

FORECASTING THE FUTURE

SCIENTIFIC, PHILOSOPHICAL, AND HISTORICAL PERSPECTIVES

edited by

Stefano Bordoni
Sara Matera

Isonomia *Epistemologica*

Isonomia – Epistemologica

Volume 6

FORECASTING THE FUTURE

SCIENTIFIC, PHILOSOPHICAL, AND HISTORICAL PERSPECTIVES

Volume 1

Il realismo scientifico di Evandro Agazzi

Mario Alai, ed.

Volume 2

Complessità e riduzionismo

Vincenzo Fano, Enrico Giannetto, Giulia Giannini, Pierluigi Graziani, eds.

Volume 3

Oltre la fisica normale

Isabella Tassani, ed.

Volume 4

Mettere a fuoco il mondo

Elena Casetta and Valeria Giardino, eds.

Volume 5

Metaphor and Argumentation

Francesca Ervas and Massimo Sangiorgi, eds.

Volume 6

Forecasting the Future

Stefano Bordoni and Sara Matera, eds.

ISONOMIA - Epistemologica Series Editor

Gino Tarozzi

gino.tarozzi@uniurb.it

FORECASTING THE FUTURE

SCIENTIFIC, PHILOSOPHICAL, AND HISTORICAL PERSPECTIVES

Edited by

Stefano Bordoni
Sara Matera

© ISONOMIA – Epistemologica
All rights reserved.

ISSN 2037-4348

Scientific Director: Gino Tarozzi
Editor in Chief: Pierluigi Graziani
Department of Foundation of Sciences
P.zza della Repubblica, 13 – 61029 Urbino (PU)

<http://isonomia.uniurb.it/>

Design by massimosangoi@gmail.com

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form, or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise without prior permission, in writing, from the publisher.

Sommario

STEFANO BORDONI, SARA MATERA <i>Introduction</i>	9
VINCENZO FANO, ROBERTO MACRELLI <i>Il determinismo: un'introduzione epistemologica</i>	13
MARGHERITA BENZI <i>Probabilistic Causation</i>	31
ANTONELLO PASINI, FULVIO MAZZOCCHI <i>Can a Multi-Approach Investigation of the Climate System Lead to More Robust Results in Attribution Studies?</i>	57
FABIO MINAZZI <i>I modelli ideali e il problema del metodo scientifico</i>	79
MARIO CASTELLANA <i>Aspetti di un dibattito in Francia sulla natura del determinismo</i>	107
ARCANGELO ROSSI <i>Federigo Enriques's View of Causality and Determinism in Philosophy and History of Science between Greek Thought and Quantum Physics</i>	125
SALVO D'AGOSTINO <i>The Torch of Mathematics on Nineteenth and Twentieth Centuries Determinism</i>	133
STEFANO BORDONI <i>A Non-Reductionist Alliance between Mechanics and Thermodynamics</i>	149

Introduction

Stefano Bordoni
University of Bologna
stefano.bordoni2@unibo.it

Sara Matera
University of Urbino Carlo Bo
sara.matera@uniurb.it

The aim of science is to explain or at least represent natural phenomena in order to better understand them, and forecast their future behaviour. The present volume collects the proceeding of the XVI Summer School in Philosophy of Physics, *Forecasting the future: epistemology and empirical sciences*, which took place in Cesena (Italy) in September 2013. Different features of the actual scientific enterprise were explored, and speakers focused on sensitive issues like *determinism*, *causality*, *reductionism*, and *predictability* from a scientific, philosophical, and historical point of view.

Their researches attempted to shed light on questions like: Can we really predict the evolution of complex systems like global climate and microscopic structures? How can we decide whether a forecast is “strong” and “reliable”? What is a good causal explanation? What enables us to believe that our world is deterministic? Is reductionism the best strategy to predict future states of the world?

In the paper *Il determinismo: un'introduzione epistemologica*, Vincenzo Fano and Roberto Macrelli offer an introduction to the classical philosophical notion of *determinism* by exploring recent and less recent literature, where both scientists and philosophers have been involved. They analyse the main attempts to define and explain determinism from an epistemological point of view. They emphasise how complex the interaction

between the epistemological and ontological levels really is, and how demanding it is to disentangle determinism from predictability.

An overview of another classical theme in philosophy of science, namely *causality*, is given by Margherita Benzi in her paper *Probabilistic causation*. She shows the difficult pathway to a satisfactory account of the relationship between causes and probabilities, from the well-known Humean formulation to the current *Causal modeling* account through the classical Suppes' definition. She also focuses on some metaphysical problems that are still under discussion. Are general causes reducible to particular causes? Are causes reducible to probabilities? Do we consider causes and probabilities as actually *physical* or purely *mental*?

An instance of the difficulties involved in a conclusive account of causality, even in specific fields, is given by the joint work of the climatologist Antonello Pasini and the philosopher of science Fulvio Mazzocchi, *Can a multi-approach investigation of the climate system lead to more robust results in attribution studies?* They discuss the attempt to overcome the extreme complexity of climate system by means of three different strategies of causal attribution: *classical computational models* (reductionist approach), *neural networks* (holistic approach), and *Granger causality analysis* (statistical approach). They explore the possibility of a definite answer to the following question: can the correlation between the global growth in mean temperature and the effects of human activities make the forecast more robust?

Predictability is discussed in connection with the foundations of scientific method in Fabio Minazzi's paper, *I modelli ideali e il problema del metodo scientifico*. Although common sense and some epistemologists maintain that scientific method involves the explanatory and predictive success of theories, a hermeneutic reading of Galileo Galilei's works shows a more complex landscape. The founding father of scientific method was aware of the necessary pliability of scientific practice, which should suit the specific nature of the subject matter under scrutiny. This complex view of the scientific process was shared by Albert Einstein: he thought that a unique and rigorous pathway towards the formulation of hypotheses did not exist. The problematic link between rational representations and empirical achievements showed the intrinsic incompleteness of any scientific practice.

Mario Castellana's paper, *Aspetti di un dibattito in Francia sulla natura del determinismo*, outlines the history of a debate that took place in France between the late nineteenth century and the mid-twentieth century. He focuses on two main characters, Émile Boutroux and Gaston Bachelard, but other scholars also emerge in his research. In the second half of the nine-

teenth century, we find the physiologist Claude Bernard, and the mathematician with serious interests in history and philosophy Antoine Augustin Cournot. With regard to the first half of the twentieth century, the contributions of the chemist and philosopher Émile Meyerson, the mathematician and philosopher Federigo Enriques, and the philosopher Léon Brunschvicg are discussed.

Arcangelo Rossi's paper, *Federigo Enriques's view of causality and determinism in philosophy and history of science between greek thought and quantum physics*, is a short overview of a complex debate where the meanings of words and concept changed over time. In reality he focuses on Federigo Enriques' historical and conceptual reconstruction, which started from the scarce fragments of the early Greek philosophers. In the book he published in 1941, *Causalité et déterminisme dans la philosophie et l'histoire des sciences*, Enriques analysed the concepts of cause, causal-deterministic explanation, and predictability of natural processes in the ancient atomism, in the Eleates, in Plato and in Aristotle. His outline was concluded by the emergence of Quantum physics, where an intrinsically indeterminist reality, consistent with the uncertainty and complementarity Principles, was at stake.

The paper of the historian of science Salvo D'Agostino, *The torch of mathematics on nineteenth and twentieth centuries determinism*, deals with the influence of mathematics on the deterministic philosophy of nineteenth- and twentieth-century physics. His research starts from Helmholtz's 1847 *Erhaltung der Kraft*, and discusses Maxwell's works on electromagnetism and thermodynamics, and Kant's influence on Hertz's epistemology. In its turn he stresses the influence Hertz had on Einstein's philosophy: it was Einstein who went so far as to claim that in theoretical physics the creative principle resides in mathematics. He focuses specifically on Maxwell's field theory as a *Dynamical philosophy*, and Helmholtz and Kirchhoff's phenomenological philosophy.

In his paper *A non-reductionist alliance between mechanics and thermodynamics: from Massieu's potentials to J.J. Thomson's dynamical theory*, Stefano Bordoni inquires into the less studied side of the history of thermodynamics. In the last decades of the nineteenth century, two kinds of mechanics were at stake: mechanics as mechanical models like colliding elastic molecules on the one hand, and mechanics as an abstract or formal language for physical sciences on the other hand. Following the second pathway, some physicists put forward a very general mathematical theory for thermodynamics, which made use of the language of abstract mechanics but did not depend on specific mechanical models or machinery.

As editors of these proceedings we would like to thank the *International Research Centre in Philosophy and Foundation of Physics* (CIRFIS) that has organized the Summer School in Philosophy of Physics for sixteen years, the director Vincenzo Fano of the sixteenth edition, all the speakers who have contributed, the editors Vincenzo Fano and Pierluigi Graziani of *Isonomia – Epistemologica*, the scientific journal that hosts these proceedings, and Massimo Sangiorgi, the editorial secretary of the journal.

Il determinismo: un'introduzione epistemologica

Vincenzo Fano

Università degli Studi di Urbino Carlo Bo
vincenzo.fano@uniurb.it

Roberto Macrelli

Università degli Studi di Urbino Carlo Bo
roberto.macrelli@uniurb.it

1. Introduzione

Da epoche remote, l'animo umano è caratterizzato da una costante presunzione di conoscere le ragioni per cui le cose sono andate in un certo modo e di poter capire che cosa succederà. Già nel pensiero greco, nell'atomismo di Democrito, troviamo tracce di una idea secondo la quale è possibile conoscere queste ragioni, poiché da tempo infinito tutte le cose passate, presenti e future sono governate anche dalla necessità¹. Nel mondo classico questa è la più importante concezione basata sull'ideale deterministico. Con il termine “ideale deterministico” intendiamo un’aspirazione che nasce da una visione del mondo o meglio della Natura governata da leggi (*nomoī*) che operano in maniera deterministica. Per alcuni antichi greci la visione del mondo è di tipo deterministico e fin da allora la filosofia è quella disciplina che si occupa in modo sistematico delle giustificazioni delle nostre credenze e della loro forza. Nella filosofia di Platone, critico verso la visione democritea della Natura, si trova che le interpretazioni dei fenomeni trovano

¹ Per le riflessioni e gli inquadramenti storici esposti in questa breve introduzione abbiamo preso spunto da Ceriani e Tosetti (2005), Trombino (1998) e Scaltrini.

dimora nel piano intellegibile del demiurgo, chiave di volta dell'universo platonico ed hanno carattere finalistico, ideale. Così Aristotele, che critica la posizione di Democrito, e secondo cui per comprendere la realtà è necessario anche indagare altre varietà di causalità, come quella finale. Da questi pensatori classici, risulta come la filosofia dia alle nostre credenze una giustificazione; ma quasi sempre le nostre credenze sono molto meno giustificate di quello che riteniamo.

Facciamo un'altra esplorazione nella storia della filosofia e guardiamo, ad esempio, ai sostenitori di quel modello astronomico che si è diffuso nell'antichità fino al medioevo: il sistema geocentrico (aristotelico-tolemaico). Come è noto l'accettazione e la giustificazione di tale modello derivano sostanzialmente da questioni filosofiche e religiose. Eppure è altrettanto manifesto che questo sistema, nonostante descriva molto bene i moti dei pianeti e delle stelle osservabili dalla Terra, è risultato successivamente un mero strumento astronomico senza contenuto reale. Che strada deve percorrere allora la filosofia per far sì che le nostre credenze siano giustificate? Una soluzione sarebbe quella di formulare le argomentazioni filosofiche dopo aver studiato a fondo i risultati delle scienze. Resta il fatto che tali argomentazioni non sono mai definitive, sono solo dei punti di partenza, che vanno modificati in corso d'opera. Come è noto, a partire dal sistema tolemaico, la scienza ha prodotto una lunga transizione, passando attraverso il sistema copernicano, per la teoria della gravitazione universale, fino alla teoria della relatività generale. Tornando alla nostra presunzione di voler conoscere le ragioni per cui le cose sono andate in un certo modo e non in un altro e di poter capire, prevedere, che cosa accadrà, sarebbe necessario comprendere se il mondo sia deterministico e, per raggiungere questo scopo, avere una definizione di che cosa il determinismo sia. L'idea di un rigoroso determinismo che abbraccia il cosmo sarebbe la pietra angolare per comprendere le ragioni del susseguirsi delle cose.

Non possiamo certo accettare l'idea di un determinismo legato alla Provvidenza divina, come fanno gli stoici. Vorremmo definire e studiare il determinismo in maniera scientifica e non postularlo semplicemente. In questo senso nel Seicento i vari tipi di meccanicismo di scienziati come Galileo Galilei, Johannes Kepler, René Descartes, Gottfried Wilhelm Leibniz, fiduciosi nella possibilità di comprendere la struttura reale del mondo, identificavano la natura con una macchina razionale organizzata secondo precisi rapporti esprimibili in linguaggio matematico. In questo senso il determinismo fornisce il supporto per l'identificazione tra la matematica e una natura infallibile come lo sono le equazioni matematiche, dalle quali è espressa. Non possiamo accettare *tout court* questa visione "matematicista"

della realtà, perché è o un postulato o al massimo un'ipotesi di lavoro. In Isaac Newton la matematica ridiventava un mero strumento di calcolo, spogliandosi di ogni spiegazione metafisica. Parallelamente, il determinismo della natura nell'empirismo inglese e soprattutto in John Stuart Mill, assume che la natura sia semplice e sempre conforme a se stessa. Il tema di un mondo deterministico attraversa anche il Settecento ed è presente in scienziati e filosofi come Leonhard Euler e Daniel Bernoulli: la meccanica diventa una scienza deterministica studiata con modelli matematici. Questa visione settecentesca tuttavia entra in forte tensione quando si incomincia a distinguere tra la conoscenza razionale, che è certa, e la scienza empirica, che risulta invece incerta. Questo discernimento si esplicita in Nicolas de Condorcet nella contrapposizione tra conoscenza umana, ottenuta mediante una scienza empirica, e conoscenza divina, accessibile solo a un “Ente” superiore che è il solo a concepire le leggi che regolano il cosmo, e che basa le proprie conoscenze su una scienza razionale.

Vogliamo ora analizzare, in una prospettiva epistemologica, i principali tentativi della filosofia di comprendere se il mondo sia deterministico o meno. Per capire se il mondo sia tale è necessario trovare una definizione feconda di determinismo.

2. La definizione di determinismo di Laplace

In sintonia con il pensiero di Condorcet, il matematico, astronomo e filosofo Pierre Simon de Laplace nel suo *Saggio filosofico sulle probabilità* (1814) scrive:

Tutti gli avvenimenti, anche quelli che per la loro piccolezza non sembrano essere dominati dalle grandi leggi della natura, ne sono una conseguenza così necessaria come le rivoluzioni del Sole. [...] Un'intelligenza che per un dato istante conoscesse tutte le forze da cui la natura è animata e la situazione rispettiva degli esseri che la compongono, se fosse così vasta da sottoporre questi dati all'analisi, abbraccerebbe in un'unica e medesima formula i movimenti dei più grandi corpi dell'universo e quelli del più lieve atomo: nulla sarebbe incerto per essa, e l'avvenire, come il passato, sarebbe presente ai suoi occhi.

La definizione di Laplace non è filosoficamente rigorosa, in essa si trova una mescolanza evidente tra piano epistemologico e piano ontologico. Parole come “avvenimenti”, “conseguenza”, “necessaria” appartengono alla sfera ontologica, mentre “intelligenza”, “conoscenza”, “formula”, “incertezza” rientrano nella sfera epistemica. Inoltre il modello di conoscenza auspicato da Laplace, nel contesto classico, è quello cui dovremmo ambire,

ma che nella realtà non potremo raggiungere, è un ideale in senso kantiano: dal punto di vista della ragion pura, in ambito teoretico non è possibile ottenere conoscenza indipendentemente dai fenomeni. Usando le parole di Otfried Höffe, filosofo tedesco tra i maggiori interpreti di Kant²:

L'esperienza ci mostra necessariamente sempre solo parti e frammenti di realtà; la ragione cerca di mettere insieme questi frammenti in un tutto, la qual cosa è giustificabile. Solo che il tutto non ci è mai dato, bensì proposto costantemente come compito [...]. Poiché tutta l'esperienza ha carattere di frammento, ed ogni nuova esperienza compone i frammenti in frammenti più grandi, ma mai in un tutto completo, l'esperienza intrapresa secondo un metodo, la scienza, è un processo mai concluso di ricerca di conoscenza. Il tutto è come un orizzonte, del quale soltanto i bambini credono che se ne possa raggiungere il limite.

Nella definizione del determinismo di Laplace troviamo l'ipotesi di fondo che il mondo sia deterministico (Determinismo classico), cosa che, ripetiamo, vorremmo poter dimostrare e non semplicemente assumere come assioma. Traduciamo la definizione di Laplace con le parole della fisica matematica e con un po' di formalismo lagrangiano: Prendiamo un sistema a n gradi di libertà in moto. Siano q_1, q_2, \dots, q_n le coordinate generalizzate che descrivono il sistema $q = (q_1, q_2, \dots, q_n) \in R^n$ e $\dot{q} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n) \in R^n$, le velocità generalizzate

$$\dot{q}_i = \frac{dq_i}{dt}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.1)$$

Se il sistema è soggetto a forze conservative generate da un potenziale $V(q)$, la *lagrangiana* associata al sistema avrà la forma

$$L(\dot{q}, q) = T(\dot{q}) - V(q)$$

dove $T(\dot{q})$ è l'energia cinetica totale del sistema stesso. Allora se all'istante iniziale si hanno i seguenti valori:

$$\begin{cases} q(0) = q_0 \\ \dot{q}(0) = \dot{q}_0 \end{cases}, \quad (2.2)$$

² Si veda Trombino (1998, vol 2.2 p. 215). La citazione di Höffe è tratta da Trombino (1998, vol 2.2 p.215). Si veda anche Höffe (1992, trad. it. §5.1).

l'evoluzione temporale del sistema è deterministica ed è data dall'unica soluzione $q(t)$ delle *equazioni di Lagrange*:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} (\dot{q}, q) \right) = \frac{\partial L}{\partial q_i} (\dot{q}, q), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.3)$$

che soddisfano il dato iniziale (2.2).

Analogamente potremo ricavare il moto del sistema in maniera deterministica, scrivendo le equazioni di Hamilton equivalenti alle equazioni di Lagrange tramite il cambiamento di coordinate

$$(\dot{q}, q) \rightarrow (p, q).$$

Esse costituiscono un sistema di $2n$ equazioni differenziali del 1° ordine:

$$\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i} \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i} (\dot{q}, q), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.4)$$

dove $H(p, q) = T(p) + V(q)$ è l'*hamiltoniana* classica. Di nuovo il moto del sistema è univocamente determinato dall'unica soluzione $(p(t), q(t))$ di (2.4) che soddisfa un dato iniziale fissato:

$$\begin{cases} p(0) = p_0 \\ q(0) = q_0 \end{cases}. \quad (2.5)$$

Dunque nel formalismo hamiltoniano, gli stati del sistema o moti sono le funzioni: da t a $(p(t), q(t))$, dove $(p(t), q(t))$ è rappresentato nello spazio delle fasi a $2n$ dimensioni.

Di fatto sappiamo che per sistemi microscopici le condizioni iniziali non si possono determinare con assoluta precisione. Se volessimo descrivere il moto di un sistema a livello microscopico non saremo mai in grado di stabilire contemporaneamente posizione e velocità. Questo risultato, che prende il nome di *Principio di indeterminazione*, enunciato per la prima volta da Werner Karl Heisenberg, ci porta a concludere che le equazioni di Lagrange o di Hamilton non sono più applicabili in senso classico nell'ambito microscopico. Il determinismo di Laplace a questo livello diventa non adeguato, allo stesso modo di come risulta insufficiente la Mecanica classica. Ovvero sussiste la necessità di introdurre una definizione di

determinismo che sia adeguata non solo per i fenomeni quantistici, ma che risolva in maniera rigorosa il problema dell'intreccio tra piano epistemologico e ontologico al quale abbiamo accennato precedentemente.

3. La definizione di determinismo di Nagel

Nel 1961 Ernest Nagel nel suo libro *La struttura della scienza*³, nel cercare di precisare la differenza tra determinismo e meccanicismo, ci mostra come una teoria non abbia bisogno di essere espressa con il formalismo della meccanica per poter essere deterministica. Infatti egli sostiene che:

Una teoria T è deterministica quando da un qualsiasi stato q_i di un sistema S da lei descritto al tempo t_i , T è in grado di dedurre lo stato q_j di S per un qualsiasi tempo t_j precedente o successivo a t_i .

Nagel porta la definizione di determinismo totalmente sul piano epistemologico, legandola alla struttura logico-matematica della teoria. La Meccanica classica, secondo Nagel, in base a questa definizione, risulta una teoria deterministica. Inoltre egli sostiene che anche la Meccanica quantistica sia deterministica, in quanto l'equazione di Schrödinger ha un andamento deterministico. Nagel, però, dimentica il problema della misurazione: la maggior parte degli studiosi di fisica quantistica sostiene infatti che il vettore di stato quantistico, che determina la probabilità che un'osservabile abbia un dato valore, descrive una situazione oggettivamente indeterminata e che si determina solo in presenza di una misurazione. Se ciò è vero, deve esistere un processo fisico di misurazione che spieghi questo fenomeno. L'equazione di Schrödinger, che governa l'evoluzione dello stato quantistico, è deterministica, ma non riesce a descrivere la modificazione dello stato nel caso della misurazione, che quindi è indeterministica⁴. Quindi nella Meccanica quantistica, in questo caso, non esiste un insieme di grandezze fisiche i cui valori sono determinati nel tempo dalle equazioni della teoria stessa, per cui la teoria non risulta deterministica secondo la definizione for-

³ Nagel (1961, trad. it. §10.V p. 332). Per una buona recensione di questo libro si veda www.lankelot.eu/scienze/nagel-ernest-la-struttura-della-scienza-problemi-nella-logica-della-scoperta-scientifica.htm in cui, analogamente a quanto esponiamo, si afferma: "Nagel si sforza [...] di chiarire la differenza tra determinismo e meccanicismo. Una teoria non ha bisogno di essere formulata nei termini della meccanica per essere deterministica."

⁴ L'indeterminazione nasce dal fatto che alcune osservabili sono incompatibili fra loro (principio di indeterminazione), ad esempio velocità e posizione nel caso in cui la posizione non sia un autostato. Si veda Fano (2005, pp.66-67).

nita da Nagel. Abbiamo preso in considerazione un tentativo di definire che cosa sia una teoria deterministica, resta però di fondo un problema cruciale: vorremmo sapere se il mondo sia deterministico, non solo se lo sono le nostre teorie.

4. Dalla teoria alla realtà: il criterio dell'inferenza alla miglior spiegazione

Vorremmo espandere la nostra conoscenza dal piano epistemologico a quello ontologico, passare dalla teoria alla realtà delle cose. Per far ciò, introduciamo un criterio che esponiamo nella maniera seguente⁵: Siano G_1, \dots, G_n , un insieme di teorie che permette di spiegare un dominio di oggetti e sia G_i la teoria che spiega meglio questo dominio. Si potrebbe concludere che G_i è vera seguendo la regola, che chiamiamo *Inference to the Best Explanation* (IBE): *Se una teoria è la miglior spiegazione di un dato dominio di oggetti, allora ci sono buone ragioni per ritenerla vera.*

La ragione per cui questo criterio è stato chiamato *Inference to the Best Explanation* risiede nel fatto che esso inferisce da una teoria che è la migliore spiegazione alla sua verità⁶, tuttavia IBE ha un problema legato al fatto che tutte le teorie che in passato sono state accettate come veritieri sono poi risultate false: ad esempio la fisica classica nel corso del XX secolo è stata messa in discussione dalla teoria della relatività e da quella quantistica, quest'ultime molto probabilmente lo saranno a loro volta nel corso dei secoli avvenire. Non abbiamo, quindi, ragioni sufficienti a sostenere IBE, quantomeno in questa forma forte. Tuttavia la fisica classica riesce a mantenere comunque un valore esplicativo se la sua applicazione è relativa, per esempio, a oggetti di dimensioni medie che si muovono a velocità non prossime a quelle della luce. Con questo intendiamo dire la fisica classica mantiene un certo valore descrittivo e resta la miglior spiegazione se ristretta ad un certo dominio di oggetti. Si potrebbe modificare IBE con questo: *Se una teoria è la miglior spiegazione di un dato dominio di oggetti, allora ci sono buone ragioni per ritenerla vera in modo parziale*, dove con “in modo par-

⁵ Fano (2005, pp. 114-115).

⁶ Come si afferma in Fano (2005, p.115): “Per precisare questo criterio è innanzitutto necessario stabilire quando una teoria è la miglior spiegazione di un certo dominio di oggetti. In generale la scienza dispone di adeguate procedure metodologiche per scartare la maggior parte delle teorie che competono rispetto a un certo ambito empirico. Per cui, di solito, non è difficile individuare quale sia la miglior spiegazione.”

ziale” non intendiamo un termine che esprima una qualche probabilità, ma semplicemente che una o più parti della teoria sono vere.

5. Possiamo applicare IBE al determinismo?

Per avere informazioni sul determinismo della realtà potremmo quindi usare la *Inference to the Best Explanation* che darebbe alla scienza il potere di espandere la nostra ontologia dalle entità osservabili a quelle inosservabili. Applicata alla definizione di Nagel porterebbe alla seguente formulazione: *Se il sistema S è un modello della teoria T, T è la miglior spiegazione di S e T è deterministica nel senso di Nagel, allora S è deterministic*, cioè se *T* è la miglior spiegazione di *S*, allora *T* è parzialmente vera per *S*. Quindi se la teoria è deterministica anche il mondo sarà deterministico.

Tuttavia è molto difficile stabilire una valutazione comparativa o quantitativa delle nostre conoscenze⁷. Assumiamo comunque la seguente ipotesi assai ragionevole che chiameremo premessa della valutazione⁸: *Se abbiamo più teorie che descrivono un dato dominio di oggetti allora è possibile valutarle e compararle stabilendo quale fra esse sia più probabilmente vera*.

Questa premessa porta ragionevolezza a IBE. Infatti se tra le teorie G_1, \dots, G_n , G_i è quella che ha una maggior probabilità comparativa di essere vera, allora, abbiamo buone ragioni a ritenerla più vera che falsa. Tuttavia anche in questo caso si verificano dei problemi, in quanto ritenere una teoria vera significa attribuirle la proprietà di descrivere la realtà. Questo comporta a considerare che anche la parte non osservativa di G_i , abbia contenuto reale. Con un rapido sguardo alla storia della scienza, ci si può accorgere che la pratica di questo tipo di inferenza, non ha portato spesso a qualcosa di buono. Questo perché non è detto che tra le teorie che spiegano un dominio di oggetti D, vi sia la teoria vera. Possiamo quindi accettare all’ingrosso la seguente assunzione di van Fraassen⁹ come critica dell’IBE, chiamata *Premessa del non privilegio: La quantità delle nostre conoscenze è molto minore rispetto a quella delle nostre “ignoranze”*¹⁰. Dalla premessa della valutazione e da quella del non privilegio non possiamo concludere che fra

⁷ Per un tentativo di definizione si veda Niiniluoto (1987).

⁸ Fano (2005, pp. 158-159).

⁹ Van Fraassen (1989, pp.142 ss.), Penrose (2004, tr. it. § 34.10), afferma “la risposta a domande profonde suscita domande ancor più profonde”.

¹⁰ Fano (2005, p. 160).

tutte le teorie che spiegano D, quella con maggior probabilità di essere vera sia necessariamente quella vera.

Come afferma il filosofo della scienza ed epistemologo Larry Laudan, che propone la meta-induzione pessimista, le nostre teorie saranno tutte soppiantate nel futuro. Come è noto, Laudan, in atteggiamento critico verso il realismo, nel suo articolo del 1981 “*A Confutation of Convergent Realism*”, sostiene, a favore di ciò, che le entità non osservabili di molte teorie scientifiche, che in passato hanno riscosso successo empirico, si sono rivelate non reali (basti pensare alle teorie dell'etere luminifero, alla teoria chimica del flogisto, a quelle fisiche del calorico, che sono risultate false nel futuro prosieguo della ricerca). Inoltre l'elaborazione di teorie nuove, che hanno la pretesa di spiegare meglio un certo dominio di oggetti, portano spesso a un cambiamento di prospettiva, verso “direzioni significativamente diverse da quelle attualmente seguite” come afferma Roger Penrose (2004): basti pensare ai buchi neri oggetti cosmici “attorno a cui permane il più profondo mistero - e che le nostre attuali teorie sono incapaci di descrivere” fino in fondo, ma che aprono nuovi e interessanti scenari nella ricerca. “La risposta a domande profonde suscita domande ancora più profonde”¹¹, per cui è ragionevole supporre che siamo lontani da una spiegazione scientifica completa di alcuni problemi cruciali della scienza e, conseguentemente, dalla spiegazione vera da quel certo dominio di oggetti. Se vale l'assunzione van Fraassen-Penrose, allora usare la *Inference to the Best Explanation* per passare dal determinismo della teoria a quello della realtà è epistemicamente troppo audace¹².

6. La definizione di determinismo di Popper

Un tentativo diverso, che aggira IBE e la critica di van Fraassen-Penrose, in un certo senso viene proposto nel 1982 da Sir Karl Popper, il quale afferma:

¹¹ Penrose (2004, trad. it. pp. 1132-1134).

¹² Un modo per superare le obbiezioni della meta induzione pessimista “consiste nel richiamo al fatto che le teorie passate non si sono dimostrate false del tutto, ma solo parzialmente false. Si tratta di individuare che cosa è stato conservato nel passaggio da una teoria all'altra.” [...] “Il realismo strutturale sostiene che ciò che si conserva nel passaggio da una vecchia teoria a una nuova -nelle scienze mature- non sono gli enti, ma le relazioni strutturali che valgono fra tali enti, espresse di solito come equazioni, per cui possiamo affermare che queste equazioni individuano ciò a cui possiamo attribuire realtà.” (Fano 2005, p.172).

Un sistema S le cui quantità fisiche al tempo t_i hanno i valori q_i è deterministico se è possibile prevedere il suo stato successivo q_j sulla base delle teorie scientifiche vere di quel sistema.

Ma questa non può essere una definizione, perché come si vede mescola ancora il piano epistemico (prevedere, teorie) con quello ontologico (sistema deterministico). Inoltre non è una definizione anche perché è un criterio, che rafforza il punto di vista di Nagel in quanto richiede anche la prevedibilità. Infatti, se usassimo la *Inference to the Best Explanation* applicata alle affermazioni di Popper avremo che

Se le nostre teorie T consentono di prevedere lo stato q_j di un sistema S a un istante successivo j a partire dallo stato q_i , allora S è deterministico.

In pratica potremmo utilizzare la IBE dalla teoria deterministica alla realtà deterministica solo quando non solo la teoria è deterministica nel senso di Nagel, ma il sistema è anche prevedibile. Ovvero non solo la teoria deve essere strutturalmente deterministica, ma deve anche essere possibile fare previsioni. Questo rafforzamento consentirebbe l'applicazione della IBE con maggiore affidabilità. Mettiamo anche che la procedura di Popper sia epistemologicamente adeguata, abbiamo allora un criterio per stabilire se un sistema sia deterministico o meno, ma resta il fatto che non abbiamo una feconda definizione di determinismo, in altre parole non abbiamo ancora chiarito che cosa sia il determinismo per un sistema fisico. Anche se non è ancora chiaro che cosa sia il determinismo, è abbastanza ovvio che, quantomeno dal punto di vista concettuale, esso non coincida con la prevedibilità: uno è un concetto epistemico e l'altro ontologico. Anche se definitissimo, come Nagel, in termini epistemici il determinismo, esso non coinciderebbe con la prevedibilità. Infatti il comportamento di un sistema potrebbe essere determinato per una teoria, senza essere prevedibile.

7. Determinismo vs Prevedibilità

Prevedere l'evoluzione di un sistema è molto più del determinismo di un sistema fisico. Prendiamo in considerazione infatti un sistema deterministico di cui sia nota la sua configurazione iniziale (o stato iniziale). Per poterne prevedere il comportamento è sufficiente determinare¹³:

¹³ Per le riflessioni esposte in questo paragrafo ci siamo ispirati a Murzi (2000).

- 1) La successione delle configurazioni che il sistema assumerà nel tempo;
- 2) in quale configurazione il sistema si troverà in un determinato istante;
- 3) se il sistema seguirà un ciclo stabile di configurazioni, cioè se avrà un comportamento periodico.

Una previsione, per essere distinta da una spiegazione, deve essere effettuata prima del verificarsi del fenomeno. Un esempio utile che mostra un sistema deterministico e prevedibile (come ben illustra Murzi (2000)) è quello rappresentato dal problema dei due corpi, cioè un sistema fisico composto da due corpi celesti: si può notare infatti che la sua evoluzione è riscritta da un sistema di equazioni differenziali, la cui soluzione soddisfa le tre condizioni precedenti, grazie all'ausilio di alcuni teoremi di meccanica celeste. Quindi questo sistema è prevedibile.

Nel cercare una risposta alla domanda se un sistema deterministico sia sempre prevedibile, allarghiamo l'orizzonte del nostro problema precedentemente considerato e passiamo dall'analisi del problema dei due corpi a quello a tre corpi. Consideriamo un sistema fisico isolato costituito da tre corpi celesti, sottoposti unicamente alle reciproche forze di interazione gravitazionale. Questo sistema è l'esempio per eccellenza di un sistema deterministico (in quanto governato da un sistema di equazioni differenziali che, data una condizione iniziale, ammette una e una sola soluzione) ma non prevedibile.

Come fece osservare il grande matematico, fisico e filosofo francese Jules Henri Poincaré, rispetto al sistema dei due corpi celesti vi è in aggiunta un problema cruciale: Le equazioni differenziali che descrivono l'evoluzione del sistema a tre corpi ammettono certamente una soluzione ma questa non può essere ricavata in modo esatto¹⁴. Si può ricorrere tuttavia a metodi di calcolo numerico che per quanto possano essere accurati comporteranno delle inesattezze nei risultati seppur minime. Come nota giustamente Murzi (2000) per riuscire a prevedere l'evoluzione del sistema ci si può chiedere se delle piccole variazioni della configurazione iniziale comportino piccole variazioni sulle configurazioni future o se ciò non è sempre atteso. Porsi domande come queste significa entrare nel dominio della *teoria della complessità e del caos deterministico*.

Negli scritti di Poincaré appaiono i primi tentativi di risposta a queste domande. Una piccola variazione ε delle condizioni iniziali può generare

¹⁴ Poincaré (1907, §23, p. 266 ss.).

un comportamento futuro del sistema del tutto inaspettato. La dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali, tipica di un sistema dinamico, deterministico e caotico, rende tale sistema non più prevedibile. Così si esprime Poincaré nel 1907 in *Le hasard, Revue du mois*¹⁵:

Una causa trascurabile, che ci sfugge, determina un effetto considerevole, che non possiamo non vedere, e allora diciamo che questo effetto è dovuto al caso. Se noi conoscessimo esattamente le leggi della natura e lo stato dell'universo all'istante iniziale, potremmo prevedere esattamente lo stato di questo stesso universo a un istante successivo. Ma, quand'anche le leggi naturali non avessero per noi più segreti, non potremo conoscere lo stato iniziale se non approssimativamente. Se ciò ci permette di conoscere lo stato successivo con la stessa approssimazione, non abbiamo bisogno d'altro, e diciamo allora che il fenomeno è stato previsto, che esistono leggi che lo governano; ma questo non sempre succede, può succedere infatti che piccole differenze nelle condizioni iniziali ne generino di grandissime nei fenomeni finali; un piccolo errore a proposito delle prime genererebbe allora un errore enorme a proposito di questi ultimi. La previsione diventa impossibile e noi siamo di fronte al fenomeno fortuito.

E ancora nel 1908 in *Science et Méthode*¹⁶

Il più grande caso della Natura è la nascita di un grande uomo. È stato solo per caso che si sono incontrate due cellule genitali del sesso opposto, che contenevano appunto a turno, gli elementi misteriosi la cui reazione reciproca è stata quella di produrre il genio. Siamo d'accordo che questi elementi dovrebbero essere molto rari e che il loro incontro è ancora più raro. Basterebbe poco per deviare la strada dello spermatozoo, sarebbe stato sufficiente deviarla di un decimo di millimetro e Napoleone non sarebbe nato e il destino di un intero continente sarebbe cambiato.

Possiamo ora comprendere il motivo per cui Popper abbia fornito la definizione di determinismo nella formulazione vista precedentemente: Nel libro *Open Universe* del 1982, Popper dichiara di voler far spazio per l'indeterminismo all'interno delle teorie fisiche¹⁷, per sostenere questo egli fa congiungere la definizione di determinismo con la prevedibilità, cioè se *S* non è deterministico allora le nostre teorie *T* non ci consentono di fare previsioni. In questo modo, anche se le nostre teorie sono deterministiche, il fatto che non consentono di formulare previsioni potrebbe essere indizio che il mondo sia indeterministico.

¹⁵ Poincaré (1907, pp. 257-276), traduzione dal francese.

¹⁶ Poincaré (1908, pp. 90-91), traduzione dal francese.

¹⁷ Si veda Earman (1986, p.9 e ss.); “make room within physical theory... for indeterminism” (Popper 1982, p. xxi).

8. La definizione di determinismo di Russell

Resta ancora da risolvere il problema cruciale: non abbiamo una buona definizione di determinismo e ancor peggio non è ancora chiaro che cosa esso sia. Citiamo brevemente un problema messo in luce da Bertrand Russell, in una raccolta del 1953. Egli sostiene che sembrerebbe molto ragionevole che:

Un sistema S le cui quantità fisiche al tempo t_i hanno i valori q_i è deterministico se esistono funzioni f_j tali che per un qualsiasi altro tempo t_j valga: $q_j = f_j(q_i, t_i)$.

Questa è una definizione non epistemica e sembrerebbe quella giusta ma bisogna capire cosa si intende con la parola “funzione”. Secondo l’analisi di Roger Penrose:¹⁸

Per Euler e gli altri matematici del diciassettesimo e diciottesimo secolo, una “funzione” avrebbe rappresentato qualcosa da poter scrivere esplicitamente, come x^2 o $\sin x$ o $\log(3 - x + e^x)$, o forse definita da qualche formula implicante un’integrazione o da una serie di potenze data esplicitamente. Oggi preferiamo pensare in termini di “applicazioni”, dove un insieme A di numeri (o di entità più generali) chiamato *dominio* della funzione è “applicato” su qualche altro insieme B , chiamato *target* della funzione. [...] La funzione assegna un membro del target B a ciascun membro del dominio A . [...] Questo genere di funzione può essere solo una “tabella da consultare”; non vi sarebbe alcuna richiesta per una formula “dall’aspetto ragionevole” per esprimere l’azione della funzione in modo chiaramente esplicito.

Alla luce di ciò, la definizione di Russell risulta vuota, poiché fa sì che tutti i sistemi siano deterministic, in quanto basterebbe scegliere come funzioni f_j dei *mapping* dal dominio A al target B , una sorta di “tabella”, e funzioni siffatte possiamo sempre trovarle, anche se la maggior parte delle volte non saranno semplici. Come afferma John Earman:¹⁹

Imagine a very simple universe containing a single dimensionless particle, and suppose that the state of the particle at any instant t is specified by its position coordinates x_t , y_t , z_t . The motion of the particle through space can be as complicated as you like as long as it can occupy only one place at a time. Then [...], there must exist functions f_1 , f_2 , f_3 , such that $x_t = f_1(t)$, $y_t = f_2(t)$, $z_t = f_3(t)$. The example can be made more realistic by adding other particles.

¹⁸ Penrose (2004, trad. it., pp. 126-127).

¹⁹ Earman (1986, §1, p. 11).

Lo stesso Russell nota che se tutte le particelle che compongono l'intero universo al tempo t possono essere descritte con una funzione dipendente da t , ciò non ci trasmetterebbe nulla più del determinismo dell'universo stesso²⁰.

9. La definizione di determinismo di Earman

Quindi a questo punto dobbiamo seguire un'altra strada: in primo luogo è da osservare, riguardo alla nozione di determinismo, che il concetto di tempo, dopo Einstein, è cambiato profondamente. Appare evidente che tutte le definizioni di determinismo che abbiamo fornito si basano sulla nozione di “stato q_i di un sistema al tempo t_i ”, cioè fanno leva sul concetto newtoniano di spazio-tempo. Ma dopo le teorie relativistiche non possiamo più distinguere agevolmente fra spazio e tempo, in altre parole lo spazio-tempo diventa un tutt'uno, spaziotempo. In altre parole a partire dalle rivoluzioni relativistiche il tempo come variabile indipendente perde di rilevanza per molti sistemi fisici, cioè per tutti quelli in cui sono in gioco le particelle elementari e per tutti quelli di carattere astrofisico. È quindi necessario parlare di “stato q_i di un sistema S in una *regione* dello spaziotempo R_i ”. Uno dei primi a prendere in considerazione seriamente questo punto è stato il filosofo della fisica John Earman, che nel 1986 scrive “*A Primer on Determinism*”, in cui discute il determinismo a partire dalla fisica classica fino alla fisica dei quanti²¹.

In secondo luogo, Earman, al fine di fornire una chiara definizione di determinismo, si avvale del concetto di “mondo possibile”. David Lewis ha mostrato la grande utilità filosofica della nozione di “mondo possibile”²², Cerchiamo tuttavia di prescindere dal realismo di Lewis e di limitarci a considerare i mondi possibili come stipulazioni. Sarebbe cioè più ragionevole intendere per mondi possibili descrizioni di stato alternative, esattamente come fece Carnap²³, che ha definito il senso di un predicato come una funzione matematica da mondi possibili a insiemi di individui, e il senso di un enunciato come una funzione da mondi possibili a valori di verità²⁴. Inoltre dobbiamo chiederci che cosa si intenda con il termine “possibili”. Adot-

²⁰ Si veda Russell (1953). Si veda Earman (1986, p.11).

²¹ Per un approfondimento si veda:

www.informationphilosopher.com/solutions/philosophers/earman.

²² Lewis (1986).

²³ Carnap (1947).

²⁴ Fano (2005, p. 84).

tiamo qui la nozione più debole di mondi “nomologicamente possibili”, cioè mondi compatibili con le leggi scientifiche che conosciamo.

Fatte queste premesse, proponiamo la definizione di Earman:

Consideriamo un mondo w e l'insieme W dei mondi accessibili da w . w è (R_1, R_2) -deterministico se per ogni v appartenente a W se v e w sono nello stato in R_1 lo sono anche in R_2 .

Un paio di esempi e qualche parola di commento possono essere utili a comprendere questa definizione: Consideriamo il determinismo classico: supponiamo che S sia una palla di cannone. In questo caso gli effetti relativistici sono irrilevanti, per cui R_1 potrebbe essere una ipersuperficie dello spaziotempo a un tempo determinato e R_2 tutto il resto dello spazio-tempo rilevante per S . È chiaro che in questo caso abbiamo buone ragioni per credere che il moto della palla sia deterministico. Infatti, se seguiamo la riformulazione popperiana della IBE applicata al determinismo di Nagel, possiamo supporre che la palla di cannone sia deterministica nel senso di Earman.

Supponiamo ora che S sia un neutrino. Allora gli effetti relativistici sono molto importanti. Ci troviamo nello spazio-tempo di Minkowski. R_1 potrebbe essere una qualsiasi regione acronale e R_2 il resto dello spazio-tempo rilevante per S . Anche in questo caso, per quel che ne sappiamo, utilizzando la procedura Nagel-Popper-IBE, il moto sarà deterministico nel senso di Earman.

Consideriamo la Meccanica quantistica, supponiamo che S sia un elettrone di un atomo di idrogeno che si trova in uno stato di sovrapposizione. Allora gli effetti relativistici sono poco importanti. R_1 può essere una certa ipersuperficie istantanea. R_2 il resto dello spazio-tempo rilevante per S . Nell'interpretazione standard della Meccanica quantistica abbiamo buone ragioni per credere che il processo di eliminazione della sovrapposizione sia indeterministico.

10. Breve conclusione

Abbiamo analizzato, da una prospettiva epistemologica, i principali tentativi della filosofia di definire adeguatamente il determinismo e di comprendere se il mondo sia o meno deterministico. In Laplace ci siamo imbattuti in una definizione di determinismo filosoficamente non rigorosa, che mescola piano epistemologico e piano ontologico, con il determinismo del mondo accettato come assioma di fondo. Questa tensione è risolta in Nagel che

porta la definizione totalmente su un piano epistemologico, da cui abbiamo preso le mosse per espandere le nostre conoscenze al piano ontologico mediante il criterio della inferenza alla miglior spiegazione. Tuttavia questo balzo si è rivelato troppo audace se ad esempio assumiamo in primo luogo, come critiche a IBE, la premessa del non privilegio di van Fraassen, secondo la quale non abbiamo nessuna ragione per credere che una teoria vera rispetto a un certo dominio di oggetti sia fra quelle di cui disponiamo. In secondo luogo abbiamo il pessimismo meta-induttivo di Laudan, secondo il quale tutte le nostre teorie saranno soppiantate nel futuro. La definizione di Popper riesce ad aggirare questi problemi sorti dall'accettazione della inferenza alla miglior spiegazione, ma non è una vera e propria definizione: è un criterio che rafforza il punto di vista di Nagel, richiedendo la prevedibilità al determinismo di un sistema. La prevedibilità è molto più del determinismo. La definizione non epistemica, che sembra quella corretta, ci viene da Russell; tuttavia non ci trasmette nessuna informazione sul fatto che il mondo sia deterministico in quanto le funzioni f_i introdotte nella definizione si possono sempre costruire, rendendo quindi qualunque sistema deterministico. Alla luce delle rivoluzioni relativistiche sul concetto di spazio e tempo, coniugando il concetto di “mondi possibili” di Lewis nella nozione più debole di “mondi nomologicamente possibili”, Earman presenta una buona definizione del determinismo per stabilire se un sistema S sia deterministico. Potremmo provare a generalizzare e chiederci se non solo un sistema fisico S sia deterministico ma se lo è l'intero universo: questo ancora appare tuttora troppo audace, anche se un'indagine in tal senso aprirebbe la strada a risposte ancor più profonde di quelle che abbiamo trovato nel corso della nostra trattazione.

Bibliografia

- Carnap, R., 1947, *Meaning and Necessity: a Study in Semantics and Modal Logic*, Chicago, University of Chicago Press.
- Ceriani, A., Tosetti, V., 2005, *Lo specchio magico. Manuale del moderno formattore*, “Un lungo cammino verso l'indeterminismo”, pp. 47-48, Roma, Armando Editore.
- Earman, J., 1986, *A primer on determinism*, The Western Ontario Series in Philosophy of Science v. 32, Dordrecht, D. Reidel publishing company.
Per un approfondimento sull' opera di Earman si veda:
www.informationphilosopher.com/solutions/phosphophers/earman

- Fano, V., 2005, *Comprendere la scienza. Un'introduzione all'epistemologia delle scienze naturali*, Napoli, Liguori editore.
- Höffe, O., 1992, *Immanuel Kant*, Verlag C.H. Beck München; trad. it. *Immanuel Kant*, Bologna, Il Mulino, 1986.
- Laudan, L., 1981, "A Confutation of Convergent Realism", *Philosophy of Science*, Vol. 48, No. 1. (Mar., 1981), pp. 19-49.
- Laplace, P.S., 1814, *Essay philosophique sur les probabilités*, Paris, Mecourcier.
- Lewis, D., 1986, *On the Plurality of Worlds*, Oxford, Basil Blackwell.
- Murzi, M., 2000, "Creatività, caos e calcolatori", *Notiziario di Informatica*, (III, 1), <http://www.murzim.net/notiziario/000105.htm>.
- Nagel, E., 1961, *The Structure of Science: Problem in the Logic of Scientific Explanation*, London, Routledge & Kegan Paul PLC; trad. it. *La struttura della scienza*, Milano, Feltrinelli Editore, 1981. Recensione disponibile all'indirizzo internet www.lankelot.eu/scienze/nagel-ernest-la-struttura-della-scienza-problemi-nella-logica-della-scoperta-scientifica.htm
- Niiniluoto, I., 1987, *Truthlikeness*, Dordrecht, D. Reidel publishing company.
- Penrose, R., 2004, *The road to reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, New York, Vintage Books; trad. it. *La strada che porta alla realtà. Le leggi fondamentali dell'universo*, Milano, Rizzoli, 2011.
- Poincaré, H., 1907, "Le hasard", *Revue du mois* (III), pp. 257-276.
- Poincaré, H., 1908, *Science et Méthode*, Paris, Flammarion.
- Popper, K., 1982, *The Open Universe: An Argument for Indeterminism From the Postscript to The Logic of Scientific Discovery*, Lanham, Rowman & Littlefield Publishers, Incorporated.
- Russell, B., 1953, *The impact of Science on Society*, New York, AMS Press.

Forecasting the Future

Scaltrini, G., “Determinismo e indeterminismo”, testo on-line
www.filosofico.net/determinysegysdfjero.htm.

Trombino, M., 1998, *Filosofia. Testi e Percorsi* vol. 1,2,3, Bologna,
Poseidonia.

Van Fraassen, B., 1989, *Laws and symmetry*, Oxford, Clarendon Press.

Probabilistic Causation

Margherita Benzi

Università del Piemonte Orientale “Amedeo Avogadro”

margherita.benzi@lett.unipmn.it

1. Introduction

A well known 1988 survey of probabilistic philosophical theories of causation begun with the remark that «[p]robabilistic theories of causation have received relatively little attention» (Davis 1988, 133). Conversely, a more recent important survey, Williamson (2009, 185), begins in the following way: «Causal relationships are *typically* accompanied by probabilistic dependencies [*italics added*]». As the two different *incipit* show clearly, in about twenty years the perception of the relationship between causes and probabilities has strengthened, and a vast majority of the most promising current philosophical theories of causation deal with probabilities. However, a necessary *caveat* must be introduced: in saying that (almost) all current approaches to causation “deal with probabilities” we are not saying that every philosophical theory of causation must analyze causation in terms of probabilities, or “explain causation away” by means of probabilities: in the last few years, the philosophical program consisting in the *reduction* of causes to probabilities has not been the prevailing one, and, in its original form has ultimately proven unsuccessful (we will return to this point later). Rather, what is currently acknowledged in stressing the relationship linking causes to probabilities is the legitimacy of causal statements also when – due to lack of information or to genuine randomness – causes do not *determine* their effects. The combination of causality with probability should be of no surprise, if we consider that contemporary science is highly probabilistic; but of course, allowing indeterminacy within causation raises the question of *where* the indeterminacy lies (should we place it at the ontic or

at the epistemic level?) and what notion of probability should be adopted. A further, but not less important question, is whether there are some theories of probabilistic causation (in this weak sense) that seem to be commonly accepted, i.e. that are accepted independently of the specific analysis of causation – and of probability – endorsed, in the same way in which we say that probability calculus can be accepted regardless of the specific interpretation of probability adopted.

In this paper we will proceed in the following way: firstly we will give a brief reminder of the main tenets of the philosophical program connected to strong probabilistic causation; then we will recall some of the principal problems that the mathematization of probability-based causal theories have tried to solve in the last two decades (with a certain degree of success, which explains the two different *incipit* quoted above). Eventually we will discuss the connection between kinds of probabilities and kinds of probabilistic causations, an issue that has a strong impact on the problem of determinism.

2. Causes as Probability Modifiers

According to one of the leading philosophical approaches to causation, the essence of causation is linked to constant regularities. From a historical point of view, the source of the so called *regularity view of causation* lies in Hume's famous definition: «We may define a cause to be *an object, followed by another, and where all the objects similar to the first, are followed by objects similar to the second*» (Hume 1748, VII, II). This definition states two key elements of the regularity view, namely temporal succession and constant conjunction. As supporters of regularity view, Hume included, know well, perfectly constant conjunctions are not so frequent. Sometimes conjunctions between types of events which prove to be constant – and are unanimously considered causal – in some contexts, cease to be valid in other contexts, just because some contributing factors are missing, or because some conflicting factors are present. In other cases the “erosion” of constancy does not depend strictly on the context, but on the very fact that the conjunctions in question do not exhibit an inescapable character, but only a certain frequency.

The need of revising the Humean definition in order to account for conjunctions that manifest themselves with not strict, but rather ‘gappy’ regularities can be seen as a valid motivation for a probabilistic approach to causation: in fact the first step toward a probabilistic account of causation

consists in recognizing the existence of associations which are not invariable, but nevertheless exhibit regular frequencies. A possible paraphrase of the Humean definition could run as follows: «We may define a cause to be an object, followed by another, and where *most* objects similar to the first, are followed by objects similar to the second».

As it is well known, Hume's first definition was accompanied by a second definition whose counterfactual approach seems, at least to contemporary readers, rather at odds with the regularity view: «Or in other words *where, if the first object had not been, the second never had existed*. [It is often remarked that the phrase 'in other words' here is totally misleading]» (*ibid.*). Again, if we wanted to transpose this last definition into a 'gappy' context, the new definition could run as follows: «Or [...], if the first object had not been, the probability of the second would have been lower». If we temporarily put aside the philosophical difficulties which can easily be associated to a *counterfactual* lowering of probabilities, it should be natural to think of causes not only as those factors which determine their effects, but also as those factors which raise the probability of their effects. In fact, the first and more basic trait of probabilistic causation consists in seeing positive causes as *probability raisers*; if we define *negative* causes as those preventative or impeding factors which *lower* the probability of their effect, then we can, more generally, see (positive or negative) causes as *probability modifiers*.

The basic idea of probability raising can be stated by saying that, if C and E are both events¹, C raises the probability of E when the probability of E conditional to C is greater than the probability of E alone;

$$P(E | C) > P(E) \quad (2.1)$$

or, alternatively, by saying that the probability of E , conditional on C , is greater than the probability of E conditional on not- C :

$$P(E | C) > P(E | \sim C). \quad (2.2)$$

The two formulations (2.1) and (2.2) are almost equivalent²; as (2.1) holds just when (2.2) holds, here we will use the second. Now the basic idea of probabilistic causation can be expressed by the following formula:

¹ In absence of further specifications, we will use the term "events" both for particular events, which are the subjects of particular causal claims, as «Elizabeth's smoking caused her bronchitis», and event types, or *generic events*, which are referred to by general causal claims as «Smoking causes bronchitis».

C is a probabilistic cause of E only if $P(E / C) > P(E / \sim C)$. (2.3)

If in (2.3) we substituted the ‘only if’ with ‘if and only if’, we would obtain a possible definition of probabilistic causation

C is a probabilistic cause of E if and only if $P(E | C) > P(E | \sim C)$. (2.3*)

Given that on the right hand side of the biconditional in (2.3*) we find only probabilities, (2.3*) is a definition which reduces causes to probabilities. However, probability raising, as expressed by (2.3*), is neither a sufficient nor a necessary condition to obtain a satisfying reductive definition of causality, as there are probability raisers which are not causes, and causes that do not raise the probability of their effects. In what follows we will present a short summary of the most relevant problems deriving from insufficiency, namely *Symmetry* and *Spurious causation*.

3. Probability Raising is an Insufficient Condition for Defining Causation

3.1. Symmetry

A definition of causation in terms of probabilities like (2.3*) does not satisfy the generally accepted requisite that a relation should satisfy in order to be causal, that of being an *asymmetric* relation; in probability theory, if the occurrence of C raises the probability of E , then also the presence of E raises the probability of C ; in symbols:

If $P(E | C) > P(E | \sim C)$, then $P(C | E) > P(C | \sim E)$. (3.1)

Should we define causation by mere probability raising, like in (2.3*), we would be forced to accept that each effect causes its causes, contrary to our intuition that effects are non-causal probability raisers of their causes.³

² See Hitchcock (2010, 2.1).

³ It is perfectly possible to think of bidirectional or cyclical causation, but these cases are generally seen as different events of the same kind of the effects causing new events of the same kind of the original causes; for example, the intended meaning of the statement that «poverty causes ignorance and ignorance causes poverty» is that ignorance causes *further* impoverishment.

3.2. Spurious correlation

A definition of causation which is based exclusively on *probability raising* does not allow us to distinguish between genuine causation and spurious correlation. A typical problem of spurious correlation occurs whenever two events A and B are statistically associated, but the link is due to a third factor C , which is the cause of both A and B . Given two events A and B of which we know only that are statistically correlated we cannot say if

- i) it is B causing A , or the other way around, or
- ii) there is a third causal factor, or complex of factors, causing both A and B ⁴, or
- iii) it is just a mere coincidence, as in the famous case of the parallel increasing of sea levels in Venice and bread prices in London (Sober 2001).

Incidentally, it can be observed that difficulties in distinguishing causal from non-causal associations plague all the regularity theories of causation, probabilistic and not probabilistic ones, since their origins, as attested by Thomas Reid's well known claim that Hume's theory could not rule out the unwanted conclusion that the night causes the day and the day causes the night because they regularly follow each other.⁵

As we will see in a while, the search for suitable solutions for the problems deriving by the so-called "naive probabilistic analysis" of causation (Glynn 2011) inspired a great deal of philosophical work.

4. The No-Screening-Off Condition

A large part of what has been built within this research area finds its origins in the contribution given by Hans Reichenbach in *The Direction of Time*, a

⁴ A good example of i) and ii) is given by the controversial causal explanation of the correlation between smoking and depression: «Depression may cause people to smoke (perhaps to self-medicate their symptoms), or smoking may cause increased risk of depression (via alterations in neurotransmitter pathways following chronic exposure). The relationship may even be bidirectional (acute or infrequent tobacco use may reduce negative effect, but chronic use may exacerbate it), or be caused by shared risk factors (possibly genetic) so that the relationship is not causal at all». (Munafò & Araia 2010, 452)

⁵ «It follows from [Hume's] definition of a cause, that night is the cause of day, and day the cause of night. For no two things have more constantly followed each other since the beginning of the world». (Reid 1788, 4.9)

volume published three years after his death (Reichenbach 1956). It is worth noting that in a work written in 1923 – but published ten years later - he had presented a Kantian position, in which causal judgements were given a synthetic *a priori* status (Reichenbach 1933). Reichenbach (1956) assumes a different position, claiming that probabilities are more fundamental, and that causality can be derived from probabilistic relations; moreover, he purports to show how the direction of time is derived from the direction of causation. *The Direction of Time* also introduces a concept which will prove very important for the subsequent theories of probabilistic causality, namely the concept of *screening off*. The *no-screening-off condition* formalizes the intuition that spurious causes become uninformative once the real cause is known. Before seeing how this intuition can be put at work, let us introduce two classic examples of *screening off*.

4.1. Common cause

Let us consider a typical case of spurious correlation, the situation in which whenever the atmospheric pressure in a certain region drops below a certain level, the height of the column of mercury in a particular barometer also drops and after a short time a storm occurs. The drop of the mercury column (A) is therefore associated to the occurrence of a storm (B): therefore it *raises* the probability of the storm and its probability is raised by the occurrence of the storm itself; in symbols:

$$\begin{aligned} P(A | B) &> P(A | \sim B), \\ P(B | A) &> P(B | \sim A). \end{aligned} \quad (4.1)$$

But even if A is a *probability raiser* of B and B a probability-raiser of A , neither is cause of the other: the right causal picture is restored if we consider a third factor, the atmospheric pressure (C). If we analyze the relations of probabilistic dependency among the factors A , B , and C , we notice two important things:

- C is a *probability raiser* of each of the other two factors as $P(A | C) > P(A | \sim C)$ and $P(B | C) > P(B | \sim C)$;
- C has the further property of cancelling, whenever we condition on C , the positive statistical association between A and B . C is said to *screen A off from B* if A and B are statistically correlated, but the correlation vanishes once we consider C . The vanishing of the statistical

association is more precisely stated in terms of *probabilistic conditional independence*:

If $P(A \& B) > 0$, then A and B are probabilistically independent given C if and only if $P(A \& B | C) = P(A | C) P(B | C)$. (4.2)

The diagram in figure 4.1 represents the causal structure of the barometer/storm/pressure example:

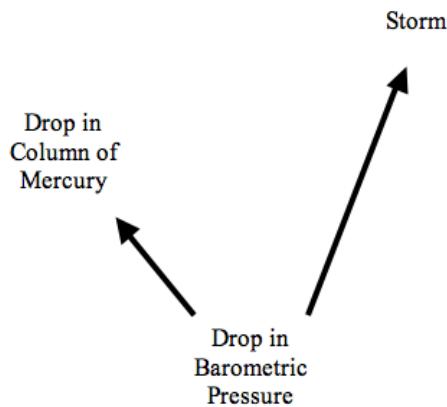


Fig. 4.1

In this case the role of the screening factor, C , is that of a common cause; screeners are often referred to as *confounders*, or *confounding factors*.

4.2. Causal intermediates

There is another important type of screening off, due to the presence of causal intermediates (Figure 4.2).

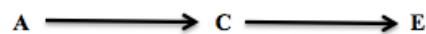


Fig. 4.2

In this case we have a causal chain, where the direct cause C screens off the effect E from A ; in this case we still want to say that A is a cause of E , even if it is an *indirect* cause.

5. The Principle of Common Cause

The notion of common cause plays a fundamental role in Reichenbach's conception of causation. «It will be advisable – he says in introducing his argument (Reichenbach 1956, 158) to treat the principle of a common cause like a statistical problem». The *Principle of Common Cause* states that «if coincidences of two events A and B occur more frequently than would correspond to their independent occurrence», that is, in statistical terms, if the following formula is satisfied⁶

$$P(A \ \& \ B) > P(A) \ P(B), \quad (5.1)$$

then the explanation of their association should be ascribed to a third factor C [with $0 < P(C) < 1$], which causes A and B. A *conjunctive fork* is a causal structure (such as that in figure 4.1) where A and B occur simultaneously, and A, B, C, satisfy the following conditions:

$$P(A \ \& \ B | C) = P(A | C) \ P(B | C) \quad (5.2)$$

$$P(A \ \& \ B | \sim C) = P(A | \sim C) \ P(B | \sim C) \quad (5.3)$$

$$P(A | C) > P(A | \sim C) \quad (5.4)$$

$$P(B | C) > P(B | \sim C), \quad (5.5)$$

Here (5.2) and (5.3) describe the fact that C screens off A from B and (5.4) and (5.5) convey the dependence, respectively, of A from C and of B from C; Reichenbach (1956, 159-161) shows that (5.1) is derivable from (5.2) - (5.5). If C satisfies (5.2) - (5.5), and there is no other factor that satisfies these conditions, then ACB form a conjunctive fork ‘open to the future’: C is the common cause of A and B and it precedes in time both A and B. According to Reichenbach, the majority of conjunctive forks are open to the future, and this hypothesis allows us to derive temporal order from causal asymmetry, which in turn is based on a particular set of statistical relations. He concedes that there are conjunctive forks open to the past, but they are defined by a different set of statistical relations. As Hitchcock (2010) notes, «Reichenbach considered this asymmetry to be a macrostatistical analogue of the second law of thermodynamics»⁷.

⁶ The notation has been changed for coherence.

⁷ «Reichenbach (1956) saw his fork asymmetry as a macro-statistical analog of the second law of thermodynamics. The idea is roughly along the following lines. Suppose we have a system such as a beach that is essentially isolated from the rest of its environment. Suppose

5.1. Suppes' Definition

An alternative way of defining probabilistic causation consists in defining probabilistic causation by “building in” the definition of the temporal order (i.e. the fact that causes precede their effects):

Probabilistic Causation – If C_t is an event occurring at time t , $E_{t'}$ is an event occurring at time t' , and t precedes t' , then C_t causes $E_{t'}$ if and only if:

- i) $P(E_{t'} | C_t) > P(E_{t'} | \sim C_t)$;
- ii) There is no further event $B_{t''}$, occurring at a time t'' earlier than or simultaneously with t , that screens $E_{t'}$ off from C_t .

A definition of this kind is presented by Suppes (1970). First, Suppes gives a preliminary definition of *prima facie* causes - in short, *prima facie* causes are *probability raiser* with a probability greater than 0 that precede their putative effect in time. He then defines *spurious causes* as those *prima facie* causes which are screened off from their effects by members of a partition of events which precede the effect. Finally, he defines *genuine causes* as those prime facie causes that are not spurious. While Reichenbach focused on structures as the one in figure 4.1, Suppes' definition is inspired by cases like the causal chain depicted in figure 4. 2.

Our brief sketch of the first period of probabilistic approaches to causation should include a presentation of the contribution given by Good (1959, 1961a, 1962). We will not provide it, referring instead, for a first presentation, to Williamson (2009). In the next section we will sketch some of the main problems linked to the definition of causation *à la* Suppes-Reichenbach, before introducing the new formal approach to the philosophy of probability and causation.

moreover that we find this system in a state of low entropy; e.g. there are footprints on the beach. The second law of thermodynamics tells us that the system did not spontaneously evolve into this state; rather, the low entropy state must be the result of an earlier interaction with some other system (a human walking on the beach). This interaction ‘prepares’ the system in a low entropy state, but once the system is isolated, its entropy will increase. Now suppose that we have two events A and B . If we hold fixed the probability of each event individually, a probability distribution over the partition $A \& B$, $A \& \sim B$, $\sim A \& B$, $\sim A \& \sim B$ will have more information, in the sense of Shannon (1948), when A and B are correlated. The formal definition of entropy is closely related to that of information, the two being inversely proportional. So when A and B are correlated, we have the analog of a system in a state of low entropy. This state is then to be explained in terms of some earlier event that prepares the system» (Hitchcock 2010).

6. Probability Raising is an Unnecessary Condition for Defining Causation

If we wanted to summarize the preceding sections, we could say that a definition of probabilistic causation in terms of probability raising (or probability modifying) should be accompanied by something like *No-Screening off Condition*, stating that C causes E just in case it raises the probability of E and there is no third factor (or conjunction of factors) C such that C screens off C from E . However, even this definition must face serious counter-examples, notably those deriving from causes that do not raise (modify) the probability of their effects. One of the most well known examples is given by Skyrms (1980). In general, smoking is a positive cause of lung cancer. But suppose that, due to air pollution (which is also assumed to be another positive cause of lung cancer), city-dwellers tend to stop smoking in order to protect their lungs, whereas in the country people feel freer to smoke. Then, smoking is a positive cause of lung cancer, living in the country is negative cause of lung cancer and a positive cause of smoking; however, if the city air quality is bad enough to cause lung cancer to a high number of non smokers, then the frequency of lung cancer in the entire population can be lower among smokers than among not smokers; in this case smoking will be negatively correlated with lung cancer even if it is a positive cause of it.

In this example, living in the country is a common cause of lung cancer (negative) and smoking (positive), but does not screens off lung cancer from smoking because smoking causally affects lung cancer in an independent way. Therefore, *No-Screening-Off Condition* is *insufficient* to restore the right causal picture. Other well known examples of contrast between probabilistic influence and causal influence are given below, together with attempts to show how to overcome this problem.

7. Hesslow Problem and Simpson's Paradox

A well known example of causation which is not reflected by probability raising is given by Hesslow (1976, 192):

It is possible however that examples could be found of causes that lower the probability of their effects. Such a situation could come about if a cause could lower the probability of other more efficient causes. It has been claimed, e.g., that contraceptive pills (C) can cause thrombosis (T), and that consequently there are cases where C_t caused $T_{t'}$. But pregnancy can also cause thrombosis, and C lowers the probability of pregnancy. I do not know the values of $P(T)$ and $P(T/C)$ but it seems possible that $P(T/C) < P(T)$, and in a population which lacked other

contraceptives this would appear a likely situation. Be that as it may, the point remains: *it is entirely possible that a cause should lower the probability of its effect.*

In Hesslow's example, we have causation unaccompanied by probability-raising. In general, those cases in which two or more properties, which are positively or negatively correlated or independent from each other, exhibit a "sign reversal" – or become uncorrelated when we consider the subpopulations separately – are called "Simpson's paradoxes". Here we present a typical example of Simpson's paradox, following Pearl (2000).

Imagine a drug trial (where some subjects are given the drug and the others are given a placebo) where the drug appears positively associated to recovery in the overall population, but negatively associated to recovery in the two subpopulations of males and females.

Here the 'factors' are: *Recovery, Drug, Female*. The absence of each factor is represented, as usual, by the negation symbol ' \sim '. The sign-reversal is represented by the following inequalities:

- i) $P(Recovery | Drug) > P(Recovery | \sim Drug)$
- ii) $P(Recovery | Drug \& Female) < P(Recovery | \sim Drug \& Female)$
- iii) $P(Recovery | Drug \& \sim Female) < P(Recovery | \sim Drug \& \sim Female)$.

The data in following three tables show, respectively, the different frequencies of recoveries of patients who received the drug with respect to those who received the placebo in the whole group (a), in the subpopulation of female patients (b) and in the subpopulation of male patients (c).

Combined	Recovered	Not recovered	Total	Recovery rate
Drug	20	20	40	50%
No drug	16	24	40	40%
	36	44	80	

(a)

Females	Recovered	Not recovered	Total	Recovery rate
Drug	2	8	10	20%
No drug	9	21	30	30%
	11	29	40	

(b)

Males	Recovered	Not recovered	Total	Recovery rate
Drug	18	12	30	60%
No drug	7	3	10	70%
	25	15	40	

(c)

If we look at the three tables, we see that (a) seems to point toward drug efficacy, as the rate of recovery is 10% higher among the treated patients. Therefore, it seems that we are justified in asserting:

$$iv) P(Recovery / Drug) > P(Recovery / \sim Drug).$$

However, tables (b) and (c) show a recovery rate which is 10% *lower* both among female patients and among male patients, displaying a value reversal with respect to the mixed group:

$$v) P(Recovery / Drug \& Female) < P(Recovery / \sim Drug \& Female),$$

$$vi) P(Recovery / Drug \& \sim Female) < P(Recovery / \sim Drug \& \sim Female).$$

In our example, the drug appears to be a positive cause of recovery in the overall population because male patients, who recover more often than female patients *independently*, also undergo treatment with higher frequency. The larger proportion of treated patients and of recovering patients within the male population, therefore, masks, in the whole population, the true causal picture. However, if we investigate the effect of the drug in the two subpopulations separately, holding fixed the factor “sex”, that in this case results to be a confounding factor, the right causal picture emerges.

The philosophical moral of these examples is that *probability raising* plus *Screening Off* are neither sufficient for analyzing causation nor for licensing correct causal judgements: it is also important that causal links are evaluated with respect to the ‘right’ populations. But how should we identify the right populations? Are there general rules to do so? Cartwright (1979, 423) suggests incorporating the requirement that probability raising is ascertained in causally homogeneous populations into the definition of probabilistic causation in the following way:

Definition of probability: C causes E if and only if C increases the probability of E in every situation which is otherwise causally homogeneous with respect to E.

In more formal terms:

Contextual Unanimity: C causes E if and only if $P(E| C \& B) > P(E| \sim C \& B)$ in every background context.

Skyrms (1980) offers a weaker formulation of this principle, requiring that the alleged cause raises the probability of the presumed effect in at least a background context and lowers it in none. *Background contexts* are defined as conjunctions of factors which are causally relevant with respect to the causal relation under enquiry. Due to this appeal to (other) causally relevant factors, neither Cartwright's nor Skyrms' theories are to be considered as reductive theories of probabilistic causation.

8. Causal modeling

Starting from late '80, the research on the relationship between causal and statistical dependencies has become interdisciplinary, and it has undergone a strong mathematization, due also to the contribution from research in artificial intelligence, at least since the works by Pearl (1988, 2000) and Spirtes, Glymour & Scheines (1993). The result of this area of research is called *causal modeling* and, due to its ability to offer a systematized account of formerly sparse statistical, philosophical and mathematical results, has become the state of the art concerning the approach to causal inference from statistical data in many scientific areas, with particular respect to epidemiology and the social sciences. From a philosophical point of view, the research of causal modeling has yield an important clarification of many principles both of *causal reasoning* and on *reasoning about causation*, but at the same time has raised a lively debate on the validity of its methods and principles. In this section we will present a brief sketch of the theory.

Our introduction starts with the definition of *Bayesian networks*. A Bayesian network is a mathematical object consisting of:

- i) a directed acyclic graph \mathbf{G} , i.e., a set of nodes and a set of arrows that connect pairs of nodes, and in which there are not cycles (like $X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_1$). Each node is associated to a *variable*, whose values represent the occurrence/non occurrence of events; for brevity, the terms "node" and "variable" are often used interchangeably. Variables can be binary (e.g. the variable FEVER having value 1 or value 0 represents the presence or the absence of fever), or range over richer sets of values

(e.g. BODY TEMPERATURE = $\{32, \dots, 41\}$). The set of variables is denoted by “ \mathbf{V} ”. The relations between subsets of variables are described as family relations: an arrow from X_1 pointing directly to X_2 is said to be a *parent* of X_2 , where X_2 is said to be a *child* of X_1 . The set formed by the children of X_1 , the children of children of X_1 , \dots , is called *the set of the descendants* of X_1 ;

ii) a probability distribution on the variables of \mathbf{G} , such that for each node Y with parents X_1, \dots, X_n is specified a conditional probability distribution $P(Y | X_1, \dots, X_n)$.

An important assumption concerning the relationship between the graph and the probability distribution is the *Markov Condition (MC)*:

(MC) In a Bayesian network any node is conditionally independent of its non-descendants, given its parents.

In figure 8.1, the probability of the node X_5 is independent of its non-descendants X_1 and X_4 conditionally on its parents X_3 and X_2 .

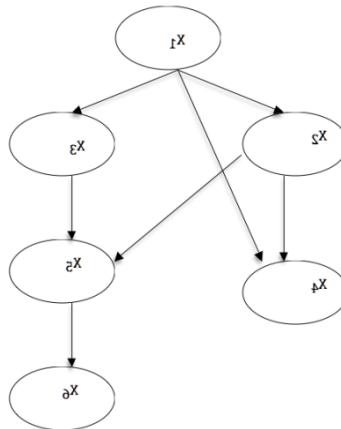


Fig. 8.1

The Markov Condition turns out to be equivalent to a relation, called *d-separation*, which allows a ‘reading’ of the independence relationships among the variables from the graph.⁸ Besides Markov Condition, two other conditions can be – and often are – assumed:

⁸ For an introduction to d-separation see e.g. Scheines (2005).

Minimality – no edge can be removed from the graph with the resulting sub-graph violating the Markov condition,

And

Faithfulness – probabilistic independencies are due only to the holding of the Markov Condition, and not to incidental mutual cancellations of probability values.

Originally Bayesian networks were devised as an useful tool for representing and inferring probabilistic dependencies. Given the close relationship between probabilistic dependencies and causal dependencies, it is not surprising that they have been used also for causal reasoning. In order to be an useful tool in this area, however, Bayesian networks must be given a causal interpretation. Under such an interpretation, the arrows of the graph represent direct causal relationships. For *causal* Bayesian networks the following *Causal Markov Condition (CMC)* holds

- (CMC) In a causal Bayesian network, any node is probabilistically independent of its *non-effects*, conditional on its direct causes.

As Williamson (2009) points out, «CMC implies the Principle of Common Cause in the following version: if variables A and B are probabilistically dependent then one causes the other, or there is a set U of common causes in V which screen off A and B ». He also remarks that this version of the Principle of Common Cause is also a consequence of Reichenbach's own version «under a suitable mapping between events and variables».

How does causal modeling fares with respect to problems like Hesslow's problem and Simpson paradox? A general answer could be that by the constant request of making every step and assumption explicit, classical problems can be handled quite well: every step of the building of the model, and every causal assumption about both the causal scenario under enquiry and the inferential principles adopted in the process of drawing causal inferences will be expressed explicitly, helping to disambiguate what is hidden in Hesslow's problem and Simpson Paradox. However, recent researches have made clear that good causal modeling requires good background causal knowledge, and some principles are still controversial. In cases à la Hesslow, for example, the possibility that the tendency of birth

control pills to (directly) cause thrombosis and the tendency of birth control pills to prevent thrombosis by preventing pregnancy (which in turns is a cause of thrombosis) is excluded by the Faithfulness Condition that, as we have seen, implies that the causal influences of a variable on another along different routes do not cancel each other. As many critics have pointed out, however, it is difficult to find metaphysical compelling reasons to accept Faithfulness, which seems therefore to be an object of methodological decisions.

As far as Simpson's paradox is concerned, it is clear that it can "dissolve" once we condition on the variable "Sex" (= male, female): even it is not perfectly clear in what sense the sex is "a cause" of recovery, in Simpson's scenario it causally influences both compliance to the treatment and recovery, so it should be held fixed and the "true" causal history is revealed by the disaggregated data. But it is not always easy to decide what factors should be held fixed, and there are not methods based on purely statistical criteria for identifying confounders. The theory of causal modeling offers a powerful method to deal with confounding biases, based on the so called "back-door criterion" (see, for example, Pearl 2013). However, applying back-door criterion correctly requires the building of a "good causal model" and this, in turn, seems to require a large amount of (causal) background knowledge. It should not be surprising, therefore, that many authors working with causal models endorse a non-reductionist position. We will discuss later open questions in the metaphysics of probabilistic causation; here we just point out some cases in which the Markov Condition does not hold. The Markov Condition can fail for the following reasons:

- a) the variables are linked by intrinsically non-causal probabilistic dependencies, such as logical relations, mathematical relations (e.g. are connected by a mathematical equation), or semantic relations (e.g. synonymy);
- b) the variables are connected by a non-causal physical law;
- c) the set of variables \mathbf{V} contains variables which are linked by a common cause that is not included in \mathbf{V} : in this case \mathbf{V} is said to be *causally insufficient*;
- d) the population is selected by a biased procedure;
- e) quantum mechanical systems.

Most of these cases are ruled out by explicit prescriptions: for example, Spirtes, Glymour & Scheines (1993) explicitly rule out causally insufficient sets of variables. They conceive principles as the Faithfulness Condition, the Sufficiency Condition and Causal Markov Condition neither as a dogma nor as parts of a reductive definition of causality, but rather as working hypotheses stating that the «Markov Condition is not given by God; it can fail for various reasons [...]. The reliability of inferences based upon the Condition is only guaranteed if substantial assumptions obtains»⁹

It is therefore clear that, in this framework, principles as the Faithfulness Condition, the Sufficiency Condition and Causal Markov Condition itself appear more as methodological principles than constitutive traits of causation. Moreover, from an epistemological point of view, the opinion that causal reasoning and causal ascertainment require a great deal of knowledge, seems rather uncontroversial; however, from an ontological point of view, there seems to be space for a strong contrast: on the one hand, even most “founding fathers” of causal modeling declare themselves anti-reductionist (Pearl), or metaphysically “neutral” (Spirtes, Glymour and Scheines 1993); on the other hand, some authors (e.g. Papineau 1993, 2001; Spohn 2001; Thalos 2002) use causal modeling to argue in favour of reductionism¹⁰. Our last remarks will be devoted to this contrast of interpretations.

9. Metaphysical Questions

9.1. Are general causes reducible to particular causes?

Any theory addressing the metaphysics of causation should specify *what* is connected by a causal link: events, tropes, states of the world? The problem of the nature of causal *relata* is common to all philosophical theories of causation, and it does not concern only probabilistic theories of causation. In causal modeling, the prevailing view, with notable exceptions, is that causal *relata* are *events*, and that events can be adequately represented by specific values of the variables in V . A specific and relevant question inside this framework is whether causal relations apply to *types of events* (as in «Drinking hemlock causes death») or to *particular events* (as in «Socrates’ drinking hemlock caused Socrates’ death»). Many authors agree on the opportunity of tackling type causation and token causation separately, but this

⁹ Spirtes, Glymour and Scheines (1993, 9).

¹⁰ It should be noted that Spohn (2001) qualify its reductionism as epistemological.

attitude avoids the problem of deciding whether one of these two kinds of causation depends on the other, and consequently to which kind of causation we should assign ontological priority. In defending the independence of the two theories, Eells (1991) proposes some convincing examples of general causal statements which could be assigned a truth-value even in case no particular instance ever occurred (e.g. «Drinking a pint of plutonium causes death»). As we will see, the question of general/particular probability is linked to the chosen interpretation of probability. It is worth noting, however, that the technical machinery of causal modeling can be applied either to singular or to general causation.

9.2. Are causes reducible to probabilities?

Within causal modeling approach, the possibility of reducing causal dependences to patterns of probabilistic (in)dependencies seems to be hampered by the so-called *statistical indistinguishability* of some patterns. Given three variables A , B , C and a probability distribution on the variables such that C screens off A from B , the three following graphs are compatible with the statistical data:

- i) $A \leftarrow C \rightarrow B$;
- ii) $A \rightarrow C \rightarrow B$;
- iii) $B \rightarrow C \rightarrow A$.

Fig. 9.2.1

In other terms, the DAGs *i*-*iii*) are all acceptable as representations of an unique set of probabilistic independence relations; however, the causal structures represented by each graph are quite different. It is therefore clear that in this case the statistical data alone underdetermine the causal picture; in such cases, we say that the graphs are statistically indistinguishable. Obviously, if we knew the temporal ordering of the variables, the underdetermination would vanish: e.g., if we knew that C occurred before A and B , it would be easy to recognize that C is the common cause of A and B and that the right graph is *i*) in figure 9.2.1 (at least if we accepted the assumption that causes precedes their effects). But if we aim to defend the metaphysical program of reducing causes to probabilities, we may not want

to be forced to accept the assumption of temporal precedence of causes; therefore, the fact that in situations as simple as the one picture in figure 9.2.1 we are not able to elicit one causal structure seems to threaten any reductionist program. A possible way out is given by what has been sometimes called “the third arrow strategy” (see for example Papineau 1993). It is based on the assumptions that when the set of probabilistic (in)dependencies let us in doubt between different causal structures, we can search for further variables that ultimately will reveal the “right” direction of the arrows between the variables under enquiry.

Consider, again, figure 9.2.1 and suppose, as Papineau (1993, 240) suggests, that there is some further variable (D) which satisfies the following probabilistic relationships:

- D is not correlated with A ;
- D is correlated with B and C ;
- D ’s correlation with B is screened off by C ;
- D ’s correlation with C is not screened off by anything.

If we assume that correlation is essential for causation, we can identify the correct diagram as the second chain in figure 9.2.1, otherwise) we should see D correlated with A .

As shown by figure 9.2.2 the right causal structure is obtained as a part of a larger structure.

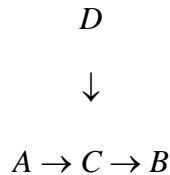


Fig. 9.2.2

In short, when causal judgement is made impossible from statistical indistinguishability, the third arrow strategy invites us to search new variables and new probabilistic independencies in order to give the right direction to our (causal) arrows. Papineau quotes a theorem by Spirtes, Glymour e Scheines stating that, assuming adequate screening off conditions, for any set of probabilistically related variables, there is a wider set such that the

conditions will fix the causal order of the original variables. He adds that «[i]t is of course a contingent matter whether such a *possible* wider set is *actually* available in every case, that is, whether, for any causally ambiguous probabilistic structure [...] there is always a wider structure [...] which disambiguates it» (Papineau 1993, 241); however, if we assume that there are such wider structures, we accept a reduction of causes to probabilities.

9.3. Objective and subjective probabilities

Whether one considers causes reducible to probabilities or merely linked to them, one should ask herself what kind of probabilities are at stake. While technical theories of probabilistic causality such as Suppes (1970) and Spirtes, Glymour & Scheines (1993) are pluralistic, and as such admit different interpretations of probability and causality, other theories try to be more specific and to give a metaphysical characterization of causation. Contemporary philosophy of probability is unanimous in distinguishing (at least) two kinds of probability: *physical* probabilities, seen as parts of external world and as such independent of our minds, and *mental* probabilities, which are defined with respect to epistemic agents. Frequency theories of probability (such as von Mises' and Reichenbach's), as well as propensity theories (such as Popper's) belong to the first kind of theories, while personalist (such as de Finetti's and Ramsey's) and logical interpretations of probability (such as Carnap's and Keynes') belong to the second kind.

An analogous distinction could be traced between interpretations of causation that see causes as related to our minds (such as Hume's and Kant's) and interpretations that see causes as features of the world. Combining the interpretations, we would obtain, as observed by Williamson (2005) four kinds of combinations:

- a) Physical probabilities, physical causes
- b) Physical probabilities, mental causes
- c) Mental probabilities, physical causes
- d) Mental probabilities, mental causes.

Williamson (2009) examines the various possibilities in depth; here we give just few short remarks on two points.

Firstly, if mental is intended as subjective, *c*) must be excluded, because we should impose a physical constraint (Principle of Common Cause, or Causal Markov Condition) on our probabilities, as the Causal Markov Condition, where causality is interpreted physically, implies that the agent's degrees of belief must satisfy certain independence relationships; therefore a physical interpretation of causality would conflict with a strict subjectivist notion of probability.

Secondly, Williamson rejects *a*) on the basis of the counterexamples that can be raised against the Causal Markov Condition, when physically interpreted. There are two possible objections against the assumption of the Principle of Common Cause under a physical interpretation. The first one has been highlighted by the well known remark by Sober (2001) that if we observe, say, that the price of the bread in Britain and the level of the water in Venice have both been steadily rising since records began, we should be forced, by PCC, to induce a common cause of the two phenomena, which is obviously absurd. Against this, Papineau (2001) claims we should not look for causal links between factors that are not spatio-temporally correlated. He is prepared to accept the idea that, if we would be able to reconstruct the huge Bayesian network formed by probabilistic dependencies at the right level (where probabilities are interpreted as frequencies), this would be all that there is in causation. But what is the right level? This question brings us to the second main group of objections raised against the physical interpretation of PCC, i.e. the fact that PCC (and CMC) seem to not work in quantum mechanical systems¹¹.

9.4. Macro-world and micro world, determinism and indeterminism

Despite its ambitious title, this section will be very short, aiming exclusively to point to some work in progress. As already mentioned, some of the outstanding authors in the field of causal modeling, like Spirtes, Glymour and Scheines, and Pearl, are not particularly disturbed by the (possible) failure of Causal Markov Condition in the micro-world; being non-reductionist they believe that even if some assumptions of causal modeling are not ap-

¹¹CCP fails for certain quantum systems involving distant correlations. For example, if we have two particles in the singlet state, and measure the spin of each in, say, the vertical direction, we will find that the probability of spin up equals the probability of spin down equals .5 for both particles. The probability that particle one is spin up while particle two is spin down is not .25 but .5, so the two measurement results are correlated. However, it can be shown that there is no (local) common cause that screens off the two measurement outcomes.(Hitchcock 2010)

plicable in some contexts, this is not a good reason to believe that those assumptions are not applicable in other contexts. Causal modeling does not need to commit to indeterminism: Pearl assumes a Laplacean position, where Spirtes, Glymour and Scheines use the expression «pseudo-indeterminism» to refer to those situations that are deterministic, but such that we don't have sufficient information for knowing all the relevant facts. However, the failure of Causal Markov Condition - and of the Principle of Common Cause - with respect to quantum phenomena could reveal itself a trouble-maker for a position that

- adopts a physical interpretation of both probability and causality,
- states that causes are reducible to probabilities (and, possibly, that there is a wide underlying Bayes Network corresponding to the causal structure of the world)
- places the fundamental level of causality in the micro-world.

However, the real import of the alleged incompatibility of CMC with quantum theory is controversial. On the one Side, Hausman & Woodward (1999) have argued against the legitimacy of considering EPR as a genuine counterexample to CMC; on the other hand, the fate of CMC could be linked to the chosen interpretation of quantum mechanics (see Suárez & San Pedro 2010).

10. Conclusive remarks

From this very sketchy survey we might gain a general perspective on the area of recent research in probabilistic causality: on the epistemological and methodological side the mathematization linked to causal modeling had brought about a paradigm shift, and what once were revolutionary studies, now seem to be configuring as normal research, solving puzzles and applying causal modeling methods to new problems and disciplines. On the other hand, on the metaphysical side we still see many conflicting opinions. In particular, the multiplicity of links between probabilities, causes and the foundations of physics seems to sharply deny the Russellian description of causation as «a relic of a bygone age».

Acknowledgments

I would like to thank the organizers and the students of the XVI *Scuola Estiva di Filosofia della Fisica*, Cesena, September 20th, 2013, where the content of this paper was presented as introductory lecture on the topic. I have kept here the idea of a presentation of the field, trying to summarize the main ideas and the main points of contrast. Rather than a ‘state of the art’ this paper aims at being an introduction to a classical debate and a suggestion at following metaphysical problems that technical solutions cannot answer.

References

- Cartwright, N., 1979, “Causal Laws and Effective Strategies”, *Nous*, 13, pp. 419-37.
- Davis, W. A., 1988, “Probabilistic theories of causation”, in *Probability and Causality. Essays in Honor of Wesley C. Salmon*, J. H. Fetzer (ed.), Dordrecht, Reidel, pp. 133-160.
- Eells, E., 1991, *Probabilistic Causality*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Galavotti, M.C., Suppes, P. and Costantini, D., (eds.), 2004, *Stochastic Causality*, Stanford, CSLI Publications.
- Glynn, L., 2011, “A Probabilistic Analysis of Causation”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 62 (2), pp. 343-392.
- Good, I. J., 1959, “A Theory of Causality”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 9, pp. 307-10.
- Good, I. J., 1961, “A Causal Calculus I”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 11, pp. 305–18.
- Good, I. J., 1962, “A Causal Calculus II”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 12, pp. 43–51. “Errata et corrigenda”, vol.13, 88.
- Hausman, D. M. and Woodward, J., 1999, “Independence, Invariance and the Causal Markov Condition”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 50, pp. 521–83.

- Hesslow, G., 1976, "Two Notes on the Probabilistic Approach to Causality", *Philosophy of Science*, 43, (2), pp. 290-292.
- Hitchcock, C., 2010, "Probabilistic Causation" in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (2010 Edition), Edward N. Zalta (ed.), <http://plato.stanford.edu/entries/causation-probabilistic/>
- Hume, D., 1748, *An Enquiry Concerning Human Understanding*.
- Munafò, M. R. and Araia, R., 2010, "Editorial: Cigarette smoking and Depression: a Question of Causation", *The British Journal of Psychiatry*, 196, pp. 425-426.
- Papineau, D., 1993, "Can We Reduce Causal Directions to Probabilities?", in D. Hull, M. Forbes, and K. Okruhlik (eds.). *PSA 1992*, East Lansing, Philosophy of Science Association, pp. 238 - 252.
- Papineau, D., 2001, "Metaphysics over Methodology – or, Why Infidelity Provides No Grounds to Divorce Causes from Probabilities", in M.C. Galavotti, P. Suppes, and D. Costantini (eds.), *Stochastic Causality*, Stanford, CSLI Publications, 2004, pp. 15-38.
- Pearl, J., 1988, *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*, San Mateo, Kaufmann.
- Pearl, J., 2000, *Causality: models, reasoning, and inference*, Cambridge, Cambridge University Press, Second Edition 2010.
- Pearl, J., 2013, "Understanding Simpson's Paradox", *Technical Report R-414*, December 2013, ftp://ftp.cs.ucla.edu/pub/stat_ser/r414.pdf , edited version forthcoming in *The American Statistician*, 2014.
- Reichenbach, H., 1933, "Die Kausalbehauptung und die Möglichkeit ihrer empirischen Nachprüfung", *Erkenntnis* 3, pp. 32-64.
- Reichenbach, H., 1956, *The Direction of Time*, Berkeley, University of California Press.
- Reid, T., 1785/2002, *Essays on the Intellectual Powers of Man*, ed. by D. Brookers, University Park, Pennsylvania State University Press.

- Scheines, R., 2005, “Causation”, in *New Dictionary of the History of Ideas*, ed. by M.C. Horowitz, New York, Charles Scribner and Sons, Vol. 1, pp. 280-289.
- Shannon, C.E., 1948, “A Mathematical Theory of Communication”, *Bell System Technical Journal*, 27, pp. 379-423, 623-656.
- Skyrms, B., 1980, *Causal Necessity*, New Haven-London, Yale University Press.
- Sober, E., 2001, “Venetian Sea Levels, British Bread Prices, and the Principle of the Common Cause”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 52 (2), pp. 311-346.
- Spirites, P., Glymour, C., and Scheines, R., 1993, *Causation, Prediction and Search*, New York, Springer, Second edition 2000.
- Spohn ,W., 2001, “Bayesian Nets Are All There Is to Causal Dependence”, in M.C. Galavotti, P. Suppes, D. Costantini (eds.), *Stochastic Causality*, Stanford, CSLI Publications, 2004, pp. 157-172.
- Suárez, M. and San Pedro, I., 2010, “Causal Markov, Robustness and the Quantum Correlations”, in M. Suárez (Ed.), *Causes, Probabilities and Propensities in Physics*, New york, Springer, pp.173-93
- Suppes, P., 1970, “A Probabilistic Theory of Causality”, *Acta Philosophica Fennica*, 24, pp. 1-130.
- Thalos, M., 2002, “The Reduction of Causal Processes”, *Synthese*, 131 (1), pp. 99-128.
- Williamson, J., 2009, “Probabilistic Theories”, in *The Oxford Handbook of Causation*, ed. by H. Beebe, C. Hitchcock and P. Menzies, Oxford, Oxford University Press, pp. 185-212.

Can a multi-approach investigation of the climate system lead to more robust results in attribution studies?

Antonello Pasini

CNR, Institute of Atmospheric Pollution Research, Rome, Italy
pasini@iia.cnr.it

Fulvio Mazzocchi

CNR, Institute for Complex Systems, Rome, Italy
fulvio.mazzocchi@isc.cnr.it

1. Introduction

Global Climate Models (GCMs) are the standard dynamical tools for catching the complexity of climate system and simulating its behaviour (see, for instance, Randall *et al.* 2007 and Pasini 2005). In particular, in the framework of this virtual laboratory we are able to perform attribution experiments (for instance, by “switching off” some forcings) in order to understand which factors have mainly influenced the behaviour of some variable of climatic importance, such as the global temperature. In fact, “attribution” is defined as the process of evaluating the relative contributions of multiple causal factors to a change or event with an assignment of statistical confidence. The results of these attribution experiments in GCMs clearly indicate that anthropogenic forcing (that is the influence of human actions on the climate system, primarily the emission of greenhouse gases) is the main responsible for the recent global warming (Hegerl *et al.* 2007).

Even if the main road for obtaining reliable attribution results is obviously represented by the application of GCMs to this problem, in the recent

Antonello Pasini & Fulvio Mazzocchi, “Can a Multi-Approach Investigation of the Climate System Lead to More Robust Results in Attribution Studies?”

in Stefano Bordoni & Sara Matera, *Forecasting the Future. Scientific, Philosophical, and Historical Perspectives*, pp. 57-78

© 2014 Isonomia, Rivista online di Filosofia – Epistemologica – ISSN 2037-4348

University of Urbino Carlo Bo

<http://isonomia.uniurb.it/epistemologica>

scientific praxis about the investigations of the causes of climate change other methods of analysis have been explored. The reason for this is three-fold.

- i) The dynamical structure of GCMs is very complex and, in principle, their specific simulation results could crucially depend on the delicate balance of fluxes between subsystems, the relative strength of feedbacks and the different parameterization routines. Multiple runs of different GCMs under the same external forcings (the so-called “ensemble runs”) greatly contribute to soften these problems and a big technical work is in progress on these aspects inside the modelling community. Nevertheless, the perception of other parts of the scientific community and, especially, of the society often emphasizes uncertainties which (they believe) could undermine the reliability of the GCMs’ results.
- ii) As well known, climate is a complex system and the study of other systems like this has shown that we often benefit from a change in approach or viewpoint when analysing them. In particular, there are complementary approaches in a number of other fields: e.g., the reductionist approach of molecular biology vs. systemic approaches in biology (see, for instance, Mazzocchi 2010 and 2012); the application of “traditional structural” models vs. the use of vector autoregressive models in economy (Sims 1980; Triacca 2009).
- iii) Both external forcings and internal variability influence the climate behaviour. At present, probably GCMs have not yet shown a satisfying ability in simulating the behaviour of some patterns – such as *El Niño Southern Oscillation* (ENSO), the *Pacific Decadal Oscillation* (PDO) and the *Atlantic Multi-decadal Oscillation* (AMO) – which dominate the internal variability of global temperature, even if recent results are very promising (Stoner *et al.* 2009).

In this framework, both neural network models and statistical models coming from an econometric framework have been adopted for analysing the relationships between external forcings and global temperature and for clarifying the specific role of internal variability. The analysis of their structures and results shows an interesting way of investigating the properties of the climate as a complex system and could allow us to increase the robustness of scientific results in attribution studies.

Robustness (of a scientific result) is intended here as a property of such a result which corresponds to its stability under different and mutually independent methods of determination. This can be also a measure of its reli-

bility: a result is more reliable if separate and independent forms of determinations reach the same conclusion (Wimsatt, 1981 and 1987).

The way in which this paper is structured reflects the different backgrounds of its co-authors (a climate scientist and a philosopher). First, a brief introduction of the notion of causation is given. The paper goes on to illustrate three distinct methods of performing attribution studies in the climate system: the standard method *via* GCMs, neural networks and Granger causality. Finally, a (very preliminary) discussion of the philosophical questions involved is undertaken. This will deal mainly with the idea of pluralism (in scientific modelling and methodology) and robustness analysis.

2. Causation in climate studies

Causation is one of the underlying philosophical topics of the climate change debate, which is called into question in relation to attribution. There is mainstream consensus among scientists on the fact that global climate change has to be put in relation with greenhouse gases emission due to human activities. However, when we come at the issue of reaching a causal judgment a number of questions have to be considered.

First, experiments cannot be performed. What could be undertaken are only experiments on artificial microenvironments, whose outcomes are mostly not applicable to real world situations.

Second, the climate system does not straight away respond to the modifications in emissions of greenhouse gases. Due mainly to the thermal inertia of the oceans, there is an extended time delay (several decades) between the gas emissions in the atmosphere and the full manifestation of their impacts on the planet.

Third, complex causality and the issue of emergence have to be taken into consideration. The former is due to non linearity (no proportionality exists between a cause and its effects), and feedback mechanisms. Phenomena and properties which many regard as emergent are due to the fact that the global climate - biosphere systems is a complex system arising out from the interactions between atmosphere, hydrosphere, cryosphere and biosphere, and that the interactions between these subunits often lead to behaviour that is not manifest if each part is considered as an isolated entity. Another layer of complexity, that is crucial in the policy dispute, is adjoined by the (emergent) properties of coupled socio-natural systems (Higgins et al. 2002).

No direct observation of causation is then possible. We can only infer it.

What do we then specifically intend when causality statements (e.g., «anthropogenic forcings are the most likely causes for the observed climate changes») are made in attribution studies? Before to move further, let us have a general look at the notion of causation.

Traditionally causation has been studied within the field of metaphysics in philosophy. And this might be one of the reasons why, following for instance the arguments of Mach and Russell, for a rather long time beginning with the initial years of the twentieth, scientists have tended to view causation as a not scientifically pertinent notion and to eliminate it from their research papers. Subsequently the importance of causation in scientific explanation has been rediscovered. This would require, in Salmon and Cartwright's view for example, making evident the causal connections really existing in the world.

However, the concept of cause is not univocally intended. As many other concepts originating in the philosophical realm, it is characterized by a considerable stratification of meaning, which originates from the history of their conceptualization. There is no single account but distinct (and related) notions of causation (conceptual pluralism). A pluralist view can be advanced also in terms of an ontological pluralism, i.e. there is more than a single kind of causal relationship in the world (Russo and Williamson 2007).

Causation has been conceptualized in terms of a necessary condition, i.e. in its absence the effect would not occur, and/or sufficient condition, i.e. in its presence the effect would occur apart from the presence or absence of other factors. In Newtonian science, causation was equated with determinism. However, triggered also by new scientific discoveries (e.g. in biomedical sciences), weakened theories of causation have arisen. In a probabilistic account of causation¹, a cause is not sufficient neither necessary to make

¹ According to probabilistic theories of causation, A is a (probabilistic) cause of B if the occurrence of the former increases the probability of the latter occurring. In its classical formulation (Suppes 1970), causation between A and B implies the following conditions to be hold: *i*) A precedes B in time; *ii*) $P(B|A) > P(B)$; *iii*) An event C preceding A such that $P(B|AC) = P(B|C)$ does not exists. The first condition refers to temporality. The second expresses the basic idea that a cause raises the probability of its effects. For example, smoking could be seen as a (probabilistic) cause of lung cancer. In fact, smokers are *more likely* to be affected by lung cancer than non-smokers, although not all smokers develop this disease. The last condition is what should ensure to avoid spurious regularities – such as when a storm occurs soon after that the height of the mercury column in a barometer decreases below a given level – to be counted as causal. See also Benzi (2014) in the present volume.

sure the effect but only changes the probability of its occurring. This has lead also to reinforce the use of correlation as a heuristic tool. Not every correlation can, of course, be accounted of as causation. And yet strong (and statistically significant) association between subsequent events (or series of events) can provide a kind of evidence for supporting the establishment of a causal association.

In climate studies, however, rather than on specifying which kind of philosophical notion of causation is implied the emphasis is on distinguishing whether linear or non linear (circular) patterns have to be considered. This may reflect also a shift in the overall theoretical approach from the one of modern science to that of complexity science.

Modern science tends to focus on simple linear cause-effect relationships ($A \rightarrow B$: A is antecedent to and affects B). Causality investigations in complex systems are instead generally more difficult. In fact, dealing with these systems we definitely forsake the so called “heaven of linearity” and the superposition principle is no more valid, that is the final effect of two or more forcing causes on a complex system is no more the sum of the effects which are caused by each forcing factor separately. In complex systems individual components interact in manifold ways, including highly dynamic regulatory and feedback mechanisms. As a result, minor (local) actions or fluctuations can lead to unexpected and dramatic (global) consequences, whereas similar causes can produce multiple effects and similar effects may be the result of very different causes. One of the leading notions of complexity science is that complex effects can derive from simple causes, i.e. from simple rules that are applied recursively. This entails that such systems, whose evolution is intrinsically unpredictable, cannot be explained by causal linear chains or in terms of unifactorialism. The notion of causation should therefore take into consideration non-linear and feedback processes (in the simpler version non linear or circular causation implies that $A \leftrightarrow B$: A affects B as well as B affects A), and multiple factors and levels of control, too (Mazzocchi 2011).

In the following section, different (methodological) approaches to inspect the climate system are illustrated: *i*) dynamical modelling; *ii*) data-driven modelling *via* neural network; *iii*) Granger causality. The first refers basically to a classical linear notion of causation to investigate complex systems and to the precepts of methodological reductionism. The second, borrowed from artificial intelligence, refers to a complexity understanding

of causation and is more inclined to methodological holism². Finally, Granger causality represents another example of data-driven method, which is used in economics but applied in other fields, too. It provides a criterion to identify possible causal relationships (between time series) which is alternative to correlation being based on predictability. In the realm of data-driven methods, sustainers of this approach recognize its value to cope with non linear behaviour. “Mirage” correlations are in fact rather common in nonlinear systems and this may produce wrong results when fitting models to observational data.

3. Multiple approaches in climate studies

3.1. Dynamical models

In a linear system causality analyses are quite simple, due to the superposition principle: one can force the system by a single cause, then by another one, and so on, finally weighting the single effects in order to understand their relative importance. The final effect in terms of system behaviour will be supplied by the sum of these ones.

In a nonlinear system, instead, the only way to weight the importance of the single causes of change is to apply all the forcing factors to the system and then to “prune” each of them (one at a time), in order to understand which one is the fundamental driver of the system’s behaviour and changes.

Unfortunately, often we are not able to do so in a real experimental activity: the climate system *in toto*, in particular, cannot be investigated in a real laboratory. Nevertheless, once worked out models that simulate climate behaviour in a satisfying manner, we can use them for virtual experiments. In the world of the model we are able to modify the values of forcing factors (one at a time) in order to test their influence on the observed behaviour of climate.

This represents the standard way of acting in the so-called studies of attribution, whose scope is to understand which forcings caused the recent global warming. And their results are very clear.

² Whereas methodological reductionism presumes that to understand complex systems an investigation at the level of the structure and behaviour of their component parts is necessary (and sufficient), methodological holism theorizes that such an understanding should be sought at the level of principles governing the behaviour of the whole system (Healey 2008).

Once started with an ensemble of models³ which are able to correctly simulate the recent behaviour of climate if all the real data of forcings are included in them, we can simulate other situations.

In particular, if we fix the anthropogenic forcing factors (amount of greenhouse gases and sulfates) to preindustrial levels, the recent global warming disappears in the world of the model and the global temperature shows quasi-constant values throughout the last century (see figure 3.1.1). Otherwise, if we do not allow changes in the natural forcing factors (solar radiation and volcanic emissions) in the last century with respect to previous values, the increase of temperature of the last 50 years remains evident in the reconstruction of the models.

Thus, the pruning activity on the forcings in this system clearly shows that anthropogenic causes are the main factors which drove the recent temperature changes.

Even if an ensemble of GCMs has been applied to attribution studies and all of them led to the same conclusion, they are joined by the same dynamical approach, in which several subsystems interact each other through a network of processes and feedbacks. We will return later on this point.

Obviously, we cannot hide the difficulty of this approach in describing and simulating a complex system such as climate. In particular, the representation of the climate system must be necessarily approximated and reflects the common present knowledge of the processes considered important. Thus, the final modelling results about the attribution of climate behaviour could be influenced by some uncertainties in our representation of the dynamics and fundamental processes or by the exclusion of some feedback which could be recognised as important in future.

In this framework, recently at least two other approaches have been applied to the attribution problem. They are joined by a common characteristic feature: we do not describe explicitly the dynamics of the climate system, but just consider the relations between (possible) causal factors and climate behaviour by an input-output analysis, in a more systemic and holistic manner. Climate dynamics is not explicitly described in these models. On the

³ In an ensemble, climate models are evaluated not only individually in relation to their predictive successes but they are also intercompared. Such models have vast areas in common (being based on established scientific theories and all involving simulation), and nonetheless they show also significant differences, being endowed with distinct representations of the many processes and feedbacks involved (e.g., different parametrizations for sub-grid processes, different details in numerical solution methods, different spatiotemporal resolution, etc).

one hand, this could be a weakness of such approaches, and yet on the other hand their results are not affected by our limited knowledge of it.

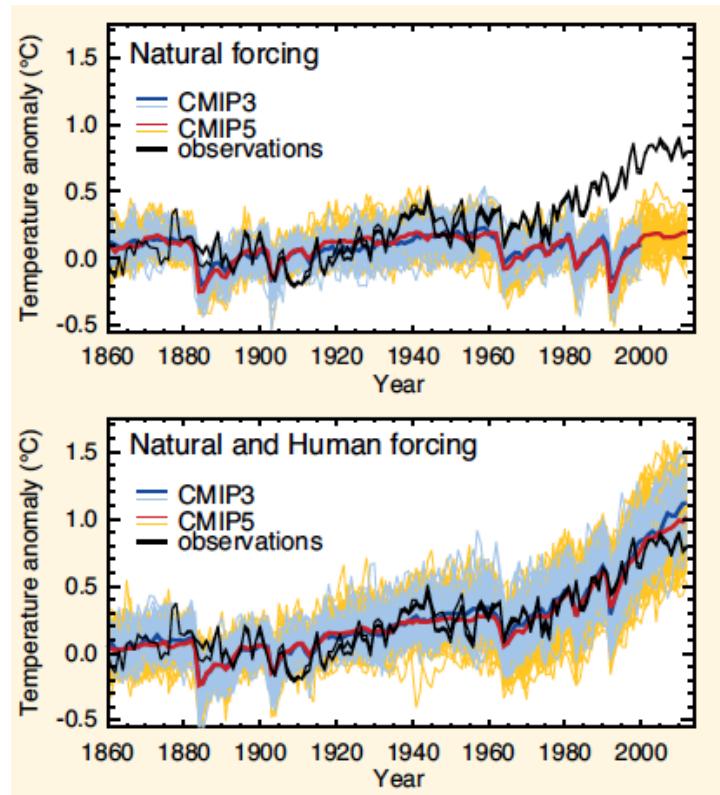


Fig. 3.1.1 Numerical experiments of attribution with two ensembles of GCMs (*CMIP3* and *CMIP5*) when the anthropogenic forcings are taken fixed at preindustrial levels (top) and when the real values of all the forcings are included in the models (bottom). The black line represents the observed global temperature, the coloured thin lines are the results of the single models and the coloured thick lines show the ensemble means (© AR5 IPCC).

In short, by means of these distinct analyses we are able to gain information from a different methodological perspective and this can be compared with the results obtained by GCMs in attribution studies.

3.2. Neural networks

In non-dynamical studies of attribution one generally chooses to not describe accurately the functioning of climate, but he tries to obtain rela-

tionships which link external forcing factors (causes) with the resulting final behaviour of climate (effect), for instance as far as the effect on global temperature is concerned.

In this framework, the simplest idea can be to apply a multivariate linear model to the analysis of the causality links between forcings and temperature. Obviously, one could investigate either instantaneous or delayed causality relationships. But, in any case, quite poor relationships (in terms of explained variance of temperatures) can be obtained, due to the intrinsic nonlinearity of the real relationships linking these variables.

Thus, one has to search for models which are able to obtain “realistic” nonlinear links between these variables. The natural candidates used for this scope have been the neural network (NN) models. In an attribution framework, we could say that the climate system is no more viewed as a white box (described by the internal/external dynamical relationships in a GCM), but it is a black box, simply described by a neural network which links the causal factors to a final effect (see figure 3.2.1).

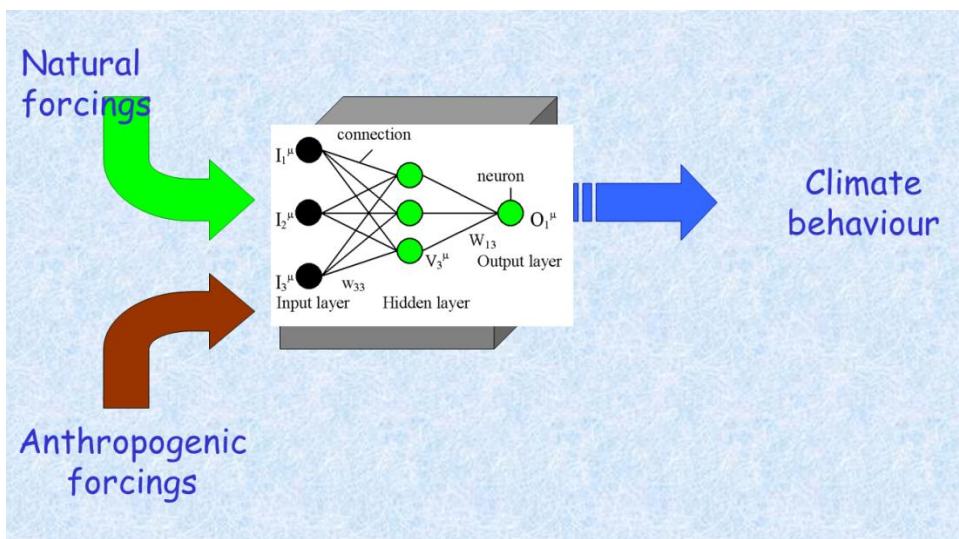


Fig. 3.2.1 Neural-network attribution: a neural network links causal factors to a final effect.

In this paper we do not deal with structure and behaviour of the networks recently applied to an attribution activity. In general, some standard feed-forward networks with error backpropagation training have been used.⁴

⁴ see Hertz *et al.* (1991) and Bishop (1995) for a comprehensive introduction to this research field and to this kind of networks in particular.

In general, scientists use NNs as one of the best way to perform a nonlinear multiple regression in order to find a valid nonlinear relationship between effects and possible causes in a complex system. Climate scientists did this for attributing the recent global warming to some causes: see examples in Pasini *et al.* (2006), Verdes (2007), Schönwiese *et al.* (2010) and references therein. Recently, Pasini & Langone (2010, 2012) and Pasini & Modugno (2013) applied NN models also to the attributions of temperature and precipitation at a regional scale.

Even without entering any technical detail, however we have to stress that NNs are so powerful that, contrary to the case of linear regression models, they are able to obtain a (nonlinear) function that reconstructs in detail the values of targets (in our case, temperatures) starting from data about inputs (external causes) if every input-target pair is known to them, and a large number of neurons in the hidden layer are allowed. But in this case, NNs overfit data and no realistic regression law can be obtained. Thus, one has to exclude some input-target pairs from the training set on which the regression law is built and must consider a small number of hidden neurons. Therefore, only if the map derived from the training set is able to describe the relation between inputs and target on independent sets can we say that a realistic regression law has been obtained.

By correctly applying this procedure, attribution studies can be performed. Their results clearly show that a model fed by natural forcings as inputs is not able to correctly catch the steep increase of global temperature in the last half century. Conversely, the consideration of anthropogenic forcings as inputs leads to a satisfying reconstruction of this recent warming. Finally, NNs allow us to insert in the model also the influence of natural variability. In this framework, it has been shown that the further introduction of data about indices of circulation leads to better reconstruct interannual and decadal variability of the temperature time series.

In a recent work, still not published as peer-reviewed paper, a NN architecture has been trained by data about natural/anthropogenic forcings and circulation patterns (AMO, PDO, ENSO) in a series of ensemble runs. After having fixed the weights of the networks, that is the specific models able to reconstruct correctly the temperature time series, the models themselves have been fed by real values of natural forcings and circulation patterns, and by values of human influences which have been taken fixed at preindustrial levels, as in dynamical attribution studies. In this way, a very impressive figure has been obtained, as preliminarily presented in Fiorani & Pasini (2010): see figure 3.2.2.

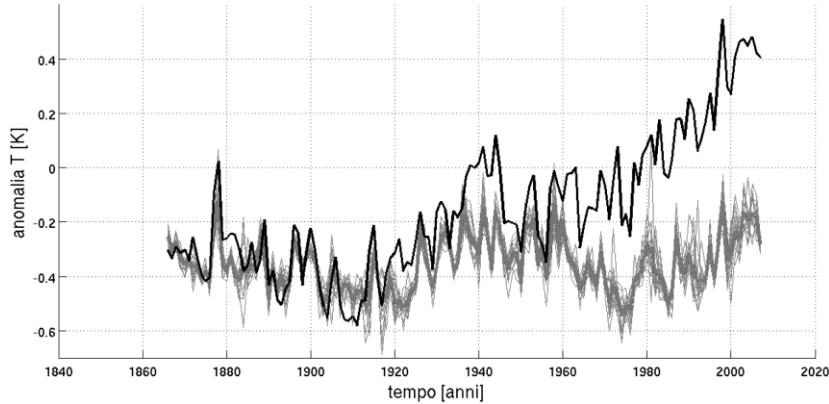


Fig. 3.2.2 Example of results of an attribution study by a neural network model fed by natural forcings and variability. The black line represents the observed global temperature, the grey thin lines are the results of the single NN runs and the grey thick line shows the ensemble mean. The recent global warming has not been correctly reconstructed, as in studies of dynamical attribution (see fig. 3.1.1). Here, the modulating role of climate variability in temperature time series is also understandable (© Città Nuova editrice).

As a final remark about these studies of attribution *via* NNs, we must stress that, in general, what has been investigated is an instantaneous causality and a delayed influence of forcings on temperature (characterized by some lags) has not been yet considered, even if the structure of the NN models allows to do so.

3.3. Granger causality

As just discussed, in NN models one does not consider the dynamics of the climate system, but they are pure data-driven models by which we regress, in a nonlinear way, time series of causes and a time series that represents a final effect.

As a matter of fact, in other fields of scientific investigation data-driven models have been used for obtaining pieces of information that dynamical models were not able to furnish. In econometric studies, in particular, vector autoregressive (VAR) models usually supply us with better forecasts than those obtained by traditional structural models.

In this framework, even causal relationships can be studied by VARs and a concept of causality, arising from the results of these models, has been identified and studied by Clive Granger (1969): at present, it is known as

“Granger causality”. Recently, this concept has been used also in climate studies and, in particular, in attribution investigations (Attanasio *et al.*, (2013)).

The concept of Granger causality is quite simple. Suppose that we have two variables, x and y . First, we attempt to forecast y_{t+1} using past terms of y . We then try to forecast y_{t+1} using past terms of x and y . We say that x Granger-causes y , if the second forecast is found to be more successful, according to standard cost functions, such as the Mean Square Error (MSE). If the second prediction is better, then the past of x contains a useful information for forecasting y_{t+1} that is not in the past of y . Clearly, Granger causality is not an instantaneous causality, but it is based on precedence and predictability.

In literature, the causal relationship between the variables x and y has often been investigated in a bivariate system. However, it is well known that in a bivariate framework problems of spurious causality and of noncausality due to omission of a relevant variable can arise. These problems can be tackled if an auxiliary variable z is considered in the analysis, specifying a trivariate system.

If we consider now a climate framework, it is quite immediate to consider a time series of global temperatures as y and a time series of an external forcing as x . If we find that a VAR built on delayed values of temperature and an external forcing significantly improves the forecasts of temperature given by an autoregressive (AR) model built just on delayed values of temperature, we can say that this external forcing Granger-causes global temperature.

Obviously, the results are more robust if also the natural variability of climate is considered by means of some circulation patterns. Thus, it is possible to consider a trivariate system in which the auxiliary variable z is a relevant index of climatic oscillations, such as ENSO, AMO and PDO. In this way, one is able to test the significance of the causality relations found in the previous bivariate framework and discover eventual spurious causalities.

Several attempts at attributing the recent global warming *via* this Granger causality method have been performed in the last 10 years: see Attanasio *et al.* (2013) for a review. However, many of them were performed with in-sample analyses and led to contrasting results. The weakness of this approach is that incorrect conclusions drawn by the necessary statistical preliminary analysis may affect the results of causality tests and their reliability.

Only recently a more genuine predictive out-of-sample Granger approach has been adopted. This approach permits to overcome the problems

which arise in in-sample analyses and supplies us with clear results about temperature attribution: see Attanasio *et al.* (2012) and Pasini *et al.* (2012).

Going into technical details is obviously outside the scope of this paper: please, refer to the references previously indicated. A brief summary of the results is instead necessary in order to understand the potentiality of this technique in attribution studies.

In short, the bivariate out-of-sample analysis shows that natural forcings, namely total solar irradiance (TSI), cosmic ray intensity and stratospheric aerosol optical thickness related to volcanic eruptions, do not Granger-cause global temperature, at least since the '40s of the last century. *Vice versa*, there is a clear general evidence that anthropogenic forcings (here considered as the total radiative forcing of the main greenhouse gases – GHG-RF) Granger-cause temperature in the last 70 years.

If now circulation indices are inserted as auxiliary variables in the information system considered in a trivariate approach, there is a clear evidence that a causal link (in the Granger sense) remains between the total radiative forcing of the main greenhouse gases and global temperature since 1941 up to the present day.

On the other hand, if TSI is considered as the causal variable, a Granger causal link is significant only in the first test set when AMO is included in the information set, and in the first two sets when PDO or ENSO is considered. In more recent periods this causal link disappears.

The situation becomes even clearer if the p-values of tests are plotted for every test period, as in figure 3.3.1. Here, it is evident that, while the influence of GHG-RF on global temperature remains important throughout all the periods, the Granger causal link between TSI and T becomes progressively less marked with time and completely disappears for the last two periods. In particular, the influences of GHG-RF and TSI on T appear comparable till the 50s, but, after that decade, a clear causal decoupling between TSI and T is evident and very marked in the data of this Granger analysis. At the same time, the Granger causality from GHG-RF to T remains robust and, possibly, becomes even more evident: the p-values, which are already very small, decrease further.

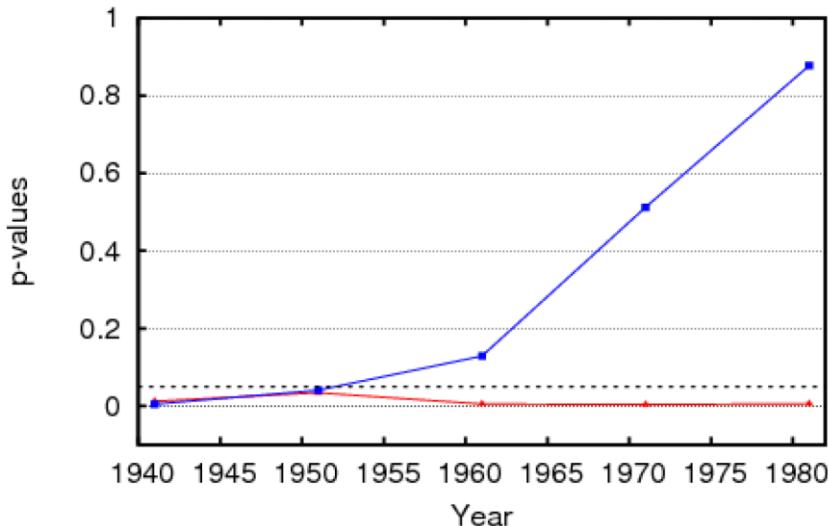


Fig. 3.3.1 Plot of the p-values from a statistical test of significance when $x = \text{TSI}$ (blue line) and $x = \text{GHG-RF}$ (red line) for $z = \text{ENSO}$. The significance threshold of 0.05 is shown (dashed line). The increase in p-values over the recent decades is evident for the performance of the model with TSI.

In short, Granger analyses show that the radiative forcing of the greenhouse gases is the main causal factor which drives the recent temperature behavior, a results resembling the analogous ones presented in the previous sections and obtained by other methods of analysis. Furthermore, here the insertion of information about indices of variability patterns leads to confirm the role of GHG-RF and to exclude that the non-causality previously found for the solar influence in the bivariate analysis was due to omitted variables. In doing so one also discovers a peculiar causal decoupling between Sun and global temperatures which has been pictured previously just in terms of simple correlations and graphical methods.⁵

Of course, a limitation of these Granger analyses can derive from the fact that this technique is linear and we are investigating a well-known nonlinear system. Thus, it can be very interesting to develop a nonlinear extension of a Granger causality model. This has been done in Attanasio and Triacca (2011) with a model based on neural networks, which was then applied to the classical problem of CO₂ influences on global temperature. Their preliminary results are consistent with our knowledge coming from other attribution methods.

⁵ See Lockwood & Fröhlich (2007), Stauning (2011).

4. Discussion

In this paper we have briefly introduced three distinct approaches for performing attribution studies in the climate system. For a few decades the scientific community adopted solely the standard method *via* GCMs. Then, some scientists began to investigate other (data-driven) methods, borrowed by other disciplines (artificial intelligence for NNs, econometrics for Granger causality) and which focus on different aspects of causation. This creates the possibility of intercomparing the results coming from very different approaches.

In the standard attribution studies an ensemble of different models is used to test the validity of the conclusions about causes of recent climate change. Each model shows reliable instances of fit (i.e., predictive successes) and, for some authors (e.g., Lloyd 2009), it is the degree of this variety of fit to increase confirmation of the causal link which all models share: «The variation in the models provides the background against which the robust cause is evaluated; repeated instances of fit even against different assumptions, such as different aerosol forcings, count in favour of the greenhouse gas causation itself, as well as its representation in the models» (Lloyd 2009: 222). By applying to climate studies Weisberg's (2006) approach to *robustness analysis*, Lloyd concludes that, despite the fact that models cover a variety of assumptions and conditions, they still have a “common structure”, i.e. the relation between increases in greenhouse gases and temperature rise. In her opinion, this would legitimate to infer that «greenhouse gas concentration increase causes global warming in the real world» (Lloyd 2009: 221)⁶.

This pluralism in climate modelling has been described by Parker (2006) as implying an “ontic competitive pluralism”, i.e. the models make different (and mutually) conflicting assumptions about the physical processes operating in the climate system, and a “pragmatic integrative pluralism”, i.e. scientists use multiple models together acknowledging their cur-

⁶ This might be a persuasive conclusion, and nonetheless, others (philosophers) have expressed reservations about it. Parker (2009: 234), for example, commented that what such instances of fit might be able to confirm are not climate models themselves, as in Lloyd's view, but rather «hypotheses about the adequacy of climate models for particular purposes». For Justus (2012: 801-802), the multi-models ensemble approach makes more sense when it is seen as implying a *sensitivity analysis*, which is a kind of robustness analysis whose purpose is «to evaluate the sensitivity of predictions and properties to specific parameter values, different parameters, and model structures that span the extent of our uncertainty about the target system being represented. If a model prediction or property is largely unaffected by these factors, it is often labeled robust».

rent epistemic situation characterized by uncertainty (in how to represent this system and consequently also in the prediction of future climatic conditions). Despite all of them are regarded as providing a *plausible* representation of the climate (being based on past predictive successes and the belief that model assumptions plausibly correspond to the real-world), there is no model that has demonstrated a marked superiority over the others.

These different GCM models are therefore used together as “complementary” tools for probing how climate may change in the future. However, it should be noted that they are all joined by the same dynamical approach, and as such they share its pros and cons.

For example, such an approach is affected, at least partially, by the limits of a reductionist methodological orientation which is inclined to dissect a problem into elements and then focus on these taken in isolation – in a GCMs we divide in fact the climate system into parts, which are individually modelled and then “combined” together again. However, focusing mainly the analysis to its subcomponents could be not sufficient to fully understand the complex (and non linear) processes and relationships which are involved in the climate system.

Not only these models share a common reductionist bias. Most of them have also not been developed independently but from a common ancestry (Parker 2006). If the “degree of heterogeneity” of the GCM models involved matters, as in the case of Lloyd’s (2009) application of robustness analysis to climate studies⁷, this can be an issue.

What is conceptually implied in the robustness argument is that *i*) a kind of reliable insight could emerge at the intersection of different individual partial models or descriptions (Levin 1966); *ii*) the reliability of a result is increased if separate and *mutually independent* “methods of determination” arrive to the same conclusion (Wimsatt 1981 and 1987). The latter points to the kind of epistemic support which can be achieved by means of triangulation. Different methods are used to cross-check results, believing that when multiple viewpoints arrive to the same conclusion, it is unlikely that this is an artefact of a particular perspective⁸. The epistemic value of robustness analysis depends hence on the fact that different derivations of

⁷ «If a sufficiently heterogeneous set of models for a phenomenon all have the common structure, then it is very likely that the real-world phenomenon has a corresponding causal structure. This would allow us to infer that when we observe the robust property in a real system, then it is likely that the core structure is present and that it is giving rise to the property» (Weisberg 2006, 739).

⁸ Opponents to such a thesis (e.g., Woodward 2006) argue that this kind of robustness would not furnish any further epistemic credence to the conclusion.

the same conclusion are somehow independent – this would lessen the probability of error due to mistakes and biases in those different modes of arriving at the conclusion (Kuorikoski *et al.* 2010). Nevertheless, while on the one hand the requirement of independence (whether this occurs in terms of a logical, theoretical or statistical independence) between models or other means of determination is crucial, on the other hand the epistemic difficulties of achieving it are in practice not easily surmountable.

In this framework, the possibility to investigate the climate system by very different methodological approaches and viewpoints (i.e., dynamical modelling, NNs and Granger causality), as proposed in this paper, can be very significant.

Each approach, if taken separately, has its own limits. For example, neural networks, which reflect the approach of first-order cybernetics, have their weak spot in the fact that, by overlooking internal dynamics and properties, they may fail to estimate how these (for example Earth's capacity, and limits of, resilience) can contribute, above all in the long term, to the evolution of the state of the environment. Granger causality, instead, being a statistical concept of causality, may be able to give limited insights into "actual" causal links. For many, statistics alone is in fact not sufficient to establish causal claims. What would be needed is a theoretical knowledge of the "mechanism" which is responsible for the regularities found in the set of data (Cartwright 2011). It is when such knowledge is available that a causal relation can be generalized⁹.

However, if these methods are taken together they might form another sort of "ensemble" and be subject to robustness analysis. Rather than a heterogeneity which is internal to the same kind of model however elaborated under different conditions and assumptions, it is involved here a kind of diversification which derives from the involvement of very different (and probably more "mutually independent") methodological approaches.

It is true that while models making different assumptions can be an expression of the same approach, different methodological approaches could also incorporate very similar presumptions. It seems, however, more likely that by intercomparing the results coming from these approaches and eval-

⁹ It should be said, however, that in order to be fruitfully applied to complex (e.g., biological or environmental) systems the notion of "mechanism" should be able to cope with situation in which systems' dynamics result from the interaction of their component parts, while being largely apart from many properties of the parts. This is precisely the kind of situation which is encountered in studying the climate system. Nevertheless, such a notion is still a matter of investigation (cfr. Kuhlmann 2011).

ating their consistency more robust results in attribution studies can be obtained.

The robustness of a result can increase confidence in its reliability. On the contrary, neither it can *prove* its truthfulness nor robustness analysis provides a kind of empirical confirmation. However, it is precisely when there is no direct mean to empirically (experimentally) ascertain the soundness of a given hypothesis that robustness becomes epistemically relevant (Kuorikoski *et al.* 2010, 552). And this is of course the case of climate studies, in which, despite the crucial role of anthropogenic influences on the recent behaviour of global temperature has been repeatedly substantiated, such a circumstance is still subject to denial (by a minority of sceptics). In policy matters, appealing to the robustness of attribution results can then be a (epistemically sound) way to contrast such a denial.

The use of different methodological approaches is important also for another reason, as it could improve our ability to analyse distinct aspects of the climate reality. The argument of pluralism (at different levels) touches here the question of how to investigate complexity. Not only the behaviours of complex systems entail a dimension of uncertainty (due to their intrinsic unpredictability) that cannot be reduced, but also any model or methodological treatment which is made of them cannot avoid to reduce their complexity, leaving out some aspects of these systems.¹⁰

The scientific arena is now characterised by many examples of multiple coupled approaches (e.g. dynamical modelling vs. data-driven modelling in climate studies and molecular reductionist vs. systemic approach in biology). Rather than opposite and incompatible, these are often seen as inter-dependent and complementary, as far as they could improve our ability to study multiple and different aspects of a complex phenomenon or system (e.g., by allowing to study natural phenomena proceeding both bottom-up, starting from the micro-level, and top-down, starting from the macro-level).

Methodological pluralism, i.e. the thesis which admits as legitimate the use of multiple theoretical models and methodological approaches in the scientific practice, often entails a methodological complementarism and can represent a highly valuable mean to explore the domain of complexity.

¹⁰ In biology, for example, Rosen (1985) defined complexity as the property of a system for which any formalism is unable to adequately capture and represent the whole set of properties of the same system. Multiple formal systems can, in fact, be necessary to better represent it in reason of the fact that they describe distinct aspects, and that these formal systems are not derivable from each other.

References

- Attanasio, A. and Triacca, U., 2011, “Detecting human influence on climate using neural networks based Granger causality”, *Theoretical and Applied Climatology*, CIII, pp. 103-107.
- Attanasio, A., Pasini, A., and Triacca, U., 2012, “A contribution to attribution of recent global warming by out-of-sample Granger causality analysis”, *Atmospheric Science Letters*, XIII, pp. 67-72.
- Attanasio, A., Pasini, A. and Triacca, U., 2013, “Granger causality analyses for climatic attribution”, *Atmospheric and Climate Sciences*, III, pp. 515-522.
- Benzi, M., 2014, “Probabilistic Causation”, in Stefano Bordoni & Sara Matera, *Forecasting the Future: Epistemology and Empirical Sciences*, Isonomia – Epistemologica, pp. 29-54.
- Bishop, C.M., 1995, *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford, Oxford University Press.
- Cartwright, N., 2011, “Predicting ‘it will work for us’: (Way) beyond statistics”, in McKay Illari, P., Russo F. and Williamson, J. (eds.), *Causality in the sciences*, Oxford, Oxford University Press.
- Fiorani, L. and Pasini, A., 2010, *Il pianeta che scotta. Capire il dibattito sui cambiamenti climatici*, Roma, Città Nuova editrice (in Italian).
- Granger, C.W.J., 1969, “Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-Spectral Methods”, *Econometrica*, XXXVII, pp. 424-438.
- Healey, R., 2008, “Holism and Nonseparability in Physics”, *Stanford Electronic Encyclopedia of Philosophy* (ed. E. N. Zalta), <http://plato.stanford.edu/archives/spr2009/entries/physics-holism/#OHQM>
- Hegerl, G.C. et al., 2007, “Understanding and attributing climate change”, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* (eds. S. Solomon et al.), Cambridge, UK, and New York, NY, Cambridge University Press, USA, pp. 663-745.

- Hertz, J., Krogh, A. and Palmer, R.G., 1991, *Introduction to the Theory of Neural Computation*, New York, Addison-Wesley.
- Higgins, P. A. T., Mastrandrea, M. D. and Schneider, S. H., 2002, “Dynamics of climate and ecosystem coupling abrupt changes and multiple equilibria”, *Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London B Biological Sciences*, CCCLVII, pp. 647-655.
- Justus, J., 2012, “The Elusive Basis of Inferential Robustness”, *Philosophy of Science*, LXXIX, pp. 795-807.
- Kuhlmann, M., 2011, “Mechanisms in Dynamically Complex Systems”, in McKay Illari, P., Russo F. and Williamson, J. (eds.), *Causality in the sciences*, Oxford, Oxford University Press.
- Kuorikoski, J., Lehtinen, A. and Marchionni, C., 2010, “Economic modelling as robustness analysis”, *British Journal for the Philosophy of Science*, LXI, pp. 541-567.
- Levins, R., 1966, “The Strategy of Model Building in Population Biology”, *American Scientist*, LIV, pp. 421-431.
- Lloyd, E., 2009, “Varieties of Support and Confirmation of Climate Models”, *Aristotelian Society Supplementary Volume*, LXXXIII, pp. 213-232.
- Lockwood, M. and Fröhlich, C., 2007, “Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature”, *Proceedings of the Royal Society A*, CDLXIII, pp. 2447-2460.
- Mazzocchi, F., 2010, “Complementarity in Biology. A reassessment in relation to molecular-reductionist and systemic approaches”, *EMBO Reports*, XI, pp. 339-344.
- Mazzocchi, F., 2011, “The limits of reductionism in biology: what possible alternatives?”, in E-Logos, XI,
<http://nb.vse.cz/kfil/elogo/science/mazzocchi11.pdf>
- Mazzocchi, F., 2012, “Complexity and the reductionism-holism debate in systems biology”, *Wiley Interdisciplinary Reviews. Systems Biology and Medicine*, IV, pp. 413-427.

- Parker, W. S., 2006, "Understanding pluralism in climate modeling", *Foundations of Science*, XI, pp. 349-368.
- Parker, W. S., 2009, "Confirmation and adequacy-for-purpose in climate modelling", *Aristotelian Society Supplementary Volume*, LXXXIII, pp. 233-249.
- Parker, W.S., 2010, "Predicting weather and climate: Uncertainty, ensembles and probability", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, XLI, pp. 263-272.
- Pasini, A., 2005, *From Observations to Simulations: A Conceptual Introduction to Weather and Climate Modelling*, Singapore, World Scientific Publishers.
- Pasini, A. and Langone, R., 2010, "Attribution of precipitation changes on a regional scale by neural network modeling: a case study", *Water*, II, pp. 321-332.
- Pasini, A. and Langone, R., 2012, "Influence of circulation patterns on temperature behavior at the regional scale: a case study investigated via neural network modeling", *Journal of Climate*, XXV, pp. 2123-2128.
- Pasini, A., Lorè, M. and Ameli, F., 2006, "Neural network modelling for the analysis of forcings/temperatures relationships at different scales in the climate system", *Ecological Modelling*, CXCI, pp. 58-67.
- Pasini, A. and Modugno, G., 2013, "Climatic attribution at the regional scale: a case study on the role of circulation patterns and external forcings", *Atmospheric Science Letters*, XIV, pp. 301-305.
- Pasini, A., Triacca, U. and Attanasio, A., 2012, "Evidence of recent causal decoupling between solar radiation and global temperature", *Environmental Research Letters*, VII, 034020.
- Randall, D.A. *et al.*, 2007, "Climate models and their evaluation", in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* (eds. S. Solomon *et al.*), Cambridge, UK, and New York, NY, Cambridge University Press, pp. 589-662.
- Rosen, R., 1985, *Anticipatory systems*, New York, Pergamon Press.

- Russo, F. and Williamson, J., 2007, "Interpreting Causality in the Health Sciences", *International Studies in the Philosophy of Science*, XXI, pp. 157-170.
- Schönwiese, C.D., Walter, A. and Brinckmann, S., 2010, "Statistical assessments of anthropogenic and natural global climate forcing. An update", *Meteorologische Zeitschrift*, XIX, pp. 3-10.
- Sims, C.A., 1980, "Macroeconomics and reality", *Econometrica*, XLVIII, pp. 1-48.
- Stauning, P., 2011, "Solar activity-climate relations: a different approach," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, LXXIII, pp. 1999-2012.
- Stoner, A.M.K., Hayohe, K. and Wuebbles, D.J., 2009, "Assessing general circulation models simulations of atmospheric teleconnections patterns", *Journal of Climate*, XXII, pp. 4348-4372.
- Suppes, P., 1970, *A probabilistic theory of causality*, Amsterdam, North-Holland Publishing Company.
- Triacca, U., 2009, "Dall'econometria strutturale all'econometria delle serie storiche", *Economia & Lavoro*, XLIII, pp. 79-87 (in Italian).
- Verdes, P.F., 2007, "Global warming is driven by anthropogenic emissions: a time series analysis approach", *Physical Review Letters*, IC, 048501.
- Weisberg, M., 2006, "Robustness Analysis", *Philosophy of Science*, LXXIII, pp. 730-742.
- Wimsatt, W.C., 1981, "Robustness, Reliability and Overdetermination", *Scientific Inquiry and the Social Sciences* (eds. M. B. Brewer and B. E. Collins), San Francisco, Jossey-Bass, pp. 124-163.
- Wimsatt, W.C., 1987, "False Models as Means to Truer Theories", *Neutral Models in Biology* (eds. M. H. Nitecki and A. Hoffman), Oxford, Oxford University Press, pp. 33-55.
- Woodward, J., 2006, "Some Varieties of Robustness", *Journal of Economic Methodology*, XIII, pp. 219-40.

I modelli ideali e il problema del metodo scientifico

Fabio Minazzi
Università degli Studi dell’Insubria
fabio.minazzi@uninsubria.it

«L’epistemologia senza contatto con la scienza diventa uno schema vuoto. La scienza senza epistemologia – se pure si può concepirla – è primitiva e informe».

Albert Einstein (1951)

1. Il paradosso di Galileo e il tradizionale modello metodologico della scienza

In una sua recente visita alla *London School of Economics*, Elisabetta II, regina d’Inghilterra, ha posto ai rinomati economisti di questa istituzione universitaria una domanda imbarazzante: come mai nessun economista ha previsto la crisi economica in cui si dibatte attualmente il mondo occidentale? Con questa sua domanda la regina d’Inghilterra non solo ha messo in difficoltà gli economisti della *London School of Economics*, ma ha messo anche in rilievo un’idea alquanto diffusa, in virtù della quale si attribuisce alla scienza la proprietà, primaria, di essere una disciplina *predittiva*. Se una teoria scientifica non è in grado di fare previsioni, quale sarà mai, allora, la sua portata scientifica? In genere costituisce un senso comune diffuso sostenere che *scienza e predittività coincidano*. Con la conseguenza che le teorie – o le discipline – che non sono in grado di offrirci valide predizioni non avrebbero, allora, alcuna portata conoscitiva. Sembra dunque che da questo punto di vista *scienza e predittività* facciano tutt’uno, al punto che una teoria scientifica, per essere tale, non potrebbe non possedere una specifica portata predittiva.

Tuttavia, se si volesse approfondire questo aspetto, concernente la presunta e scontata coincidenza tra scienza e predittività, perlomeno nell’ambi-

Fabio Minazzi, “I modelli ideali e il problema del metodo scientifico”, in Stefano Bordoni & Sara Matera, *Forecasting the Future. Scientific, Philosophical, and Historical Perspectives*, pp. 79-106

© 2014 Isonomia, Rivista online di Filosofia – Epistemologica – ISSN 2037-4348
University of Urbino Carlo Bo
<http://isonomia.uniurb.it/epistemologica>

to della tradizione di pensiero occidentale, non si potrebbe fare a meno di rimanere un poco perplessi. *In primo luogo*, perché proprio questa idea non era affatto scontata nel mondo antico. Nella scienza antica l'importanza della *previsione* fu infatti affermata ed accentuata solo ed unicamente nell'ambito delle ricerche mediche da un autore come Ippocrate (*Prognostikon*, I). D'altra parte se, *in secondo luogo*, ci si volesse spostare in ambito moderno, dal Seicento in poi, il nostro imbarazzo complessivo non diminuirebbe, anzi aumenterebbe, perché ci troveremmo di fronte a indicazioni alquanto diverse, spesso contrastanti e, persino, apertamente opposte e conflittuali. Se inoltre, *in terzo luogo*, si volesse considerare in modo più diretto ed analitico, l'opera del padre riconosciuto della scienza moderna, ovvero il pensiero di uno scienziato come Galileo Galilei, il nostro imbarazzo non potrebbe nuovamente che crescere. Perché? Proprio perché lo scienziato pisano sembra aver dato vita ad un paradosso che, da questo specifico punto di vista prospettico, potremmo addirittura indicare come il “paradosso di Galileo”.

Per meglio intendere la natura di questo singolare e curioso paradosso basterebbe tener presente cosa è successo nel dibattito epistemologico dipanatosi dal tempo di Galileo ad oggi. Se infatti si guarda, complessivamente, alla storia del dibattito epistemologico della modernità, è abbastanza agevole rendersi conto che dall'apparizione del *Discours de la méthode* (1637) di René Descartes fino ad *Against Method* (1970, 1972 e 1975, apparso in tre differenti stesure) di Paul K. Feyerabend, i vari studiosi hanno sostanzialmente discusso tra di loro (spesso litigando), nello sforzo, condiviso - presentato come scontato e pacifico - di poter effettivamente individuare *la vera natura del metodo scientifico*. Tali discussioni, che hanno variamente attraversato e condizionato la storia della cultura moderna, dal Seicento ad oggi, pur avendo anche dato vita a dibattiti assai interessanti e preziosi - nel corso dei quali le differenti scuole epistemologiche hanno ingaggiato confronti critici molto aspri e fecondi - tuttavia sembrano essere state tutte animate da una comune e assai discutibile convinzione di fondo. Ovvero dalla convinzione che la scienza si contraddistingua proprio per il fatto di possedere *un solo metodo*, applicando il quale, si otterrebbe, invariabilmente, della conoscenza, rigorosa ed affidabile.

Si è così diffusa un'idea di fondo, ampiamente, condivisa dai più, secondo la quale esisterebbe una contrapposizione di fondo ed irrimediabile tra la scienza la quale, applicando il suo metodo scientifico, produrrebbe, invariabilmente, conoscenza rigorosa, accertata e dimostrabile, e tutte le altre discipline e forme culturali le quali, non potendo utilizzare il metodo scientifico, non potrebbero produrre alcuna seria conoscenza, nel senso vero

e proprio del termine (che sarebbe, appunto, solo ed esclusivamente quello inaugurato dal pensiero scientifico galileiano). Per questa ragione non è mancato chi (per esempio uno studioso italiano come Marcello Pera 1991) è giunto a parlare, del tutto esplicitamente, della cosiddetta «sindrome cartesiana» (la quale si sarebbe diffusa proprio a partire dalla pubblicazione del *Discours de la méthode* in poi), in virtù della quale ciò che è scientifico si caratterizzerebbe per l'applicazione del metodo scientifico, mentre tutto ciò che non utilizza questo metodo si collocherebbe, invariabilmente e senza scampo, nell'ambito della retorica.

Naturalmente i differenti epistemologi sono stati poi in vario e complesso contrasto tra di loro nel cercare di poter individuare, con esattezza e precisione, la precisa natura del vero ed autentico “metodo scientifico”. Proprio su questo terreno metodologico si è sviluppato quel ricco dibattito epistemologico che, nel corso dei secoli, ha sempre inseguito, tenacemente, la possibilità (e anche il sogno) di poter infine individuare, *una volta per tutte*, la *vera ed autentica natura del metodo scientifico*. Di conseguenza diversi epistemologi hanno spesso litigato e polemizzato tra di loro, soprattutto quando si sono confrontati sulla presunta “vera natura *del* metodo scientifico”, anche se poi tutti hanno comunque condiviso l'idea comune che la scienza si qualificherebbe proprio (ed esclusivamente) per il possesso di *un* metodo scientifico, applicando il quale si produrrebbero, invariabilmente, delle conoscenze rigorose, serie ed affidabili.

Il “paradosso di Galileo” si collocherebbe allora proprio ed esattamente entro questa peculiare tradizione epistemologica, giacché lo scienziato pisano, pur essendo unanimemente indicato come il padre riconosciuto della scienza moderna, tuttavia non solo non ha mai ridotto la scienza ad *un* metodo, ma non ha neppure mai indicato quale sarebbe questo misterioso metodo scientifico. Come se il “metodo” della scienza costituisse, in contrasto con tutta la sua opera, intrinsecamente illuminista *ante literam* (cfr. Callemme 2013), addirittura, una sorta di “segreto” che non andrebbe svelato ai profani e, soprattutto, ai non-scientifici e ai non addetti ai lavori... Il che, appunto, ci consegna un'immagine, alquanto paradossale e fortemente contraddittoria, di un padre riconosciuto della scienza il quale, tuttavia, non avrebbe mai voluto indicare o svelare la vera e più profonda natura del metodo scientifico di cui è stato, peraltro, l'araldo e il campione, indiscusso, nel corso della sua intensa attività intellettuale e di ricerca.

Ma questa paradossale - ed assai inquietante - immagine di un Galileo che risulta essere, ad un tempo, fondatore della scienza moderna e geloso depositario del suo più intimo e profondo segreto metodologico, regge veramente sul piano della ricostruzione storica e su quello della ricerca teo-

rica? Lecito dubitarne, anche perché se si studia analiticamente il pensiero galileiano ben presto emerge un altro aspetto del suo lavoro scientifico. Galileo è stato infatti uno scienziato che si è occupato di differenti ambiti di indagine, spaziando da ricerche di astronomia a studi concernenti il problema del moto e della dinamica, da indagini concernenti il galleggiamento di corpi solidi sui liquidi a problemi balistici, da questioni attinenti la resistenza dei mezzi a varie questioni matematiche, geometriche, biologiche, etc., etc. Proprio questa assai rilevante ampiezza dei suoi differenti interessi scientifici, può allora far nascere l'impressione che Galileo, proprio alla luce delle sue differenti e assai diversificate indagini e ricerche scientifiche, abbia ben presto percepito l'*intrinseca plasticità del procedere scientifico*. Proprio questa consapevolezza può allora averlo indotto a non voler mai ridurre la scienza ad un solo ed unico "metodo", proprio perché lo scienziato pisano si era reso conto che *ogni differente ambito di indagine richiede sempre la costruzione e l'individuazione di una peculiare procedura metodica che non può mai prescindere dalla natura specifica di quel determinato ambito di ricerca e di studio*. In questa prospettiva ermeneutica può allora essere meglio inteso anche l'approccio metodologico consegnato alle classiche pagine di una sua famosa opera polemica, *Il Saggiatore*, apparsa nel 1623. L'indicazione metodologica galileiana che emerge da queste pagine, nel corso delle quali lo scienziato pisano sviluppa la sua polemica contro Lotario Sarsi, ovvero il gesuita Orazio Grassi, in merito alla corretta interpretazione della natura delle comete, ci fornisce, infatti, un'indicazione molto lasca, ma tuttavia preziosa, in base alla quale la scienza scaturirebbe, in ultima analisi, dall'intreccio critico, dinamico e sempre rettificabile, tra le «sensate esperienze» e le «certe dimostrazioni». Quanto a queste ultime per Galileo non ci si può infatti appellare al continuo «saettar di sillogismi» quando si voglia discorrere argomentativamente e in modo cogente:

Ma avvertisca bene al caso suo, e consideri che per uno che voglia persuader cosa, se non falsa, almeno assai dubbiosa, di gran vantaggio è il potersi servire d'argomenti probabili, di conghietture, d'esempi, di verisimili ed anco di sofismi, fortificandosi appresso e ben trinceandosi con testi chiari, con autorità d'altri filosofi, di naturalisti, di rettorici e d'istorici: ma quel ridursi alla severità di geometriche dimostrazioni è troppo pericoloso cimento per chi non le sa ben maneggiare; imperocché, sì come *ex parte rei* non si dà mezo tra il vero e 'l falso, così nelle dimostrazioni necessarie o indubbiamente si conclude o inescusabilmente si paralogiza, senza lasciarsi campo di poter con limitazioni, con distinzioni, con istorcimenti di parole o con altre girandole sostenersi più in piede, ma è forza in brevi parole ed al primo assalto restare o Cesare o niente (*Le Opere di Galileo Galilei, Edizione Nazionale*, VI, 296).

Del resto, come è pure ben noto, per Galileo «il discorrere è come il correre, e non come il portare, ed un cavallo barbero solo correrà più che non cento frisoni» (ivi, VI, 340). Insomma: le nostre conoscenze devono sempre basarsi su argomentazioni rigorose, pubbliche e controllate. Da questo punto di vista solo le matematiche, perlomeno a giudizio di Galileo, ci consentono di istituire inferenze logiche rigorose ed intersoggettive, tali da poter essere controllate criticamente da chiunque.

Ma, d'altra parte, anche queste «certe dimostrazioni», da sole, non possono esaurire il procedere critico della conoscenza umana, un procedere il quale deve sempre sapersi confrontare e intrecciare anche con la considerazione e lo studio dell'esperienza. Se infatti le inferenze argomentative ci permettono di stabilire, con rigore, alcune conoscenze formali, vuote e tautologiche, sono solo le esperienze che ci consentono, invece, di parlare del mondo fornendoci dei contenuti in grado di dilatare, effettivamente, le nostre conoscenze della realtà. In questa prospettiva, polemizzando apertamente con il Sarsi – che si appellava continuamente alle testimonianze di poeti e a quelle delle *"istorie"* onde suffragare le proprie posizioni - Galileo ha buon gioco a replicare, polemicamente, quanto segue:

ma dico bene, parermi cosa assai nuova che, di quel che sta in fatto, altri voglia anteporre l'attestazioni d'uomini a ciò che ne mostra l'esperienza. L'addir tanti testimoni, Sig. Sarsi, non serve a niente, perché noi non abbiamo mai negato che molti abbiano scritto e creduto tal cosa, ma si bene abbiamo detto tal cosa esser falsa; e quanto all'autorità, tanto opera la vostra sola quanto di cento insieme, nel far che l'effetto sia vero o non vero. Voi contrastate coll'autorità di molti poeti all'esperienze che noi produciamo. Io vi rispondo e dico, che se quei poeti fussero presenti alle nostre esperienze, muterebbono opinione, e senza veruna ripugnanza direbbero d'aver scritto ipperbolicamente o confesserebbono d'essersi ingannati. Ma già che non è possibile d'aver presenti i poeti, i quali dico che cederebbono alle nostre esperienze, ma ben abbiamo alle mani arcieri e scagliatori, provate voi se, coll'addir loro queste tante autorità, vi succede d'avvalorargli in guisa, che le frecce ed i piombi tirati da loro s'abbrucino e liquefacciano per aria; e così vi chiarirete quanta sia la forza dell'umana autorità sopra gli effetti della natura, sorda ed inesorabile a i nostri vani desideri (ivi, VI, 337).

Le «sensate esperienze», consentono, appunto, di farci conoscere gli effetti, reali e concreti, della natura, la quale è sempre «sorda ed inesorabile a i nostri vani desideri», proprio perché segue delle leggi, come saremmo forse indotti a dire noi, «universali e necessarie». Certamente per Galileo la «sensatezza» dell'esperienza significa che questa esperienza non è più l'esperienza qualitativa cui era solito riferirsi il tradizionale e classico empirismo pre-scientifico. L'esperienza «sensata» cui guarda Galileo è infatti

un'esperienza ben diversa da quella basata unicamente sui *quinque sensibus* cui si appellava, più o meno invariabilmente, l'empirismo classico, antico, medievale e moderno. L'esperienza «sensata» di Galileo costituisce, invece, un'esperienza *quantificata* e *sperimentale* che nasce e si struttura sempre entro un ben preciso apparato teorico e anche attraverso un peculiare e determinato controllo sperimentale, in cui la mediazione critica della tecnologica e la matematizzazione svolgono sempre un loro ruolo affatto ineludibile. Non solo: come si è visto per Galileo questa «sensata esperienza» deve poi intrecciarsi, a sua volta, con le «certe dimostrazioni» (entro le quali si delinea una particolare teoria fisica) le quali ultime, a loro volta, costituiscono dimostrazioni rese tanto più rigorose e cogenti proprio grazie all'uso, sistematico e pervasivo, delle matematiche.

Non a caso, proprio partendo dall'intreccio critico tra queste due diverse e affatto opposte polarità delle «certe dimostrazioni» e delle «sensate esperienze», Galileo giungerà poi a parlare, nelle pagine finali del *Saggiatore*, della necessità di introdurre – si badi: solo ed esclusivamente *sul piano operativo* – una fondamentale distinzione tra le «qualità primarie» e le «qualità secondarie», ovvero tra quegli aspetti del mondo naturale che sono effettivamente matematizzabili e quelli che rimangono del tutto refrattari ad ogni matematizzazione. Occorre peraltro tener presente che Galileo introduce questa singolare distinzione tra queste due differenti «qualità» unicamente sul piano strettamente *operativo*, senza cadere mai nella tentazione – affatto metafisica! – di ontologizzarla o sostanzializzarla, come invece farà, spesso e volentieri, gran parte della successiva tradizione filosofico-metafisica. Certamente Galileo, nell'introdurre questa sua distinzione tra le due differenti qualità, sa bene di doverla introdurre proprio perché non dispone di una matematica sufficientemente potente, in grado, cioè, di fargli effettivamente studiare, in modo quantitativo, il problema delle *morfologie*, che era giustamente sollevato, studiato e sottolineato dalla tradizione di ascendenza platonico-aristotelica.

Per tanto io dico che ben sento tirarmi dalla necessità, subito che concepisco una materia o sostanza corporea, a concepire insieme ch'ella è terminata e figurata di questa o di quella figura, ch'ella in relazione alle altre è grande o piccola, ch'ella è in questo o quel luogo, in questo o quel tempo, ch'ella si muove o sta ferma, ch'ella tocca o non tocca un altro corpo, ch'ella è una, poche o molte, né per veruna immaginazione posso separarla da queste condizioni; ma ch'ella debba essere bianca o rossa, amara o dolce, sonora o muta, di grato o ingrato odore, non sento farmi forza alla mente di doverla apprendere da cotali condizioni necessariamente accompagnata: anzi, se i sensi non ci fossero scorta, forse il discorso o l'immaginazione per se stessa non v'arriverebbe già mai: Per lo che vo io pensando che questi sapori, odori, colori, etc. per la parte del soggetto nel quale ci

par che riseggano, non sieno altro che puri nomi, ma tengano solamente lor residenza nel corpo sensitivo, sì che rimosso l'animale, sieno levate ed annichilate tutte queste qualità; tuttalvolta però che noi, sì come gli abbiamo imposti nomi particolari e differenti da quelli de gli altri primi e reali accidenti, volessimo credere ch'esse ancora fussero veramente e realmente da quelli diverse (ivi, VI, 347-348).

Tuttavia, pur nel quadro di questo preciso patrimonio tecnico-conoscitivo matematico, entro il quale Galileo si poteva muovere, nei primi decenni del Seicento, la sua mossa critica non viene comunque meno all'esigenza di poter situare questa stessa conoscenza matematica del mondo delle «qualità primarie» entro un preciso contesto scientifico ed epistemologico, ovvero quello in virtù del quale la conoscenza del mondo naturale si può avviare ed incrementare, *costruttivamente* e *positivamente*, solo nella misura in cui sappiamo effettivamente costruire un'*immagine conoscitiva rigorosa della natura*. Un'immagine in grado di delinearsi ed instaurarsi, in modo sempre argomentato e controllabile (ovvero *empiricamente* e *argomentativamente* controllabile), entro quella specifica tensione critica che si instaura, all'interno di una particolare teoria scientifica, tra il polo delle «certe dimostrazioni» e quello della «sensate esperienze». Nel *Saggiatore*, Galileo non ci dice nulla di più, ma anche nulla di meno, di questa assai importante, ma generica, indicazione metodologica prospettica di fondo, per il cui tramite il sapere scientifico viene dunque situato in un preciso orizzonte problematico che si instaura entro la tensione critica che può determinarsi tra due polarità antitetiche come quella del pensiero teorico e quella della sperimentazione.

2. La complessa immagine della scienza in Galileo

Di fronte a tale preziosa indicazione epistemologica galileiana mi pare allora opportuno e doveroso ritornare nuovamente ai testi di Galileo, in particolare a quelli in cui lo scienziato pisano discute e affronta, del tutto esplicitamente, la natura della scienza, nel mentre delinea la sua immagine dell'impresa scientifica. Anche Galileo ha infatti avuto modo di affrontare, in diverse occasioni - concettualmente strategiche - il problema della natura della scienza, pur sempre rifiutandosi, però, di ridurla ad un “metodo”. Anzi, da questo punto di vista si può osservare come proprio la sua opera metodologicamente più celebre, *Il Saggiatore* (1623), come si è visto, sia stata volutamente scritta in modo da lasciar emergere solo ed unicamente una duplice polarità antinomica entro la quale, sempre secondo Galileo, si

costruisce il *pensiero scientifico*, ovvero la già ricordata polarità che si instaura tra le «certe dimostrazioni» e le «sensate esperienze». Del resto lo stesso Galileo ci introduce in questa sua specifica riflessione, anche in altri passi emblematici dei suoi numerosi scritti. Per esempio nella sua famosa lettera a Giovanni Battista Baliani del 7 gennaio 1639, nella quale, parlando del suo capolavoro scientifico, i *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, così scrive:

ma tornando al mio trattato del moto, argomento *ex suppositione* sopra il moto, in quella maniera diffinito; siche quando bene le conseguenze non rispondessero alli accidenti del moto naturale de' gravi descendantii, poco a me importerebbe, siccome nulla deroga alla dimostrazione di Archimede il non trovarsi in natura alcun mobile che si muova per linee spirali. Ma in questo sono io stato, dirò cosi, avventurato, poiché il moto dei gravi et i suoi accidenti rispondono puntualmente alli accidenti dimostrati da me del moto da me definito (ivi, XVIII, 12-13).

Da questo breve passo è agevole intendere come per Galileo la scienza debba procedere prendendo le mosse da alcune congetture ipotetiche dalle quali deve saper ricavare, in modo rigoroso, tutte le conseguenze. Saranno poi queste ultime che dovranno essere poste in relazione diretta, tramite la mediazione sperimentale - entro la quale la tecnologia gioca un ruolo fondamentale - con il mondo dell'esperienza scientifica. Questa preziosa impostazione metodica di fondo emerge anche nel suo celebre *Dialogo sopra i due massimi sistemi, tolemaico e copernicano*, in cui, perlomeno a mio modo di vedere (cfr. Minazzi 1994a e 2013), Galileo ci offre una straordinaria ricostruzione del complesso ed articolato processo concettuale in virtù del quale lui stesso, da tolemaico, è alla fine diventato un convinto ed agguerrito copernichista.

Se infatti si accetta questa mia ipotesi, concernente il profondo *cambiamento concettuale* operatosi allora nella mente di Galileo, occorre di conseguenza leggere il *Dialogo* galileiano come una “storia di un'anima”, ovvero come la più straordinaria documentazione del processo concettuale che Galileo ha attraversato per abbandonare la tradizionale impostazione tolemaica e far sua la nuova prospettiva astronomica inaugurata da Copernico. In questa precisa chiave di lettura ermeneutica del *Dialogo*, allora i diversi personaggi (Salviati, Simplicio e Sagredo) costituiscono, *tutti insieme*, la “voce” unitaria del pensiero di Galileo e anche la voce di tutti i molteplici e profondi dubbi che il Nostro scienziato ha dovuto affrontare prima di convincersi della bontà euristica della prospettiva copernicana, abbandonando la tradizionale concezione tolemaica. Ma per abbandonare la prospettiva tradizionale occorreva anche convincersi dell’opportunità di utilizzare le

matematiche per studiare il mondo fisico. Ma proprio su questo punto peculiare bisognava allora saper vincere la tenace resistenza del pensiero antico il quale rifiutava, sistematicamente, di poter applicare il rigore matematico al mondo dell'imperfezione della realtà sublunare. La tradizione tolemaico-aristotelica rifiutava la possibilità di utilizzare le matematiche per studiare il mondo fisico sublunare, soprattutto per una ragione metafisico-ontologica, ovvero per la ragione che si riteneva il mondo sublunare affatto imperfetto, sottoposto a cambiamenti continui, proprio perché costituiva un mondo dove tutto risulta essere travolto da cambiamenti incessanti che determinano il passaggio continuo dall'essere al non essere. A fronte di questa realtà in perpetuo divenire, la perfezione matematico-geometrica sarebbe allora risultata del tutto inadatta e veramente fuorviante, proprio perché non riuscirebbe mai a dare ragione di un mondo in perpetuo divenire. Non per nulla già gli antichi greci erano riusciti ad applicare il rigore della geometria e della matematica unicamente ai moti celesti degli astri, dove tutto sembrava presentare un moto circolare affatto perfetto, immodificabile, in virtù del quale sembrava che i cieli sovra-lunari fossero formati di una quintessenza perfetta, eterna e trasparente. Solo ed unicamente in relazione a questa realtà perfetta ed immodificabile sarebbe stato allora possibile applicare le matematiche e le figure geometriche per costruire un'immagine veritiera del mondo fisico sovralunare. Invece, e di conto, la mutevolezza continua del mondo sub-lunare avrebbe vietato, *per principio*, l'utilizzazione delle matematiche per conoscere il nostro mondo fisico terrestre.

Non a caso proprio su questo punto decisivo dell'uso delle matematiche per studiare la realtà del mondo fisico terrestre, nella seconda giornata del *Dialogo*, si legge l'obiezione fondamentale, avanzata proprio dalla tradizione aristotelica, obiezione che viene così mirabilmente riassunta dalla voce copernicana del dialogo galileiano:

Salviati: Adunque, tuttavolta che in concreto voi applicate una sfera materiale ad un piano materiale, voi applicate una sfera non perfetta a un piano non perfetto; e questi dite che non si toccano in un punto. Ma io vi dico che anco in astratto una sfera immateriale, che non sia perfetta, può toccare un piano immateriale, che non sia piano perfetto, non in un punto, ma con parte della sua superficie; talché sin qui quello che accade in concreto, accade nell'istesso modo in astratto: e sarebbe ben nuova cosa che i computi e le ragioni fatte in numeri astratti non rispondessero poi alle monete d'oro e d'argento e alle mercanzie in concreto (ivi, VII, 233-234).

Per la verità questa prima risposta è debole proprio perché si limita a delineare la possibilità – basata su una sorta di isomorfismo strutturale tra mondo fisico e il cielo della teoria – tra quanto accade, effettivamente, nel

mondo fisico e quanto accade sul piano della teoria. Se il mondo dell'esperienza ci presenta una sfera imperfetta che tocca un piano imperfetto in più punti – violando, palesemente, quanto previsto dalla perfezione geometrica delle figure – allora noi potremo sempre costruire una teoria mimetica della realtà: nella misura in cui la realtà è imperfetta, costruiremo una teoria in grado di render conto proprio di queste imperfezioni della realtà fisica. Ma Galileo, nel momento stesso in cui enuncia questa sua prima, assai claudicante, risposta, sa benissimo, al contempo, che quest'ultima non rappresenta affatto la vera risposta all'obiezione, invero strategica e decisiva, di Simplicio e della tradizione aristotelico-tolemaica. Semmai, nella ricostruzione del dialogo, messo sempre “in scena” con grandissima perizia, anche letteraria, da Galileo, si può considerare questo intervento di Salviati, come una modalità peculiare con cui un interlocutore, messo in grave difficoltà dal proprio avversario, interviene quasi cercando di “prendere tempo”. Prende così la parola, in primo luogo per riesporre il nocciolo concettuale dell'obiezione avanzata dal suo interlocutore e cerca poi subito dopo di depotenziarne l'eventuale valore, avanzando una teoria banale che cerca appunto di trasformare il punto focale – e di forza - della critica in un suo proprio elemento vincente. Così se Simplicio fa leva sulla discrasia esistente tra il mondo fisico reale e il mondo della perfezione geometrica, si replica che, in realtà, tale discrasia non esisterebbe affatto, perlomeno nella misura in cui si fosse in grado di costruire delle teorie in grado di riprodurre perfettamente – appunto, mimeticamente, secondo un processo basato sull'isomorfismo – quelle stesse conclamate imperfezioni del mondo fisico. Così Salviati concede immediatamente che se il mondo è imperfetto si può sempre costruire una teoria mimetica del mondo, in grado di riprodurre, con rigorosa fedeltà, proprio l'imperfezione del mondo fisico. Tuttavia, Galileo non crede affatto che il mondo fisico in cui viviamo sia “imperfetto” (perlomeno nel senso tradizionale della metafisica ontologica aristotelico-tolemaica). Non lo crede anche perché lo scienziato pisano ha ormai fatto suo, dalle celebri scoperte astronomiche del 1610, affidate al *Sidereus Nuncius*, una ben diversa concezione fisica del mondo e dell'universo, in cui non esistono più i quattro elementi empedoclei cui si contrapporrebbe un “quinto elemento” sovralunare, perfetto, eterno e immodificabile. Né basta: Galileo ha anche apertamente polemizzato contro il tradizionale concetto ontologico-metafisico della perfezione, entrando in rapporto conflittuale anche con la stessa tradizione platonica che si divertiva a parlare della “perfezione” delle figure geometriche giungendo addirittura a parlare di “nobiltà” di questa o quella figura. Contro tutte queste fantasie metafisiche Galileo, fin dal *Saggiatore*, fa valere un ben diverso concetto di perfezione

ed io, in quanto a me, non avendo mai letto le croniche e le nobiltà particolari delle figure, non so quali di esse sieno più o men nobili, più o men perfette; ma credo che tutte sieno antiche e nobili a un modo, o, per dir meglio, che quanto a loro non sieno né nobili e perfette, né ignobili ed imperfette, se non in quanto per murare credo che le quadre sien più perfette che le sferiche, ma per ruzzolare o condurre i carri stimo più perfette le tonde che le triangolari (ivi, VI, 319).

Galileo non dimentica affatto questa sua precedente presa di posizione polemica contro la tradizione ontologico-metafisica aristotelico-tolemaica, e deve quindi fornire una ben diversa risposta all'obiezione, decisiva, avanzata da Simplicio, il quale, con la sua critica ha invero sollevato un problema di fondo e cruciale, quello dello studio e della conoscenza delle *morfologie* del mondo naturale. Ecco allora che dopo questa prima – provvisoria – risposta di Salviati, la pagina galilaiana introduce la vera risposta epistemologica dello scienziato pisano. In questo caso lo stesso stile della pagina di Galileo ci avverte del drastico cambiamento di prospettiva. Infatti ora Salviati si rivolge al suo interlocutore con una domanda retorica che introduce la torsione concettuale che il dialogo sta subendo: da questo punto in poi arriverà la vera e propria risposta galileista all'obiezione aristotelica. Aggiunge infatti Salviati, incalzando ora con sicurezza il suo interlocutore,

Ma sapete, signor Simplicio, quel che accade? Si come a voler che i calcoli tornino sopra i zuccheri, le sete e le lane, bisogna che il computista faccia le sue tare di casse, invoglie ed altre bagaglie, così, quando il filosofo geometra vuol *riconoscere in concreto gli effetti dimostrati in astratto*, bisogna che *dif falchi gli impedimenti della materia*; che se ciò saprà fare, io vi assicuro che le cose si riscontreranno non meno aggiustatamente che i computi aritmetici. Gli errori dunque non consistono né nell'astratto né nel concreto, né nella geometria o nella fisica, ma nel calcolatore, che non sa pare i conti giusti (ivi, VII, 234, i cor-sivi sono miei).

Come si vede in questa risposta galileiana, apparentemente paradossale, il «filosofo geometra» (ovvero lo scienziato inteso come autentico filosofo della natura che non si limita a studiare un aspetto particolare del mondo, ma che ambisce ad offrire una nuova immagine complessiva della realtà fisica universale) deve sempre saper «riconoscere in concreto gli effetti» precedentemente «dimostrati in astratto». Ma per conseguire questo suo risultato lo scienziato deve allora saper sempre “*dif falcare*” «gli impedimenti della materia». Come è agevole constatare da questo passo galileiano riemergono, nuovamente, i differenti momenti, cruciali e costitutivi, che sempre contraddistinguono l'innovativo modo di procedere dello scienziato: la sua capacità di *saper pensare, congetturalmente*, in modo originale e innovativo; la sua capacità di *saper dedurre*, in modo necessario e rigoroso,

le conseguenze delle sue premesse ipotetiche; la sua capacità di *saper “diffalcare”* gli impedimenti della materia, tramite l'intreccio, *creativo*, che sa instaurare tra il suo specifico apparato teorico e la non meno complessa verifica sperimentale, sempre mediata dalla tecnologia sperimentale di cui uno scienziato può effettivamente disporre entro un determinato patrimonio tecnico-concettuale, quello proprio e specifico del suo tempo. Per Galileo il procedere scientifico è il risultato, complessivo, di tutti questi diversi momenti che, nel loro stesso intreccio problematico, determinano la configurazione del pensiero scientifico. Per Galileo è evidente che il «filosofo geometra» non può non produrre pensiero scientifico nella misura in cui parte da alcuni assunti congetturali per poi avere la capacità di dedurre da questi suoi assunti tutte le conseguenze necessariamente implicite nelle sue premesse. In questa prima fase uno scienziato cosa fa? Costruisce un complesso teorico, appunto una teoria di un certo aspetto del mondo fisico. Ma questa fase “creativa” non produce ancora conoscenza, perché se lo scienziato, «filosofo geometra», vuole poi controllare l'effettiva portata conoscitiva delle sue teorie scientifiche è obbligato a collegare i risultati di queste sue ardite teorie con il mondo della realtà fisica. Ma per operare questa verifica lo scienziato, inteso quale «filosofo geometra», deve allora essere anche in grado di «diffalcare» gli impedimenti della natura. Perché? Proprio perché Galileo ha capito – *contro* tutta la tradizione ontologico-metafisica che ha alle spalle, ma anche *contro* la stessa, pur complessa e feconda tradizione dell'empirismo moderno (che avrà di fronte a sé nei secoli successivi, dal Seicento fino al Novecento incluso) – che la conoscenza umana del mondo non scaturisce mai da un'osservazione neutra della realtà. Non solo perché tale osservazione “neutra” non esiste. Ma anche perché Galileo sa che per conoscere il mondo occorre sempre avere delle idee, delle teorie e anche delle congetture prospettive ed euristiche, con cui noi dobbiamo *saper* guardare al mondo. Solo entro questo sguardo orientato e diretto dalle nostre idee e dai nostri pensieri possiamo allora sperare di poter approfondire la nostra conoscenza della realtà. Certamente poi quest'ultima ha da dire una sua parola importante e decisiva: quella mediante la quale – passando proprio per la mediazione sperimentale entro la quale la componente tecnologica svolge una sua funzione insostituibile – il mondo è in grado di selezionare le nostre stesse teorie scientifiche. Ma proprio all'interno di questo confronto tra le conseguenze delle nostre teorie e la resistenza materiale della realtà fisica si costruisce quella prova sperimentale superando la quale le teorie possono infine acquistare un'autentica portata conoscitiva. Autentica portata conoscitiva che è del resto testimoniata proprio dal funzionamento della tecnologia la quale, con la sua stessa efficacia pratica, testimoni-

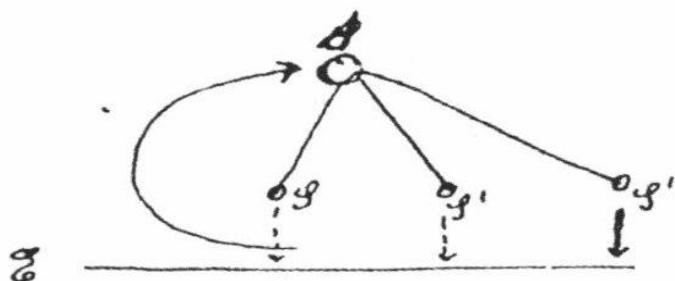
nia che le nostre teorie sono effettivamente riuscite a cogliere alcuni aspetti reali del mondo materiale. Il che spiega perché lo stesso Galileo, nella terza giornata del *Dialogo*, possa poi scrivere di non poter trovare «[...] termine all’ammirazion mia, come abbia possuto in Aristarco e nel Copernico far la ragione tanta violenza al senso, che contro a questo ella si sia fatta padrona della loro credulità» (VII, 355; per un approfondimento di queste tematiche sia comunque nuovamente lecito rinviare a Minazzi 1994a).

Naturalmente con questa sua innovativa e rivoluzionaria impostazione Galileo non ha certamente risposto, in modo completo, alla decisiva obiezione aristotelica, la quale, in fondo, imputa al metodo della fisica-matematica, come si è accennato, di non riuscire affatto a risolvere il problema, decisivo, dello studio delle *morfologie* del mondo della nostra esperienza. Da questo punto di vista Galileo sapeva benissimo che con la matematica di cui poteva allora effettivamente disporre, non era affatto in grado di affrontare il problema delle morfologie ed era quindi necessariamente obbligato ad introdurre la sua celebre distinzione tra le “qualità primarie” (quelle matematizzabili) e le “qualità secondarie” (quelle non matematizzabili). Ma questa distinzione, al di là dei ben noti problemi ontologico-metafisici cui darà inevitabilmente luogo nella discussione filosofica post-galileiana – non è comunque in grado di porre la soluzione galileiana al riparo da ogni problema epistemologico e scientifico. Come infatti la storia della scienza si è poi incaricata di porre in evidenza, è la stessa concezione galileiana di un sapere scientifico identificato con un sapere assoluto ed immodificabile che è infine entrata in crisi con la nascita della nuova fisica quantistica e con la costruzione della teoria della relatività einsteiniana. Né può essere parimenti negato come proprio esattamente entro questa precisa distinzione tra le due *qualità* galileiane, la stessa tradizione aristotelica disponesse ancora di parecchie frecce nella sua faretra per rimproverare alla svolta galileiana di non essere affatto in grado di fornirci un’immagine sufficientemente ricca ed articolata dell’infinita ricchezza del nostro mondo sensibile e di tutte le sue innumerevoli *forme*. In fondo la distinzione galileiana tra le due differenti *qualità*, quelle primarie e quelle secondarie, costituisce, se letta *a rovescio*, proprio la sua approvazione (implicita) di questo rilievo critico aristotelico. Anche se è poi vero che Galileo non dubita affatto che, prima o poi, anche questo cruciale problema delle morfologie potrà essere infine risolto scientificamente. Ma per noi, che oggi leggiamo la storia della scienza moderna da Galileo in poi, con una differente consapevolezza critica e metodologica, appare evidente che proprio l’obiezione avanzata da Simplicio ha costituito – nel corso dei secoli – la tradizionale obiezione in nome della quale si è imputato alla scienza non solo l’incapacità di farci conoscere

il mondo nella sua reale ed effettiva complessità, ma si è anche giustificata una tesi in base alla quale si è affermato che la conoscenza scientifica del mondo costituirebbe un’immagine *falsificante* lo stesso mondo. In questo senso da Simplicio ad Heidegger corre un *filo rosso* che deve essere tenuto presente non solo per scorgere i *limiti* intrinseci della risposta galileiana – una risposta che risulta essere del tutto inserita nel patrimonio tecnico-scientifico della sua epoca storica – ma anche per scorgere il *valore* innegabile del suo orizzonte prospettico. Un valore oggettivo, entro il quale lo stesso pensiero scientifico, nel corso degli anni, ha avviato uno sviluppo, invero straordinario, che ci ha permesso di costruire un patrimonio tecnico-scientifico di conoscenze che non ha pari nella storia dell’umanità. Ma sempre in questa precisa prospettiva ermeneutica e critica l’importante immagine galileiana del «filosofo geometra» ci consente anche di meglio intendere la più profonda natura dell’impresa scientifica che si basa sempre sulla produzione di un pensiero scientifico che nasce e scaturisce proprio all’interno di quelle differenti polarità critiche entro le quali si è in grado di produrre una conoscenza scientifica del mondo e della realtà. Il che non costituisce un pregio di poco conto, perché tutte le differenti immagini della scienza che sono state suggerite dalle più diverse tradizioni epistemologiche – da quelle empiriste a quelle convenzionaliste, da quelle verificazioniste a quelle falsificazioniste, da quelle idoneiste a quelle post-neopositiviste, etc. – hanno sistematicamente trascurato la capacità della scienza di saper produrre un autentico pensiero scientifico. In genere è proprio questo aspetto del pensiero scientifico che è stato negato, conciulcato e apertamente combattuto, mettendo spesso capo ad un’immagine, affatto caricaturale, del procedere scientifico. Al punto che nel Novecento è quasi diventato un luogo comune, proprio di buona parte della riflessione epistemologica e filosofica, ridurre senz’altro la scienza ad un mero *algoritmo di calcolo*. Così lo slogan *la scienza non pensa, calcola* è diventato un luogo comune di buona parte della cultura del Novecento. Non è infatti un caso che, per esempio, il primo Wittgenstein, nel suo *Tractatus logico-philosophicus* sostenesse, apertamente, che la scienza fosse riducibile a mero calcolo, in cui posta una domanda la risposta si sarebbe dovuta necessariamente trovare. E non è nuovamente un caso se un pensatore metafisico come Heidegger, per molti versi del tutto opposto ed effettivamente antitetico a Wittgenstein, abbia finito per sostenere, con indubbia enfasi, la tesi che *Die Wissenschaft denkt nicht*, finendo per contrapporre alla pratica scientifica la più vera attività del pensiero che si esplicherebbe unicamente nella ricerca metafisico-ontologica (che, sempre a suo avviso, sarebbe, naturalmente, in grado di pensare veramente).

3. L'immagine einsteiniana della scienza

Il 7 maggio 1952 Albert Einstein, scrivendo ad un amico e sodale del loro informale e ristrettissimo cenacolo costituente l'«Akademie Olympia», Maurice Solovine (1875-1958), ebbe modo di precisare la sua immagine ideale della scienza, tracciando il seguente disegno che consente di meglio comprendere la sua precisa visione epistemologica del pensiero scientifico:



La linea orizzontale *E* indica il mondo del *Lebenswelt*, ovvero il mondo delle esperienze ordinarie ed immediate. Ognuno di noi appartiene a questo mondo. Meglio ancora: ognuno di noi non solo appartiene a questo mondo ma è anche, al contempo, *un momento* di questo mondo, giacché ogni uomo possiede sempre una sua propria *storia individuale*. *Was der Mensch thut, das ist er*: questa celebre definizione hegeliana può giustamente essere richiamata proprio per sottolineare questa appartenenza costitutiva dell'uomo a questa dimensione del *Lebenswelt*, per il cui tramite ognuno di noi rappresenta un autentico “tramite costitutivo” di questo stesso nostro mondo del senso comune. Spesso si dimentica che anche i grandi specialisti (si pensi ai premi Nobel), al di fuori dei loro specifici campi di competenza, vivono anch'essi entro il comune mondo del *Lebenswelt* cui anche loro necessariamente appartengono. Questa prima indicazione einsteiniana è dunque preziosa proprio perché ci ricorda che ognuno di noi ha – e deve avere – sempre i propri piedi radicati nel mondo del “senso comune”. Nel disegno di Einstein il polo *A* rappresenta, invece, il polo degli assiomi astratti e congetturali da cui si possono trarre, per rigorosa deduzione matematica, le conseguenze *S*, *S'*, *S''*, ..., *Sⁿ*. Tuttavia, per passare dal piano rappresentato dalla linea *E* al polo delle idee astratte indicate da *A* non esiste alcun percorso logico, giacché, come si noterà, il ramo di parabola che conduce ad *A* “fluttua”, ad una certa distanza, *sopra* la linea *E*, senza tuttavia aver alcun punto di contatto diretto con il mondo delle esperienze immediate. Quel suo “fluttuare” indica esattamente il carattere intuitivo, creativo e anche di autentica fantasia, con cui può nascere un innovativo e creativo

percorso di pensiero che ci induce, appunto, ad elaborare, astrattamente e concettualmente, con la forza del pensiero, gli assioni *A*. Di contro, le conseguenze *S*, *S'*, *S''*, ..., *Sⁿ*, ricavate tutte per una via matematica, rigorosamente deduttiva e cogente, devono, a loro volta, essere poste nuovamente in relazione con il livello *E*. Effettivamente queste conseguenze sono messe in relazione proprio con il piano orizzontale delle *E* tramite una complessa verifica basata sull'esperienza sperimentale. La linea tratteggiata sottolinea come questa verifica e questa stessa procedura di verifica, per dirla con le stesse parole di Einstein, appartenga

essa stessa alla sfera extralogica (intuitiva), non essendo di natura logica la relazione tra i concetti che intervengono negli enunciati e le esperienze immediate. Questa relazione tra gli *S* e le *E* è tuttavia (pragmaticamente) molto meno incerta di quella che sussiste tra gli *A* e le *E* (ad esempio il concetto di cane e le corrispondenti esperienze immediate). Se una tale corrispondenza, pur restando inaccessibile alla logica, non potesse essere stabilita con un elevato grado di certezza, tutto l'armamentario logico non avrebbe alcun valore ai fini della ‘comprendere’ della realtà (esempio, la teologia). L’aspetto essenziale è qui il legame, eternamente problematico, fra il mondo delle idee e ciò che può essere sperimentato (L’esperienza sensibile) (Einstein 1988, 743).

Dunque, in profonda ed evidente sintonia critica con la concezione galileiana della scienza precedentemente illustrata, anche per Einstein l’aspetto decisivo, che attribuisce al pensiero scientifico una sua autentica portata conoscitiva, si radica esattamente nel nesso che, tramite la sperimentazione tecnologica, si riesce ad instaurare tra il complesso mondo delle teorie (considerate un tutt’uno con le loro stesse conseguenze) e la linea orizzontale delle *E*. Rapporto intimamente complesso e affatto problematico, proprio perché la mediazione della sperimentazione tecnologica ci consente senz’altro di affermare che la nostra teoria è in grado di cogliere un “filo di verità” del mondo, ma non ci consente, tuttavia, di ritenere che tale “filo di verità” sia in grado di offrirci un’immagine definitivamente *esaustiva* del mondo fatto oggetto del nostro studio. Non per nulla la storia delle scienze documenta come ogni determinato risultato conoscitivo possa sempre essere sottoposto ad un ulteriore approfondimento critico, secondo una curvatura di ricerca che, per dirla con Karl R. Popper, «non ha mai fine», proprio perché la ricerca stessa, per sua intrinseca natura, «non ha mai fine». Il che non significa affatto negare un’effettiva portata oggettiva alla conoscenza umana, ma significa, semmai, riconoscere come questa stessa conoscenza oggettiva del mondo si costruisca sempre entro un preciso *limite*, teorico, pratico e conoscitivo. Per dirla con il lessico husseriano, potremmo anche affermare che ogni conoscenza umana del mondo si costruisce sempre entro una pre-

cisa e determinata «ontologia regionale», che non può mai trascendere. Il che ci riporta al valore epistemologico della «rivoluzione copernicana» inaugurata da Kant con l'affermazione della *trascendentalità* della nostra conoscenza. In questa prospettiva non ha infatti alcun senso parlare di un “oggetto” della conoscenza umana senza specificare la natura precisa di questo “oggetto” il quale viene istituito sempre entro una determinata teoria scientifica e in relazione ad un’altrettanto determinata e peculiare pratica tecnologico-sperimentale (cfr. Minazzi 2010).

Inoltre, sempre in relazione a questo prezioso disegno einsteiniano e alla sua possibile spiegazione si possono svolgere alcune altre interessanti osservazioni (per un approfondimento delle quali sia lecito rinviare a Minazzi 2007). *In primo luogo*, non è privo di significato che Einstein, per illustrare la sua immagine della scienza, abbia avvertito la necessità di ricorrere ad un disegno, proprio perché la *rappresentazione grafica* consente di meglio “visualizzare” la complessità della sua immagine *concettuale* del procedere scientifico. *In secondo luogo*, è agevole comprendere come questo schema individui due polarità opposte: quella degli assiomi *A*, che fa riferimento al livello del pensiero astratto, e quella delle esperienze immediate *E*, che fa invece riferimento al mondo del vissuto quotidiano, in cui tutti gli uomini sono sempre necessariamente inseriti. Questa polarità tra astratto e concreto, tra assiomi convenzionali e piano dell’esperienza concreta ed immediata, ci riporta nuovamente, e in modo del tutto naturale, alla stessa polarità galileiana tra il piano delle «certe dimostrazioni» e quello delle «sensate esperienze». Inoltre, *in terzo luogo*, anche nello schema einsteiniano figura tutta la problematicità intrinseca del collegamento tecnico-sperimentale che può eventualmente instaurarsi tra la serie delle conclusioni *S, S', S'', ..., Sⁿ* e il piano del *Lebenswelt*. Ancora una volta, come peraltro già accadeva anche nella riflessione galileiana, questo strategico nesso problematico è assicurato proprio dalla dimensione tecnologica, per mezzo della quale i nostri costrutti teorici – nei quali certamente si delinea anche una componente predittiva – vengono posti in relazione con il piano sperimentale che consente un controllo (di verifica o anche di falsificazione) dell’intera teoria. Giustamente anche Einstein sottolinea, però, come questo nesso risulti essere sempre altamente problematico e sempre aperto a molteplici revisioni ed approfondimenti. In ogni caso il disegno einsteiniano ha infine, *in quarto luogo*, il pregio di consentirci di “vedere” la natura intrinsecamente concettuale del procedere scientifico, perché è indubbio come quello spazio che interconnette il piano astratto del pensiero (indicato dalla polarità delle *A*) e il piano empirico indicato dalla linea *E* sia “riempito” ed

“animato” da una serie plastica e dinamica di rapporti per mezzo dei quali emerge proprio la dimensione concettuale del procedere scientifico.

In questa prospettiva epistemologica, per Einstein (come anche già accadeva per Galileo) è un fatto intrinseco allo stesso procedere scientifico che la scienza *pensi*. Meglio ancora: per Galileo ed Einstein non solo la scienza pensa, ma grazie a queste loro riflessioni epistemologiche si evidenzia anche come il pensiero scientifico sia un pensiero “forte”, perché ci consente di conoscere il mondo. Ed è un pensiero “forte” anche perché, attraverso una complessa mediazione di elementi diversi e persino antitetici, l’impresa scientifica riesce infine a mettere capo ad una visione scientifica del mondo che “funziona” tecnologicamente, riuscendo, appunto, a cogliere alcuni aspetti reali del mondo fisico nel quale viviamo.

Il modello ideale del procedere scientifico che si può dunque evincere dalle riflessioni galileiane ed einsteiniane sulla scienza rappresenta così un modello epistemologicamente assai sofisticato ed articolato, in grado di sottolineare, *in primo luogo*, la molteplicità intrinseca delle differenti mediazioni critiche mediante le quali si costruisce il sapere scientifico del mondo. Non solo: *in secondo luogo* questa complessa immagine del procedere scientifico riesce anche a cogliere il ruolo strategico esercitato dalla stessa funzionalità tecnologico-sperimentale, mediante la quale il complesso delle teorie astratte riesce ad entrare in fecondo nesso operativo col mondo empirico della realtà fisica da noi esperita e vissuta. Il pregio epistemologico dell’immagine galileiana ed einsteiniana della scienza consiste allora, *in terzo luogo*, proprio nella sua flessibilità programmatica per mezzo della quale, senza mai ridurre la scienza a questo o quel metodo scientifico ideale, ci ricorda la pluralità dei punti di forza e dei vincoli all’interno dei quali si costruisce ogni differente sapere scientifico. Per questa precisa ragione Galileo ed Einstein non riducono mai la scienza ad un solo metodo, ma ci ricordano, invece, la molteplicità dei fattori – anche metodologici – che vengono posti in essere entro ogni programma di ricerca scientifico onde poter incrementare la nostra conoscenza del mondo. Quella che taluno potrebbe forse ritenerne costituire un’immagine generica del procedere scientifico, scaturisce, invece, da una precisa e rigorosa coscienza metodologica, in base alla quale Galileo ed Einstein - proprio perché, da scienziati e fisici *militanti*, si sono occupati di differenti ambiti di ricerca – sanno bene che non si può mai ridurre l’infinita ricchezza del procedere scientifico ad un solo ed unico metodo ideale. Anche perché l’esigenza cui sempre vuole rispondere ogni scienziato coincide con un *approfondimento critico continuo* della nostra conoscenza del mondo. Quindi ogni scienziato avverte direttamente – quasi sulla propria pelle – l’esigenza di aderire, quanto più

può, all'oggetto delle sue indagini. E per conseguire questo risultato di "aderenza" critica all'oggetto del suo studio ogni scienziato è allora capace di svolgere ed assumere qualsiasi "mossa" metodologica pur di poter approfondire la sua conoscenza del mondo. Del resto, proprio tematizzando il rapporto di fondo, sempre sussistente, tra scienza ed epistemologia, lo stesso Einstein ha finito per richiamare, strategicamente, un celebre e decisivo rilievo kantiano, onde sottolineare il preciso *tèlos* conoscitivo che sempre incalza ogni autentico scienziato. Einstein, nella sua *Replica alle osservazioni dei vari autori* (nel volume a lui dedicato, promosso e curato da Paul A. Schlippe, *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, apparso, nel 1949, nella famosa serie *The Library of Living Philosophers*) ha infatti scritto:

il rapporto reciproco fra epistemologia e scienza è molto importante. Esse dipendono l'una dall'altra. L'epistemologia senza contatto con la scienza diventa uno schema vuoto. La scienza senza epistemologia – se pure si può concepirla – è primitiva e informe. Ma non appena l'epistemologo, nella sua ricerca di un sistema chiaro, riesce ad aprirsi la strada verso di esso, è portato a interpretare il contenuto di pensiero della scienza secondo il suo sistema, e a rifiutare tutto ciò che al suo sistema non si adatta. Lo scienziato, però, non può spingere fino a questo punto la sua esigenza di una sistematica epistemologica. Egli accetta con riconoscenza l'analisi concettuale epistemologica; ma le condizioni esterne, che per lui sono date dai fatti dell'esperienza, non gli permettono di accettare condizioni troppo restrittive, nella costruzione del suo mondo concettuale, in base all'autorità di un sistema epistemologico. È inevitabile, quindi, che appaia all'epistemologo sistematico una specie di opportunista senza scrupoli: che gli appaia come un *realista*, poiché cerca di descrivere il mondo indipendentemente dagli atti della percezione; come un *idealista*, poiché considera i concetti e le teorie come libere invenzioni dello spirito umano (non deducibili logicamente dal dato empirico); come un *positivista*, perché ritiene che i suoi concetti e le sue teorie siano giustificati *soltanto* nella misura in cui forniscono una rappresentazione logica delle relazioni fra le esperienze sensoriali. Può addirittura sembrargli un *platonico* o un *pitagoreo*, in quanto considera il criterio della semplicità logica come uno strumento indispensabile ed efficace per la sua ricerca (Einstein 1958, 629-630, corsivi nel testo).

Se dunque per Kant concetti senza intuizioni sono vuoti, mentre intuizioni senza concetti sono cieche, per Einstein il medesimo rapporto si instaura tra scienza ed epistemologia: l'epistemologia deve avere come suo contenuto l'incedere scientifico, se non vuole trasformarsi in una riflessione, arbitraria, vuota, che parla del nulla; di contro, però, anche la scienza necessita della riflessione epistemologica, se non vuole chiudersi in un cieco prassismo del tutto acefalo. Ma entro questa fondamentale correlazione critica di ascendenza kantiana, lo scienziato non può neppure accettare una rigida distorsione epistemologica, ovvero quella, affatto unilaterale, che vor-

rebbe invariabilmente ridurre la scienza ad un solo ed unico modello metodologico ideale come quelli storicamente delineati dal realismo, dall'idealismo, dal positivismo, dal platonismo, dal pitagorismo *et similia*. *Contro* tutti questi differenti carceri "epistemologici", che finiscono per cristallizzare la scienza in un unico ed invariabile modello ideale, lo scienziato militante rivendica la sua piena libertà di ricerca, in nome della quale può sempre praticare scelte metodologicamente antinomiche e conflittuali – appunto quelle che lo fanno apparire, di volta in volta, come un realista, un idealista, un platonico, un pitagoreo, un positivista, etc. – pur di poter incrementare, continuamente, la sua conoscenza oggettiva del mondo reale.

Insomma, nella prospettiva einsteiniana – che risulta essere in sintonia di fondo con quella galileiana – lo scienziato può e deve sempre compiere tutte queste differenti e varie mosse metodologiche proprio perché la sua tensione massima è sempre volta all'approfondimento della conoscenza del mondo fisico. Come un innamorato è sempre disposto a compiere tutte le più diverse scelte strategiche – anche quelle eminentemente contraddittorie e paradossali – pur di conquistare la persona oggetto della propria profonda passione, in modo del tutto analogo lo scienziato appare, epistemologicamente parlando, *privo di scrupoli* pur di poter aderire, nel miglior modo possibile, all'oggetto fisico della propria indagine, onde poter incrementare la nostra conoscenza di questo aspetto particolare del mondo reale. Per questa ragione di fondo l'immagine ideale del procedere scientifico delineata da Galileo ed Einstein risultano essere in profonda sintonia epistemologica, proprio perché riconoscono sempre allo scienziato militante la possibilità di operare mosse metodologicamente diversificate – a seconda del differente ambito di indagine fisica – pur di poter incrementare la nostra conoscenza del mondo. Per Galileo ed Einstein la scienza non è così mai riducibile ad uno solo modello metodologico ideale, giacché il suo incedere conoscitivo si radica, semmai, entro una procedere assai complesso, che è sempre in grado di riformulare, dinamicamente e creativamente, i differenti rapporti prospettici che possono eventualmente instaurarsi tra le differenti polarità del *Lebenswelt*, degli assunti teorico-concettuali e del mondo delineato dall'orizzonte tecnologico-sperimentale. Ma proprio il valore euristico specifico complessivo dell'immagine galileiana ed einsteiniana della scienza ci costringe, allora, a meglio precisare anche l'importanza epistemologica della tecnologia.

4. Ruolo e funzione epistemologica della tecnologia

Il ruolo e la funzione strategica decisiva attribuita alla dimensione sperimentale-tecnologica del procedere scientifico così, come è stato delineato dall'immagine galileiana e da quella einsteiniana della scienza, impone di dedicare un'attenzione affatto specifica al problema epistemologico della tecnologia. In genere la tradizione della ricerca epistemologica ha rimosso sistematicamente questo problema, dedicando scarso o nullo interesse ad una riflessione sull'*oggetto tecnologico*. Il che appare abbastanza paradosso, proprio nella misura in cui, sempre più, oggi dobbiamo confrontarci con il paradigma delle tecno-scienze, ovvero con un paradigma conoscitivo entro il quale il rapporto tra la dimensione tecnologica e quella teorica appare sempre più inscindibile e irrinunciabile. Tuttavia, proprio questo aspetto di scarsa o nulla attenzione ai problemi della tecnologica ha contraddistinto buona parte della riflessione epistemologica. Se così ci si riferisce, per esempio, alla riflessione epistemologica del Novecento, da quella neopositivista a quella falsificazionista, da quella convenzionalistica a quella post-nepositivista, è veramente difficile negare come tutta questa pur feconda ed assai diversificata tradizione epistemologica abbia comunque messo capo ad una riflessione fortemente *teoreticista*, incapace di comprendere sistematicamente la funzione specifica e il ruolo strategico della tecnologia entro il procedere scientifico (per un approfondimento di questa tematica sia comunque lecito rinviare a Minazzi 1994b). Eppure una tale doverosa riflessione epistemologica sulla natura intrinseca della tecnologia dovrebbe invece senz'altro imporsi come fondamentale, strategica e veramente irrinunciabile, se solo si riflettesse che lo stesso Galileo, pubblicando il suo autentico capolavoro scientifico, ovvero i *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638) ha voluto aprire il suo testo con uno dei più profondi elogi del pieno valore culturale e filosofico della tecnica:

largo campo di filosofare a gl'intelletti speculativi parmi che porga la frequente pratica del famoso arsenale di voi Signori Veneziani, ed in particolare in quella parte che meccanica si domanda; atteso che quivi ogni sorte di strumento e di machina vien continuamente posta in opera da numero grande d'artefici, tra i quali e per l'osservazioni fatte da i loro antecessori, e per quelle che di propria avvertenza vanno continuamente per se stessi facendo, è forza che ve ne siano de i peritissimi e di finissimo discorso (Galileo, *Le opere, Edizione Nazionale*, VIII, 49).

La straordinaria bellezza letteraria di questo celebre passo e il suo carattere, culturalmente ed intrinsecamente rivoluzionario, riemergono con-

tinuamente da ogni parola. Galileo tesse infatti l'elogio della tecnologia - e, soprattutto, della pratica della «mecanica» - proprio perché riconosce alla tecnologia la capacità di offrire «largo campo di filosofare», perlomeno agli «intelletti speculativi», ovvero a quelli, per riprendere una immagine del *Saggiatore* che non volano a stormi, bensì sanno procedere in modo originale, da soli, come le aquile, e sono quindi in grado di pensare autonomamente con la propria testa, aprendo nuovi orizzonti di riflessione critica. Per comprendere tutta la distanza di Galileo dalla tradizione culturale egemonica nel mondo occidentale, basterebbe ricordare come questo elogio della «meccanica» entri in flagrante ed aperto conflitto con il tradizionale giudizio, perennemente svalutativo, del mondo dell'arte meccanica. Mentre la tradizione occidentale in genere connette alla meccanica un'immagine svalutativa ed axiologicamente negativa, Galileo afferma, al contrario, che proprio la riflessione sull'arte della meccanica offre un campo per le riflessioni più originali ed innovative, perlomeno agli intelletti «speculativi», ovvero a quegli intelletti che hanno la capacità di *saper pensare* in proprio.

Ma perché l'oggetto tecnico possiederebbe un autentico ed intrinseco *valore culturale*? Perché l'orizzonte della tecnologia – anche di quella meccanica – ci offrirebbe la possibilità di pensare, in positivo, a nuove ed originali costruzioni teoriche e teoretiche? Perché, infine, la tecnologia avrebbe una funzione strategica irrinunciabile per lo stesso sviluppo della conoscenza scientifica del mondo? Per cercare di rispondere a tutte queste domande, avendo sempre presente il problema di poter eventualmente delineare un'immagine corretta del procedere scientifico, occorre riflettere seriamente sulla natura specifica dell'oggetto tecnico. Per farlo prenderò spunto da una, peraltro assai famosa, definizione di Francis Bacon, il quale ultimo fu anche un autentico *buccinator* del valore rivoluzionario, e profondamente innovativo, della civiltà delle tecniche. Se infatti Bacon non delineò un'immagine rigorosa dell'effettivo procedere scientifico, tuttavia comprese invece benissimo la svolta storica epocale che la complessa civiltà delle scienze, realizzata dalle molteplici applicazioni tecnologiche, avrebbe ben presto determinato nella storia della modernità, come si è poi puntualmente verificato.

Da questo punto di vista Francis Bacon ha sottolineato come *natura nisi parendo vincitur: alla natura si comanda solo ubbidendole* (Bacon 1653, § 16). Ma perché alla natura “si comanda” solo ed unicamente “ubbidendole”? E cosa c’entra, a questo proposito, l’oggetto tecnico? Per comprendere come l’oggetto tecnico realizzi appieno questa celebre, per quanto apparentemente paradossale definizione baconiana, occorre naturalmente ben comprendere la natura *concettuale* dell’oggetto tecnico. Quest’ultimo, infatti, costituisce

un punto creativo, di mediazione decisivo, tra il mondo della natura – inteso da leggi “sorde et ineludibili”, ovvero “universalis e necessarie” – e il mondo umano del pensiero, della libertà, della creatività e della fantasia. Questi due mondi sono tra di loro antitetici, mentre l’oggetto tecnico – per sua intrinseca natura – costituisce proprio un decisivo e strategico “anello di congiunzione” tra il mondo della necessità (quello del mondo naturale) e il mondo della libertà (quello del pensiero). Infatti qual è la funzione precipua di un oggetto tecnico? È proprio quella di permetterci di conseguire un determinato fine rispettando, con rigore, le leggi naturali. Si pensi, per esempio, alla “vite di Archimede”: quest’ultima, sfruttando intelligentemente la legge di gravità – legge di cui, peraltro, Archimede non aveva alcuna effettiva conoscenza teorica – consente di innalzare l’acqua da un determinato livello più basso ad uno più elevato. In tal modo, senza mai violare le leggi di natura, ma, anzi, rispettandole sempre pienamente, l’oggetto tecnico ci permette di realizzare uno scopo che in natura non esiste. In questo caso riusciamo infatti a sollevare l’acqua ottenendo un effetto contrario al normale accadimento fisico. Ma riusciamo ad ottenerlo proprio perché rispettiamo, con rigore, le leggi naturali che, pure, sono utilizzate, con intelligenza e creatività, per conseguire un fine che, in natura, non esiste. L’oggetto tecnico è così in grado di instaurare una terza, nuova, dimensione che si colloca tra il mondo naturale e il mondo del pensiero. La tecnologia costruisce esattamente quel mondo di intermediazione tra mondo della natura e mondo della libertà, mediante la quale il nostro pensiero riesce a collocarsi *tra le pieghe* del mondo naturale dando vita ad un oggetto, al contempo *naturale ed artificiale*, che precedentemente non esisteva in natura. Da questo punto di vista l’oggetto tecnico si configura, allora, come l’intelligenza umana che, *tramite il lavoro*, si “oggettivizza” in un determinato oggetto tecnico-materiale. Meglio ancora: potremmo anche dire che un oggetto tecnico, perlomeno da questo punto di vista, si configura proprio come l’*intelligenza humana materializzata in un oggetto fisico*. Contrariamente a quanto sostiene una lungissima tradizione di pensiero, ancor oggi culturalmente egemone, la quale scorge invece nell’oggetto tecnico un prodotto che sarebbe in grado di impoverirci spiritualmente. Da questo differente punto di vista galileiano (e baconiano) l’oggetto tecnico si configura, al contrario, come una delle più significative realizzazioni dell’intelligenza umana proprio perché l’oggetto tecnico può essere visto e percepito come l’*intelligenza humana trasformata in una realtà fisica che, precedentemente, non esisteva*. Una nuova realtà fisica che si è “concretizzata” proprio seguendo un procedimento costruttivo che ha fatto leva, archimedea, sulle leggi della natura onde realizzare qualcosa che in natura non esisteva. In tal modo è proprio l’oggetto

tecnico che ci consente di introdurre nel mondo – anche e soprattutto nel mondo storico dell'uomo – uno strumento in grado di farci conseguire *livelli di libertà* precedentemente negati ed esclusi dal mondo della natura. Ma il bello è che questi nuovi livelli di libertà vengono conseguiti e raggiunti proprio rispettando, con rigore, le leggi naturali. Appunto, come mirabilmente affermava Bacon, *natura nisi parendo vincitur*.

Non è ora naturalmente possibile approfondire ulteriormente questo ambito di riflessione, invero strategicamente decisivo e veramente fondamentale (per uno studio del quale bisognerebbe perlomeno tener presente tanto le riflessioni di un autore come Ian Hacking 1983, quanto le fondamentali riflessioni di un grande filosofo della tecnologia come Gilbert Simondon 1958, 1964, 1989), tuttavia questo cenno sia sufficiente per comprendere la necessità di costruire una nuova e più articolata immagine del procedere scientifico, in grado di tener sempre presente il ruolo strategicamente fondamentale e decisivo che la tecnologia svolge sia all'interno dello sviluppo scientifico, sia in riferimento al continuo mutamento delle nostre stesse pratiche storico-sociali (per questi aspetti del dibattito epistemologico contemporaneo cfr. Carrozzini 2011, Petiot 2009 e Minazzi 2004 e 2006).

5. Alcune conclusioni epistemologiche

Naturalmente lo schema einsteiniano precedentemente considerato (cfr. § 3) può essere variamente complicato ed articolato (come è stato del resto proposto anche da qualche interprete). Ma non è ora il caso di seguire queste, pur opportune, “integrazioni”, perché è semmai meglio concentrarsi sul suo valore epistemologico intrinseco. Un valore intrinseco che ci fa scorgere, *in primis*, come si è accennato, la perfetta congruenza concettuale tra l'immagine galileiana e quella einsteiniana del procedere scientifico. Inoltre, come già accadeva anche per l'immagine galileiana della scienza, anche quella delineata da Einstein, ci consente di comprendere, a colpo d'occhio, la *dimensione concettuale* del procedere scientifico. La scienza si instaura, infatti, entro quel delicato e prezioso *spazio concettuale* che si delinea tra la polarità degli assiomi e quella della verifica sperimentale. Entro questa specifica e delimitata polarità si costruisce, appunto, l'intreccio critico specifico e concettuale di ogni singola disciplina scientifica. Proprio questo piano concettuale – sempre peculiare e proprio di ogni, pur assai differente, procedere scientifico – viene in tal modo posto in piena evidenza, andando decisamente contro tutti i riduttivismi (basterebbe pensare a quello, classico, proprio della tradizione dell'empirismo, che, in tutte le sue differenti va-

rianti – antica, medievale, moderna e contemporanea – ha sempre inseguito il sogno, peraltro affatto irrealizzabile, di poter ricondurre, *senza residui*, il piano del pensiero al piano dell’esperienza). Al contrario, lo straordinario disegno epistemologico einsteiniano ci ricorda – *visivamente!* – come questo riduzionismo dogmatico e acritico non possa mai essere realizzato, proprio perché cancella ed oblitera, unilateralmente, proprio la componente *concreta* del pensiero scientifico. Quest’ultimo non è mai riducibile alle esperienze – sia pure quelle sperimentali – proprio perché nasce, invece, dal particolare intreccio critico-problematico che instaura, autonomamente e creativamente, *in ogni specifica disciplina*, tra il piano del pensiero astratto e quello del *Lebenswelt* criticamente saggiato attraverso uno specifico apparato tecnico-sperimentale (che pone sempre in essere una determinata procedura di verifica o falsificazione delle conseguenze dei differenti apparati teorici).

Last but not least, lo schema einsteiniano pone anche in chiara evidenza come il punto di contatto tra un complesso apparato teorico, mediato dalla dimensione tecnologica, e il piano dell’esperienza sperimentale non ci consenta mai di fornirci una conoscenza “esaustiva” del mondo, perché, al contrario, ci consente solo di cogliere, per dirla con Leonardo da Vinci, qualche «filo di verità» del mondo stesso. Proprio perché ogni teoria scientifica - come anche ogni apparato sperimentale e tecnologico - finiscono per delineare i *confini precisi* di una determinata «ontologia regionale» (per rubare nuovamente una calzante, ma felice, espressione ad Edmund Husserl), mediante la quale costruiamo l’oggettività della conoscenza che può essere instaurata entro un determinato ambito disciplinare. Ma quest’ultimo non esaurisce affatto tutte le possibili e differenti conoscenze oggettive che l’uomo può elaborare al fine specifico di approfondire, costantemente e in modo innovativo e fecondo, la sua immagine conoscitiva del mondo.

In questa prospettiva le considerazioni di Galileo e di Einstein ci aiutano allora a meglio comprendere come non esista affatto “un metodo” e un modello ideale della scienza. Semmai, sembra essere vero esattamente il contrario: all’interno di ogni specifico e differente campo disciplinare lo studioso che vuol mettere capo ad una determinata conoscenza oggettiva (scientifica) del mondo è sempre costretto a farsi, autonomamente, le proprie categorie concettuali, i propri linguaggi, i propri criteri di verifica e anche quelli di falsificazione, nonché le proprie vie sperimentali, etc., onde riuscire effettivamente a costruire, *step by step*, una disciplina e delle teorie scientifiche in grado di approfondire, in quel determinato campo di indagine, la nostra conoscenza del mondo. Il che, come è agevole comprendere, ci deve allora indurre a ripensare anche alla tradizionale immagine

del sapere, avendo la capacità di riformulare i rapporti che si possono instaurare tra le differenti aree disciplinari, abbandonando ogni chiusura dogmatica e anche la presunzione epistemologica che possano davvero esistere discipline dotate di una presunta “superiorità” scientifica rispetto ad altri ambiti della conoscenza umana. Il che ci dovrebbe indurre a ripensare, *ab imis fundamentis*, la stessa storia del sapere umano, avviandoci a costruire una nuova e più feconda immagine della conoscenza umana, in grado di comprendere l’autonomia disciplinare che deve contraddistinguere ogni singola disciplina per il cui tramite l’uomo è infine riuscito ad uscire, storicamente, dalla barbarie del mondo ferino dal quale pure proviene.

Bibliografia

- Bacon, F., 1653, “Cogitata et Visa” in Ellis, R. L., Spedding, J. and Heath, D. D. (eds.), *The Works of Francis Bacon*, London 1857-59, 7 voll., vol. III, pp. 591-620 (*The Works* sono stati riediti nel 1887-92, nel 1962, da Friedrich Fromann Verlag, Stuttgart e, nel 1968, da Garret Press, New York).
- Calemme, A. (a cura di), 2013, *L’illuminismo prima dell’Illuminismo. Perché la Chiesa condannò Galilei*, Napoli, La Città del Sole.
- Carrozzini, G., 2011, *Gilbert Simondon filosofo della mentalità technique*, Milano-Udine, Mimesis.
- Descartes, R., 1637, *Discours de la méthode*, texte et commentaire par É. Gilson, Paris, Librairie Philosophique J. Vrin, 1987 (sixième édition).
- Einstein, A., 1951, *Albert Einstein: philosopher-scientist*, edited by Paul Arthur Schilpp, New York, Turdo Publ. Co.
- Einstein, A., 1958, *Replica alle osservazioni dei vari autori* in Einstein *et al.*, 1958, pp. 609-635.
- Einstein, A., 1988, *Opere scelte*, a cura di Enrico Bellone, Torino, Bollati Boringhieri.
- Einstein, A. *et al.*, 1958, *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, The Library of Living Philosophers, Evanston, Illinois, 1949, trad. it. di A. Gamba,

Albert Einstein scienziato e filosofo, a cura di P. A. Schlippe, Torino, Paolo Boringhieri.

Fano, V., Minazzi, F., Tassani, I. (a cura di), 2007, “Albert Einstein filosofo e metodologo”, *Il Protagora*, XXXV, gennaio-giugno, quinta serie, n. 9.

Feyerabend, P.K., 1975, *Against Method. Outline of an anarchistic theory of knowledge*, London, New Left Book.

Galilei, G., 1968, *Le opere di Galileo Galilei*, ed. naz. a cura di A. Favaro, Firenze, Barbèra, voll. 20.

Hacking, I., 1983, *Representing and Intervening*, Cambridge, Cambridge University Press.

Minazzi, F., 1994a, *Galileo «filosofo geometra»*, Milano, Rusconi.

Minazzi, F., 1994b, *Il flauto di Popper*, Milano, Franco Angeli.

Minazzi, F., 2004, *Teleologia della conoscenza ed escatologia della speranza. Per un nuovo illuminismo critico*, Napoli, La Città del Sole.

Minazzi, F., 2006, *L'Épistémologie comme herméneutique de la raion*, Paris-Naples, Vrin-La Città del Sole.

Minazzi, F., 2007, “Albert Einstein epistemologo”, in Fano, V., Minazzi, F., Tassani, I. (a cura di), 2007, pp. 115-151.

Minazzi, F. (a cura di), 2010, “Kant e il problema del trascendentale”, *Il Protagora*, XXXVII, gennaio-giugno, sesta serie, n. 13.

Minazzi, F., 2013, *Alcune brevi considerazioni su Galileo e il significato della sua opera*, in Calemme, A. (a cura di), 2013, pp. 181-196.

Pera, M., 1991, *Scienza e retorica*, Roma-Bari, Laterza.

Petitot, J., 2009, *Per un nuovo illuminismo. La conoscenza scientifica come valore culturale e civile*, Prefazione, cura e trad. dal francese di F. Minazzi, Milano, Bompiani.

Forecasting the Future

- Simondon, G., 1958, *Du Mode d'existence des objects technique*, Paris, Aubier-Montaigne (riedito nel 1989).
- Simondon, G., 1964, *L'Individu et sa genèse psycho-biologique*, Paris, Presses Universitaires de France.
- Simondon, G., 1989, *L'Individuation psychique et collective*, Paris, Aubier.

Aspetti di un dibattito in Francia sulla natura del determinismo

Mario Castellana
Università del Salento
mario.castellana@unisalento.it

Per comprendere meglio il senso dei dibattiti avvenuti su rilevanti questioni di natura filosofico-scientifica come il determinismo, specialmente quando si verificano dei cambiamenti strutturali come nel caso della seconda metà dell’Ottocento, forse può essere utile il ricorso alla storia della filosofia della scienza,¹ che ci permette di situare nel loro giusto contesto l’emergere di rilevanti questioni epistemologiche. Questo approccio di storiografia epistemologica si rivela ancora più necessario se si vuole studiare il periodo in cui la filosofia della scienza, pur fra molteplici contraddizioni, ha messo le sue radici, cioè quando di fronte alle dinamiche concettuali innescate dallo sviluppo della conoscenza scientifica sono sorte una pluralità di ottiche e di strategie teoriche finalizzate alla sua comprensione critica. Nello stesso tempo occorre tenere metodologicamente presente che quello che Pierre Duhem e successivamente Ludovico Geymonat hanno chiamato «patrimonio scientifico-tecnico»², ha prodotto contestualmente un vero e proprio «patrimonio epistemologico»³, un autentico e particolare «arsenale epistemologico-ermeneutico» per una serie di «strumenti forgiati» al suo interno, a dirla con Dario Antiseri.⁴ Come tale esso è stato ed è un «laboratoire de pensée», finalizzato a cogliere la dimensione filosofica della scienza

¹ Cfr. Parrini (1983), Laudan (1984), Oldroyd (1989), Brenner (2003).

² Duhem (1906, trad. it. 293) e Geymonat (2006, 76).

³ Castellana (1990 e 2012).

⁴ Antiseri e Reale (2001, 226).

ed il pensiero implicito, la «*pensée des sciences*»⁵ secondo l’accezione data a questa espressione da Gaston Bachelard in varie sue opere.

Il notevole sviluppo del patrimonio epistemologico, a partire dagli ultimi decenni dell’Ottocento, ha reso necessario farne criticamente la storia delle varie e non omogenee vicende che l’hanno contraddistinto attraverso diverse modalità; un modo storiografico può essere, ad esempio, l’analisi dei dibattiti su una particolare e rilevante questione, com’è stata quella relativa al determinismo, le cui ottiche interpretative ne hanno scandito le varie tappe con l’indicazione di precisi orientamenti venuti a maturazione in momenti e contesti diversi. Studiare, pertanto, l’evoluzione dei dibattiti su un problema scientifico, significa a volte comprendere le «svolte» in senso *schlickiano* operate all’interno della filosofia della scienza, e prendere coscienza, a dirla con Federigo Enriques, dello stesso «travaglio dei concetti» in ambito propriamente epistemologico, simile a quello che ha caratterizzato l’impegno degli «scienziati-pensatori»⁶ dell’Ottocento. Nello stesso tempo, inoltre, la lezione metodologica che può dare la storia della filosofia della scienza, come d’altronde ogni autentica ricerca storica, è la presa d’atto della pluralità di ottiche che emergono nell’analisi di un fatto, dell’inadeguatezza strutturale delle interpretazioni unilaterali che hanno assolutizzato un aspetto sia pure importante della conoscenza scientifica ed emarginato un altro venuto a maturazione epistemica in seguito dopo alterne vicende. Il presente contributo si concentra su alcuni momenti significativi del dibattito epistemologico francese fra Ottocento e Novecento, che ha trovato nella centralità assegnata alla questione del determinismo un elemento costante di riflessione, pur nella inevitabile varietà di posizioni; tale varietà di posizioni ha contribuito, sia pure in maniera contraddittoria, allo sviluppo e all’affermazione di un capitolo importante della filosofia della scienza, la filosofia della fisica come un campo di indagine autonomo e nello stesso tempo strategico per questo sapere, per aver messo al centro del dibattito, sin dalle teorie del secondo Ottocento alla stessa meccanica quantistica, il problema della natura del reale fisico e della sua intelligibilità.

⁵ L’espressione *pensée des sciences* compare soprattutto in *La Philosophie du non* del 1940 e cfr. Bachelard (1940, cap. I). In Francia, sulla scia dell’epistemologia bachelardiana, Charles Alunni ha fondato il *Laboratoire Disciplinaire “Pensée des sciences”* con lo scopo di «elaborare un pensiero delle scienze che sia riconosciuto dalle stesse scienze come un pensiero che si elabora al loro interno» e cfr. Alunni (1999, 7-15). Ma da un punto di vista storico è bene precisare che già nel 1912 Federigo Enriques, in *Scienza e Razionalismo*, parlava di una vera e propria «filosofia implicita» nella scienza e di «pensiero scientifico» in *Significato della storia del pensiero scientifico* del 1934; cfr. Enriques (1990, 145 e 1934) e su questo cfr. Castellana (2007 e 2012).

⁶ Enriques (1912, 286).

Se l'epistemologia francese nel suo complesso ha preso, in seguito, una strada diversa da quella anglosassone pur avendo dato diversi contributi allo sviluppo stesso di quest'ultima⁷, ciò è dovuto al fatto che è pervenuta a delineare una curvatura teorica incentrata sulla necessità di interrogare il reale fisico nella sua struttura concettuale e ontologica, assegnando alla matematica un ruolo quasi fondante. La questione del determinismo si inquadra in questo contesto concettuale, rivolto a comprendere la struttura della conoscenza scientifica e gli sforzi tesi alla razionalizzazione del reale. Nello stesso tempo, in Francia, grazie a quello stretto legame fra indagine teorica e approccio storico nell'analisi dei problemi, già a partire da Comte, sono stati sempre ben messi in evidenza quei legami epistemologici, in una determinata epoca, fra concezione del determinismo e visione della scienza. I confini fra l'aspetto metodologico e l'aspetto ontologico a volte si sovrappongono, a volte sono tenuti separati oscillando fra un ambito più strettamente scientifico e un ambito più filosofico, anche se il punto di riferimento rimane costantemente ciò che avviene nel pensiero fisico, per il semplice fatto che sono stati gli stessi scienziati, com'è noto, come Laplace, Bernard e lo stesso Poincaré,⁸ a considerare il determinismo quasi come una esigenza razionale di fondo, come una credenza spontanea al di là dei fatti sperimentali. Infatti, sin dall'inizio, il dibattito si è concentrato sulla natura dei fenomeni corpuscolari e dei fenomeni ondulatori, investendo in pieno la questione del determinismo, come afferma Gaston Bachelard molto sinteticamente: «il problema del realismo delle onde e dei corpuscoli va perciò confondendosi a poco a e a poco col problema del determinismo e della probabilità»⁹.

Ancora è lo stesso Bachelard che con questa perentoria affermazione, «Il determinismo è sceso dal cielo in terra»,¹⁰ nell'opera del 1934 *Le nouvel esprit scientifique*, così riassume parte della storia concettuale del determinismo, la cui radice originaria viene trovata nell'ambito dell'astronomia,

⁷ Cfr. Parrini (1983) e Brenner (2003).

⁸ Riportiamo, come esempio paradigmatico, la nota affermazione di Henri Poincaré: «La scienza è determinista e lo è *a priori*; essa presuppone il determinismo perché senza non potrebbe esistere»; cfr. Poincaré (1922, 244).

⁹ Bachelard (1934, trad. it. 142).

¹⁰ Bachelard (1934, trad. it. 144). In quest'opera c'è un ampio capitolo dedicato alla questione del determinismo e dell'indeterminismo, dal significativo titolo *Determinismo e Indeterminismo. La nozione di oggetto*. Ma tale problematica ha attraversato l'intero suo percorso epistemologico sin dall'*Étude sur l'évolution d'un problème de physique. La propagation thermique dans les solides* del 1927 ad una delle sue ultime opere *L'activité rationaliste de la physique contemporaine* del 1951, dove l'ultimo capitolo ha come titolo *Déterminisme rationnel et déterminisme technique*.

dove l’osservazione della ripetizione continua dei movimenti dei corpi celesti ha portato sin dall’antichità a supporre l’esistenza di leggi eterne e naturali. Nostro compito è chiarire il senso di questa affermazione di Bachelard che trova il suo significato all’interno dei diversi suoi contributi alla filosofia della fisica e soprattutto allo statuto epistemologico della fisica-matematica¹¹. La fisica matematica in Francia, com’è noto, da Lagrange e Laplace sino a Fourier, Ampère, Lamé, ha avuto una lunga tradizione e ha determinato un ampio dibattito sulla sua struttura concettuale con particolari echi nel *Cours de philosophie positive* di Comte, nella ventottesima Lezione soprattutto, continuata poi nel primo Novecento con Paul Langevin e De Broglie, sino agli approfondimenti più filosofici di Albert Lautman negli anni ‘30 e quelli più recenti di Gilles Châtelet¹². Questa frase bachelardiana ci aiuta a capire meglio l’esito di un percorso filosofico-scientifico più generale avvenuto in Francia fra Ottocento e Novecento, unico nel suo genere, che ha visto protagonisti filosofi e soprattutto grandi figure di scienziati, dapprima come Claude Bernard e Cournot e poi come Pierre Duhem ed Henri Poincaré. Essi infatti s’impegnarono in serrati approfondimenti dei cambiamenti scientifici in atto, tutti accomunati però, al di là dei rispettivi interessi di ricerca, dalla necessità di elaborare un nuovo punto di vista in grado di coglierne più adeguatamente la portata conoscitiva e le varie articolazioni filosofiche, etiche e metafisiche. Come dirà lo stesso Bachelard in una delle sue ultime opere epistemologiche, *Le Rationalisme appliqué* del 1949, nel commentare un’opera di Priestley, «nel regno del pensiero scientifico, ogni *rischio* è metafisico in quanto impegna sia la metafisica del pensiero e sia la metafisica della realtà»¹³.

Il determinismo, prima nelle sue formulazioni filosofiche e poi nell’ambito dei processi fisici nella dinamica, con le equazioni differenziali del moto, come dirà Federigo Enriques nella sua ultima opera del 1941

¹¹ Cfr. Castellana (1974 e 1986).

¹² È stato Léon Brunschwig ad evidenziare come Lagrange e Laplace e sulla loro scia Comte, per il comune insistere sulla matematizzazione della meccanica, abbiano reso la visione deterministica del mondo uno strumento di profonda intelligibilità quasi universale; per una visione d’insieme della situazione francese dell’Ottocento relativa ai dibattiti sui rapporti fra matematiche e fisica, cfr. Brunschwig (1912, 285-289) e Bachelard S. (1958). Per il dibattito nel primo e secondo Novecento, occorre tenere presenti i lavori di Albert Lautman degli anni ‘30 e quelli più recenti di Gilles Châtelet e cfr. Lautman (2006), Châtelet (1993 e 2010) e su Suzanne Bachelard, Châtelet e Lautman, cfr. Castellana (2004, capp. VI-VI).

¹³ Bachelard (1949, 47).

*Causalità e determinismo nella filosofia e nella storia della scienza*¹⁴, è stato a tal proposito sino alla seconda metà dell'Ottocento il prototipo di pensiero unificante delle due metafisiche, quella della realtà e quella del pensiero, dove l'uno legittimava l'altra, che a sua volta ne garantiva l'oggettività. Il grande dibattito che avverrà in Francia e non solo, preceduto però da quello sulla struttura concettuale delle geometrie non euclidee, sulla teoria cinetica dei gas, sulla termodinamica e sulle teorie dell'energetismo nello loro scansioni fisiche e chimiche, sostanzialmente ha mirato, da parte di tutti gli attori in causa, a comprendere come tali teorie del pensiero fisico abbiano scalfito tale unità, abbiano rotto sia a livello metodologico e sia a livello più ontologico le univoche e evidenti articolazioni lineari. Si può dire, senza esagerare, che su tali problematiche dove la questione del determinismo è centrale, si sviluppa in Francia un vero e proprio filone del pensiero epistemologico, un vero e proprio capitolo di filosofia della fisica, prima con il lavoro più noto di Duhem *La théorie physique* del 1906, poi con Abel Rey e i suoi lavori *La théorie de la physique chez les physiciens contemporains* e *L'énergétique et le mécanisme au point de vue des conditions de la connaissance*, entrambi del 1907, sino a *Réel et déterminisme dans la physique quantique* del 1933 di Émile Meyerson, e agli scritti di Bachelard, molti dei quali dedicati all'approfondimento delle conseguenze filosofiche della relatività e della meccanica quantistica, come *La valeur inductive de la relativité* del 1929, *Les intuitions atomistiques* del 1933 e *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine* del 1937.

Per poter capire l'affermazione bachelardiana iniziale, occorre tenere presente che in Francia, più che in altre tradizioni di ricerca, sono gli stessi scienziati che riflettono criticamente sui cambiamenti in atto e sul senso filosofico di tali cambiamenti; essi, infatti, affrontano problemi cruciali di quella che sarà in seguito la filosofia della scienza, introducono anche concetti di carattere più propriamente epistemologico. Essi spingono i filosofi di professione a porsi le loro stesse domande, i quali sono costretti a prendere atto della crisi irreversibile delle vecchie categorie filosofiche e della loro inadeguatezza strutturale; ad esempio Antoine-Augustin Cournot afferma: «le crisi rinnovatrici delle scienze sono le sole crisi utilmente rinnovatrici della filosofia»¹⁵. Di fronte ad una tale affermazione di uno scienziato come

¹⁴ Enriques (1941, trad. it. 55). Ricordiamo che quest'opera fu scritta direttamente in francese da Enriques e poi pubblicata in italiano nel 1946.

¹⁵ Cournot (1851, vol. I, 3). La teoria probabilistica del caso fu oggetto di diversi dibattiti incentrati per lo più su rilevanti questioni di natura metodologica e lo stesso Cournot nelle sue opere di carattere filosofico ne dava una interpretazione che andava già al di là della stessa impostazione positivistica fornendo così strumenti più appropriati per riannodare su

Cournot, ben consci dei cambiamenti in atto e del conseguente, necessario rinnovamento filosofico, alcuni filosofi, come Boutroux e Le Roy ad esempio, accettano la sfida e si rendono conto che devono farsi interpreti di tale rinnovamento. Si impegnano, infatti, nell'elaborazione di una “*nouvelle philosophie*” sino ad arrivare in alcuni casi a posizioni più radicali, come ad esempio l'affermazione che la filosofia deve essere espressione di tale cambiamento di paradigma, anzi essa risiede nelle novità scientifiche emergenti e, come diranno i neopositivisti logici e lo stesso Bachelard più tardi, essa deve essere contemporanea delle scienze per esplicitarne le dimensioni concettuali implicite.

Émile Boutroux nei suoi vari scritti, già a partire dal 1874 nell'opera più famosa *De la contingence des lois de la nature* e poi soprattutto in quella del 1895 *De l'idée de loi naturelle dans la science et la philosophie contemporaines*, analizza le nuove meccaniche, le varie teorie fisiche e trova in esse, sia pure articolato in maniera diversa, il tema della crisi della visione deterministica e soprattutto le modalità del suo superamento, la rottura dell'equazione filosofica del determinismo identificabile con la natura e il reale in generale. La critica della necessità delle leggi naturali procede, come è stato messo in evidenza da alcuni studi recenti sul pensiero di Boutroux¹⁶, attraverso un confronto diretto con ciò che succede nelle scienze matematiche, fisiche e biologiche: il ruolo dell'intuizione in mate-

nuove basi il rapporto fra scienza e filosofia. Opere come *l'Essai sur les fondements de nos connaissances et sur les caractères de la critique philosophique*, *Traité de l'enchaînement des idées fondamentales dans les sciences et dans l'histoire*, *Considérations sur la marche des idées et des événements dans les temps modernes* inaugurano quasi, sino a diventarne parte integrante, quel vasto e contraddittorio movimento di *critique des sciences* che si sviluppò in Francia nella seconda metà dell'Ottocento e hanno dato molti spunti al dibattito filosofico sia nei suoi percorsi più orientati in senso epistemologico e sia in quelli di natura più etica e metafisica; ma in questo periodo questi due momenti e aspetti della riflessione filosofica sono strettamente intrecciati, sia perché sono gli stessi scienziati che a volte si impegnano in tal senso e sia perché gli stessi filosofi avvertono la stretta dipendenza fra i due momenti al di là delle loro preoccupazioni sia esse orientate sul versante metodologico o sul terreno metafisico. I contributi di Cournot hanno avuto un ruolo decisivo nello sviluppo dell'approccio epistemologico sia perché hanno chiarito la necessità di una riflessione critica sui fondamenti delle scienze e sia perché hanno preparato il terreno per una svolta postpositivista per l'importanza accordata al ruolo delle ‘idee’ e del teorico nella costruzione scientifica; cfr. Cournot (1851, 1861, 1872) e su Cournot, cfr. Milhaud (1927) e Callot (1960).

¹⁶ Cfr. Polizzi (1984) e Bordoni (2013, capp. II-III). In questo dibattito occorre tenere presente anche la figura del matematico Joseph Boussinesq, autore di diversi scritti sul determinismo, come l'opera del 1878 *Conciliation du véritable déterminisme mécanique avec l'existence de la vie et de la liberté morale* e *Études sur divers points de la philosophie des sciences* del 1879.

matica e la sua irriducibilità a leggi logiche predeterminate, come pensavano molti matematici francesi, e l'incommensurabilità fra le leggi fisiche e il linguaggio matematico. Nello stesso tempo viene sottolineata l'incompatibilità fra termodinamica e teoria meccanica dei gas, per l'introduzione dell'elemento qualitativo presente nel principio di Clausius. Scrive Boutroux:

Abbiamo notato che i fisici dubitano oggi di poter ridurre tutti i fenomeni al movimento. Ci sono persino matematici che ritengono i due principi della termodinamica incompatibili col meccanismo. L'energia che si conserva cambia in pari tempo di natura, e la sua qualità va sempre diminuendo. In realtà, il principio di conservazione dell'energia è piuttosto *uno stampo di leggi che una legge unica e determinata.*¹⁷

Boutroux prende atto del progressivo depotenziamento del determinismo fisico anche per l'introduzione delle leggi statistiche e nello stesso tempo, grazie allo studio dei fenomeni calorici, arriva a mettere in evidenza la complessità, la poliedricità e la contingenza del mondo fisico sino a sottolineare il carattere puramente metodologico di quelle che vengono chiamate "leggi di natura": «Ciò che chiamiamo leggi della natura è l'insieme dei metodi che abbiamo trovato per adattare le cose alla nostra intelligenza e piegarle a compiere la nostra volontà»¹⁸.

L'interpretazione contingentista delle leggi di natura trova dunque la sua legittimità nei saperi scientifici che stanno emergendo; se la visione classica dava un fondamento univoco al determinismo filosofico, e questo a sua volta ne forniva le ragioni teoretiche, in questo periodo il lavoro filosofico serve a chiarire il senso del cambiamento in atto, a prendere coscienza del livello metodologico e della libertà da parte del soggetto conoscitivo di predisporre gli strumenti più appropriati nell'indagine del reale fisico. Non è facile districarsi in questo intreccio filosofico-scientifico approntato da Boutroux e la sua "*critique des sciences*" non è diretta contro la scienza fisica come tale, ma a smontare il modello di fondo su cui essa sino allora si era retta, modello di fondo messo in crisi dall'emergere in essa di nuove modalità operative per la presenza di elementi qualitativi non inquadrabili in schemi rigidi e predeterminati sino ad arrivare, come dice Enriques a rappresentare la realtà come una serie discontinua di dati¹⁹. Gli orientamenti scientifici contemporanei per Boutroux per l'introduzione di punti di vista indeterministici nelle varie scienze rafforzano l'idea della convenzionalità e

¹⁷ Boutroux (1895, 54-55).

¹⁸ Boutroux (1895, 129).

¹⁹ Enriques (1912, 259).

della contingenza delle leggi, mettono in ulteriore difficoltà il concetto di necessità causale; e come dirà Federigo Enriques sulla sua scia più in là²⁰, molti errori della filosofia classica e di quella di fine Ottocento derivano dall'aver confuso la necessità e il determinismo, confusioni oggetto di analisi critiche da parte di Boutroux, condivise poi anche dallo stesso Bachelard. Non a caso saranno oggetto di approfondimento sia da parte di Enriques che di Bachelard le indicazioni presenti nella seguente affermazione di Boutroux:

Bisogna stare attenti a non confondere determinismo e necessità: la necessità esprime l'impossibilità che una cosa sia diversamente da quella che è; il determinismo esprime l'insieme delle condizioni che fanno sì che il fenomeno deve essere posto per quello che è con tutti i suoi modi di essere. La legge di conservazione è una legge di necessità astratta, ma non una legge deterministica; d'altra parte, ogni legge che come il principio di Clausius regola la distribuzione della forza è una legge deterministica, ma è e rimane esclusivamente sperimentale.²¹

Pertanto si può dire che la “*critique des sciences*” avanzata da Boutroux e da altri in quel periodo non era finalizzata alla critica della scienza in quanto tale, ma alla critica di alcune interpretazioni filosofiche di essa e alla loro inadeguatezza strutturale; la critica severa al principio di causalità e al determinismo meccanicista gli serve per liberare questi concetti da interpretazioni unilaterali e riduzionistiche e di ricollocarli nel loro più giusto alveo scientifico e metodologico. Nello stesso tempo Boutroux tiene a sottolineare, attraverso lo studio delle leggi di cambiamento introdotte dalla termodinamica e dalle ricerche sul magnetismo, la crisi di quella che chiama «intelaiatura meccanicistica» (si noti qui la concordanza con l'intelaiatura “logica” di Hilbert) per la presenza di una fenomenologia che tende a sfuggirle, dove avviene sempre più una estensione progressiva del determinismo sperimentale. Il determinismo così, cambia senso e come dirà Bachelard, è proprio quando un concetto cambia senso che acquista più senso²², in quanto viene a perdere il suo significato astratto, astorico, metafisico per assumere un senso storico e metodologico, più delimitato ma più scientifico; esso lascia il cielo e la sua immutabilità e sulla terra acquista diverse fisionomie concettuali nelle varie configurazioni teoriche del pensiero fisico e di altre che potranno svilupparsi anche grazie a questa maggiore libertà di movimento conquistata. Il determinismo così perde fissità e astrattezza,

²⁰ Enriques (1941, 57).

²¹ Boutroux (1895, 58).

²² Cfr. Bachelard (1934, trad. it. 87).

diventa sperimentale, acquista libertà operativa e contingente, permette una fenomenologia più ricca. Scrive Boutroux a tal proposito:

Riassumendo, la considerazione delle leggi fisiche, paragonata alla considerazione delle leggi puramente meccaniche, segna un progresso nel determinismo, nel senso che certi modi d'essere, che la meccanica lasciava indeterminati, si trovano ora spiegati secondo leggi. Ma il determinismo, restringendosi, diviene più complesso e più oscuro, e meno riducibile a quel legame analitico che solo sarebbe necessario.²³

Nello stesso tempo si prende coscienza epistemica dei diversi determinismi a cui le singole scienze approdano e l'analisi storico-critica di tali varie modalità permette il formarsi di un modo di operare antiriduzionistico che per Boutroux deve costituire l'essenza della conoscenza scientifica:

In sintesi, le leggi della fisiologia sembrano essere irriducibili. Il determinismo fisiologico, considerato in se stesso, differisce da quello fisico-chimico, come questo differiva da quello puramente meccanico; è più limitato perché regola dei fenomeni che le leggi fisico-chimiche lasciano indeterminati. Ma si basa su una nozione di legge più complessa e più oscura in quanto è in relazione ad un fatto, non solo con un altro fatto, ma con un fatto finalizzato al primo. Il determinismo, rinserrandosi, diviene più impenetrabile e più irriducibile alla necessità.²⁴

Al di là poi delle considerazioni filosofiche più generali che sfoceranno, com'è noto, nel contingentismo come filosofia della libertà, ciò che occorre evidenziare è il peso epistemico di queste analisi di Boutroux²⁵, i cui studi di *critique des sciences* appartengono chiaramente a quella che in Francia stava diventando la *philosophie des sciences*²⁶, dove innanzitutto si pren-

²³ Boutroux (1895, 57-58) corsivo nostro .

²⁴ Boutroux (1895, 82).

²⁵ Bordoni parla di una sofisticata filosofia della scienza presente in questo periodo e soprattutto in Boutroux; cfr. Bordoni (2013, cap. III).

²⁶ Innanzitutto dal punto di vista storico, il termine *philosophie des sciences* è anteriore a quello di *critique des sciences* e trova le sue radici nelle diverse forme che prese il dibattito sulla newtoniana *philosophia naturalis* verso la fine del '700, quando si svilupparono la *philosophie mathématique*, la *philosophie géométrique*, la *philosophie biologique*, la *philosophie zoologique*, la *philosophie chimique*, la *philosophie sociale*, la *philosophie économique*, la *philosophie pénale*, ecc. Nel *Cours de philosophie positive*, infatti, essa appare come anche in Ampère, ed è intesa, com'è noto, quasi nel senso di una classificazione delle scienze in base al loro grado di matematizzazione secondo il modello della *Meccanica analitica* di Lagrange, tenuto presente da Comte il cui positivismo, come dice Brunschvicg, ne è la coscienza filosofica più matura. La *Critique des sciences* sorge in seguito all'avvento delle geometrie non euclidee e poi delle nuove teorie fisiche e gli ampi dibattiti che ne scaturirono vengono quasi a coincidere con la *philosophie des sciences* sino

deva coscienza della pluralità delle scienze e quindi dell'impossibilità di avere della conoscenza scientifica una visione generale e unilaterale magari col privilegiare una scienza sia pure importante a scapito delle altre; e poi soprattutto data la stessa pluralità degli approcci interni ad ogni singola scienza, era ritenuto necessario basare la loro interpretazione su più punti filosofici data la ricchezza concettuale implicita in ogni teoria scientifica. In questo periodo, in Francia, stava emergendo anche grazie all'impostazione comtiana la necessità della storia delle scienze e questo approccio, insieme storico ed epistemologico, portava inevitabilmente a non usare più la parola *scienza*, ma *scienze*; quindi il termine *philosophie des sciences* non stava a significare solo una generica presa d'atto dell'esistenza delle diverse scienze, ma era frutto di un percorso teoretico che, grazie all'analisi dei loro diversi metodi ed elementi teorici, era arrivata a delineare un'idea di conoscenza scientifica non unilaterale e aperta a più dimensioni storico-concettuali. Nello stesso tempo questi studi di *philosophie des sciences* non è che non prendevano in considerazione il grande tema dell'unità della scienza, che verrà, com'è noto, a maturazione in seguito col neopositivismo logico, ma ne davano una particolare configurazione teorica fatta consistere nella loro dimensione propriamente conoscitiva, storica e concettuale, oggetto specifico della riflessione filosofica; questa a sua volta, facendo tesoro della loro pluralità, doveva acquisire una coscienza epistemica del fatto che non esiste la scienza in senso generale, ma le scienze nel loro concreto e diverso modo di produrre conoscenze.

Boutroux, insieme ad altri, contribuisce a superare l'unilateralità dell'approccio positivistico nella *philosophie des sciences* liberandola definitivamente da posizioni ingenue e da punti di vista dogmatici; e alcuni dei suoi risultati epistemologici, combinati con quelli successivi di Brunschvicg²⁷, permetteranno poi a Bachelard di dare alla stessa *philosophie des sciences* una diversa configurazione teorica, una consistenza più organica e legittimarla sul piano degli sviluppi delle scienze del primo Novecento con la critica severa dei punti di vista normativi che tendevano a costruire

a incorporarsi in essa col modificarla radicalmente rispetto a quella comtiana, creando così le basi di quella che sarà l'epistemologia storica francese degli anni '30. Ad esempio, Cournot usa il termine *philosophie des sciences* già in senso post-positivista negli anni '60, come altri autori poco dopo e cfr. Cournot (1861), Boussinesq (1879), Naville (1883), Berthelot (1886), Boutroux (1895); nei loro lavori la *critique des sciences* viene ad identificarsi con la *philosophie des sciences* come d'altronde nelle opere di Duhem e Poincaré.

²⁷ Cfr. Brunschvicg (1912 e 1922) e su Brunschvicg filosofo della fisica matematica post-convenzionalista, cfr. Castellana (2004, cap. III).

modelli di scientificità astorici coll'assolutizzare momenti e procedure di una determinata scienza sia pure importanti. L'impegno bachelardiano era rivolto a comprendere il senso delle rivoluzioni scientifiche, considerate delle vere e proprie «rivoluzioni della ragione» e la stessa *philosophie des sciences* doveva mirare all'analisi del «mobile scientifico»²⁸ e dei suoi continui cambiamenti strutturali col modificare ogni volta le modalità interpretative messe in atto; nello stesso tempo era ritenuto necessaria un'analisi mirante allo studio della costituzione dello *spirito* scientifico e delle forme di razionalità elaborate in base al suo sviluppo. Tutte le sue opere chiariscono lo stesso carattere *mobile* della riflessione epistemologica, il carattere polimorfo e «ouvert de la philosophie des sciences»²⁹ per la presa di coscienza dei continui *non* in atto nelle singole scienze; esse, così, arrivano a tracciare un percorso più di natura strettamente metodologica rivolto a chiarire le modalità conoscitive dello «spirito scientifico moderno», una volta individuazione quello che chiama «piano psicologico complesso»³⁰ dei principi di fondo che lo hanno sorretto.

Anche la questione del determinismo, come poi quella dell'indeterminismo, viene inserita in tale piano psicologico per spiegare la genesi dello spirito scientifico e le ragioni che portano al suo continuo cambiamento. Ma il determinismo, come poi l'indeterminismo, per evitare fraintendimenti concettuali sempre in agguato nella riflessione filosofica vittima di punti di vista generali³¹, vengono collocati e incentrati all'interno della storia della fisica matematica che ha trovato nello sviluppo dell'astronomia moderna il suo primo fondamento. Bachelard ne indaga la filosofia che ha fatto da supporto, la «filosofia del cielo stellato, la quale insegna all'uomo la legge fisica nei suoi caratteri d'obiettività e di determinismo assoluti»³². Nello stesso tempo le prime formulazioni del determinismo erano dovute all'intuizione delle forme semplici del reale, della prima geometrizzazione che forniva uno strumento formidabile teso alla comprensione dell'ordine di fondo del reale attraverso la sicurezza dei legami matematici e delle simmetrie. Così Bachelard descrive l'origine del determinismo nelle due variabili, scientifica e filosofica:

²⁸ Bachelard (1949, 45) e sul razionalismo bachelardiano come filosofia del «mobile scientifico», cfr. Castellana (2004, cap. VI).

²⁹ Bachelard (1940, 15).

³⁰ Bachelard (1934, trad. it. 143).

³¹ Bachelard parla di «filosofia generale e integrale dei filosofi» che porta sistematicamente alla deformazione dei concetti scientifici e cfr. Bachelard (1940, cap. I).

³² Bachelard (1934, trad. it. 144).

È, tale astronomia, quella che ha fondato la Fisica matematica moderna. I fenomeni astronomici rappresentano, in qualche modo, la forma più obiettiva e più strettamente determinata dei fenomeni fisici. L’astronomia è pertanto la conoscenza più adatta a dare allo spirito scientifico abitudini fondamentali, forme che, non essendo aprioristiche nella percezione, potrebbero in modo abbastanza proprio esser dette *a priori* nella riflessione. Così, a voler seguire lo sviluppo dell’astronomia fino al secolo scorso, possiamo renderci conto del doppio senso implicito nel Determinismo, preso ora come un carattere fondamentale del fenomeno, ora come forma *a priori* della conoscenza obiettiva. Spesso la confusione che si verifica nelle discussioni filosofiche è dovuta al passaggio surrettizio dall’uno all’altro senso [...] Il Determinismo poteva imporsi soltanto mediante una matematica veramente elementare. La matematica elementare è quella che ha rinforzato con una specie di laccio di necessità il vincolo costante presentato apparentemente dall’empirismo più o meno semplificato. All’osservazione più o meno esatta veniva ad aggiungersi una previsione più o meno precisa per fondare di diritto e di fatto il Determinismo.³³

Gli sviluppi dell’Ottocento e le analisi di Boutroux permettono di capire la dimensione psicologica del determinismo, il suo essere stato a lungo uno sforzo continuo ed insieme uno strumento indispensabile per «razionalizzare il reale»³⁴; Bachelard afferma, pertanto, che il determinismo classico è il risultato di «un’analisi metafisica della fenomenologia separata in due aspetti: la cosa e il movimento»; è frutto di vere e «proprie restrizioni sperimentali», è diventato una vera e propria tecnica concettuale, frutto determinato da «una scelta e da un’astrazione», cioè in base al presunto «ordine che noi mettiamo tecnicamente nella natura»³⁵. La riflessione epistemologica avviata a fine Ottocento ha permesso di «disgregare questo enorme blocco del Determinismo metafisico che grava sul pensiero scientifico», di distinguere il «determinismo in negativo e in positivo», col considerarlo comunque sempre «l’oggetto d’una discussione, l’oggetto d’una polemica quasi giornaliera nell’attività del laboratorio»³⁶. Nello stesso tempo Bachelard fa un passo avanti rispetto a Boutroux e a quello che potremmo chiamare *radicalismo contingentista*, anche perché si è confrontato con gli studi di Von Mises e di Reichenbach sulla causalità e la probabilità, dove questi principi e lo stesso determinismo erano ritenuti *mobili* e «subordinati alle esigenze della fisica [...] e del pensiero obiettivo»³⁷; pur considerandolo

³³ Bachelard (1934, trad. it. 144-145).

³⁴ Bachelard (1934, trad. it. 146).

³⁵ Bachelard (1934, trad. it., 150-151).

³⁶ Bachelard (1934, trad. it. 152).

³⁷ Bachelard (1934, trad. it. 154). Bachelard cita direttamente Von Mises e ne prende l’espressione principio «mobile» (*wandelbar*); in questo capitolo, inoltre, analizza i lavori

sulla sua scia, per il ruolo positivo avuto nello sviluppo della fisica matematica, «un efficace strumento di pensiero»³⁸, per uscire da una pura e semplice deriva psicologistica che può arrivare dal suo completo abbandono e per eliminare «la costante confusione tra il determinismo e la causalità», propone

una specie di *determinismo topologico* corrispondente a certi legami funzionali e operante nel divenire su certi insiemi generali, così come opera l'*Analysis Situs* sull'ente geometrico [...] Al di là delle verifiche metriche, spesso disperse, vi è quindi posto per le verifiche del determinismo topologico, che ci dimostra come un fenomeno non resti alterato dal leggero variare dei suoi tratti.³⁹

In Bachelard il determinismo o quello che sulla sua scia si potrebbe chiamare «pratica deterministica», come anche tecnica concettuale, acquista una sua operatività metodologica più appropriata e una collocazione epistemica più delimitata ma più fondata sugli sviluppi del pensiero fisicomatematico; e in una delle ultime opere di carattere epistemologico, *L'activité rationaliste de la physique contemporaine* del 1951, egli riprende tale problematica, continua la critica a quello che chiama «determinismo universale» dei filosofi ritenuto un «commento dell'idea di totalità»⁴⁰, una volta approfonditi gli sviluppi della meccanica quantistica degli anni '30-'40 che porta a «definire dei limiti ad un determinismo meccanico che pretenda di implicare tutto l'universo a partire da una singola azione locale»⁴¹. Il pensiero scientifico contemporaneo offre una visione diversa del «mondo reale che implica un *determinismo dinamico*», una pluralità di determinismi per i quali «si rende necessario un vocabolario filosofico nuovo» in base ai vari fenomeni che si esaminano come il campo della luce come nel fotone dove vige un «*determinismo lineare*»⁴² o nella stessa misura dei fenomeni dove è necessario il *determinismo algebrico* o topologico. All'interno della sua proposta di razionalismo regionale che scaturisce dall'analisi dei vari settori del pensiero fisico, così precisa Bachelard:

Determinismo limitato, determinismo lineare, determinismo topologico, determinismo misurato, ecco molte sfumature che ci portano già ad affermare il pluralismo dei determinismi. Insomma ogni determinismo è parziale, individuale,

di Reichenbach. Ricordiamo che Bachelard per la rivista *Recherches philosophiques* fra il 1931 e il 1935 recensisce opere di Von Mises, Reichenbach e Popper.

³⁸ Bachelard (1934, trad. it. 152).

³⁹ Bachelard (1934, trad. it. 155).

⁴⁰ Bachelard (1951, trad. it. 243-244).

⁴¹ Bachelard (1951, trad. it. 245).

⁴² Bachelard (1951, trad. it. 246-247)

regionale. Lo si coglie da un particolare punto di vista, in un ben definito ordine di grandezze, all'interno di limiti esplicitamente o tacitamente prefissati. Tutto ciò che studiamo con cura scientifica è invece affetto da un determinismo determinato. Persino il principio di indeterminazione di Heisenberg ha ricevuto una determinata giurisdizione; rappresenta un particolare settore del determinismo con espressioni e leggi algebriche rigorose.⁴³

Anche la tecnica, per il suo stretto rapporto con lo sviluppo delle teorie, inoltre ha un suo specifico determinismo, chiamato «determinismo tecnico consolidato» dovuto alle varie acquisizioni teoriche che hanno storicamente ampliato il raggio delle conoscenze e che hanno permesso la costruzione degli strumenti scientifici che sono nella terminologia bachelardiana teoremi fisico-matematici realizzati a partire, ad esempio dal microscopio: «ogni tecnica, affermando il suo determinismo autonomo, nega il determinismo di Laplace [...] Ciò è possibile solo per la stretta cooperazione della teoria e della tecnica. Il determinismo consolidato è un determinismo capito»⁴⁴. È necessario, pertanto, un continuo sforzo riflessivo per comprendere il senso dei vari determinismi operanti nei vari campi, in ognuno dei quali vige un *determinismo determinato* dai percorsi teorico-sperimentali messi in atto; l'ultimo Bachelard ha condotto una particolare riflessione sulla tecnica, confluita soprattutto in *Le Rationalisme appliqué* del 1949, su quelli che ha chiamato «teoremi matematici applicati della microfisica contemporanea» dove si costruiscono nuovi fenomeni, dove si realizzano i teoremi e dove la fisica non si limita più a essere scienza dei fatti, ma una vera e propria «tecnica di effetti» (Zeeman, Stark, etc.)⁴⁵, in quanto gli stessi laboratori sono il condensato storico-concettuale di diverse teorie con in più la specifica funzione di “consolidare” i loro specifici contenuti veritativi. La riflessione critica sulla tecnica, ritenuta «lo sbocco del pensiero scientifico nelle sue forme contemporanee», combinata con l'analisi dei vari determinismi di natura più concettuale, ha portato così Bachelard a parlare di un vero e proprio *determinismo epistemologico*, di un *determinismo del pensiero* che la *philosophie des sciences* deve indagare e inserirlo nei suoi stessi fondamenti:

Ma se davvero si affronta la riflessione di una tecnica, di quella tecnica che è già il risultato della riflessione, ci si renderà conto che, nel pensiero scientifico, il circuito che va senza sosta dalla teoria alla tecnica e dai nuovi risultati tecnici ai fondamenti teorici ci trasmette un movimento umano nuovo. Questo legame così stretto, così indispensabile tra teoria e tecnica, ci sembra vada enunciato come un

⁴³ Bachelard (1951, trad. it. 249).

⁴⁴ Bachelard (1951, trad. it. 254-255).

⁴⁵ Cfr. anche Bachelard (1931-32).

determinismo umano del tutto particolare, come un determinismo epistemologico che non era percepibile in alcun modo nella separazione tra le culture matematiche e quelle sperimentali di qualche secolo or sono. Non si può concepire a nostro avviso che questo determinismo a due voci, a due vie, si fermi. Sotto questo duplice aspetto questo determinismo del pensiero e dell'esperienza scientifica dà prova della sua duplice fecondità. Ma quante riflessioni saranno necessarie al filosofo [...] Quale lavoro filosofico sarà necessario per delucidare le relazioni tra le determinazioni umane e il determinismo che implicano e di cui si servono!⁴⁶

La *philosophie des sciences* ha il preciso compito, propria per la sua vocazione tesa ad indagare i diversi percorsi conoscitivi messi in atto dalla ragione nel tentativo di rendere sempre più intelligibile il reale, di far prendere piena coscienza epistemica della diversità e della pluralità di significati teorico-sperimentali che un concetto, come il determinismo, che sembrava così solido nelle sue due variabili, possa acquisire storicamente e come possa riacquistare, una volta chiarite le modalità operative e procedurali all'interno dei diversi campi di applicazione, un nuovo modo di essere come strumento di pensiero indispensabile, ma libero dalle varie assolutizzazioni che lo hanno attraversato.

Bibliografia

- Alunni, C., 1999, "Pensée des sciences : un Laboratoire", in *Revue de synthèse*, IV serie, 1, pp. 7-15.
- Antiseri, D. and Reale G., 2001, *Quale ragione?*, Milano, R. Cortina Ed.
- Bachelard, G., 1931-32, "Noumène et Microphysique", in *Recherches philosophiques*, 1, pp. 55-65.
- Bachelard, G., 1934, *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Presses Universitaires de France (*Il nuovo spirito scientifico*, trad. it. di F. Albergamo, Bari, Laterza, 1951).
- Bachelard, G., 1940, *La Philosophie du non*, Paris, Presses Universitaire de France.
- Bachelard, G., 1949, *Le Rationalisme appliqué*, Paris, Presses Universitaires de France, 1970⁴.

⁴⁶ Bachelard (1951, trad. it. 255).

- Bachelard, G., 1951, *L'activité rationaliste de la physique contemporaine* (*L'attività razionalista della fisica contemporanea*, trad. it. di C. Maggioni, Milano, Jaca Book, 1987).
- Bachelard, S., 1958, *La conscience de rationalité. Étude phénoménologique de la physique mathématique*, Paris, Presses Universitaires de France.
- Berthelot, M., 1886, *Science et Philosophie*, Paris, Calmann Lévy.
- Bordoni, S., 2013, *Let Philosophy Emerge from Theoretical Physics. The French context from Boussinesq to Duhem*, Tesi di Dottorato, Università di Urbino.
- Boussinesq, J., 1879, *Études sur divers points de la philosophie des sciences*, Paris, Gauthier -Villars.
- Boutroux, E., 1874, *De la contingence des lois de la nature*, Paris, Librairie Germer Baillièrre.
- Boutroux, E., 1895, *De l'idée de loi naturelle dans la science et la philosophie contemporaines*, Paris, Oudin/Alcan.
- Brenner, A., 2003, *Les origines françaises de la philosophie des sciences*, Paris, Presses Universitaires de France.
- Brunschvicg, L., 1912, *Les étapes de la philosophie mathématique*, Paris, Librairie Scientifique Blanchard.
- Brunschvicg, L., 1922, *L'expérience humaine et la causalité physique*, Paris, Presses Universitaires de France.
- Callot, E., 1960, *La philosophie biologique de Cournot*, Paris, Librairie M. Rivière et Cie.
- Castellana, M., 1974, *Il surrazionalismo di Gaston Bachelard*, Napoli, Glaux.
- Castellana, M., 1986, *Epistemologia debole*, Verona, Bertani.
- Castellana, M., 1990, *Alle origini della ‘nuova epistemologia’. Il Congrès Descartes del 1937*, Lecce, Il Protagora.

- Castellana, M., 2004, *Razionalismi senza dogmi. Per una epistemologia della fisica-matematica*, Soveria Mannelli, Rubbettino Ed.
- Castellana, M., 2007, “Il metodo storico in filosofia della scienza”, in Enriques, F., 2007, *Il significato della storia del pensiero scientifico*, Manduria, Barbieri-Selvaggi Ed., pp. 87-127.
- Castellana, M., 2012, “Uno strumento della ragione epistemologica: il tetraedro epistemologico-ermeneutico”, in AA.VV., *Un austriaco in Italia. An austrian in Italy*. Festschrift in honour of Professor Dario Antiseri, a cura di R. De Mucci e K. R. Leube, Soveria Mannelli, Rubbettino Ed., pp. 585-602.
- Châtelet, G., 1993, *Les enjeux du mobile. Mathématique, physique, philosophie*, Paris, Le Seuil.
- Châtelet, G., 2010, *L'enchantement du virtuel. Mathématique, physique, philosophie*, a cura di C. Alunni, Paris, Éditions Rue d'Ulm.
- Cournot, A.A., 1851, *Essai sur les fondements de nos connaissances et sur les caractères de la critique philosophique*, Paris, Hachette, I-II voll .
- Cournot, A.A., 1861, *Traité de l'enchaînement des idées fondamentales dans les sciences et dans l'histoire*, Paris, Hachette, I-II voll.
- Cournot, A.A., 1872, *Considérations sur la marche des idées et des événements dans les temps modernes*, Paris, Hachette, I-II voll.
- Duhem, P., 1906, *La théorie physique. Son objet et sa structure*, Paris, Chevalier & Rivière Éditeurs (*La teoria fisica, il suo oggetto e la sua struttura*, Bologna, Il Mulino, 1984).
- Enriques, F., 1912, *Scienza e Razionalismo*, Bologna, Zanichelli, 1990².
- Enriques, F., 1922, *Per la storia della logica*, Bologna Zanichelli.
- Enriques, F., 1934, *Signification de l'histoire de la pensée scientifique*, Paris, Hermann (*Il significato della storia del pensiero scientifico*, Manduria, Barbieri-Selvaggi Ed., 2007).

- Enriques, F., 1941, *Causalité et déterminisme dans la philosophie et l'histoire des sciences*, Paris, Hermann (*Causalità e determinismo nella filosofia e nella storia delle scienze*, Roma, Adriatica, 1946).
- Février, P., 1955, *Déterminisme et Indéterminisme*, Paris, Presses Universitaires de France.
- Geymonat, L., 2006, *Lineamenti di filosofia della scienza*, Torino, UTET.
- Laudan, L., 1984, *Scienza e ipotesi*, trad. it., Roma Armando.
- Lautman, A., 2006, *Les Mathématiques, les Idées et le Réel physique*, Paris, Librairie Vrin.
- Milhaud, G., 1927, *Études sur Cournot*, Paris, Librairie Vrin.
- Naville, E., 1883, *La physique moderne. Etudes historiques et philosophiques*, Paris, Librairie Germer Baillière & C.
- Oldroyd, D., 1989, *Storia della filosofia della scienza*, trad. it., Milano, Mondadori.
- Parrini, P., 1983, *Empirismo logico e convenzionalismo. Saggio di storia della filosofia della scienza*, Milano, F. Angeli Ed.
- Poincaré, H., 1922, *Dernières pensées*, Paris, Flammarion.
- Polizzi, G., 1984, *Forme di sapere e ipotesi di traduzione. Materiali per una storia dell'epistemologia francese*, Milano, F. Angeli Ed.

Federigo Enriques's view of causality and determinism in philosophy and history of science between greek thought and quantum physics

Arcangelo Rossi
University of Salento
arcangelo.rossi@unisalento.it

According to Federigo Enriques¹, it is at least implicit in the early philosophical-scientific Greek thought, especially in Democritean atomism he so passionately studied², that the future is at least in principle foreseeable, as reality itself is supposed completely ruled by necessity. As a consequence, though not all movements are directly observable as not all rationally explicable processes identify themselves with observable processes, they are, notwithstanding, explicable, though not always observable and foreseeable in advance.

The causal-deterministic explication of phenomena anyway appears necessary and recognizable, as they are finally explained, even though they are not observed and foreseen in advance. It is enough, from a rationalistic, non-empirical point of view, to evoke their “sufficient reason”, as it will be called by the great G. W. Leibniz about 2000 years later³.

A reason or cause which does not identify itself with observation or forecast was for example introduced, already before Democritus, by Anaximander to explain the stability of the earth, supposed at the centre of the cosmos, by symmetry reasons: the balance of its constituting parts, between up and down, right and left, would rationally guarantee the equilibrium of

¹ Cp. Enriques (1941, It. transl.).

² Cp. Enriques & Mazzotti (1948).

³ Cp. Enriques (1941 , 21-36).

the system. On the other hand, afterwards, the great Archimedes enunciated his fundamental scales law exactly expressing the equilibrium of plates equally charged, as an effect of equal rational causes in mutual equilibrium, apart from simple direct observation. Thus, according to the Eleates⁴, every rationally thinkable objects would be considered as existent and as such explicable, even if they, like Democritus's atoms, were not directly observable, as mechanical rational causes of perceptible appearances⁵.

In Plato and Aristotle there is however, besides the acknowledgement of the rational character of the cause as explication of phenomena meant as its effects according to a mechanical necessity, a further characterization of the cause itself as aim and goal (final cause). By it, the efficient or mechanical cause itself would be justified as a consequence of voluntary acts.

This distinction itself introduces another fundamental one, especially in Aristotle, referring to the necessary and at least in principle completely foreseeable character of efficient, material and formal causes, contrary to the unforeseeable and voluntary character of the final causes as expressions of freedom and/or pure chance. This is about the so called "contingent futures", unforeseeable as pure chance and unobtainable from other causes, rather than as purely causal properties and independent events or, more exactly, expressions of specific free wills. Such causal events present themselves as finalistic explications, so that the acts of free will acquire full explicative autonomy in front of all other causal explications. That would prove, in particular according to Aristotle, the autonomy of living beings and the happening of contingent futures, as for him neither express mere human ignorance and limited knowledge, rather than true indeterminism where a free choice would take place. So contingent things are not predetermined but, eventually, they postulate ethical freedom and responsibility⁶.

Anyway, if scientific explanation were maintained in terms of the causal determinism professed, for example, by the Megara School (according to which any affirmation must be necessarily true or false in conformity with the Excluded Middle Principle), then chance and free will would not take place, as all would be already written and foreseen⁷. Plato and Aristotle instead tried to safeguard freedom and chance, distinguishing between efficient and final causes, the former for knowledge and the latter for free will and casual choice. To be true, their Hellenistic successors mainly worried about ethics, trying to reconcile it with a quite expected deterministic con-

⁴ Cp. Fano (2012).

⁵ Cp. Enriques (1941, 6).

⁶ Cp. *Ibidem* (7-10).

⁷ Cp. *Ibidem* (10-11).

ception of reality. To the aim, the Stoics postulated the most rigorous natural determinism, such as to be extended, without hesitation, to the moral life, in order to give a sure guide, according to nature, to the wise man, molding his will for his own good. Epicureans, on the other hand, though recovering Democritus's mechanism, inserted individual swerves into his atomic system, so that the atoms casually collided with unforeseeable new effects thanks to a peculiar casual deviation (*clinamen*) explaining the freedom of individual choices. However, Epicurus does not limit himself to introduce a casual deviation, which inserts free will into a mechanistic frame. He rather wants to reconcile the world with free will, so refusing rigid necessity. Then it is clear that, while Epicureans try to reconcile the world with individualistic and hedonistic morals, based on a - though limited – free will, Stoics exalt naturalistic determinism towards a strongly voluntary but total acceptance of natural necessity as a base for action⁸.

In the Middle Age theological reflections on free will, coming off more from natural knowledge, rather tried to reconcile ethics with religion, particularly beyond the conflict linked to the attribution to God of both omnipotence and infinite goodness. Then they even arrived at totally attributing evil to men's free will, but at the cost of admitting a further conflict with Saint Agustín's theological thesis of human predestination. A way out from the difficulty looked like to recognize that logic and in particular the Excluded Middle Principle cannot claim to submit theology⁹.

In fact the question still goes on to be discussed, with different and even opposite arguments among Catholics and Protestants, so developing the discussion on the relationships among science, morals and theology in terms of chance, determinism and causality. Well, the New Science itself has known a similar dialectic in accordance with the different relationships it established between experience and its causal interpretation, since Galileo and Descartes¹⁰. In fact, the conflict would be, particularly in Newton, between mechanical causes as explanatory base of the New Science, in order to obtain causal-deterministic explanations of phenomena, and the simple description and phenomenal forecast drawn from empirical experience¹¹. However, like in ancient Greek thought, also in the New Science mechanical explanation, particularly in the work of Leibniz and his followers, was supplemented, as explanatory causal base, by the introduction of final, besides mechanical, causes. As a result, there was a synthesis of mechanical

⁸ Cp. *Ibidem* (11-12).

⁹ Cp. *Ibidem* (12-13).

¹⁰ Cp. *Ibidem* (15-19).

¹¹ Cp. *Ibidem* (19-20).

and final causes in terms of sufficient reason and forces equilibrium, in order to obtain the most profitable physical results. So, in the most rationalistic orientation of the New Science, mechanical forces were ruled, as causes of phenomena, by great conservation and economy principles, both mechanical and finalistic, like the Principle of Minimum Action. The New Science entrusted it with the task of deducing the best voluntary and chance evolution of mechanical and overall physical systems in a rigorous mathematical, analytical and algebraic language¹².

Afterwards, on the contrary, the viewpoint of phenomenological positivism expressed itself as an empirical generalization, not requiring explanations but only descriptions and empirical forecast without explanatory ambitions, rather in favor of simple descriptions of facts in mathematical language¹³. At most, it justified causal hypotheses as endowed with heuristic and provisional value, in any case not to be considered as realistic representations of the physical world. Rather, as different “instruments”, in case coexistent in manifold and non conclusive but incomplete and probabilistic sense, notwithstanding Kant’s attempt at attributing a deterministic perfection and *a priori* validity to those supposed “instruments”¹⁴. So, even the great Poincaré, notwithstanding his at first view apparently completely deterministic and foreseeable planning, in accordance with the science-philosophy of most ancient Greeks, truly attributed irreducibly approximated character to the continuously accumulated empirical knowledge, without considering any exhaustive causal imputation. Well, just the approximated character of his own professed determinism shows the same Poincaré as a - though sophisticated and open – representative of the positivistic approach, in terms of instrumentalist and contingent manifold theories, moreover never excluding the possibility of further and further, though never exhaustive, approximations with more and more deterministic precision¹⁵. Well, Federigo Enriques’s position on the question in Italy does not appear too different, as he recognizes the position inevitably approximated character of his determinism, always open to more and more exact but never final new empirical representations, though reaching more and more theoretical and practical, but inevitably always uncertain and incomplete limits¹⁶. Reality is in fact defined by Enriques as a relationship between voluntary empirical acts and connected sensations which put to the test those acts

¹² Cp. *Ibidem* (34-36).

¹³ Cp. Mach (1883, It. transl.).

¹⁴ Cp. Enriques (1938).

¹⁵ Cp. Poincaré (1905, It. transl.).

¹⁶ Cp. Enriques (1906, chap.I).

as interpretations of experiences requiring to be, even if only approximately, identified with perceived facts and systems of facts¹⁷. What must be taken into account is then the presence of more and more approximated but never conclusive invariants in the flow of experience¹⁸. Expressed in terms of scientific theories, they will allow to carry out empirical forecasts without exhausting themselves in the empirical content of the theories, due to the hypothetical-rational character of those theories and forecasts. Well, in this hypothetical character even the empirical collection of data to comfort and confirm scientific theories reveals the development, besides positive empirical science, of imaginative processes¹⁹. They will try to explain the reason of phenomena, without limiting themselves to record them, by also recovering causal-deterministic explanations endowed with a strong heuristic significance, that did not identify itself with reality, and was then open to further and further interpretative and creative developments, such as establishing continuity and intelligibility in front of experience through inexhaustible manifold models²⁰.

Modern physics at the advent of the following century however ripens a radical change of both the manifold classical theories and the phenomenological ones which dominated in the previous centuries. So it put in discussion both the phenomenological models and the mechanistic-reductionist theories, of the electromagnetic ether as a mechanical medium, and of the mechanistic conception of heat interpreted as a purely deterministic mechanical movement. However, when classical mechanics, with its explicative principles supposed universal, was put in discussion either as a final theory or as a source of phenomenological models, traditional mechanism itself was then discussed, by postulating new basic principles and models for mechanics. This will need new relativity principles and a new space-time geometry incompatible with Galilean-Newtonian principles²¹. On the other hand, the energy concept itself underwent a big change from a purely continuum view, compelling to elaborate a different paradigm. Even, the problem was posed of the relationship between energy discontinuity and matter continuity, so creating a hybrid union between a new wave quantum mechanics and a new strictly discrete one²². Afterwards, it seemed even impossible to submit the new mechanics to a rigid classical determinism,

¹⁷ Cp. *Ibidem* (chap.II).

¹⁸ Cp. *Ibidem* (chap. III).

¹⁹ Cp. *Ibidem* (chap. IV-VI).

²⁰ Cp. *Ibidem* (chap. IV-VI).

²¹ Cp. Einstein & Infeld (1938, It. transl., 174-256)

²² Cp. *Ibidem* (260-300).

since statistical laws appeared sufficient, being not reducible to an exact determination, but expressing an intrinsically indeterminist reality, consistently with the Uncertainty and Complementarity Principles²³. Nevertheless, one can mind that the MQ paradoxes could be overcome by exclusively following Schrödinger's viewpoint of continuum wave mechanics, so renouncing the corpuscular view, considered irreconcilable with it. Schrödinger essentially assumed continuum models not only as empirical but also as causal deterministic representations²⁴. In particular, he even conceived the statistical probabilistic treatment as expression of a continuum reality, whose corpuscular aspect would be reduced to only empirical-positivistic representations²⁵. Actually, Schrödinger's viewpoint assumed causal-deterministic continuum explanations, thus going beyond classical statistical models which were essentially considered expressions of ignorance and/or incompleteness, devoid of full foresight about the causes of phenomena: a point of view shared also by Federigo Enriques and other greatest mathematical physicists of his time²⁶.

References

- Bernardini, P. (ed.), 1986, *S. N. Bose, A. Einstein, E. Schroedinger, La statistica quantistica e le onde di materia*, Napoli, Bibliopolis.
- Einstein, A. and Infeld, L., 1938, *The evolution of Physics*, New York, (*L'evoluzione della fisica*. It. transl., Torino, Einaudi, 1948).
- Enriques, F., 1906, *Problemi della scienza*, Bologna, Zanichelli.
- Enriques, F., 1934, *Signification de l'histoire de la pensée scientifique*, Paris, Hermann (It. ed., *Il significato della storia del pensiero scientifico*. Castellana, M., Rossi, A. (eds), Manduria, Barbieri, 2004).
- Enriques, F., 1938, *La théorie de la connaissance scientifique de Kant à nos jours*, Paris, Hermann (It. trans., *La teoria della conoscenza scientifica da Kant ai nostri giorni*, Pompeo Faracovi, O. (ed.), Bologna, Zanichelli, 1983).

²³ Cp. Enriques (1941, It. transl., 78-92).

²⁴ Cp. *Ibidem* (92-103).

²⁵ Cp. Bernardini *et al.*(1986, It. transl.).

²⁶ Cp. Enriques (1941, 104-9).

Enriques, F., 1941, *Causalité et déterminisme dans la phylosophie et l'histoire des sciences*, Paris, Hermann (*Causalità e determinismo nella filosofia e nella storia della scienza*. It. transl., Roma, Adriatica, 1945).

Enriques, F. and Mazziotti, M., 1948, *Le dottrine di Democrito di Abdera. Testi e commenti*, Bologna, Zanichelli.

Fano, V., 2012, *I paradossi di Zenone*, Roma, Carocci.

Mach, E., 1883, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch Dargestellt*, Prague (*La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, It. transl., Torino, Boringhieri, 1968).

Poincaré, J. H., 1905, *La valeur de la science*, Paris, Flammarion (*Il valore della scienza*. It. transl., Bari, Dedalo, 1992).

The Torch of Mathematics on Nineteenth- and Twentieth-Century Determinism

Salvo D'Agostino
Università “Sapienza” Roma
saldagostino1921@tiscali.it

1. Introduction

My study concerns an analysis of the influence of mathematics on the deterministic philosophy of Nineteenth and Twentieth Centuries physics¹. As is known, most Nineteenth Century scientists considered deterministic philosophy, and the related cause-effect correlation, as the emblem itself of physics as a mechanical science. In his 1814 *Analytical Theory of Probability*, Laplace endorsed its cosmological foundation: «[...] the present state of the universe has to be considered as the effect of its anterior and as the cause of his future state». In my study, I argue that in the Middle Century a remarkable changement of deterministic philosophy was influenced by the field theory of J.C. Maxwell's. Maxwell's works on Electromagnetism and Statistical Gas theories proposed a new view of physics and of the cause-effect correlation. If it is true that in his 1847 *Erhaltung der Kraft* Hermann von Helmholtz considered conservation of energy as a triumph of Determinism and causal connection, it is also noteworthy that in his mature years his thought evolved towards a Kirchhoff-type mathematical phenomenology, where causality was replaced by lawfulness (Cohen & Helkana, 1977b, XVIII). I argue that Helmholtz' physiological approach to the transcendent component of Kantian philosophy influenced Hertz's epistemology. But

¹ The Torch of mathematics 1800-1870, is the title of the first volume of Christa Jungnickel & Russel McCormach, *Intellectual Mastery of Nature* (Jungnickel & McCormach 1986).

Heirich Hertz, an Helmholtz' student, soon reacted to his master ideas. In my view, Hertz was the true predecessor of Einstein's 's philosophy. Albert Einstein, in his *Spencer Lecture* at Oxford (Einstein 1933), went so far as to claim that in theoretical physics the «creative principle resides in mathematics». In Einstein's General Relativity the increased impact of mathematics proves my thesis on its essential role on the development of modern physics.

2. Maxwell's Field Theory as Dynamical Philosophy

According to Leon Rosenfeld, «[Maxwell's] initial twin sources of inspiration for his electromagnetic theory were obtained through a powerful dynamical conception of nature, that of Faraday, on the one hand, and, on the other, by the great mathematical tradition of the French School» (Rosenfeld 1956, 1647). As regards Maxwell's «dynamical conception of nature», there is no better example than the study of his electromagnetic theory². The dynamical aspect was implicit in Maxwell's 1860-61 first attempt to form a theory of the actual motions and stresses in an elastic-electric ether. Though successful as it was in introducing a vector-potential, the theory contained so many *ad-hoc* hypotheses on the elastic properties of ether, that his author thought it expedient to supersede this mode of approaching his field theory. In fact, his 1865 great paper *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, and his master opus, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, adopted a *Dynamical Approach* to a theory of the moving particle (D'Agostino 1986). He affirmed that in this approach his aim was to cultivate his dynamical ideas, and that to be «dynamical», a theory could dispense with the detailed mechanism of motion, and needed provide expressions only for the kinetic and potential energies of the system. He found that Lagrange's equations were the appropriate mathematical tool for his dynamical ideas because of their energetic approach to the internal motions of a system. A few details on this scarcely explored chapter of Maxwell's Lagrangian mechanics will turn very appropriate: Lagrange introduced generalized co-ordinates in place of the traditional parameters of motion of the Newtonian-Laplacian mechanics, and, instead of using quantities representing positions, constraint-forces, and velocities of the particles, his equations described motion «[by] eliminating these quantities from the

² The outstanding contributions of J. C. Maxwell (1831-1879) to a field theory of electromagnetism and to a kinetic theory of gas have been extensively studied in recent years (D'Agostino 1968a, Ibid. 1968b, Harmann 1995).

final equations»³. It was therefore through his special transformation of Lagrange's equation that Maxwell evaded the burning detailed description of motion of the electric particles and of ether, although he succeeded in establishing a quasi-mechanical theory of electromagnetism. In his 1873 *On the Dynamical Evidence of the Molecular Constitution of Bodies*, he presented *Molecular Science* as his peculiar form of micro-physics and returned to his preferred method, *the dynamical explanation of phenomena*:

When a physical phenomenon can be completely described as a change in the configuration and motion of a material system, *the dynamical explanation* of that phenomenon is said to be complete⁴. We cannot conceive any further explanation to be either necessary, desirable, or possible, for as soon as we know what is meant by the words configuration, motion, mass, and force, we see that the ideas which they represent are so elementary that they cannot be explained by means of anything else (Italics mine) (Maxwell 1957, 418).

Notice that, in the passage above, Maxwell considered *the dynamical explanation* as a method complete in itself, because he did not think that any further explanation of the mechanical-atomistic type was either possible or desirable. I find that Maxwell's views on this point are scarcely underlined in recent historiography, but they are a fundamental component of his philosophy, and deserve a few lines for a comment⁵. He thought that framing *detailed hypotheses* about the motions and actions of particles in a material system implied a fundamental ambiguity, in the sense that a plurality of other *detailed hypotheses* could have been taken into account as empirically testable. Experiments concerning the proof of *detailed hypotheses* were therefore non-crucial. He confirmed this thesis in his 1877 booklet *Matter and Motion*, in which his criticism of *detailed hypotheses* was extended to the whole of micro-physics by casting a judgment of fundamental ambiguity

³ The author is tempted to compare Maxwell's claim of an utmost generality as a condition for the validity of the empirical test of theories with the well known Carl Popper's thesis on the sole validity of confutation as a valid empirical process. Notes that Popper thesis concerns physical theories in general and does not concern the epistemological nature of each theory.

⁴ In chapter IX of his Treatise on Electricity and Magnetism, titled: «General equations of the electromagnetic field», he defined his Dynamical Approach as the method which identifies an electromagnetic system with a dynamical system, and in order «to bring electrical phenomena within the province of dynamics», he applied an extension of Lagrange's method in the investigation of Thomson and Tait.

⁵ It is worth noticing that he followed a Dynamical Philosophy in his contribution to a Kinetic Theory of Gases, by including a distribution law of velocities in his statistical approach (D'Agostino 1978).

on the method of framing hypotheses *of a certain definite kind*, such as, for instance, the atomistic hypotheses⁶. In conclusion, I argue that Maxwell's claim for an utmost generality of *hypotheses* theories was consistent with the role he attributed to mathematics in the context of an empirical science. Concerning this role, let us underline that in his 1872 paper *On the mathematical classification of physical quantities* (Maxwell 1971), he proposed a method for a new classification founded on the mathematical or formal analogies between quantities traditionally regarded as physically different, i.e., belonging to different phenomena. The new method differed from the traditional classification based on quantities which were classified accordingly «the matter to which they belong»⁷. Let us notice that following Maxwell's innovation two different roles were to be attributed to physical symbols, one related to their numerical measurements, the other to their physical role (i.e., of being scalars, or vectors, tensors, etc) (Maxwell 1971). Due to this distinction of roles, new types of symbols beyond the former rational numbers, were introduced in physics such as *gradients*, *divergence*, *rotors*, and the likes, generally labelled as vectorial operators. The route was therefore open for the revolutionary introduction of new mathematical entities, such as *imaginary numbers*, *quaternions*, *operators and matrices*, the symbols that are to-day commonly exploited in Quantum Mechanics.

3. Helmholtz and Kirchhoff' Phenomenological Philosophy

Hermann von Helmholtz' scientific philosophy represented a pivotal point in the epistemological literature of the Nineteenth Century (Cohen & Helkana 1977b). His particular interpretation of Kant opened the route for much of the End-of-Century scientific philosophy (Meuldres 2001). It is

⁶ It is worth remarking that Maxwell's dynamical approach was not compatible with a conception of the particulate nature of electricity. In fact, as Jed Buchwald showed in detail in his book, Maxwell could not insert in his theory a microscopic convective conception of the conduction current, i.e. the idea that a current consists in microscopic charges in motion in a wire.

⁷ The new classification implied that each symbol consisted of two factors, a numerical times a standard quantity of the same kind with that to be defined (Maxwell 1957, 258). A new meaning was thus attributed to symbols in the physical equations, because quantities were classified in accord with their vectorial and tensorial representations, i.e., for their intrinsic mathematical features. Maxwell's new classification was advantageous for establishing analogies between quantities belonging to different phenomena, such as quantities in gravitation and in the steady conduction of heat, both expressed by a Laplacian. In Maxwell's words: «one theory can [thus] be transferred to solve problems in the other» (Maxwell 1957, 258).

noteworthy that he met Kant right in the middle of his physiological researches (Cappelletti 1976), and he contributed to what he considered an original refinement of Kant's *a-priorism* (Cohen & Helkana 1977b; D'Agostino 1993b). Concerning his modification to Kant's transcendental philosophy, he considered his contribution, the result of his own physiological investigations, as an important advance with respect to Kant, because his access to *a-priori arguments* were strictly related to his experimental procedures with vision and hearing, i.e., via an operational, as distinguished from what he considered a Kantian merely linguistic approach. In fact, he overtook Kant on his own ground: «[...] here Kant was not critical enough in his critique» (Helmholtz 1977, 163). He found differences of two neatly distinguished types between various forms of perceptions: one type concerned different senses, such as sight and sound, the other type concerned sensations of the same kind, just differing in quality, which he named as the *narrower specification* of sensations. It concerned the various kinds of spaces described by the axioms of geometry, or, in the visual perception, the particular colors which appear on this or that occasion, their arrangement or sequence. Such a form of intuition limits our perception of space to its three-dimensional formulation, and is too narrow (too full of a particular content) to represent all possible contents of our experience. The axioms of Euclidean geometry, the space three-dimensionality, are a case of the *narrower specification intuition*, and «it limits our form of intuition of space in such a way that it can no longer absorb every thinkable concept, if geometry is at all supposed to be applicable to the actual world». They cannot be a truly *a-priori* form, one which must be devoid of content and free to an extent sufficient for absorbing any content whatsoever.

Starting from these premises, in 1878 Helmholtz denied that the eye, and our senses in general, are passive receptors of a supposedly faithful image of the world. Science and physics could thus only pretend to be a *symbolic representation of the real natural world*, not its *faithful image*. The only criterion in fact which allows the eye to causally connect in the mind the subjective *lux* to the external agent *lumen*, it is the regularity through which concepts, such as *lumen*, are related to the various sensations of *lux*. As underlined in his 1877 Rectorial Address at Berlin University (Helmholtz 1977), a *Parallelism of Regularities* represented for him the foundation itself of objective scientific knowledge. Reality is thus reached only through the regularity of mathematical laws. He emphasized that he had no less than Robert Kirchhoff as a supporter of his ideas, and he confirmed Kirchhoff's statement: «the task of the most abstract amongst the

natural sciences, namely mechanics [is] to describe completely and in the simplest manner the motions occurring in nature» (Helmholtz 1977, 141).

Concerning Helmholtz's modification to Kant's transcendental philosophy, he considered his contribution, the result of his own physiological investigations, an important advance with respect to Kant. He was convinced that his access to transcendental arguments became accessible via an operational, as distinguished from a Kantian merely linguistic approach⁸.

As the best analysis of Helmholtz philosophy's impact on phenomenology, let us quote Ernst Cassirer's comment: «Here is no unilateral relationship of dependence in the connection between *cause* and *effect*, no logical *earlier* or *later*. On the contrary pure correlation rules, whose simplest expression is to be found in the mathematical concept of *function*» (Cassirer 1950, 90). As to Cassirer, the best description of phenomena was Helmholtz and Kirchhoff's formal mathematical approach.

4. Hertz reinstates a Kantian orthodoxy and the theory's anti-empirical role

Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) was one of the greatest theoretical and experimental nineteenth-century physicist. His contributions offer a privileged standpoint for an inquiry into the historical development of theoretical physics at the beginning of one of the most fecund periods for German and European science. In this paper I wish to underline what I consider the most interesting aspect of his philosophy: his critical approach to his master' Helmholtz's phenomenological views. At difference with Helmholtz' *Parallelism of Regularities*, Hertz did not believe that *Parallelism* unambiguously determines the choice of an appropriate theory, because a multiplicity of «forms of representation» (*Darstellungen*) are included into the same phenomenological background (D'Agostino 1993b). Consequently, he supported a *theoretical pluralism*: theories are therefore under-determined with respect to observations. It is of great epistemological interest to remark that under-determination (UD) of theories represents an important element of distinction between Helmholtz and Hertz. Let us also notice that Hertz used UD as an incentive for the development of further internal (non-empirical) criteria of validation of theories. He introduced and discussed at length in his Introduction to *Prinzipien*, three requirements, as selective criteria for

⁸ For Helmholtz the general form of intuition is a schema devoid of any content which he declared «to be the true form of intuition». Kant's doctrine of the a-priori *kategorien* as general form of intuition was thus upheld by Helmholtz (Helmholtz 1977, 117).

the choice of an “adequate theory”: *Permissibility* (*Zulässigkeit*), *Correctness* (*Richtigkeit*) and *Appropriateness* (*Zweckmäßigkeit*) (Hertz 1956b, 2). The first two are *a-priori* requirements in the sense of Kant's transcendental *a-priorism*.

The role of the *a-priori* in Hertz's *logic of research* is significantly documented by his discovery of Maxwell's electromagnetic waves (D'Agostino 1975, 263, 288) in as much as he was guided by the Principle of *uniqueness and independent existence of electric forces*. In his often quoted dictum, Hertz manifested his conviction of a unity between philosophical speculation on principles and practical results: «By the experiment above sketched the propagation in time of a supposed action at-a-distance is for the first time proved. This fact forms the philosophical result of the experiments, and, indeed, in a certain sense the most important result» (Hertz 1962a).

5. Einstein's request for Over Determined Theories

The problem of the relationship between physical concepts and their empirical counterpart (German: *Empfindungen*), was always an important topic in Einstein's philosophy. In his 1921 *Geometrie und Erfahrung* (Einstein, 1921, 232-243) one main point touched the role of Geometry in the axioms of a theory. He thought that a physicist has to dismiss to use Geometry in its *purely logical form*, favoring instead a coordination of Geometry's *empty conceptual schemes* with the objects of experience. He can arbitrarily fix the *geometrical counterpart G* of theory, but in such a way that the ensemble of physics *P* and geometry *G*, i.e., $G \oplus P$, represented an *empirically available theory*. Einstein quoted Poincarè as the first scientist who required this feature for the *feature of an ideal theory* (Einstein, 1959a, 665-688, 677). However, he conceded that in the present state of physics, Poincarè's request was an unattainable goal, and that one has to be content with a limited empirical approach. In fact, he admitted that *rods and clocks were introduced as independent empirical objects* into his Relativity, without claiming to deduce them from the theory's $G \oplus P$ premises (Einstein 1959a, 680)⁹. In a passage from his *Spencer Lecture* (Einstein 1933), he returned to the problem of *independent empirical objects*, and referred to Levi-Civita

⁹ A remarkable feature of this approach is the non-linearity of electromagnetic equations. It is this non-linearity which fulfils Einstein's request for over determined field equations whose spherical-symmetric singularity-free solutions can be interpreted as elementary particles. It can be reasonably argued that the complete fulfillment of the requirement above would correspond to Einstein's ideal of a purer theory.

and Hilbert as to the scientists who succeeded in a *purely axiomatic theory*, that he labeled as a «purer theory»¹⁰. In the Thirties of the last century, Einstein took a refuge from Nazi Germany and spent many years at the Princeton Institute in USA, working on Relativity and Unified Field Theories. His considerations on the 1921 problem of «pure» theories were again expressed in his 1949 *Autobiographical Notes*, a contribution which might well represent one of his last scientific documents:

One is struck that the theory, i.e., his General relativity Theory, (except for the four-dimensional space) introduces two kinds of physical things, i.e., (1) *measuring rods and clocks*, (2) *all other things, e.g. the electro-magnetic field, the material point, etc.* This, in a certain sense, is inconsistent; strictly speaking measuring rods and clocks would have to be represented as solutions of the basic equations (objects consisting of moving atomic configurations), not, as it were, as theoretically self-sufficient entities. However, the procedure justifies itself because it was clear from the very beginning that *the postulates of the theory are not strong enough* to deduce from them sufficiently complete equations for physical events sufficiently free from arbitrariness, in order to base upon such a foundation a theory of measuring rods and clocks (Italics added) (Einstein 1959b, 59).

In the passage, the 1921 problem of *rods and clocks introduced as independent empirical objects* is viewed as an *under-determination* of his General Relativity theory: the postulates of the theory are not strong enough to allow to derive from them particles and physical objects. In this sense, he remarks that the theory is a *non-complete theory*. I interpret Einstein's remark above as evidence that in 1949 he held that the G⊕P unresolved problem of 1921, was now viewed as *the general problem of non completeness* of the basis of his General Relativity and *Unified Field Theory*¹¹. The often quoted EPR essay (Einstein 1935) can perhaps be better enlightened by a comparison with his later 1949 reflexions (Tarozzi 1992, D'Agostino 2000b). As is known, Einstein continued his researches on *Unified Field Theory* until the end of his intellectual life. Researches in *Relativity and Unified Field Theories* were pursued over the main European countries until the middle of the last Century, but faded from the physicists' interest after the triumphal advent of Quantum Theories (Vizgin 1986, 306; Bergia 1991).

¹⁰ I find very significant on this point Pais comment on the non conformity of some of Einstein's statements on empirism and on the contrasting possibility of a pure theory (Pais 1982).

¹¹ From the premise above, it can be argued that Einstein's 1949 discussion with Hans Reichenbach has to be understood as a further clarification of his 1921 and 1936 search for a purer method (Einstein 1959, 676 passim).

6. Conclusive remarks

In this paper I study the Nineteenth and Twentieth Centuries' fundamental contribution of Mathematics to a new conception of Determinism in theoretical physics. One mode of this contribution was metaphorical labeled "the torch of mathematics" (Jungnickel & McCormach 1986)¹². I shortly illustrated that in the course of two Centuries, mathematics changed its role in physics passing from one computational role to that of a model. Although Hertz declared that he never understood completely Maxwell's electromagnetic conceptions, (Hertz, 1962b, 20) he took up the mathematical structure of Maxwell's theory, originally interpreting Maxwell's equations and performing a new type of experiment to prove the existence of ethereal waves. Hertz's ideas were highly influential in «bringing physicists to the utmost critical re-appraisal of their intellectual tools» (Cohen, 1956, V). It is not therefore too bold to affirm that the main intellectual heir of Kantianism in the German science was Heinrich Hertz (Cassirer 1953, 170 *passim*; Cassirer 1950, 102 *passim*). His emphasis on the axiomatic structure of physical theories influenced Einstein's Special Relativity. As illustrated by Ernst Cassirer's incisive comment: «When we consider electricity and light as phenomena of the same sort [...] *this assertion is not based on an agreement capable of being grasped by perception but on the form of the equations*» (Italics, S.D.) (Cassirer, 1953, 252). Einstein's adhesion to neo-Kantianism was expressed in one of his 1949 passages (Einstein 1959a, 680). It can be argued that his thought presents a grandiose intellectual conflict between two different scientific *Weltanschaungen*. In a crude synthesis of Einstein's philosophy, I argue that he was confronted with a double conceptual alternative: *a*) to content himself with a strongly axiomatic theory, but risking losing contact with physical reality; *b*) to construct *under-determined theories*, gaining contact with phenomena, but losing the transcendental power of formalism as regard their purity (D'Agostino 2005). Although controversial for some of its aspects, it can be reasonably argued that the complete fulfillment of the first alternative would correspond to Einstein's ideal of a purer theory. By his own admission, this ideal was not achieved in his lifetime (Einstein 1959, 686). It was considered hardly realizable by Hermann Weyl and other physicists in 1955 (D'Agostino 2005), the more so after the QM approach to elementary particles in our modern theories.

¹² The institutional and conceptual aspects of German Theoretical Physics were masterfully investigated by Jungnickel & McCormach (1986).

I agree with Gerald Holton that the confessed not-completeness of his theories (Einstein 1959a, 686) is to be valued as an important contribution to our understanding of the deep philosophical implications of the last two centuries theoretical physics (Holton 1988, 246). Recognizing this fact should effect the conclusive remarks of those historical contributions that are only interested in regarding science as a continuously successful enterprise. Just on the opposite, I consider the scientists' failures in achieving a conclusive view as a fruitful aspect of their research (Longo 2009, 75-76)

Einstein's thought was congenial with the scientific and philosophical tradition of the great European physicists : the experimental success of their theories did not release them from thinking they had to understand how and why theory and experiments were related. i.e., the *how and why of their success*. Their "ethos" was not only a discovery "ethos" but an intellectual and cultural "ethos", which aimed to associate their science and philosophy in a single field of interest.

Acknowledgements

I gratefully acknowledge the cultural inspiration and institutional help received from my friends and colleagues Stefano Bordoni, Vincenzo Fano, Arcangelo Rossi, Gino Tarozzi. I am especially grateful to the *Cesena XVI Scuola Estiva di Filosofia della Fisica* for a ten-years support given to my many years-long work on history of physics.

References

- Baird, D., Hughes, R.I.G. and Nordmann, A. (eds.), 1998, *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*, Dordrecht, Kluver Academic Publs.
- Bergia, S., 1991, "Attempts at Unified Field Theories (1918-1955): alleged failure and intrinsic validation/refutation criteria", in Earmann, J., Janssen, M. and Norton, J. D. (eds.), *Einstein Studies Series*, vol.4.
- Bevilacqua, F., 1984, "H.Hertz, Experiments and the Shift towards Contiguous Propagation in the Early Nineties", *Rivista di Storia della Scienza*, Vol 1, n.2 (1984), pp. 239-256.

- Buchwald, J. Z., 1994, *The Creation of Scientific Effects. Heinrich Hertz and Electric Waves*, Chicago, The University of Chicago Press.
- Cappelletti, V., 1976, *Opere di Hermann Von Helmholtz*, Utet, Torino.
- Cassirer, E., 1950, *The Problem of Knowledge, Philosophy of Science and History of Science since Hegel*, Yale USA, Yale University Press.
- Cassirer, E., 1953, *Substance and function and Einstein's Theory of Relativity*, NY, Dover Reprint.
- Cattaneo, G. and Rossi, A. (eds.), 1991, *I Fondamenti della Meccanica Quantistica. Analisi Storica e Problemi Aperti*, Editel, Commenda di Rende (Italy).
- Cohen, R.S., 1956, "Hertz's Philosophy of Science, an Introductory Essay", in Hertz, H., 1956, pp. I-XX.
- Cohen, R.S. and Helkana, Y. (eds.), 1977a, "Hermann von Helmholtz, Epistemological Writings", *Boston Stud. Phil. Science*, vol. XXXVII, Dordrecht, Reidel.
- Cohen, R.S. and Helkana, Y., 1977b, "Introduction", IX-XXVIII, in Cohen, R. S. and Helkana, Y. (eds.), 1977a.
- D'Agostino, S., 1968a, "Il pensiero scientifico di Maxwell e lo sviluppo della teoria del campo elettromagnetico nella memoria. On Faraday's Lines of Force", *Scientia* DCLXXIII, CLXXIV, 103 (1968), pp. 1-11.
- D'Agostino, S., 1968b, "I Vortici dell'Etere nella Teoria del Campo elettromagnetico di Maxwell", *Physis*, Anno X, Fasc.3 (1968), pp. 188-202.
- D'Agostino, S., 1975, "Hertz's Researches on Electromagnetic Waves", *Hist. Stud. in the Phys. Sciences*, Vol. 6, pp. 261-323.
- D'Agostino, S., 1978, "Experiment and theory in Maxwell's works", *Scientia*, 113, 453-468.
- D'Agostino, S., 1986, "Maxwell's Dimensional Approach to the Velocity of Light", *Centaurus*, 29, pp. 178-204.

- D'Agostino, S., 1993a, "Hertz's Researches and their Place in Nineteenth Century Theoretica Physics", *Centaurus*, 36 (1993), 46.
- D'Agostino, S., 1993b, "A consideration of the rise of theoretical physics in Europe and of its interaction with the philosophical tradition", in *First Eur. Physical Soc. Conference on History of Physics in Europe in the Nineteenth and Twentieth Centuries*, Ed. Compositori Bologna, pp 5-28.
- D'Agostino, S., 2000a, *A History of the Ideas of Theoretical Physics. Essays on the the Nineteenth and Twentieth Century Physics*, Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publ.
- D'Agostino, S., 2000b, "Einstein's Life Long Doubts on the physical Foundation of the General Relativity and Unified Field Theories", in D'Agostino, S., 2000a, pp. 239-252.
- D'Agostino, S., *Chapter II*, in D'Agostino, S., 2000a, pp. 239-252.
- D'Agostino, S., 2005, "Einstein and Weyl on the Epistemological Shortcomings of Unified Field Theories", in Alumni, C., Castellana, M., Ria, D., Rossi, A. (eds.), *Albert Einstein et Hermann Weyl 1955-2005, Questions épistémologiques ouvertes*, Manduria (TA), Barbieri Selvaggi, pp. 89-99.
- Einstein, A., 1921, *Geometrie und Erfahrung*, Berlin, Springer.
- Einstein, A., 1921, "Geometry and Experience", *Ideas and Opinions*, NY, pp. 232-243.
- Einstein, A., 1933, "On the Method of Theoretical Physics", *The Herbert Spencer Lecture delivered at Oxford*, June 10, 1933. Oxford Clarendon Press.
- Einstein, A., 1949c, "Autobiographical Notes", *A. Einstein Philosopher Scientist*, Harper & Brothers Publ. NY 1959, 2 vols, vol.1, pp. I-95.
- Einstein, A., 1959, *A. Einstein Philosopher Scientist*, Harper & Brothers Publ. NY , 2 vols.

- Einstein, A., 1959a, "Reply to Criticism", repr. in *A. Einstein Philosopher Scientist*, NY, Harper & Brothers Publ., 2 vols, vol 2, pp. 665-688.
- Einstein, A., 1959b, "Autobiographical Notes", in Einstein, A., 1959 ,vol.1, pp.I-95.
- Einstein, A., Tolman, R.C. and Podolsky, B., 1935, "Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?", *Physical Review*, vol. 37, pp. 780-781; trad.it., Tarozzi 1992.
- Fano, V., 1996, *Matematica ed esperienza nella fisica moderna*, Firenze, Il Ponte Vecchio.
- Harmann, P.M. (ed.), 1995, *The Scientific Papers and Letters of James Clerk Maxwell*, Vol.2, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 1862-1873.
- Helmholtz, H., 1956c, "Preface of H. von Helmholtz", in Hertz, H., 1956a, (numberless).
- Helmholtz, H., 1871, "Die Tatsachen in der Waharnehmung", in Helmholtz, H., *Populäre.wissenschaftliche.Vorträge*, 2 vol, pp. 215-247.
- Helmholtz, H., 1977, "*The Facts in Perception*", (Engl. Transl of Helmholtz 1871), in Cohen, R.S. and Helkana, Y. (eds.), 1977.
- Hertz, H., 1956a, *The Principles of Mechanics presented in a new Form*, NY, Dover Publ. Inc. (Engl. Transl. of: Hertz H. 1910, *Die Prinzipien der Mechanik in Neuen Zusammenhang Dargestellt*, Leipzig, J.M. Barth).
- Hertz, H., 1956b, "Introduction", in Hertz, H., 1956a, pp. 1-41.
- Hertz, H., 1962, "On the finite Velocity of Propagation of electric Action", in Hertz, H., 1962a, pp. 107-123.
- Hertz, H., 1962a, *Electric Waves, being Researches on the Propagation of Electric Action*, Dover Pbl, (Engl. Transl. of: Hertz H. 1914, *Intersuchungen ueber die Ausbreitung der Elektrischen Kraft*, Leipzig, J.M. Barth).
- Hertz, H., 1962b, "Introduction", in Hertz, H., 1962a, pp. 1-28.

- Holton, G., 1988, *Thematic Origins of Scientific Thought. Kepler to Einstein*, (Revised Edition), Harvard, Harvard University Press.
- Jungnickel, C. and McCormach, R., 1986, *The Torch of mathematics 1800-1870*, Vol. 1 of *Intellectual Mastery of Nature Theoretical Physics from Ohm to Einstein*, 2 Vols., Chicago, The University of Chicago Press.
- Longo, G., 2009, “Incompletezza, indeterminazione, aleatorio. La forza del ‘no’ nel pensiero scientifico moderno”, *Riflessioni sistemiche*, N. 1, Agosto, pp. 74-82.
- Maxwell, J. C., (Undated), “On the Mathematical Classification of Physical Quantities”, in Maxwell, J. C., 1957, *The Scientific Papers of James Clark Maxwell*, Vol. 2, Dover Reprint, pp. 257-266.
- Maxwell, J. C., (undated), “On the Dynamical Evidence of the Molecular Constitution of Bodies”, in Maxwell, J. C., 1957, *The Scientific Papers of James Clark Maxwell*, Vol. 2, Dover Reprint, pp. 418-428.
- Maxwell, J. C., 1855, “On Faraday’s Lines of Force”, in Maxwell, J. C., 1954, Vol. 1, pp. 155-229.
- Maxwell, J. C., 1957, *The Scientific Papers of James Clark Maxwell*, Vol. 2, Dover Reprint.
- Maxwell, J. C., 1861, “On Physical Lines of Force”, *Philosophical Magazine*, 21, Part I, March 1861, Part II, April and May 1861.
- Maxwell, J. C., 1862, “On Physical Lines of Force”, *Philosophical Magazine*, January and February 1862, Part III, in Maxwell, J. C., 1954, Vol. 1, pp. 451-513.
- Maxwell, J. C., 1864, “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field”, *Transaction Royal Society*, CLV, received: October 27, read: December 8, 1864, in Maxwell, J. C., 1954, Vol. 1.
- Maxwell, J. C., 1971, *Matter and Motion*, Dover reprint.

Maxwell, J. C., 1871(circa), “On the Mathematical Classification of Physical Quantities”, (undated), in Maxwell, J. C., 1954, Vol. 2, pp, 257-266.

Maxwell, J. C., 1877, *Matter and Motion 1901-1921*, Amsterdam, Elsevier 1967.

Maxwell, J. C., 1890, *The Scientific Papers of James Clark Maxwell*, Niven, W.D. (ed.), Third Edition, 2 vols.

Maxwell, J. C., 1891, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3th Edition, Cambridge University Press.

Maxwell, J. C., 1920 (circa), *Matter and Motion* , Reprinted, with Notes and an Appendix by Sir Joseph Larmor.

Maxwell, J. C., 1954, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Dover reprint, 2 Vols.

Maxwell, J. C., 1954a, *The Scientific Papers of James Clark Maxwell*, Dover Reprint; 2 Vols.

Maxwell, J. C., 1995, *Scientific Papers and Letters*, Vol. 2, 1862-1873, Cambridge, Cambridge University Press.

Meulders, M., 2001, *Helmholtz, Des Lumières aux neurosciences*, Paris, Edition Odile Jacob.

Minati, G., 2009, “L’incertezza nella gestione della complessità”, *Riflessioni sistemiche*, N. 1, Agosto, pp. 91-100.

Pais, A., 1982, *Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*; Oxford, Clarendon Press.

Rosenfeld, L., 1956, “The velocity of light and the evolution of electrodynamics”, *Il Nuovo Cimento*, Supplemento al Vol. IV, X, 5, pp. 1630-1667.

Schilpp, A. (ed.), 1951, *Albert Einstein Philosopher Scientist*, NY, Harper Torch Books, 2 Vols.

Tarozzi, G. (ed.), 1992, *Il paradosso della realtà fisica (Le interpretazioni dell'argomento di Einstein, Podolsky e Rosen)*, Cesena, Acc. Naz. di Scienze Lettere ed Arti, Modena, Ass. alla Cultura.

Vizgin, V. P., 1986, “Einstein., Hilbert, and Weyl: the Genesis of the Geometrical Unified Field Theory Programm”, in *Einstein and the History of General Relativity*, Birkhäuser, pp. 300-314.

A non-reductionist alliance between mechanics and thermodynamics: from Massieu's potentials to J.J. Thomson's dynamical theory

Stefano Bordoni
Bologna University
stefano.bordoni2@unibo.it

Between the 1860s and 1880s, the recently emerged thermodynamics underwent a powerful mathematisation, and new theoretical frameworks were put forward. Moreover a widespread philosophical and cosmological debate on the second law also emerged.¹ On the specific physical side, two main traditions of research were at stake: the refinement of the kinetic theory of gases, and a questionable alliance between mechanical models and statistical procedures, on the one hand, and the attempt at recasting thermodynamics in accordance with the mathematical structures of analytical mechanics, on the other.²

James Clerk Maxwell and Ludwig Boltzmann pursued the integration of thermodynamics with the kinetic theory of gases, whereas other scientists relied on a macroscopic and abstract approach in term of continuous variables, setting aside specific mechanical models. One of the essential features of thermodynamics, the time irreversibility, made it very different from mechanics. Nevertheless, both traditions of research attempted to bridge the gap between the mechanical and thermal domains. It is worth remarking that, at the turn of the twentieth century, the alliance between microscopic

¹ For the methodological and philosophical debate which stemmed from the second principle of thermodynamics, see Kragh (2008), chapters 3 and 4.

² For a detailed reconstruction of the theoretical pathway leading from Clausius to Duhem, see Bordoni (2012c). The first half of this paper has widely been developed in Bordoni (2013a) and Bordoni (2013b).

mechanical models and probabilistic laws was successfully applied to the field of electromagnetic radiation. (Darrigol & Renn 2003, 498 and 505).

The more abstract approach to thermodynamics was based on the mathematical and physical concept of *potential*, and had its roots in Rudolf Clausius's and William Macquorn Rankine's researches in the mid-nineteenth century. An essential feature of that tradition of research was the assumption of a new *physical space*, where thermal variables (and variables of other kind) went along with time and geometrical variables in order to describe complex physical events. The simplified picture of two traditions of research in thermodynamics overshadows the existence of many nuances and different theoretical streams. Different “mechanical theories of heat”, and different meanings of the adjective *mechanical* were on stage. In the abstract approach we can find at least three trends, which corresponded to different attitudes toward mechanics:

- 1) a macroscopic and phenomenological approach,
- 2) a macroscopic approach based on a structural analogy with abstract mechanics,
- 3) a combination of macroscopic and microscopic approaches.³

I must stress that some scientists contributed to different streams: Max Planck and Arthur von Oettingen contributed to the first and second, Hermann von Helmholtz developed the second and third, and Joseph John Thomson was also at ease along the second and third. In 1888, Thomson remarked that physicists had at their disposal two different methods: a detailed mechanical description of the physical system, and a more general description that depended on «the properties of a single function of quantities fixing the state of the system» (Thomson 1888, v-vi, 1-2, and 4). The third stream represented an attempt at bridging the gulf between the two main traditions. It is worth remarking that even Clausius had previously followed a twofold pathway: a very general mathematical approach to thermodynamics in some memoirs, and an attempt at devising kinetic models of gases in other memoirs.

³ We should add the energetist approach, which in its turn encompassed different attitudes: Helm's approach, which stemmed from the tradition of mathematical physics, was different from Ostwald's approach, which emerged in the context of the experimental physical chemistry, and led to a simplified metaphysics of energy. On *Energetism* see Ostwald (1896), Helm (1898), and Deltete (1999).

1. The two main traditions

In the 1870s, the Austrian physicist Ludwig Boltzmann tried to go far beyond Maxwell's microscopic interpretation of equilibrium in rarefied gases: he aimed at inquiring into the processes leading to equilibrium. In a long paper he published in 1872 he assumed that molecules were continuously in motion, and those microscopic undetectable motions gave rise to «well-defined laws» at the macroscopic level, which involved the observed average values. A thermodynamic theory required therefore two different levels: a microscopic invisible, and a macroscopic visible one. Statistics and probability could bridge the gap between the two levels. According to Boltzmann, probability did not mean uncertainty: probabilistic laws were ordinary mathematical laws as certain as the other mathematical laws (Boltzmann 1872, 316-8).

In 1877, in an even longer paper, his physical model of gas was not so far from the model he had put forward five years before. The gas was «contained in a vessel with rigid and elastic walls», and the molecules interacted as they were equally rigid and elastic balls. Another suitable model was that of «centres of force» endowed with a specific law of force: only when their distances became «less than a given value», they experienced some kind of interaction. This allowed Boltzmann to combine two different processes, which stemmed from two different mechanical traditions: the continuity of unperturbed trajectories, and the discontinuity of sudden collisions. Boltzmann stressed the structural similarity between his function Ω , representing the probability of a given state, and the entropy dQ/T in any «reversible change of state». Many years ago, Ernst Cassirer claimed that Boltzmann had managed to remove the «paradoxical and extraneous nature (*Fremdheit*)» of the second Principle of Thermodynamics in the context of Mechanics. He qualified Boltzmann as «one of the most rigorous representatives of classic Mechanics». The fact is that, in Boltzmann's theory, the second Principle did not stem from Mechanics, but from statistical and probabilistic hypotheses unrelated to Mechanics. I find questionable that Boltzmann might be qualified as a «classical physicist» (Boltzmann 1877, 166 and 216-7; Cassirer 1936, 95-6).⁴

⁴ Dugas reminded us that Boltzmann's theoretical representation of atoms and molecules evolved over time. In the first volume of his *Vorlesungen über Gastheorie* (1895-1898), we find molecules as «elastic spheres» and then molecules as «centres of force», whereas in the second volume, molecules are represented as «mechanical systems characterized by generalized coordinates». See Dugas (1959), pp. 25 and 79, footnote 5 included.

In the following years, on the European Continent, some scientists cast doubts on atomism and microscopic interpretations of the second principle of Thermodynamics. In 1893, Henri Poincaré remarked that Mechanics required that «all phenomena are *reversible*», even though every experience contrasted that requirement: thermal conduction was a well-known instance of irreversibility. That a scientist could expect thermal irreversibility to stem from the laws of Mechanics, seemed logically inconsistent to Poincaré: how could we rely on a theory wherein «we find reversibility at the outset, and irreversibility at the end»? Moreover, in his researches on the mathematical foundations of mechanics, he had found that a physical system could return to the surroundings of its initial conditions after a very long time. Boltzmann answered systematically to Poincaré's criticism, and subsequently to the criticism of the young mathematician Ernst Zermelo. He stressed the intrinsic statistical nature of his approach: from his point of view, «Poincaré's theorem» was «completely in accordance» with his own theorems. In 1896 he remarked that the entity of Poincaré's recurrence time «makes a mockery of every attempt at observing it», and in 1897 stressed that «[i]n practice [...] a numerical upper boundary for the time of recurrence [...] cannot be specified» (Poincaré 1893, 534-7; Boltzmann 1896, 571; Boltzmann 1897, 595; Dugas 1959, 207-8 and 212-3; Brush 1976, book 1, 96 and book 2, 356-63).⁵

It is worth remarking that, in 1894, Boltzmann had taken part in the annual meeting of the *British Association for the Advancement of Science*, and his communications raised some debate, which continued in the pages of the scientific journal *Nature* in 1895. The British physicists Edward P. Culverwell, Joseph Larmor, Samuel H. Burbury, George H. Bryan, and Henry W. Watson's discussed and criticised Boltzmann's theory. The British journal also hosted a paper where Boltzmann tried to clarify his probabilistic approach to Thermodynamics (Culverwell 1895, 246; Boltzmann 1895, in Boltzmann 1909, III. Band, 535; Brush 1976, book 2, 622).

However, in the second half of the nineteenth century, a different pathway to Thermodynamics was taken by scientists and engineers who relied on abstract generalisations and Analytical Mechanics. The most important difference between this pathway and Maxwell and Boltzmann's pathway dealt with the relationship between Thermodynamics and Mechanics. According to the former, a general mathematical framework had to be set

⁵ In 1906 Poincaré returned to the concept of entropy, and put forward two different kinds of entropy. See Cercignani (1997, 98-9, 103, and 149).

up, without any reference to microscopic structure underlying the physical system under consideration. According to the latter, microscopic mechanical models, mixed with extra-mechanical hypothesis of probabilistic nature, were expected to account for the thermodynamic behaviour of macroscopic systems. Expressions like “mechanical theory of heat” had different meanings when interpreted in the two different perspectives: formal similarities between the mathematical structures of Thermodynamics and Mechanics in the first case, and specific mechanical models in the second.

In 1869, the mining engineer and professor at Rennes University François Massieu took the path of a mathematical generalisation of thermodynamics. After having chosen the volume v and the temperature t as independent variables, and after some computations, he arrived at a function ψ whose differential was an exact differential of the same variables. Massieu labelled «*characteristic function of the body*» the function ψ . The most important mathematical and physical step consisted in deriving «all body properties dealing with thermodynamics» from ψ and its derivatives. More specifically, the internal energy U and the entropy S could be expressed in terms of the function ψ :

$$U = T^2 \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad \text{and} \quad S = \psi + T \frac{\partial \psi}{\partial t}, \text{ or} \quad S = \frac{\partial}{\partial t}(T \psi) \quad \text{and} \quad \psi = S - \frac{U}{T}.$$

He also introduced a second *characteristic function* ψ' in terms of the two variables t and pressure p . Besides U , p , v , Q and S , even the specific heats at constant pressure or volume k and k' , and the coefficient of dilatation at constant pressure or volume β and β' could be derived from ψ and ψ' (Massieu 1869a, 859 and Massieu 1869b, 1058-61).

According to Massieu, this «mechanical theory of heat» allowed mathematicians and engineer to «settle a link between similar properties of different bodies». Thermodynamics could rely on a consistent set of general and specific laws, and his “characteristic functions” could be looked upon as the mathematical and conceptual link between general and specific laws. In Massieu’s theoretical and meta-theoretical context, the adjective mechanical did not mean microscopic mechanical models in the sense of Maxwell and Boltzmann, but a mathematical approach on the track of abstract mechanics. (Massieu 1876, 2-3).

2. From Gibbs to Helmholtz

An abstract approach and wide-scope generalisations were also the hallmarks of Josiah Willard Gibbs's researches on thermodynamics, which he published in the *Transactions of the Connecticut Academy* in the years 1875-78. The American scientist put forward three «fundamental» thermodynamic functions:

$$\psi = \varepsilon - t\eta, \quad \chi = \varepsilon + p\nu, \quad \zeta = \varepsilon - t\eta + p\nu.$$

The adjective fundamental meant that all «thermal, mechanical, and chemical properties» of a physical-chemical system could be derived from them. Under specific conditions, the functions ψ , χ , and ζ led to new conditions of equilibrium (Gibbs 1875-8, 89)⁶.

Gibbs was weaving the plot of a more general mechanics of equilibrium: he followed the track of analytical mechanics, but aimed at a wider-scope mechanics, which encompassed mechanics, thermodynamics and chemistry. He did not try to describe complex thermodynamic systems by means of mechanical models: on the contrary, purely mechanical systems were looked upon as specific instances of thermodynamic ones. The relationship between mechanics and thermodynamics consisted of a formal analogy: the mathematical structure of mechanics offered a formal framework for the more general mathematical structure of thermodynamics.

In 1880, the young German physicist Max Planck remarked that the theory of elasticity had been put forward without any connection with the thermal properties of bodies, and the thermal actions on them. In the dissertation *Gleichgewichtszustände isotroper Körper in verschiedenen Temperaturen*, which he published in order to be given the *venia legendi*, he aimed at filling the gap between thermodynamics and the theory of elasticity. He outlined a mathematical theory where the mechanics of continuous media merged with thermodynamics.

He relied on the two principles of «the mechanical theory of heat»: «specific assumptions on the molecular structure [*Beschaffenheit*] of bodies» were «not necessary». In accordance with this theoretical option, he assumed that isotropic bodies consisted of «continuous matter». The body could be subject to «an external pressure», and the condition of equilibrium was assured by the counteraction of «internal elastic forces». Both mechani-

⁶ The modern names and symbols for Gibbs's functions ψ, χ, ζ are *free energy* $F=U-TS$, *enthalpy* $H=U+pV$, and *free enthalpy* or *Gibbs free energy* $G=U-TS+pV$ (Müller 2007, 70, 131-2, and 147-8; Kragh & Weininger 1996, 99).

cal work and heat flow could act on the body: under those actions, both the reciprocal of density («*spezifische Volumen*») and temperature could change from $(v; T)$ to $(v'; T')$. In particular the geometrical co-ordinates of a point inside the body, and its temperature, underwent a transformation in accordance with the equations

$$x = x_0 + \xi; \quad y = y_0 + \eta; \quad z = z_0 + \zeta \quad \text{and} \quad T' = T + \tau,$$

where x_0, y_0, z_0 and T were the initial values and ξ, η, ζ , and τ the infinitesimal variations. Planck specified that energy depended on τ and on the derivative of (ξ, η, ζ) with reference to (x, y, z) . In particular it depended on the seven new variables τ and Cauchy's six strain components,

$$\begin{aligned} x_x &= \frac{\partial \xi}{\partial x}, & y_y &= \frac{\partial \eta}{\partial y}, & z_z &= \frac{\partial \zeta}{\partial z}, \\ x_y + y_x &= \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial x}, & y_z + z_y &= \frac{\partial \eta}{\partial z} + \frac{\partial \zeta}{\partial y}, & z_x + x_z &= \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial z} \end{aligned}$$

(Planck 1880, 3-4 and 9-10).

Cauchy had put forward a two-constant relation between stress and deformation, which is «the one now accepted for isotropic elasticity». In 1852 the mathematician and engineer Gabriel Lamé published the first book on the theory of elasticity, *Leçons sur la Théorie Mathématique de l'Élasticité des Corps Solides*. He came to the conclusion that «to determine the elastic properties of an isotropic material, two elastic constants were required». It is worth mentioning that some kind of thermo-elastic equations had already been put forward by Jean-Marie Duhamel in 1838, and Franz Neumann in 1841, quite before the emergence of thermodynamics (Darrigol 2002, 119-20; Timoshenko 1983, 107, 110, 116-7 and 242-3; Barus 1905, 356).

Planck showed that energy, entropy, and elastic stresses depended on a combination of mechanical and thermal variables, which were multiplied by a combination of mechanical and thermal coefficients. The two elastic constants could be expressed in terms of those coefficients (Planck 1880, 21-3).

After two years, and after having made important contributions to physics and physiology, Helmholtz, renowned professor of physics at Berlin University, put forward a mathematical theory of heat pivoted on the concept of «free energy». The role of entropy, the structural analogy between

thermodynamics and mechanics, and a unifying theoretical framework for physics and chemistry were at stake in a paper he published in 1882⁷.

Helmholtz labelled ϑ the absolute temperature, and p_α the parameters defining the state of the body: they depended neither on each other nor on temperature. If P_α was the external force corresponding to the parameter p_α , and $P_\alpha \cdot dp_\alpha$ the corresponding work, then the total external work was $dW = \sum_\alpha (P_\alpha \cdot dp_\alpha)$. If U was the internal energy of the physical system, S ist entropy, and J the mechanical equivalent of the heat unit, the function $\mathcal{F} = U - J \cdot \vartheta \cdot S$ played the role of a generalised potential for the forces P_α :

$$P_\alpha = -\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial p_\alpha}.$$

According to Helmholtz, the function \mathcal{F} represented the potential energy or the «Ergal» in the thermodynamic context. The functions U and S could be derived from \mathcal{F} by simple derivation. Helmholtz did not seem aware of Massieu's result, which had probably not crossed the France borderlines⁸. The function \mathcal{F} also represented the «free energy», namely the component of the internal energy which could be transformed into every kind of work. If U represented the total internal energy, the difference between U and \mathcal{F} , namely $J \cdot \vartheta \cdot S$, represented the «bound energy», namely the energy stored in the system as a sort of *entropic* heat (Helmholtz 1882, 968-9 and 971).

In 1884 Helmholtz attempted to give a microscopic representation of heat, but without any recourse to specific mechanical models. In the memoirs *Principien der Statik monocyklischer Systeme*, he followed an intermediate pathway: he introduced a global microscopic Lagrangian coordinate, corresponding to a fast, hidden motion, and a set of macroscopic coordinates, corresponding to slow, visible motions. The energy associated with the first coordinate corresponded to thermal energy, whereas the energy associated with the others corresponded to external thermodynamic work (Helmholtz 1884a; Helmholtz 1884b; Bierhalter 1993).

⁷ For a brief scientific biography, see Cahan (1993b, 3). For a general account of Helmholtz's contributions to thermodynamics and Thermo-Chemistry, see Bierhalter (1993), and Kragh (1993).

⁸ Clausius had already coined the terms «ergal» and «ergon» in order to represent «the force function» and work (Daub 1970, 332, 56).

3. Oettingen's symmetries

In 1885 the German speaking physicist Arthur von Oettingen, who held the chair of physics in Dorpat University (now Tartu, Estonia), undertook an even more ambitious design: a formal theory, where mechanical work and heat flows represented the starting point of a dual mathematical structure (Oettingen 1885, p. 1).

The whole body of knowledge of thermodynamics could be based on four «main variables» or parameters, and two kinds of energy. On the one hand, he put temperature and entropy, and the corresponding energy, which was «the actual energy» [*actuelle Energie*] Q , or in other words the exchanged heat. On the other hand, he put volume and pressure, and the corresponding energy, which was the «potential energy S », namely the mechanical energy which actually appeared under the form of mechanical work. In brief

$$dQ = t \cdot du, \quad dS = -p \cdot dv,$$

where t was «the absolute temperature», u «the entropy or Adiabate», p «the pressure» and v «the specific volume». Temperature was a measure of the amount of «actual energy of molecules», and pressure was the measure of «the dead energy of the body against the outer wall» (Oettingen 1885, 2-3).

In general the state of a system could be described by two parameters among the four t, u, p, v , but the two more meaningful representations corresponded to the choices (u, t) and (v, p) . Oettingen insisted on the physical and linguistic symmetry between thermal and mechanical variables and functions. He put forward a list of «energy coefficients» or «capacities»: among them, the ordinary heat capacities could be found. That list was a dual one indeed: if on the left the list of «heat capacities» [Wärmecapacitäten] was displayed, on the right we can see the list of «work capacities» [Arbeitscapacitäten]. In particular, «thermal heat capacities» and «thermal work capacities» corresponded to

$$\left(\frac{dQ}{dt} \right)_v = C_v, \quad \left(\frac{dQ}{dt} \right)_p = C_p; \quad \left(\frac{dS}{dt} \right)_u = \Phi_u, \quad \left(\frac{dS}{dt} \right)_p = \Phi_p$$

whereas «barometric heat capacities» and «barometric work capacities» corresponded to

$$\left(\frac{dQ}{dp} \right)_v = F_v, \quad \left(\frac{dQ}{dp} \right)_t = F_t; \quad \left(\frac{dS}{dp} \right)_u = \Gamma_u, \quad \left(\frac{dS}{dp} \right)_t = \Gamma_t$$

(Oettingen 1885, 4-8)⁹.

Oettingen was aware of the existence of recent abstract approaches to thermodynamics. In particular, he attempted to link his approach to Helmholtz's recent researches, and in his essay the concepts of «free and bound energy» played a relevant role. In reality, in accordance with his dual and complementary framework, he relied on a series of four functions, «free, bound, total and lost energies» [«*freie, gebundene, totale und verlorene Energie*»]. A two-fold representation, and an intrinsic symmetry emerged once again. He first introduced the two functions «bound energy $G=t \cdot u$ » and «lost energy $V=-p \cdot v$ », and then defined «free energy» and «total energy» as

$$F = E - G = E - t \cdot u, \quad T = E - V = E - (-p \cdot v)$$

(Oettingen 1885, 21-2).

The two couples of functions or potentials $(F; G)$ and $(T; V)$ allowed physicists to split internal energy into two parts, and the split could be performed in two different ways. The traditional split $dE = dQ + dS$ of the *state function* E did not lead to *state functions* or potentials, whereas the two new splits led to two couples of *state functions*. In Oettingen's dual framework, free energy and total energy appeared as the generalisation of mechanical work and exchanged heat, or better a sort of actual work and heat, once some kind of *disturbing terms* were subtracted (Oettingen 1885, 21-3).

In the last pages of the first part of his essay, Oettingen showed that even Gibbs's third potential $\mathcal{N} = E - tu + pv$ could find room in his mathematical framework: it could be expressed alternatively as

$$\mathcal{N} = F + T - E \quad \text{or} \quad \mathcal{N} = E - G - V.$$

As a further combinatorial synthesis he displayed the derivatives of the five functions F, G, T, V, \mathcal{N} with reference to the four basic parameters

⁹ A graphic interpretation of heat and work capacities was available both in (u, t) and (v, p) spaces. In particular, the values of C_v and C_p could be found in the horizontal axes u of the plane (u, t) , and the values of Γ_u and Γ_t could be found on the horizontal axes v of the plane (v, p) .

p, v, t, u . Every derivative could be performed under the condition of constancy of one of the other parameters. In other words, those derivatives had the formal structure

$$\left(\frac{dP_k}{dx_j} \right)_{x_l} \quad k=1,2,3,4,5; \quad j,l=1,2,3,4$$

where P_k represents the five potentials, and x_k, x_l two among the four basic parameters. As a whole, 60 derivatives could be written down, and each of them corresponded to a specific combination of parameters and «capacities». The list could be reversed, and every basic parameter and every «capacity» corresponded to some derivatives of thermodynamic potentials (Oettingen 1885, 23 and 26-9).

In the end Oettingen pointed out the generality of his approach, which was valid «for any state of aggregation». The choice of basic parameters or variables did not affect such a generality: in particular, the variable v could be replaced by a set of geometrical parameters, «just as Helmholtz had done». Nevertheless the theory required «reversible processes», and he did not specify how the wonderful symmetries of the equations might be preserved in the case of irreversible processes. However he thought he had fulfilled his explicit «intention», namely to collect «into a self-contained system all existing knowledge» on thermodynamics (Oettingen 1885, 31).

After four years Planck reviewed Oettingen's essay in the *Annalen der Physik*: he described carefully its content, and the author's specific point of view, which he labelled «dualism». He praised both Oettingen's effort to attain «completeness», and «the new systematic framework» for the «variety of formulae dealing with the theory of heat». (Planck 1889, 838). It is worth mentioning that, in 1891, in a paper he read at the annual meeting of German scientists, Planck claimed that Maxwell and Boltzmann's skilful «analysis of molecular motion» was not «adequately rewarded by the fruitfulness of the results gained». In particular, he found that the kinetic theory was not at ease with phenomena placed on the borderline between physics and Chemistry: he did not expect that it could «contribute to further progress» in that field. Similar remarks can be found in the book on the foundation of Thermochemistry Planck published in 1893. As Darrigol and Renn pointed out some years ago, «Helmholtz and Planck preferred a macroscopic approach in terms of differential equations, which involved really observable entities». Nevertheless they had different attitudes with regard to molecular hypotheses: whereas Helmholtz made minimal use of them with-

out denying molecular reality, Planck rejected any form of atomism. (Deltete 2012, 3-4; Darrigol & Renn 2003, 503 and 505; Kuhn 1987, 22; Born 1948, 163).

4. J.J. Thomson's applications of «dynamics»

In 1888 Joseph John Thomson, then Cavendish Professor of Experimental physics at Cambridge, published a book, *Applications of Dynamics to Physics and Chemistry*, where he put forward a very general approach to physical and chemical problems in which the superposition of different effects was at stake. He analysed phenomena where both mechanical stresses and magnetic actions were involved, or elastic and thermal effects interacted with each other, or electromotive forces emerged from a thermal disequilibrium. He noted that the phenomena under investigation were «generally either entirely neglected or but briefly noticed» in contemporary treatises (Thomson 1888, p. v.).

From the outset he remarked that physicists had at their disposal two different methods of establishing «the connection between two different phenomena»: a detailed mechanical description of the physical system, on the one hand, and a more general, or «dynamical», description, «which does not require a detailed knowledge of the mechanism required to produce the phenomena», on the other. The second method depended on «the properties of a single function of quantities fixing the state of the system», and had already been «enunciated by M. Massieu and Prof. Willard Gibbs for thermodynamic phenomena». He found a deep connection between «the extension of the principle of the Conservation of Energy from mechanics to physics», and «the belief that all physical phenomena can be explained by dynamical principles», where the expression «dynamical principles» corresponded to «Hamilton's principle of Varying Action and the method of Lagrange's Equations». He also found that the methods of analytical mechanics in the context of thermodynamics were consistent with the fact that «the kinetic energy possessed by bodies in visible motion can be very readily converted into heat». (Thomson 1888, v-vi, 1-2, and 4).

The structure of Lagrange's equations

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{q}_i} - \frac{dL}{dq_i} = Q_i \quad i = 1, \dots, n$$

where $L = T - V$, and Q_i were the forces acting on the coordinates q_i , was suitable for dealing with a set of coordinates which were geometrical only in part. Temperature or a distribution of electricity could be interpreted as “coordinates” in a very general sense. Thomson appreciated the possibility of giving «a more general meaning to the term *coordinates* than that which obtains in ordinary Rigid Dynamics». He insisted on this opportunity: «any variable quantities» could be considered as coordinates if the corresponding Lagrangian function could be expressed «in terms of them and their first differential coefficients». Two kinds of ambiguity emerged from that pliable structure: the impossibility of a sharp separation between kinetic and potential energy, and the difficulty in determining whether a given symbol should be associated with a generalised coordinate or velocity. According to Thomson, some «dynamical considerations» could enable physicists «to overcome this difficulty». (Thomson 1888, 9, 17 and 19).

In the sixth chapter of his book, *Effect of temperature upon the properties of bodies*, he extended the methods to those cases «in which we have to consider the effects of temperature upon the properties of bodies». A dynamical interpretation or «a dynamical conception of temperature» had already been offered by «the Kinetic Theory of Gases»: temperature was a measure of «the mean energy due to the translatory motion of the molecules of the gas». In this case Thomson attributed two different meanings to the adjective «dynamical», and this might mislead the reader. He made «dynamical methods» and mechanical models overlap, and let the readers think that the mechanical interpretation of temperature was an essential feature of the general dynamical method (Thomson 1888, 89-90).

The superposition of dynamical methods and mechanical models led Thomson to introduce kinetic terms of the kind

$$\frac{1}{2} (uu) \dot{u}^2 + \dots$$

where u was a Lagrangian coordinate «helping to fix the position or configuration of a molecule». He saw «an essential difference» between this kind of coordinates and those «which fix the geometrical, strain, electric, and magnetic configuration of the system». If the latter could be labelled «controllable coordinates» because they were «entirely under our control», the former were much more elusive and «individually» unattainable. Only «the average value of certain functions of a large number of these coordinates» was actually observable or measurable: he labelled them «unconstrained».

inable» coordinates. He could not exclude that the above kinetic terms depended on some «controllable coordinate ϕ », namely

$$\frac{1}{2}(uu)\dot{u}^2 + \dots = \frac{1}{2}f(\phi)[(uu)\dot{u}^2 + \dots]$$

where «the coefficients (uu) ' do not involve ϕ ». On the contrary, the temperature θ , which was proportional to those kinetic expressions, did not involve «controllable coordinates». In the very general expression

$$\theta = \frac{1}{2}C[(uu)\dot{u}^2 + \dots],$$

the term C should not contain any ϕ (Thomson 1888, 89-90).

Thomson arrived at an equation that linked the dependence of heat fluxes on mechanical coordinates to the dependence of external forces on temperature. A deep connection between thermal and mechanical effects was at stake, and he reminded the reader that both Maxwell and Helmholtz had arrived at the same result although starting from different assumptions. Then he made use of this equation in order to tackle «the relations between heat and strain», and in particular the «effects produced by the variation of the coefficients of elasticity m and n with temperature» (Thomson 1888, 98-100).

It is worth mentioning that the separation between *mechanical* and *dynamical* approaches was also at stake in the context of British theories of elasticity. In 1845 George Gabriel Stokes had introduced two distinct kinds of elasticity, «one for restoration of volume and one for restoration of shape». As Norton Wise pointed out in 1982, «he worked only with observable macroscopic concepts», and distinguished between «mechanical» and «dynamical» theories. He reserved the term «mechanical theory» for «speculations» into the structure of matter or aether, and *dynamical theory* for an approach independent of such hypotheses (Darrigol 2002, 142; Norton Wise 1982, 185-6; Stokes 1883, 244-5).

If the coefficients of elasticity decreased as the temperature increased ($dm/d\theta < 0$ and $dn/d\theta < 0$) then his equations showed that $\delta Q > 0$: a given amount of heat had to be supplied in order «to keep the temperature of a bar constant when it is lengthened». In other words, «a bar will cool when it is extended», if no heat is supplied from outside.

In the case of a twist, the physical interpretation was not different from the previous one: when a rod is twisted, «it will cool if left to itself», pro-

vided that «the coefficient of rigidity diminishes as the temperature increases», which is what usually happens (Thomson 1888, 20, 47-8 and 100-1).¹⁰

5. Concluding remarks

In the 1880s, a unified approach to mechanics and thermodynamics was put forward by different scientists in different countries. Oettingen explicitly mentioned the role played by Massieu, Gibbs and Helmholtz. In the introduction to the first edition (1897) of his *Vorlesungen über Thermodynamik* Planck did not name other contributors, except Helmholtz. In the second, improved edition he only added the names of physicists who had contributed to the «research results in the field of heat radiation». J.J. Thomson mentioned Massieu and Gibbs alongside Lagrange and Hamilton (Oettingen 1885, 21; Planck 1897, IV-V; Planck 1905, VI-VII; Thomson 1888, vi).

In 1891, while he was a young lecturer at Lille University, the French physicist Pierre Duhem began to outline a systematic design of mathematisation and generalisation of thermodynamics. In Duhem's texts, physical remarks and historical reconstructions were tightly linked to each other: he credited Massieu, Gibbs, Helmholtz, and Oettingen with having carried out «the most important researches on that subject». Although he did not mention J.J. Thomson, his general aim was not so different from Thomson's, but he rejected any microscopic representation of heat (Duhem 1891, 231-2).¹¹

He pursued a wide-scope alliance between Lagrangian mechanics and thermodynamics. That scientific enterprise was not confined to thermodynamics: in the same years, in Great Britain, Fitzgerald, J.J. Thomson and Joseph Larmor were looking for a new alliance between Lagrangian mechanics and the electromagnetic theory. If something like “the crisis of mechanics” crossed the late nineteenth century, it did not dwell at the homes of Massieu, Gibbs, Helmholtz, Planck, Oettingen, Thomson, and Duhem. These physicists offered *mechanical* theories of heat that relied on the tradi-

¹⁰ Even in this case Thomson mentioned previous researches in the same field: he reminded the readers that William Thomson had first obtained those results «by means of the Second Law of thermodynamics». (*Ibidem*, p. 101).

¹¹ For a historical reconstruction of Duhem's researches on theoretical physics see Bordoni (2012a), Bordoni (2012b), and Bordoni (2012c), and the less recent but very detailed Manville (1927).

tion of mathematical physics: they pursued a *mechanical* approach to thermodynamics that did not stem from a reductionist design.

The pursuit of an abstract thermodynamics in the late nineteenth-century might be regarded as a body of knowledge of merely historical interest. Nevertheless that tradition of research resurfaced in the second half of the twentieth century, and found new implementations in the context of rational thermodynamics and thermodynamics of irreversible processes. Twentieth-century developments like «modern continuum thermodynamics» and theories concerning «elastic materials», «viscous materials», and «materials with memory» might be looked upon as more sophisticated implementations of what Planck, Oettingen and J.J. Thomson had put forward in the 1880s (Truesdell 1984, 7, 24-5, 123 and 157; Müller & Weiss 2012, 180-4).

References

- Barus, C., 1905, “The Progress of physics in the Nineteenth Century”, *Science*, 22. 560, pp. 353-69.
- Bierhalter, G., 1993, “Helmholtz’s Mechanical Foundation of thermodynamics”, in Cahan, D. (ed.), 1993a, pp. 291-333.
- Boltzmann, L., 1872, “Weiteren Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen”, in Boltzmann, L., 1909, I. Band, pp. 317-402.
- Boltzmann, L., 1877, “Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht”, in Boltzmann, L., 1909, II. Band, pp. 164-223.
- Boltzmann, L., 1895, “On certain Questions of the Theory of Gases”, *Nature*, 51, pp. 413-15, in Boltzmann, L., 1909, III. Band, pp. 535-44.
- Boltzmann, L., 1896, “Entgegnung auf die wärmetheoretischen Betrachtungen des Hrn. E. Zermelo”, in Boltzmann, L., 1909, III Band, pp. 567-78.
- Boltzmann, L., 1897d, “Über einen mechanischen Satz Poincaré’s”, in Boltzmann, L., 1909, III Band, pp. 587-95.
- Boltzmann, L., 1909, *Wissenschaftlichen Abhandlungen*, Leipzig, Barth.

- Bordoni, S., 2012a, “Unearthing a Buried Memory: Duhem’s Third Way to thermodynamics. Part 1”, *Centaurus*, 54, 2, pp. 124-47.
- Bordoni, S., 2012b, “Unearthing a Buried Memory: Duhem’s Third Way to thermodynamics. Part 2”, *Centaurus*, 54, 3, pp. 232-49.
- Bordoni, S., 2012c, *Taming Complexity. Duhem’s third pathway to Thermodynamics*, Urbino, Editrice Montefeltro.
- Bordoni, S., 2013a, “Routes towards an Abstract Thermodynamics in the late nineteenth century”, *European Physical Journal – H*, 38, pp. 617-660.
- Bordoni, S., 2013b, “Looking for a Rational Thermodynamics in the late XIX century”, Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, Berlin (Max Planck Institute for the History of Science), *Preprint 443*.
- Born, M., 1948, “Max Karl Ernst Ludwig Planck. 1858-1947”, *Obituary Notices of Fellows of the Royal Society*, 6, 17, pp. 161-88.
- Brush, S.G., 1976, *The Kind of Motion we call Heat, Books 1 and 2*, Amsterdam-New York-Oxford, North Holland Publishing Company.
- Cahan, D. (ed.), 1993a, *Hermann von Helmholtz and the Foundations of Nineteenth-Century*, Berkeley/Los Angeles/London, University of California Press.
- Cahan, D., 1993b, “Introduction: Helmholtz at the Borders of Science”, in Cahan, D. (ed.), 1993a, pp. 1-13.
- Cassirer, E., 1936, *Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik*, Göteborg, Wettergren & Kerbers Förlag.
- Cercignani, C., 1997, *Ludwig Boltzmann e la meccanica statistica*, La Goliardica Pavese, Pavia.
- Culverwell, E.P., 1895, “Boltzmann’s Minimum Theorem”, *Nature*, 1895, n. 1315, vol. 51, p. 246.
- Darrigol, O., 2002, “Between Hydrodynamics and Elasticity Theory: The First Five Births of the Navier-Stokes Equation”, *Archive for History of Exact Sciences*, 56, pp. 95-150.

- Darrigol, O. and Renn, J., 2003, “La nascita della meccanica statistica”, *Storia della Scienza*, Istituto della Enciclopedia Italiana, chapter xlvi, pp. 496-507.
- Daub, E.E., 1970, “Entropy and Dissipation”, *Historical Studies in the Physical Sciences*, 2, pp. 321-54.
- Deltete, R.J., 1999, “Helm and Boltzmann: Energetics at the Lübeck Naturforscherversammlung”, *Synthese*, 119, pp. 45-68.
- Deltete, R.J., 2012, “Planck, Ostwald, and the Second Law of thermodynamics”, *HOPOS*, 2, 1, 121-46.
- Dugas, R., 1959, *La théorie physique au sens de Boltzmann*, Neuchâtel-Suisse, Éditions du Griffon.
- Duhem, P., 1891, “Sur les équations générales de la Thermodynamique”, *Annales Scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure*, 3^e série, tome VIII, p. 231.
- Gibbs, J.W., 1875-8, “On the Equilibrium of Heterogeneous Substances”, *Transactions of the Connecticut Academy*, in Gibbs, J. W., 1906, pp. 55-349.
- Gibbs, J.W., 1906, *The Scientific Papers of J. Willard Gibbs*, London, New York, and Bombay, Longmans, Green, and Co.
- Helm, G., 1898, *Die Energetik nach ihrer geschichtlichen Entwicklung*, Leipzig, Verlag von Veit & Comp.
- Helmholtz, H., 1882, “Die Thermodynamik Chemischer Vorgäng”, *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, (2 Febr. 1882) vol. I. pp. 22-39, in Helmholtz , H., 1883, pp. 958-78.
- Helmholtz, H., 1883, *Wissenschaftliche Abhandlungen*, II Band, Barth, Leipzig.
- Helmholtz, H., 1884a, “Principien der Statik monocyklischer Systeme”, in Hemholtz, H., 1895, pp. 142-62.

- Helmholtz, H., 1884b, “Principien der Statik monocyklischer Systeme (Zweiter Aufsatz)”, in Helmholtz, H., 1895, pp. 179-202.
- Helmholtz, H., 1895, *Wissenschaftliche Abhandlungen*, III Band, Barth, Leipzig.
- Kragh, H., 1993, “Between physics and Chemistry: Helmholtz’s Route to a Theory of Chemical thermodynamics”, in Cahn, D. (ed.), 1993, pp 403-31.
- Kragh, H., 2008, *Entropic Creation – Religious Context of thermodynamics and Cosmology*, Farnham (England), Ashgate.
- Kragh, H. and Weininger, S.J., 1996, “Sooner Silence than Confusion: The Tortuous Entry of Entropy into Chemistry”, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 27, 1, pp. 91-130.
- Kuhn, T.S., 1987, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity 1894-1912* (With a New Afterword), Chicago & London, The University of Chicago Press.
- Massieu, F., 1869a, “Sur les Fonctions caractéristiques des divers fluides”, *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences* LXIX, pp. 858-62.
- Massieu, F., 1869b, “Addition au précédent Mémoire sur les Fonctions caractéristiques”, *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences* LXIX, pp. 1057-61.
- Massieu, F., 1876, “Mémoire sur les Fonctions caractéristiques des divers fluides et sur la théorie des vapeurs”, *Mémoires des Savants étrangers* XXII, pp. 1-92.
- Müller, I., 2007, *A History of Thermo-dynamics. The Doctrine of Energy and Entropy*, Dover, New York.
- Müller, I. and Weiss, W., 2012, “Thermodynamics of irreversible processes – past and present”, *The European Physical Journal H*, 37, pp. 139-236.

- Norton Wise, M., 1982, "The Maxwell Literature and the British Dynamical Theory", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 13, 1, pp. 175-205.
- Oettingen, A., 1885, "Die thermodynamischen Beziehungen antithetisch entwickelt", *Mémoires de l'Académie impériale des Sciences de Saint-Pétersbourg*, Tome XXXII, pp. 1-70.
- Ostwald, W., 1896, "Zur Energetik", *Annalen der Physik und Chemie* 58, pp. 154-67.
- Planck, M., 1880, *Gleichgewichtszustände isotroper Körper in verschiedenen Temperaturen*, München, Theodore Ackermann.
- Planck, M., 1889, "A. von Oettingen. Die thermodynamischen Beziehungen antithetisch entwickelt", *Annalen der Physik* (Beiblätter), twentiethIII, pp. 466-9; reprinted in Hoffmann, D., 2008, pp. 838-41.
- Planck, M., 1897, *Vorlesungen über Thermodynamik*, Veit & Comp., Leipzig.
- Planck, M., 1905, *Vorlesungen über Thermodynamik*, (zweite, verbesserte Auflage), Veit & Comp., Leipzig.
- Poincaré, H., 1893, "Le mécanisme et l'expérience", *Revue de Métaphysique et de Morale*, pp. 534-7.
- Stokes, G.G., 1883, *Mathematical and Physical Papers*, vol. II, Cambridge, Cambridge University Press,.
- Thomson, J.J., 1888, *Applications of Dynamics to physics and Chemistry*, London and New York, Macmillan and Co.
- Timoshenko, S.P., 1983, *History of Strength of Materials*, Dover, New York.
- Truesdell, C., 1984, *Rational thermodynamics*, New York/ Berlin/ Heidelberg/ Tokio, Springer-Verlag.

The aim of science is to explain or at least represent natural phenomena in order to better understand them, and forecast their future behaviour. The present volume collects the proceeding of the XVI Summer School in Philosophy of Physics, *Forecasting the future: epistemology and empirical sciences*, which took place in Cesena (Italy) in September 2013. Different features of the actual scientific enterprise were explored, and speakers focused on sensitive issues like *determinism*, *causality*, *reductionism*, and *predictability* from a scientific, philosophical, and historical point of view. Their researches attempted to shed light on questions like: Can we really predict the evolution of complex systems like global climate and microscopic structures? How can we decide whether a forecast is “strong” and “reliable”? What is a good causal explanation? What enables us to believe that our world is deterministic? Is reductionism the best strategy to predict future states of the world?



The aim of science is to explain or at least represent natural phenomena in order to better understand them, and forecast their future behaviour. The present volume collects the proceeding of the XVI Summer School in Philosophy of Physics, *Forecasting the future: epistemology and empirical sciences*, which took place in Cesena (Italy) in September 2013. Different features of the actual scientific enterprise were explored, and speakers focused on sensitive issues like *determinism*, *causality*, *reductionism*, and *predictability* from a scientific, philosophical, and historical point of view. Their researches attempted to shed light on questions like: Can we really predict the evolution of complex systems like global climate and microscopic structures? How can we decide whether a forecast is “strong” and “reliable”? What is a good causal explanation? What enables us to believe that our world is deterministic? Is reductionism the best strategy to predict future states of the world?

Stefano Bordoni, Sara Matera, FORECASTING THE FUTURE

FORECASTING THE FUTURE SCIENTIFIC, PHILOSOPHICAL, AND HISTORICAL PERSPECTIVES

edited by

Stefano Bordoni
Sara Matera



ISSN 2037-4348

Isonomia *Epistemologica*