolarmente interessante. Egli fu autore di un “Trattato sulla configurazione delle qualità e del movimento” (*Tractatus de configurationibus qualitatum et motuum*, 1356) in cui espone il suo metodo per rappresentare graficamente (tramite diagrammi) le variazioni di una grandezza, che chiama *qualità*, in funzione di un'altra. In altre parole, egli introduce il concetto matematico di *relazione funzionale*, cioè di *funzione*, tra due variabili che variano una in funzione dell'altra; concetto che neanche Galileo riuscirà a formulare in maniera generale, e infatti bisognerà aspettare i lavori di Newton e Leibniz sull'analisi infinitesimale per trovarne un enunciato preciso.

Oresme considera per esempio un corpo nel quale il calore non è omogeneo, ma varia secondo il luogo e la misura. Per rappresentare le variazioni del calore all'interno del corpo, egli immagina una retta tracciata sul corpo. Chiamata *longitudino* (che corrisponde al nostro asse orizzontale delle *ascisse*) la distanza che separa un punto qualsiasi della retta da un ‘punto origine’ fissato arbitrariamente. In ciascun punto di questa retta egli traccia una perpendicolare la cui altezza, che chiama *latitudino* (l'equivalente del nostro asse verticale delle *ordinate*), è proporzionale all'intensità del calore nel punto corrispondente del corpo. Ottiene così una figura geometrica il cui studio non solo facilita l'analisi delle variazioni del calore, ma in più ha il pregio di evidenziare il fatto importante che i cambiamenti nel diagramma geometrico sono tutt'uno con le variazioni dello stato fisico del corpo materiale. Non ci troviamo quindi di fronte a una mera rappresentazione grafica del variare di due quantità messe in relazione tra di loro, ma a un diagram-

ma intrinsecamente spaziale le cui variazioni riflettono cambiamenti che avvengono nella qualità (nel caso specifico si tratta del calore) o nelle qualità dei corpi.

La proprietà di questa qualità – scrive Oresme – saranno esaminate più chiaramente e più facilmente quando qualcosa che le è simile è disegnato su una figura piana, e questa cosa, resa chiara cioè visibile, viene colta rapidamente e perfettamente dall'immaginazione [...] perché l'immaginazione della figura aiuta grandemente la conoscenza delle cose stesse.

Nel passo finale della citazione Oresme sottolinea un punto importante, ossia l'importanza dell'immaginazione nel processo della conoscenza, e più precisamente ancora l'importanza delle immagini mentali per penetrare nelle proprietà stesse delle cose (dei corpi). Cosicché le figure, i grafi o i diagrammi non sono un mero strumento utile per descrivere le variazioni di quantità ma dei modelli atti a spiegare i cambiamenti qualitativi dei corpi². Egli intraprende poi, infatti, uno studio matematico delle figure piane ottenute grazie alle rappresentazioni grafiche della qualità. Fa loro subire delle trasformazioni geometriche semplici cercandovi delle proprietà invarianti, il che lo porta a una classificazione delle curve. Alcuni storici vedono in Oresme un precursore di Cartesio poiché di fatto avrebbe posto le basi della geometria analitica. Il nostro autore non si ferma tuttavia a uno studio completamente astratto, tanto è vero che applica la sua idea di *configurazione* allo studio di diversi fenomeni, in particolare in biologia: egli afferma, per esempio, che il calore naturale di un leone si comporta in modo diverso da quello di un asino o di un bue. E dà la seguente spiegazione: «Esso [il calore] gli fornisce una potenza più grande, non solamente perché è più intenso, ma anche perché la sua rappresentazione grafica è diversa». Così, sembra esserci un nesso tra la proprietà fisica e la variazione spaziale, nesso che contribuisce a produrre dei cambiamenti qualitativi nei corpi.

² Su questo ed altri aspetti del pensiero matematico di Oresme, cfr. le analisi interessanti di GILLES CHÂTELET, *Les enjeux du mobile*, Parigi, Éditions du Seuil, 1993.

La parte forse più rilevante dell'opera di Oresme è quella in cui l'autore applica la sua "dottrina della configurazione" a uno studio delle proprietà del movimento. Qui Oresme dà tutta la misura del suo genio. Si tratta della parte della sua opera che esercitò un'influenza duratura sui suoi contemporanei e che senza dubbio ha lasciato una traccia importante nella storia della scienza del moto. Per descrivere e studiare un movimento rettilineo, Oresme ha l'idea di rappresentare graficamente la velocità istantanea del corpo mobile in funzione del tempo. Su una retta orizzontale riporta una scala proporzionale al tempo, da cui traccia delle perpendicolari la cui lunghezza è proporzionale alla velocità del mobile nell'istante corrispondente. Egli s'interessa particolarmente a esaminare la regione del piano in cui compaiono queste perpendicolari successive. Grazie allo studio di casi particolari semplici e la loro generalizzazione, Oresme giunge alla conclusione che l'area della superficie interessata dalle diverse perpendicolari tracciate a partire da ciascun punto della scala del tempo è proporzionale alla distanza percorsa dal mobile durante l'intervallo di tempo. Questo postulato è alla base delle scoperte relative al moto uniformemente accelerato. Attraverso un sottile ragionamento matematico e aiutandosi con una altrettanto penetrante intuizione spaziale e rappresentazione diagrammatica, Nicolas Oresme perviene a stabilire *la legge fondamentale del moto rettilineo uniformemente accelerato*, vale a dire che, se la velocità all'istante iniziale v_0 è nulla, la distanza percorsa sarà proporzionale al quadrato del tempo t^2 .

Questa legge ebbe una notevole diffusione nel periodo trascorso tra Oresme e Galileo e fu insegnata ad Oxford dal filosofo, logico e matematico britannico William Heytesbury (1313-1372) e dai suoi discepoli. Una delle ragioni per cui abitualmente si attribuisce questa legge a Galileo, è perché lo scienziato pisano ha avuto l'idea di utilizzare un piano inclinato per verificare sperimentalmente quale legge si applicasse al moto di caduta dei corpi. Ma anche perché Galileo non fu particolarmente propenso a riconoscere il valore delle scoperte fatte dagli scienziati che l'avevano preceduto. È il caso di Archimede per quanto riguarda la matematica (proprietà delle spirali, definizione dell'area e del volume della sfera, enunciato del problema della quadratura della

parabola, in cui egli dimostra con vari metodi che *l'area di un segmento di parabola vale quattro terzi l'area del triangolo avente la stessa base*), la meccanica razionale (il principio della leva), la meccanica dei fluidi (principio di Archimede) e l'astronomia. È anche il caso di Keplero per quanto riguarda le sue scoperte astronomiche sul moto planetario (*Astronomia nova*, 1609), e di Giordano Bruno in relazione alle sue strabilianti idee che ammettevano la natura infinita dell'universo e la possibile esistenza di un numero infinito di mondi (ovvero di galassie) all'interno di esso (in *De l'infinito, universo e mondi*, 1584). Va infine osservato che il *Trattato sulla configurazione delle qualità e del movimento* è stato un momento importante dello sviluppo concettuale della scienza e della filosofia della natura. La dottrina di Oresme fu diffusa in tutta Europa, tra cui l'Italia. Tuttavia, non circolò l'opera originale, ma un compendio intitolato *Tractatus de latitudinibus formarum*, nel quale mancavano alcuni metodi e ragionamenti importanti sviluppati da Oresme nel suo Trattato originale. Alcune lacune furono colmate dal filosofo e matematico parmigiano Biagio Pelacani (1355-1416), che insegnò a Padova. I suoi scritti ebbero larga diffusione in Italia, ed è probabile che Galileo per suo tramite fosse a conoscenza delle scoperte di Oresme.

Sul piano filosofico, non senza una certa temerarietà, Galileo oppose alle convinzioni dei 'filosofi in libris' la certezza che la vera filosofia naturale era tutta da costruire, facendo domande singole e chiare alla natura, costringendola a rispondere con precisione, generalizzando le risposte sotto forma di leggi, confrontando di nuovo le leggi con l'esperienza. Ipotesi teorico-fattuali e verifica matematica, induzione e deduzione, analisi e sintesi, sono per Galileo momenti ed elementi estremamente interconnessi del "buon" metodo scientifico, che tuttavia non troviamo mai espressamente compendiati in enunciati precisi.

Nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano* (1632), l'interlocutore copernicano Salviati critica Aristotele per aver costruito la 'fabbrica del mondo', ossia il cosmo geocentrico e geostatico secondo i precetti di una 'architettura' arbitraria, ovvero la distinzione ontologica tra moti circolari e moti rettilinei, tra mondi incorruttibili e perfetti e sfera sublunare. C'è comunque da notare a questo proposito che la concezione di Aristotele, che egli espone nelle sue due

opere maggiori che trattano della “filosofia della natura”, la *Fisica* e la *Metafisica*, è ben più ricca e complessa e viene spiegata dall'autore con argomenti fisici e formali spesso esposti in modo rigoroso.

Va anche precisato che i precetti d'architettura galileiana non derivano da una fonte unica, ma da più fonti antiche. Anzitutto la statica e l'idrostatica di Archimede, dal quale Galileo apprese a impostare quantitativamente, matematicamente il problema della caduta dei gravi e del moto in generale; in secondo luogo la certezza che il mondo fisico possedesse una determinata struttura geometrica e fosse conforme a leggi matematiche precise, ch'egli amava esprimere in termini platonici; e ancora, dalla concezione corpuscolare della materia e della sensazione, che risale a Democrito.

Quando nel 1609 Galileo volse il cannocchiale verso il cielo, fu un evento memorabile nella storia del pensiero umano. È noto che cosa “vide” e annunciò al mondo con la pubblicazione nel 1610 del breve trattato di astronomia, *Sidereus Nuncius*. La Luna gli apparve “aspra e ineguale, ripiena di protuberanze e di cavità simili ma assai maggiori ai monti e alle valli della Terra”; su quei monti sorgeva e tramontava il sole come sulla Terra. La Via Lattea si rivelava un enorme ammasso di stelle lontanissime, i pianeti e le costellazioni apparivano più distinti.

In quegli stessi anni in cui Galileo era intento a osservare le caratteristiche irregolari e imperfette della Luna e a mostrare l'esistenza di satelliti orbitanti intorno al pianeta Giove, le cui traiettorie variano geometricamente e la loro direzione è retrograda rispetto al senso di rotazione di Giove, il matematico, astronomo, fisico e teologo tedesco Johannes Kepler era dedito a scoprire le ragioni geometriche dell'armonia del cosmo e a elaborare una teoria matematica capace di spiegare le leggi del moto e dunque la dinamica dei corpi celesti nell'Universo. Galileo e Keplero si scambiarono lettere di collaborazione e di stima riguardo alle scoperte del *Sidereus Nuncius*, ma l'uno non conobbe o non apprezzò la scoperta kepleriana delle ellissi, né l'altro seppe utilizzare i concetti essenziali della dinamica galileiana. Descartes, d'altra parte, scorre con poca attenzione il *Dialogo sui massimi sistemi*... e non dette molto credito al metodo sperimentale galileiano. Il filosofo e matematico ritrovò a sua volta insieme con il filosofo e scienziato Isaac

Beeckman la legge del moto uniformemente accelerato e “geometrizzò” il concetto di inerzia all’interno di una concezione rigorosamente euclidea dello spazio.

Un progresso decisivo fu ottenuto dal fisico e matematico britannico Isaac Newton poco più di cinquant’anni dopo le osservazioni e scoperte importanti fatte da Galilei. A partire dal 1666, Newton riuscì ad unificare in una teoria coerente e armonica i diversi risultati di Keplero sulle cause dei moti planetari e di Cartesio sul peso dei corpi sulla Terra, dando alle leggi dinamiche elaborate dai suoi predecessori una sistemazione teorica decisamente più intelligibile. Risolto il problema dinamico del moto di un corpo grazie al modello geometrico dell’elisse introdotto da Keplero, Newton unificò concettualmente il principio cartesiano del moto rettilineo uniforme di una particella materiale in *vacuo*, la legge galileiana della scomposizione delle forze e le tre leggi di Keplero circa i moti planetari, pervenendo così, progressivamente, alla formulazione matematica della *legge di gravitazione universale*, secondo la quale *i corpi nell’universo si attraggono in ragione direttamente proporzionale alle loro masse e inversamente proporzionale alle loro distanze*.

Tale legge rappresentava la definitiva unificazione della fisica terrestre e della fisica celeste, nel cui contesto la legge galileiana della caduta dei gravi veniva vista come un caso particolare della legge di gravitazione universale.

Si può capire che Newton abbia detto «*hypoteses non fingo*» sulla causa della gravitazione, essendosi pronunciato in favore di un tempo e di uno spazio assoluti non avrebbe mai potuto trovare nella geometria l’origine e l’interpretazione della gravitazione. E, del resto, come avrebbe potuto immaginare una geometria diversa da quella euclidea, l’unica nota al suo tempo?

2. Alla ricerca della simmetria: da Platone a Keplero

Una certa concezione della matematica, ispirata alle idee di equilibrio, armonia e giusta proporzione fu elaborata da Platone e dai suoi discepoli, e insegnata nell’accademia fondata da Platone ad Atene

nel 387 a.C. Essa venne in seguito ripresa e sviluppata dalla corrente neo-platonica. Uno dei contributi fondamentali della filosofia platonica e del neoplatonismo allo studio della natura consistette nell'importanza attribuita alla geometria nella formazione intellettuale. Nel dialogo *Repubblica*, Platone rilevò la necessità della matematica come esercizio per la mente che cerca di comprendere le forme nella loro possibile perfezione. Già per Platone, la geometria consente di conoscere ciò che si conserva nel cambiamento, ed è perciò l'origine di un certo ordine (dinamico e non statico) della natura e forse della mente. Oggi diciamo che la geometria (la quale nel frattempo si è arricchita di molte nuove nozioni e teorie) cerca di conoscere quelle strutture matematiche che si conservano al seguito di determinate trasformazioni (simmetrie) e deformazioni (per esempio immersioni), ed è questa invarianza che assicura una certa stabilità del mondo matematico e del mondo reale, che si suppongono essere profondamente connessi. Nel *Timeo* Platone espone la sua cosmologia e consegna alla tradizione successiva l'idea che tutto sia retto dalla simmetria, da rapporti e proporzioni. I *solidi platonici*, cioè i sei poligoni regolari, sono una chiara espressione di questo principio e riflettono l'idea che il mondo fisico segue un certo ordine ideale senza mai però poterlo raggiungere. A questo proposito, il fisico Werner Heisenberg ha osservato che:

Per Platone, al limite inferiore [a fondamento] degli enti materiali non si trova più in realtà qualcosa di materiale, ma una forma matematica; diciamo una struttura che non è solo fisica, ma metafisica. L'elemento primordiale che ci permette di comprendere unitariamente il mondo è, in Platone, la simmetria matematica, l'immagine, l'idea, da qui il nome d'*idealismo* per la concezione platonica. [...] Per Platone la forma è caratteristica per le proprietà dell'elemento materiale considerato, ne costituisce parte essenziale delle sue proprietà fisiche. Contrariamente a quanto pensava Democrito, in Platone le particelle di materia (terra, acqua, aria, fuoco) non sono invariabili e indistruttibili; al contrario esse possono essere scomposte in triangoli ed essere ricostituite da triangoli (e dunque non hanno più niente di fisico).

Tuttavia, fu Keplero a sottolineare tutta l'importanza della simmetria per la conoscenza delle “vere” cause dell'ordine del cosmo e del

mondo fisico. Per lui, non solo il cerchio e la sfera avevano anche un significato in un certo senso “divino”, oltre che matematico, ma in più riteneva che fossero archetipi che strutturano le proprietà e il divenire dei fenomeni reali. Nello stesso tempo, egli capì che non erano gli enti geometrici più perfetti e neanche i più atti a spiegare i segreti del comportamento dei corpi naturali e celesti: infatti, sia la classe delle ellissoidi (analoghi tridimensionali delle ellissi), forme geometriche che si ottengono a partire da una deformazione continua della sfera, che quella dei poliedri (convessi) regolari contengono un più gran numero di simmetrie, e pertanto consentono determinate trasformazioni impossibili da effettuare con il cerchio e la sfera. Poiché sono ricchi in simmetrie e suscettibili di una molteplicità di trasformazioni che lasciano invariate le proprietà essenziali dei corpi celesti, questi solidi geometrici fungono, secondo il matematico e astronomo tedesco, da modello per spiegare le leggi del sistema solare. Keplero andò ben oltre Platone nel suo studio della natura e del ruolo delle simmetrie, e riuscì a fare quello che né Copernico né Galilei osarono fare. Solo contro tutti, egli oserà nell'*Astronomia nova* (1609) prima rinunciare al centro dei cerchi, poi rinunciare all'eccentricità del movimento e al moto uniforme, e infine allo stesso cerchio, mostrando che si possono deformare le orbite circolari in orbite ovali e poi ellittiche, liberandosi così, come dirà nell'*Astronomia nova*, delle «macine dei cerchi».

Quando si parla del ruolo della simmetria nell'astronomia di Keplero si pensa subito ai cinque poliedri regolari. In realtà, il ruolo dei solidi platonici è in Keplero via via sempre più marginale, allusivo e simbolico, limitato alla determinazione del numero dei pianeti, mentre altre simmetrie, basate sugli accordi armonici e rivelatrici di forme naturali più complesse, acquisteranno sempre più il ruolo di struttura portante del cosmo e della natura³. Alla fine della sua fatica Keplero penserà di aver trovato, tramite una struttura astratta o forma ideale di natura matematica, il modo di tenere insieme numero di pianeti, distanze dei pianeti dal sole, periodi di rivoluzione, densità e masse dei pianeti, dimen-

³ Cfr. LUCIANO BOI, *Symmetry and Symmetry Breaking in Physics: From Geometry to Topology*, in «Symmetry», 13 (2021), pp. 2100-2120.

sioni del cosmo... e persino teologia, anima e forma di governo. Nella *Dissertatio cum Nuncio Sidereo*, pubblicata nel 1610, subito dopo aver letto il *Sidereus Nuncius* di Galileo, Keplero espone i motivi del suo interesse particolare per la geometria e per i poliedri regolari. Nella geometria, dopo la sfera, vi è una famiglia di figure che è la più perfetta di tutte, quelle dei cinque solidi euclidei. Questo nostro mondo planetario sarebbe disposto appunto secondo le regole e le proprietà di questi solidi. Keplero è alla ricerca della costituzione del cosmo e la via per arrivare a spiegarla sta nelle costruzioni che rispondono a certe simmetrie. La chiave non sta nei numeri ma nella geometria, non tanto nella semplice misura quanto nella forma del movimento. Mentre per Galilei le orbite ellittiche rompono la simmetria del cosmo, per Keplero sono la strada verso la scoperta di simmetrie 'nascoste' più profonde, consistenti in rapporti e proporzioni tutte generate dal rapporto di quinta armonica $3/2$. Anche quando Keplero cercò, nella *Strena seu de nive sexangula* (1611), la causa della simmetria sexangula della neve non si diresse verso la struttura atomica ma verso motivi formali di efficienza superficie-volume. Grazie a queste sue intuizioni, Keplero può essere considerato in qualche modo il precursore delle idee che condurranno Eulero e Lagrange a elaborare la teoria delle superfici minime e il calcolo delle variazioni. Sono motivi formali – cioè attinenti alle proprietà intrinseche e globali delle forme – che fanno sì che l'uomo e il mondo risuonino allo stesso modo. La proporzione nelle distanze e nella velocità dei pianeti è tale da essere riconosciuta dalla mente umana che porta in sé come archetipi tali proporzioni. Per Keplero, le orbite ellittiche sono il risultato della necessità fisica e delle leggi matematiche dell'armonia. Volendo costruire il mondo secondo le leggi dell'armonia non bastano i solidi regolari, che darebbero orbite circolari concentriche e velocità costanti; le proporzioni armoniche costringono il creatore a far variare le velocità dei pianeti. E poiché occorre rispettare la necessità materiale, le ragioni della vis, la legge di variazione della velocità deve seguire la «legge della bilancia» e questa impone orbite circolari o ellittiche. Sono dunque escluse le orbite circolari eccentriche e i dati astronomici non consentono orbite circolari centrate sul sole. In sintesi: (1) dati astronomici + (2) armonia + (3) necessità fisica di orbite ellittiche.

3. Simmetrie, invarianze e leggi fisiche

Oggi sappiamo che quelle che credevamo essere le leggi della natura, assolutamente certe e perennemente valide, rappresentano soprattutto (anche se non solo) le relazioni tra i fenomeni che abbiamo indagato, e che la loro validità è limitata alla precisione con la quale abbiamo osservato i fenomeni stessi. All'aumentare della potenza dei nostri metodi d'indagine e all'estensione delle osservazioni a domini prima inaccessibili, le leggi che avevamo credute eterne e universali si dimostrano essere solo approssimazioni di leggi più generali (...). Non leggi della natura, dunque, ma leggi valide per quel modello di natura che ci siamo fatti sulla base delle nostre limitate conoscenze. Così all'inizio del nostro secolo il "libro" di cui parlava Galileo nel *Saggiatore* non ci appare più come libro della natura, ma come libro dei modelli della natura che via via ci facciamo sulla base delle nostre osservazioni e descrizioni fenomenologiche.

La nostra conoscenza della natura si esprime in relazioni matematiche. La cosa straordinaria è che quando nuovi fenomeni ci costringono ad abbandonare un modello per sostituirlo con un altro più generale, quest'ultimo si rivela più bello, cioè matematicamente più strutturato e più simmetrico, quasi che la ricerca della bellezza matematica coincidesse con la ricerca della verità. In altre parole, la bellezza come criterio estetico è un elemento intrinseco importante dell'indagine della natura e della conoscenza delle cause dei suoi fenomeni; la bellezza ha quindi valore estetico, euristico ed epistemico fondamentale⁴.

Il modello di indagine seguito da Galileo era fondato sull'unione dell'osservazione dei fenomeni e della generalizzazione astratta, ovvero, tra pratica sperimentale e ricerca di leggi generali. La matematica è il linguaggio nel quale il libro della natura è scritto. Aver capito che essa è la chiave per intendere la natura, almeno la natura dei fisici,

⁴ Per considerazioni approfondite su questo tema, cfr. LUCIANO BOI, *Some Mathematical, Epistemological, and Historical Reflections on the Relationship Between Geometry and Reality, Space-Time Theory and the Geometrization of Theoretical Physics, from Riemann to Weyl and Beyond*, in «Foundations of Science» 24 (1), 2019, pp. 1-38.

è stata probabilmente l'idea più originale di Galileo: da una parte l'osservazione accurata dei fenomeni, sapientemente spogliati dei dettagli contingenti, ha suggerito nuove idee alla matematica (il calcolo differenziale è nato così), dall'altro teorie elaborate per puro interesse intellettuale dai matematici si sono dimostrate profondamente feconde per interpretare fenomeni ignoti al tempo in cui tali teorie sono state inventate.

Molto significativa per le applicazioni fisiche fu la generalizzazione del concetto di spazio operata grazie alla scoperta delle geometrie non euclidee, alla geometria intrinseca delle superfici curve e alla teoria delle varietà differenziabili elaborate, rispettivamente, da Gauss e Riemann⁵. Il concetto di spazio, liberato dalla rigida cornice euclidea basata in parte sulla percezione visiva e tattile, fu esteso al di là delle tre dimensioni tradizionali, a un numero arbitrario, anche infinito di esse. La geometria entrò nell'Ottocento in un periodo – che dura tutt'ora – di straordinaria creatività inventando strutture matematiche nuove di cui quelle note alla geometria euclidea sono solo casi particolari.

Un esempio della potenza dell'astrazione matematica è il passaggio dall'idea vaga di simmetria al concetto matematico di gruppo che secondo Hermann Weyl⁶ è il più originale fra quelli introdotti e sviluppati dalla matematica dell'Ottocento. Quella di simmetria è una delle idee guida della scienza, la quale mira a spiegare i fenomeni conformemente a leggi, cioè a regolarità, all'invarianza nel cambiamento. Nell'idea di simmetria sono presenti due elementi: da un lato l'oggetto che è simmetrico (che presenta certe regolarità), il cerchio o il quadrato per esempio, dall'altro le operazioni (o trasformazioni) che possiamo fare sull'oggetto lasciandolo immutato; per esempio una qualunque rotazione del cerchio attorno a un asse passante per il centro e perpendi-

⁵ CARL FRIEDRICH GAUSS, *Disquisitiones circa superficies curvas*, Göttingen 1827, in *Werke*, vol. IV, Göttingen, 1873. GEORG FRIEDRICH BERNHARD RIEMANN, *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen*, *Habilitationsarbeit*, 1854, in *Bernhard Riemann Gesammelte Mathematische*, nuova edizione, Springer-Verlag, 1990, pp. 304-319.

⁶ HERMANN WEYL, *Symmetry*, Princeton University Press, 1952.

colare al piano del cerchio o, nel caso del quadrato, le rotazioni di 90° , 180° , 270° e 360° gradi.

In un linguaggio un po' più preciso parliamo di un insieme I i cui elementi designeremo con $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ (I per esempio il cerchio, gli elementi $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ i punti del cerchio) e di un gruppo G di trasformazioni che chiameremo $g_1, g_2, g_3, \dots, g_i$ che agiscono su I nella maniera seguente: la trasformazione g_i applicata all'elemento E_j lo manda nell'elemento E_k di I , cioè $g_i E_j = E_k$.

Concisamente diremo che l'insieme I è simmetrico o invariante rispetto a G se una qualunque trasformazione di G manda un elemento di I in un elemento di I . Sia l'insieme I che il gruppo G possono avere un numero infinito di elementi: negli esempi che ho citato sia i punti del cerchio che quelli del quadrato sono infiniti, le rotazioni di G che lasciano invariato il cerchio sono infinite, quelle che lasciano invariato il quadrato sono invece in numero finito, cioè formano un gruppo finito. Nel primo caso abbiamo un gruppo continuo; nel secondo, un gruppo discreto.

Un gruppo si dice *continuo* se ha un numero infinito di elementi, e *discreto* se contiene un numero finito di elementi. I gruppi continui sono molto importanti sia in matematica che in fisica perché collegano profondamente il mondo dei "concetti" matematici agli "oggetti" del mondo fisico tramite le operazioni di trasformazione, cambiamento e invarianza. Possiamo definirli come quei gruppi in cui l'insieme degli elementi, oltre ad avere una struttura di gruppo (vale a dire che gode delle proprietà dell'*associatività*, dell'*esistenza dell'elemento neutro* e dell'*esistenza dell'inverso*; ricordiamo che un gruppo si dice *abeliano* se tutti i suoi elementi commutano, e *non abeliano* se non commutano), è anche uno spazio topologico con topologia compatibile con l'operazione di gruppo.

Fra i gruppi continui, i gruppi di Lie assumono particolare rilevanza in fisica. Si tratta di gruppi topologici in cui l'insieme di punti, oltre ad essere uno spazio topologico, formano una varietà differenziabile. Un gruppo possiamo pensarlo localmente isomorfo a R^n . Citiamo alcuni dei gruppi più importanti. Il gruppo delle rotazioni nel piano R^2 : l'elemento del gruppo prende il nome di $SO(2)$ (gruppo delle matrici

2×2 ortogonali con determinante 1); il gruppo è unidimensionale (cioè dipende da un solo parametro reale, l'angolo di rotazione θ di un vettore (x, y)) ed è abeliano; è importante notare che l'elemento θ è equivalente all'elemento $\theta + 2\pi$ e ciò rende il gruppo compatto in quanto equivalente, come varietà, ad un cerchio. Nello spazio bidimensionale complesso, il piano complesso di Gauss di equazione $u = x + iy$, si ha il gruppo $U(1)$ la cui rotazione è rappresentata dalla "matrice unidimensionale" $U(\theta) = e^{i\theta}$, che è una fase. È importante osservare che le matrici dei due gruppi precedenti soddisfano le stesse proprietà, quindi coincidono, o, in termini matematici, sono *isomorfi* $SO(2) \sim U(1)$. Essi godono inoltre della seguente importante proprietà: l'azione del gruppo può essere ottenuta come composizione di un numero molto grande di trasformazioni "infinitesime" successive. Due altri gruppi importanti sono legati al momento angolare in Meccanica Quantistica. Si tratta del gruppo delle rotazioni in R^3 , $SO(3)$, e del gruppo $SU(2)$ delle matrici unitarie con determinante 1. Un gruppo topologico si dice *compatto* se è munito di una struttura di varietà topologica compatta, compatibile con la struttura algebrica, le cui operazioni di gruppo che agiscono sulla varietà sono funzioni continue. I gruppi di simmetrie di *gauge* sono: il gruppo $U(1)$ per l'elettrodinamica quantistica, il gruppo $SU(2) \times U(1)$ per le interazioni elettrodeboli e il gruppo $SU(3)$ per la cromodinamica quantistica. I gruppi di Lie sono gruppi topologici localmente compatti. Un teorema importante ci dice che *se G è un gruppo topologico compatto, allora le seguenti proposizioni sono equivalenti: (a) G non ha sottogruppi piccoli; (b) G è un sottogruppo chiuso di $O(n)$ per qualche $n > 0$; (c) G è un gruppo di Lie.*

Un gruppo euclideo si compone di rotazioni e traslazioni. Una *rotazione* è un'isometria, cioè una trasformazione geometrica che sposta gli elementi in modo rigido lasciando inalterate le distanze. Ogni rotazione del piano è definita da un punto O , detto centro di rotazione, e da un angolo α caratterizzato da un'ampiezza e da un verso, che può essere orario o antiorario. Una *traslazione* è una trasformazione geometrica che conserva la misura delle lunghezze e l'ampiezza degli angoli, due figure ottenute mediante una traslazione sono direttamente congruenti. In fisica: (i) la traslazione corrisponde al seguente fenome-

no: tutte le particelle descrivono traiettorie (le rette che uniscono due punti qualsiasi di un corpo rimangono sempre parallele alla direzione iniziale); ii) la rotazione intorno a un asse corrisponde al fatto che tutte le particelle descrivono traiettorie circolari attorno a una retta chiamata asse di rotazione.

Consideriamo ora un esempio più ricco, il piano, che è illimitato. È chiaro che il piano resta invariato (cioè immutato) se applichiamo una traslazione a (ossia spostiamo) ogni punto P per un segmento arbitrario A e anche se ruotiamo tutto il piano attorno a un asse arbitrario perpendicolare al piano. L'insieme di tutte le traslazioni e di tutte le rotazioni è un gruppo, detto *gruppo euclideo*. Ognuna di queste rotazioni e traslazioni lascia invariata la distanza $d(P, P')$ fra due punti qualunque P, P' del piano. Una proprietà interessante dei gruppi che appare quando si *compongono* due trasformazioni (o azioni del gruppo): per esempio, se prima effettuiamo una traslazione applicata al punto O (l'origine di due rette perpendicolari) e una rotazione intorno a O di un angolo di 90° , poi ripetiamo queste stesse operazioni invertendone l'ordine, cioè prima la rotazione poi la traslazione, otteniamo allora un risultato diverso da quello che avevamo ottenuto prima: questa proprietà del gruppo si chiama *non-commutatività*. In altre parole, le rotazioni nel piano (attorno a un asse perpendicolare al piano) e le traslazioni sono due operazioni che non commutano.

4. Gli sviluppi concettuali della fisica nell'Ottocento: Newton, Maxwell, Planck, Einstein

Il quadro concettuale della fisica dell'Ottocento rimane quello definito nei *Principia* di Newton (*Philosophiæ naturalis principia mathematica*, 1687): lo spazio euclideo assoluto e il tempo, anch'esso assoluto, ambedue dati a priori ma rigorosamente separati, ambedue infiniti, sono la sede dove si svolgono i fenomeni dovuti al moto e alle trasformazioni della materia. Né i fenomeni influenzano la cornice spazio-temporale, né questa reagisce sui fenomeni.

L'elettromagnetismo di Maxwell, come la meccanica classica di Newton, Euler, Bernoulli, Lagrange, Laplace, Hamilton, ecc., sembrava confermare una concezione deterministica dell'evoluzione temporale dei fenomeni: noto lo *stato* di un sistema fisico a un dato istante t_0 e tutte le forze che agiscono su di esso, è possibile determinare lo stato ad ogni istante successivo.

Lo “stato”, nel caso di un sistema di particelle in meccanica classica, è definito dalla sua posizione nello spazio (coordinate spaziali) e dalla velocità a un dato istante, ove questa velocità può rimanere costante oppure variare con intervento dell'accelerazione, che rappresenta quindi la derivata seconda rispetto al tempo. Caratteristica della fisica dell'Ottocento è la rappresentazione di tutte le grandezze fisiche con *funzioni reali e continue* delle coordinate spaziali e del tempo, formulazione matematica dell'antica affermazione “*Natura non facit saltus*”, le grandezze fisiche possono così essere moltiplicate fra loro e tale prodotto è indipendente dall'ordine dei fattori.

Il primo anno del secolo XX (1901) segnò l'inizio di una nuova concezione della materia. Nel dicembre del 1900 Max Planck presenta all'Accademia delle Scienze di Berlino la sua interpretazione dei risultati sperimentali di Rubens *et* Kulbaum dalla quale emerge che dopo tutto “*Natura facit saltus*”. Per un quarto di secolo questo risultato, estraneo all'ortodossia scientifica ottocentesca, turberà i più brillanti ingegni e, quando finalmente verrà interpretato, la fisica non sarà più quella di prima e la natura ci apparirà qualcosa di molto meno meccanico e deterministico di quanto i filosofi dei lumi avevano cercato di far credere.

Qualche anno dopo la scoperta di Planck, si ha una delle tre grandi rivoluzioni scientifiche e concettuali della fisica del Novecento: la scoperta della relatività ristretta ad opera di Albert Einstein nel 1905. Questa teoria sta alla base di gran parte della fisica del Novecento, e soprattutto ha introdotto una concezione dello spazio e del tempo che ha profondamente cambiato la nostra visione della natura.

Facciamo un passo indietro. Qual è l'idea che Galileo aveva dello spazio e del tempo? Nella sua visione, il tempo è assoluto e lo spazio è relativo, la misura dipende dal moto dei sistemi inerziali di riferimento. L'approccio sperimentale di Galileo consiste nello studio dei

fenomeni, i quali sono stati pensati per confermare un'ipotesi teorica. Famoso è l'esempio in cui egli enuncia (nel *Dialogo sopra i due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano*, 1632) il suo *principio della relatività*, vale a dire che i moti dei corpi sono gli stessi sia che ci si trovi in uno stato di quiete sia in moto rettilineo uniforme, quindi le leggi della meccanica sono le stesse in tutti i sistemi inerziali. Da ciò si evince che non è possibile stabilire se stiamo fermi o se ci muoviamo di moto rettilineo uniforme, quindi non esiste lo stato di quiete assoluto: tutti gli osservatori hanno pari valore in quanto ognuno può considerare sé stesso come Primo Motore Immobile.

Newton attribuiva allo spazio e al tempo la qualifica di assoluti, cioè li considerava come qualcosa di dato a priori, fissi e immutabili, indipendenti l'uno dall'altro; per ciascuno di essi vale la geometria euclidea, rispettivamente quella dello spazio a tre dimensioni e quella di una retta (a una dimensione). Ambedue sono infiniti: verso il passato e verso il futuro il tempo; a Nord e a Sud, a Est e a Ovest, in alto e in basso, lo spazio. La geometria della retta che rappresenta il tempo resta invariata se spostiamo l'origine del tempo. Diciamo che nulla cambia se a ogni tempo t , aggiungiamo o togliamo un qualunque tempo fisso. In linguaggio preciso diciamo che la fisica è invariante rispetto alle traslazioni temporali (cioè non cambia se cambiamo l'origine del tempo).

Per individuare un punto nello spazio occorre fissare *un punto di riferimento* S , cioè dare un punto O e tre rette perpendicolari fra loro nascenti da O : per esempio, O può essere lo spigolo di una stanza e le tre rette quelle definite dall'intersezione di due pareti e di ciascuna di queste con il pavimento. Fissato il riferimento S , ogni punto dello spazio è individuato da tre numeri (x^1, x^2, x^3) , che rappresentano le distanze, con segni opportuni, dai tre piani definiti da S : le due pareti e il pavimento. Naturalmente invece di S , possiamo prendere un altro riferimento S' la cui origine è un altro punto O' ottenuto da O con una traslazione e le cui rette perpendicolari sono ruotate rispetto a quelle che definivano il riferimento S . Nel riferimento S' il punto P è individuato da tre numeri diversi dai precedenti, chiamiamoli (X^1, X^2, X^3) . Come sappiamo, le proposizioni della geometria euclidea sono invarianti rispetto alle trasformazioni (traslazioni e rotazioni del gruppo

euclideo). Ciò significa che esse mantengono la stessa forma sia che le esprimiamo usando le coordinate (x^1, x^2, x^3) del sistema S sia che le esprimiamo usando quelle (X^1, X^2, X^3) del sistema S' .

Siamo abituati a pensare lo spazio e il tempo come due concetti assolutamente distinti, ma se esaminiamo la cosa attentamente ci rendiamo conto che è difficile pensare all'uno senza l'altro. Minkowski ha giustamente osservato che nessuno ha mai visto un posto se non a un certo tempo, né ha vissuto un istante se non in un dato posto. A questa unione di spazio e tempo si dà il nome di *evento*, caratterizzato da quattro numeri (x^1, x^2, x^3, t) : i primi tre precisano, rispetto a un dato sistema di riferimento, la posizione nello spazio, e il quarto, t , l'istante corrispondente rispetto a una data origine del tempo. L'insieme di tutti gli eventi si chiama spazio-tempo ed è chiaramente uno spazio a 4 dimensioni.

Il primo a porsi il problema di quali movimenti relativi di due sistemi di riferimento fossero compatibili con le osservazioni fu Galileo, e la soluzione che ne diede è contenuta nel principio che oggi chiamiamo *relatività galileiana*, la quale era basata sull'osservazione di fenomeni meccanici. Secondo tale principio, verificato la prima volta sperimentalmente da P. Gassendi nel 1640, non è possibile decidere con esperimenti meccanici se il nostro sistema di riferimento sia in quiete o si muova di moto rettilineo uniforme. L'unica cosa che ha senso è il moto relativo di due oggetti, non quello assoluto di un solo oggetto.

Gassendi fece l'esperienza suggerita da Galileo di lasciar cadere una pietra dall'albero di una nave che si muoveva con velocità uniforme rispetto alla riva in un mare calmo: la pietra cadde, come aveva predetto Galileo, ai piedi dell'albero, come se la nave fosse ferma. Se ne conclude che è impossibile distinguere con esperienze meccaniche lo stato di quiete da uno stato di moto rettilineo uniforme. Naturalmente il moto deve essere rettilineo e uniforme: un moto accelerato è facilmente avvertibile non foss'altro per gli effetti che esso provoca in ognuno di noi.

Tradotto in un linguaggio preciso questo significa che il principio di relatività impone che le rotazioni (che nel caso della nave corrispondono al rullio e al beccheggio) devono essere indipendenti dal tempo, mentre le traslazioni devono dipendere linearmente dal tempo (cioè essere proporzionali al tempo).

Esplicitamente il principio di relatività galileiana significa che le coordinate (x^1, x^2, x^3, t) e le coordinate $(x^1 - v^1 t, x^2 - v^2 t, x^3 - v^3 t, t + a^0)$ dello stesso evento in due sistemi che si muovono l'uno rispetto all'altro con velocità $v = (v^1, v^2, v^3)$ sono perfettamente equivalenti. Le trasformazioni che fanno passare da x^i a $x^i - v^i t$, ecc. formano un gruppo che si chiama *gruppo di Galileo*, anche se Galileo non lo disse mai perché non conosceva il concetto di gruppo.

La meccanica newtoniana è determinata dalla richiesta che le sue equazioni siano invarianti rispetto alle trasformazioni del gruppo di Galileo, allo stesso modo come, secondo Felix Klein (il matematico tedesco autore del ben noto Programma d'Erlangen, 1872), la geometria euclidea è determinata dalla richiesta che le sue proposizioni siano invarianti rispetto al gruppo euclideo.

Il gruppo di Galileo determina la struttura dello spazio-tempo (l'ambiente della fisica), la quale oltre che a risultare tutt'altro che intuitiva è, dal punto di vista matematico, assai poco elegante. Ciò deriva dal fatto che lo spazio e il tempo sono trattati in maniera asimmetrica nella meccanica classica, nella quale spazio e tempo hanno un ruolo molto diverso. Lo spazio della fisica classica, matematicamente parlando, è uno "spazio fibrato" la cui base è la retta del tempo e le cui fibre sono spazi euclidei tridimensionali.

Uno *spazio fibrato* è un concetto chiave della matematica del XX° secolo. Va innanzitutto chiarito che l'idea di fibrato consiste nell'associare a ogni punto di una varietà uno spazio vettoriale della stessa dimensione della varietà: quest'oggetto si chiama *spazio tangente*. L'unione disgiunta degli spazi tangenti, detta *fibrato tangente* alla varietà, ha a sua volta una struttura naturale di varietà, di dimensione pari al doppio di quella della varietà di partenza. Il fibrato tangente è il primo esempio di una classe molto importante di varietà, i fibrati vettoriali, che possono essere descritti, in termini generali, come unione disgiunta di spazi vettoriali associati in modo differenziabile ai punti di una varietà di base. La definizione formale dei fibrati vettoriali comprende lo studio delle *sezioni* dei fibrati vettoriali, cioè le applicazioni differenziabili che associano a ciascun punto della varietà base un vettore nel corrispondente spazio vettoriale. Le sezioni del fibrato tangente sono

i *campi vettoriali*. In questo modo il fibrato diventa un oggetto dinamico. Infatti, dare un campo vettoriale è come assegnare in maniera differenziabile un vettore velocità a ciascun punto della varietà base; un punto della varietà che si muove seguendo questa velocità percorre una curva detta *curva integrale* del campo vettoriale. Seguendo le curve integrali per un tempo prefissato si ottiene un'applicazione differenziabile da un aperto della varietà a valori nella varietà stessa, detta *flusso* del campo vettoriale. In termini generali, la definizione formale è la seguente: una funzione continua $p : E \rightarrow B$ è un fibrato con spazio totale E , spazio di base B e spazio fibra F se esiste un ricoprimento aperto $\{U\}$ di B , e per ogni $U \in \{U\}$ un omeomorfismo $\phi_U : U \times F \rightarrow p^{-1}(U)$ con $p \circ \phi_U(x, y) = x$ per $x \in U$ e $y \in F$; per ogni $b \in B$, $p^{-1}(b)$, che è omeomorfa a F , si definisce la fibra sopra b . Il fibrato $\zeta = (E, B, F, p)$ viene inoltre fornito di un gruppo strutturale G , che agisce su E e su F . Si tratta di una struttura molto ricca e, in particolare, se lo spazio di base B soddisfa a particolari condizioni, la proiezione p del fibrato è una *fibratura*. Il concetto di fibrato ha avuto un'ampia diffusione in molti settori della matematica e della fisica. È di particolare interesse il fatto che ogni moderna teoria di *gauge* si basa sullo studio di un fibrato vettoriale, mentre la struttura globale dei fibrati permette la formalizzazione del concetto di *istante* e della carica topologica; inoltre, lo studio di grandezze gauge-invarianti ha portato alla classificazione degli spazi fibrati mediante le classi di Chern (classi di coomologia definite su un fibrato vettoriale complesso n -dimensionale) su un fibrato complesso.

5. La relatività speciale (o ristretta) di Einstein

La teoria dell'elettromagnetismo, formulata da Maxwell nel suo *A treatise on electricity and magnetism* (1873) suggerì a Einstein nel 1905 la prima profonda revisione del modello newtoniano dello spazio-tempo. Nelle equazioni di Maxwell compare una velocità c che l'esperienza dimostra essere uguale alla velocità della luce nel vuoto, $c = 3 \times 10^8$ m/s. Fu questa coincidenza, a priori inaspettata, a permettere di includere l'ottica tra i fenomeni elettromagnetici e a fornire così la più esplicita

conferma della teoria di Maxwell. Come dimostrò una celebre esperienza compiuta da Michelson nel 1879 e in seguito perfezionata nel 1904, la velocità della luce emessa da una sorgente in moto con velocità v è indipendente da v . La velocità della luce appare dunque come la velocità massima con cui si propaga un segnale. Nello spazio-tempo newtoniano una tale velocità non trova posto, perché in esso non esiste alcun limite superiore alla velocità.

Il problema che si presentò ad Einstein era dunque quello di riconciliare il *principio di relatività*, l'impossibilità cioè di rivelare un moto rettilineo uniforme che l'esperimento di Michelson dimostra esser valido per tutta la fisica e non solo per la meccanica – con la costanza della velocità della luce, cioè con la violazione dell'invarianza rispetto alle trasformazioni di Galileo che non ammettono nessuna velocità massima. È chiaro anche che l'esistenza di una velocità massima con cui si possono trasmettere segnali è inconciliabile con lo schema spazio-temporale newtoniano che ammette la possibilità di definire la contemporaneità di eventi separati da qualunque distanza spaziale anche infinita. Le modificazioni *del concetto di contemporaneità* rappresenta l'essenza della relatività einsteiniana e della nuova concezione dello spazio-tempo.

Si deve comunque a Poincaré la formulazione precisa del gruppo di trasformazioni che lasciano invarianti le equazioni di Maxwell (in una memoria apparsa nei *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, 1897). Sono trasformazioni lineari (ciò dipendenti solo dalla prima potenza delle coordinate (x^1, x^2, x^3, t) e le coordinate (X^1, X^2, X^3, T)) dello stesso evento in due diversi sistemi di riferimento in moto relativo con velocità v ; le trasformazioni dipendono dal rapporto (v/c^2) e sono tali che nel limite in cui c tende all'infinito si riducono a quelle di Galileo.

La geometria dello spazio-tempo della relatività speciale è quindi diversa da quella immaginata da Newton ed è matematicamente più elegante e concettualmente più soddisfacente di quest'ultima. Infatti l'esistenza di una velocità privilegiata c permette di trattare spazio e tempo sullo stesso piano, associando a un tempo t una distanza $ct = ct$. Perciò tempo e spazio non sono più grandezze distinte e incommen-

surabili come per Newton: conoscendo c ci basta un solo strumento per misurare entrambe.

È quello che facciamo quando parliamo di anno-luce, cioè la distanza che la luce percorre in un anno $= c \times 1 \text{ anno} = 3 \times 10^8 \text{ (m/s)} \times 3 \times 10^7 \text{ s} = 9.3 \times 10^{15} \text{ m}$). Lo spazio-tempo diventa così molto più simile allo spazio tridimensionale in cui viviamo, cioè diventa, matematicamente parlando, uno *spazio vettoriale*, i cui punti sono eventi che avvengono nello spazio-tempo.

Molto simile ma non analogo, perché la geometria dello spazio-tempo non è uguale a quella dello spazio euclideo tridimensionale. In quest'ultimo qualunque rotazione o traslazione facciate, il quadrato l^2 della distanza tra due punti resta invariato. La geometria dello spazio-tempo invece è determinata dal gruppo di Poincaré per il quale la distanza spaziale l^2 per due eventi e l'intervallo di tempo che li separa non sono singolarmente invarianti come avveniva per lo spazio-tempo della meccanica newtoniana: solo la combinazione di spazio e tempo data da $(x^1)^2 + (x^2)^2 + (x^3)^2 - (x^4)^2$ rimane invariata (si noti che $l^2 = (x^1)^2 + (x^2)^2 + (x^3)^2$). Spazio e tempo risultano così intimamente connessi seppur in maniera non del tutto simmetrica a causa del segno – davanti a $(x^4)^2$; la combinazione $s^2 = (x^1)^2 + (x^2)^2 + (x^3)^2 - (x^4)^2$ non è quadratica, cioè non è il quadrato delle distanze del punto O di coordinate $(0, 0, 0, 0)$ dal punto P di (x^1, x^2, x^3, x^4) , perché i quadrati delle distanze sono per definizione positivi o nulli solo quando i due punti coincidono.

6. La relatività generale e l'interazione tra geometria (curvatura) e fisica (materia)

Lo spazio della relatività speciale, pur essendo con le sue quattro dimensioni abbastanza lontano dall'intuizione comune, ha tuttavia una struttura geometrica (relativamente) semplice. Esso condivide alcune delle sue proprietà con il piano e lo spazio euclideo, ad esempio il fatto che sia illimitato e infinito. Noi sappiamo però che ci sono delle superfici e degli spazi che sono illimitati e pur finiti, per esempio la sfera e gli ellipsoidi, sui quali la geometria d'Euclide non è più valida (o è valida solo local-

mente, cioè in porzioni infinitesimamente piccole della superficie). In particolare queste superfici e questi spazi sono curvi e non piatti. Perché non pensare allora che lo spazio-tempo sia anch'esso uno spazio-tempo curvo e limitato? Uno spazio-tempo infinito e illimitato come quello della relatività speciale, implica quasi necessariamente un universo anch'esso infinito e illimitato nello spazio e nel tempo, ed è proprio questa concezione cosmologica che ha dominato il pensiero scientifico e filosofico dal Seicento fino quasi agli anni trenta del secolo scorso.

La considerazione e lo studio degli spazi curvi ha costituito un elemento di profondo cambiamento concettuale nella matematica e nella fisica che ha trasformato in particolare il modo di concepire i rapporti tra geometria e fisica.

Abbiamo visto che l'invarianza dei fenomeni elettromagnetici rispetto al gruppo di Poincaré ha un'evidenza sperimentale e che questa invarianza è a favore di una fisica ambientata in uno spazio-tempo piatto, infinito e illimitato. Ma questo modello di spazio-tempo non è concettualmente soddisfacente. Infatti, mentre sia la relatività galileiana che quella speciale di Einstein ci hanno insegnato l'impossibilità di rivelare una velocità uniforme assoluta (solo quella relativa ha senso) i moti rotatori (o più generalmente accelerati) danno luogo a fenomeni rivelabili, per esempio quelli dovuti alle forze centrifughe (in particolare la forza apparente d'inerzia in un sistema di riferimento in moto circolare). Per Newton le rotazioni andavano considerate unicamente rispetto allo spazio assoluto, cioè a un sistema di riferimento privilegiato. Per Newton è dunque nello spazio che va ricercata l'origine delle forze centrifughe e di altre simili. Ma se lo spazio dà origine a forze che agiscono sulla materia mentre quest'ultima non reagisce in alcun modo sullo spazio, si ha fra spazio e materia una relazione asimmetrica assai poco intelligibile.

La svolta avviene con Gauss e soprattutto con Riemann, il quale nel 1854 (nel suo scritto di Abilitazione) aveva osservato che questa asimmetria fra spazio dato a priori, che agisce sulla materia, e la materia che occupa lo spazio lasciandolo immutato è concettualmente insoddisfacente: non ha senso infatti parlare di proprietà dello spazio senza tener conto della materia, né del moto di questa senza considerare la struttura geometrica dello spazio.

Del resto senza materia non è possibile conoscere la struttura dello spazio, non foss'altro perché senza materia non esisterebbero strumenti (i corpi rigidi e i metri campione di cui parla prima Helmholtz e poi Einstein) per misurare lunghezze e intervalli di tempo e cioè per determinare la struttura metrica (locale) dello spazio-tempo. È più logico pensare che sia la distribuzione della materia a determinare la geometria dello spazio-tempo e che questa a sua volta prescriva l'evoluzione dei fenomeni fisici e in particolare le leggi del moto. Ciò vuol dire superare lo schema concettuale che aveva determinato tutta la fisica da Galileo e Newton in poi: uno spazio-tempo rigidamente fissato a priori, nel quale si svolgono i fenomeni dovuti alla materia, quasi come una storia che si svolge in una scena immutabile. In luogo di questo schema, Riemann propone una concezione più profonda e più complessa nella quale materia e spazio-tempo (fenomeni fisici e strutture geometriche) siano inseparabilmente congiunti e dinamicamente interdipendenti: l'una, la materia, determina la struttura geometrica dello spazio-tempo, e questa a sua volta determina le leggi del moto della prima.

Per la sua teoria della relatività generale Einstein considera non solo sistemi di riferimento in moto relativo uniforme, ma anche sistemi in moto accelerato. Il moto uniformemente accelerato vale per ogni corpo, indipendentemente dalla sua massa e dalla sua composizione, il che vuol dire che l'accelerazione che subisce un corpo dipende solo dal campo gravitazionale, cioè dalla forza per unità massa. Tale campo può annullarsi se si usa un sistema di riferimento fisso in caduta libera. Einstein ebbe la grande intuizione fisica che la peculiarità della gravitazione (della forza gravitazionale) è l'uguaglianza fra massa inerziale (il coefficiente che moltiplica l'accelerazione) e massa gravitazionale (il coefficiente che moltiplica il campo gravitazionale).

L'eliminazione del campo gravitazionale con l'uso di un sistema di coordinate in caduta libera non può ottenersi globalmente su tutto lo spazio-tempo, a meno che il campo gravitazionale non sia costante. Se invece esso varia da punto a punto occorre, per eliminarlo, in ogni punto, un diverso sistema di coordinate (sistema di riferimento). Si è così condotti a considerare trasformazioni di coordinate generali (invertibili) che dipendono in maniera continua e differenziabile dal

punto, trasformazioni dunque molto più generali di quelle di Poincaré che caratterizzano la geometria della relatività speciale. Queste nuove trasformazioni sono quelle della geometria riemanniana che valgono per ogni spazio curvo a n dimensioni ($n > 3$) dotato di una metrica che varia localmente in ognuno dei suoi punti.

In altre parole, quello che ora è richiesto rispetto alle trasformazioni di Poincaré per la relatività speciale è soltanto che tale geometria (riemanniana) valga in un intorno piccolo di ciascun punto (cioè localmente) dello spazio-tempo, ma non globalmente. La situazione è simile a quella che si ha su una superficie curva bidimensionale, la Terra per esempio, la cui geometria, in un intorno piccolo di ogni suo punto, può essere approssimata dal piano tangente a tal punto, la quale però non vale globalmente sulla superficie.

Similmente la teoria della relatività generale richiede che le leggi della fisica siano invarianti rispetto a trasformazioni generali delle coordinate locali (cioè in ogni punto) dello spazio-tempo. Ciò significa ammettere che la struttura dello spazio-tempo sia meno rigida di quella che avevamo supposto sin qui e sia invece quella di uno spazio curvo la cui curvatura sia determinata dall'effetto gravitazionale della materia e a sua volta influenzi la distribuzione della materia nell'universo.

La relatività generale è la prima teoria fisica in cui la struttura dello spazio-tempo non è data a priori ma va determinata risolvendo un sistema di equazioni assai complicate, dette *equazioni di Einstein*, che contengono come incognite le grandezze che determinano la geometria dello spazio-tempo e la sorgente del campo gravitazionale. Secondo la teoria della relatività generale, le proprietà geometriche dello spazio-tempo, quali la distanza fra due eventi infinitamente vicini, la curvatura, ecc., variano in genere da punto a punto, come avviene in generale sulle superfici curve. Tali proprietà sono la manifestazione geometrica del campo gravitazionale dovuto alla materia: per esempio, la generalizzazione del potenziale gravitazionale di Newton è legata alla distanza fra punti infinitamente vicini, e le forze gravitazionali di marea (cioè la variazione del campo gravitazionale per unità di distanza) sono legate alla curvatura dello spazio-tempo. Precisamente,

le equazioni di Einstein sono equazioni alle derivate parziali non lineari che legano le componenti del tensore metrico g_{ij} e le loro derivate prime e seconde alle componenti del tensore energia-impulsione T_{ij} della materia.

Due concetti matematici fondamentali per capire la relatività generale sono quelli di “trasporto parallelo” e di “connessione”. In termini intuitivi, il concetto di *trasporto parallelo* si può descrivere come segue. Immaginiamo di spostare un vettore lungo un cammino chiuso formato di archi di geodetiche, sotto la condizione che rimanga fisso l'angolo tra il vettore e la geodetica lungo la quale si muove. Se si esegue l'operazione su di un piano, il vettore ritorna puntato lungo la direzione di partenza, ma in uno spazio curvo si ottiene un risultato ben diverso. Sulla Terra esiste, per esempio, un ottante (triangolo geodetico equilatero) avente come vertici il Polo Nord, Quito, capitale dell'Equador, e Libreville, nello Zaire, e avente come lati l'arco di meridiano Polo Nord-Quito, l'arco di equatore Quito-Libreville e infine l'arco di meridiano Libreville-Polo Nord. Gli angoli interni dell'ottante valgono $\pi/2$. La formula qui sopra si scrive allora come: $\alpha + \beta + \gamma - \pi = \pi/2 = Area/R^2$. L'area dell'ottante vale quindi $\pi R^2/2$, ossia l'ottava parte dell'area terrestre $4\pi R^2$. Partiamo ora dal Polo Nord con il vettore, usando la convenzione di Levi-Civita; ritorneremo al Polo Nord con il vettore ruotato di $\pi/2$. Il risultato ha validità universale: il vettore che fa il giro di un triangolo geodetico torna ruotato dell'angolo $Area \times Curvatura$, ossia di un certo difetto angolare ε ; in altri termini, il cammino non è un invariante conforme. Il vantaggio della nozione di Levi-Civita sta nella sua validità per cammini chiusi che non sono triangoli e che non sono neppure composti da archi di geodetiche. Infine essa permette un'immediata applicazione a spazi di dimensione qualsiasi, per cui l'uso del triangolo appare assolutamente inadeguato. Cammini chiusi che possono deformarsi l'uno nell'altro senza incontrare zone in cui esiste curvatura sono equivalenti agli effetti del trasporto parallelo.

La *connessione* è un oggetto geometrico tra i più importanti dell'analisi tensoriale; esso fornisce un metodo per valutare la velocità con cui i vettori e i tensori variano in modo infinitesimale su una varietà riemanniana. L'operatore ∇ dato da $\nabla dw^i = \Gamma^k_{ij} dw^j du^k$ (dove Γ^k_{ij} defini-

scono i simboli di Christoffel, con indici che possono variare da 1 a n) prende il nome di *connessione di Levi-Civita*. Esso viene usato per introdurre la nozione di parallelismo, che permette di stabilire quando un tensore è costante lungo una curva negli spazi curvi e n -dimensionali considerati da Riemann. La struttura indotta dal prodotto scalare canonico (o *forma bilineare simmetrica*) è un esempio di *metrica riemanniana* su una varietà, mentre la derivazione di un campo vettoriale (più in generale, la *derivata covariante*) nella direzione data da un altro è un esempio di *connessione*. Una metrica riemanniana permette di misurare la lunghezza di vettori tangenti, la lunghezza di curve e di introdurre la distanza fra due punti; una connessione permette di derivare campi vettoriali, e in particolare di dare una nozione di campi costanti lungo curve (chiamati *campi paralleli*). Va sottolineato che su ogni varietà si possono definire infinite connessioni e infinite metriche riemanniane.

Notiamo, a questo proposito, che nel 1918 Hermann Weyl sviluppò la geometria differenziale affine, basata esclusivamente sulla nozione di parallelismo e non sulla metrica riemanniana; assumendo il punto di vista della teoria degli invarianti, egli creò nel 1921 la teoria delle connessioni proiettive e conformi; in una serie di lavori pubblicati tra il 1923 e il 1925, Elie Cartan sviluppò anche la teoria delle connessioni affini, proiettive e conformi secondo il punto di vista del Programma di Erlangen di Felix Klein, cioè facendo agire un determinato gruppo, un gruppo di Lie, sulla varietà; l'associazione dei gruppi di Lie semplici e la geometria differenziale delle varietà differenziabili culminò nella sua scoperta degli spazi riemanniani simmetrici, i quali offrono una naturale generalizzazione della superficie sferica nello spazio euclideo e del disco unitario nel piano complesso con la metrica non euclidea di Poincaré.

È importante peraltro sottolineare che l'esistenza di una metrica riemanniana o di una connessione con determinate proprietà (in particolare riguardanti la curvatura) può avere delle conseguenze sulla topologia della varietà; in altri termini, ci può essere una relazione diretta tra la curvatura e la topologia globale di una varietà, dotata di una metrica riemanniana. Per esempio, la curvatura positiva determina la topologia, cioè la forma e le proprietà globali, di certe varietà rieman-

niane. Si tratta del problema più generale del rapporto tra proprietà locali e proprietà globali. Sappiamo che la curvatura di una curva o di una superficie si può determinare esaminando soltanto una piccola regione intorno a un punto, ma è chiaro che questa nozione di tipo locale può influire sull'andamento della curva o della superficie nella loro globalità. Per esempio, proprio la curvatura della sfera è responsabile della sua chiusura su se stessa e quindi del fatto che la sua area sia finita. Anche la teoria delle geodetiche mette in risalto la differenza tra locale e globale. In una regione sufficientemente piccola di una superficie, la geodetica tra due punti è l'unica curva che individua il percorso di minima distanza da un punto all'altro; dal punto di vista analitico, si tratta della traiettoria di una particella le cui coordinate $u^i(t)$ verificano le seguenti equazioni alle derivate parziali del secondo ordine, $\ddot{u}^k + \Gamma^k_{ij} \dot{u}^i \dot{u}^j = 0$ ($k = 1, 2$), dove i punti sopra le lettere indicano le derivate rispetto a t . Invece, se la regione considerata si aggrandisce (supponiamo di gonfiare una palla piatta) si viene a perdere la proprietà di unicità, come nel caso della sfera, in cui le geodetiche coincidono con i cerchi massimi. Lo studio di altre superfici su cui le geodetiche si richiudono su se stesse come nel caso della sfera, dando luogo alla proprietà della *convessità*, rappresenta un problema affascinante con conseguenze intuitivamente assai evidenti per il chiarimento di alcuni problemi fondamentali in diversi settori della fisica.

Il teorema di Gauss-Bonnet (la cui prima formulazione si deve a Gauss) racchiude l'essenziale degli sviluppi appena ricordati. Un suo enunciato più recente e completo (trattato dalla topologia differenziale e algebrica) si ottiene dividendo una superficie chiusa Σ dello spazio tridimensionale in un certo numero di triangoli geodetici (questo metodo è chiamato *triangolazione delle varietà*) e sommando il contributo dell'espressione $\int_{\Delta} K dA = \alpha + \beta + \gamma - \pi$ (dove l'integrale del primo membro è approssimato dalla somma dei prodotti della curvatura K per l'area di regioni infinitesime) per ciascuno di essi. Ne segue che $\int_{\Sigma} K dA = 2\pi\chi$, dove il numero χ denota la caratteristica di Eulero di Σ . Quest'ultima equazione è la più semplice di una famiglia considerevole di equazioni che mettono in relazione la curvatura di un oggetto con la sua topologia. Si osservi inoltre che essa non cambia quando viene fatta variare la

metrica assegnata tramite la prima forma fondamentale della superficie. Dal teorema di Gauss-Bonnet si deduce che la sfera è l'unica superficie chiusa a curvatura gaussiana costante positiva, mentre il toro è l'unica superficie chiusa a curvatura identicamente nulla. Esistono, invece, molte superfici di curvatura gaussiana costante negativa, che presentano una geometria iperbolica. Tra i modelli più noti, citiamo la *pseudosfera* (scoperta da Eugenio Beltrami) formata dalla rotazione di una curva particolare, la trattrice, e il *semipiano superiore* formato da tutti i punti (x, y) con y positivo, su cui vale una metrica iperbolica (questo modello è dovuto a Poincaré).

7. Brevi cenni sul ruolo delle simmetrie in meccanica quantistica e nelle teorie di gauge

Secondo il grande fisico teorico Werner Heisenberg (1965),

Il conflitto tra materialismo e idealismo ha segnato l'intera storia della filosofia, in particolare la storia della fisica. Questa antitesi è stata resa nuovamente attuale in una forma ben precisa dalla fisica atomica moderna, in particolare dalla teoria dei quanta. Fino alla scoperta del quanto d'azione di Planck, le moderne scienze naturali esatte, fisica e chimica, erano orientate materialisticamente. Nel secolo decimonono si consideravano gli atomi della chimica e le loro parti che oggi chiamiamo particelle elementari come ciò che esiste veramente, come il substrato reale d'ogni materia. Sembrava che l'esistenza degli atomi fosse una cosa evidente, indubitabile, e che non avesse bisogno di spiegazione. Ma Planck aveva svelato nei fenomeni di radiazione un carattere di discontinuità che sembrava collegato in modo sorprendente con l'esistenza degli atomi, e che d'altra parte non poteva essere spiegata in base alla loro esistenza. Questo carattere, rivelato dal quanto d'azione, fece pensare che tanto la discontinuità, quanto l'esistenza degli atomi fossero manifestazioni comuni di una legge fondamentale della natura, d'una struttura matematica insita nella natura, e che la sua formulazione potesse condurre a un'unificazione delle nostre idee sulla struttura della materia. È proprio ciò che avevano tentato i filosofi greci. Dunque l'esistenza degli atomi non era forse un fatto primordiale, non suscettibile di ulteriori spiegazioni. Quest'esistenza poteva anzi essere ricondotta, come in Plato-

ne, all'azione di leggi naturali formulabili matematicamente, dunque all'azione di simmetrie matematiche.

In effetti, le leggi delle radiazioni di Planck si distinguevano in un modo assai caratteristico dalle leggi naturali formulate in precedenza. Se le leggi naturali precedenti, per esempio quelle della meccanica di Newton, contenevano delle cosiddette costanti, queste designavano delle proprietà di oggetti, per esempio la loro massa o l'intensità della forza agente fra due corpi, o cose simili; invece il quanto d'azione di Planck, che appare come la costante caratteristica nella sua legge delle radiazioni, non rappresenta una proprietà di oggetti ma una proprietà della natura. A questa nuova concezione della natura contribuirono la scoperta di Planck (1900) sul corpo nero e il fenomeno della radiazione, e la scoperta di Einstein (1905) sul comportamento discreto dei fotoni. Il passo successivo furono le prime idee sulla meccanica quantistica. Nel 1913, Niels Bohr introdusse due postulati che apparivano ingiustificabili nell'ambito della fisica classica: (a) ogni atomo è caratterizzato da una successione discreta di livelli energetici E_1, E_2, E_3, \dots . In condizioni normali, l'atomo si trova nel livello di energia più bassa E_1 ma se viene perturbato, per esempio scaldandolo, può portarsi in uno dei livelli eccitati E_2, E_3, \dots dai quali dopo brevissimo tempo (circa 10^{-10} s) si ritorna al livello più basso; (b) le frequenze angolari ν_{ij} delle righe spettrali di un atomo sono caratterizzate da una coppia (i, j) di numeri interi e sono legate alle energie E_1, E_2, \dots dei livelli energetici della relazione $\hbar \nu_{ij} = E_i - E_j$ ($E_i > E_j$). In questa relazione, \hbar è la stessa costante introdotta da Planck nello studio dello spettro del corpo nero, e da Einstein per interpretare l'effetto fotoelettrico. I postulati di Bohr non trovano spiegazione nella fisica classica secondo la quale l'energia può assumere ogni valore e non soltanto valori discreti. L'unica conclusione che si doveva trarre era dunque l'inapplicabilità della fisica classica ai fenomeni connessi alla struttura dell'atomo. Bisognava ammettere che, almeno all'interno dell'atomo, «Natura facit saltus», e abbandonare il sogno che le leggi scoperte dall'osservazione dei fenomeni macroscopici fossero le leggi universali della natura, valide comunque.

Lo sviluppo della fisica spettrale, grazie a raffinati strumenti d'indagine e delicate apparecchiature, metteva in grado i fisici di osservare un mondo fino ad allora del tutto invisibile, una regione della natura che, a tutti gli effetti, fino ad allora non esisteva. Era ormai chiaro che componenti invisibili e microscopici come elettroni, fotoni, nuclei si comportavano in modo molto diverso dagli oggetti del nostro mondo macroscopico. Il linguaggio con il quale gli spettri del mondo atomico, cioè le righe spettrali, o la curva continua del corpo nero, è assolutamente incomprensibile a chi non conosce quel linguaggio, il quale è decodificabile solo attraverso complicati ragionamenti matematici che hanno una connessione solo indiretta con l'osservazione fenomenologica iniziale; ed è percorrendo un lungo cammino di elaborazione e comprensione matematica che spesso i fisici giungono a scoprire "tesori", cioè proprietà e comportamenti del mondo fisico di ineffabile bellezza.

Un fenomeno spettrale, come quello della distribuzione spettrale della radiazione del corpo nero (nel modello teorico che lo descrive si riportano sulle ascisse le lunghezze d'onda – proporzionali all'inverso della frequenza – in unità di 10^{-7} m; sulle ordinate l'intensità in unità convenzionali; i numeri sulle curve indicano le temperature assolute; all'aumentare della temperatura il massimo della distribuzione si sposta verso le lunghezze d'onda minori) è riproducibile sperimentalmente. La natura spettrale fa parte quindi della realtà fisica (cristalli liquidi, laser, molecole, ecc.), ed essa presenta una straordinaria varietà e un ordine che rimane ancora in gran parte un mistero.

Sia la relatività ristretta che quella generale hanno avuto ciascuna come punto di partenza e come motivazione un solo fatto sperimentale: la costanza della velocità della luce per la prima, il principio d'equivalenza della massa inerziale e della massa gravitazionale per la seconda.

La meccanica quantistica è stata scoperta grazie a una ricca e varia fenomenologia disponibile, che andava tuttavia interpretata teoricamente e generalizzata matematicamente per acquisire un fondamento sicuro. Questo lavoro di generalizzazione teorica lo si deve innanzitutto a Heisenberg, al quale seguì l'opera importante di Dirac, Born e

Jordan, preceduti dai risultati già ottenuti da Bohr. Le loro scoperte e l'elaborazione teorica della meccanica quantistica rivelò innanzitutto che quello che fino ad allora avevamo letto nel "libro della natura" non era una descrizione di tutta la natura, ma un modello approssimato della natura valido solo nell'ambito dei fenomeni dai quali era stato derivato ma che non poteva essere esteso a priori al di là di tale ambito.

Forse dovremmo rinunciare alla speranza di scoprire «le vrais systèmes du monde» (di Laplace). Lo comprese subito Einstein quando, al giovane Heisenberg che gli espose la sua teoria disse: «Se le sue idee fossero giuste dovremmo limitarci a parlare solo di quello che conosciamo della natura e non di quello che la natura realmente fa». Heisenberg non rinunciò a cercare di capire "quello che la natura realmente fa", a una nuova possibilità di pensiero. Per questo bisogna partire dalla consapevolezza, secondo il fisico tedesco, che «l'estensione dell'indagine scientifica a nuovi campi di esperienza avviene ben diversamente che applicando ad oggetti nuovi i principi precedentemente noti». Si trattava di cambiare questi stessi principi. Il mutamento che occorreva introdurre nella meccanica classica non era una modifica delle leggi del moto, quanto piuttosto la rinuncia a qualche concetto fondamentale. L'ispirazione gli venne da un esame della relatività d'Einstein. Scrive Heisenberg:

Il centro della relatività speciale è la constatazione che la contemporaneità di due eventi in differenti luoghi è un concetto problematico. Similmente per la teoria dei quanti è della massima importanza la constatazione che non è sensatamente possibile parlare simultaneamente di una precisa posizione e di un preciso impulso di una particella.

È questo il contenuto del principio di indeterminazione, che Heisenberg espose in un fondamentale lavoro del 1927 ("Über die anschaulichen Inhalt der quantentheoretische Kinematik und Mechanik", *Zeitschrift für Physik*), uno dei testi classici della letteratura scientifica del Novecento. In questo articolo Heisenberg dedusse dal formalismo della meccanica quantistica, che egli stesso aveva introdotto due anni prima, il significato fisico e intuitivo (*anschaulich Inhalt*) della nuova

meccanica. Formalmente il principio d'indeterminazione è espresso dalla celebre disuguaglianza

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq \frac{1}{2} \hbar / 2\pi,$$

dove Δq e Δp sono rispettivamente l'incertezza nella misura della posizione (spaziale) q e quella della misura dell'impulsione p di una particella (che è una variabile temporale). La disuguaglianza non dice che non si possa misurare con assoluta precisione la posizione q o la componente dell'impulso p (l'impulso è il prodotto della massa per la velocità). Afferma solo che non si può raggiungere una precisione infinita nella misura contemporanea di q e p : infatti, tanto più precisa è una delle due misure, tanto più imprecisa è l'altra.

È corretto dire che l'apparizione di questo principio sulla scena della fisica ha contribuito a rimettere profondamente in questione la concezione della natura che aveva dominato le scienze per più di tre secoli. Ha significato la fine dell'illusione di poter raggiungere una conoscenza completa (e assolutamente certa) della natura, o quella che si credeva dovesse essere una conoscenza completa, e quindi la fine di una previsione sicura dell'evoluzione futura di un sistema fisico. Ricordiamo infatti che, secondo la meccanica classica, il calcolo della traiettoria di una massa puntiforme richiede la conoscenza esatta della sua posizione e del suo impulso all'istante iniziale, proprio quella conoscenza che il principio di indeterminazione nega possa essere mai raggiunta. Il determinismo di Laplace che garantiva di poter predire l'avvenire dell'universo dalla conoscenza della posizione e della velocità iniziali risulta incompatibile con il risultato di Heisenberg. Tuttavia, già Poincaré (nei suoi lavori matematici fondamentali sulla meccanica celeste apparsi tra il 1892 e il 1899) mostrò che il determinismo laplaciano andava rimesso in questione se si voleva avere una conoscenza più estesa della natura e una comprensione profonda e più completa delle sue proprietà, per esempio se si voleva capire il comportamento di un sistema dinamico a tre corpi (Sole, Terra, Luna) e molti altri fenomeni fisici in cui la complessità cresce con l'aumentare delle variabili e degli effetti perturbativi.

Per ritornare agli sviluppi della meccanica quantistica, è importante sottolineare che per elaborare il suo teorema d'impossibilità delle teorie a variabili nascoste, Bell era partito dal riconoscimento dell'importanza del carattere intrinsecamente non locale della teoria di David Bohm: in essa la traiettoria di una particella localizzata in una regione dello spazio può dipendere istantaneamente da quel che accade in un luogo da lei arbitrariamente lontano. La non località che appare nella trattazione causale di Bohm del paradosso EPR (Einstein, Podolsky e Rosen) non è un difetto del modello teorico, ancora parziale, non essendo relativistico, ma una caratteristica necessaria che ogni teoria a variabili nascoste in grado di riprodurre perfettamente il formalismo quantistico deve contenere. Il ragionamento di Bell dimostra che se si effettuano due misure su due sistemi fisici (ad esempio una coppia di particelle di spin $\frac{1}{2}$ che si muovono liberamente in direzioni opposte ad ognuna delle quali si associa un apparato che permette di misurare le componenti dello spin) che corrispondono a due eventi spazialmente separati, allora l'orientazione di uno degli apparati influenzerà il risultato della misurazione eseguita dall'altro apparato. Risulta dunque impossibile predire con certezza il risultato di una qualunque delle componenti dello spin di una delle particelle da una misura della stessa componente dell'altra particella, in quanto la funzione quantomeccanica ψ non determina il risultato di una osservazione individuale. L'idea della non località quantistica, che viola il cosiddetto *principio di località* (di Einstein), secondo il quale non è ragionevole pensare che un dato fenomeno fisico possa avvenire indipendentemente dalla distanza dall'evento che lo ha causato, è che sia invece l'interazione tra i due sistemi fisici che conta, perché grazie ad essa le due rappresentazioni (ossia gli stati quantici delle due particelle) sono diventati aggrovigliati (*entangled*).

La definizione di questo importante fenomeno fu data per la prima volta da Erwin Schrödinger nel 1935 come commento al paradosso EPR:

Quando due sistemi, dei quali conosciamo i rispettivi stati, interagiscono temporaneamente mediante forze note, e quando dopo un periodo di in-

fluenza mutua si separano nuovamente, essi non possono più essere descritti come prima, cioè attribuendo a ciascuno di essi un suo stato caratteristico.

Secondo Schrödinger, l'*entanglement* è il tratto caratteristico della meccanica quantistica, il cui significato filosofico peculiare risiede nell'idea di non località delle interazioni tra le particelle; e, si potrebbe aggiungere, d'indiscernibilità delle particelle che interagiscono; l'oggetto della fisica non è più la particella isolata, ma l'interazione tra due o più particelle e l'intreccio che così esse formano; il processo di interazione modifica l'azione e lo stato delle particelle. Ad esempio, l'interazione gravitazionale tra materia oscura e materia ordinaria modella il cosmo in una ragnatela di galassie; gli scambi e le collisioni tra le diverse forze quantistiche sembra modellare lo spazio-tempo alla scala di Planck in una struttura ripiegata e annodata estremamente complessa e dinamica.

Il principio d'indeterminazione (chiamato anche "relazioni d'incertezza") stabilisce un limite fenomenologico all'indipendenza del sistema fisico dall'osservatore e dall'osservazione, le due cose vanno distinte ma non sono più separabili, quantomeno a livello microscopico; infatti, si osserva un'*intricazione quantistica* tra il sistema fisico e il sistema di osservazione e di misura impiegato dall'osservatore (dal fisico). Chiariamo questo concetto con un esempio. Consideriamo due sistemi fisici apparentemente simili, eccetto che uno è macroscopico e l'altro è microscopico: un pianeta che si muove nel campo gravitazionale del Sole e un elettrone che si muove nel campo coulombiano di un protone (cioè un atomo di idrogeno). Il campo di forza che agisce nei due casi ha la stessa dipendenza dalla distanza – pianeta-Sole o elettrone-protone –: in ambedue i casi la forza è inversamente proporzionale al quadrato della distanza $f = -1/d^2$. La differenza tra i due casi sta nel fatto che il sistema planetario (macroscopico) resta essenzialmente indisturbato dall'osservazione, mentre l'atomo d'idrogeno (microscopico) è alterato o perturbato in maniera essenziale. Heisenberg ha infatti dimostrato che per osservare l'orbita di un elettrone in un atomo dovremmo usare una radiazione di frequenza, e quindi d'impulso, così grande che l'elettrone verrebbe espulso dall'atomo. Il concetto di orbita

di un elettrone in un atomo, diversamente dal concetto classico di orbita di un grave terrestre o di un corpo celeste, non ha dunque senso perché è inosservabile.

Ma questo significa per Heisenberg, e secondo la meccanica quantistica, che ha senso solo ciò che è osservabile tramite un apparato di osservazione e di misura? Eppure noi sappiamo che ci sono molti fenomeni, soprattutto alla scala subatomica di Planck e anche a quella dell'intero Universo, che non sono ancora mai stati osservati ma che tuttavia hanno un senso all'interno del modello o della teoria fisica in cui sono stati pensati.

Un altro aspetto importante è che la struttura matematica della fisica classica differisce da quella della meccanica quantistica. Quest'ultima mostra il ruolo fondamentale che i concetti e le strutture matematiche svolgono per la spiegazione del mondo fisico, e quindi, si presume, nel comportamento reale dei fenomeni fisici. Tre concetti matematici avranno un ruolo fondamentale per gli sviluppi teorici prima della meccanica quantistica poi delle teorie dei campi quantistici: quello di spazio d'operatori di Hilbert a un numero infinito di dimensioni, quello di non commutatività e quello di gruppo di Lie non abeliano (un gruppo non abeliano è per definizione non commutativo).

Dal punto di vista fenomenologico, un sistema fisico è descritto, sia in meccanica classica che quantistica, dalla misura di grandezze fisiche ognuna delle quali corrisponde a un ben determinato strumento di misura. Chiameremo «osservabile» l'oggetto matematico che rappresenta un particolare strumento di misura, e chiameremo «stato» del sistema l'oggetto matematico che determina i valori medi degli osservabili. Consideriamo il più semplice sistema fisico, cioè una particella che si muove lungo una retta in un potenziale dato, per esempio un oscillatore. Questo sistema è descritto da due grandezze fisiche, la posizione q e l'impulso p . Ogni altra quantità, l'energia per esempio, è una grandezza di q e di p . Chiaramente gli osservabili q e p sono oggetti matematici molto diversi a seconda che li si consideri in meccanica classica o in meccanica quantistica. Secondo la meccanica classica, q e p possono essere ambedue misurati con infinita precisione ad ogni

istante, e sono così rappresentabili come funzioni continue e differenziabili del tempo (o rispetto al tempo).

I valori di q e p a un dato istante determinano completamente lo stato del sistema classico. La situazione in meccanica quantistica è diversa. Infatti il principio di indeterminazione ci dice che q e p non possono essere misurati contemporaneamente con infinita precisione e che il prodotto delle loro incertezze soddisfa il principio d'indeterminazione di Heisenberg. La dimostrazione data dal fisico tedesco di questa relazione implica che la posizione q e l'impulso p non possono essere rappresentati da oggetti matematici il cui prodotto commuti, cioè tali che il prodotto qp sia uguale a pq come avviene per i numeri reali (invertendo l'ordine dei fattori il risultato non cambia) o per le funzioni reali del tempo della meccanica classica. Questi oggetti matematici richiedono che s'introduca una geometria e un'algebra diverse al fine di poter caratterizzare le principali proprietà di una matematica e fisica non commutative.

L'immaginazione matematica non è senza legami con il mondo fisico e i fenomeni naturali, anzi essa ha permesso in molti casi di scoprire strutture matematiche nuove che si sono rivelate essere fondamentali per la comprensione delle proprietà dei fenomeni fisici. È il caso delle simmetrie o gruppi trasformazione, ed è il caso anche, come dicevamo prima, della non-commutatività che svolge un ruolo essenziale in meccanica quantistica e nelle teorie quantistiche dei campi. Già nella seconda metà dell'Ottocento, Hamilton, Cayley e in particolare Clifford avevano scoperto delle entità matematiche per le quali si può definire un prodotto non commutativo. Un esempio di tali entità sono le trasformazioni di un gruppo come l'insieme delle rotazioni e delle traslazioni nel piano, ma ce ne sono diversi altri, ad esempio le matrici, per le quali si può definire la somma: quest'ultima è commutativa, cioè $a+b = b+a$, mentre il prodotto non lo è, cioè ab è diverso da ba . L'insieme di tali entità o strutture matematiche, opportunamente definite, viene chiamata *algebra non commutativa* (o *non abeliana*).

Ritornando a Heisenberg, egli ha dimostrato che se si definisce il prodotto delle p e delle q con la relazione $qp - pq = i \hbar/2\pi^2$, dove \hbar è la costante di Planck, e $i = \sqrt{-1}$, e se si definiscono opportunamente le

incertezze Δp e Δq , si ottiene il famoso principio di indeterminazione $\Delta p \cdot \Delta q \geq \frac{1}{2} \hbar / 2\pi$. Naturalmente anche lo stato del sistema non può essere rappresentato dai valori di p e q poiché questi non possono essere misurati simultaneamente. Lo stato potrà esprimere solo la probabilità che q e p abbiano determinati valori. La *probabilità*, nel senso di un qualcosa per il quale non c'è nessuna certezza che accada ma solo una certa possibilità, diviene un elemento essenziale della teoria fisica e, in questo senso, il determinismo della meccanica classica perde la sua validità. Tuttavia l'evoluzione temporale dello stato è retta, come ha dimostrato E. Schrödinger, da un'equazione deterministica, la famosa equazione di Schrödinger.

Si possono qui menzionare due tipi di problemi, che furono già discussi in passato soprattutto dai filosofi greci, sollevati nuovamente dalla teoria dei quanti di Planck e la sua scoperta della natura discontinua della materia, degli elettroni. Il primo di questi problemi concerne l'essenza della materia. Per essere storicamente più precisi, si tratta dell'antico problema dei filosofi greci, ossia la ricerca di come sia possibile ricondurre a principi semplici, a concetti intelligibili, la varietà multiforme dei fenomeni che si verificano nel mondo materiale (fisico). L'altro aspetto riguarda un problema epistemologico che si è posto ripetutamente, in modo particolare da Kant in poi: ci si domanda fino a che punto sia possibile dare un significato oggettivo a ciò che osserviamo nella natura o, in genere, a ciò che cade sotto i nostri sensi. In altre parole, si tratta di determinare un fatto oggettivo che accade indipendentemente dall'osservatore, partendo dai fenomeni osservati. Kant aveva parlato delle "cose in sé", che il filosofo riteneva inconoscibili in termini oggettivi e intersoggettivi. Nella teoria dei quanti il problema riguardante il substrato oggettivo dei fenomeni è stato posto in un modo nuovo e inaspettato.

La scoperta del quanto d'azione di Planck introduce un problema fondamentale della fisica, quello dell'ordine di grandezza o della scala alla quale si producono i fenomeni. La scoperta fatta da Planck del quanto d'azione, che appare come costante caratteristica delle sue leggi delle radiazioni, non rappresenta una proprietà di oggetti ma una proprietà della natura, stabilisce una distinzione nella scala di gran-

dezze che si osserva nella natura, e perciò mostra nello stesso tempo che, in ambienti in cui gli effetti risultano molto grandi di fronte al quanto d'azione di Planck, i fenomeni naturali hanno un decorso diverso da quelli in cui gli effetti sono dell'ordine di grandezza dell'atomo, dunque del quanto di Planck. Mentre le leggi della fisica classica, per esempio della meccanica di Newton, dovevano in principio avere lo stesso valore per tutti gli ordini di grandezze (il movimento della Luna intorno alla Terra doveva verificarsi con le stesse leggi che la caduta di una mela dall'albero o la deviazione di una particella alfa che vola via rasentando il nucleo di un atomo), la legge delle radiazioni di Planck mostrava per la prima volta che ci sono in natura distinzioni secondo scale di grandezze. In altri termini, essa mostrava che fenomeni che avvengono a scale spaziali ed anche temporali e di livelli di energia diversi, non sono dello stesso tipo, anche se possono esserci delle relazioni e delle strutture fondamentali di tipo matematico e fisico comuni o quantomeno simili a tutti questi fenomeni. Da qui l'idea che la varietà e complessità della natura e del mondo fisico (per esempio le diverse transizioni di fase della materia) possa essere retta da qualche simmetria fondamentale (che inglobano altre simmetrie più parziali) e da uno spazio topologico generale la cui struttura spiega l'esistenza di strutture diverse.

Già pochi anni dopo la scoperta di Planck fu compreso il significato di una seconda "costante di misura". La teoria della relatività speciale di Einstein rese chiaro ai fisici che la velocità della luce non rappresenta la qualità di una materia speciale, l'"etere", a cui doveva incombere la propagazione della luce (come si era congetturato a suo tempo nell'elettrodinamica), ma una qualità dello spazio e del tempo, dunque una qualità affatto generale della natura indipendente dagli oggetti speciali che ne fanno parte. Perciò anche la velocità della luce può essere considerata come una costante naturale, relativa alle scale di grandezze. I nostri concetti intuitivi di spazio e di tempo possono essere applicati a quei fenomeni in cui si presentano delle velocità piccole in confronto alla velocità della luce. Inversamente i noti paradossi che si riferiscono alla relatività si basano proprio sul fatto che fenomeni in cui intervengono velocità vicine a quella della luce non possono essere interpretati

coi nostri concetti comuni di spazio e di tempo. Un esempio è il noto paradosso degli orologi, ossia il fatto che, per un osservatore che si sposti velocemente, il tempo scorre in apparenza più lentamente che per un osservatore in quiete.

I lavori di Bohr, Kramers e Slaetr (1924), secondo i quali il campo d'onde elettromagnetico, a cui sono dovuti in modo tanto evidente i fenomeni d'interferenza e di diffrazione, determina solo la probabilità che un atomo assorba o emetta per quanti (dunque per pacchetti discreti di fotoni) l'energia luminosa nella regione dello spazio considerata, contenevano l'idea d'importanza decisiva che le leggi naturali non determinano il verificarsi di un avvenimento, ma la probabilità che esso si verifichi; che inoltre questa probabilità deve essere messa in relazione con un campo d'onde che ubbidisca a un'equazione d'onde formulabile matematicamente.

Si tratta di una specie di stato intermedio di verità che sta in mezzo tra la verità massiccia della materia e la verità astratta dell'idea o dell'immagine. Nella teoria moderna dei quanti questo concetto di possibilità assume una nuova veste: è formulato quantitativamente come una probabilità e sottomesso a leggi naturali esprimibili matematicamente. Le leggi naturali formulate in termini matematici non determinano più i fenomeni stessi ma la loro possibilità, la probabilità che succeda qualche cosa.

Nella fisica moderna (quantistica) si ammette che la determinatezza dei fenomeni esiste solo in quanto essi sono descritti con i concetti della fisica classica. L'applicazione di questi concetti è limitata, d'altra parte, dalle cosiddette relazioni d'indeterminazione; queste contengono delle restrizioni quantitative sui limiti posti all'applicazione dei concetti classici.

Scrive Heisenberg:

Con ciò si compiva un distacco decisivo della fisica classica e si ritornava in ultima analisi a una concezione che aveva già assunto una grande importanza nella filosofia di Aristotele. Le onde di probabilità di Bohr, Kramers, Slater possono essere interpretate come una formulazione quantitativa del concetto aristotelico di *dinamica*, di possibilità, chiamato anche più tardi col

nome latino *potentia*. L'idea che quanto succede non sia determinato in modo perentorio e definitivo, ma che già la possibilità o tendenza al verificarsi di un fatto possieda una specie di verità, ha nella filosofia di Aristotele una parte decisiva.

8. Gruppi e teorie di gauge, invarianza locale e interazioni fisiche

Hermann Weyl sviluppò un approccio per lo studio della meccanica quantistica interamente basato sul concetto matematico di gruppo. La questione fondamentale che egli si pone in quegli anni (1930-35) è di capire che la spiegazione delle proprietà fondamentali delle particelle può essere ricondotta allo studio più generale delle proprietà di simmetria delle leggi quantistiche. Da un punto di vista matematico ciò comporta che si conosca la struttura di certe classi di gruppi di Lie compatti e le loro rappresentazioni algebriche. Dal punto di vista fisico, si tratta di capire se le proprietà delle particelle soddisfano le simmetrie fondamentali che si conoscono, vale a dire destra/sinistra, passato/futuro, carica (elettrica) positiva/carica (elettrica) negativa.

La generalizzazione non lineare delle equazioni di Maxwell alla spiegazione delle proprietà delle particelle elementari ha richiesto l'introduzione di diversi tipi di simmetria: (i) simmetrie *esterne* o *spazio-temporali*, ovvero i gruppi di Lorentz, di Poincaré e il gruppo conforme – nel caso di massa a riposo nulla; (ii) le simmetrie *interne*, cioè i gruppi SU(2) o SU(3) per certe proprietà delle particelle elementari; (iii) le simmetrie di covarianza, ovvero la possibilità di combinare certe proprietà quantiche delle particelle elementari con la gravitazione in uno spazio curvo che possiede determinate proprietà topologiche.

Nell'elettrodinamica quantistica l'operazione di simmetria consiste in un cambiamento di fase del campo dell'elettrone, cosicché una di queste fasi si trova associata a un'interazione con il campo elettromagnetico. Possiamo così immaginare un elettrone sottomesso a due cambiamenti di fase consecutivi: l'emissione di un fotone, poi il suo assorbimento. Si verifica che la sequenza secondo la quale si producono tali cambiamenti di fase sono invertiti, per cui un fotone viene

prima assorbito, poi emesso: il risultato finale sarà quindi lo stesso. Ne risulta che una serie infinita di cambiamenti di fase può essere effettuata e il risultato finale sarà semplicemente la somma algebrica di tutti i cambiamenti indipendentemente dall'ordine in cui la sequenza è stata effettuata. Invece, nella teoria di Yang-Mills (su cui ritorneremo tra poco), dove l'operazione di simmetria è una rotazione locale dell'isospin, il risultato di più operazioni può essere diverso. Supponiamo un adrone (una particella subatomica composta da quark e antiquark legati dalla forza nucleare forte) soggetto a una trasformazione, B , dopo una serie di trasformazioni (cioè un cambiamento di simmetria), la particella avrà un'orientazione corrispondente a quella di un protone (una particella subatomica di carica elettrica positiva che insieme al neutrone è un costituente del nucleo atomico). Supponiamo ora di applicare la stessa trasformazione all'adrone ma secondo un ordine inverso, cioè prima B e poi A . In generale, lo stato finale in cui si troverà la particella non sarà lo stesso di quello precedente: la nuova particella potrà essere un neutrino⁷ invece di un protone. Il risultato delle due trasformazioni dipende dunque dall'ordine nel quale esse vanno eseguite.

Il concetto di simmetria svolge un ruolo fondamentale nelle teorie di gauge in fisica teorica. Le nuove teorie di gauge furono elaborate da Yang e Mills negli anni 50 del secolo scorso (il primo lavoro importante è del 1954), al seguito dei primi tentativi fatti da Hermann Weyl per introdurre una geometria locale più generale rispetto a quella riemanniana capace di inglobare in un modello esplicativo unitario alcune proprietà fondamentali dei campi quantistici. La teoria di Yang e Mills offre un modello geometrico per spiegare le interazioni forti e per comprenderne gli effetti quantistici. La sua principale caratteristica è di ammettere come gruppo di invarianza un gruppo di Lie non abeliano, che è il più "semplice" dei gruppi non commutativi. Questa

7 Il neutrino è una particella priva di carica elettrica e con una massa estremamente piccola, che non si è ancora riusciti a misurare. I neutrini interagiscono molto raramente con la materia; possono infatti attraversare praticamente indisturbati enormi spessori di materia.

proprietà matematica del gruppo di simmetrie conferisce alla teoria una struttura molto ricca e permette di trovare delle equazioni di campo più generali di quelle di Maxwell. Già questo mostra a sufficienza il ruolo fondamentale che hanno le simmetrie geometriche nella comprensione dei problemi di fisica studiati dalle teorie di gauge.

Conviene ricordare che già nella teoria proposta da Weyl nel 1929 appare, in più delle variabili di posizione nello spazio-tempo, un parametro di spazio interno sul quale il gruppo di fase agisce. Il campo che s'identifica alla funzione d'onda della particella può dunque essere visto come se associassimo a ogni punto dello spazio-tempo un punto dello spazio di configurazione interna, che nel caso dell'elettromagnetismo è un angolo. Una gauge esige allora che si combinino le coordinate dello spazio-tempo con i parametri dello spazio fisico interno. La teoria di Weyl soddisfa un principio "d'invarianza locale"; in altre parole, le equazioni di campo restano invariate quando si applica una serie di trasformazioni o di simmetrie al sistema fisico. Gli sviluppi delle teorie di gauge mostrano chiaramente che le proprietà fondamentali delle particelle e delle loro interazioni dipendono essenzialmente dalla conoscenza di alcuni gruppi di simmetria. In affetti, l'idea più importante delle teorie di gauge è quella di simmetria: vale a dire l'idea che un "oggetto" o una "quantità" fisica, alla scala quantica, è simmetrico se possiamo applicargli una trasformazione che conserva la sua struttura. Per esempio, possiamo applicare una rotazione di 60° a un fiocco di neve senza modificare la sua forma. Si può anche farlo ruotare di un angolo multiplo di 60° o applicargli più trasformazioni successive e il risultato sarà lo stesso. Una situazione che si incontra di frequente è che più trasformazioni differenti (per esempio rotazioni e traslazioni) lasciano un oggetto invariato: si dirà allora che l'insieme di queste trasformazioni possiede una struttura matematica di gruppo e forma il gruppo di simmetrie dell'oggetto.

Sono soprattutto i gruppi continui, come i gruppi di Lie, che appaiono nella teoria quantistica dei campi. Le trasformazioni di questi gruppi dipendono da uno o più parametri che variano in modo continuo: è il caso, per esempio, del gruppo di rotazioni di uno spazio a tre dimensioni, i cui parametri sono i tre angoli di Eulero. La struttura

matematica dei gruppi di Lie è molto ricca ed è per questo che hanno un ruolo importante in fisica: infatti, ad ogni gruppo continuo di simmetrie corrisponde una legge di conservazione di una quantità fisica. Questa proprietà fondamentale del mondo fisico è l'essenza del teorema di Emmy Nother. La conservazione dell'energia corrisponde all'invarianza della teoria rispetto alle rotazioni nello spazio. La fisica e la geometria si trovano ad essere profondamente legate, a far parte dello stesso processo di trasformazione della materia e di organizzazione del mondo fisico a diverse scale e livelli.

Le leggi di conservazione hanno un'importanza fondamentale nello studio dei sistemi fisici. Diremo che una teoria (che è innanzitutto un modello di un sistema fisico) presenta una simmetria *globale* se rimane invariata rispetto all'azione delle trasformazioni di un gruppo, a condizione che la stessa trasformazione sia simultaneamente applicata a tutti i punti dello spazio. Diremo, invece, che la simmetria è *locale* se la trasformazione agisce diversamente in ogni singolo punto. Poiché si suppone generalmente che lo spazio sia continuo, è piuttosto naturale che siano i gruppi *continui*, o gruppi di Lie, a svolgere un ruolo preponderante nelle teorie caratterizzate da una simmetria locale. Diversamente da ciò che si sarebbe portati a pensare, l'esigenza di soddisfare una simmetria locale è molto più vincolante rispetto alla simmetria globale: mentre quest'ultima è, per così dire, autosufficiente, nel caso della simmetria locale è necessario aggiungere un elemento alla teoria, ovvero un campo, ed è per questo che si richiede alla teoria di possedere una simmetria locale.

Per meglio arrivare a riconoscere la natura intrinseca delle simmetrie nella teoria quantistica dei campi, che come abbiamo visto possono essere sia di natura locale sia di natura globale, occorre avere un'idea sufficientemente chiara delle proprietà topologiche, globali e locali, dello spazio (o della varietà) in cui si suppone "esistano" e agiscano le particelle alla scala di Planck. In altre parole, la conoscenza della struttura topologica dello spazio fisico potrebbe permettere non solo di identificare l'esistenza di nuove simmetrie in più di quelle che già si conoscono, ma anche la presenza di nuovi campi fisici prodotti dall'azione di queste altre simmetrie.

D'altra parte, come abbiamo rimarcato sopra, la simmetria locale di certe teorie fisiche, come ad esempio l'elettrodinamica quantistica, può essere ripristinata aggiungendo un nuovo campo alla teoria, così, ad esempio, l'elettrodinamica quantistica risulta dalla combinazione del campo materiale di elettroni con il campo elettromagnetico; mentre, invece, nella relatività generale questo campo è naturalmente quello della gravità.

L'elettromagnetismo di Maxwell e la relatività generale di Einstein ammettono entrambe una simmetria di gauge locale. In quest'ultima, la simmetria non è associata a un campo che si propaga attraverso lo spazio, ma alla struttura dello spazio-tempo stesso, vale a dire alla sua geometria, e in realtà (questo lo si è capito più tardi) anche alla sua topologia, la quale può generare effetti fisici anche in assenza di campi gravitazionali forti. Diversamente dalle due teorie appena menzionate, la prima teoria di gauge per le interazioni forti, proposta da Yang e Mills nel 1954, ammetteva una simmetria globale. Il problema che subito allora si pose era di capire quali conseguenze potessero sorgere se si cambiava la simmetria globale in una simmetria locale. Quello che succede in questo caso, come in altri casi, è che l'invarianza locale si conserva solo se si aggiungono nuovi campi alla teoria. Più precisamente, quando la rotazione dell'isospin avviene diversamente in ogni singolo punto (cioè non è la stessa per l'intero spazio) le leggi della fisica rimangono invariate se si aggiungono nove nuovi campi.

Una delle più importanti caratteristiche della fisica contemporanea è di aver geometrizzato le forze. I primi tentativi risalgono a Riemann, Clifford e Poincaré⁸. In realtà, essi fanno parte di un programma più generale di geometrizzazione della matematica e della fisica portato

⁸ Per una ricostruzione concettuale degli sviluppi di tale programma, cfr. i nostri seguenti lavori: LUCIANO BOI, *Le problème mathématique de l'espace. Une quête de l'intelligible*, prefazione di René Thom, Heidelberg-Berlin, Springer-Verlag, 1995; LUCIANO BOI, *L'espace, concept abstrait et/ou physique; la géométrie entre formalisation mathématique et étude de la nature*, in Luciano Boi, Dominique Flament, Jean-Michel Salanskis (eds.), *1830-1930: A Century of Geometry, History, Mathematics and Epistemology*, History and Mathematics, Lecture Notes in «Physics», vol. 402, Heidelberg, Springer-Verlag, 1992, pp. 63-90.

avanti da Einstein, E. Cartan e Weyl nella prima metà del secolo scorso. Seguendo approcci diversi, tutti e tre hanno mostrato che potevano darsi i principi matematici di una teoria più generale rispetto a quella riemanniana atta a spiegare i fenomeni fisici come tipi di eventi definiti in un determinato modello di spazio-tempo.

Dopo i lavori fondamentali di Riemann, Clifford e Poincaré in matematica e in fisica, la relatività generale ha costituito la prima realizzazione importante di questo programma di geometrizzazione. La sua proprietà matematica fondamentale è di ammettere, per i fenomeni fisici alla scala dell'universo, un gruppo di simmetria rispetto al quale le loro leggi si conservano invariate. Si tratta del gruppo di diffeomorfismi che lascia invariata la forma quadratica, cioè la metrica, di una varietà pseudoriemanniana di dimensione 4. Più precisamente, si può effettuare una trasformazione qualsiasi del sistema di coordinate nell'intorno di un punto dato in questo stesso spazio-tempo senza che le leggi fisiche ne risultino modificate. Possiamo affermare, in un certo senso, che la scelta delle coordinate è arbitraria (o che è una convenzione teorica). Ma la struttura geometrica dello spazio-tempo, caratterizzato in questo caso da una metrica pseudoriemanniana di tipo iperbolico, non è affatto arbitraria. L'elemento forse più significativo della relatività generale è di aver fornito una descrizione unitaria dello spazio, del tempo e della gravitazione. Secondo questo modello, lo spazio-tempo è una varietà di dim. 4, M , con una metrica $g_{\mu\nu}$ di signature (3, 1), la cui *connessione* rappresenta la forza di gravità. In altre parole, la gravità è "portata" da un campo connessione simmetrico: da un oggetto dunque di natura essenzialmente geometrica. In effetti Einstein era partito dall'ipotesi che ogni fenomeno fisico poteva essere associato a un tensore T , che chiama *tensore d'energia*, il quale verifica le due equazioni

$$T^{\mu\nu} \equiv T^{\nu\mu}$$

$$\Delta T \equiv 0.$$

Ciò ha permesso di stabilire l'identità tra il tensore di energia e il tensore metrico (o di Riemann); quest'ultimo può essere definito secondo un principio variazionale e nell'equazione appare come la grandezza

coniugata della connessione riemanniana (M, g) . La legge fondamentale della relatività generale si esprime attraverso l'equazione di Einstein

$$R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R = 8\pi T_{\mu\nu},$$

dove $R_{\mu\nu}$ e R sono, rispettivamente, la curvatura di Ricci e la curvatura scalare di $g_{\mu\nu}$, e $T_{\mu\nu}$ è il tensore d'energia della materia. In assenza di materia, l'equazione di Einstein per la varietà spazio-tempo si scrive

$$R_{\mu\nu} = 0.$$

Certi sviluppi recenti della fisica teorica mostrano che la struttura geometrica dello spazio-tempo alla scala quantica potrebbe essere all'origine non solo del comportamento cinematico, ma anche di quello dinamico dei fenomeni fisici che si generano in esso. Sappiamo che ciò è vero per il campo gravitazionale, il quale secondo la relatività generale è determinato dalla struttura geometrica dello spazio-tempo e in particolare dalla sua curvatura, ma, in più, anche gli altri campi di materia sembrano essere suscettibili di un'interpretazione geometrica. Ed è in ciò, infatti, che risiede il significato essenziale delle teorie di gauge. La teoria delle corde (e supercorde) sviluppa la stessa idea fondamentale arricchendola di nuove strutture matematiche, poiché essa cerca di mostrare che i diversi campi di materia hanno verosimilmente un'origine geometrica comune, o che si costituiscono a partire dalla struttura geometrica e topologica stessa come manifestazioni delle sue fluttuazioni e dei suoi cambiamenti. Cosicché, secondo la teoria delle corde i campi e le interazioni tra le diverse forme di materia alla scala di Planck e a bassissime energie emergerebbero dalla geometria (e dalla topologia) nello stesso modo in cui la gravità risulta dalla geometria (metrica e curvatura) dello spazio-tempo a scala macroscopica dell'universo.

Riassunto Appoggiandosi su idee e risultati ottenuti da diversi autori nei secoli precedenti e in particolare sulla rivoluzione astronomica esposta da Nicolò Copernico nel De

revolutionibus orbium cœlestium (1543), Galileo riuscì a dare una formulazione della legge matematica della caduta dei gravi, fece alcune scoperte astronomiche, enunciò il “principio di relatività”, i principi di inerzia e di scomposizione delle forze, e fu un convinto assertore dell'importanza e della validità del sistema copernicano, tant'è che molti dei suoi sforzi come scienziato furono rivolti a farne riconoscere la novità radicale nella concezione dell'universo. Il “principio di relatività galileiana” sarà sviluppato nei secoli successivi e diventerà uno dei principi fondamentali dell'intera fisica grazie soprattutto alle scoperte fatte da Einstein con la sua teoria della relatività ristretta del 1905 e della teoria della relatività generale del 1915-16, quest'ultima basata sul principio di equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazionale; in altre parole, il loro rapporto è costante e uguale per tutti i corpi. Dopo le osservazioni e scoperte importanti fatte da Galilei tra il 1609 (il corto trattato sull'astronomia *Sidereus Nuncius* appare nel 1610 e *Il Saggiatore* viene pubblicato nel 1623) e il 1632 (anno della pubblicazione del *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano*), riguardanti le leggi del moto dei corpi terrestri e celesti, un progresso decisivo fu ottenuto da Isaac Newton, che a partire dal 1666 riuscì ad unificare in una teoria coerente i diversi risultati di Keplero sulle cause dei moti planetari e di Cartesio sul peso dei corpi sulla Terra, dando alle leggi dinamiche dei suoi predecessori una sistemazione teorica decisamente più intelligibile. Risolto il problema dinamico del moto di un corpo grazie al modello geometrico introdotto da Keplero, Newton unificò concettualmente il principio cartesiano del moto rettilineo uniforme di una particella materiale in *vacuo*, la legge galileiana della composizione delle forze e le tre leggi di Keplero circa i moti planetari, pervenendo così alla formulazione matematica della legge della gravitazione universale (nella sua grande opera *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, del 1680). Il concetto di simmetria ha avuto un ruolo capitale nel cammino tortuoso e travagliato della scienza che ha portato tra metà Ottocento e inizi Novecento ad una conoscenza approfondita delle regolarità fondamentali del mondo fisico, di cui però già Keplero aveva avuto un'intuizione profonda. In particolare, si è via via capito il nesso fondamentale tra simmetrie geometriche, invarianze di certe grandezze e leggi fisiche. L'idea di simmetria, matematicamente espressa tramite il concetto di gruppo di trasformazioni (grazie ai lavori di Klein, Lie, Weyl e E. Cartan), che può essere continuo (infinito) o discreto (finito), ha aperto la strada a nuove scoperte fondamentali nella fisica del XX secolo, in particolare le due teorie della relatività, ristretta e generale, e la meccanica quantistica, e permesso la formulazione rigorosa dell'elettrodinamica quantistica (teoria che unifica materia e radiazione) e delle teorie di gauge non abeliane basate su un gruppo di simmetrie locali le cui trasformazioni sono non-commutative. Questi gruppi di simmetrie possono essere definiti e agire dinamicamente su certi spazi topologici di cui le strutture fondamentali sono invariati per deformazione.

Abstract Relying upon ideas and results obtained by different scientists during the previous centuries and notably on the astronomical revolution presented by Copernicus

in *De revolutionibus orbium cœlestium* (1543), Galileo Galilei succeeded in formulating the mathematical law of falling bodies, made some astronomical discoveries, and states the “principle of relativity”, the principle of inertia and the principle of decomposition of forces, and also he was a convinced advocate of the importance and validity of the Copernican system, so much so that many of his much efforts as a scientist were directed at recognizing the radical change in the vision of the universe it produced. The “principle of galilean relativity” will be developed in the following centuries and will become one of the most fundamental principles of physics thanks especially to Einstein’s discovery of special relativity (1905) and general relativity (1915-16), the last based on the principle of equivalence between inertial mass and gravitational mass. After the important observations and discoveries made by Galilei between 1609 (the short astronomical treatise *Sidereus Nuncius* appeared in 1610 and *Il Saggiatore* was published in 1623) and 1632 (with the publication of the *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano*) concerning the laws of the movement of terrestrial and celestial bodies, a major progress was obtained by Isaac Newton, which around the year 1666 succeeded in unifying in a coherent theory the different results by Kepler on the causes of planetary movements and by Descartes on the weight of the bodies on the Earth; and therefore he was able to give to the dynamical laws of his predecessors a more intelligible theoretical setting. With the resolution of the dynamical problem of the movement of a body thanks to the geometrical model introduced by Kepler, Newton conceptually unifies the cartesian principle of rectilinear uniform movement of a material particle in *vacuo* with the Galilean law of the composition of forces and the three laws of Kepler on the planetary movements, obtaining thus the mathematical formulation of the law of universal gravitation. Furthermore, it has been stressed that the concept of symmetry played a key role in the tortuous path, which led, between the second half of the XIX century and the beginning of the XX century, to a deep knowledge of fundamental regularities of the physical world, although already Kepler has had a profound intuition of this fact. In particular, one has gradually understood the fundamental link relating the geometrical symmetries to the invariance of certain quantities and the physical laws. The idea of symmetry, mathematically expressed through the concept of a group of transformations (due to the works of Klein, Lie, Weyl and E. Cartan), which can be either continuous (i.e. infinite) or discrete (i.e. finite) paved the way to new fundamental discoveries in the XX century physics, particularly to the two theories of Einstein’s relativity, special and general, and quantum mechanics, and allowed for the rigorous formulation of the quantum electrodynamics (a theory which unifies matter and radiation) and of non-Abelian gauge theories, resting on groups of local symmetries whose transformations are non-commutative. These groups of symmetries can be well defined and they act dynamically upon certain topological spaces whose fundamental structures are invariant by deformation.

Historians of Science, Creators.

Philosophical Perspectives on the History of Science on the light of *Il Saggiatore* by Galileo Galilei

Flavia Marcacci¹

To William R. Shea,
sage, wise, and yet Galilean.

But the narrators are not only witnesses –
least of all are they witnesses; they are ac-
tors and makers.

(SVJATLANA ALEKSIEVIČ, *The unwomanly face
of war: an oral history of women in World War II*,
New York, Random House, 2017, XXI).

1. Introduction

Galileo Galilei expresses his appreciation for the “istorie, cioè le cose sensate”, referring to meaningful histories, writing to Giovanfranc-

¹ An earlier version of this paper was presented at the Congress *Reading the Book of Nature Across Science, History and Philosophy. To Celebrate 400th Anniversary of Galilei's “Il Saggiatore”*, organized jointly by the Italian Society of History of Science, the Italian Society for Logic and the Philosophy of Science, and the Italian Philosophical Society in Florence, 28-30 June 2023. In that context, I sought to propose a reflection that, beginning with Galileo's *Il Saggiatore*, aimed to examine key points of convergence and intersection between the history of science, the history of philosophy, and the philosophy of science. Recognizing that this objective is too ambitious to be fully realized within a single essay, I have endeavored to frame the discussion in a way that fosters new avenues for collaboration. I am grateful to Elena Canadelli, Davide Pietrini, Vincenzo Fano, William Shea, and Ugo Baldini for the valuable discussions during the preparation phase of this paper. Any errors or inaccuracies remain my sole responsibility.

esco Buonamici². He references reports from mariners traveling the globe as valuable sources for understanding natural phenomena, such as the ebb and flow of tides. It was the year 1629, November 19th, and he was preparing his “dialogi” (which will become the *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*), in which he aimed to explain³:

La vera cagione, lontanissima da tutte quelle cose alle quali è stato sin qui attribuito cotale effetto.

[The true cause, very different from all those things to which such an effect has hitherto been attributed.]

For Galileo, narratives of natural facts serve as critical tools within the framework of *historia naturalis*, aiding the investigation of causes central to natural philosophy. His writings suggest that historical accounts act as necessary mediators for uncovering the physical nature of phenomena, such as tides. However, Galileo’s regard for narratives surfaces in a more articulated manner in *Il Saggiatore* (1623)⁴, his celebrated polemic against the Jesuit Orazio Grassi on the nature of comets. Addressed to Virginio Cesarini, this text culminates Galileo’s dispute with Grassi and displays his literary proclivities. Galileo fills his writings with references to “men of letters” or “historians” among which Dante, Giovanni Ciampoli, Carlo Dati, Anton Francesco Doni,

² Galileo Galilei to Gianfrancesco Buonamici, 19 November 1629, in GALILEO GALILEI, *Opere. Edizione nazionale*, Antonio Favaro (ed.), Firenze, Barbèra, 1890-1909 (rist. 1919), 20 voll. (*Edizione nazionale* hereafter), vol. XIV, pp. 52-55: 54.

³ *Ibidem*.

⁴ GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore: nel quale con bilancia esquisita e giusta si ponderano le cose contenute nella Libra astronomica e filosofica di Lotario Sarsi*, appresso Giacomo Mascardi, Roma, 1623. Partial English translation in *The Assayer*, in *Discoveries and opinions of Galileo*, translated with an introduction and notes by Stillman Drake, New York, Doubleday Anchor Book, 1957, pp. 231-280. In this paper I will refer also to other editions: *Edizione nazionale*, vol. VI, pp. 197-372; ID., *Il Saggiatore*, edited and commented by Ottavio Besomi and Mario Helbing, Roma-Padova, Antenore, 2002; ID., *Il Saggiatore*, edited and commented by Michele Camerota and Franco Giudice, Milano, Hoepli, 2023.

Giovanni Pontano, and, above all, Ariosto. Grassi, in turn, cited classical authors like Ovid, Lucretius, Lucan, and Virgil. Virgil's character Mezentius, for example, illustrated the Aristotelian idea that an arrow's ferrous body is heated by friction with the air (*attrizione*⁵), a notion Grassi deemed relevant to his inquiry. Galileo, however, protested the use of poetic authority over empirical evidence⁶:

Voi contrastate coll'autorità di molti poeti all'esperienze che noi produciamo.
[You contrast with the authority of many poets the experience we produce].

However,

se quei poeti fussero presenti alle nostre esperienze, muterebbono opinione, e senza veruna repugnanza direbbono d'avere scritto iperbolicamente o confesserebbono d'essersi ingannati.

[If those poets were present to our experiences, they would change their opinion, and without hesitation they would say that they had written hyperbolically or confessed that they had been mistaken].

For Galileo, empirical experience – repeatable and independent of poetic narratives – forms the foundation of knowledge. Specific epistemic principles govern such experiences: the necessity of experimental verification, rejection of authority, openness in scientific inquiry, reliance on instruments, and the standardizing role of mathematics in understanding nature.

In *Il Saggiatore*, Galileo integrates experience and narrative as dual pillars of epistemology, welcoming scientific creativity within a disciplined framework. Hypotheses, ideas, and interpretations flourish in this space while nature is “narrated.” Galileo's meticulous storytelling reflects his dual role as a collector of data and a theorist of knowledge. Yet here, Galileo writes amid uncertainty. He has no definitive theory of comets but dismantles Grassi's arguments, rooted in Tycho Brahe's

⁵ GALILEO, *Il Saggiatore*, in *Edizione nazionale*, p. 339.

⁶ *Ivi*, p. 337.

geo-heliocentric model, to protect the Copernican system from misconceptions that might mislead philosophers and theologians.

Il Saggiatore of Galileo brings out a fortunate conjuncture between the need to reason about natural phenomena in their narrative-rich framework and the need to detect the fundamental epistemological cores of the philosophy of nature. Conversely, certain epistemic beliefs guide historical, literary, and narrative accounts, giving the latter a robust communicative capacity. In Galileo, it is a circular relationship in the most virtuous sense possible. To actualize this circularity, it is also necessary to speak of tension. Indeed, the question is how recomposing and treating disciplinary tenets of the history of science and philosophy of science, at first glance, are so different. History of science does not like univocal explanations, prefers complex explanations, accepts correlations, leaves room for contingent events, is very attentive to the social as well as the economic and political context, is annoyed by excessively neo-positivist descriptions, does not hesitate to link the objectivity of the data to the subjectivity of the scientist who scrutinizes it, feels the urge to make that scrutiny an “interpretation” before any explanation or description. This set of methodological attitudes would seem very distant from an image of scientific activity of a rationalistic kind, understood as a search for universal and reductivist explanations, as empirical practices aimed at the search for objectivity, and as a set of assertions. On the one hand, the historical turn in philosophy of science has made history the place to draw elaborate models of scientific development and forms of rationality, creating an alternative image of science⁷. Historiographical research has helped philosophy

⁷ Thomas Kuhn, Norwood Hanson, and Paul Feyerabend challenged Karl Popper's attempt to establish a logic of scientific discovery. Popper, opposing both essentialism and instrumentalism, replaced verification with falsification, arguing that scientific knowledge is best understood through its historical development. Rejecting the linear, cumulative model of science proposed by Rudolph Carnap, Hans Reichenbach, and Ernest Nagel – formalized in Carl G. Hempel's nomological-deductive model – Popper advocated for a process of conjecture and refutation, distinguishing discovery from justification. The “historical turn” in the philosophy of science emerged in opposition to this separation. For an introduction

clean up the philosophical lens with which to view science in history, with eyes purged of metascientific and para-philosophical biases⁸. On the other hand, historians have shown epistemic symptomatology as to renew entire lines of inquiry. In other words, philosophical practice has helped historians improve historiographical accounts, as also seen in the intersections of history of philosophy and theoretical philosophy. In this sense, philosophical practice helps the historian to be faithful to her vocation: that of never lingering on rigid accounts, of exploring sources and documents with a spirit of innovation and new issues, of tracing lines of continuity and identifying setbacks in disseminating intellectual schemes.

This paper reflects on the interplay between history, philosophy, and science, drawing insights from *Il Saggiatore* and going to today's practices in history and philosophy of science. Section 2 introduces Galileo's masterpiece in light of its relevance to this purpose. Section 3 examines three focuses of the history of science evident in Galileo's work and inside the historical work: the narrative dimension, the engagement with material sources, and the epistemological foundations of scientific inquiry. Section 3 concludes by suggesting a possible framework for integrating these domains, aiming to map their reciprocal interactions without succumbing to superficial hybridizations. Instead, this approach seeks to identify "common denominators" that support robust interdisciplinary research. *Il Saggiatore* proves invaluable for such an endeavor, offering a rich case study of intellectual synthesis.

and overview to this topic, see THOMAS NICKLES, *Historicist Theories of Scientific Rationality*, in Edward N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2021 Edition), = <<https://plato.stanford.edu/archives/spr2021/entries/rationality-historicist/>>.

- 8** NORWOOD RUSSELL HANSON, *The Irrelevance of History of Science to Philosophy of Science*, in «Journal of Philosophy», 59(21), 1962, 574-586. See JUTTA SCHICKORE, *The Significance of Re-Doing Experiments: A Contribution to Historically Informed Methodology*, in «Erkenntnis», CXXV, 3, *What (good) is historical epistemology?*, November 2011, pp. 325-347.

2. Galileo, Grassi, and the importance of the comets

Three comets appeared, particularly big and brilliant, in the sky from the November 1618 to January 1619⁹. The phenomenon caused great excitement and curiosity, and many books on astronomical and astrological topics were produced. Unfortunately, Galileo was ill and could not devote himself to observation. Still, many friends, especially from the circles of the Accademia dei Lincei, urged him to have his say, precisely by commenting on some of the circulating texts. In particular, Galileo's attention was drawn to the 1619 volume of the Jesuit Oratio Grassi, the *Disputatio astronomica*¹⁰. Grassi taught at the Roman College and was known for mathematical expertise, skills as an architect, and great erudition. In the *Disputatio* he interpreted the comet as Tycho Brahe had done in 1577. Since he was unable to detect a good parallax measurement, Grassi placed the celestial object above the Moon and, most importantly, confirmed it as a real object. Grassi's thesis must have been read as support for the system and the figure of Tycho to attack Copernicus' astronomical proposal, if the prelate Giovanni Battista Rinuccini thus wrote from Rome¹¹:

I Gesuiti n'hanno pubblicamente fatto un Problema, che si stampa, e tengono fermamente che sia nel cielo; et alcuni fuori de' Gesuiti spargono voce che questa cosa butta in terra il sistema del Copernico e che egli non ha il maggior contrario argomento di questo: però s'io dicessi a V.S. che mi par mill'anni di saper l'opinion sua, credo che me lo perdonerà.

[The Jesuits discussed the comet in a public lecture now in press, and they firmly believe that it is in the heavens. Some outside the Jesuit Order are spreading the rumour that it is the greatest argument against Coperni-

⁹ See WILLIAM R. SHEA, *Galileo's intellectual revolution*, London-Basingstoke, Macmillan Press, 1972, pp. 75-106.

¹⁰ ORAZIO GRASSI, *De tribus cometis anni MDCXVIII disputatio astronomica*, Roma, ex Typ. Iacobi Mascardi, 1619. See also ID., *De tribus cometis...*, in *Edizione nazionale*, vol. VI, pp. 21-35.

¹¹ Gio. Battista Rinuccini to Galileo, 2 March 1619, *Edizione nazionale*, vol. XII, p. 443. Translation by Shea, *Galileo's intellectual revolution*, p. 75.

cus' system and that it knocks it down. Yet, if I were to say to Your Lordship that I long a thousand years to know your opinion, I trust you would forgive me].

Under the name of a disciple, Mario Guiducci, consul of the Florentine Academy, Galileo published a *Discorso delle comete*¹² in which he insisted that those who wished to use parallactic motion to determine the position of a comet, as Tycho did, must first demonstrate that it is a physical body and not an optical phenomenon. For his part, Galileo was ready to argue that the comet was an apparent phenomenon, the result of refractive effects of sunlight, and comparable to haloes, rainbows, parhelia, and rays of sunlight streaming through clouds. According to Grassi this was not sustainable, however, because comets appeared in different positions not only with respect to the observer but also with respect to the Sun.

The controversy began here. Galileo focused on more than just the technical problem of determining parallax, e.g., how this measurement should be determined or its problematic assumptions. He gradually steered further discussions about broader themes. Cross-referencing the contents of the *Disputatio* and the *Discorso*¹³, the questions were taken head-on by Galileo. Thus, far from being a compelling problem of astronomy, the discussion became a problem of the philosophy of nature. And as a result, relations with the Jesuits, of course, suffered.

¹² *Discorso delle comete di Mario Guiducci fatto da lui nell'Accademia fiorentina nel suo medesimo consolato*, Firenze, Stamperia di Pietro Cecconcelli, 1619. See also *Discorso delle comete: con alcuni frammenti ad esso attinenti*, in *Edizione nazionale*, vol. VI, pp. 37-108. See also GALILEO GALILEI, MARIO GUIDUCCI, *Discorso delle comete*, in GALILEO GALILEI, MARIO GUIDUCCI, *Discorso delle comete*, edizione critica e commento a cura di Ottavio Besomi e Mario Helbing, Roma-Padova, Editrice Antenore, 2002, pp. 111-248.

¹³ OTTAVIO BESOMI, MARIO HELBING, *Introduzione al Discorso delle comete*, in GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*, cit., pp. 23-25.

Given the weakness of Galileo's position, the reaction to his *Discorso* was swift. In the *Libra astronomica ac philosophica* (1619)¹⁴, Grassi "weighed" Galileo's opinions. Grassi expressed his ideas by pretending to have a student whose name was an anagram of Horazio Grassi Savonensi: Lothario Sarsi Sigensani. He reminded his readers of the recent condemnation of Copernicus by the Holy Office. It was unfortunate because a political problem clouded his timely criticism of Galileo. He would return to problems related to the determination of parallax or Galileo's ambiguous attitude when he remained vague or contradictory in his arguments against the Aristotelians – or rather, the Tychonians. Besides, Kepler had also tried to place the comet along a straight trajectory but had failed to dispel all doubts.

It was impossible for Tycho think about the cometary trajectories as parabolic. Thus, he supposed that they displayed a path similar to those of planets, full of retrogressions and stationary points. Yet a fruitful difference was that, if in opposition, comets did not move in retrograde directions. Consequently, it was possible to maintain immobile the Earth and invent a mixt system, as he did. Therefore, the problem of comets challenged Copernicanism and was relevant to the great astronomical treatise (which became the *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*¹⁵).

This tenuous explanation stood little chance of being accepted unless he could show that Tycho had been completely wrong in what he stated about comets. Galileo sought to achieve this by attacking Tycho on several fronts, and by using his consummate ability as a controversialist to destroy Tycho's prestige¹⁶.

¹⁴ ORAZIO GRASSI, *Libra astronomica ac philosophica qua Galilaei Galilaei opiniones de cometis a Mario Guiducio in Florentina Academia expositae, atque in lucem nuper editae, examinantur a Lothario Sarsio Sigensano*, Perugia, ex Typographia Marci Naccarini, 1619. Besides, in *Edizione nazionale*, vol. VI, pp. 109-180.

¹⁵ GALILEO GALILEO, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, in *Edizione nazionale*, pp. 21-520. Besides, ID., *Dialogue on the two greatest world systems*, translated by Mark Davie, introduction and notes by William R. Shea, Oxford, Oxford University Press, 2022.

¹⁶ WILLIAM R. SHEA, *Galileo's intellectual revolution*, p. 87. See also *ivi*, pp. 83-87.

Galileo also refused to consider an expansion of the dimensions of the universe within which to accommodate parallactic evidence. The latter refusal implied that the idea of a world small enough for the parallel displacement of distant stars to be perceptible in the event that the Earth moved. Galileo was “so intent on refuting Tycho” that he left opened the ambiguity of a world where there would be no room for heliocentric theory. Unless the stars were at an enormous distance, the absence of annual parallax was a convincing argument for Earth’s immobility. “Fear of a dangerous rival turned Galileo into a biased critic, and one wonders whether, in the heat of the debate, he hoped to dislodge the comet from the sky by demolishing Tycho’s reputation on Earth”¹⁷. The critical point of Galileo’s position, however, was wanting to deny that the comet was a real body¹⁸.

3. Expectations on the history of science: kinds of creation

3.0 If historians of science “create” something

Can the construction of a worldview unfold through the stages of sourcing, understanding, and interpreting written and material sources? The historian’s work not only engages with specific problems but also expands into broader reflections on the value of science itself. This vision is continually reconfigured, debated, and reassessed in an ongoing hermeneutic process. Examining science’s historical development reveals a dynamic interplay with the creative impulses of philosophers, scientists, artisans, and technicians. Let us, then, allow *Il Saggiatore* to inspire an inquiry into the creative dimensions inherent in the historical study of science.

¹⁷ Ivi, p. 87.

¹⁸ See GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*, cit., XXXI-XXXVII.

3.1 Creating world-visions. The multiple opportunities of narratives. From *Il Saggiatore*

3.1.1 From *Il Saggiatore*

On 6 May 1623, the printing of *Il Saggiatore* began. During the 16th century, several comets (1577, 1585) had marked the night sky. At least two concerns were cogent: what was comets' nature, capable of plowing through the old celestial solid spheres; what was their trajectory, since thanks to Tycho Brahe's methodical practice, astronomers had learned that comet "appearances" could also be "returned". Hypothesizing the supralunar nature of comets and the fluid nature of the sky was the answer to the first question; about the second question, astronomers showed more hesitation and searched for an answer by telescopic practice and a theory of gravitation. Comets' observations were the topic of many correspondences and astronomical treatises from all parts of Europe. The global collection of this information, as well as its sharing, was fundamental to advancing hypotheses. In any case, the old Aristotelian theories were the ubiquitous term of comparison and contrast.

The Aristotelian tradition provided philosophical topics and techniques for arguing about science during the Renaissance. Dialectics was intertwined with rhetoric and became a disquisition, discourse, contrast, and polemic tool. The dialogue form was preferred, and Galileo was the master in the "hot" years of the 17th century. However, the ancient forms of commentary also received new impulses and hybrid forms. *Il Saggiatore*, as the whole Galileo-Grassi polemic, takes place along the lines of the slavish commentary on the opponent's text – or rather, the opponent's scientific community¹⁹. Grassi published the *Disputatio* in February 1619. The trigger for the controversy occurs with

¹⁹ ROBERT WESTFALL, *Galileo and Newton: Different Rhetorical Strategies*, in Marcello Pera, William R. Shea (eds.), *Persuading science. The art of scientific rethoric*, Canton-Massachuse, Science History Publications, 1991, pp. 107-124. About Grassi's community, see UGO BALDINI, *Legem impone subactis. Studi su filosofia e scienza dei gesuiti in Italia (1540-1632)*, Roma, Bulzoni, 1992, especially *Appendice 2*.

Galileo's response, the *Discorso delle comete* published under the name of Mario Guiducci. Grassi plays his countermove under the pseudonym of Lotario Sarsi Sigensano to publish the *Libra astronomica*²⁰, where he adopts a more polemical and harsh tone and explicitly refers to Galileo²¹. Grassi/Sarsi takes advantage of the ambiguity of the term "dittatore"²² to injure Galileo, the real author of Guiducci's text: who knows if he was more dictator or dictator.

Demonstrations and technical remarks are intimately dialogical, even when they have the guise of a treatise. Words, aphorisms, and jokes have literary and rhetorical value, peppered with references to the classical world to favour consensus and condescension. The scientific language passed from a monologue form to a dialogic one. Moreover, the scientific language was passing, in Galileo's hands, from Latin to Italian to express better than in the past the changeability and innovation in the philosophy of nature. Galileo could accord Grassi's text to contemporary standards of eloquence and etiquette, but Galileo ignites and initiates a style of controversy that will be perpetuated²³. He wrote *Il Saggiatore* in the Tuscan vernacular, and confirmed his habit of including visual language with description and analogies able to bring stars, heavens, and planets down to earth. The title itself reverses the traditional metaphorical meaning of the "scales" with which Cicero weighed the opinions of the vulgar and becomes the instrument for evaluating scholarly opinions with endowment²⁴. Among other metaphors, one of the most is the metaphor of the "book of nature". Con-

²⁰ *Libra astronomica ac philosophica*, Perugia, ex Typographia Marci Naccarini, 1619. Besides, in *Edizione nazionale*, vol. VI, pp. 109-180.

²¹ See also Cesare Marsili to Galileo Galilei, 14 November 1625, Ed. Naz. XIII, pp. 285-6, p. 286.

²² GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*, in *Edizione nazionale*, p. 114.

²³ See EMANUELE ZINATO, *Il vero in maschera: dialogismi galileiani. Idee e forme nelle prose scientifiche del Seicento*, Bari, Liguori, 2004.

²⁴ STEFANIA DE TOMA, Galileo Galilei, "Il Saggiatore", in Pasquale Guaragnella, Stefania De Toma, Pensa Multimedia (eds.), *L'incipit e la tradizione letteraria italiana. Dal Trecento al Cinquecento*, vol. I, Lecce 2011, pp. 37-43.

troversial spirit and irony sprinkled throughout the text: Sarsi/Grassi's most learned witticisms are mocked as²⁵

Trattabile e benigna filosofia, che così piacevolmente e con tanta agevolezza si accomoda alle nostre voglie ed alle nostre necessità!

[Tractable and benign indeed is such philosophy, so pleasantly and readily adapting itself to men's needs and wishes!]

And even images, like the narrative dimension in general, are pushed to the point of creating fables that give the hint of new epistemic needs. Galileo can invent for his great literary interest, his experience along narrative books and confidence with *humanae litterae*²⁶.

Galileo argued that the human mind could not uncover nature's secrets without first abandoning the absurd philosophical pursuit of complete knowledge. His contribution to modern science was crucial in this regard: he helped shift the focus from seeking to understand each part of the universe in relation to a grand, all-encompassing framework to a more pragmatic approach aimed to start from how individual parts function before having a unified worldview.

To communicate his new notion of scientific inquiry, Galileo invented a parable, a story about a man who found one day, to his considerable astonishment, that musical sounds were not only produced by birds (the so-called "fable of sounds"). After investigating many sounds, he had the opportunity to catch a cicada and began to study it. By closing its mouth nor stopping its wings, he could not diminish its strident sound, yet he could not see it move its scales or any other parts. In the end, he took his curiosity to the extreme: he opened the

²⁵ GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*, in *Edizione nazionale*, p. 336. English translation by Drake, *the Assayer*.

²⁶ *Galilaeana Studies in Renaissance and Early Modern Science*, Special Issue XXI, 1, 2024; Massimo Bucciantini (ed.), *Galileo and literature*. Particularly in this issue, CRYSTAL HALL, *Literature in Galileo's library*, pp. 7-34. Viceversa, Galileo's discoveries and book influenced literature and art since very soon (see CRYSTAL HALL, *Galileo, Poetry, and Patronage: Giulio Strozzi's Venetia edificata and the Place of Galileo in Seventeenth-Century Italian Poetry*, in «Renaissance Quarterly», 66(4), 2013, pp. 1296-1331).

animal's shell to understand where the sound was coming from and, in doing so, killed it, which he thought were the cause of the sound and he resolved to break them. But everything failed until, driving the needle to date, he transfixed the creature and took its life with its voice so that even then he could not make sure whether the sound had originated in those ligaments. Thus, Galileo wrote²⁷:

onde si ridusse a tanta diffidenza del suo sapere, che domandato come si generavano i suoni, generosamente rispondeva di sapere alcuni modi, ma che teneva per fermo potervene essere cento altri incogniti ed inopinabili.

[His knowledge was reduced to diffidence, so that when asked how sounds were created he used to answer tolerantly that although he knew a few ways, he was sure that many more existed which were not only unknown but unimaginable.]

3.1.2 Narrative statements and history of science: short remarks

Historical accounts rely on narrative sentences to link events in temporal sequence, yet when structured as mere chronicles or reconstructions, they risk an implicit incompleteness by omitting causal explanations. The language of history is further shaped by rhetorical and literary devices, raising key methodological questions: are nomological generalizations in the history of science possible or desirable? Should history explain the past, or must it remain detached from interpretation? The longstanding concerns of theory-ladenness and anachronism highlight the tension between historiographical fragmentation and the unifying impulse of historical explanation.

Uebel observes: "Narrative histories should be aggregative, insofar as they are histories, but cannot be, insofar as they are narrative."²⁸ As a

²⁷ GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*, in *Edizione nazionale*, cit., vol. 6, p. 281. English translation by Drake, *The Assayer*.

²⁸ THOMAS UEBEL, *Philosophy of History and History of Philosophy of Science*, in *Hopos: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science*, vol. 7, Issue 1,

result, every grand narrative – or “mega-narrative” – has been dismantled²⁹. He continues to examine how a certain degree of “presentism” can not only be maintained but may also become essential³⁰. In Uebel’s opinion, Danto³¹’s insights clarify how narrative standards shape historical practice. If we apply them in light of a “narrative” approach after the historical turn in the historiography of science, we focus on at least two points. First, the necessity of narrative statements, since even if non-narrative history exists, we can trace connections among events when we explore the origins and development of a scientific concept. Second, temporal asymmetry and conceptual asymmetry in narrative sentences because the description or understanding of an event often includes knowledge or relies on concepts not coeval at such an event.

As history remains open to reinterpretation, it must balance retro-active understanding with the risk of anachronism and ensure historiographical validity by debates within an entire scholarly community. The historian of science engages in three key activities:

1. Synoptic analysis, constructing a comprehensive yet contingent perspective on historical problems.
2. Feedback revision, reassessing past accounts through critical reinterpretation.
3. Validation, refining narratives according to audience and context.

Through this approach, the history of science effectively communicates complex ideas, blending narrative methods with cultural, bio-

2017, pp. 1-30. See also DAVID WEBERMAN, *The Nonfixity of the Historical Past*, in «Review of Metaphysics», 1997, 50, pp. 49-68.

29 JO GULDI, DAVID ARMITAGE, *The History Manifesto*, Cambridge, Cambridge University Press, 2014 (online publication 2017: *The History Manifesto*); ANTONELLA ROMANO, *The History Manifesto, History of Science, and Big Narratives: Some Pending Questions*, in «Isis», volume CVII, 2, June 2016, pp. 338-340.

30 UEBEL, *Philosophy of History and History of Philosophy of Science*, cit.

31 ARTHUR DANTO, *Narrative Sentences*, in «History and Theory», 2, no. 2, 1962, pp. 146-179, <https://doi.org/10.2307/2504460>; ID., *Analytical Philosophy of History*, Cambridge, Cambridge University Press, 1965.

graphical, and sociopolitical elements to enhance accessibility without sacrificing accuracy.

The power of the history of science to shape worldviews lies in its capacity to relativize and problematize. The history of science demonstrates how the questions posed by science have evolved, offering significant philosophical insights. Notably, the canon of “thinkers” traditionally regarded as philosophers may not always align with those addressing the same questions³². Galileo’s challenge to the principle of authority can be extended to all past views, mainly when authority is defined as the categories conforming to a dominant perspective. However, this does not lead to a rejection of theoretical interpretation. On the contrary, the historiographical approach enriches the range of explanatory possibilities, making them more complex and less dogmatic. It achieves this without lapsing into fiction, grounding itself in rigorous engagement with sources, philological and technical analysis, and logical and speculative inquiry. For these reasons, one should talk in terms of storythinking and not just storytelling³³.

3.2 Material creations and Material History of Science

3.2.1 From *Il Saggiatore*

Four instruments immediately catch the eye in the frontispiece of *The Assayer*³⁴, engraved by Francesco Villamena: an astrolabe held by the feminine allegory of Natural Philosophy, an armillary sphere and a compass in the hands of the allegory of Mathematics, and, on the stylolate beneath her feet, two telescopes crossed around the *occhialino* – a magnifying glass used to observe and reproduce details of plants

³² UEBEL, *Philosophy of History and History of Philosophy of Science*, p. 4.

³³ ANGUS FLETCHER, *Storythinking: The New Science of Narrative Intelligence*, Columbia University Press, 2023.

³⁴ PIETRO REDONDI, *Teologia ed epistemologia nella rivoluzione scientifica*, in «Belfagor», XLV, 1 Jan 1990, pp. 613-636.

and animals, particularly bees. Surprisingly, the instrument one might most expect to find—the precision balance, or “saggiatore” in Italian³⁵, as the balance is depicted in the title page of Grassi/Sarsi’s *Libra astronomica ac philosophica* – is absent. A precision balance was part of an initial draft for the frontispiece, but Villamena’s design was ultimately preferred³⁶. It is unlikely that the telescope was chosen simply because it was already widely known. While it’s true that, following Galileo’s publication of *Sidereus Nuncius* in 1610, the telescope had achieved almost mythical status, the ongoing controversy between Grassi and Galileo consistently leaned on the metaphor of the scales. Even after *Il Saggiatore* was published, Grassi maintained this metaphor in his subsequent response, *Ratio ponderum librae et symballae* (1626), although the debate had largely subsided by then. Nevertheless, the telescope played a pivotal role in the sequence of arguments.

The comets of 1618 were the first to be observed with a telescope. In 1619, the Jesuit Orazio Grassi published his *Disputatio Astronomica*, arguing that comets are celestial bodies located above the Moon’s orbit. Grassi noted the lack of observable parallax of the comet, and this argument was crucial. He added also further considerations, as calculations of comet’s distance and speed, based on the principle that celestial bodies move faster or slower depending on their proximity. He also considered the comet’s apparent size, and its disappearance near the Arctic due to vapors on the horizon. Besides, Grassi observed that the telescope did not produce any significant magnification (*incrementum*) of the cometary body, unlike the Moon, which undergoes noticeable magnification through the same instrument. Since the telescope magnifies less as the distance of the object increases – which was a wrong principle – Grassi concluded that the comet must be farther away than the Moon and placed the comet between the Moon and the Sun. Galileo

³⁵ MARCO BIANCHI, *Il dire galileiano per titoli. Una nota lessicale su “Il Saggiatore”*, in «Zeitschrift für romanische Philologie», CXXX, 3, 2014, pp. 802-814.

³⁶ Galileo Galilei to Francesco Stelluti, Rome, September 8th 1623, in *Edizione nazionale*, XIII, p. 129.

read in it an allusion to his personal knowledge in optics³⁷, while his fame was rapidly growing³⁸.

Grassi further discussed the limitations of small instruments, asserting that their data might be unreliable compared to the more precise measurements obtained by Tycho Brahe's superior instruments. Relying on information received from Cologne, Grassi confirmed his conclusion that the comet was above the Moon. He positioned himself as an innovator by rejecting Aristotelian theories, which held that comets were atmospheric phenomena below the Moon. Another noteworthy element in Grassi's analysis was his use of projections of the comet's position on a plane tangent to the celestial sphere. The result showed a straight line, suggesting that the comet's circular path had such a large radius that it could only lie above the lunar sky. This conclusion was beautifully illustrated in the magnificent diagram included in the *Disputatio*³⁹.

Galileo replied with Marco Guiducci's pen in the *Discorso delle comete*⁴⁰, showing his consternation at such terse arguments and insisting on what were the consequences of the lack of parallaxes in Grassi. Therefore, the author expanded extensively with examples and reasoning on the use of the telescope. How can it be said, Galileo/Guiducci warned sarcastically, that distant things would not be magnified, when previously unseen fixed stars have appeared in the telescope? Showing up from nothing to the visible is, on the contrary, infinite magnification!⁴¹ Similarly, Galileo/ Guiducci insists on the differences caused

³⁷ On the suspicion about Galileo's optical skills, see GIORGIO ABETTI, *Amici e nemici di Galileo*, Milano, Bompiani, 1945, p. 118; MARIO LIVIO, *Galileo. Contro i nemici del pensiero scientifico*, 2021, pp. 189-196.

³⁸ Hall, *Literature in Galileo's library*, (see footnote 24).

³⁹ See BESOMI-HELBING, *Annotazioni alla De tribus cometis disputatio*, in GALILEO GALILEI, MARIO GUIDUCCIO, *Discorso delle comete*, Roma-Padova, Editrice Antenore, 2002. See also *Disputatio* in *Edizione nazionale*, vol. VI, intra pp. 32 and 33.

⁴⁰ GALILEO GALILEI, *Discorso delle comete di Mario Guiducci fatto da lui nell'Accademia fiorentina nel suo medesimo consolato*, nella Stamperia di Pietro Cecconcelli, Firenze, 1619. See also in *Edizione nazionale*, vol. VI, pp. 37-108.

⁴¹ GALILEI GALILEI, *Discorso*, in *Edizione nazionale*, p. 75.

by the variations of the exemplars of the instruments, such as by the length of eyepiece tubes. Again, the telescope shows objects in a definite way without glaring at their outline. Grassi's arguments, in short, were completely equivocal. On the contrary, an astronomer must not forget his perception and what depends on the observer: "Ora, se tale irradiazione è nell'occhio nostro, com'è manifesto, che merauiglia è se 'l Telescopio non l'aggrandisce?"⁴². Therefore, any argument based on telescope magnifications is to be rejected.

Armed with the pseudonym Lothario Sarsi, Grassi responds with the *Libra astronomica ac philosophica*⁴³ in kind by letting the telescope be described as an instrument of observation and not speculation. In fact, among visible things, nobody should discuss the transition from Nothing to Something, because the telescope does not observe anything that does not yet exist⁴⁴. Grassi/Sarsi wants to be magnanimous and allows Galileo to refer to what is not yet seen as a Nothing, almost waiting for an act of divine creation to bring it into existence. Even granting this, Galileo is wrong: in fact, elsewhere he claims that the telescope does not produce infinite magnifications but according to precise proportions!

Galileo's response in *Il Saggiatore* repeated the arguments offered in *Discorso sulle comete* but in the form of a slavish commentary on the *Libra* and reinforcing references to optics and geometry⁴⁵. Sometimes, he went also back to the *Disputatio*, as in the case of the question of the parallaxes measured between Rome and Antwerp: Sarsi would like the comet have had parallaxes major than the solar one, but his master Grassi calculated a degree of around $56^{\circ} 56'$ ⁴⁶, but Galileo disputes ex-

⁴² Ivi, p. 85. [English translation: "Now, if this radiation is in our eyes, as is evident, what wonder is it that the telescope magnifies it?"].

⁴³ ORAZIO GRASSI, *Libra astronomica ac philosophica*, Perugia, ex Typographia Marci Naccarini, 1619.

⁴⁴ ID., *Libra*, in *Edizione nazionale*, p. 122.

⁴⁵ MICHELE CAMEROTA, FRANCO GIUDICE, *Introduzione*, in GALILEO GALILEO, *Il Saggiatore*, pp. xxx.

⁴⁶ Ivi, pp. 159-160, in particular footnote 575.

actly this calculation, arguing that any object observed from that terrestrial distance could confer an angle greater than 50° . Sarsi replied again in the *Ratio (examen xxvi)*⁴⁷ and affirmed again that the comet is not a sort of effect from the solar light. But the polemic was going to fade away around the comets. Indeed, the most significant divergences concerned the trajectory of comets and the parallaxes, in line to reject the true purpose of Grassi's theses, which is the true aim of the polemic by Galileo: the defense of the immobility of the Earth and Tycho's system⁴⁸. Yet, tension and disagreement emerge again over the use of the instrument. "Mai non si è detto, l'accrescimento nelle stelle fisse esser infinito"⁴⁹, says Galileo Galileo about the mentioned question of the magnification from nothing to something. Galileo replies against Sarsi/Grassi as pedantic (*cavilloso*). Unable to accommodate Grassi/Sarsi's unpleasant criticism, Galileo carries out a verbose examination on his opponent's argument. He defends the greatness of the telescope by extolling its two capabilities: enlarging objects by widening the angle under which they can be observed and focusing objects by dissolving halos and lights that disturb their real perception.

3.2.2 Instruments, objects and material creations: short remarks

Galileo and Grassi's optical telescopes operated within the same frequency range as the human eye, with their primary distinction lying in the magnification they provided – effectively extending and enhancing human perception. By contrast, a radio telescope enables the detection of aspects of reality that are entirely imperceptible to the unaided human eye, revealing them only through instrumental mediation. Numerous other devices similarly grant access to physical phenomena

⁴⁷ ORAZIO GRASSI, *Libra*, in *Edizione nazionale*, pp. 114–115.

⁴⁸ MICHELE CAMEROTA, FRANCO GIUDICE, *Introduzione*, in GALILEO GALILEO, *Il Saggiatore*, pp. XXXI ff.

⁴⁹ GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*, p. 245. [English translation: "It has never been said that the growth of fixed stars is infinite".]

beyond direct human perception. A straightforward example is the magnetic compass, which detects Earth's magnetic field – an element of reality that remains imperceptible to our senses⁵⁰.

In *Il Saggiatore*, Galileo extensively discusses the relationship between sensory perception and reality. The distinction between data accessible directly through the senses and those requiring instrumental mediation presents a philosophical challenge that Galileo, among others, had to navigate. With the telescope, Galileo not only discovered Jupiter's satellites but also magnified their significance in *Sidereus Nuncius*. This work elevated him from an obscure mathematics teacher to a court mathematician. Later, in *Il Saggiatore*, he employed the same instrument to dissolve the solidity of comets into mere optical phenomena, thereby enshrining the practice of doubt as a cornerstone of scientific inquiry⁵¹.

Establishing an instrument as a credible observer of reality – or, more precisely, as a means of investigating specific aspects of reality – is an epistemological issue that has broader implications for the role of instruments in scientific knowledge. Within the context of the Galilean revolution, this issue was of fundamental importance, as using the telescope required a range of methodological and interpretative strategies. These included the technical skill to operate and refine the instrument and the ability to interpret its data and determine its epistemic significance in adjudicating between competing models of the world. Notably, Grassi incorporated telescopic observations – albeit inaccurately – into his arguments rather than relying solely on unaided visual perception. Galileo engaged in discussions regarding the limitations and challenges of telescopic observation with Christopher Clavius, the leading Jesuit mathematician of his time⁵². The Jes-

⁵⁰ HAROLD I. BROWN, *Galileo on the Telescope and the Eye*, in «Journal of the History of Ideas», XLVI, 4, 1985 (Oct.-Dec.), pp. 487-501.

⁵¹ GIOVANNI BAFFETTI, *Il Metodo e l'errore. Galileo e La Filologia Del Libro Della Natura*, in «Lettere Italiane» 69/3 (2017), pp. 499-512.

⁵² Galileo Galilei a Cristoforo Clavio in Roma, 17 September 1610, in *Edizione nazionale*, vol. x, vol. 431-432.

uits' engagement with instrumental investigations and their cosmological implications had two significant consequences. First, it did not impede the transition from observational to instrumental astronomy. Second, it led to paradoxical situations in which telescopic data were employed to support advanced forms of geoheliocentrism⁵³.

The telescope, its construction, the expertise required to refine it, and its ability to generate new data and insights into nature became a mark of credibility. The trust one astronomer placed in another increasingly depended on demonstrating proficiency in using this instrument. This principle extends more broadly to science as a whole, as exemplified in Galileo's case and modern scientific practice. Scientific instruments were not only tools of inquiry but also artifacts, works of craftsmanship, and commercial products – objects that circulated within diverse contexts and served multiple purposes⁵⁴.

Scientific objects are the entities, processes, and phenomena individuated, represented, investigated and used as tools in scientific practice. They have beginnings in time, when boundaries are carved around them; they are endowed with properties, which enable them to perform their epistemic functions; they have blind spots, for which they become subject to theorizing and experimental investigation; they are often laden with values and emotional significance; and they sometimes pass away, for a multitude of reasons. Because of these characteristics, they lend themselves to biographical narratives⁵⁵.

53 FLAVIA MARCACCI, *Cieli in contraddizione. Giovanni Battista Riccioli e il terzo sistema del mondo*, Modena-Perugia, Accademia Nazionale di Scienze Lettere e Arti di Modena-Aguaplano L'Officina del Libro, 2018; ID., *G.B. Riccioli's Geo-heliocentric Use of Epicycles, Ellipses and Spirals*, in «Journal for the History of Astronomy», May 2023, 1-22; FLAVIA MARCACCI, PAOLO BUSSOTTI, *How to use Kepler's first and second laws in a geo-heliocentric system? Ask G.B. Riccioli*, in «Archive for the History of exact sciences», 79, 4 (2025), <https://doi.org/10.1007/s00407-024-00343-3>.

54 MARIO BIAGIOLI, *Galileo's Instruments of Credit. Telescopes, Images, Secrecy*, Chicago and London, The University of Chicago Press, 2006.

55 THEODORE ARABATZIS, *Do scientific objects have a life (which may end)?*, in «Science in Context», 2021, 34, pp. 195-208. See also ID., *Representing Electrons: A Biographical Approach to Theoretical Entities*, Chicago, University of Chicago Press, 2006; LORRAINE DASTON, *Biographies of Scientific Objects*, Chicago, University of Chicago

Beyond specific methodological approaches, it is essential to acknowledge the materiality of the objects at the core of scientific inquiry. This consideration extends beyond scientific instruments to encompass a broader range of objects, including works of art, architectural structures, museum exhibits, and various artifacts that contribute to the historical development of science. These material entities possess both ontological and epistemic dimensions, a recognition that extends even to purely theoretical domains⁵⁶. Moreover, they play a fundamental role in preserving and valorizing scientific and technological heritage⁵⁷. Scientific instruments and naturalistic collections are irreplaceable three-dimensional sources for the material history of science⁵⁸. They, further, are the legacy of the culture of entire social groups, with their theoretical and practical expressions⁵⁹.

3.3 Creating styles of reasonings. History of Science, logic, argumentation

3.3.1 From *Il Saggiatore*

Versed in Aristotelian logic, Grassi was fond of casting his results in syllogistic form. Galileo mocked him for attempting to solve with logical arguments problems that could only be settled by empirical evi-

Press, 2000; HANS-JÖRG RHEINBERGER, *Toward a History of Epistemic Things: Synthesizing Proteins in the Test Tube*, Stanford, Stanford University Press, 1997.

56 BARRY SMITH, *Beyond concepts: Ontology as Reality Representation*, in Achille Varzi, Laure Vieu (eds.), *Proceedings of FOIS 2004. International Conference on Formal Ontology and Information Systems*, Turin, 4-6 November 2004, pp. 73-84.

57 In Italy the “Scientific and technological heritage” received specific regulation in the Urbani Code only in 2004. For a recent proposal to valorize the Italian heritage, see ELENA CANADELLI, PAOLA BERNARDETTE DI LIETO, *Da cimeli a beni culturali: fonti per una storia del patrimonio scientifico italiano*, Editrice bibliografica, 2024.

58 MARCO BERETTA, *Storia materiale della scienza*, nuova edizione, Roma, Carocci, 2024.

59 BARBARA KIRSHENBLATT-GIMBLETT, *Intangible heritage as metacultural production*, in «Museum international», 56, 2018, pp. 52-65.

dence. Galileo speaks of “natural logic” for this, meaning logical reasoning based on experience: Sarsi/Grassi defends the idea that there are bodies that produce heat without losing weight since in his experiments, he was unable to verify any change in weight in an overheated copper body⁶⁰. Moreover, if not even the best balance can register this alteration, on what principle do we continue to insist? Galileo answers by classifying three types of contact between bodies: those that rub together but are very smooth and produce no heat (polished mirrors), those that rub together heat up and wear out (such as filed iron), and those that remain doubtful. In the latter case, seeing that the heat is there for sure, one concludes that they lose weight! Galileo relies on analogical reasoning designed to cover up the weakness of experimental detection. Moreover, he accuses Sarsi as superficial as a philosopher. But Galileo does not skimp on nods to logical figures: thus, he denounces the *ad hominem* fallacies of his opponent⁶¹, blames his opponent’s vice of drawing false conclusions from true premises⁶².

Ma mi duol bene oltre modo, che l'essere esse vere, gli è di maggior pregiudicio, che se fusser false; poiche la principal conclusion; che per esse doueua essere dimostrata, è falsissima, ne credo, che ci sia verso di poter sostenere, che grauemente non pecchi in Logica quegli, che dà proposizioni vere deduce una conclusion falsa. [...]

Chiarissima è adunque la falsità della conchiusione. Resta ora che mostriamo la fallacia nel dedurla da premesse vere. E quì mi pare, che al Sarsi sia accaduto quello, che accaderebbe ad un mercante, che nel riueder sopra i suoi libri, lo stato suo, leggesse solamente le facce dell'auere, e che così si persuadesse di star bene, ed esser ricco; la qual conchiusione sarebbe vera, quando all'incontro non vi fussero le facce del dare.

[But it occurs to me, beyond all measure, that the fact of their being true brings him greater harm than if they were false; for the principal conclusion, which ought to have been demonstrated on their basis, is utterly false. Nor do

⁶⁰ GALILEO GALILEI, *Il saggiaiore*, in *Edizione nazionale*, cit., vol. VI, pp. 332-335.

⁶¹ *Ivi*, p. 319.

⁶² *Ivi*, p. 254 and p. 255.

I believe there is any way to defend him from the grave error in logic he commits, as he derives a false conclusion from true premises. [...]

Thus, the falsity of the conclusion is manifest. What remains is to expose the fallacy in deducing it from true premises. And here, it seems to me, Sarsi has fallen into the very error that would befall a merchant who, in reviewing his accounts, considered only his revenues and thus convinced himself that he was prosperous and wealthy – his conclusion would indeed be true, but only if there were no expenses to account for].

Galileo, however, is honest: Grassi/Sarsi observes and considers experiences and tries to reproduce and examine them. His gaze, however, is deceived: those experiences must be interpreted correctly, so that Grassi “aurebbe scoperta la fallacia del suo sillogismo” (“would have discovered the fallacy of his syllogism”⁶³).

A new special philosophical issue looms. Facts do not speak unless interrogated, and questions asked limits and determines the range of meaningful answers. Both Galileo and Grassi called upon experimental facts to justify certain features of their own theories but they never suggested that experiments give rise to theories. What they assumed was that experiments illustrated, confirmed, or falsified existing hypotheses. The laboratory was not the breeding-ground for them but the testing-place of theories. We can see this in their debates over the influence of revolving spheres, brilliantly explained by Shea in a long passage but valuable to be read⁶⁴:

Aristotle claimed that the vapors rising from the Earth were carried around by the motion of the sky. Galileo-Guiducci⁶⁵ denied that a light material such as air could be swept along simply by touching the surface of its container, and he proved this experimentally by placing a lighted candle in the center of a hollow vessel and showing that when the vessel revolves the flame remains erect and, therefore, that the air is at rest. Grassi retorted with

⁶³ Ivi, p. 300: [would have discovered the fallacy of his syllogism].

⁶⁴ WILLIAM R. SHEA, *Galileo's intellectual revolution*, pp. 92-93.

⁶⁵ *Discorso delle comete di Mario Guiducci*, ch. 11.

a modified experiment. He moved the candle from the center and placed it close to the internal surface of the vessel, triumphantly noting that the flame was deflected in the direction in which the vessel was twirling. A strip of paper hanging from a thread and suspended near the surface of the vessel was even more deflected, thus confirming that the air moved with its container. Galileo accepted the experimental challenge in *The Assayer*.⁶⁶ This time he took two lighted candles, attached one inside the vessel about two centimeters from the top, and held the other in his hand inside the vessel at the same height. The vessel was then set in motion. He reasoned that if the motion was imparted to the air as Grassi claimed, the flame of the candle attached to the vessel would not bend because it would move with the same speed as the air, whereas the flame of the candle that was not attached to the vessel would be deflected. Experiment, however, proved just the opposite: the flame of the candle held in the hand remained straight while the flame of the candle fastened to the rotating vessel was deflected. Galileo concluded that the most Grassi could claim for his experiment was that a very thin layer of air was carried around by the roughness of the surface of the vessel. In his rejoinder, Grassi argued that he had never asserted that the air rotated as swiftly as the sphere in which it was contained, and that Galileo's experiment was a distortion of the real empirical situation in which the flame of the candle fastened to the vessel met with resistance from the air, not because the air did not move but because it did not move as swiftly as the vessel itself. By shifting his ground, Grassi managed, therefore, to render Galileo's experiment innocuous.

3.3.2 Philosophical and historical reciprocity: short remarks

Is the history of science truly irrelevant to philosophy, as Norwood Russell Hanson claimed in 1962?⁶⁷ Thomas Kuhn observed that philosophers of science historically relied on the history of science to inform their philosophical inquiries.⁶⁸ However, he lamented how infrequently the

⁶⁶ GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*, ch. 40.

⁶⁷ NORWOOD R. HANSON, *The irrelevance of history of science to philosophy of sciences*.

⁶⁸ THOMAS KUHN, *The Relations between the History and the Philosophy of Science*, in ID., *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, 3-20. Chicago, IL: University of Chicago Press.

reverse occurred. In recent years, this dynamic has shifted. There has been a surge of interest in historical epistemology and related approaches, accompanied by a growing recognition that historiographical work can benefit from deeper epistemic awareness. By considering questions such as the nature of scientific rationality, the role of epistemic virtues in scientific research, and the motivations behind fierce theoretical competition, historians can identify particularly fruitful areas of inquiry. This enables them to craft rich historical interpretations of scientific theoretical activity. Conversely, philosophical theorization of scientific inquiry offers significant insights that can enhance and stimulate historiographical practices⁶⁹. Thus, one can show the birth of a concept when there was not yet the vocabulary to talk about it, and, at the same time, provide good justifications in involving contemporary concept reading the past⁷⁰.

Historical accounts of past scientific practice involve metascientific concepts (e.g. 'discovery' or 'experiment'), which are not philosophically innocent and require philosophical scrutiny [...]. I will suggest that philosophical reflection on these concepts can be historiographically fecund: it can elucidate historiographical categories, justify historiographical choices and, thereby, enrich and improve the stories that historians tell about past science as a knowledge-producing enterprise⁷¹.

⁶⁹ WILLIAM R. SHEA, *The Quest for Scientific Rationality: Some Historical Considerations*, in Marcello Pera, Joseph C. Pitt (eds.), *Rational Changes in Science: Essays on Scientific Reasoning*, Dordrecht-Boston-Lankaster-Tokyo, D. Reidel Publishing Company, 1987, pp. 155-176. See also FLAVIA MARCACCİ, *Scientific Change, Realism, and History of Science*, in Adriano Angelucci, Vincenzo Fano, Pierluigi Graziani, Giovanni Galili, Gino Tarozzi (eds.), *Scientific Change, Realism, and History of Science. Festschrift for Mario Alai*, Milano, Franco Angeli, 2023, pp. 61-71.

⁷⁰ In this perspective, as an example: DOMENIQUE LAMBERT, *The "Primeval Atom Hypothesis": Where Did It Come From? What Is Its Status?*, and FLAVIA MARCACCİ, GINO TAROZZI, *Max Planck, Causality, and the Necessity of God*, in Paul Allen, Flavia Marcacci (eds.), *Divined explanation. The Theological and Philosophical Context for the Development of the Sciences (1600-2000)*, Leiden-Boston, Brill, 2024 respectively at pp. 189-209 and pp. 210-231.

⁷¹ THEODORE ARABATZIS, *What's in It for the Historian of Science? Reflections on the Value of Philosophy of Science for History of Science*, in «International Studies in the Philosophy of Science», 31, 1, 2017, pp. 69-82: 70.

The interaction, included the use of such metascientific concepts, must not have the pretense for a total explanation of what happened in past science. Such pretense does not respect the actual aim of an historian. Anyway, the intention can be absolved:

a philosophical perspective, if worth its mettle, should assist the historians to write better history, [...] more plausible, and more coherent stories about the past scientific practice. [...] Insights from history of science can be (and, indeed, have been) brought to bear on and enrich the historiography of science.

Il Saggiatore suggests many examples about the possibility of interaction between historical analysis and recent philosophical and logical accounts. Let take into consideration the contemporary issue of underdetermination and competing theories: no theory wins at the end. There is no agreement or dominant theory at the end of the dispute. Conversely, the theory choice is based on a dialogical conflict and a controversial style where each part furnishes his point of view about the nature of the comets. The same data are interpreted in opposite ways by Grassi and Galileo. Some general criteria overlap (for instance, the importance of observations), but sometimes, they oppose (for instance, about the role of authority). A definitive solution lacks and exactly for that, for not having a conclusive cometary theory, Galileo is free on the one hand to propose the fable of sounds in a perfect literary style, on the other hand, he proposes the idea of the progressive and never-ending scientific process of knowledge and the skeptical ground of science.

There are at least other two examples. *Il Saggiatore*, and not only the other Galileo's works, suggests material for the topic of scientific and conceptual change⁷². The tensions between the two opposite perspec-

72 JOSEPH P. PITT, *Galileo and rationality: the case of the tides*, in Marcello Pera, Joseph Pitt (eds.), *Rational Changes in Science*, pp. 135-153; JEAN-CLAUDE PONT, *Épistémologie et Méthodologie Dans l'œuvre de Galilée*, in «Anabases», no. 15 (2012), pp. 163-82. About the scientific change and history of science, in particular: MICHAEL FRIEDMAN, *Dy-*

tives is not only “essential”: it is omnipresent, deflagrating, and devastating. That tension becomes like a tension between “styles of reasoning”⁷³: both empirical but dogmatic and deductive for Grassi, skeptical and inductive for Galileo. Besides, *Il Saggiatore* suggests the style of recent “dialogical” logical approaches⁷⁴, base not on axiomatic deduction but on the development of demonstrations that one party bases solely on the other party’s response. Although not formally and except for the beginning step of the *Disputatio*, the demonstrations exhibited by Grassi and Galileo along the seesaw of mutual backlash are drawn from what the opponent advances. Each of these topics deserves careful study of the text and specific analysis that cannot be done here.

History, science and philosophy can stimulate each other without losing autonomy. The three perspectives can interact with a view to compound reciprocity and integration, as Galileo wanted, when he cited Ariosto and the gentle contention, he liked so much⁷⁵:

Tra noi per gentilezza si contenda.
[Let us compete in courtesy among ourselves.]

Even if one can suspect that Galileo repeated Ariosto out of flattery!

namics of Reason. The 1999 Kant lectures at Stanford University, Stanford, CSLI Publications, 2001 and DAVID MARSHALL MILLER, *Friedman, Galileo, and Reciprocal Iteration*, in «Philosophy of Science» 78, no. 5 (2011), pp. 1293-1305.

⁷³ IAN HACKING, ‘Style’ for Historians and Philosophers, in «Studies in History and Philosophy of Science», 1992, 23 (1):1-20 [= Ian Hacking, *Historical Ontology*, Harvard University Press, Cambridge-Massachusetts 2002, 178-199].

⁷⁴ NICOLAS CLERBOUT, ZOE MCCONAUGHEY, *Dialogical Logic*, in «The Stanford Encyclopedia of Philosophy» (Fall 2022 Edition), Edward N. Zalta, Uri Nodelman (eds.), = <https://plato.stanford.edu/archives/fall2022/entries/logic-dialogical/>; SHAHID RAHMAN, FLAVIA MARCACCI, *Dialogical Logic*, 2023, ffhalshs-04144147f (Italian translation forthcoming in «Aphex. Rivista Italiana di Filosofia analitica»).

⁷⁵ Ludovico Ariosto in GALILEO GALILEI, *Il Saggiatore*, in *Edizione nazionale*, p. 317.

4. Conclusion: historians of science, creators

The framework outlined here highlights the relationship between history, philosophy, and science as dynamic, intricate, and, at times, contentious, searching for order challenging. This interaction fosters a heuristic approach that can guide both historians and philosophers in their engagement with science. From this perspective, we can identify three key creative moments in the historian's activity:

- *The creation of world-visions.* The narrative dimension of history, in dialectical relation with historiographical explanation, continually generates new syntheses in an ongoing process of understanding the past. The history of science serves to break free from biases and authoritarian epistemic principles, yet it does so through rigorous rational effort.
- *The creation of material operations.* Understanding history requires moving beyond rigid disciplinary boundaries. Material culture embodies the three-dimensional expression of abstract concepts. Behind objects lie invisible yet equally significant actors – that is, concepts – in the history of science.
- *The creation of logical-epistemic frameworks.* History of science investigates the development of ways of argumentation and styles of reasoning. It reveals the interactions among disciplines while simultaneously being shaped by the very disciplines it influences.

Historical inquiry reminds us that no account is ever definitive and that science itself remains an open system, constantly interacting with both practical and theoretical domains. From a philosophical standpoint, at least a few fundamental principles emerge to support historical awareness. First, periodization, though central to historical practice, must contend with the vast and intricate nature of scientific development, where concepts, methodologies, and external influences are deeply interwoven. Second, history encompasses both observable and unobservable actors, including individuals and communities, as well as humans and concepts. Third, analyzing science historically de-

mands multilevel reasoning: since science evolves over time, its practitioners, experiments, and theories transform in tandem with broader shifts in epistemic frameworks and modes of demonstration characteristic of each era. Finally, historical explanations remain partial and contingent, shaped by the myriad factors at play – including the historian's own perspective.

This approach rejects both dogmatism and relativism, embracing exceptions not as anomalies but as sources of insight. Historians resist the Procrustean bed of homogenization, favoring creativity and acknowledging evolution. Consequently, historical analysis offers a multilayered account of the past grounded in a deep philosophical perspective. The quality of historical interpretation reflects the richness of the elements engaged and the depth of their interaction. A nuanced understanding of the past is essential for comprehending the present and shaping future inquiries.

Yet, interaction does not imply mere overlap or duplication. Authentic engagement occurs only between distinct elements. Someone⁷⁶ cautioned against expecting philosophy to become science or stripping science of its unique interpretative methods. The same applies to history, which must resist rigid certainties, thrives on critical questioning, and seeks to grasp the evolution of ideas. In the diverse landscape of historical inquiry, historians are the observers who recognize nascent ideas, allowing them to flourish. In this way, critical thinking and the growth of knowledge are mutually reinforcing. And Galileo's *Il Saggiatore* still shows its depth.

Riassunto In questo saggio si intende leggere *Il Saggiatore* di Galileo Galilei come esemplare punto di incontro fra storia della scienza, storia della filosofia e filosofia della scienza. Attraverso il confronto con Orazio Grassi e la tradizione gesuitica che difendeva il sistema astronomico di Tycho Brahe, Galileo trasforma la controversia sulle comete in un laboratorio epistemologico dove si intrecciano esperienza, linguaggio e narrazione. Vengono messe in evidenza tre dimensioni creative proprie dello storico della scienza:

⁷⁶ MICHAEL FRIEDMAN, *Dynamics of reason*, pp. 15-24.

la creazione di visioni del mondo mediante la narrazione; la creazione materiale, legata allo studio di strumenti scientifici; e la creazione logico-epistemica, che investiga gli stili di ragionamento e le forme di argomentazione e di dialogo. L'approccio interdisciplinare proposto intreccia storiografia, filosofia e analisi dei testi scientifici, suggerendo che la storia della scienza non è solo descrizione del passato, ma anche soprattutto un esercizio critico di interpretazione. Essa offre in questo modo elementi di elaborazione per categorie filosofiche utili a comprendere la scienza. *Il Saggiatore* diventa così un paradigma per comprendere la tensione tra esperienza e teoria, tra autorità e creatività, e per valorizzare la funzione del racconto nella costruzione della razionalità scientifica.

Abstract This essay reads Galileo Galilei's *Il Saggiatore* as an exemplary meeting point between the history of science, the history of philosophy, and the philosophy of science. Through his confrontation with Orazio Grassi and the Jesuit tradition that defended Tycho Brahe's astronomical system, Galileo transforms the controversy over comets into an epistemological laboratory where experience, language, and narrative intertwine. The essay highlights three creative dimensions characteristic of the historian of science's work: the creation of worldviews through narrative; a reflection about the material creation associated with scientific instruments and objects; and the logical-epistemic creation, which investigates styles of reasoning and forms of argumentation and dialogue. The proposed interdisciplinary approach weaves together historiography, philosophy, and the analysis of scientific texts, suggesting that the history of science is not merely a description of the past but above all a critical exercise in interpretation. In doing so, it provides conceptual tools for developing philosophical categories useful for understanding science. *Il Saggiatore* thus emerges as a paradigm for grasping the tension between experience and theory, between authority and creativity, and for recognizing the role of narrative in the construction of scientific rationality.

Indice dei nomi

- Abetti, Giorgio 255n
Abbri, Ferdinando 8
Ablondi, Fred 102n
Adam, Charles 116n
Aleksievič, Svjatlana 239
Alighieri, Dante 42, 177, 240
Arabatzis, Theodore 259n, 264n
Archimedes 14, 189, 193, 194, 195
Ariosto, Ludovico 241, 266 e n
Aristotle 20, 21, 93n, 109n, 110, 114, 126n, 187, 188, 194, 229, 230, 262
Aristarco di Samo 189
Armitage, David 252n
Ayers, Michael 102n
- Bader, Ralf 117n
Baffetti, Giovanni 258n
Baldini, Ugo 239n, 248n
Ball, Brian 75n
Banks, Joseph 57
Banfi, Antonio 132 e n
Barents, Willem 36
Baroncini, Gabriele 113n
Bárðarson (Bárdarson), Ivar 42, 52
Beckedorff, David L. 174
- Bell, John Stewart 223
Bellenghi, Giuseppe 62
Bengio, Yoshua 87 e n, 88
Bennett, Charles H. 183
Beretta, Marco 260n
Bernardette di Lieto, Paola 260n
Bernardini, Gilberto 176, 178
Bernoulli, Daniel 205
Berque, Augustin 143, 150, 151 e n
Besomi, Ottavio 240n, 245n, 255n
Biagioli, Mario 259n
Bianchi, Luigi 136n
Bianchi, Marco 254n
Bianchi, Ruggero 146n
Bianchini, Francesco 8
Biemel, Walter 96n
Blackburn, Simon 96n
Blumenberg, Hans 181n
Bohm, David 223
Bohr, Niels 166, 169, 182, 219, 221, 229
Boghossian, Paul A. 102n
Boccaccio, Giovanni 42
Boi, Luciano 8, 10, 198n, 200n, 234n
Bonsignori, Stefano 50, 52
Botti, Vicente 69n

Indice dei nomi

- Bouveresse, Jacques 70n
Boyle, Robert 93 e n
Brożek, Bartosz 87n
Brown, Harold I. 258n
Bucciantini, Massimo 250n
Buckner, Cameron 78n
Burnyeat, Myles 109n
Burt, Edward Arthur 94n
Butts, Robert E. 98n, 115n
- Camerota, Filippo 8, 113n
Camerota, Michele 72n, 100n, 240n, 256n, 257n
Canadelli, Elena 8, 239n, 260n
Carnap, Rudolph 242n
Carbone, Ludovico 111
Carter, Brandon 182
Casini, Paolo 187n
Cassirer, Ernst 121 e n
Cayley, Arthur 226
Cesarini, Virginio 240
Cevolani, Gustavo 8
Chalmers, David J. 100n
Charles V 37, 38
Chaucer, Geoffrey 42
Chen, Kai 80n
Châtelet, Gilles 192n
Clifford, William 226, 234, 235
Cloud, John 9, 37n, 45n, 65
Clavius, Christopher 17, 18 e n, 19 e n, 20, 21, 23, 32, 33n, 258 e n.
Cnoyen, Jacobus 37, 39, 41
Coates, Pauk 97n
Colgate, Stirling 174
Coliva, Annalisa 77n
Coleman, Sam 97n
Contarini, Gasparo 36
Cook, James 57, 58, 59, 61
Cook, John 141n
- Copernico, Niccolò 127, 188, 189, 198, 236, 237, 244, 246
Corchado, Emilio 69n
Corrado, Greg 80n
Courville, Aaron
Cristin, Renato 128 e n, 129 e n
Cusano Nicola 187, 191
- D'Ambrosio, Paul 155n
Danti, Ignazio (Danti, Pellegrino Rainaldi) 49, 50, 51
Danto, Arthur 73n, 252 e n
Daston, Lorraine 259n
Davis, John 38
Dean, Jeffrey 80n
de Balzan, Luigi Borg 60
Dee, John 39, 40
Democritus 94 e n
Dennett, Dan 101n
De Rosa, Raffaella 116n
Descartes (Cartesio, René) 73, 116 e n, 147, 148n, 189, 192, 195, 196, 237, 238
De Toma, Stefania 249n
Devlin, Jacob 68 e n, 88n
Dicke, Robert 177, 182
Dini, Piero 112 e n, 127
Donahue, William H. 95n
Doni, Anton Francesco 240
Doran, Peter T. 141n
Drake, Stillman 94n, 95n, 110n, 113n, 115n, 240n, 250n, 251n
Drioli, Sara 9
Dummett, Michael 70n
Dyson, Freeman 166 e n, 168
- Edward III 42
Einstein, Albert 10, 135, 136 e n, 137 e n, 138n, 169, 186n, 187, 190, 204, 205, 209, 210, 212, 213, 214, 215,

- 219, 221, 223, 228, 234, 235, 236, 237, 238
 Eliasmith, Chris 83n
 Erasmus, Desiderius 37
 Eratostene 189
 Euclid 14, 16, 17, 18, 19, 21, 32, 36, 189, 211
 Euler, Leonhard 199, 205, 217, 232
- Fabbri, Natacha 8
 Fano, Vincenzo 8, 106n, 239n, 264n
 Fermi, Enrico 173, 179
 Feyerabend, Paul 242n
 Feynman, Richard 159, 168
 Finocchiario, Maurice A. 99n
 Fisher, Eugen 73n
 Fisher, Raymond 53n
 Fogelin, Robert J. 73n, 75
 Fontana, Gasparo Ferdinando Felice 56
 Forlani, Paolo 36
 Foucault, Michel 152n
 Fowler, William A. 179
 Frascolla, Pasquale 70n
 Francescato, Sara 9
 Friedman, Michael 265n, 266n, 268n
 Frobisher, Martin 38
 Furman, Michał 87n
 Furlan, Stefano 9, 161n, 165n, 166n, 169n, 170n, 174n, 177n, 178n, 180n, 182n, 183n, 184n, 185n
 Fyfe, Colin 69n
- Galilei, Galileo 7 e n, 8, 9, 10, 69, 70 e n, 71, 72 e n, 73 e n, 78, 82, 86, 87, 90, 91, 92, 93, 94, 95n, 97, 98 e n, 99, 100 e n, 101, 102n, 103, 104, 107, 108 e n, 109, 110, 111 e n, 112 e n, 113, 114, 115 e n, 116, 117, 119, 120, 121 e n, 122n, 123, 124 e n, 125 e n, 126 e n, 127 e n, 130, 131, 132 e n, 135, 139, 140, 147 e n, 159, 160, 161, 177, 179, 180, 186, 187, 188, 189, 191, 193, 194, 195, 196, 198, 199, 200, 201, 205, 207, 208, 210, 213, 237, 238, 239, 240 e n, 241 e n, 242, 244 e n, 245 e n, 246 e n, 247 e n, 248, 249 e n, 250 e n, 251 e n, 254 e n, 255 e n, 256 e n, 257 e n, 258 e n, 260, 261 e n, 262, 263 e n, 265 e n, 266 e n, 268, 269
- Galison, Peter 164n
 Galli, Giovanni 9, 75n, 264n
 Galluzzi, Paolo 8, 70n
 Gargani, Aldo 73 e n
 Garson, James 78n
 Gassendi, Pierre 102n, 207
 Gauss, Carl Friedrich 201 e n, 203, 212, 217, 218
 Gayler, Ross W. 68n, 69, 77, 83 e n, 85n, 89
 Gell-Mann, Murray 159
 Gendler, Tamar Szabo 100n
 Ghigi, Nicoletta 138, 139n
 Giotto di Bondone 177
 Giudice, Franco 72n, 240n, 256n, 257n
 Goldfarb, Warren 84 e n
 Goldin, Paul R. 155n
 Goldman, Alvin I. 106n
 Gomez, Aidan N. 88n
 Gomez, Pedro 21, 22
 Gonzalez, Avelino 89
 Goff, Philip 94 e n
 Gorham, Geoffrey 70n
 Grassi, Orazio 240, 241, 244 e n, 245, 246 e n, 248 e n, 249, 254, 255, 256 e n, 257 e n, 258, 260, 261, 262, 263, 265, 266, 268, 269
 Graziani, Pierluigi 8, 264n
 Greenblatt, Stephen 94n
 Guiducci, Mario 245 e n, 249, 255, 262

Indice dei nomi

- Hacker, Peter M. S. 76 e n, 77n, 89n
Hacking, Ian 266n
Hall, Crystal 250n, 255n
Hamilton, William Rowan 205, 226
Hanson, Norwood Russell 242n, 243n, 263 e n
Harrison, B. Kent 173
Hawthorne, John 100n
Heidegger, Martin 132n, 141 e n
Heisenberg, Werner 197, 218, 220, 221, 222, 224, 225, 226, 229
Hempel, Carl G. 242n
Hentschel, Klaus 162 e n, 165 e n
Herodotus 45
Heytesbury, William 193
Hintikka, Jaakko 84 e n
Hintikka, Merrill 84 e n
Hooke, Robert 162
Hoyle, Fred 179
Houlton, Benjamin Z. 141n
Horrell, David G. 146n
Hume, David 93 e n, 96n
Husserl, Edmund 9, 96n, 119 e n, 120, 121, 123, 124 e n, 125n, 127, 128 e n, 129n, 130 e n, 131 e n, 132 e n, 134, 135 e n, 136 e n, 137 e n, 138, 139, 140

Ihde, Don 124n
Ignatius Loyola 20
Ishiguro, Nobuyoshi 29

Jackson, Frank 104n
Jackson, Terrence 25 e n
James, William 183
Jandrić, Andrej 68n
Johnson, Mark 142n
Jones, Franklin 164, 166
Jones, Llion 88n
Jullien, François 151, 152 e n

Kaiser, David I. 169n, 176 e n
Kaiser, Łukasz 88n
Kanerva, Pentti 83n
Karaisl, Antonia 9
Kepler, Johannes 95 e n, 188, 189, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 237, 238, 246
Kenton, Lee 68n, 88n
Kitaev, Nikita 68 e n
Klein, Dan 68 e n
Klein, Felix 208, 216, 237, 238
Kotcher, John E. 141n
Kripke, Saul 76 e n
Kucharzyk, Bartłomiej 87n
Kuhn, Thomas 242n, 263
Kuusela, Oskari 71n

Lagrange, Joseph-Louis 199, 205
Lakoff, George 142n
Lambert, Dominique 264n
Landauer, Rolf 183
Laplace, Pierre-Simon 205, 221, 222
Laozi 153n, 155n
Leibniz, Gottfried Wilhem 185n, 186n, 188, 189, 191
Lenzi, Alessandra 8
Levi-Civita, Tullio 215, 216
Leucippus 94n
Levere, Trevor H. 111n
Levy, Simon D. 68n, 69 e n, 77, 83 e n, 85n, 89
Lie, Sophus 202, 203, 216, 225, 230, 231, 232, 233, 237, 238
Livio, Mario 255n
Locke, John 102n, 124
LoLordo, Antonia 102n
Lowney, Charles W. 68n, 69, 75, 77, 83 e n, 84, 85 e n, 86, 89, 90
Lucretius 94 e n, 241

- Lynas, Mark 141n
- Mach, Ernst 172 e n
- Malcom, Norman 76n
- Mallarmé, Stéphane 159, 181
- Marconi, Diego 70n
- Marion, Mathieu 71n
- Marsili, Cesare 249n
- Martelli, Matteo 8
- Mastrobisi, Giorgio Jules 136n, 137 e n, 138n
- Maxwell, James Clerk 204, 205, 209, 210, 230, 232
- McDowell, John 102n
- McGinn, Marie 71n
- Medici, Cosimo I de' 35, 46, 47, 49, 55, 64, 66
- Medici, Ferdinando I de' 55
- Medici, Francesco I de' 55, 56
- Meganck, Martin 146n
- Mercator, Gerardus 37, 38 e n, 39, 40, 41, 42n, 43, 45, 53, 54, 64, 65
- Mercator, Gisbert 37
- Michelson, Albert Abraham 210
- Mikolov, Tomáš 80n, 88
- Mills, Robert 231, 234
- Mills, Stephen 68n, 84n
- Ming-Wei, Chang 88n
- Misner, Charles W. 169n, 174, 175n, 176n, 186
- Mitsuyoshi, Yoshida 27
- Mugnai, Massimo 8
- Mulhall, Stephen 76
- Myers, Krista F. 141n
- Myers, Teresa A. 141n
- Næss, Arne 143, 148, 149n, 150
- Nansen, Fridtjof 36
- Neri, Guido Davide 124, 125n
- Newton, Isaac 127, 189, 191, 196, 204, 205, 206, 210, 211, 212, 213, 214, 219, 228, 237, 238
- Nickles, Thomas 243n
- Nolan, Lawrence 102n
- Nother, Emmy 233
- Norton, David Fate 93n
- Norton, Mary J. 93n
- Okada, Mitsuhiro 70n
- Oppenheimer, J. Robert 170, 171
- Oresme, Nicola 187, 191, 192 e n, 193, 194,
- Ortelius, Abraham 36, 39, 50
- Palmerino, Carla Rita 70n
- Palomino, Elisa 9, 37n, 45n, 60n, 65
- Papini, Giovanni 123, 124, 127n
- Parmar, Niki 88n
- Pasnau, Robert 106n, 109n, 110n
- Pavlidis, George 95n
- Peacocke, Christopher 106n
- Pelacani, Biagio 194
- Penco, Carlo 70n
- Perler, Dominik 109n
- Perry, Simon 141n
- Peterson, Mark A. 70n
- Peirce, Charles S. 183n
- Picardi, Eva 77n
- Piccolino, Marco 113n
- Pierce, John R. 183
- Pietrini, Davide 239
- Pitt, Joseph C. 98n, 115n, 264n, 265n
- Planck, Max 169, 204, 205, 218, 219, 224, 225, 226, 227, 228, 233, 236
- Plato 18, 126, 165n, 196, 197, 198, 218,
- Polo, Marco 52
- Polizzi, Gaspare 8
- Polosukhin, Illia 88n

Indice dei nomi

- Poincaré, Henri 210, 211, 212, 214, 216, 218, 222, 230, 234, 235
Popper, Karl 242n
Potter, Michael 71n
Poveda, Jordi 69n
Ptolemy, Claudius 35, 38, 46, 49, 50
Pytheus of Massalia (Pytheas) 36, 45
- Radin, Joanna 87 e n, 89
Rahman, Shahid 266n
Rasmussen, Daniel 83n
Redecker, Christine 70n
Redondi, Pietro 253n
Regge, Tullio 170 e n
Reichenbach, Hans 242n
Rheinberger, Hans-Jörg 260n
Riemann, Bernhard 188, 201n, 212, 213, 216, 234, 235
Rigoni, Riccardo 152n
Rinuccini, Giovanni Battista 244 e n
Romano, Antonella 252n
Rossi, Alessandro 75n
Rossi, Paolo 125 e n, 187n
Rudin, Cynthia 87 e n, 89
Russo, Lucio 189
- Säätelä, Simo 71n
Sacrobosco, Johannes 18, 19
Sanguinetti, Juan José 135, 136n
Schärli, Mario 9
Schmid, Jelscha 117n
Schrödinger, Erwin 223, 224, 227
Schwinger, Julian 168
Scoto, Duns 187, 191
Seki, Takakazu 27n, 30
Shakespeare, William 37
Shannon, Claude 183
Shea, William R. 111, 239n, 244n, 246n, 248n, 262 e n, 264n
- Shields, Christopher 93n
Shazeer, Noam 88n
Skelac, Ines 68n
Slowik, Edward 70n
Smolensky, Paul 83 e n, 85
Smith, A. Mark 110n
Smith, Barry 260n
Smith, Stephan Halikowski 43n
Smith, Martin Ferguson 94n
Soffer, Gail 129 e n
Soldati, Gianfranco 117n
Sorabji, Richard 109n
Steiner, George 146 e n
Stewart, Candlish 77
Stewart, Michael A. 93n
Strawson, Galen 97n
Strawson, Peter Frederick 84 e n
- Takebe Katahiro 30 e n, 31, 32, 33
Tamir, Michael 87, 88
Tannery, Paul 116n
Tarozzi, Gino 264n
Taylor, C. C. W. 94n
Taylor, Eva Germaine Rimington 39n, 41n
Taylor, Kirsten 62n
Thomson, Arthur 166
Toccafondi, Fiorenza 8, 10
Tomonaga, Sin-Itiro 168
Toutanova, Kristina 68n, 88n
Tukey, John W. 183
- Uebel, Thomas 251n, 252 e n, 253n
Uszkoreit, Jakob 88n
- van Aken, Jheronimus (Hieronymus Bosch) 37
Van Helden, Albert 115n
Varzi, Achille 260n

- Vasari, Giorgio 46, 49 e n, 51, 55
 Vaswani, Ashish 88n
 Velleman, J. David 102n
 Vellido, Alfredo 69n
 Vieu, Laure 260n
 Vincent, Pascal 87n
 Virgil (Publio Virgilio Marone) 241
 von Neumann, John 173
- Wakano, Masami 173
 Wallace, Robert M. 111n
 Wallace, William A. 111n
 Waldseemüller, Martin 36
 Wang, Alex 68, 69 e n
 Watsuji, Tetsuro 150, 151
 Weber, Joseph 175n
 Webermann, David 252n
 Weisskopf, Viki 159
 Westfall, Robert 248n
 Weyl, Hermann 201 e n, 216, 230, 231, 232, 235, 237, 238
 Wheeler, John A. 9, 10, 159, 160, 161, 162, 163 e n, 164 e n, 165 e n, 166 e n, 167, 168, 169 e n, 170, 171, 172, 173 e n, 174, 175 e n, 176 e n, 177, 178, 179 180, 181 e n, 182 e n, 183 e n, 184 e n, 185 e n, 186 e n
 White, Richard H. 174
 Wigner, Eugene 184
 Wittgenstein, Ludwig 9, 67, 68, 69, 70n, 71 e n, 72, 73 e n, 74, 75, 76 e n, 77, 78, 79, 80, 82, 84 e n, 85, 86, 88 e n, 89, 90, 91, 92
 Wright, Crispin 70n
 Wrigley, Michael 70n
 Wisan, Winifred Lovell 115n
- Yang, Chen-Ning 231, 234
 Yin, Hujun 69
- Zambelli, Paola 70n
 Zanin, Ruggero 120 e n
 Zel'dovich, Yakov B. 179
 Zinato, Emanuele 249n

Studi e ricerche del Dipartimento di Lettere e Filosofia

Antichità e Filologia

1. FRANCESCO CANNIZZARO, *Sulle orme dell'Iliade. Riflessi dell'eroismo omerico nell'epica d'età flavia*, 2023.
2. *Noster delectat error. L'errore tra filologia e letteratura*, a cura di Elisa Migliore, Matilde Oliva, Claudio Vergara, 2024.

Filosofia

1. *Ecologia politica. Temi e riflessioni da un pensiero in divenire*, a cura di Stefano Righetti, 2025.
2. *Prescienza, profezia, determinismo e futuri contingenti tra Antichità e Medioevo*, a cura di Anna Rodolfi, Maddalena Sartini, 2025.
3. *Gestazione per altre persone. Legami, desideri, corpi, norme*, a cura di Federica Buongiorno, Xenia Chiaramonte, Matteo Galletti, 2026.
4. *Reading the Book of Nature Across Sciences, History and Philosophy*, edited by Davide Pietrini, 2026.

Letteratura italiana e Romanistica

1. *L'illustre volgare. Riletture, riscritture e traduzioni dantesche nelle lingue romanze*, a cura di Michela Graziani, Michela Landi e Salomé Vuelta García, 2023.
2. «La sintassi del mondo». *La mappa e il testo*, a cura di Laura Bardelli, Elisa Caporiccio, Ugo Conti, Antonio D'Ambrosio, Carlo Facchin, Martina Romanelli, 2023.
3. *La violenza nella letteratura italiana. Forme, linguaggi e rappresentazioni*, a cura di Rebecca Bardi, Camilla Bencini, Chiara Canali, Andrea Carnevali, Alice Petrocchi, Alessandro Privitera, Andrea Talarico, 2023.
4. PEDRO ORDÓÑEZ DE CEBALLOS, *Tres entremeses famosos, a modo de comedia, de entretenimiento*, edizione critica a cura di Arianna Fiore, 2025.

Linguistica

1. «La sua chiarezza séguita l'ardore». *Studi di linguistica e filologia offerti a Paola Manni*, a cura di Barbara Fanini, 2023.
2. *I dati linguistici. Metodologie e strumenti della ricerca*, a cura di Caterina Cacioli, Serena Carlamaria Crespi, Stefano Miani, Barbara Patella, Ersilia Russo, Carmelina Toscano, 2024.

Finito
di stampare
nel mese di febbraio 2026 da Rotomail Italia S.p.A.
Volume stampato con tecnologia print on demand

This volume presents a selection of papers by early-career researchers in philosophy, philosophy of science, and the history of science, originally presented at the conference *Reading the Book of Nature Across Sciences, History, and Philosophy*. The conference, organized by SFI, SILFS, and SISS, was held at the prestigious Museo Galileo – Istituto e Museo di Storia della Scienza (Florence, 2023) to celebrate the 400th anniversary of Galileo's *Il Saggiatore*.

The *fil rouge* of the papers in this volume is the evolution of knowledge and scientific thought, as well as the exploration of their relationship with nature, techniques, and technology.

DAVIDE PIETRINI is a research fellow at the University of Urbino. His work focuses primarily on the history of modern scientific thought, with particular attention to epistemological aspects and the rise of modern science.

