

OLTRE LA FISICA *NORMALE*
INTERPRETAZIONI ALTERNATIVE
E TEORIE NON STANDARD
NELLA FISICA MODERNA

a cura di

Isabella Tassani

WANTED



NEITHER DEAD NOR ALIVE

Isonomia Epistemologica

Isonomia – Epistemologica

Volume 3

OLTRE LA FISICA NORMALE

**INTERPRETAZIONI ALTERNATIVE E TEORIE NON STANDARD NELLA FISICA MODERNA
PER IL 75-ESIMO COMPLEANNO DI FRANCO SELLERI**

Volume 1
Il realismo scientifico di Evandro Agazzi
Mario Alai (a cura di)

Volume 2
Complessità e riduzionismo
Vincenzo Fano, Enrico Giannetto, Giulia Giannini, Pierluigi Graziani (a cura di)

Volume 3
Oltre la fisica normale
Isabella Tassani (a cura di)

ISONOMIA - Epistemologica Series Editor
Gino Tarozzi

gino.tarozzi@uniurb.it

OLTRE LA FISICA NORMALE

**INTERPRETAZIONI ALTERNATIVE E TEORIE NON STANDARD NELLA FISICA MODERNA
PER IL 75-ESIMO COMPLEANNO DI FRANCO SELLERI**

A cura di

Isabella Tassani

© ISONOMIA – Epistemologica
All rights reserved.

ISSN 2037-4348

Scientific Director: Gino Tarozzi
Managing Director: Pierluigi Graziani
Department of Foundation of Sciences
P.za 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

GINO TAROZZI, ISABELLA TASSANI <i>Introduzione</i>	7
ALESSANDRO AFRIAT <i>La topologica</i>	13
GENNARO AULETTA <i>Features, not waves!</i>	19
STEFANO BORDONI <i>Widening the boundaries of classical physics: from Einstein's 1909 paper back to late nineteenth-century theoretical physics</i>	25
MARCO BUZZONI <i>Kuhn: l'esperimento mentale fra scienza normale e scienza rivoluzionaria</i>	53
CLAUDIO CALOSI, VINCENZO FANO <i>Di due analoghi dilemmi: forza di gravità e correlazioni a distanza</i>	69
ALBERTO CAPPI <i>Cosmologia standard e oltre</i>	95
GIOVANNI MACCHIA <i>Quasar, redshift e controversie: l'espansione dell'universo è da rivedere?</i>	115
FABIO MINAZZI <i>La questione epistemologica del realismo nel programma di ricerca di Franco Selleri</i>	181
ARCANGELO ROSSI <i>La scienza tra normalità e rivoluzione</i>	209
GINO TAROZZI <i>Oltre la fisica normale. Realtà della funzione d'onda e delle proprietà fisiche prevedibili nell'interpretazione di Selleri della meccanica quantistica</i>	223

Introduzione

Nonostante il suo grande potere predittivo e la vastità del suo campo di applicazione, la meccanica quantistica nella sua formulazione *standard*, meglio nota come “interpretazione ortodossa”, contiene una vera e propria rinuncia a quelle esigenze esplicative che caratterizzano ogni autentica teoria scientifica, rinuncia che è stata sintetizzata dall’affermazione di Feynman, secondo la quale «è tutto assolutamente misterioso e più ci riflettiamo più ci appare misterioso».

Nel corso della sua straordinaria opera scientifica Franco Selleri si è sempre opposto a questa rinuncia alla comprensione della struttura della realtà fisica, mostrando i limiti e le conclusioni paradossali cui conduceva l’idea largamente condivisa che la meccanica quantistica, così come altre teorie della fisica del ‘900 su cui egli ha in un secondo tempo concentrato le sue ricerche e analisi critiche, rappresentassero, per dirla con Popper, “la fine della strada in fisica”.

Tale carattere antiesplicativo e di radicale rinuncia epistemologica da parte della teoria quantistica *standard* si è tradotto in primo luogo nell’abbandono del principio di causalità, come è stato sottolineato molto efficacemente da Selleri, in *Quantum Paradoxes and Physical Reality* (1990), con riferimento alla legge quantistica del decadimento radioattivo, che definisce una vita media per una data classe di particelle atomiche, ma non spiega il perché del differente comportamento individuale di ciascuna particella appartenente a questa classe:

La fisica attuale non fornisce una comprensione di queste cause e accetta infatti una filosofia acausale: ogni decadimento è un processo spontaneo e non ammette una spiegazione causale. La questione della differente vita individuale di simili sistemi instabili, come i neutroni, secondo questa linea di pensiero rimarrà per sempre senza una risposta e dovrebbe essere pertanto considerata come una questione “non scientifica”.

Nato a Bologna il 9 ottobre del 1936, Franco Selleri ha compiuto i suoi studi presso l’Università della sua città, l’antica e celebre *Alma Mater*

studiorum, con scienziati da lui definiti “indimenticabili”: il chimico Giovanni Battista Bonino, il matematico, e fisico matematico, Antonio Pignedoli e il fisico Giampietro Puppi. Nel 1958 si è laureato in Fisica *cum laude* e, solo un anno dopo, è diventato borsista all’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN).

Il primo articolo della sua lunga carriera scientifica riguarda una delle sue idee originali, l’*one-pion exchange model* per i processi anelastici ad alta energia in fisica delle particelle. Il notevole successo di questo modello gli ha aperto la strada a diverse esperienze internazionali: borsista al CERN di Ginevra (1959-61), *collaborateur étranger* a Saclay (Francia, 1962/63), *research associate* alla Cornell University (USA, 1963/65), ecc. Nel 1966 Selleri torna in Italia, prima a Bologna e poi, dal 1968 come docente e direttore di ricerca dell’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (I.N.F.N.) al Dipartimento di Fisica dell’Università di Bari, dove dal 1980 è stato chiamato come professore ordinario di Fisica teorica.

Risale ai tardi anni ‘60 l’elaborazione e lo sviluppo della sua prospettiva critica nei confronti delle teorie fondamentali della fisica moderna, in particolar modo della teoria delle particelle elementari e della meccanica quantistica, che verrà ben presto a configurarsi uno dei principali elementi caratterizzanti del suo programma di ricerca.

Nel corso della sua intensa e infaticabile attività scientifica, Selleri è entrato in proficuo contatto con molti grandi fisici e filosofi della scienza, ma quelli che ritiene lo abbiano più significativamente influenzato sono stati Louis de Broglie, John Bell e Karl Popper.

Egli ha molto apprezzato l’idea di de Broglie che la funzione d’onda della meccanica quantistica dovrebbe descrivere oggettivamente onde reali che si propagano nello spazio ordinario. Perciò egli è arrivato a ritenere che la teoria quantistica, considerata così “misteriosa”, per riprendere le parole di Feynman, potrebbe essere riformulata in modo tale da apparire comprensibile anche a un normale essere umano pensante. Con la sua ipotesi delle onde vuote, più tardi definite “onde quantistiche”, Selleri può essere considerato a pieno diritto un originale continuatore dell’opera di de Broglie, che in una lettera a Franco Selleri (11 aprile 1969), individuò in tale nuova prospettiva

un importante tentativo volto a ottenere un’interpretazione della meccanica ondulatoria più soddisfacente di quella che viene attualmente adottata e una conferma delle idee che mi avevano guidato nel momento in cui avevo proposto nel 1923-24 le concezioni di base della meccanica ondulatoria,

che rispetto alla teoria dell'onda pilota presenta, come rileva sempre de Broglie nella stessa lettera, la possibilità di un appello all'evidenza sperimentale:

L'esperienza che lei propone per provare l'esistenza dell'onda sarà di estremo interesse per provare l'esistenza di quest'onda debolissima (*très faible*) che trasporta le particelle [...].

Selleri fu molto impressionato dalla scoperta della famosa diseguaglianza di Bell, che discrimina a livello empirico tra la teoria quantistica e tutte le descrizioni realistiche locali della natura, che per lui significava la possibilità di scegliere sperimentalmente tra differenti prospettive filosofiche; inutile dire che egli preferisce il realismo locale alla perfetta validità della teoria quantistica convenzionale, considerandosi insoddisfatto degli esperimenti realizzati finora, che ha criticato in diversi lavori mettendo in luce le ipotesi addizionali, tipicamente quantistiche, che vengono di solito introdotte sotto varie forme.

Alle ricerche sul problema dell'incompatibilità sia logica che empirica tra meccanica quantistica e realismo locale, e al duplice problema da una parte delle ipotesi in gioco nella dimostrazione del teorema di Bell, dall'altro del suo dominio di validità, Selleri ha dato un contributo che può essere difficilmente sopravvalutato nella fisica del '900; già nel 1974 il grande storico della scienza Max Jammer, nel suo classico *The Philosophy of Quantum Mechanics* (1974), metteva in rilievo come egli avesse da una parte dimostrato la forma più forte della diseguaglianza di Bell, dall'altro mostrato, in alcuni articoli scritti con V. Capasso e D. Fortunato, la possibilità di discriminare a livello empirico tra descrizione attraverso stati *entangled* e descrizione attraverso vettori di stato fattorizzabili, quest'ultima implicata dal realismo locale, anche rispetto ad altre osservabili, definite "osservabili sensibili".

Della filosofia popperiana, Selleri ha apprezzato e condiviso l'atteggiamento critico verso la fisica moderna, il suo realismo e razionalismo, piuttosto che la sua specifica teoria della conoscenza. E a sua volta le idee di Selleri sulla meccanica quantistica sono state altrettanto influenti sul grande filosofo viennese, che dopo aver sostenuto per molti anni un'interpretazione statistica strettamente corpuscolare, aderì poi pienamente all'interpretazione realistica della funzione d'onda:

Franco Selleri ha suggerito (continuando l'opera di Louis de Broglie) che possono esistere onde senza particelle [...]. Le conseguenze [*di tale possibilità*] sembrerebbero essere rivoluzionarie [...] esse stabilirebbero, in luogo del

carattere “complementare” di particelle e onde (ondicelle) l’interazione di due tipi di oggetti reali: onde e particelle.

Analogamente Popper fece propria la critica di Selleri e Tarozzi alla dimostrazione probabilistica di Clauser e Horne del teorema di Bell, critica che sembrava restringere alla sola classe delle teorie deterministiche locali di variabili nascoste l’ambito di validità di tale teorema, sembrando così aprire una prospettiva di riconciliazione tra meccanica quantistica e teorie probabilistiche locali:

F. Selleri e G. Tarozzi hanno trovato un modello che soddisfa la definizione di Bell di località ma non la definizione di località di Clauser e Horne (conosciuta anche come “condizione di fattorizzabilità”); questo sembra mostrare ancora una volta che Clauser e Horne non hanno soddisfatto la pretesa di universalità [*del teorema di Bell*].

Franco Selleri ha pubblicato, prevalentemente su prestigiose riviste internazionali, più di trecento articoli riguardanti principalmente la fisica delle particelle, i fondamenti della teoria quantistica e della relatività ma, anche se in misura minore, la storia e la filosofia della fisica. Infine, egli ha scritto molti libri, pubblicati presso editori europei e americani, che hanno generalmente ricevuto critiche molto positive. Riguardo a *Paradossi quantistici e realtà fisica*, un noto fisico americano ha scritto:

Il Professor Selleri è quasi unicamente qualificato come un vero scettico che, ciononostante, ha una profonda comprensione dell’Interpretazione di Copenaghen. Se si aggiunge a questo un’instancabile onestà intellettuale e un’imparzialità di fondo, ci si può rendere conto quanto sia speciale questo libro.

Selleri è stato ed è tuttora membro del comitato scientifico di molte riviste internazionali, quali *Foundations of Physics Letters*, *Fundamental Theories of Physics*, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, e *Apeiron*, svolgendo la funzione di *referee*, tra le quali *Foundations of Physics*, *Physics Letters*, *Journal of Physics*, *Europhysics Letters* e *Nuovo Cimento*. Fa parte di molte istituzioni e società scientifiche, come la Società Italiana di Fisica (S.I.F.), l’*American Physical Society*, la Società Italiana di Logica e Filosofia della Scienza (S.I.L.F.S.), la *New York Academy of Sciences*, la *Fondation Louis de Broglie* di Parigi, la *Gdanskie Towarzystwo Naukowe* e il Centro interuniversitario di ricerca in Filosofia e Fondamenti della Fisica (C.I.R.F.I.S.) degli atenei di Bologna, dell’Insubria, del Salento e di Urbino.

Negli anni recenti, ha stabilito l’esistenza di una, a suo parere, inaccettabile discontinuità tra qualunque ragionevole descrizione dei sistemi

di riferimento accelerati e la descrizione relativistica dei sistemi di riferimento inerziali. Ha suggerito come si possa superare la precedente difficoltà distinguendo il gruppo di trasformazioni di Lorentz da altre trasformazioni che implicano un ritorno alla nozione di simultaneità assoluta.

Come curatori di questo numero speciale di *Isonomia* siamo onorati di fare omaggio a Franco Selleri come amico e collega speciale, sia per la sua passione instancabile e la sua profonda conoscenza dei fondamenti delle teorie della fisica contemporanea che ha generosamente profuso nel cercare risposte alle fondamentali questioni concettuali aperte, sia e forse ancor più per la prospettiva perennemente critica che egli ha sempre seguito con particolare rigore ed estrema determinazione per raggiungere questo scopo.

Siamo certi di esprimere anche il pensiero dei colleghi che hanno contribuito a questo numero della rivista, augurandogli ancora molti anni di un'altrettanto eccellente creatività scientifica.

Gino Tarozzi e Isabella Tassani,
Dipartimento di Scienze di Base e Fondamenti
Università di Urbino *Carlo Bo*

La topologica

Alessandro Afriat
Université de Bretagne Occidentale
alexander.afriat@univ-brest.fr

1. L'effetto Aharonov-Bohm

Viene esposto un aspetto rivoluzionario della topologica (o topo-logica), logica scaturita verso fine Novecento dagli alti misteri della fisica.

Una funzione d'onda è divisa in due fasci, i quali, avendo rinchiuso una regione (semplicemente connessa) ω contenente un solenoide, vengono fatti interferire su uno schermo. La funzione d'onda avvolgente è sensibile all'elettromagnetismo eventualmente rinchiuso nella misura in cui il potenziale¹ elettromagnetico A , una uno-forma, contribuisce una fase

$$\exp i \oint_{\partial\omega} A$$

alla funzione d'onda lungo il bordo $\partial\omega$ e quindi alla figura d'interferenza sullo schermo. L'elettromagnetismo su ω è legato alla circolazione intorno al bordo dal teorema

$$(1) \quad C = \oint_{\partial\omega} A = \iint_{\omega} dA$$

¹ Per "potenziale" intendo solo *primitiva*: il potenziale della due-forma elettromagnetica $F = dA$ è la sua primitiva $A \leftrightarrow (\mathbf{A}, \varphi)$, il potenziale della due-forma magnetica $\mathbf{B} = d\mathbf{A}$ è la sua primitiva \mathbf{A} , il potenziale della uno-forma elettrica $*\mathbf{E} = d\varphi$ è la sua primitiva φ (il duale di Hodge * essendo preso in tre dimensioni), il potenziale della tre-forma $\rho = d\mathbf{E}$ è la sua primitiva \mathbf{E} .

di Stokes. Il campo elettromagnetico² $F = dA$ prodotto dal solenoide è circoscritto a una regione centrale $\lambda' \subset \omega$ circondata da una regione isolante $\lambda' = \omega - \lambda$ dove F è nullo ma non A . L'effetto Aharonov-Bohm³ 'completo' può essere considerato la sensibilità 'differenziale' o 'incrementale' della figura d'interferenza alle variazioni della corrente attraverso il solenoide⁴.

2. L'interpretazione topologica

L'interpretazione topologica⁵ dell'effetto Aharonov-Bohm può essere formulata come segue: Se A fosse chiusa su una regione ω semplicemente

² Possiamo pensare F come il campo puramente magnetico \mathbf{B} prodotto dalla densità di corrente $\mathbf{J} = d*\mathbf{B}$ nel solenoide.

³ Ehrenberg & Siday (1949), Aharonov & Bohm (1959).

⁴ Cf. Batterman (2003: 555): "Similarly, in the AB effect, it appears that we will need to refer to different nonseparable holonomy properties for each case in which there is a different flux running through the solenoid."

⁵ Qui "topologica" è un aggettivo e non una logica. Aharonov & Bohm (1959: 490): "in a field-free multiply-connected region of space, the physical properties of the system still depend on the potentials." Wu & Yang (1975: 3845): "The famous Bohm-Aharonov experiment [...] showed that in a multiply connected region where $f_{\mu\nu} = 0$ everywhere there are physical experiments for which the outcome depends on the loop integral [...] around an unshrinkable loop." (*Ibid.*: 3856): " $f_{\mu\nu}$ underdescribes electromagnetism because of the Bohm-Aharonov experiment which involves a doubly connected space region." Nash & Sen (1983: 301): "We [...] consider the consequence of assuming the field F to be identically zero in some region Ω . At first one may think that there will be no physically measurable electromagnetic effects in such a region Ω . This is not so, effects may arise if the topology of Ω is non-trivial, e.g. if Ω is not simply connected. [...] In terms of parallel transport one says that zero curvature does not imply trivial parallel transport if the region in which the curvature is zero is not simply connected. This underlies the fact that there is a sense in which the connection is a more fundamental object than the curvature, even though a connection is gauge dependent and not directly measurable." Ryder (1996: 101-4): "the Bohm-Aharonov effect owes its existence to the non-trivial topology of the vacuum [...]. The Bohm-Aharonov effect is the simplest illustration of the importance of topology in this branch of physics. [...] The relevant space in this problem is the space of the vacuum, i.e. the space outside the solenoid, and that space is not simply connected. [...] It is thus an essential condition for the Bohm-Aharonov effect to occur that the configuration space of the vacuum is not simply connected. [...] in other words, it is because the gauge group of electromagnetism, U_1 , is not simply connected that the Bohm-Aharonov effect is possible. [...] The configuration space of the Bohm-Aharonov experiment is the plane \mathbb{R}^2 [...] with a hole in, and this is, topologically, the direct product of the line \mathbb{R}^1 and the circle [...]. There is, nevertheless, a positive effect on the interference fringes. The mathematical reason for this is that the configuration space of the null field (vacuum) is the plane with a hole in [...]." Batterman (2003: 544): "We now have a $U(1)$ bundle over a nonsimply connected base space: $\mathbb{R}^2 - \{\text{origin}\}$. This fact is responsible for the AB effect." (*Ibid.*: 552-3): "most

connessa sarebbe anche esatta, e quindi esprimibile come gradiente $A = d\mu$ di una zero-forma μ ; il flusso

$$\oint_{\partial\omega} d\mu = \iint_{\omega} d^2\mu$$

attraverso il bordo $\partial\omega$ sarebbe quindi nullo, essendolo d^2 . Ma qui A è chiusa su λ' ; da $dA=0|_{\lambda'}$ non segue che A sia esatta, né che il flusso attraverso il bordo sia nullo: potrebbe esserlo oppure no.

L'esistenza della sorgente a cui è dovuto l'effetto è quindi esclusa da una topologia (A chiusa su una regione semplicemente connessa) ma non da un'altra.

Lo stesso vale per una regione semplicemente connessa tridimensionale Ω rinchiusa da un bordo bidimensionale $\partial\Omega$. Se la due-forma \mathbf{E} fosse chiusa su Ω sarebbe anche esatta, e pertanto esprimibile come rotore $\mathbf{E} = d\zeta$ di una uno-forma ζ ; il flusso

$$\iint_{\partial\Omega} d\zeta = \iiint_{\Omega} d^2\zeta$$

discussions of the AB effect very quickly idealize the solenoid to an infinite line in space or spacetime. The flux, in this idealization, just is the abstract topological property of having space or spacetime be nonsimply connected. [...] The issue is whether the idealizations — [...] and nonsimply connected space in the AB effect — do better explanatory work than some less idealized description. I believe that the idealized descriptions do, in fact, do a better job.” (*Ibid.*: 554): “It seems to me that for a full understanding of these anholonomies, one needs to appeal to the topology and geometry of the base space. [...] If we take seriously the idea that topological features of various spaces [...] can play an explanatory role [...].” Nota 29, stessa pagina: “it is most fruitful to treat the AB solenoid as an idealization that results in the multiple connectedness of the base space of a fiber bundle.” (*Ibid.*: 555): “The different cases are unified by the topological idealization of the solenoid as a string absent from spacetime which renders spacetime nonsimply connected. [...] This topological feature enables us to understand the common behaviour in different AB experiments [...]. [...] how can it possibly be the case that appeal to an idealization such as the AB solenoid as a line missing from spacetime, provides a better explanation of genuine physical phenomena than can a less idealized, more “realistic” account where one does not idealize so severely? [...] quite often [...] appeal to highly idealized models does, in fact, provide better explanations.” Martin (2003: 48): “in the case of non-trivial spatial topologies, the gauge-invariant interpretation runs into potential complications. [...] So-called holonomies [...] encode physically significant information about the global features of the gauge field.” Vedi anche Lyre (2001: S377-80), Nounou (2003), Lyre (2004: 659), Agricola & Friedrich (2010: 275).

attraverso il bordo sarebbe quindi nullo. Ma se la regione su cui \mathbf{E} è chiusa contiene un buco, il flusso attraverso la superficie rinchiudente potrebbe essere nullo oppure no.

E così in elettrostatica, dove il campo elettrico $\mathbf{E} = *d\varphi$ è (sostanzialmente) il gradiente del potenziale scalare φ . La divergenza nulla $d\mathbf{E}$ esprime la conservazione dell'elettricità laddove non viene creata, lontano dalle cariche che producono \mathbf{E} secondo l'equazione Maxwell-Poisson $d\mathbf{E} = d*d\varphi = \rho$, la tre-forma ρ essendo la densità di carica. Se la divergenza $d\mathbf{E}$ fosse nulla su tutto il volume Ω non ci sarebbe né produzione di elettricità né irraggiamento attraverso il bordo⁶. Ma una carica in Ω — diciamo in una regione $\Lambda \subset \Omega$ isolata da $\Lambda' = \Omega - \Lambda$ — impedirebbe la conservazione dell'elettricità su tutta la regione Ω .

Abbiamo lo stesso formalismo in gravitazione Newton-Poisson, dove φ è il potenziale gravitazionale, $d\varphi$ e \mathbf{E} rappresentano entrambi la forza gravitazionale, e ρ è la densità di massa. La gravità⁷ sarebbe pertanto un altro effetto topologico.

La topologia della regione dove il 'potenziale' (A o \mathbf{E} per esempio) è chiuso appunto non ci dice molto: se la regione fosse semplicemente connessa, la conservazione sarebbe *generale* all'interno della superficie rinchiudente visto che non ci sarebbero buchi con sorgenti; e se nulla fosse creato all'interno del bordo, la radiazione totale che lo attraversa sarebbe nulla. Ma laddove la topologia *non* permette di escludere la presenza di buchi, nemmeno la presenza di sorgenti sarà esclusa; e una sorgente produrrebbe un flusso attraverso il bordo.

Una topologia non banale non può nemmeno escludere l'*assenza* di una sorgente. Né precisa la 'quantità' o 'intensità' della possibile sorgente (che ci direbbe l'intensità dell'effetto — il flusso attraverso il bordo). Quindi l'effetto Aharonov-Bohm completo, che possiamo considerare 'differenziale', non è particolarmente topologico, o almeno non più dell'elettrostatica o della gravitazione Newton-Poisson.

⁶ Al di là un fondo elettrico senza divergenza che potrebbe essere o non essere presente.

⁷ Cioè l'attrazione gravitazionale *totale* irradiata da una massa.

3. La topologica

Le implicazioni

$$([dA=0|_{\omega}] \& [\omega \text{ senza buchi}]) \Rightarrow [A \text{ esatta}] \Rightarrow \left[\oint_{\partial\omega} A = 0 \right]$$

non hanno nulla d'interessante, essendo consentite nelle logiche più classiche. Le implicazioni davvero rivoluzionarie, valide solo nella topologica, sono

$$([dA=0|_{\omega}] \& \neg[\omega \text{ senza buchi}]) \Rightarrow \neg[A \text{ esatta}] \Rightarrow \neg \left[\oint_{\partial\omega} A = 0 \right]$$

ossia

$$([dA=0|_{\omega}] \& [\omega \text{ non senza buchi}]) \Rightarrow [A \text{ non esatta}] \Rightarrow \left[\oint_{\partial\omega} A \neq 0 \right].$$

È qua che vediamo il vero passo in avanti rispetto alle vecchie logiche, ormai superate. Ma credo che la topologica ci dica soprattutto che *c'è uno yak in Piazza del Campo*⁸.

Riferimenti bibliografici

Agricola, I. e T. Friedrich (2010), *Vektoranalysis: Differentialformen in Analysis, Geometrie und Physik*, Vieweg+Teubner, Berlin.

Aharonov, Y. e D. Bohm (1959), "Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory" *Physical Review* 115, 485-91.

Batterman, R. W. (2003), "Falling cats, parallel parking and polarized light" *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 34, 527-57.

Brading, K. e E. Castellani (a cura di) (2003), *Symmetries in physics*, Cambridge University Press.

⁸ Ogni buco deve contenere un oggetto sorprendente – assioma della topologica. Ma lo yak (tale è la flessibilità della topologica) potrebbe anche trovarsi in λ o il solenoide in Piazza del Campo.

- Ehrenberg, W. e R. E. Siday (1949), "The refractive index in electron optics and the principles of dynamics" *Proceedings of the Physical Society B* 62, 8-21.
- Lyre, H. (2001), "The principles of gauging" *Philosophy of Science* 68, S371-81
- Lyre, H. (2004), "Holism and structuralism in U (1) gauge theory" *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 35, 643-70.
- Martin, C. (2003), "On continuous symmetries and the foundations of modern physics" pp. 29-60, in Brading & Castellani (2003).
- Nash, C. e S. Sen (1983), *Topology and geometry for physicists*, Academic Press, London
- Nounou, A. (2003), "A fourth way to the Aharonov-Bohm effect" pp. 174-99, in Brading & Castellani (2003).
- Ryder, L. (1996), *Quantum field theory*, Cambridge University Press.
- Wu, T. T. e C. N. Yang (1975), "Concept of nonintegrable phase factors and global formulation of gauge fields" *Physical Review D* 12, 3845-57.

Features, not waves!

Gennaro Auletta
University of Cassino
gennaro.auletta@gmail.com

Classically, the main ontological attempts at understanding quantum mechanics focus on the corpuscular behavior of these systems and especially on detection events, since these are the most classical phenomena that we have in such a context (indeed, they also require the presence of a classical apparatus). The main trend has been to consider wave-like aspects as deprived of ontological substrate and as reflecting rather the mathematical abstract formalism of the theory. The few attempts that have been done in order to assign some form of ontological reference to wave-like aspects have tried to interpret this in terms of classical waves and have been disproved across the last 30 years (see Auletta & Tarozzi, 2004b; Auletta & Torcal, 2011).

It is perhaps time to try a different approach, by renouncing any attempt at a classical ontology and by taking seriously into account the non-local aspects of the theory (which are mostly associated with wave-like phenomena). When we consider things in this perspective, we shall discover that all non-local phenomena in quantum mechanics, although different, have something in common: they all rely on non-local interdependencies among possible events or measurement outcomes (see Auletta, 2011). This is true for all interference phenomena for isolated systems, this is true for entangled systems, this is true for the Aharonov-Bohm effect, and so on. What is sad is that we do not have until now a name for denoting this mysterious reality. It is indeed mysterious, since we cannot directly measure it. There is in fact no way to have a direct experimental evidence of it. In most cases we can only reconstruct the interference profile after many experimental runs, a circumstance that has led many scientists to discard any ontological attribution to wave-like phenomena. However, a proposed

experiment (Auletta & Tarozzi, 2004a) shows that this is not necessarily the case.

Nevertheless, although very mysterious, these interdependencies display certain effects. Let us consider the following example: suppose that the state of two particles is a singlet state (an instance of entanglement: see Auletta *et al.*, 2009, Ch. 16). In such a case, they show a spin-correlation such that when one of the two particles is found to be in a spin-up state along an experimentally chosen direction, the other one will be necessarily in a spin-down state along the same direction or vice versa (that is, if the former is found in a spin-down state, the other one will be in a spin-up state). In other words, we expect to obtain either up-down or down-up but never up-up or down-down. If the world consisted of random events only, we would expect to obtain one of these four possible outcomes with equiprobability. The fact that we can obtain only two (either up-down or down-up) out of four cases represents a reduction of the space of possible events. In other words, quantum-mechanical correlations act as constraints limiting the space of the events that we can obtain (and therefore also the space of possible measurement outcomes). Now, it is bizarre to admit that something can have such effect without being somehow a reality.

Since a specific term for denoting this kind of reality does not exist (but neither a satisfactory theory) I shall use the term *features* (Auletta & Torcal, 2011) meaning two different things simultaneously:

- These factors are characters of quantum state that have noticeable and experimental consequences. Although they cannot be ascertained in themselves, we can be sure of their presence when for instance we compare the statistics of the systems in entanglement. If the results show the kind of reduction of the space of possible events that I have mentioned, we can infer that they are in fact present.
- However, I avoid the term *property* since properties are by definition local, while I have stressed that features manifest themselves precisely in non-local phenomena.

However, we need also to take seriously in account that we cannot do a direct experience with these features. It is a little like for the Kantian noumenon. If I am allowed to draw this analogy further, I can say that a correct ontology can only be a kind of phenomenal one, that, is an ontology that is always interpreted in the framework of a certain theory. On the contrary, the primary reality is in itself a piece of *uninterpreted* ontology. This might be true of features, but what is the situation for events? They seem to be much more real so that such a distinction between an interpreted

and uninterpreted ontology seems not very insightful for dealing with our problem. I will certainly not deny that there is indeed an ontological difference between events (which by definition are localized in space and time) and features (which by definition are delocalized). However, there is a commonality that is much stronger than this difference.

We take for granted that detection events mean property-attribution to quantum systems. In fact, if a detector clicks, we can say e.g. that a particle is located in a certain region of the space. However, what we forget here is that we are allowed to make such an attribution only because the measured system has previously interacted with an apparatus (the so-called premeasurement: see Auletta *et al.*, 2009, Ch. 9) in such a way that, if a detector clicks, the established connection between object system and apparatus allows us to infer which property we may assign to the system in this experimental set up. Moreover, we can do this only because there is a theory (namely quantum mechanics) that describes this dynamics and therefore provides us with the formal or mathematical means to perform such an inference. In other words, we assign a property only in the framework of both an experimental context and a theory. Therefore, a property is a piece of interpreted ontology: one of the major worries about classical mechanics is to have misunderstood this point and to have taken properties as primary ontology beyond any interpretation. However, an event is a piece of uninterpreted ontology: an event only happens or occurs and tells nothing about anything else. In order to do this, we need the mentioned framework.

Therefore both events and features are pieces of uninterpreted ontology. However, events have properties as interpreted counterpart. Which is the interpreted counterpart of features? Only this would fully justify our parallelism between events and features. I must admit that it is not so straight to find an interpreted counterpart to features (here, their specificity is manifest). However, I have mentioned the necessity of an experimental context in order to be able to assign properties. If we analyze such a process with more care, we shall see that it has three main fundamental stages:

- 1) We *prepare* a system in a certain state. A preparation can be understood as a *determination* of the state of a single system. It is the procedure through which only systems in a certain (previously theoretically defined) state are selected and delivered for further procedures, that is, allowed to undergo subsequent operations (premeasurement and measurement). States are equivalence classes of preparations.

- 2) Then we select a certain observable (like position or energy) to be measured. This step is called *premeasurement*. It consists in an interrogation of a quantum system relative to a specific degree of freedom. Indeed, not all experimental contexts are adequate to measure a certain observable, and this allows us to define an observable as an equivalence class of premeasurements.
- 3) Finally, a *detection* or measurement in a strict sense is an answer to our interrogation of the object system. Therefore, we can say that a property is an equivalence class of detections (many different detections can lead to the same property attribution).

Events occur in the third step, whilst features are constitutive of the state as it is prepared in the first step. The second step is somehow the dynamical bridge initial and final procedure (it is indeed in this stage that system and apparatus interact). Then, we can say that properties are attributed thanks to *detection* events, that is, to events that happen in a specific experimental framework. On the other hand, features are inferred thanks to the *effects* that a system in a certain state has on the subsequent steps. Therefore, the whole of the experimental procedure (consisting in preparation, premeasurement and detection) is a sort of *operational* bridge between uninterpreted and interpreted ontology (it is here that the Kantian framework is no longer helpful but we need to shift to a operationalist philosophy). It is what ensures this distinction but also the connection between these two ontologies (and therefore also justifies the term *uninterpreted* ontology). In this way, events and features on the one hand, and detections and preparations on the other can be taken to really be part of the two mentioned ontologies.

References

The aim of the following list is to provide the reader with some original texts in which primary literature is also quoted.

Auletta, G., Tarozzi, G., 2004a, “Wavelike Correlations versus Path Detection: Another Form of Complementarity”, *Foundations of Physics Letters*, 17, pp. 889-95.

Auletta, G., Tarozzi, G., 2004b, “On the Physical Reality of Quantum Waves”, *Foundations of Physics*, 34, pp. 1675-94.

Oltre la fisica normale

Auletta, G., Fortunato, M., Parisi, G., 2009, *Quantum Mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press.

Auletta, G., 2011, "Correlations and Hyper-Correlations", *Journal of Modern Physics*, 2, pp. 958-61.

Auletta, G., Torcal, L., 2011, "From Wave--Particle to Features-Event Complementarity", *International Journal of Theoretical Physics*, 50, pp. 3654-68.

Widening the boundaries of classical physics: from Einstein's 1909 paper back to late nineteenth-century theoretical physics

Stefano Bordoni
University of Urbino
stefano.bordoni@gmail.com

1. From the early XX century back to the late XIX century

In the paper Einstein published in the *Physiklische Zeitschrift* in 1909, he re-shaped the hypotheses which he had put forward in 1905 and re-stated in 1906. He focussed on the problematic link between electromagnetism and thermodynamics, in particular on the status of Maxwell's equations, the irreversibility of electromagnetic processes, and the reconstruction of «the law deduced by Jeans». He pointed out the theoretical mismatch between «current theoretical views», which inevitably led «to the law propounded by Mr. Jeans», and known «facts». Then he analysed Planck's theory, and he found that it was founded on classical assumptions stemming from Electromagnetism and Thermodynamics: it led to new results by means of ingenious contrivances. He claimed he would have clarified the assumptions from which Planck's result could be consistently derived, because «Planck's presentation of his own theory suffers from a certain logical imperfection»¹.

The search for a *physical* «definition of the probability W of a state» led Einstein to reverse the mathematical procedure which had led Boltzmann and Planck to the computation of S starting from the computation of W . Einstein suggested starting from the empirical expression for the entropy to derive the expression for W : the latter would correspond to a probability

¹ Einstein (1909, engl. trans. 357-61).

endowed with physical meaning. Einstein reminded the readers that, in 1905 he had followed the same logical path. If in 1905 he had started from Wien's law of radiation, in 1909 he decided to start from Planck's law. He concentrated on the relationship between the fluctuation of energy and the fluctuation of probability, and then computed «the fluctuations of radiation pressure, due to fluctuations of the momentum». In the end, two different terms of different nature emerged from the computation of the fluctuations of electromagnetic energy and momentum. If the second term was consistent with the wave-like behaviour of electromagnetic radiation, the first term had a corpuscular nature, and microscopic amounts of energy $h\nu$ were at stake. He claimed that «the constitution of radiation must be different from what we currently believe», and that the new representation led to a more natural interpretation of Planck's law².

In the last part of his paper, Einstein faced some dimensional relationships, and discussed the numerical relationship which linked «the light quantum constant h to the elementary quantum ε of electricity». He reminded the reader that even «the elementary quantum ε » was «an outsider in Maxwell-Lorentz's electrodynamics». In particular, he remarked that «[o]utside forces must be enlisted in order to construct the electron in the theory». Einstein hinted at a unified theory wherein the physical constants h and ε could spontaneously emerge in the same way that electrodynamics and electromagnetic radiation had spontaneously emerged from Maxwell's theory³.

In some way Einstein pointed out a structural analogy between the emergence of the discrete nature of radiation from the background of a classical continuous representation, on the one hand, and the emergence of the discrete nature of electricity from the background of Maxwell's continuous representation, on the other.

In a paper published in 1910 in the *Annalen der Physik*, Planck associated Einstein and Stark to J.J. Thomson and Larmor. He noted that the four physicists had put forward an extremely radical interpretation of electromagnetic radiation: even in the case of «electromagnetic processes in pure vacuum», they had imagined «*diskreten Quanten*» or «*Lichtquanten*». Although Planck did not explicitly quote from it, in 1909 Larmor had published a paper (in the *Proceedings of the Royal Society*) devoted to the

² Einstein (1909, engl. trans. 363-9).

³ *Ibid.*, 372-4. See, in particular, p. 374: «The relation $h = \varepsilon^2 / c$ seems to me to indicate that the same modification of the theory that will contain the elementary quantum ε as a consequence will also contain the quantum structure of radiation as a consequence».

statistical interpretation of electromagnetic radiation. According to Larmor, a «ray», or «filament of light», could be looked upon as «a statistical aggregate»: the statistical «constitution of the ray» mirrored the statistical distribution of energy «in the radiant element of mass». The «general thesis» he developed was a «molecular statistics of distribution of energy», which gave birth to a re-derivation of «Planck's formula for natural radiation»⁴.

In his 1910 review, Planck faced the general query concerning continuity and discontinuity, both for matter and energy, but in the end, he found that every «*Korpuskulartheorie*» appeared weak and unreliable to people «relying on the electromagnetic nature of light». He thought that a radical assumption of discontinuity in the structure of light would have led physics back to the old debates taking place in the eighteenth century. Could a physicist put in danger the fruitful alliance between the wave theory of light and Maxwell's electromagnetic theory, for the sake of a questionable hypothesis? Although he acknowledged the existence of some connection between his own view and J.J. Thomson, Larmor and Einstein's views, for the time being, Planck restated his trust in «Maxwell-Hertz's equations for empty space, which excluded the existence of energy quanta in vacuum»⁵.

Planck had already made similar remarks the year before, in the lectures he had held at Columbia University. In particular, in the sixth lecture, «Heat radiation. Statistical theory», he had claimed that «the most radical view» had put forward by J.J. Thomson, Larmor, Einstein, and Stark, who thought that «the propagation of electromagnetic waves in a pure vacuum does not occur precisely in accordance with the Maxwellian field equations», but by

⁴ See Larmor (1909, 91). He reminded the reader that in 1902 he had already published a very brief *Report* (eleven lines), «in which it was essayed to replace Planck's statistics of bipolar vibrators by statistics of elements of radiant disturbance» (Larmor (1909, 86-8, 91)). See Larmor (1902, 546): «[...] various difficulties attending this [namely Planck's] procedure are evaded, and the same result attained, by discarding the vibrators and considering the random distribution of the permanent element of the radiation itself, among the differential elements of volume of the enclosure, somewhat on the analogy of the Newtonian corpuscular theory of optics». See Planck (1910a, 761): «Am radikalsten verfährt hier von den englischen Physikern J.J. Thomson, auch Larmor, von den deutschen Physikern A. Einstein und mit ihm J. Stark. Dieselben neigen zu der Ansicht, daß sogar die elektrodynamische Vorgänge im reinen Vakuum, also auch Lichtwellen, nicht stetig verlaufen, sondern nach diskreten Quanten von der Größe hn , den ‚Lichtquanten‘, wobei n die Schwingungszahl bedeutet». For the diffusion of Larmor's papers, see Kuhn (1987, 136-7, 314).

⁵ See Planck (1910a, 763-4, 767-8). Planck's review was really oversimplified: neither the differences between J.J. Thomson and Einstein, nor the differences between J.J. Thomson and Larmor were taken into account.

means of definite energy quanta. He found it «not necessary to proceed in so revolutionary a manner»; he would have confined himself to «seeking the significance of the energy quantum $h\nu$ solely in mutual actions with which the resonators influence one another». In any case, a «definite decision with regard to these important questions» could stem only from «further experience»⁶.

I have decided to take into account the conceptual and historical reconstruction Planck outlined in 1909 and 1910, and the melting pot of complementary theoretical models and meta-theoretical options which was turned on in the last decades of the nineteenth century.

In reality, in the early 1890s, before his well-known experiments on cathode rays, J.J. Thomson had outlined a discrete model of electromagnetic radiation. In the same years, Larmor was trying to match continuous with discrete models for matter and electricity.

J.J. Thomson and Larmor were strongly involved in the emergence of late nineteenth century theoretical physics. Although the emergence of chairs of «theoretical physics» in German speaking countries in the last decades of the nineteenth century must be distinguished from «theoretical physics» as a new practice in physics, the latter emerged as a really new approach⁷. The hallmark of theoretical physics was the awareness that the alliance between the mathematical language and the experimental practice celebrated by Galileo had to be updated. Besides *definite demonstrations* and *sound experiments* there was a third component, which we could label conceptual or theoretical: it dealt with principles, models, and patterns of explanation. That conceptual component, neither formal nor empirical, was looked upon as a fundamental component of scientific practice. Different theories could share the same mathematical framework and make reference to the same kind of experiments: the difference among them could be found just at the conceptual level. Conversely, a given set of phenomena could be consistently described by different theories⁸.

The emergence of theoretical physics also corresponded to a new sensitivity to meta-theoretical issues: we find explicit designs of unification, explicit methodological remarks, and explicit debates on the foundations of

⁶ Planck (1910b, engl. trans., 1998, 95-6).

⁷ For the institutional aspects, see McCormmach & Jungnickel (1986, II vol., 33, 41-3, 48, 55-6).

⁸ It seems to me that a similar point of view has been put forward in Giannetto (1995, 165-6), Kragh (1996, 162), D'Agostino (2000, ix), and Lacki (2007, 248). For a historical reconstruction from the point of view of an early twentieth-century scholar, see Merz (1912, 199).

physics. In that season, all these cogitations were looked upon as intrinsic aspects of scientific practice. Scientists did not entrust philosophers with reflections on aims and methods of science: meta-theoretical remarks emerged from the actual scientific practice, as a sort of new awareness⁹.

It seems to me that L. Boltzmann managed to frame theoretical physics from the historical and conceptual points of view. In a lecture held in 1904, in St. Louis (USA), at the *Congress of Arts and Science*, he qualified «the development of experimental physics» as «continuously progressive». He saw some permanent achievements: among them, «the various applications of Röntgen rays» or «the utilisation of the Hertz waves in wireless telegraphy». On the contrary, he acknowledged that the «battle which the theories have to fight is, however, an infinitely wearisome one». Theoretical physics dealt with «certain disputed questions which existed from the beginning» and which «will live as long as the science». In other words, theoretical physics deals with conceptions which continuously emerge, then are neglected and subsequently re-emerge. One of the «problems» which he found «as old as the science and still unsolved» concerned the choice between *discrete* and *continuous* in the representation of matter. Moreover, the historical consciousness, which had already emerged in scientists of the last decades of the nineteenth century, found in Boltzmann an advanced interpretation. Physical theories could not be looked upon as «incontrovertibly established truths», for they were based on hypotheses which «require and are capable of continuous development»¹⁰.

2. Continuity versus discontinuity, and mechanics versus probability

Swinging between discrete and continuous theoretical models was indeed one of the main features of Boltzmann's pathway to thermodynamics. In the 1870s, 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 the first lines of his 1872 paper

⁹ See Cassirer (1950, 83-4): «Now not only does the picture of nature show new features, but the view of what a natural science can and should be and the problems and aims it must set itself undergoes more and more radical transformation. In no earlier period do we meet such extensive argument over the very conception of physics, and in none is the debate so acrimonious. [...] When Mach or Planck, Boltzmann or Ostwald, Poincaré or Duhem are asked what a physical theory is and what it can accomplish we receive not only different but contradictory answers, and it is clear that we are witnessing more than a change in the purpose and intent of investigation».

¹⁰ Boltzmann (1905, 592-5).

“Weiteren Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen”, he reminded the reader about the foundations of the mechanical theory of heat. Molecules were always in motion, but the motion was invisible and undetectable: only the “average values» could be detected by human senses¹¹.

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. Boltzmann claimed that probability did not mean uncertainty: the presence of the laws of probability in the mechanical theory of heat did not represent a flaw in the foundations of the theory. Probabilistic laws were ordinary mathematical laws as certain as the other mathematical laws: we should not confuse an “incomplete demonstration» with a “completely demonstrated law of the theory of probability»¹².

The pivotal mathematical entity was «the number of molecules whose living force lies between x and $x + dx$, at a given time t , in a given space r »: Boltzmann labelled $f(x,t) dx$ this differential function. From the mathematical point of view, he had to face a «two-steps task»: the «determination of a differential equation for $f(x,t)$ », and the subsequent «integration». He assumed that “the variation of the function stemmed only from the collisions» between couples of molecules. The keystone of the whole procedure was therefore the computation of the collisions¹³. That a differential equation, namely a mathematical structure based on a continuous variation over time, depended on intrinsically discontinuous processes like collisions, sounds quite astonishing: much more than the specific mathematical difficulties, this was the crucial challenge Boltzmann had to cope with. The function $f(x,t)$ did not belong to the tradition of mathematical physics: a re-interpretation of the concepts of dynamic equation and time-evolution of a physical system was at stake. That function had to bridge the gap between two different traditions in Mechanics: the laws of scattering between solid bodies, which were confined at the invisible microscopic level of interacting molecules, and the equations of motions, which ruled the macroscopic observable behaviour of the whole gas¹⁴.

¹¹ Boltzmann (1872), in Boltzmann (1909, I Band, 316).

¹² *Ibid.*, 317-8.

¹³ *Ibid.*, 322.

¹⁴ *Ibid.*, 322-3.

In a next section of the essay, the problematic link between mathematical algorithms and physical concepts was newly at stake, for Boltzmann transformed his integro-differential equation into an infinite sum of discrete terms. That a late-nineteenth century physicist trained in the tradition of mathematical physics replaced integrals with infinite sums, seems quite puzzling, even though a discrete mathematical model was in accordance with the physical foundations of the kinetic theory of gases. Boltzmann himself tried to justify his theoretical choice¹⁵.

The new discrete procedure Boltzmann was undertaking required that the variable x , representing the living force of a molecule, could assume only a series of multiple values of a given quantity ε . This is perhaps the most astonishing feature of Boltzmann new theoretical model: energy, just like matter, could rely on a basic unit. In other words, Boltzmann put forward an atomic or molecular representation of energy alongside an atomic or molecular representation of matter. Here we can appreciate one of the main features of late-nineteenth-century theoretical physics: the explicit awareness that a plurality of theoretical models could account for a given class of phenomena. The continuous function $f(x,t)$ had to be replaced by a series of statistical weights: the number w_1 of molecules with energy ε , the number w_2 of molecules with energy 2ε , and so on. The label $N_{\chi\lambda}^{kl}$ represented «the number of collisions» which transformed the energies $k\varepsilon$ and $l\varepsilon$ of two molecules into the energies $\chi\varepsilon$ and $\lambda\varepsilon$ ¹⁶.

Two important features of Boltzmann's theoretical pathway deserve to be emphasised. First, Boltzmann forced Mechanics and Statistics to stay beside each other. Second, he gave up the demand that the behaviour of a physical system as a whole be reduced to, and explained by, the behaviour of its components. Every molecular component followed the laws of ordinary mechanics, but the whole followed statistical laws: the whole could not be looked upon as a mere sum of its microscopic parts¹⁷.

¹⁵ See *Ibid.*, 347: «Die Integrale sind bekanntlich nichts anderes als symbolische Bezeichnungen für Summen unendlich vieler, unendlich kleiner Glieder. Die symbolische Bezeichnung der Integralrechnung zeichnet sich nur durch eine solche Kürze aus, dass es in den meisten Fällen nur zu unnützen Weitschweifigkeiten führen würde, wenn man die Integrale erst als Summen von p Gliedern hinschriebe und dann p immer größer werden ließe. Trotzdem aber gibt es Fälle, in denen die letztere Methode wegen der Allgemeinheit, die sie erzielt, namentlich aber wegen der größeren Anschaulichkeit, in der sie die verschiedenen Lösungen eines Problems erscheinen lässt, nicht ganz zu verschmähen ist».

¹⁶ *Ibid.* 348-9.

¹⁷ In this conceptual gap, Cassirer saw a deep transformation of “the ideal of knowledge”. See Cassirer (1936, 97): «Denn eben der Umstand, dass so weitreichende Aussagen über

In 1877 Boltzmann published an even longer paper, where he reminded the reader that the function E he had introduced in 1872 could never increase, and that it reached its minimum value at thermal equilibrium. He also reminded the reader about a recently published paper, “Bemerkungen über einige Probleme der mechanischen Wärmetheorie”: there he had shown that «there are more uniform than non-uniform distributions» of living force among the molecules of a gas, and that a great probability «that the distribution become uniform over time» followed¹⁸.

The molecules could assume only discrete values of velocity: the model was qualified by Boltzmann himself as «fictitious» and «not corresponding to an actual mechanical problem», although «much easier to handle mathematically». The series of available «living forces» corresponded to an «arithmetic progression» $0, \varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon, \dots, p\varepsilon$ with an upper bound $P = p\varepsilon$. These values of the energy could be «distributed over the n molecule in all possible ways», provided that the sum of all energies was preserved over time, and assumed a given value $\lambda \cdot \varepsilon = L$ ¹⁹.

Boltzmann called «complexions» the different distribution of energy among the n molecules, which corresponded to the same number of molecules endowed with a given value of energy. In other words, a complexion was a simple permutation in a fixed state or distribution of energy. If a given state corresponds to « w_0 molecules with null living force, w_1 molecules with living force ε , w_2 with living force 2ε , and so on», there is a given number of complexions corresponding to the state, which Boltzmann labelled «the number of complexions» B or «number of permutations» or «permutability of a given distribution». In his 1877 paper, the *discrete function* B took on the crucial role played by the *discrete function* $N_{\chi\lambda}^{kl}$ in his 1872 paper²⁰.

The computation of the «permutability» $B = n! / w_0! \cdot w_1! \cdot w_2! \cdot \dots \cdot w_p!$ was submitted to the conservation of matter and energy. For every state, the number of complexions corresponded to the number of permutations among

ein physikalisches Ganze unter Verzicht auf die Kenntnis der einzelnen Teile möglich sind, stellt vom Standpunkt der reinen Punktmechanik eine Paradoxie dar und enthält eine Umbildung des Erkenntnisideals, das sie bisher durchgeführt hatte».

¹⁸ Boltzmann (1877b), in Boltzmann (1909, II Band, 164).

¹⁹ *Ibid.*, 167-9.

²⁰ *Ibid.*, 169-70. At this stage of Boltzmann’s theorisation, every specific mechanical model was dismissed. See Campogalliani (1992, 455): «[...] in questo ambito ogni modello ancorato alla meccanica delle collisioni molecolari risulta sostanzialmente accantonato [...]».

all the molecules divided by the number of internal permutations among the members of every set of molecules owning the same energy. Boltzmann identified the minimum of the denominator with the minimum of its logarithm, because the denominator «is a product» of factorials. At this point, he suddenly changed his model, «in order to apply the differential calculus» to a computation based on the discrete structure of integer numbers. He transformed the *factorial function* into the *Gamma function*, which was a generalisation of the factorial function to continuous numerical sets²¹.

Another mathematical switch was activated at this point; he re-translated the expression *to be minimised* into a discrete form. Subsequently the quantity ε was interpreted as «a very small quantity», and the frequencies $w_0, w_1, w_2, \dots, w_p$ were expressed by means of a continuous function $f(x)$ ²².

After having devoted some pages to multi-atomic molecules, and many more pages to analysing different distributions of probability, in the last section Boltzmann faced «the relationship between entropy and distribution of probability». He stressed the structural similarity between the function Ω , representing the probability of a given state, and the entropy dQ/T in any «reversible change of state»²³.

However, in the 1880s, some German-speaking scientists cast doubts on atomism and microscopic interpretations of the second principle of

²¹ *Ibid.*, 175-6. In the subsequent years, Boltzmann tried to clarify the conceptual tension between continuous and discontinuous theoretical models. In two papers, first published in the *Annalen der Physik und Chemie* in 1897, and then in his *Populäre Schriften*, he claimed that «[a]tomism seems inseparable from the concept of the continuum». He noticed that in the theory of heat conduction and in the theory of elasticity, «one first imagine a finite number of elementary particles that act on each other according to certain simple laws and then once again looks for the limit as this number increases». In any case, we have to start from «a finite number of elements» even in integral calculus. According to Boltzmann, mathematical procedure required the passage from discontinuous to continuous representations, just in this order. See Boltzmann (1897a, 44), and Boltzmann (1897b, 55). On the Kantian *flavour* of Boltzmann approach to that conceptual tension, see Dugas (1959, 73).

²² *Ibid.*, 177 and 187-8.

²³ *Ibid.*, 216-7. For a comparison with his 1872 line of reasoning, see Boltzmann (1872), in Boltzmann (1909, I Band, 399-400). Cassirer found that Boltzmann had managed to remove the “paradoxical and extraneous nature (*Fremdheit*)» of the second Principle of Thermodynamics in the context of Mechanics. Just for this reason, he qualified Boltzmann as «one of the most rigorous representatives of classic Mechanics». See Cassirer (1936, 95-6). 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.

Thermodynamics: among them we find the young Planck, who had an extraordinary tenure at the University of Kiel. In 1882, in the last paragraph of a paper devoted to vaporisation, melting and sublimation, he made some sharp remarks on the second Principle. He found that the consequences of that principle and «the assumption of finite atoms» were mutually «incompatible», and imagined that «a battle (*Kampf*) between the two hypotheses» would have taken place in the near future. Making use of an emphatic metaphor, which did not fit in with the plain style of the paper, Planck foresaw that the battle would lead to «the loss of life» for one of the opponents. Although he considered «however premature» any definite prediction, he saw some evidence in favour of the hypothesis of «continuous matter» and against the atomic theory, «its great results notwithstanding»²⁴.

In 1880, when he had published the dissertation *Gleichgewichtszustände isotroper Körper in verschiedenen Temperaturen*, in order to be given the *venia legendi*, he had outlined a mathematical theory where the mechanics of continuous media merged with thermal processes. He relied on the two principles of «the mechanical theory of heat», and «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*»²⁵.

A widespread debate on the foundations of Thermodynamics involved the scientific community for many years, and some British physicists criticised the mechanical and probabilistic interpretations of the second Principle. Edward P. Culverwell was one of the British scientists who were dissatisfied with Boltzmann's explanation of the drift of a physical system towards equilibrium. In 1890, he had remarked that «no one» had managed to show that «a set of particles having any given initial conditions» would

²⁴ Planck (1882, 474-5). In a footnote he made reference to two recent German editions of Maxwell's *Theory of Heat*, in particular to a passage where the author played with an omnipotent being who was able to separate fast from slow molecules. See Maxwell (1872, 308-9), and Maxwell (1885, 328-9). See Kuhn (1987, 23-4) for the identification of Planck's reference to German editions with the above mentioned passage by Maxwell.

²⁵ Planck (1880, 1). Planck became *Privatdocent* at the University of Munich in 1880, and was appointed as extraordinary professor of physics at the University of Kiel in 1885. In 1889, two years after Kirchhoff's death, he became assistant professor at the University of Berlin, and director of the Institute for Theoretical Physics: in 1892 he was appointed ordinary professor. See McCormach & Jungnickel (1986, vol. 2, 51-2, 152, 254), and Gillispie (ed.) (1970-80, Volume XI, 8).

have approach the «permanent configuration» of equilibrium, «as time goes on»²⁶.

In 1894, Boltzmann took part to 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 journal also hosted a paper where Boltzmann tried to clarify his probabilistic approach to Thermodynamics. He clearly stated that the second Law could «never be proved mathematically by means of the equations of dynamics alone». This was a very important statement, because he explicitly acknowledged that something else was at stake besides the mechanical model of the kinetic theory. In reality, that *something else* was the statistical independence of the dynamical parameters of the different molecules, and it was a hypothesis in contrast with the laws of mechanics. In some sense Boltzmann's answer to Culverwell's objection was in accordance with Culverwell's objection itself: the demonstration of Boltzmann's theorem required "some assumption" of not-mechanical nature²⁷.

3. Continuous and discrete structures for the electromagnetic field

In a paper published in 1891, Poynting's model of tubes of force allowed J.J. Thomson, then Cavendish Professor of Experimental Physics (the chair previously held by Maxwell), to undertake a relevant conceptual shift. The electric field as a continuous entity transformed into a new «molecular» theory, where electric fields were imagined as a collection or discrete, individual entities, endowed with their own identity. He introduced two levels of investigations, macroscopic and microscopic. In thermodynamics, the macroscopic level of the theory of gases corresponded to the microscopic level of the kinetic molecular theory: in some way, the latter was an *explanation* of the former. The microscopic level corresponded to a higher level of comprehension or to a finer interpretation. In the electromagnetic theory, to a macroscopic level, described in terms of continuous fields, corresponded a microscopic level, described in terms of an invisible,

²⁶ Culverwell (1890, 95). Among the problems still unsolved, Culverwell mentioned the determination of the mathematical law for intermolecular force, and the role played by the luminiferous aether.

²⁷ Boltzmann (1895), in Boltzmann (1909, III. Band, pp. 539-40). See Culverwell (1895, 246, above quoted). There was another issue, indeed, which Boltzmann did not face explicitly, a fundamental question which emerges whenever the argument of velocities reversal comes into play: where would the required energy come from?

discrete structure: the tubes of electric induction. J.J. Thomson put forward a conceptual shift towards a *kinetic molecular* theory of energy, the same conceptual shift already realized in the case of matter²⁸.

Another conceptual shift occurred in the representation of matter, from the model of solid dielectrics to the model of electrolytes. Electrolytes were exactly the kind of matter which was not easy to explain in the context of Maxwell's theoretical framework. At the same time, gases seemed to exhibit the same behaviour of electrolytes when electricity passed through them. Liquid electrolytes and ionised gases became the new model of matter «undergoing chemical changes when the electricity passes through them». The theory Maxwell had put forward was essentially a theory based on solid dielectrics and conductors; now liquids and gases were on the stage and Thomson attempted to explain the properties of metals by means of the properties of liquids and gases²⁹.

In 1893, in the treatise *Recent Researches in Electricity and Magnetism*, J.J. Thomson put forward a discrete structure for matter, electricity and energy, provided that the tubes of force represented a sort of substantialisation of the electromagnetic energy stored in the field. Inside a molecule, Thomson saw short tubes of force keeping atoms close to each other, in order to assure molecular stability: in this case, the length of the tubes were of the same order of molecular dimensions. On the contrary, if the length of the tubes was far greater than molecular dimensions, we would have in front of us atoms «chemically free»³⁰. Not only was matter embedded in a net of tubes of force but even aether was. Indeed, tubes of force were not a mere materialisation of electric forces: Thomson imagined a sea of tubes of force spread throughout aether even without any electric force. There was a distribution of tubes corresponding to an unperturbed state. The effect of electric forces was an overbalance in the sea of tubes: electric forces made tubes move towards a specific direction. The drift of the tubes, driven by the electric forces, gave rise to electrodynamic effects, for instance the establishment of a magnetic field³¹.

²⁸ See Thomson (1891, 150): «We may regard the method from one point of view as being a kind of molecular theory of electricity, the properties of the electric field being explained as the effects produced by the motion of multitudes of tubes of electrostatic induction; just as in the molecular theory of gases the properties of the gas are explained as the result of the motion of its molecules».

²⁹ See Thomson (1891, 151).

³⁰ See Thomson (1893, 3).

³¹ *Ibid.*, 4.

Tubes of force were the *hardware* associated to energetic processes. They underwent a sort of Law of Conservation: they could be neither created nor destroyed. A symmetry between matter and energy was explicitly assumed: in Thomson's theoretical model, the *sea* of tubes of force behaved as a *cloud* of molecules in a gas³².

A statistical aspect of Thomson's theory emerged, an aspect which connected electromagnetism to thermodynamics: in both cases, the macroscopic picture was the statistic effect of a great number of microscopic events. Thomson was strongly committed to a meta-theoretical issue, which flowed through the specific features of his theory like an enduring conceptual stream. This issue was the pursuit of the unity of physics. The theoretical model of «molecular» electric tubes of force allowed him to realize at least a certain degree of unification³³.

In a subsequent section, *Electromagnetic Theory of Light*, Thomson tried to give a more detailed account of propagation of light in terms of tubes of force. He thought that Faraday's tubes of force could help to «form a mental picture of the processes which on the Electromagnetic theory accompany the propagation of light». The propagation of a plane wave could be interpreted as «a bundle of Faraday tubes» moving at right angles to themselves and producing a magnetic force oriented at right angles with regard to both the direction of the tubes and the direction of motion³⁴.

Starting from Maxwell's electromagnetic fields, represented as stresses propagating through a continuous solid medium, Thomson arrived at a representation of fields as a sea of discrete units carrying energy and

³² See Thomson (1893, 4): «Thus, from our point of view, this method of looking at electrical phenomena may be regarded as forming a kind of molecular theory of Electricity, the Faraday tubes taking the place of the molecules in the Kinetic Theory of Gases: the object of the method being to explain the phenomena of the electric field as due to the motion of these tubes, just as it is the object of the Kinetic Theory of Gases to explain the properties of a gas as due to the motion of its molecules. The tubes also resemble the molecules of a gas in another respect, as we regard them as incapable of destruction or creation.»

³³ I agree with J. Navarro when he stresses J.J. Thomson effort to attain a unified representation of physical and chemical phenomena, but I do not find that the «metaphysics of the continuum» was the unifying element. See Navarro (2005, 272-3).

³⁴ Thomson (1893, 11, 42): If there is no reflection the electromotive intensity and the magnetic force travel with uniform velocity v outwards from the plane of disturbances and always bear a constant ratio to each other. By supposing the number of tubes issuing from the plane source per unit time to vary harmonically we arrive at the conception of a divergent wave as a series of Faraday tubes traveling outwards with the velocity of light. In this case the places of maximum, zero and minimum electromotive intensity will correspond respectively to places of maximum, zero and minimum magnetic force.

momentum. The wave theory of light, then a well-established theory, seemed violently shaken by a conception which echoed ancient, outmoded theories³⁵.

The conceptual tension between the *discrete* and the *continuous* affected aether, matter, energy and electric charge. This tension led to a unified view, where a new symmetry emerged between matter and energy: both were represented as discrete structure emerging from the background of a continuous medium. Invisible, discrete, microscopic structures explained the properties of apparently continuous, macroscopic phenomena. J.J. Thomson tried to transform Maxwell's theory into a unified picture where atomic models of matter stood beside *atomic* models of fields. One unit of matter corresponded to one unit of electricity, and one unit of tube of force connected units of matter-charge to each other³⁶.

From 1893 to 1897, Larmor, then fellow of the *Royal Society*, published in the *Philosophical Transactions* three thick papers under the title «A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium». The title drew readers' attention to aether, which represented the keystone of the whole project: it was the seat of electrical and optical phenomena, and it was involved in the constitution of matter.

In 1894, Larmor tried to clarify the relationship between electricity and structure of matter. The lines of twist starting from an atom and ending on another atom of the same molecule resembled the short tubes of force connecting the atoms in a molecule as suggested by J.J. Thomson some years before. In that theoretical model, Maxwell's transfer of electricity as pure propagation of breakdowns of elasticity across the aether appeared not completely satisfactory, because the seat of electricity could also be inside matter. Therefore Larmor took a step forward: the transfer of electricity also consisted of the «convection of atomic charges». Electric charge underwent a conceptual shift from a phenomenon connected to the distribution and transfer of energy to a phenomenon connected to the distribution and transfer of matter. Conversely, matter became a peculiar entity, stemming from dynamical actions taking place in the aether. However, a sort of

³⁵ *Ibid.*, 43: «This view of the Electromagnetic Theory of Light has some of the characteristics of Newtonian Emission theory; it is not, however, open to the objections to which that theory was liable, as the things emitted are Faraday tubes, having definite positions at right angles to the direction of propagation of the light. With such a structure the light can be polarised, while this could not happen if the things emitted were small symmetrical particles as on the Newtonian Theory».

³⁶ For further remarks on J.J. Thomson's theoretical researches between 1891 and 1893, see Bordoni (2008, chapters 12 and 13).

conceptual continuity was assured, for the transfer of particles, represented as dynamical structures of the aether, was not so different from the transfer of *pure* energy. In other words, in Larmor's general framework, matter and energy, in their intimate nature, were not radically different from each other³⁷.

The motion of a charged particle through aether produced an «elastic effect of convection through the medium», consisting of «a twist round its line of movement». The effect was not so different from the propagation of elastic actions in *displacement* currents: such a twist was just the common feature of every kind of electric current. At the same time Larmor acknowledged that he had not managed to enlighten what he considered the core of every electromagnetic theory: «the detailed relations of aether to matter». He assumed that the basic dynamic entity was placed at the sub-atomic level, and he labelled «electron» that entity. The new solution, the «electron», confirmed the integration between the continuous *substratum* and the discrete unit, in some way a *particle*, of electric charge. The specific unifying element of the new theory was the convective nature of all kind of electric currents, both macroscopic and microscopic³⁸.

Independently from their peculiar nature of dynamical singularities in the aether, electrons were electric charges in motion along closed paths, therefore undergoing an accelerated motion. Consistently with Maxwell's electromagnetic theory of radiation, accelerated electric charges would have sent forth electromagnetic waves. That effect was in contrast with Larmor's atomic model, for a swift damping of electronic motion would have followed. To save the model, Larmor introduced (*ad hoc*, indeed) the concept of «steady motion», and the concept of perturbation of a steady motion. Electric waves could stem only from those perturbations³⁹.

This new condition of «steady motion» broke the symmetry between macroscopic and microscopic level, for the condition of *steadiness* appeared

³⁷ See Larmor (1894, 771).

³⁸ Larmor (1894, 807).

³⁹ See Larmor (1894, 808): «It may be objected that a rapidly revolving system of electrons is effectively a vibrator, and would be subject to intense radiation of its energy. That however does not seem to be the case. We may on the contrary propound the general principle that whenever the motion of any dynamical system is determined by imposed conditions at its boundaries or elsewhere, which are of a steady character, a steady motion of the system will usually correspond, after the preliminary oscillations, if any, have disappeared by radiation or viscosity. A system of electrons moving steadily across the medium, or rotating steadily round a centre, would thus carry a steady configuration of strain along with it; and no radiation will be propagated away except when this steady state of motion is disturbed».

suitable only for the latter. Unfortunately, the tension between *macroscopic* and *microscopic*, which seemed to have been overcome by the attribution of a convective nature even to microscopic currents, re-appeared once again. There was a difference between the intimate nature of matter, concerning microphysics, and its visible features, concerning ordinary physics⁴⁰.

The double nature of electrons, as individual building blocks of matter, on the one hand, and as dynamical structures of aether, on the other, affected their behaviour with regard to velocity. As long as their velocity remained far less than the velocity of radiation, their dynamical properties could be expressed “in terms of the position of the electrons at the instant”. When their velocities approached that of radiation, they had to be «treated by the methods appropriate to a continuum». In other words, low velocity electrons behaved like particles, whilst high velocity electrons behaved like radiation⁴¹.

Larmor’s electron as a rotational stress in the aether led to a model of electric current not so different from Thomson’s, because an electronic flow could be looked upon as a motion of some kind of aethereal perturbation. I find that, beyond some specific, important features, which differentiated Larmor’s electrons from Thomson’s tubes of force, both entities consisted of dynamical and aethereal structures propagating through aether itself. Moreover, in both cases, we are dealing with the propagation of a series of discrete units, either tubes of force or electrons⁴².

After 1894, Larmor went on inquiring into the aethereal concentration of energy which was peculiar to his electron. In 1895, in the first lines of the second paper of the trilogy «A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium», he re-introduced «electrons or permanent strain-

⁴⁰ It is worth mentioning that, since the dawn of natural philosophy, two general conceptions on the link between *macroscopic* and *microscopic* world had been on the stage. On the one hand, the conception of an invisible small-scale structure as a tiny copy of the large-scale world; on the other hand, the conception of an invisible small-scale structure endowed with specific features, following different laws. The main hallmark of ancient atomism was the physical gap between the ordinary, visible world, and the invisible world of atoms: the latter was an *explanation* of the former.

⁴¹ Larmor (1894, 811). For further remarks on Larmor’s theoretical researches between 1894 and 1895, see Bordoni (2011, 36-54).

⁴² A different appraisal can be found in Darrigol (2000, 168, 174). Darrigol claimed that Poynting and J.J. Thomson’s theoretical model of electric current as an effect of the convergence and dissolution of tubes of force «preserved a Maxwellian intuition of the electric current». On the contrary, the *electron* Larmor introduced in 1894, represented an alternative to Maxwell’s leading theoretical model, as well as *particles* (1892) and *ions* (1895) which Lorentz introduced in the same years.

centres in the aether, which form a part of, or possibly the whole of, the constitution of the atoms of matter»⁴³.

In his 1900 *Aether and Matter*, Larmor put forward a unified view for both electromagnetic fields and matter. On the one hand, electromagnetic actions consisted of «elastic actions across the aether», so that «an electric field must be a field of strain». On the other hand, *protions*, endowed with intrinsic electric charge, «must be surrounded by a field of permanent or intrinsic aethereal strain» and therefore they must be «in whole or in part a nucleus of intrinsic strain in the aether». Propagations of pure fields and propagation of elementary matter yielded the same effects; in other words, Maxwell's *displacement* currents and convective electric currents shared the same intimate nature. He portrayed *protions* or *electrons* as something which «can move or slip freely about through that medium much in the way that a knot slips along a rope»⁴⁴.

In 1904 J.J. Thomson published a booklet, *Electricity and Matter*, wherein he collected together some lectures he had held in Yale in 1903; within a few months, Thomson's booklet was translated into German and other languages. In the third chapter, «Effects due to acceleration of the Faraday's tubes», Thomson focussed on the interaction between Röntgen rays and matter. He remarked that «Röntgen rays are able to pass very long distances through gases, and as they pass through the gas they ionise it». What he found difficult to explain was that «the number of molecules so split up is, however, an exceedingly small fraction, less than one billionth, even for strong rays, of the number of molecules in the gas». The question was: why were not all the molecules crossed by that kind of radiation affected in the same way? In other words, «if the conditions in the front of the wave are uniform, all the molecules of the gas are exposed to the same conditions»: how could the fact «that so small a proportion of them are split up» be explained? Perhaps the concentration of energy which modified the microscopic structure of matter did not have its seat in Röntgen rays but in matter itself. Perhaps only high-energy molecules could experience the ionisation when interacting with the rays. Nevertheless, in this case, the probability of the ionisation would have shown some kind of dependence on gas temperature, namely on its internal energy: «the ionisation produced by the Röntgen rays ought to increase very rapidly as the temperature increases»⁴⁵. This was not the case and therefore J.J. Thomson resorted to

⁴³ Larmor (1895, 695, 697 and 706).

⁴⁴ Larmor (1900, 26, 86).

⁴⁵ Thomson (1904, 63-4).

his 1893 theoretical model of electromagnetic radiation as a bundle of discrete tubes of force. He thought that the selective ionisation could be explained only if, «instead of supposing the front of the Röntgen ray to be uniform, we suppose that it consists of specks of great intensity separated by considerable intervals where the intensity is very small». According to that hypothesis, the microscopic properties of electromagnetic radiation were similar to the properties of microscopic particles: in J.J. Thomson's words, «the case becomes analogous to a swarm of cathode rays passing through the gas». Indeed, that flux of elementary corpuscles showed the same behaviour of X-rays: «The number of molecules which get into collision with the rays may be a very small fraction of the whole number of molecules». In 1904, J.J. Thomson imagined tubes of force «as discrete threads embedded in a continuous ether, giving to the latter a fibrous structure». He assumed that both aether and electromagnetic waves were endowed with a discrete structure: it was a solution, he remarked, «which I have not seen noticed»⁴⁶.

4. Concluding remarks on *classical physics*

Now the question is: why, in more recent secondary literature has not the conceptual link between J.J. Thomson and Einstein (however problematic it may be) been taken into account? I must stress that what appears as a sort of *missing link* in recent literature, was acknowledged as an important link by some physicists in the first half of the twentieth century⁴⁷.

⁴⁶ Thomson J.J. 1904, 63, 65.

⁴⁷ In reality, between the 1950s and the 1980s, historians payed attention to the conceptual link between J.J. Thomson and Einstein, but more recently, the issue has been skipped by historians. In 1953, E.T. Whittaker acknowledged that the «apparent contradiction between the wave-properties of radiation and some of its other properties had been considered by J.J. Thomson in his Silliman lectures of 1903». See Whittaker (1953, 93). In 1963, M. Klein, confined himself to note that Einstein's 1905 paper on light *quanta* did not show any evidence «that he was aware of or influenced by Thomson's ideas». See Klein (1963, 62 and 80). In 1967, R. McCormmach stated that Einstein's «views have certain close similarities with Thomson's, and they should be examined». When he drew his conclusion he claimed that «Thomson's theory of light was inconclusive» and «the predicted structure remained largely qualitative in theory and undetectable in the laboratory». But he acknowledged that «Thomson contributed to the twentieth-century revolution in the theory of light». See McCormmach (1967, 387). In 1978, C. Tarsitani remarked that the query about the nature of radiation «had already been raised by J.J. Thomson before 1905, without any reference to photoelectric effect». See Tarsitani (1978, 255-6). In 1983, B.R. Wheaton remarked that «Thomson had speculated that lines or 'tubes' of force might be

Millikan, both in *The Electron*, the book he published in 1917, and in his 1924 *Nobel Lecture* took explicitly into account the link between J.J. Thomson and Einstein. The photo-electric effect and X-rays scattering could be accounted for «in terms of a corpuscular theory», wherein «the energy of an escaping electron comes from the absorption of a light-corpucle». Einstein's 1905 hypothesis seemed to Millikan a daring implementation of Thomson's theoretical model. The former appeared to Millikan definitely unreliable: «I shall not attempt to present the basis for such an assumption, for, as a matter of fact, it had almost none at the time»⁴⁸. In any case, and independently from the unsatisfactory theoretical foundations, he acknowledged that the process of «emission of energy by an atom is a discontinuous or explosive process». That «explosive» feature suggested to Millikan the hypothesis that the cause of the photoelectric effect or X-rays scattering was placed in matter rather than in radiation. This model was called by Millikan the «loading theory», because the process of accumulation of energy inside the atom was its main feature. According to Millikan, an unknown mechanism concerning the structure of the atom, and some unknown structure of aether were involved. He completely overturned the meaning of Einstein's *quantum* theory: not only, in his words, the «Thomson-Einstein theory throws the whole burden of accounting for the new facts upon the unknown nature of the ether», but Thomson and Einstein were associated in their supposed attempt to make «radical assumptions about its structure»⁴⁹. That Einstein's theoretical model did not require any aether was perhaps beyond Millikan's conceptual horizon.

more than just mathematical abstractions». See Wheaton (1983, 78); see also Wheaton (1983, 16, 109, 138). On the contrary, Cassidy's survey of Einstein's 1905 paper on light *quanta* begins with the sharp sentence: «Einstein was the first to propose that light behaves in some circumstances as if it consists of localized units, or quanta». See Cassidy (2005, 15, 17). In a detailed and authoritative paper, J. Norton claimed that, differently from «special relativity and the inertia of energy», which he looked upon as «a fulfillment of the 19th century tradition in electrodynamics», Einstein's hypothesis of «spatially localized quanta of energy – stands in direct contradiction with that most perfect product of 19th century science». See Norton (2006, 72).

⁴⁸ Millikan (1917, 221-3). Einstein's «lokalisierten Energiequanten» appeared to Millikan nothing more than a specific feature of J.J. Thomson's *fibrous aether*. In eight pages (from 231 to 238), there are eight occurrences of expressions like «Thomson-Einstein theory», «Thomson-Einstein hypothesis of localized energy», «Thomson-Einstein theory of localized energy», «Thomson-Einstein assumption of bundles of localized energy travelling through the ether», or eventually «Thomson-Einstein semi-corpuscular theory».

⁴⁹ Millikan (1917, 234-7). B.R. Wheaton claimed that an «integral part of Einstein's rejection of the medium for light waves was his suggestion of the lightquantum hypothesis». See Wheaton (1983, 106).

In his 1924 Nobel lecture, he recollected his efforts to find «some crucial test for the Thomson-Planck-Einstein conception of localized radiant energy.» According to Millikan, Einstein's theory combined Thomson's conception with «the facts of quanta discovered by Planck through his analysis of black-body radiation», in order to obtain «an equation which should govern, from his viewpoint, the interchange of energy between ether waves and electrons». Although «the reality of Einstein's light quanta may be considered as experimentally established», he thought that «the conception of the localised light quanta out of which Einstein got his equation must still be regarded as far from being established»⁵⁰.

Two elements are worth mentioning: first, Millikan failed to acknowledge Thomson's 1893 theoretical contribution, and, second, he misunderstood the nature of the conceptual link between J.J. Thomson and Einstein⁵¹.

Obviously, Planck's 1900 search for a new law for the distribution of electromagnetic radiation, Einstein's 1905 attempt to overcome the asymmetry between matter and radiation, and J.J. Thomson's outline of a unified picture represented sharply different pathways to the integration between discrete and continuous models for energy. At the same time, Planck, Einstein, J.J. Thomson, and Larmor's different theoretical approaches could be looked upon as different implementations of the same attempt to integrate complementary conceptions. The connections among them are meaningful but quite problematic, and the different specific features of their correspondent theories should not be overshadowed⁵².

⁵⁰ Millikan (1924, 61-65). Once again he only saw two alternatives: either «the mechanism of interaction between ether waves and electrons has its seat in the unknown conditions and laws existing within the atom», or such a *mechanism* «is to be looked for primarily in the essentially corpuscular Thomson-Planck-Einstein conception as to the nature of the radiant energy ».

⁵¹ R. Stuewer pointed out two elements. First, «Millikan, in common with almost all physicists at the time, rejected Einstein's light quantum hypothesis as an interpretation of his photoelectric-effect experiments of 1915». Second, Millikan himself, in his Autobiography, published in 1950, revised his appraisal and stated that the phenomenon «scarcely permits of any other interpretation than that which Einstein had originally suggested». Stuewer qualified that sharp change as an instance of «revisionist history». On this issue, and on the attitudes of the scientific community towards Einstein's hypothesis in the 1910s, see Stuewer (2006, 543-8).

⁵² I find worth mentioning Renn's general interpretation of Einstein's 1905 papers. The hypothesis of light quanta was interpreted as an attempt to solve the problems at the borderline between electromagnetism and thermodynamics. The hypothesis of the equivalence between electromagnetic radiation and inertial mass was interpreted as an

Planck's 1910 review in the *Annalen der Physik* was really oversimplified: neither the relevant differences between J.J. Thomson and Einstein, nor the less relevant differences between J.J. Thomson and Larmor were taken into account. Planck continued to swing between continuous and discrete theoretical models: in his talk at the French Society of Physics in 1911, the persistence and co-existence of complementary theoretical models both for matter and energy, and the co-existence of determinism and indeterminism vividly emerge. If discrete electromagnetic processes were involved in «the emission of energy», in accordance with «the laws of chance», absorption took place «in a perfect continuous way». The two-fold behaviour of radiation allowed Planck to recover a sort of symmetry between matter and radiation: discontinuous processes were involved both «in pure energy of radiation, like heat radiation, Röntgen rays, and γ rays, and in material rays, like cathode rays and α and β rays.»⁵³

In 1913, in the second edition of his *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*, Planck insisted on this two-fold theoretical approach. He assumed that absorption was a continuous process, while emission was a discrete one, and it had the feature of a random process⁵⁴. He did not think that swinging between opposite theoretical model was a disparaging meta-theoretical option.

Both in Boltzmann's pathway to Thermodynamics in the 1870s, and in Larmor and J.J. Thomson's pathways to Electromagnetism in the 1890s, we find an attempt at integration between discrete and continuous models, and

attempt to solve the problems at the borderline between mechanics and electromagnetism. See Renn & von Rauchhaupt (2005, 32). See also Renn (2006b, 43).

⁵³ See Planck (1911, 358-9): «Il me semble donc nécessaire de modifier l'hypothèse des éléments d'énergie de la façon suivante. Seule l'émission de l'énergie se fait par à-coups, par quantités d'énergie \mathcal{E} entières et d'après les lois du hasard; l'absorption, au contraire, se poursuit d'une manière parfaitement continue. [...] On suppose ici, en effet, qu'une molécule ne peut émettre de l'énergie de vibration que suivant certaines quantités déterminées \mathcal{E} , qu'il s'agisse de pure énergie de rayonnement comme dans le rayonnement calorifique, les rayons Röntgen et les rayons γ , ou d'un rayonnement corpusculaire, comme dans le cas des rayons cathodiques et des rayons α et β .» See also p. 359: «Il semble aussi que, dans l'émission des rayons cathodiques, dans l'effet photo-électrique, de même que dans les phénomènes de la radioactivité, [...] elle doit jouer un rôle fondamental».

⁵⁴ See Planck (1913), in Planck (1915, 153): «[...] we shall assume that the emission does not take place continuously, as does the absorption, but that it occurs only at certain definite times, suddenly, in pulses, and in particular we assume that an oscillator can emit energy only at the moment when its energy of vibration, U , is an integral multiple n of the energy $\mathcal{E} = h\nu$. Whether it then really emits or whether its energy of vibration increases further by absorption will be regarded as a matter of chance».

between macroscopic and microscopic levels, both for matter and radiation. Can we say that we are dealing here with *classical* physics? In reality, the question is: what is really classical physics?

I see two historiographical alternatives: either the path of *classical* physics ended around the 1880s, or it ended around the 1920s. In that time span, the torch of theoretical physics flourished and quickly faded away. According to the second historiographical framework, Boltzmann's 1877 paper on the probabilistic interpretation of Thermodynamics, and J.J. Thomson's 1893 treatise on Electromagnetism belong to classical physics, and therefore Planck's theoretical pathway from 1900 to 1911 belongs to classical physics, and Einstein's 1909 paper can be looked upon as a sort synthesis of classical physics. According to the second framework, Boltzmann's paper and J.J. Thomson's treatise do not belong to classical physics, and therefore they represent a new kind of physics; Einstein's new theories can suitably be associated to Larmor and J.J. Thomson's XIX-century physics. However, in both cases, we find a substantial continuity in the history of physics until, at least, 1911.

The relationship between Planck and Einstein's new theories of electromagnetic radiation, on the one hand, and the body of knowledge which had emerged in the last decades of the nineteenth century, on the other, represents a very sensitive historiographical issue, and it has not been widely analyzed yet. I have confined myself to casting some light on the field, which is still waiting for being further explored. From a more general historiographical perspective, I find that we must stress changes and innovation introduced by the early twentieth-century theoretical physics and, at the same time, we must acknowledge the importance of theoretical researches which took place at the end of the nineteenth century. There was continuity in the attempt to integrate complementary conceptions for matter and energy; there was discontinuity in the specific features of Planck and Einstein's theories. I find that «continuity and innovation» should not be «disjunctive, mutually exclusive predicates». Sometimes the concept of scientific revolution «describes only the gross structures of scientific change». When we take into account the fine structure, we have the opportunity to appreciate elements of both continuity and discontinuity⁵⁵.

⁵⁵ See Funkenstein (1986, 14). He claimed that what we look upon as «new», often «consists not in the invention of new categories or new figures of thought, but rather in a surprising employment of existing ones». E. Giannetto has recently remarked that «nature and origins of quantum physics» had meaningful roots in Larmor's theoretical researches. See Giannetto (2007, 178, 181). See Miller (1984, 312). I think that my sketch does justice to the old-fashioned concepts of *forerunner* and *anticipation*. At the level of specific

Bibliography

- Boltzmann, L., 1872, “Weiteren Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen”, in Boltzmann, L., 1909, I. Band, pp. 317-402.
- , 1877a, “Bemerkungen über einige Probleme der mechanischen Wärmetheorie”, in Boltzmann, L., 1909, II. Band, pp. 112-48.
- , 1877b, “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.
- , 1895, “On Certain Questions of the Theory of Gases”, *Nature*, 51, pp. 413-15, in Boltzmann, L., 1909, III. Band, pp. 535-44.
- , 1897a, “On the Indispensability of Atomism in Natural Science”, in Boltzmann, L., 1974, pp. 41-53.
- , 1897b, “More on Atomism”, in Boltzmann, L., 1974, pp. 54-6.
- , 1905, “The Relations of Applied Mathematics”, in Rogers H.J. (ed.) 1905, *Congress of Arts and Science, St. Louis 1904*, vol. I, Boston and New York, Houghton, Mifflin and C., pp. 591-603.
- , 1909, *Wissenschaftlichen Abhandlungen*, Leipzig, Barth.
- , 1974, *Theoretical Physics and Philosophical Problems*, Dordrecht-Holland/Boston-U.S.A, (McGuinness B. ed.) D. Reidel Publishing Company.
- Bordoni, S., 2008, *Crossing the Boundaries Between Matter and Energy*, Pavia, Università degli Studi di Pavia – La Goliardica Pavese.
- Bordoni, S., 2011, “Beyond Electromagnetic and Mechanical World-views: J. Larmor’s Models of Matter and Energy in the Early 1890s”, *Centaurus*, 53, 1, pp. 31-54.

theoretical features of a theory, these concepts make no sense, because specific features are untranslatable. At the level of general conceptual models, we find persistence or recurrent re-emergence of themes or models: therefore nobody can claim to have *anticipated* a long-term tradition.

- Campogalliani, P., 1992, "Freccia del tempo e principio probabilistico nella costruzione teorica di Ludwig Boltzmann", *Physis*, 29, 2, pp. 447-63.
- Cassidy, D.C., 2005, "Einstein and the Quantum Hypothesis", in *Einstein's Annalen Papers*, ed. by J. Renn, Weinheim, WILEY-VHC Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Cassirer, E., 1936, *Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik*, Göteborg Wettergren & Kerbers Förlag.
- , 1950, *The Problem of Knowledge – Philosophy, Science, and History since Hegel*, New Haven, Yale University Press.
- Culverwell, E.P., 1890, "Note on Boltzmann's *Kinetic Theory of Gases*, and on Sir W. Thomson's *Address to Section A*", *British Association 1884, Philosophical Magazine*, 1890, 5, pp. 95-99.
- , 1895, "Boltzmann's Minimum Theorem", *Nature*, 1895, n. 1315, vol. 51, p. 246.
- D'Agostino, S., 2000, *A History of the Ideas of Theoretical Physics*, Boston Studies in the Philosophy of Science, Dordrecht/Boston/London, Kluwer.
- Darrigol, O., 2000, *Electrodynamics from Ampère to Einstein*, Oxford, Oxford University Press.
- Dugas, R., 1959, *La théorie physique au sens de Boltzmann*, Neuchatel-Suisse, Éditions du Griffon.
- Einstein, A., 1905, "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", *Annalen der Physik* 17, pp. 132-48.
- , 1906, "Theorie der Lichtezeugung und Lichtabsorption", *Annalen der Physik*, XX, pp. 199-206.
- , 1909, "Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems", *Physikalische Zeitschrift* 10, pp. 185-93; engl. trans. in Einstein, A., 1989, pp. 542-50.

- , 1989, *Collected Papers*, vol. 2, *The Swiss Years: Writings, 1900-1909*, Princeton - New Jersey, Princeton University Press.
- Funkenstein, A., 1986, *Theology and the Scientific Imagination from the Middle Ages to the Seventeenth Century*, Princeton, Princeton University Press.
- Giannetto, E., 2007, “The Electromagnetic Conception of Nature and the Origins of Quantum Physics”, in *The Foundations of Quantum Mechanics – Historical Analysis and Open Questions*, ed. by C. Garola, A. Rossi, S. Sozzo, Singapore, World Scientific, pp. 178-185.
- Gillispie, C.C., (ed.) 1970-80, *Dictionary of Scientific Biography*, New York, Charles Schreiberner’s Sons.
- Klein, M., 1963, “Einstein’s First Paper on Quanta”, *The Natural Philosopher* 2, pp. 59-86.
- Kragh, H., 1996, “The New Rays and the Failed Anti-Materialistic Revolution”, in *The Emergence of Modern Physics*, Proceedings of a Conference held at Berlin in 1995, ed. by D. Hoffmann, F. Bevilacqua, R. H. Stuewer, Pavia, Università degli Studi di Pavia, pp 403-31.
- Kuhn, T.S., 1987, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912* (with a new Afterword), Chicago and London, The University of Chicago Press.
- Lacki, J., 2007, “Les Principes de la Mécanique de Heinrich Hertz: une prelude à l’axiomatique”, in J-C. Pont, L. Freland, F. Padovani, L. Slavinskaia (eds.), 2007, pp. 241-62.
- Larmor, J., 1894, “A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 185, pp. 719-822.
- , 1895, “A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium – Part II”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 186, pp. 695-742.

- , 1897, “A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium – Part III: Relations with Material Media”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 190, pp. 205-300.
- , 1900, *Aether and Matter*, Cambridge, Cambridge University Press.
- , 1902, “On the Application of the Method of Entropy to Radiant Energy”, *British Association for the Advancement of Science, Report 1902*, p. 546.
- , 1909, “The Statistical and Thermodynamical Relations of Radiant Energy”, *Proceedings of the Royal Society*, 83, pp. 82-95.
- Maxwell, J.C., 1872, *Theory of Heat*, London, Longmans, Green, and Co.
- , 1885 (8th ed.), *Theory of Heat*, London, Longmans, Green and Co.
- McCormach, R., 1967, “J.J. Thomson and the Structure of Light”, *British Journal for the History of Science*, 3, pp. 362-87.
- McCormach, R., & Jungnickel, C., 1986, *Intellectual Mastery of Nature*, 2 vols., Chicago/London, The University of Chicago Press.
- McGuinness, B. (ed.), 1974, *Ludwig Boltzmann - Theoretical Physics and Philosophical Problems*, Dordrecht/Boston, D. Reidel Publishing Company.
- Merz, J.T., 1912, *A History of European Thought in the Nineteenth Century*, Edinburgh/ London, Blackwood and Sons.
- Miller, A.I., 1984, *Imagery in Scientific Thought – Creating 20th-Century Physics*, Boston/Basel/Stuttgart, Birkhäuser.
- Millikan, R.A., 1917, *The Electron*, Chicago, The University of Chicago Press.
- , 1924, “The Electron and the Light-Quant from the Experimental Point of View”, Nobel Lecture, in *Nobel Lectures, Physics 1922-1941*, Amsterdam, Elsevier Publishing Company, 1965, pp. 54-66.
- Navarro, J., 2005, “J.J. Thomson on the Nature of Matter: Corpuscles and the Continuum”, *Centaurus*, 47, 4, pp. 259-82.

- Norton, J.D., 2006, “Atoms, Entropy, Quanta: Einstein’s Miraculous Argument of 1905”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 37, pp. 71-100.
- Planck, M., 1880, Über Gleichgewichtszustände Isotroper Körper in verschiedenen Temperaturen, München, Theodor Ackermann.
- , 1882, “Verdampfen, Schmelzen und Sublimieren”, *Annalen der Physik und Chemie*, 15, pp. 446-75.
- , 1910a, “Zur Theorie der Wärmestrahlung”, *Annalen der Physik* 31, pp. 758-68.
- , 1910b, *Acht Vorlesungen über theoretische Physik*, Hirzel, Leipzig; engl. trans. in Planck, M., 1915, *Eight Lectures on Theoretical Physics*, New York, Columbia University Press; reprinted in Planck, M., 1998, *Eight Lectures on Theoretical Physics*, New York, Dover.
- , 1911, “Énergie et température”, Communication faite à la Société française de Physique – séance du 3 février 1911, *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 1, 1, pp. 345-59.
- , 1913, *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*, (Zweite Auflage), Leipzig, Barth; engl.trans. in Planck M. 1915, *The Theory of Heat Radiation*, Blakinston’s Son & Co., Philadelphia.
- Poynting, J.H., 1885, “On the Connection between Electric Current and the Electric and Magnetic Inductions in the Surrounding Field”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 176, pp. 277-306.
- Renn, J. (ed.), 2006a, *The Genesis of General Relativity*, Dordrecht, Springer.
- , 2006b, “Classical Physics in Disarray”, in Renn J. (ed.) 2006a, Vol. 1, pp. 21-80.
- Renn, J., & Rauchhaupt, U. von, 2005, “In the Laboratory of Knowledge”, in *Albert Einstein chief engineer of the universe – One hundred authors for Einstein*, ed. by J. Renn, Berlin, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, and Max Planck Institute for the History of Science.

- Rogers, H.J. (ed.), 1905, *Congress of Arts and Science, St. Louis 1904*, vol. I, Boston and New York, Houghton, Mifflin and C.
- Stachel, J., 2006, “The First Two Acts”, in Renn J. (ed.) 2006a, Vol. 1, pp. 81-111.
- Stuewer, R.H., 2006, “Einstein’s Revolutionary Light-Quantum Hypothesis”, *Acta Physica Polonica*, 37, B 3, pp. 543-58.
- Tarsitani, C., 1983, *Il dilemma onda-corpusco*, Torino, Loescher.
- Thomson, J.J., 1891, “On the Illustration of the Properties of the Electric Field by Means of Tubes of Electrostatic Induction”, *Philosophical Magazine*, 31, pp. 150-171.
- , 1893, *Recent Researches in Electricity and Magnetism*, Oxford, Clarendon Press.
- Thomson, J.J., 1904, *Electricity and Matter*, New Haven, Yale University Press.
- Wheaton, B.R., 1983, *The Tiger and the Shark*, Cambridge/New York/Port Chester, Cambridge University Press.

Kuhn: l'esperimento mentale fra scienza normale e scienza rivoluzionaria

Marco Buzzoni
Università di Macerata
buzzoni@unimc.it

1. L'esperimento mentale fra empirismo e platonismo

Negli ultimi vent'anni la letteratura epistemologica sull'esperimento mentale nelle scienze naturali s'è moltiplicata rapidamente. Nonostante le numerose e divergenti interpretazioni via via prospettate, fra gli autori è rimasta un'unanimità sostanziale nell'indicare ove risieda il problema fondamentale che deve affrontare ogni ricerca intorno allo statuto epistemologico degli esperimenti mentali: poiché un esperimento mentale, a differenza d'un esperimento reale, non si basa su alcun materiale nuovo, ricavato dall'esperienza, come può condurre a conclusioni inaspettate, che talvolta possono mostrare l'insostenibilità di teorie empiriche anche ben confermate? O, per riformulare la stessa domanda più brevemente, com'è possibile che inferenze tratte nella sfera del solo pensiero possano, in modo analogo a quanto accade nell'esperimento reale, dire qualcosa sulla realtà empirica?

Le due più diffuse risposte a questa domanda sono quella empiristica e quella razionalistico-platonica. La prima risale a Ernst Mach, il quale pose in luce la somiglianza fondamentale fra l'esperimento scientifico reale e quello mentale, e cioè il «metodo della variazione» (*Methode der Variation*): così come in un esperimento reale sono variate delle circostanze naturali, analogamente, in un esperimento mentale, sono variate mentalmente delle rappresentazioni, per esaminare quali conseguenze ne discendano (cfr. Mach, 1905a, 1905b, 1905c, 1883). Ora, questa somiglianza fra esperimenti reali ed esperimenti mentali dipende secondo Mach dal fatto che questi ultimi presuppongono di aver già fatto delle esperienze, cioè di

Marco Buzzoni, "Kuhn: l'esperimento mentale fra scienza normale e scienza rivoluzionaria", in Isabella Tassani (a cura di), *Oltre la fisica normale. Interpretazioni alternative e teorie non standard nella fisica moderna*, pp. 53-67.

© 2013 Isonomia, Rivista online di Filosofia – Epistemologica – ISSN 2037-4348
Università degli Studi di Urbino Carlo Bo
<http://isonomia.uniurb.it/epistemologica>

avere già eseguito degli esperimenti reali, magari anche soltanto a livello del senso comune. Il gioco della fantasia – nota Mach – può propriamente iniziare soltanto quando l'esperienza fisica è già sufficientemente ricca (cfr. Mach, 1905a, 187-188).

Dal punto di vista radicalmente empiristico di Mach, quindi, l'esperimento mentale deve necessariamente attingere da un precedente patrimonio di esperienze, che non soltanto consente di spiegare come l'esperimento mentale possa produrre nuove conoscenze senza apparentemente ricavarle dall'esperienza, ma anche contiene sia i fondamenti della sua validità sia, eventualmente, le ragioni delle sue lacune o della sua erroneità. In questo modo, Mach delineò quella che rimarrà la tesi tipicamente empiristica circa la natura e la funzione dell'esperimento mentale. Questo mobilita conoscenze e abilità acquisite dallo sperimentatore nella sua esperienza precedente, e poiché in questo modo l'esperimento mentale mette a nostra disposizione un sapere che prima era soltanto implicito, è corretto affermare che esso amplia effettivamente il nostro sapere e contribuisce in modo significativo al suo progresso¹.

Ben lontana da ogni variante empiristica è invece la concezione platonistica di Brown (cfr. per es. Brown, 1986, 1991a, 1992b). Secondo questo autore, anche se la maggior parte della conoscenza scientifica dev'essere spiegata secondo la consueta linea empiristica, vi sono tuttavia in fisica alcune conoscenze *a priori*, fondate su di una «percezione non sensibile di oggetti che esistono in modo indipendente» (Brown, 1991a, 86-87), e precisamente le conoscenze fornite da una specie particolare di esperimenti mentali, cui egli dà il nome di «esperimenti mentali platonici» (*platonian thought experiments*) e che dovrebbero rendere possibile

¹ L'idea fondamentale della concezione di Mach degli esperimenti mentali è stata ripresa in seguito nelle forme più diverse da moltissimi autori. Limitandomi alle linee principali di sviluppo dell'idea machiana, essa è stata anzitutto ripresa da Sorensen (1992) e da Norton (1991 e 1996), il primo accentuando il naturalismo naturalmente connesso all'empirismo machiano e sfumando la distinzione fra esperimenti reali e mentali sino a renderla mera differenza di grado, il secondo invece cercando di recuperare questa distinzione facendo leva su quella fra momento logico-analitico e momento empirico propria della tradizione dell'empirismo logico. L'intuizione machiana è stata poi riproposta da Mišćević (1992) e Nersessian (1993) dal punto di vista della teoria dei modelli mentali: ragionare mediante un esperimento mentale comporterebbe la costruzione e la derivazione di inferenze da una simulazione mentale. Nella prospettiva dell'epistemologia evoluzionistica, infine, la tesi è ripresa, oltre che dallo stesso Sorensen, da Genz (1999), secondo il quale i presupposti che entrano in un esperimento mentale sono stati impressi nella nostra mente dall'evoluzione.

l'intuizione diretta di leggi di natura, che esistono in modo indipendente dai singoli e concreti soggetti conoscenti:

Un *esperimento mentale platonico* è un singolo esperimento mentale che distrugge una teoria precedente o attuale e simultaneamente ne genera una nuova; esso è *a priori* per il fatto di non basarsi su nuova evidenza empirica, né esso è derivato in modo puramente logico da dati precedenti; ed esso rappresenta un progresso per il fatto che la teoria che ne risulta è migliore della teoria precedente (Brown, 1991a, 77).

Nel caso degli esperimenti mentali platonici, otteniamo delle conoscenze nuove, che costituiscono spesso un importante progresso rispetto al passato, «senza input empirico *nuovo*, e forse senza nessun input empirico» (Brown, 1993a, 271; cfr. anche Brown, 1986, 12-13 e Brown 1991b, 127). Gli esperimenti mentali di tipo platonico consistono in un'intuizione diretta da parte dello scienziato, simile a quella mediante cui, secondo Amstrong (1983), s'intuiscono le leggi di natura entro casi reali particolari:

Questa conoscenza *a priori* è ottenuta mediante una sorta di percezione delle leggi naturali rilevanti, [...] interpretate realisticamente. Proprio come la mente matematica può afferrare (alcuni) insiemi astratti, così la mente scientifica può afferrare (alcune) delle entità astratte come le leggi naturali (Brown 1991a, ix).

2. Oltre la distinzione analitico-sintetico: esperimento mentale e principio di non contraddizione in Kuhn

Ora, col saggio *A Function for Thought Experiments* (1964), Thomas Kuhn non s'è soltanto di fatto posto all'origine dell'interpretazione «sociologico-costruttivistica» degli esperimenti mentali (cfr. soprattutto Kuhn, 1964, ma si vedano anche i cenni contenuti in Kuhn, 1962, 88, trad. it. 115), ma al tempo stesso, e in certo senso *ante litteram*, ha cercato di porsi al di qua della contrapposizione fra concezione empiristica e concezione razionalistico-platonica degli esperimenti mentali, anche se, come vedremo, non si può dire che vi sia davvero riuscito.

Secondo la concezione degli esperimenti mentali che Kuhn definisce «tradizionale» – senza tuttavia precisare gli autori a cui questa concezione dovrebbe essere attribuita –, gli esperimenti mentali hanno il compito di eliminare delle confusioni o delle inconsistenze concettuali, cosa che concerne la coerenza dell'apparato concettuale usato dallo scienziato, ma non la natura in se stessa, e non richiede quindi conoscenze empiriche nuove:

Sulla base di quest'analisi, la funzione dell'esperimento mentale consiste nell'aiutare ad eliminare una confusione precedente, costringendo lo scienziato a riconoscere delle contraddizioni sin dal principio inerenti al suo modo di pensare. A differenza della scoperta di nuova conoscenza, l'eliminazione d'una confusione esistente non sembra richiedere dati empirici aggiuntivi. Né è necessario che la situazione immaginata sia tale da esistere realmente in natura. Al contrario, l'esperimento mentale che ha come unico scopo quello di eliminare una confusione, è sottoposto alla sola condizione di verosimiglianza. La situazione immaginata dev'essere una situazione cui lo scienziato può applicare i suoi concetti nel modo in cui egli li ha normalmente impiegati in precedenza.²

Ora, l'obiezione fondamentale mossa da Kuhn a questa concezione dell'esperimento mentale è che essa presuppone una distinzione fra analitico e sintetico troppo ingenua, trascurando una serie di casi in cui le incongruenze riguardano al tempo stesso l'apparato concettuale e la natura. Almeno certi tipi d'esperimenti mentali non si possono eseguire utilizzando soltanto ed esclusivamente le leggi della logica formale. Per dimostrare questo punto, Kuhn prende le mosse dallo studio di Piaget sull'evoluzione del concetto di velocità nei bambini, il quale aveva mostrato che questi tendono a ritenere più o meno veloci gli oggetti sulla base di criteri percettivi come l'impressione immediata della loro velocità e il fatto di arrivare prima o dopo ad un traguardo dato, e non invece sulla base della lunghezza del tratto percorso o del momento in cui essi hanno iniziato il loro moto.

Analizzando quindi un esperimento mentale di Galileo alla luce di questa tesi di Piaget, Kuhn mostra come l'applicazione alla natura del predicato «più veloce di» possa dar luogo a contraddizioni che spingono verso una distinzione concettuale capace di rimuovere la contraddizione. L'esperimento galileiano in questione, che prepara quello più noto che abbiamo visto in precedenza, riguarda la domanda se, prescindendo da ogni attrito, sia più veloce la sfera che scende lungo un piano inclinato oppure quella che scende in caduta libera lungo un percorso pari al dislivello

² Kuhn (1964, 242, trad. it. 263). Come abbiamo detto, Kuhn non precisa gli autori cui questa concezione dovrebbe essere attribuita, ma si può congetturare che egli si riferisca alle numerose, ma occasionali affermazioni che a proposito degli esperimenti mentali si trovano negli empiristi logici (soprattutto in Hempel, 1965) e negli scritti dei filosofi del linguaggio ordinario. Kuhn ha forse presente alla mente anche l'interpretazione popperiana degli esperimenti mentali: anche se Popper accenna alla capacità degli esperimenti mentali di far emergere possibilità trascurate, egli insiste soprattutto sull'importanza d'un «uso critico» degli esperimenti mentali, per portare alla luce le contraddizioni d'una teoria (cfr. Popper, 1959, App. XI). Per quanto concerne la letteratura successiva, possiamo per esempio ricondurre alla concezione «tradizionale» cui allude Kuhn la concezione di Sorensen (1992, 5-6), e quella di Bunzl (1996, 233).

superato dal piano inclinato. Galileo mostra che, dal punto di vista aristotelico, si giunge a risposte fra loro contraddittorie. Più precisamente, secondo Kuhn, ciò è prodotto dal fatto che la nozione aristotelica di velocità confonde la velocità media con la velocità istantanea. Il punto essenziale è che, se partendo dal concetto che un oggetto è più veloce se percorre lo stesso tratto in tempo minore, si giunge in realtà a risposte fra loro incoerenti, ma quest'incoerenza è diversa da quella meramente logica (come, poniamo, quella di «quadrato rotondo»):

Il concetto di velocità di Aristotele – questa è la diagnosi di Kuhn –, con i suoi due criteri simultanei, può essere applicato senza difficoltà alla maggior parte dei moti che vediamo intorno a noi. I problemi sorgono soltanto per quella classe di moti, anch'essi piuttosto rari, in cui il criterio della velocità istantanea e il criterio della velocità media conducono a risposte contraddittorie nelle applicazioni qualitative. In entrambi i casi i concetti sono contraddittori solo nel senso che l'individuo che li usa corre il rischio di contraddirsi. Egli può cioè trovarsi in una situazione in cui può essere costretto a fornire risposte incompatibili all'unica e stessa domanda.³

Fu dunque «la natura piuttosto che la sola logica» a essere responsabile delle difficoltà in cui s'imbatté la fisica aristotelica e che furono sottolineate dall'esperimento mentale con cui Galileo mostrava la mancata distinzione fra velocità media e velocità istantanea. Di per sé preso, il concetto aristotelico di velocità non era contraddittorio. In un mondo diverso, in cui tutti i corpi si muovessero di moto uniforme, lo scienziato aristotelico potrebbe applicare i suoi concetti senza tema di vedere mai insorgere una contraddizione, poiché in questo mondo velocità media e velocità istantanea coinciderebbero sempre.

Nel nostro mondo, invece, data la nostra esperienza più ampia e un apparato concettuale più ricco (ciò che per Kuhn significa naturalmente: dal punto di vista del nostro paradigma), diremmo probabilmente che, coscientemente o incoscientemente, Aristotele aveva incorporato nel suo concetto di velocità l'aspettazione che nel suo mondo vi fossero soltanto moti uniformi (Kuhn, 1964, 255, tr. it. 278). I difetti del concetto aristotelico di velocità, scrive Kuhn,

non stanno nella sua consistenza logica, ma nella sua incapacità ad adattarsi a tutta la struttura fine del mondo cui ci si aspettava che si applicasse. Questo è il motivo per cui imparare a riconoscere i suoi difetti significò necessariamente

³ Kuhn (1964, 254, trad. it. 276-7). Per alcune analisi dettagliate dell'esempio kuhniano si vedano: Cargile (1987); Sorensen (1992, 111-131); Humphreys (1993).

imparare qualcosa sia sul mondo sia sul concetto (Kuhn, 1964, 258, trad. it. 281; cfr. anche 261, trad. it. 284).

Esperimento mentale, crisi e rivoluzione scientifica sono concetti strettamente correlati. In una rivoluzione scientifica alcuni dati, prima trascurati dallo scienziato, vengono posti al centro dell'attenzione e la riconcettualizzazione rivoluzionaria «consente di vederli in modo nuovo». Gli esperimenti mentali non rivelano semplicemente delle contraddizioni o delle confusioni concettuali, ma «promuovono una riforma concettuale fondamentale», una «riorganizzazione concettuale», che può togliere contraddizioni o paradossi relativi ad un paradigma soltanto mediante un implicito riferimento ontologico (cfr. Kuhn, 1964, 263, trad. it. 287-288).

Qui si scorge bene come la *pointe* dell'analisi kuhniana consiste nel fatto di cercare di porsi al di qua della contrapposizione fra empirismo e razionalismo e, così facendo, essa si pone anche, *ante litteram*, al di qua della contrapposizione fra concezione empiristica e concezione razionalistico-platonica degli esperimenti mentali. Secondo Kuhn, non s'apprendono mai dei puri concetti o dei puri dati empirici, ma sempre e soltanto concetti e fatti insieme: nel mondo definito dal paradigma aristotelico, il concetto aristotelico di velocità «funzionava in parte come una legge di natura» (Kuhn, 1964, 255, trad. it. 278) e, più in generale, i concetti mostrano una «inestricabile mescolanza» di definizioni e di leggi (cfr. Kuhn, 1964, 258, trad. it. 282). Mostrando che è impossibile applicare contemporaneamente due concetti alla stessa realtà, l'esperimento mentale ci insegna al tempo stesso qualcosa circa il nostro apparato concettuale e circa il mondo:

La radice della difficoltà è la nostra assunzione che, poiché poggiano esclusivamente su dati ben noti, gli esperimenti mentali non possono insegnare nulla del mondo. Benché il vocabolario gnoseologico contemporaneo non ci fornisca dei modi di esprimerci veramente utili, intendo ora sostenere che *la maggior parte delle persone impara al tempo stesso qualcosa sui loro concetti sul mondo*. Nell'imparare qualcosa sul concetto di velocità, i lettori di Galileo imparano anche qualcosa su come si muovono i corpi. Ciò che accade loro è molto simile a ciò che accade a chi, come Lavoisier, deve assimilare il risultato d'una nuova, inattesa scoperta sperimentale (Kuhn, 1964, 253, trad. it. 276; corsivo mio).

Da questo punto di vista, la decisione a fondamento dell'uso di un certo apparato concettuale (o «paradigma») non è secondo Kuhn sufficiente per attribuire alle proposizioni che possono essere formulate mediante quest'apparato uno statuto meramente analitico: queste proposizioni valgono per un determinato mondo (per esempio solo per un mondo in cui

tutti i moti sono uniformi), e non per tutti i mondi possibili. D'altro canto, tuttavia, sia la decisione d'usare un certo paradigma sia la decisione che dovrà di volta in volta essere presa in ogni sua nuova applicazione alla natura impediscono di ascrivere alle proposizioni dettate da un certo paradigma uno statuto meramente sintetico. Un'importante conclusione dell'analisi kuhniana degli esperimenti mentali consiste dunque nel fatto che la vecchia dicotomia fra enunciati analitici e sintetici è insufficiente a comprendere la dinamica scientifica. I significati empirici, infatti, vengono appresi e, ancor prima, tracciati soltanto mediante il loro uso, cioè mediante la loro concreta applicazione alla realtà.

Ora, questa problematizzazione della dicotomia analitico-sintetico ha immediate conseguenze per il modo di concepire il rapporto fra esperimenti mentali ed esperimenti reali. E' evidente, infatti, che la tesi fondamentale di Kuhn, secondo cui, con gli esperimenti mentali, impariamo sempre al tempo stesso qualcosa sui nostri concetti e sulla realtà, pone un nesso intrinseco fra esperimento mentale ed esperimento reale. Poiché gli esperimenti mentali (o, come Kuhn più precisamente si esprime, gli esperimenti mentali simili a quelli sin qui indagati) non servono a mostrare una semplice inconsistenza o una confusione del nostro apparato concettuale, ma piuttosto un'inconsistenza fra quest'ultimo e delle esperienze precedentemente non assimilate, storicamente «il loro ruolo è strettamente simile a quello, duplice, svolto dagli esperimenti reali e dalle reali osservazioni di laboratorio» (Kuhn, 1964, 261, trad. it. 285).

Da questo punto di vista, a ben vedere, si può affermare che – sia pur fra molte incertezze ed ambiguità – Kuhn ha forse intravisto il fondamento operativo dell'uso empirico del principio di non contraddizione. La scoperta di contraddizioni e di ambiguità resa possibile dall'esperimento mentale di tipo empirico, in effetti, può aver luogo soltanto nel corso di un'applicazione effettiva (o, direi con più precisione, operativa e sperimentale) di certi sistemi teorici alla realtà. Ciò implica il rifiuto sia della concezione empiristica sia, soprattutto, di quella formalistica del principio di contraddizione, perché ciò che si può pensare coerentemente (della realtà empirica) e ciò che si può fare sono due concetti che non possono essere separati l'uno dall'altro. Contro una concezione empiristica del principio di non contraddizione, che vorrebbe rinchiuderlo nel campo delle mere verità sintetiche, Kuhn fa implicitamente valere la possibilità di riconcettualizzare il reale alla luce di nuovi paradigmi. Contro una concezione formalistica del principio di non contraddizione, che vorrebbe rinchiuderlo nel campo delle mere verità analitiche, l'interpretazione di Kuhn degli esperimenti mentali mostra indirettamente che il criterio

mediante cui, in un esperimento mentale, viene controllata la coerenza d'un sistema teorico rinvia necessariamente ad un riferimento al mondo reale, e più precisamente al modo in cui si svolgono i suoi processi sia quando interferiamo con essi sia quando ci asteniamo dal farlo⁴.

Il motivo di vero della concezione kuhniana consiste quindi nel fatto che, anche se lo scopo di eliminare ambiguità e contraddizioni può certamente essere considerato come un carattere fondamentale dell'esperimento mentale in quanto tale – non importa cioè se filosofico, logico-matematico o empirico –, esso non costituisce un carattere distintivo degli esperimenti mentali empirici. Più precisamente, la concezione «tradizionale» (per continuare a usare l'espressione kuhniana) degli esperimenti mentali trascura completamente la condizione fondamentale di possibilità degli esperimenti mentali *di tipo empirico*. Secondo questa condizione, le presupposizioni implicate nella formulazione della domanda sperimentale debbono sempre avere un senso empiricamente controllabile, debbono cioè comportare qualche differenza per la nostra esperienza del mondo reale-sensibile. Ogni mutamento nell'apparato concettuale indotto da un esperimento mentale condurrà sempre, almeno in linea di principio, a nuove esperienze ed osservazioni possibili, a nuove possibilità d'intervento tecnico-operativo sul reale.

La concezione «tradizionale» non sarebbe più convincente, se fosse formulata dicendo che l'esperimento mentale non svolge un ruolo anche nell'esecuzione dell'esperimento, ma soltanto nella sua progettazione, e precisamente rispetto alla sua coerenza. In realtà, anche questa formulazione conduce di nuovo a separare il momento teorico-anticipatorio (proprio in effetti dell'esperimento mentale) e quello del controllo mediante il funzionamento tecnico d'un apparato sperimentale. L'esperimento mentale non è interessato alla coerenza della progettazione dell'esperimento in quanto tale, ma s'interessa di questa soltanto nella misura in cui una progettazione non coerente dell'esperimento lo renderebbe semplicemente impossibile. La coerenza (o la contraddittorietà), nel caso della conoscenza empirica, non è questione né puramente trascendentale né puramente logica, perché dipende anche sempre (benché non in modo esclusivo) dal modo in cui possiamo

⁴ È perciò sia scorretto storiograficamente sia sterile teoreticamente ridurre le inconsistenze che secondo Kuhn gli esperimenti mentali possono portare alla luce a contraddizioni fra certe affermazioni e i presupposti di queste stesse affermazioni o, per parlare con Kuhn, fra certe affermazioni scientifiche e il paradigma entro cui esse vengono formulate (cfr. Sorensen, 1992, 125). Sorensen cerca d'interpretare in questo modo il testo kuhniano proprio per salvare quella distinzione fra analitico e sintetico che Kuhn ha invece avuto il merito di problematizzare.

agire o non possiamo agire nel mondo reale. Il principio cui è affidata la possibilità di rendere coerenti i nostri concetti rispetto alla loro applicazione alla natura non è un principio autonomo, indipendente, ma deve rimanere connesso all'agire stesso. E in modo analogo, l'agire, se fosse separato da quel principio, non sarebbe un agire capace di generare o giustificare nuova conoscenza.

Da questo punto di vista, le contraddizioni che si possono scoprire o le confusioni che si possono chiarire con un esperimento mentale *empirico* non sono contraddizioni meramente analitiche, logiche o matematiche, cioè contraddizioni che sono già contenute in un ambito simbolico ormai chiuso, di cui s'è escluso in linea di principio ogni possibile smentita da parte di esperienze future. Si tratta invece di contraddizioni che sorgono fra concetti che possono apparire come contraddittori soltanto presupponendo – ma potendo errare in questo presupporre – che certe esperienze abbiano contenuti particolari ben determinati.

3. Esperimento ed esperimento mentale in Kuhn

Ora, fin qui abbiamo seguito Kuhn nel rifiutare tutte le concezioni che tendono a ridurre gli esperimenti mentali a metodi per la scoperta di contraddizioni meramente formali nella rete delle nostre teorie. Dobbiamo adesso chiederci se Kuhn, che ha così indirettamente suggerito un punto di contatto gnoseologicamente decisivo fra esperimento reale ed esperimento mentale, sia stato poi anche in grado di distinguerli. Si tratta cioè di sollevare la seguente domanda: cosa distingue un esperimento mentale da un esperimento reale, se in entrambi i casi non possiamo imparare qualcosa sull'uso dei nostri concetti senza imparare anche qualcosa intorno al mondo?

In verità Kuhn non è in grado di distinguere coerentemente esperimenti reali ed esperimenti mentali. Una prima ragione consiste nel fatto che il riferimento alla natura che egli afferma con decisione per entrambi i tipi di esperimento è direttamente revocata in dubbio dalla sua tesi dell'incommensurabilità. Come abbiamo visto, la funzione degli esperimenti mentali – ed anche il modo in cui apprendiamo mediante esperienze dirette – presuppone necessariamente il riferimento ad una natura cui non possiamo applicare ad arbitrio i nostri concetti. Questo è di per sé perfettamente condivisibile anche dal punto di vista realistico e operazionistico, sia pure di un realismo e di un operazionismo non ingenuo, che riconosce la necessaria funzione della mediazione concettuale. Come abbiamo visto, da un punto di

vista realistico e operazionistico è particolarmente importante la tesi di Kuhn secondo cui i concetti aristotelici non sono di per se stessi contraddittori, ma si mostrano tali soltanto perché, nella loro applicazione al mondo, disponiamo di un paradigma che distingue aspetti del mondo reale che quello aristotelico non distingueva. Con questa tesi, a ben vedere, Kuhn ammette implicitamente che la contraddizione può valere fra due paradigmi unicamente *rispetto ad una medesima realtà*. Soltanto grazie a questo riferimento comune le affermazioni aristoteliche e quelle galileiane possono apparire come contraddittorie, come tali da non poter essere applicate contemporaneamente al mondo reale.

Il problema per Kuhn consiste nel fatto che quest'ordine di considerazioni è in patente contraddizione con la tesi dell'incommensurabilità. Questa contraddizione è particolarmente evidente se ci chiediamo quale sia il fondamento sulla cui base l'esperimento mentale può indurre in qualche modo a un «riorientamento gestaltico», a una riorganizzazione globale di tutti i dati empirici disponibili (che è la risposta di Kuhn al problema fondamentale concernente gli esperimenti mentali: come questi possano insegnarci qualcosa intorno al mondo senza ricorrere a nuove esperienze). Il concetto di riorientamento gestaltico, com'è noto, rappresenta la metafora kuhniana forse più importante per descrivere il passaggio fra paradigmi incommensurabili successivi, ma non bisogna dimenticare che Kuhn sottolinea con vigore un punto fondamentale rispetto a cui il paragone fra un cambio di paradigmi ed un riorientamento gestaltico viene meno: a differenza d'un riorientamento gestaltico, dove prima e dopo vengono percepite le medesime linee tracciate su un foglio, nel caso d'un cambio paradigmatico non v'è nulla che rimane immutato, non v'è alcun *tertium comparationis* che non sia travolto nel mutamento del modo di percepire, di assumere l'esistenza o di attribuire dei significati a degli oggetti (cfr. Kuhn, 1962, 114-115, trad. it. 142-143).

Ora, come si concilia ciò con la tesi kuhniana secondo cui l'esperimento mentale può togliere delle contraddizioni nelle nostre reti concettuali, riferendosi ad una natura rispetto alla quale soltanto prendono senso queste contraddizioni? Nell'esposizione kuhniana dell'esperimento mentale galileiano, in effetti, non emerge alcuna incommensurabilità fra il punto di vista aristotelico e quello galileiano, anzi la contraddizione che Galileo ricava può valere soltanto a condizione che entrambi i contendenti attribuiscono lo stesso significato ai concetti fondamentali usati nell'esperimento mentale.

In effetti, benché l'epistemologia kuhniana trovi nel concetto d'incommensurabilità il suo centro principale, nondimeno esiste in essa anche una sia pur secondaria tendenza realistica. Questo genera un'oscil-

lazione costante. Per un verso Kuhn afferma che i nostri concetti ci dicono sempre al tempo stesso qualcosa intorno al mondo, per cui il problema della coerenza del *corpus* scientifico si pone soltanto rispetto al modo in cui possiamo agire nel mondo. Per altro verso, invece, questo stesso mondo dipende da un particolare paradigma. Per un verso, Kuhn afferma che i rompicapi sono per la maggior parte direttamente «presentati dalla natura» e che indirettamente tutti «coinvolgono la natura» o che «la natura non può essere costretta in un qualsiasi insieme arbitrario di caselle concettuali» (Kuhn, 1970, 263, trad. it. 348). Per altro verso, in conformità con la tesi dell'incommensurabilità, che segna la tendenza fondamentale della sua epistemologia, egli afferma che il passaggio da un paradigma all'altro non rappresenta alcun progresso rispetto al modo in cui la natura è realmente (cfr. su questo punto Buzzoni, 1986, cap. III, § 3).

Il concetto di una realtà indipendente dai nostri sforzi per conoscerla è indispensabile sia per il concetto di esperimento reale sia per quello di esperimento mentale sia, infine, per comprendere il loro stesso rapporto. Togliendo questo concetto, entrambi i tipi di esperimento divengono incomprensibili e, *a fortiori*, lo diviene il loro rapporto. Nella misura in cui il momento reale viene fagocitato da quello teorico e Kuhn sostiene la tesi della *theory ladenness* in un senso che lo conduce alla tesi dell'incommensurabilità, non si comprende più la capacità degli esperimenti reali di farci conoscere aspetti nuovi del mondo; e in ultima analisi la stessa differenza fra esperimento mentale ed esperimento reale scompare completamente.

Anche se la distinzione fra analitico e sintetico presupposta dal modo tradizionale di concepire il rapporto fra esperimento ed esperimento mentale è insostenibile, ciò non significa ancora che si debba rifiutare *ogni* distinzione fra piano concettuale e piano reale, riducendo questa distinzione all'unidimensionalità del piano sociologico. La tendenza fondamentale dell'epistemologia kuhniana è contrassegnata da questa riduzione al piano sociologico, la quale, se portata alle sue ultime, radicali ma coerenti conclusioni, si risolve nel «programma forte» in sociologia della scienza di Bloor, che pone sullo stesso piano credenze vere e credenze false e secondo il quale nessun tipo di discorso – empirico, logico, matematico, filosofico – può vantare qualche pur relativa autonomia rispetto all'analisi sociologica.

In questo modo, il vero punto di forza dell'interpretazione kuhniana degli esperimenti mentali, che consiste sia nello strettissimo nesso posto fra momento teorico e momento sperimentale sia nel superamento dell'astratta contrapposizione fra giudizi analitici e sintetici, si risolve – già tendenzialmente in Kuhn, e in misura assai maggiore presso i suoi epigoni – in una

interpretazione sociologica degli esperimenti mentali, che, se vuole rimanere coerente, può riconoscere loro soltanto una funzione retorica.

L'elemento più importante d'un esperimento mentale diviene così il suo potere persuasivo, interpretato alla luce del modello di riorientamento gestaltico: questo potere persuasivo deriva per esempio dal fatto di organizzare in modo nuovo e perspicuo delle conoscenze empiriche istintive sino a quel momento non articolate e non esplicitate⁵. Secondo McAllister (1996), che più decisamente s'è mosso in questa direzione, sia gli esperimenti reali sia quelli mentali posseggono un «significato di evidenza» soltanto subordinatamente al fatto di accettare certi presupposti teorici generali, e in entrambi i casi l'evidenza è indotta dallo sforzo di persuasione retorica esercitata dagli scienziati (cfr. McAllister, 1996, 242 e 248). Ogni distinzione fra esperimento reale ed esperimento mentale viene così meno in linea di principio. E in effetti, se l'esperimento reale può persuadere soltanto a condizione di convertire l'interlocutore a certi presupposti teorici di fondo, non v'è certo ragione di principio per negare che l'esperimento mentale possa svolgere la stessa funzione e raggiungere la medesima efficacia persuasiva dell'esperimento reale⁶.

Ciò che in queste analisi è andato sostanzialmente smarrito è il significato tecnico della riproducibilità sperimentale, che distingue il linea di principio il discorso di tipo empirico da altri tipi di discorso e fa sì che l'esperimento mentale non possa soddisfare la pretesa d'un potere autonomo di conferma senza subordinarla in ultima istanza ad un controllo finale da parte dell'esperimento reale.

⁵ Cfr. per es. Gendler (1998, 412 e 420); cfr. anche Gendler (2000, 1, 12 e 153-154), dove la tesi kuhniana è ripresa dal punto di vista della riconsiderazione dei casi eccezionali entro nuove strutture concettuali. Fra coloro che hanno ripreso la tesi kuhniana circa la capacità degli esperimenti mentali di mettere in rilievo i limiti d'un vecchio modo di categorizzare il mondo e al tempo stesso di prospettare nuove strutture concettuali per comprenderlo, ci limitiamo a ricordare ancora Poser (1984), che pone un particolare accento sulle implicazioni ontologiche della tesi kuhniana. Per una prospettiva simile cfr. infine Arthur (1999).

⁶ In realtà McAllister (1996) riconosce implicitamente che il criterio ultimo d'ogni discorso empirico può essere soltanto l'esperimento reale, poiché sostiene che l'esperimento mentale viene offerto in mancanza di meglio, e cioè tutte le volte che gli esperimenti concreti hanno il difetto di presentare delle esecuzioni non perfettamente riproducibili, come per esempio nel caso galileiano della caduta d'un oggetto dall'albero d'una nave in movimento o da una torre (cfr. McAllister, 1996, 245-248). Ma ciò non è del tutto coerente con la sua tesi di fondo, secondo cui la forza persuasiva d'ogni esperimento dipende dall'adesione a certi presupposti teorici generali.

Riferimenti bibliografici

- Amstrong, D. M., 1983, "What is a Law of Nature?", Cambridge, Cambridge University Press.
- Arthur, R., 1999, "On thought experiments as a priori science", in *International Studies in the Philosophy of Science*, 13, pp. 215-229.
- Brown, J. R., 1986, "Thought Experiments Since the Scientific Revolution", in *International Studies in the Philosophy of Science*, 1, pp. 1-14.
- , 1991a, *Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences*, London and New York, Routledge.
- , 1991b, "Thought Experiments: A Platonic Account", in Horowitz and Massey (eds.) 1991, pp. 119-128.
- Bunzl, M., 1996, "The Logic of Thought Experiments", in *Synthese*, 106, pp. 227-240.
- Buzzoni, M., 1986, *Semantica, ontologia ed ermeneutica della conoscenza scientifica. Saggio su T.S. Kuhn*, Milano, Angeli.
- Cargile, J., 1987, "Definitions and Counterexamples", in *Philosophy*, 62, pp. 179-193.
- Gendler, T. S., 1998, "Galileo and the Indispensability of Scientific Thought Experiment", in *The British Journal for the Philosophy of Science*, 49, pp. 397-424.
- Gendler, T. S., 2000, *Thought Experiment. On the Power and Limits of Imaginary Cases*, New York and London, Garland.
- Genz, H. 1999, *Gedanken-experimente*, Weinheim, Wiley-VCH.
- Hempel, C. G., 1965, *Aspects of Scientific Explanation*, New York, Free Press.
- Horowitz, T., and Massey, G. J., (eds.) 1991, *Thought Experiments in Science and Philosophy*, Savage (MD), Rowman & Littlefield.

- Hull, D., Forbes, M. and Okruhlik, K., (eds.) 1992, *PSA 1992*, Vol. 1, East Lansing, MI, Philosophy of Science Association.
- Hull, D., Forbes, M. and Okruhlik, K., (eds.) 1993, *PSA 1992*, Vol. 2, East Lansing, MI, Philosophy of Science Association.
- Humphreys, P., 1993, "Seven Theses on Thought Experiments", in A. J. Earman and G. Massey (eds.), *Philosophical Problems of the Internal and External Worlds: Essays on the Philosophy of Adolf Grünbaum*, Pittsburgh and Konstanz, University of Pittsburgh Press and Universitätsverlag Konstanz, pp. 205-227.
- Kuhn, Th. S., 1962, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, Univ. of Chicago Press; II ed. 1970 (da cui sono tratte le citazioni); trad. it., *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, IV ed., Einaudi, Torino, 1978.
- , 1964, "A Function for Thought Experiments", in R. Taton et I. B. Cohen (dir.), *L'aventure de la science, Mélanges Alexandre Koyré*, vol. II, Paris, Hermann, pp. 307-337; rist. in T.S. Kuhn, *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, Chicago (Ill.), University of Chicago Press, 1977, pp. 240-265 (da cui sono tratte le citazioni).
- , 1970, *Reflections on My Critics*, in Lakatos and Musgrave (eds.) 1970, pp. 231-278, tr. it. 313-365.
- Lakatos, I., and Musgrave, A., (eds.) 1970, *Criticism and the Growth of Knowledge*, Cambridge, Cambridge University Press; tr. it. a cura di G. Giorello, *Critica e crescita della conoscenza*, Milano, Feltrinelli, 1976.
- Mach, E., 1883, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig, Brockhaus, cit. dalla IX ed., Leipzig 1933; tr. it., *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, Torino, Boringhieri, 1992.
- , 1905a, "Über Gedankenexperimente", in *Erkenntnis und Irrtum*, Leipzig. Barth, 1905, V ed. 1926 (da cui sono tratte le citazioni), pp. 183-200; tr. it., "Sugli esperimenti mentali", in *Conoscenza ed errore*, Einaudi, Torino, 1982, pp. 180-196.

- , 1905b, “Das physische Experiment und dessen Leitmotive”, in *Erkenntnis und Irrtum*, Leipzig, Barth, 1905, V ed. 1926 (da cui sono tratte le citazioni), pp. 201-219; tr. it., “L’esperienza fisica e i suoi motivi guida”, in *Conoscenza ed errore*, Torino, Einaudi, 1982, pp. 197-215.
- , 1905c, “Die Hypothese”, in *Erkenntnis und Irrtum*, Barth, Leipzig, 1905, V ed. 1926 (da cui sono tratte le citazioni), pp. 232-250; tr. it., *L’ipotesi*, in *Conoscenza ed errore*, Torino, Einaudi, 1982, pp. 228-245.
- McAllister, J., 1996, “The Evidential Significance of Thought Experiments in Science”, in *Studies in History and Philosophy of Science*, 27, pp. 233-250.
- Miščević, N., 1992, “Mental Models and Thought Experiments”, in *International Studies in the Philosophy of Science*, 6, pp. 215-226.
- Nersessian, N., 1993, “In the Theoretician’s Laboratory: Thought Experimenting as Mental Modeling”, in Hull et al. (eds.) 1993, pp. 291-301.
- Norton, J., 1991, “Thought Experiments in Einstein’s Work”, in Horowitz and Massey (eds.) 1991, pp. 129-148.
- , 1996, “Are Thought Experiments Just What You Thought?”, in *Canadian Journal of Philosophy*, 26, pp. 333-366.
- Popper, K. R., 1959, *The Logic of Scientific Discovery*, London, Hutchinson; II ed., 1968 (da cui sono tratte le citazioni); trad. it., *Logica della scoperta scientifica*, Torino, Einaudi, 1970.
- Poser, H., 1984, “Wovon handelt ein Gedankenexperiment?”, in H. P. Poser und H.-W. Schütt (hrsg.), *Ontologie und Wissenschaft. Philosophische und Wissenschaftstheoretische Untersuchungen zur Frage der Objektkonstitution*, Berlin, Technische Universität Berlin, 19, pp. 181-198.
- Sorensen, Roy A., 1992, *Thought Experiments*, Oxford/New York, Oxford University Press.

Di due analoghi dilemmi: forza di gravità e correlazioni a distanza

Claudio Calosi
Università di Urbino
claudio.calosi@uniurb.it

Vincenzo Fano
Università di Urbino
vincenzo.fano@uniurb.it

1. Introduzione

McMullin (1989) nota che esiste una analogia tra quello che egli chiama “*Il Dilemma della Gravità*” e il “*Dilemma Quantistico*”. Infatti scrive:

Può essere istruttivo raccontare molto brevemente in chiusura [del volume Cushing e McMullin, 1989] alcune risposte dei filosofi naturali al dilemma della gravità. Tali risposte si raggruppano all'incirca in tre classi [...] Non è difficile trovare analogie fra queste alternative e le risposte al dilemma quantistico (McMullin, 1989, 294-295, traduzione nostra).

Per dirla in breve, i due dilemmi consisterebbero nel trovare una soddisfacente spiegazione scientifica della natura dell'attrazione universale da una parte, e delle correlazioni tra sistemi fisici spazialmente separati predette dalla meccanica quantistica e sperimentalmente confermate, dall'altra. Quanto proposto non viene tuttavia sviluppato¹, né nel testo, né, a nostra conoscenza, altrove in letteratura. Scopo di questo lavoro è dunque delineare tale analogia e valutarne la portata e i limiti.

¹ Un accenno si trova in Fano (2005, 182-83).

Come si nota dalla citazione che abbiamo riportato, McMullin individua come base dell'analogia tra i due dilemmi le varie risposte che per questi sono state avanzate. In generale quando una nuova teoria fisica con grande potere esplicativo pare far ricorso in qualche modo a nozioni che sembrano esse stesse richiedere una spiegazione, quali quelle di attrazione e correlazione a distanza, si possono riscontrare almeno tre atteggiamenti generali. Chiamiamo questi tre atteggiamenti, che corrispondono a tre possibili risposte ai dilemmi, *Strumentalismo*, *Realismo* e *Incompletismo* rispettivamente. Vediamo come possono essere caratterizzati brevemente in termini generali.

Lo *Strumentalismo* prende le mosse dalla constatazione che una spiegazione scientifica delle nozioni in questione non è possibile. Questo tuttavia costituirebbe un problema solo se venisse richiesto alle teorie fisiche di essere una spiegazione del mondo piuttosto che una sua semplice descrizione. In altre parole, il riconoscimento dell'impossibilità di una spiegazione scientifica delle nozioni cruciali delle nuove teorie fisiche dovrebbe in qualche modo favorire un atteggiamento antirealista, strumentalista nei confronti di queste ultime. Infatti, solo una volta abbandonato il desiderio tipicamente realista di una spiegazione del mondo da parte delle nostre teorie, si può convivere serenamente col fatto che talvolta tale spiegazione non sia di principio possibile.

Insomma, non è sempre un problema che non si trovi una spiegazione delle nozioni cruciali di una teoria fisica perché le teorie non spiegano, ma descrivono.

Dall'altra parte dello spettro, il *Realismo* propone di considerare le implicazioni delle teorie fisiche *at face value*. Alcune nozioni che svolgono un ruolo esplicativo all'interno delle nostre teorie fisiche, come l'azione gravitazionale o le correlazioni a distanza, devono essere considerate come *primitive*. Non esisterebbe nessun altro concetto nei termini del quale analizzare o spiegare tali nozioni. Questa analisi epistemologica avrebbe una precisa controparte ontologica. Le nozioni in questione, infatti, dovrebbero essere considerate individui o proprietà (monadiche o *n*-adiche) *irriducibili*, e in quanto tali appartenenti alla base di sopravvenienza di ogni nostra spiegazione scientifica condotta all'interno della teoria in questione.

Insomma, non è sempre un problema che non si trovi una spiegazione delle nozioni cruciali di una teoria fisica perché alcune nozioni non devono essere spiegate, esse servono a spiegare.

Presumibilmente a metà fra queste due impostazioni si colloca l'*Incompletismo*. L'impossibilità di avere una spiegazione soddisfacente nei termini della teoria non implica di per sé una rinuncia a una spiegazione *tout*

court. Significa piuttosto riconoscere che la teoria di partenza, proprio in virtù della sua impossibilità a fornire una spiegazione, è incompleta. Completando la teoria, ricorrendo, per dirla nel modo più generale possibile, a nuove ipotesi, si può (e deve) arrivare a una spiegazione scientifica delle nozioni cruciali.

Insomma, se non si trova una spiegazione delle nozioni cruciali di una teoria fisica nei termini di quella stessa teoria si deve guardare altrove, e completarla in modo che venga ottenuta una spiegazione soddisfacente.

Questa è l'architettura del lavoro. Nella sezione 2 ricostruiremo brevemente le risposte *Strumentalista*, *Realista* e *Incompletista* al *Dilemma della Gravità*. La sezione 3 sarà dedicata al *Dilemma Quantistico*. Costruiremo queste sezioni in modo tale che l'analogia, per così dire, si presenti da sola. Nella sezione 4 considereremo invece alcune obiezioni ai nostri argomenti e tenteremo una valutazione dei limiti, della portata e degli eventuali sviluppi dell'analogia proposta. Si delinea inoltre una valutazione di una eventuale analogia nella *risoluzione* dei due dilemmi.

Qualche parola di cautela è doverosa. Per prima cosa è necessario notare che le soluzioni che si prendono in considerazione non hanno la pretesa di essere né esaustive né esclusive. In secondo luogo il nostro lavoro è un lavoro principalmente teorico. Questo per dire che molte sottigliezze storiche e storiografiche andranno sicuramente perse. Questo comporta inoltre che alcuni aspetti particolari delle posizioni di diversi filosofi e fisici che assoceremo con le diverse soluzioni possano venire in qualche modo trascurati. Non ce ne vogliano storici da una parte e filosofi e fisici dall'altra. Per finire la nostra attenzione è rivolta maggiormente al *Dilemma Quantistico*, per cui solo di quest'ultimo caso si propone un'analisi tecnica più dettagliata.

2. Il Dilemma della Gravità e le Sue Soluzioni

In questa sezione si presentano brevemente il *Dilemma della Gravità* (§2.1) e le sue soluzioni *Strumentalista* (§2.2), *Realista* (§2.3) e *Incompletista* (§2.4). Come si è già accennato nell'introduzione, non ci si soffermerà molto sui dettagli tecnici e non si offrirà una trattazione analitica di questo particolare dilemma, dato che il nostro interesse è, per così dire, spostato verso la meccanica quantistica. Il lettore che fosse interessato a un maggiore dettaglio e a ricostruzioni più analitiche può utilizzare il bel lavoro di Von Lunteren (1991) *Framing Hypothesis*².

² Ringraziamo Dennis Dieks che ci ha fornito questa bella tesi di dottorato.

2.1. Il Dilemma della Gravità

Qualsiasi teoria del moto ha sempre dovuto rendere conto del fatto che i corpi materiali posseggono un peso e tendono a cadere se non sostenuti. La soluzione aristotelica, ad esempio, era stata quella da una parte di associare a ogni corpo materiale una particolare qualità primitiva di tendere verso il proprio luogo naturale e dall'altra sostenere che lo spazio fosse anisotropo.

Soltanto con i *Principia* si arrivò a rimpiazzare completamente questa qualità occulta responsabile di una tendenza centripeta con una attrazione reciproca, o una tendenza all'avvicinamento reciproco di cui sarebbero dotate tutte le particelle materiali dell'universo. Un'idea questa che era già stata proposta, ma che solo con Newton viene sviluppata nel modo corretto. Questa nuova, sensazionale ipotesi, forse tra le testimonianze più alte dell'ingegno e creatività umane, aveva un potere esplicativo mai visto. Newton riuscì a trovare la forma di una legge universale che regola tale attrazione e a mostrare che una forza proporzionale all'inverso del quadrato della distanza implica una traiettoria ellittica per il moto dei pianeti. Numerosi altri fenomeni celesti e terrestri, movimenti dei satelliti, passaggio delle comete, movimenti delle maree, solo per menzionarne alcuni, potevano venire spiegati sulla base della nuova dinamica newtoniana.

Di fronte a questo enorme potere esplicativo non sembrava tuttavia far riscontro una chiara comprensione della natura della nozione centrale della nuova dinamica, cioè quella di gravitazione universale. Una tendenza all'avvicinamento reciproco è forse meno oscura di una tendenza centripeta cui si faceva riferimento prima dei *Principia*? È lo stesso Newton a far trapelare in qualche modo il bisogno e forse la necessità di avere una *spiegazione* dell'attrazione gravitazionale. In una famosa lettera a Bentley del 1692 o 1693 scrive:

Che la gravità sia innata, inerente ed essenziale alla materia, in modo che un corpo possa agire su un altro a distanza e attraverso il vuoto senza la mediazione di null'altro che veicoli la loro forza o azione reciproca, è per me un'assurdità così grande che nessuno che abbia una qualche competenza o capacità di riflettere nella filosofia ritengo potrà mai caderci.³

È dunque lo stesso Newton a riconoscere implicitamente il *Dilemma della Gravità*. La nozione di attrazione gravitazionale ha un potere esplicativo enorme, e tuttavia essa stessa, nei termini in cui compare nei *Principia*, sembra necessitare di una spiegazione, se non si vuole cadere da un lato

³ Newton a Bentley, 25 febbraio 1692/3, <http://www.newtonproject.sussex.ac.uk/view/texts/normalized/THEM00258>. Traduzione nostra.

nell'assurdità, dall'altro nel pericolo di una spiegazione *obscura per obscuriora*.

2.2. Gravità e Strumentalismo

Dunque il *Dilemma della Gravità* nascerebbe in qualche modo dal bisogno di una spiegazione soddisfacente della nozione centrale della nuova dinamica newtoniana, la forza di gravitazione universale. Il primo passo della soluzione *Strumentalista*⁴ è il riconoscimento che una tale spiegazione, nei termini stessi della dinamica newtoniana, è, se non di principio impossibile, almeno molto difficile da formulare. L'argomento a favore di questa conclusione prende le mosse da Newton stesso. Nel libro II dei *Principia* egli infatti dimostra come l'introduzione di un mezzo meccanico il cui moto sia soggetto alle leggi della nuova dinamica e che dovrebbe in qualche modo trasmettere l'azione gravitazionale da un corpo a un altro, finirebbe per disturbare il moto dei pianeti forzandoli a compiere una spirale verso l'interno, a meno di non dotare tale mezzo meccanico di peculiari proprietà⁵. Da qui a sostenere lo *Strumentalismo* il passo non è poi così lungo. Proviamo a delineare un possibile argomento⁶. Supponiamo che si sostenga che lo scopo principale della nuova dinamica newtoniana sia quello di spiegare i moti gravitazionali. Siccome si è appena argomentato che una spiegazione nei termini della nuova dinamica della nozione fondamentale di gravitazione universale non è possibile, si dovrebbe concludere che la teoria in questione presenta una grossa mancanza nelle sue stesse fondamenta. Ma, continua lo *Strumentalista*, la conclusione del precedente argomento a favore di una problematica mancanza nelle fondamenta della teoria fisica, dipende in maniera cruciale dall'accettazione della premessa tipicamente realista che lo scopo delle teorie fisiche è quello di fornire una *spiegazione* del mondo. Se si accetta invece un atteggiamento antirealista secondo cui le teorie fisiche sono solo strumenti predittivi il cui scopo sarebbe quello di *descrivere* i fenomeni piuttosto che spiegarli, l'argomento di cui sopra viene bloccato e la bontà della teoria fisica salvata. In quest'ottica strumentalista, come nota giustamente McMullin (1989: 300), quando Newton propone la legge dell'inverso del quadrato della

⁴E non solo. In effetti questo passo può essere considerato un passo preliminare per tutte le soluzioni, *Strumentalista, Realista e Incompletista*.

⁵Sarà in effetti questo che faranno tutti coloro che sosterranno la tesi dell'*Incompletezza*.

⁶Più che un argomento ben strutturato invitiamo il lettore a considerarlo l'abbozzo di un argomento.

distanza per descrivere l'azione della gravità universale, non c'è nient'altro da dire per il fisico, non c'è alcun bisogno di cercare una ulteriore e nascosta causa dei movimenti. Dunque lo *Strumentalismo* salva la nuova dinamica newtoniana dai pericoli dell'assurdità e dell'oscurità con cui si era chiusa la sezione precedente, indebolendo gli scopi stessi della teoria.

La più chiara presa di posizione strumentalista nei confronti del *Dilemma della Gravità* è forse quella di Berkeley nel *De Motu*, del 1720. Piuttosto che parafrasare dal testo riportiamo un passo in cui quello che in questa sezione è stato messo in luce appare nella maniera più chiara:

Di fatto alla fisica e alla meccanica spetta stabilire non le cause efficienti, ma solo le regole dei fenomeni d'urto o di attrazione e, in una parola, le leggi del moto; attribuire, cioè, su queste basi, ai fenomeni particolari una spiegazione e non una causa efficiente.⁷

2.3. Realismo e Gravità

Si è detto che la soluzione strumentalista consiste in generale nell'ammettere che l'impossibilità di una spiegazione della gravitazione universale non è un problema per la meccanica newtoniana, perché lo scopo delle teorie fisiche non è quello di spiegare ma di descrivere i fenomeni. Un atteggiamento realista deve invece attribuire uno scopo esplicativo alle teorie fisiche. La risposta realista diventa allora in breve che il problema della mancata spiegazione della gravitazione non costituisce un problema perché, sebbene le teorie fisiche abbiano lo scopo di spiegare i fenomeni, queste non possono che farlo sulla base di alcune nozioni primitive. E le nozioni primitive di una teoria, in quanto tali, non devono essere a loro volta spiegate. Già da questo si vede chiaramente qual è il cuore teorico della soluzione realista: basterà riconoscere la gravità come nozione primitiva della nuova dinamica.

È abbastanza istruttivo ricorrere alla nozione di *sopravvenienza* e di *base di sopravvenienza* per chiarire almeno in parte quanto si propone. Queste nozioni sono da molto tempo ormai al centro di un sofisticato dibattito filosofico⁸. Per fortuna, ai fini della nostra discussione, non è necessario addentrarsi in tali sottigliezze. Ci si può accontentare di una caratterizzazione vaga della nozione di sopravvenienza che colga comunque il suo aspetto fondamentale.

⁷ Berkeley, *De Motu*, 1721, § 35, tr. it. di M. Fimiani, *10/17*, Salerno (1989, 87).

⁸Si veda ad esempio il classico Kim (1984).

Diciamo che un insieme di proprietà, non necessariamente monadiche, $\{\beta_i\}$ sopravviene su un insieme di proprietà, anch'esse non necessariamente monadiche, $\{\alpha_j\}$ se non è possibile⁹ che si abbia un cambiamento nelle β -proprietà senza un cambiamento nelle α -proprietà.

Chiamiamo invece *base di sopravvenienza* di una teoria T un insieme di proprietà $\{\kappa_n\}$ tale che (i) non esiste un altro insieme di proprietà in T su cui tali proprietà sopravvivono e (ii) per ogni insieme di proprietà in T , o queste proprietà sopravvivono su $\{\kappa_n\}$ o sopravvivono su un insieme di proprietà che sopravviene su $\{\kappa_n\}$.

Abbiamo introdotto la nozione di base di sopravvenienza perché illustra in maniera chiara l'aspetto epistemologico, ontologico e la loro relazione che è al cuore della risposta realista. Supponiamo infatti di voler dare una spiegazione di un qualsiasi fenomeno F all'interno di una determinata teoria T . In modo molto generale tale fenomeno può essere visto come il cambiamento di alcune proprietà rappresentate da certi termini in T per alcuni individui per i quali vale T . Spiegare F vorrà dire ricondurre il cambiamento delle proprietà in questione a un cambiamento delle proprietà che compaiono nella base di sopravvenienza di T . Questo implica inoltre che il cambiamento in queste ultime invece non può, e non *deve*, essere a sua volta spiegato. Le proprietà nella base di sopravvenienza sono, a livello epistemologico, *primitive*: non ci sono altre proprietà nei termini delle quali analizzarle. La controparte ontologica è che queste sono un insieme di proprietà *che ineriscono* agli individui che formano il dominio di T . Tali proprietà sono, in un certo senso, quelle che fanno degli individui quello che sono.

Adesso non dovrebbe essere difficile capire la risposta realista al *Dilemma della Gravità*. La nuova dinamica newtoniana riesce nel suo straordinario potere esplicativo ricorrendo in particolar modo alla seconda legge:

⁹A meno che non venga specificato altrimenti si sottintende nel lavoro una interpretazione nomologica degli operatori modali.

$$F = ma = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1)$$

L'equazione (1), nella sua forma analitica, offre una rappresentazione immediata di quelle che sono le proprietà che la nuova teoria dinamica include nella sua base di sopravvenienza. Si vede infatti che le velocità non sono tra queste, essendo sopravvenienti su intervalli temporali e posizioni spaziali, e nemmeno le accelerazioni, essendo queste sopravvenienti su intervalli temporali e velocità. Mettiamo da parte la difficile questione della possibilità di interpretare intervalli temporali e posizioni spaziali come genuine proprietà di alcuni individui. L'equazione (1) ci dice comunque che tra le proprietà presenti nella base di sopravvenienza indicata dalla meccanica newtoniana, si devono contare le masse e le forze, non ultima la forza di attrazione universale, ossia la gravità. E così si conclude l'argomento realista. La gravità, secondo la nuova meccanica newtoniana, è una proprietà *epistemologicamente primitiva ed ontologicamente inerente*. Essa non deve essere spiegata, e dunque il fatto che non possa, da cui era partito anche l'argomento strumentalista, non costituisce alcun problema.

Se dovessimo indicare due luoghi in cui la risposta realista al *Dilemma della Gravità* risulta con maggior chiarezza, potremmo riferire il lettore alla prefazione alla seconda edizione dei *Principia* (1713) scritta da Cotes¹⁰ e all'ambiente dei newtoniani olandesi, in particolare Musschenbroek nel suo *Elements of Natural Philosophy* (1744). Nel primo caso è inoltre molto interessante vedere come Cotes abbia ben chiaro il duplice aspetto, epistemologico e ontologico, della risposta realista. Con le dovute differenze terminologiche non dovrebbe essere difficile per il lettore vedere come nelle seguenti citazioni, si sostenga effettivamente quello che abbiamo cercato di chiarire in questa sezione:

O la gravità trova un suo posto tra le proprietà primarie di tutti i corpi, oppure non vi sono nemmeno l'estensione, la mobilità, l'impenetrabilità [...] E la natura delle cose sarà o giustamente spiegata mediante la gravità dei corpi o non sarà affatto spiegata.¹¹

Tutti I corpi sono stati dotati di essa [la gravità] dal Creatore, assieme con i loro altri attributi e proprietà. Ora se ad altri [...] piacerà chiamarla potere innato,

¹⁰Con ogni probabilità approvata almeno in parte da Newton stesso.

¹¹Cotes, 1713, XXVI, traduzione nostra.

mediante il quale le parti dei corpi vanno ad avvicinarsi, non saremo molto contrari.¹²

Rimane adesso solo l'*Incompletismo*.

2.3. Gravità e Incompletismo

Come si accennava già nell'introduzione l'argomento *incompletista* è, in generale, formulabile abbastanza brevemente. Il fatto che una teoria fisica non sappia spiegare alcune tra le sue nozioni fondamentali nei suoi stessi termini non significa che la teoria non ha lo scopo di spiegare, come vuole lo *Strumentalismo*, o che quelle nozioni non devono essere spiegate perché primitive, come vuole il *Realismo*, ma più semplicemente che manca qualcosa alla teoria, un qualcosa che invece renderebbe possibile tale spiegazione. In altre parole, la teoria in questione sarebbe incompleta.

Da qui si nota anche che, allora, un vero e decisivo argomento a favore dell'*Incompletismo* non può essere semplicemente costituito dalla denuncia delle limitazioni della teoria fisica in questione. Deve, per avere una qualche forza, anche venire accompagnato da una proposta di completamento della teoria che riesca a fare due cose: (i) essere empiricamente ed esplicativamente almeno equivalente alla teoria di partenza, e (ii) offrire una spiegazione soddisfacente delle nozioni che risultavano problematiche nella teoria di partenza.

Alla pubblicazione dei *Principia* la fisica cartesiana era ancora il paradigma di riferimento. Non c'è dunque da meravigliarsi se i primi argomenti a favore dell'*Incompletismo* accompagnati da diversi tentativi di completamento della teoria venissero condotti in un qualche spirito cartesiano. Tra i più celebri si ricordano il *Discours sur la Cause de la Pesanteur* di Huygens, e il *Tentamen de Motuum Coelestium Causis* di Leibniz. Ma come potevano questi tentativi far fronte all'argomento del libro II dei *Principia*, cui si è accennato in 2.2, secondo cui l'introduzione di un mezzo meccanico in grado di trasmettere l'azione gravitazionale tra i corpi, tratto essenziale in una prospettiva cartesiana, avrebbe disturbato il moto dei pianeti? Si può superare l'argomento newtoniano solo a patto di dotare tale mezzo meccanico di particolari proprietà. E' prova dell'ingegno di alcuni argomenti incompletisti esser riusciti proprio in questo. Nulla ci

¹² Musschenbroek, 1744, 105-107, traduzione nostra.

sembra possa servire meglio come esempio di questo atteggiamento della teoria che Nicolas Fatio espone nel marzo del 1690 alla Royal Society¹³.

L'assunzione di base della teoria di Fatio è che la meccanica newtoniana debba essere completata con l'introduzione di un mezzo materiale onnipresente e assai sottile, composto da particelle estremamente piccole che si muovono molto velocemente in ogni possibile direzione. Quando queste particelle vengono a collidere con grossi corpi materiali perdono una frazione infinitesimale di quantità di moto. Per mostrare che queste assunzioni conducono effettivamente a una spiegazione della gravitazione newtoniana, Fatio considera una sfera solida immersa in un liquido le cui particelle si muovono rapidamente ed entrano in collisione con la sfera. Riesce così a dimostrare che le particelle che si avvicinano alla sfera hanno "forza d'azione" molto più ampia di quelle che vengono riflesse. Il risultato, a distanze sufficientemente ampie, sarebbe stato effettivamente quello di una forza centripeta che varia con l'inverso del quadrato della distanza. Una volta raggiunto questo punto si può procedere come nei *Principia* per la spiegazione dei vari moti terrestri e celesti.

La teoria di Fatio non fu più sviluppata fino alla seconda metà del XVIII secolo¹⁴. Le sue assunzioni sembrano *ad hoc* e si riscontrano vari problemi tecnici, fra cui un'accumulazione di materia nel corpo più attrattivo, che avrebbe potuto condurre a divergenze con le leggi newtoniane non facilmente trascurabili. Abbiamo voluto riproporla qui, non tanto per i suoi meriti o mancanze, quanto come esempio paradigmatico di argomento incompletista. Dalla pubblicazione dei *Principia* tali argomenti si sono moltiplicati, dalle cosiddette "*ether theories of gravitation*"¹⁵ della seconda metà del XVIII secolo fino alla proposta di una teoria elettrogravitazionale di Weyl nel XX secolo. Naturalmente non tutte le proposte di completamento, dove completamento deve essere inteso in senso lato, hanno seguito uno spirito cartesiano. Non tutte, ma almeno una, almeno a parere del suo stesso autore. Questa proposta la si conosce oggi con il nome di *Relatività Generale*¹⁶.

¹³Purtroppo il contenuto di questa lecture è andato perso per la maggior parte. Oltre alle parti rimaste si ha qualche ulteriore dettaglio sulla teoria dalla corrispondenza personale di Fatio, in particolare con Huygens (vedi Van Lunteren, 1991, 41).

¹⁴Quando fu ripresa in parte da George Louis Le Sage. Vedi Van Lunteren (1991, 111-121).

¹⁵Vedi ancora Van Lunteren (1991, 95-125).

¹⁶Einstein (1952, 295).

3. Il Dilemma Quantistico e le sue Soluzioni

Si passa in questa sezione a esaminare prima la formulazione del *Dilemma Quantistico* (§3.1) e poi delle sue soluzioni. Per affrontare tali soluzioni è necessaria una breve parentesi tecnica (§3.2) per introdurre quegli strumenti che ci permetteranno poi di precisare in cosa consistano la risposta *Strumentalista* (§3.3), *Realista* (§3.4) e *Incompletista* (§3.5). Al di là delle differenze tecniche si proporranno argomenti che ricordano da vicino quelli della sezione 2. Questo dovrebbe già di per sé essere un primo elemento di valutazione a favore dell'esistenza dell'analogia tra i due dilemmi.

3.1. Il Dilemma Quantistico, ovvero le Correlazioni Pericolose¹⁷

Supponiamo di avere una macchina che riesce a sparare due palle da tennis in direzione opposta, ognuna delle quali dotata di un momento angolare. Facciamo l'assunzione semplificatrice che possano esserci due valori soli di tale momento angolare e indichiamoli con \uparrow, \downarrow rispettivamente. Non conoscendo tutti i parametri rilevanti non sappiamo dire con certezza quale momento angolare abbia una palla appena uscita dalla macchina. Si può dunque affermare che la probabilità che ogni palla da tennis abbia momento angolare, diciamo \uparrow sia $1/2$.¹⁸ Quando le palle sono sparate dalla macchina esse costituiscono naturalmente sistemi fisici spazialmente separati. La nostra intuizione, probabilmente modellata sulla fisica classica newtoniana, sembra suggerire che non ci si dovrebbe aspettare nessuna correlazione fra i valori dei momenti angolari delle due palle da tennis. Supponiamo di fare quattro lanci. Una *serie classica SC* di risultati sperimentali dovrebbe pressappoco apparire così:

$$(SC) \uparrow_1, \uparrow_2; \uparrow_1, \downarrow_2; \downarrow_1, \downarrow_2; \downarrow_1, \uparrow_2 \quad (2)$$

Dove $\uparrow_n, n = (1, 2)$ sta per il valore del momento angolare della palla da tennis 1, 2. Come si vede dalla (2) la probabilità per ogni singola palla da tennis di avere un determinato momento angolare è $=1/2$ e non ci sono correlazioni significative tra i valori dei momenti angolari delle due palle.

¹⁷Dal titolo del bel lavoro di Laudisa (1998).

¹⁸Lo stesso naturalmente vale per \downarrow .

Passiamo adesso al caso quantistico. Supponiamo di avere una procedura sperimentale che prepari due oggetti quantistici, che per i nostri scopi possono essere particelle, nello stato:

$$|\psi\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2) \quad (3)$$

Dove $|\uparrow\rangle_n, |\downarrow\rangle_n, n = (1, 2)$ sono le autofunzioni dello spin in una particolare direzione della particelle 1, 2. Quando le particelle siano state effettivamente preparate nello stato (3) siano poi separate e portate a distanza considerevole. Come nel caso classico¹⁹ la meccanica quantistica prevede che ogni particella abbia un particolare valore di spin con probabilità = 1/2. Le due particelle costituiscono *due* sistemi fisici separati. La nostra intuizione fisica, allenata classicamente, sembra suggerire che questi *due* sistemi fisici *separati* siano dunque *indipendenti*. Dunque ci si dovrebbe attendere, come nel caso classico, che non ci siano correlazioni tra i valori di spin delle due particelle. Ed è questo invece che la meccanica quantistica prevede, ed è anche ciò che è stato rilevato sperimentalmente. Si può in effetti dedurre da (3) che i valori dello spin siano perfettamente *anti-correlati*: ogni volta che si misura \uparrow per la particella 1, si misura anche \downarrow per la particella 2, e viceversa. Per usare la notazione di cui sopra, una serie quantistica S di quattro lanci appare pressappoco così:

$$(S) \uparrow_1, \downarrow_2; \downarrow_1, \uparrow_2; \downarrow_1, \uparrow_2; \downarrow_1, \uparrow_2 \quad (4)$$

Si vede dalla (4) che effettivamente ogni particolare valore di spin ha probabilità di essere rilevato nella misurazione = 1/2, ma anche che esistono delle “correlazioni pericolose” tra i valori di spin delle due particelle. Tali correlazioni sarebbero “pericolose” perché sussistono tra sistemi fisici spazialmente separati in modo tale che non sia possibile fra loro alcuna interazione causale. In altre parole non è possibile per la particella 1 in qualche modo “avvertire” la particella 2 del risultato della misurazione.

Quando una tale correlazione statistica si presenta sembra naturale richiederne una spiegazione. Ad esempio si potrebbe supporre che nel

¹⁹Naturalmente nel caso classico il fatto di attribuire a un certo valore del momento angolare probabilità = $\frac{1}{2}$ era dovuto fondamentalmente a una ignoranza dei valori di alcuni parametri. Non così nel caso quantistico.

momento in cui le particelle erano ancora in contatto si siano “messe d’accordo” sui valori dello spin, cioè che fin dal momento che le particelle anticorrelate sono state prodotte il loro spin era già determinato. Tuttavia la meccanica quantistica nega questa determinazione e la violazione sperimentale della disuguaglianza di Bell conferma la sua impossibilità fisica. In questo consiste il *Dilemma Quantistico*. Gli stati quantistici sono tra le nozioni fondamentali della nuova teoria meccanica, e tra le nozioni che le conferiscono il suo enorme potere predittivo, e tuttavia da alcuni stati che la teoria ammette tra quelli fisicamente possibili ce ne sono alcuni, quali (3), che danno vita a correlazioni statistiche che sembrano a loro volta necessitare una spiegazione. Non è difficile ritrovare una qualche analogia col *Dilemma della Gravità*.

3.2. Probabilità, Cause Comuni e Meccanica Quantistica

Come si è già accennato, in questa sezione si introducono alcune formulazioni tecniche che serviranno nella presentazione successiva degli argomenti *Strumentalista*, *Realista* e *Incompletista*. La nostra discussione si serve e rielabora numerose fonti tra cui Van Fraassen (1981), Salmon (1984), Redhead (1987), Earman e Salmon (1992), Elby (1992) e Harrigan e Spekkens (2010) per citarne alcune.

Indichiamo con $p(x)$ la probabilità di occorrenza di un evento x , e con $p(x_1, x_2, \dots, x_n)$ la probabilità dell’occorrenza congiunta degli eventi x_1, \dots, x_n . Si indica invece la probabilità condizionata degli eventi x_1, \dots, x_n rispetto a²⁰ C_1, \dots, C_n con $p(x_1, \dots, x_n / C_1, \dots, C_n)$.

Due eventi x_1, x_2 sono in *correlazione positiva* se e solo se la probabilità della loro occorrenza congiunta è maggiore della loro occorrenza indipendente, cioè:

$$p(x_1, x_2) > p(x_1) \cdot p(x_2) \quad (5)$$

Non è difficile generalizzare l’equazione (5) per casi in cui si abbiano n eventi distinti. Un insieme di condizioni C_1, \dots, C_n costituisce un insieme di *cause comuni* per due eventi positivamente correlati se e solo se rende la

²⁰ Si noti come non si specifica cosa possa contare come evento o come condizione rilevante: potranno infatti i primi e i secondi essere risultati di misura, stati quantistici, variabili nascoste e così via.

loro occorrenza *statisticamente indipendente*. Questo perché si osserva una correlazione positiva tra le loro occorrenze solo fino a quando non si considerino le loro cause comuni. Una volta considerate anche queste, infatti, si vedrebbe che né l'evento x_1 dipende dall'evento x_2 , né viceversa. Ovvero entrambi dipendono solamente da C_1, \dots, C_n . Formalmente:

$$p(x_1, x_2 / C_1, \dots, C_n) = p(x_1 / C_1, \dots, C_n) \cdot p(x_2 / C_1, \dots, C_n) \quad (6)$$

Anche in questo caso non è difficile generalizzare al caso di n eventi. L'equazione (6) esibisce in modo formale la ragione per cui il trovare delle cause comuni C_1, \dots, C_n *spieghi* la correlazione positiva tra gli eventi in questione. Redhead (1987) argomenta che una buona spiegazione causale dovrebbe richiedere inoltre che la causa o le cause in questione si qualificano come *robuste*, dove $p(x_i / C)$ è *robusta* se e solo se tale probabilità è insensibile a piccoli cambiamenti su come occorrono C_1, \dots, C_n . Elby (1992, 18) mostra che un insieme di cause comuni che soddisfano (6) sono robuste nel senso di Redhead. Si vedrà che nel dominio quantistico è impossibile trovare un insieme di condizioni C_1, \dots, C_n che si qualificano come cause comuni delle correlazioni a distanza introdotte nella sezione 3.1. Prima si deve tuttavia dire qualcosa sulla meccanica quantistica.

La meccanica quantistica MQ offre un algoritmo per calcolare la probabilità che si trovi un particolare valore k , dato un particolare processo di misura M e procedura di preparazione P , che qui indichiamo con $p(k / M, P)$. Quest'algoritmo è naturalmente la regola di Born generalizzata. In generale ad ogni metodo di preparazione MQ associa un operatore densità. Qui si fa l'assunzione semplificatrice che ogni preparazione lasci un sistema fisico in uno stato puro. Questi possono essere rappresentati da vettori normalizzati nello spazio di Hilbert per cui si può sostituire $p(k / M, P)$ con $p(k / M, |\varphi\rangle)$. Inoltre si farà sempre riferimento a un unico processo di misura per una singola osservabile per cui si può sottintendere la condizione M e semplificare ulteriormente in $p(k / |\varphi\rangle)$.

Si assume²¹ dunque che ogni preparazione P_i lasci il sistema fisico preparato in uno stato puro $|\varphi_i\rangle$, che, in qualche modo, esemplifica un insieme di proprietà $\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$. Una specificazione completa di tali proprietà è detta *stato ontologico* del sistema. L'insieme di tutti gli stati

²¹ Qui si segue Harrigans e Spekkens (2010) con alcune modifiche.

ontologici, o lo *spazio degli stati ontologici*, viene indicato con Λ . Un osservatore assegna una distribuzione di probabilità $p(\lambda / |\varphi_i\rangle)$ su Λ , che è detta *stato epistemico*, per ogni stato puro $|\varphi_i\rangle$.

Nel caso che si è introdotto nella sezione 3.1, per un singolo sistema fisico si ha dunque che $k_i = \{\uparrow, \downarrow\}$ e λ_i è in qualche modo legato²² allo stato puro generale $|\varphi_i\rangle = c_1 |\uparrow\rangle + c_2 |\downarrow\rangle$, $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$. A questo punto il risultato della misurazione dipenderà dalle proprietà λ_i , cioè $p(k / \lambda_i)$. Allora, semplificando, si può dire che un modello quantistico per un sistema fisico S_1 è una terna

$$(\Lambda_1, p(k / \lambda_i), p(\lambda_i / |\varphi_i\rangle)) \quad (7)$$

Che soddisfa

$$\int d\lambda p(k / \lambda) p(\lambda / |\varphi\rangle) = \text{tr} \rho(E_k) \quad (8)$$

Dove la parte destra dell'equazione rappresenta uno dei tanti modi di formulare la regola di Born generalizzata. In altre parole l'equazione (8) richiede che le componenti del nostro modello quantistico si comportino in maniera tale da "riprodurre" tale regola.

Un modello quantistico è *completo* se e solo se è isomorfo allo spazio proiettivo di Hilbert, cioè lo spazio dei raggi dello spazio di Hilbert. Formalmente allora, un modello è completo se e solo se esiste un isomorfismo:

$$f : \Lambda \rightarrow PH \quad (9)$$

In questo caso lo spazio degli stati ontologici Λ è parametrizzato solamente dagli stati quantistici ammissibili del sistema in questione.

Si consideri ora un sistema fisico S_{12} formato da due sistemi fisici S_1, S_2 quale quello che abbiamo introdotto nella sezione 3.1. Un modello per tale sistema è *separabile* se e solo se lo spazio degli stati del sistema

²² Questo sembra scartare la possibilità che gli stati quantistici siano interpretabili statisticamente, nel senso tecnico specificato in Harrigan e Spekkens (2010). In questo lavoro infatti non si prenderà in considerazione questa possibile interpretazione statistica. Per tale dibattito si veda Harrigan e Spekkens (2010), Pusey, Barrett e Rudolph (2011) e Calosi, Fano, Graziani e Tarozzi (2011).

complessivo è dato dal prodotto cartesiano dello spazio degli stati dei sistemi componenti, cioè:

$$\Lambda_{12} = \Lambda_1 \times \Lambda_2 \quad (10)$$

Questa breve sezione tecnica dovrebbe essere sufficiente per capire le argomentazioni nelle sezioni successive.

3.3. Correlazioni a Distanza e Strumentalismo

Si ripensi alla sezione 2.2. Si argomentava che il primo passo della soluzione *strumentalista* era il riconoscimento che una spiegazione della nozione di attrazione gravitazionale non era possibile nei termini della meccanica newtoniana. Nel presente contesto questo significa riconoscere dunque che non è possibile offrire una spiegazione delle correlazioni a distanza presentate nella sezione 3.1 all'interno della meccanica quantistica.

Si formula ora un argomento a favore di quest'ultima affermazione. Come si è mostrato nella sezione precedente, una spiegazione di una correlazione positiva consiste nel trovare una causa comune di tale correlazione che renda gli eventi statisticamente indipendenti. Per prima cosa si deve dunque accertare che gli eventi \uparrow_1 = "rilevamento di \uparrow per la particella 1" e \downarrow_2 = "rilevamento di \downarrow per la particella 2"²³ siano effettivamente *positivamente correlati*, cioè soddisfino (5). Dalla sezione (3.1) si ha che:

$$p(\uparrow_1, \downarrow_2) = \frac{1}{2} \quad (11)$$

$$p(\uparrow_1) = \frac{1}{2} = p(\downarrow_2) \quad (12)$$

e naturalmente da (11) e (12) si deriva che \uparrow_1 e \downarrow_2 sono *effettivamente positivamente correlati*, dato che

²³Naturalmente lo stesso vale per gli eventi "rilevamento di \downarrow per la particella 1" e "rilevamento di \uparrow per la particella 2".

$$p(\uparrow_1, \downarrow_2) = \frac{1}{2} > p(\uparrow_1) \cdot p(\downarrow_2) = \frac{1}{4} \quad (13)$$

Una spiegazione nei termini della meccanica quantistica dovrebbe in modo naturale ricercare nello stato quantistico che descrive i due sistemi, cioè lo stato quantistico $|\psi\rangle_{12}$ dell'equazione (3), la causa comune che renda gli eventi \uparrow_1, \downarrow_2 statisticamente indipendenti. Questo perché tale stato è la descrizione matematica dello stato complessivo del sistema. Ma naturalmente:

$$p(\uparrow_1 / |\psi\rangle_{12}) = p(\downarrow_2 / |\psi\rangle_{12}) = p(\uparrow_1, \downarrow_2 / |\psi\rangle_{12}) = \frac{1}{2} \quad (14)$$

Da cui si vede che $|\psi\rangle_{12}$ non può qualificarsi come causa comune secondo l'equazione (6), visto che deriva da (14) che

$$p(\uparrow_1, \downarrow_2 / |\psi\rangle_{12}) = \frac{1}{2} \neq p(\uparrow_1 / |\psi\rangle_{12}) \cdot p(\downarrow_2 / |\psi\rangle_{12}) = \frac{1}{4} \quad (15)$$

Dunque una spiegazione delle correlazioni quantistiche sembra impossibile da dare nei termini della teoria. Come già nella sezione 2.2 da qui allo *Strumentalismo* il passo non è poi così lungo. Non a caso infatti Van Fraassen si riferisce al caso delle correlazioni quantistiche come alla “*Cariddi del Realismo*”. Infatti tale mancanza di spiegazione diviene problematica solo se si ritiene che *spiegare* sia lo scopo principale delle nostre teorie fisiche. Ma abbiamo già visto in 2.2, e per questo non ripetiamo l'argomentazione per intero, che questa è solo una possibilità. Un più modesto atteggiamento antirealista secondo cui le teorie fisiche semplicemente *descrivono* i fenomeni potrebbe facilmente convivere con l'impossibilità di spiegare le correlazioni a distanza. Ed infatti Van Fraassen (1980), parlando in generale di correlazioni statistiche, scrive:

Che i fenomeni osservabili esibiscano tali regolarità, per cui si accordano con la teoria, è semplicemente un fatto brutto, e potrebbe o meno avere una spiegazione [...] non importa affatto per giudicare della bontà della teoria, né conta per la nostra comprensione del mondo.²⁴

Sarebbe difficile trovare parole più chiare.

²⁴ Van Fraassen, 1980, 24, traduzione nostra.

3.4. Correlazioni a Distanza e Realismo

Un atteggiamento realista, come già si è accennato, non può tuttavia rinunciare al ruolo esplicativo delle teorie fisiche. La soluzione tratteggiata nella sezione 2.3 era quella di riconoscere dunque che alcune nozioni della teoria fisica in questione sono *epistemologicamente primitive* e *ontologicamente inerenti*, dove inerenti veniva inteso nel senso di non sopravvenienti.

Quest'ultima caratterizzazione coglie precisamente il senso della soluzione *realista* al *Dilemma Quantistico*. Tale risposta può essere differentemente attribuita a Howard (1989), Ghirardi (1997), Auletta, Fortunato e Parisi (2009), solo per citarne alcuni. La sua formulazione più chiara si deve forse a Teller (1989), per cui si farà riferimento essenzialmente a quest'ultima.

Prima di tutto si consideri il seguente argomento, che interpreta le correlazioni a distanza tra sistemi fisici spazialmente separati nei termini di relazioni che intercorrono tra i sistemi stessi. Supponiamo che i due sistemi fisici S_1, S_2 formino il sistema S_{12} nello stato (3). Le correlazioni tra i sistemi S_1, S_2 dicono che qualora si trovi spin \uparrow come risultato di misura sulla particella 1 si trova necessariamente spin \downarrow per la particella 2. In altre parole le correlazioni dicono che tra i sistemi fisici S_1, S_2 intercorre la *relazione* "avere spin opposto". La mancanza di una spiegazione delle correlazioni a distanza diviene in questo sfondo problematica solo se si richiede che tale relazione sia una relazione sopravveniente. Il candidato naturale della base di sopravvenienza, in analogia col caso classico, sarebbe naturalmente dato dall'insieme delle proprietà dei sistemi S_1, S_2 .

Teller (1989) chiama *Particolarismo* questa tesi metafisica. Scrive: "Il *Particolarismo* afferma che il mondo è composto da individui, che gli individui hanno proprietà non relazionali, e che tutte le relazioni tra gli individui sopravvengano sulle proprietà non relazionali dei relata" (Teller, 1989, 213, traduzione nostra).

La risposta realista al *Dilemma Quantistico* diviene allora la negazione del *Particolarismo*. Al fondo, come nel caso del *Dilemma della Gravità*, tale soluzione consiste nell' accettare come facenti parte della base di sopravvenienza della teoria le relazioni che intercorrono tra sistemi fisici separati. Come già nel caso della gravità, tali relazioni sono *epistemologicamente primitive*, cioè non esistono altre nozioni nei termini delle quali debbano essere spiegate, e *ontologicamente inerenti*, cioè non esiste un insieme di proprietà monadiche o n -adiche tali che queste relazioni soprav-

vengano su quell'insieme. Teller (1986) chiama tali relazioni, non a caso, *inherent relations*.

Teller (1989) è ancora più chiaro:

A meno di non avere un forte atteggiamento strumentalista nei confronti della teoria quantistica, la teoria quantistica ci dice che il *Particolarismo* è falso. Ci dice che dobbiamo abbracciare quello che chiamo *Olismo Relazionale*, la tesi secondo cui esistono relazioni non sopravvenienti, cioè, relazioni che non sopravvivono sulle proprietà non relazionali dei relata.²⁵

Questo passaggio, con la sua caratterizzazione in senso olistico di un certo realismo quantistico, è inoltre assai utile per mostrare una conseguenza importante della soluzione *Realista*. Ogni soluzione di questo tipo è *non separabile*, nel senso che viola la condizione (10). È questo l'ultimo argomento di questa sezione.

Torniamo al nostro esempio. Le relazioni inerenti sono relazioni che intercorrono tra sistemi fisici S_1, S_2 quando questi formino un sistema fisico

S_{12} nello stato $|\psi\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2)$. Dato che queste relazioni sono ontologicamente inerenti avremo che

$$|\psi\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2) \in \Lambda_{12} \quad (16)$$

Infatti (16) dice solamente che questo stato, che attribuisce le relazioni inerenti, deve appartenere allo spazio degli stati del sistema S_{12} . Si considerino ora gli spazi degli stati Λ_1, Λ_2 di S_1, S_2 rispettivamente. Questi saranno gli insiemi di tutti quei vettori di stato che, in generale, possono essere scritti nella seguente forma:

$$\begin{aligned} \Lambda_1 &= \{|\varphi\rangle_1 : c_1 |\uparrow\rangle_1 + c_2 |\downarrow\rangle_1\} \\ \Lambda_2 &= \{|\varphi\rangle_2 : c_3 |\uparrow\rangle_2 + c_4 |\downarrow\rangle_2\} \\ |c_1|^2 + |c_2|^2 &= 1 = |c_3|^2 + |c_4|^2 \end{aligned} \quad (17)$$

Da cui si deduce che i vettori di stato che appartengono a $\Lambda_1 \times \Lambda_2$ hanno la seguente forma:

²⁵ Teller, 1989, 214.

$$\Lambda_1 \times \Lambda_2 = \{ |\varphi\rangle_{12} : c_1 c_3 |\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 + c_1 c_4 |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 + c_2 c_3 |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 + c_2 c_4 |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 \} \quad (18)$$

Adesso basta dunque provare che $|\psi\rangle_{12}$ in (16) non può essere scritto nella forma di $|\varphi\rangle_{12}$ in (18). Questa è infatti la nostra definizione di separabilità (10). Si riprende l'argomento da Calosi, Fano e Tarozzi (2011, 1745) con le dovute modifiche. Da (16) e (18) si deduce che

$$\begin{aligned} c_1 c_3 &= 0 = c_2 c_4 \\ c_1 c_4 &= \frac{1}{\sqrt{2}} = c_2 c_3 \end{aligned} \quad (19)$$

Che non possono venire entrambe soddisfatte. Questo mostra come ogni risposta *realista* al *Dilemma Quantistico* sia non separabile. Ghirardi (1997, 221) scrive: «Einstein aveva veramente torto poiché non aveva neppure contemplato [...] questa possibilità che i processi naturali risultassero fondamentalmente non locali [separabili]». Un punto di vista simile esprimono Auletta, Parisi e Fortnato (2009, 625): «La meccanica quantistica ci costringe ad abbandonare il concetto di separabilità». Resta ora da esaminare solo la risposta *Incompletista*.

3.5. Correlazioni a Distanza e Incompletismo

Si ricordi dalla sezione 2.4 qual è il cuore della soluzione *Incompletista*. Questa muove dal fatto che l'impossibilità di trovare una spiegazione delle nozioni problematiche, in questo caso le correlazioni a distanza, nei termini della teoria fisica in questione, in questo caso la meccanica quantistica, non significa abbandonare la possibilità di una spiegazione *tout court*. Basta completare la teoria in modo tale da garantire che tale spiegazione sia possibile. Dunque, ogni risposta *incompletista*, per essere ragionevole, deve essere accompagnata da una proposta di completamento che soddisfi a questi due requisiti, che chiamiamo il requisito della *Possibile Spiegazione (PS)* e dell'*Adeguatezza Empirica (AE)*. Una caratterizzazione per alcuni versi non molto rigorosa può bastare.

Da una parte *PS* può essere così formulato: si supponga di avere un completamento della teoria quantistica. Tale completamento deve essere in grado di fornire una spiegazione soddisfacente delle correlazioni a distanza.

Dall'altra *AE*: Si supponga di avere un completamento della teoria quantistica. Tale completamento deve essere *almeno* empiricamente equivalente alla meccanica quantistica.

Non è possibile far vedere qui come le diverse proposte di completamento della teoria quantistica soddisfino puntualmente *PS* ed *AE*. Ci si limiterà perciò a far vedere in modo generale come l'ipotesi *incompletista* possa di principio in effetti trovare una soluzione al *Dilemma Quantistico* fornendo una possibile spiegazione delle correlazioni a distanza. Si indicherà poi un esempio concreto di proposta di completamento di MQ su cui c'è abbastanza accordo in letteratura nel ritenere che soddisfi realmente entrambi i requisiti.

Partiamo dall'argomento generale. Una soluzione *incompletista* muove dal riconoscimento che MQ, nella sua formulazione attuale è non completa. Nei termini in cui si è definita la completezza nella sezione 3.2 questo significa che lo spazio degli stati Λ di un sistema fisico non è isomorfo allo spazio di Hilbert proiettivo associato a tale sistema. In termini tecnici questo significa che Λ non è parametrizzato solamente dagli stati quantistici. Indichiamo con $\omega = \{\omega_1, \dots, \omega_n\}$ l'insieme di parametri tali che questi e l'insieme degli stati quantistici parametrizzi completamente Λ . In letteratura si è soliti riferirsi a $\omega = \{\omega_1, \dots, \omega_n\}$ come *variabili nascoste*. In altre parole uno stato ontologico completo di un sistema fisico è dato da:

$$\lambda_i = (|\varphi\rangle_i, \omega_i) \in \Lambda \quad (20)$$

Grazie a (20) si può in effetti bloccare l'argomento (14)-(15) secondo cui non è possibile fornire una spiegazione delle correlazioni a distanza. Questo perché quell'argomento, presupponendo implicitamente la completezza di MQ, assume che $\lambda_i = |\varphi\rangle_i$, da cui si ha che:

$$p(\uparrow_i / |\varphi\rangle_i) = p(\uparrow_i / \lambda_i) \quad (21)$$

Ma questo naturalmente non è più garantito, dato (20). Dato (20) si ha infatti che, in generale:

$$p(\uparrow_1, \downarrow_2 / |\phi\rangle_{12}) \neq p(\uparrow_1, \downarrow_2 / |\phi\rangle_{12}, \omega_{12}) \quad (22)$$

Ma se vale (22) può allora essere che

$$p(\uparrow_1, \downarrow_2 / \lambda_{12}) = p(\uparrow_1 / \lambda_{12}) \cdot p(\downarrow_2 / \lambda_{12}) \quad (23)$$

Nel qual caso λ_{12} si qualificherebbe come causa comune delle correlazioni secondo l'equazione (6). In questo caso sarebbe il ricorso all'insieme di variabili nascoste $\omega_{12} \in \lambda_{12}$ a spiegare le correlazioni tra i sistemi fisici S_1, S_2 . Non è possibile entrare qui nei dettagli di come diverse proposte *incompletiste* effettivamente esemplifichino l'argomento generale che noi abbiamo dato in (20)-(23), e che inoltre soddisfino sia a *PS* che a *AE*. Non si può far di meglio che additare un esempio concreto su cui vi sia abbastanza accordo in letteratura. Stiamo parlando della *Meccanica Bohmiana* presentata in Bohm (1952)²⁶.

Questo conclude la nostra discussione dei due analoghi dilemmi.

4. Conclusione

Si è dunque sviluppata in questo lavoro l'analogia proposta da McMullin (1989) tra il *Dilemma della Gravità* e il *Dilemma Quantistico*. Resta da rispondere a qualche possibile obiezione agli argomenti che abbiamo presentato. Resta inoltre da vedere un'altra cosa. Noi sappiamo, almeno in parte, quale delle possibili soluzioni al *Dilemma della Gravità* sia stata storicamente vincente. Sembra naturale dunque chiedersi se questo dovrebbe dire qualcosa, sulla base dell'analogia proposta, anche riguardo la soluzione dell'ancora per certi versi irrisolto *Dilemma Quantistico*. Dedichiamo questa conclusione a tali questioni.

Più che riguardo le argomentazioni specifiche si potrebbe sollevare una obiezione generale riguardo l'analogia sviluppata nel lavoro. Data la generalità delle risposte *Strumentalista*, *Realista* e *Incompletista* non è difficile trovare una analogia tra i due dilemmi. In altre parole l'analogia non sarebbe dovuta a qualche caratteristica fondamentale che il *Dilemma della Gravità* e il *Dilemma Quantistico* condividerebbero, quanto al fatto che questioni riguardanti in qualche modo la spiegazione scientifica possano sempre venir affrontate facendo ricorso alle soluzioni generali proposte. L'analogia in questione perderebbe così molto del suo interesse particolare.

Questo tuttavia è solo in parte vero. C'è in effetti un aspetto fondamentale riguardo la natura dei due dilemmi per cui la loro analogia appare fondata. Quest'aspetto ha a che fare con l'azione a distanza. Come si è visto esplicitamente dalle parole dello stesso Newton, l'attrazione gravitazionale sembra essere una qualche forma di azione a distanza. Anzi, è

²⁶ Un lettore completamente digiuno può partire da Goldstein (2006).

proprio il rifiuto di tale azione a distanza che in qualche modo è all'origine della richiesta di spiegazione dell'attrazione gravitazionale.

Lo stesso vale per le correlazioni quantistiche. Supponiamo di avere le due particelle preparate nello stato (3) e supponiamo di misurare lo spin della prima particella. Supponiamo inoltre che il risultato del processo di misura sia \uparrow_1 . Dato il fondamentale postulato del collasso secondo cui quando viene effettuata una misurazione lo stato del sistema fisico dopo la misurazione è descritto da una autofunzione dell'osservabile misurata appartenente all'autovalore trovato, segue che lo stato di S_1 , ossia della prima particella, è $|\uparrow\rangle_1$. MQ predice allora che lo stato di S_{12} dopo la misurazione sia:

$$|\psi'\rangle_{12} = |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 \quad (24)$$

Che, a differenza di (3) è uno stato separabile. Ne segue che S_2 è in uno stato puro descritto dal vettore $|\downarrow\rangle_2$. Dunque la misurazione dello spin sulla particella 1 sembra in qualche modo aver agito a distanza sulla particella 2 cambiando il suo stato. Quest'azione a distanza è ancora più problematica nel caso quantistico perché i sistemi fisici in questione possono essere portati a distanze tali che tale azione avrebbe dovuto essere trasmessa tramite segnali superluminali, in apparente contraddizione con le restrizioni relativistiche.

Questo mostra quanto sia almeno affrettato sostenere che non ci sia alcun elemento fondamentale caratterizzante l'analogia proposta tra i due dilemmi. Naturalmente si può, con Maudlin (2002: 22-24), sottolineare alcuni importanti punti di differenza, anche riguardo la presunta azione a distanza che sembra caratterizzarli.

La prima differenza da notare è che mentre l'attrazione gravitazionale tra due corpi diminuisce all'aumentare della distanza, questo non vale per i due sistemi quantistici. La correlazione quantistica è infatti indipendente e insensibile alla misura della distanza spaziale che intercorre tra i sistemi fisici. Questo rende la correlazione quantistica ancora più misteriosa di quella gravitazionale.

Un altro elemento di differenza che contribuisce al maggior mistero del *Dilemma Quantistico* è dato da quello che talvolta in letteratura viene chiamato *Monogamia dell'Entanglement*. A differenza dell'azione gravitazionale che viene subita da *tutte* le particelle materiali dell'universo indistintamente, le correlazioni quantistiche sembrano *esclusive*. Se i due

sistemi S_1, S_2 sono nello stato (3) questo riguarda esclusivamente S_1 ed S_2 . Anzi, non è possibile che uno dei due formi un sistema $S_{13\dots n}$ o $S_{23\dots n}$ con altri sistemi S_3, \dots, S_n tali che il sistema composto sia in uno stato non separabile. In altre parole, le correlazioni sono un “affare privato” che esprime una relazione monogama, non condivisibile, tra i sistemi in questione.

Queste considerazioni non ci devono tuttavia far affrettatamente concludere che non esista analogia alcuna tra i due dilemmi, date le significative differenze. Dovrebbe soltanto spingerci a riconoscere che, come ogni analogia, anche questa è imperfetta ed ha i suoi limiti.

Se allora, per quanto imperfetta, tale analogia è in parte sostenibile, può essere utilizzata per dire qualcosa sulla soluzione dei due dilemmi? Sarà analoga anch'essa? Oggi conosciamo la soluzione storicamente vincente al *Dilemma della Gravità*. Tale soluzione ha il nome di *Relatività Generale* (RG). Abbiamo già sottolineato come questa possa essere vista come una soluzione in generale *incompletista*. In maniera molto vaga si può sostenere che RG abbia risolto il *Dilemma della Gravità* spiegando le variazioni dell'attrazione gravitazionale come manifestazioni della curvatura dello spaziotempo.

Che l'*Incompletismo* sia dunque la soluzione più promettente al *Dilemma Quantistico*? Una cosa è certa. Un atteggiamento in generale *incompletista* è senz'altro da un certo punto di vista *progressivo*. Come tale dunque ha indiscutibili meriti a livello epistemologico. Se questa sarà la soluzione ne seguirà che dovremmo accettare una forma anche debole di non *separabilità*. Le disuguaglianze di Bell e la loro violazione sperimentale sembrano suggerirci almeno questo²⁷. Che si debba attendere allora un Albert Einstein incline a una qualche forma di olismo?

²⁷ Harrigan e Spekkens (2010) presentano un interessante argomento secondo cui si può far vedere che i modelli quantistici in cui gli stati quantistici in qualche modo parametrizzano lo spazio degli stati dei sistemi fisici devono essere non locali. In questo senso per una violazione della località non sarebbero necessarie le “armi pesanti”, come vengono chiamate nel lavoro, del teorema di Bell.

Riferimenti bibliografici

- Auletta, G., Fortunato, M., Parisi, G., 2009, *Quantum Mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Bohm, D., 1952, "A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden Variables" I and II», *Physical Review*, 85, pp. 166-193.
- Calosi, C., Fano, V., Tarozzi, G., 2011, "Quantum Ontology and Extensional Mereology», *Foundations of Physics*, 41, pp. 1740-1755.
- Calosi, C., Fano, V., Graziani, P., Tarozzi, G., 2012, "Statistical Vs Wave Realism in the Foundations of Quantum Mechanics», A: <http://philsci-archive.pitt.edu/9021/>
- Cotes, R., 1713, "Preface to the second edition of Sir Isaac's Newton Principles of mathematical Philosophy», Berkeley, University of California Press, 1974, pp. XX-XXXIII.
- Cushing, J., McMullin, E., 1989, *Philosophical Consequences of Quantum Theory*, Notre Dame, Notre Dame University Press.
- Earman, J., Salmon, W., 1992, "The Confirmation of Scientific Hypothesis, in AA.VV. *An Introduction to the Philosophy of Science*, London: Hackett Publishing Company, 42-104.
- Elby, A. 1992, "Should We Explain the EPR Correlations Causally?», *Philosophy of Science*, 52, pp. 16-25.
- Einstein, A., 1952, "La relatività e il problema dello spazio», in *Relatività: esposizione divulgativa*, Torino, Boringhieri, 1981, pp. 294-313.
- Fano, V., 2005, *Comprendere la scienza*, Napoli, Liguori.
- Ghirardi, G., 1997, *Un'occhiata alle carte di Dio*, Milano, Il Saggiatore.
- Goldstein, S., 2006, "Bohmian Mechanics». At: <http://plato.stanford.edu/entries/qm-bohm/>.

- Harrigan, N., Spekkens, R., 2010, "Einstein, Incompleteness and the Epistemic View of Quantum States», *Foundations of Physics*, 40, pp. 125-157.
- Howard, D., 1989, "Holism, Separability, and the Metaphysical Implications of the Bell Experiments», in Cushing e McMullin (ed), *Philosophical Consequences of Quantum Theory*, Notre Dame, Notre Dame University Press, pp. 224-253.
- Kim, J., 1984, "Concepts of Supervenience», *Philosophy and Philosophical Research*, 45, pp. 153-176.
- Laudisa, F., 1998, *Le correlazioni Pericolose*, Padova, Il Poligrafo.
- Maudlin, T., 2002 (2nd ed), *Quantum Non Locality and Relativity*, Oxford, Blackwell Publishing.
- Musschenbroek, P., 1744, *The Elements of Natural Philosophy*, London.
- Pusey, M., Barrett, J., Rudolph, T., 2012, "On the Reality of Quantum State», *Nature Physics*, 8, pp. 476-479.
- At: <http://www.nature.com/nphys/journal/v8/n6/full/nphys2309.html>.
- Redhead, M., 1987, *Incompleteness, Non Locality and Realism: a Prolegomenon to the Philosophy of Quantum Mechanics*, Oxford, Oxford University Press.
- Salmon, W., 1984, *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*. Princeton, Princeton University Press.
- Teller, P., 1986, "Relational Holism and Quantum Mechanics», *British Journal for the Philosophy of Science*, 37, pp. 71-81.
- , 1989. "Relativity, Relational Holism and the Bell Inequalities», in Cushing e McMullin(Ed), *Philosophical Consequences of Quantum Theory*, Notre Dame, Notre Dame University Press, pp. 208-223.
- Van Fraassen, B., 1980, *The Scientific Image*, Oxford, Clarendon Press.
- Von Lunteren, F., 1991, *Framing Hypothesis*, Tesi di Dottorato, Università di Utrecht.

Cosmologia standard e oltre

Alberto Cappi
INAF – Osservatorio Astronomico di Bologna
alberto.cappi@oabo.inaf.it

1. Introduzione

Nel corso della seconda metà del XX secolo si è progressivamente sviluppata ed affermata una cosmologia “standard”: vedremo in che cosa consiste e come si è costituita. Vedremo anche quali sono i suoi limiti e quali nuove teorie si candidano per superarli. Vorrei comunque chiarire subito che la cosmologia standard, per quanto possano sembrare sorprendenti i suoi risultati (qualche specialista parla di *preposterous universe*, ovvero di un assurdo universo), si fonda su esperimenti ed osservazioni, ed avrebbe potuto essere falsificata tante volte: ciò non è finora accaduto. Al cuore della cosmologia standard abbiamo quella che viene chiamata “teoria del *Big Bang*” la quale, offrendo una descrizione quantitativa dell’origine comune e dell’evoluzione di tutto l’universo osservabile, rappresenta una delle grandi conquiste intellettuali del XX secolo. Detto questo, nel quadro della teoria del *Big Bang* sono ancora possibili molti modelli diversi: soltanto alla fine del XX secolo si è finalmente avuta la convergenza su un modello particolare, che costituisce il modello standard (detto anche *concordance model*).

Che cosa possiamo invece definire come cosmologia non standard? A parte le teorie alternative al Big Bang che appartengono al passato (come quella dello Stato Stazionario), abbiamo oggi teorie che si propongono di andare al di là del *Big Bang* e di spiegare ciò che la cosmologia standard per sua natura non è in grado di spiegare. Abbiamo così l’inflazione, i modelli di *pre-Big Bang*, gli universi-brana, il Multiverso, che a livelli diversi si basano su una nuova fisica non verificata sperimentalmente: siamo dunque

in un campo altamente speculativo, ricco di ipotesi e molto lontano dalla pratica quotidiana dell'astronomo.

In questo contributo cercherò di seguire una traccia storica e, per quanto riguarda la bibliografia, salvo poche eccezioni rimanderò ad una piccola selezione di *review* e libri nei quali il lettore potrà trovare i riferimenti agli articoli originali e specialistici. Per un'introduzione aggiornata in lingua italiana alla cosmologia, segnalo il testo a livello universitario di Bonometto (2008)¹.

2. La cosmologia prima del XX secolo

L'inizio della cosmologia come spiegazione razionale di un cosmo considerato come comprensibile all'uomo risale ai filosofi presocratici (VI secolo a.C.). Ad Anassimandro le fonti attribuiscono la prima grande rivoluzione cosmologica: l'idea che la Terra è sospesa nel vuoto. La seconda rivoluzione cosmologica fu invece la scoperta della sfericità della Terra, che divenne nota ai Greci a partire dal V secolo a.C. ed è attribuita a Parmenide o a Pitagora. Ma l'apogeo della scienza e della cosmologia scientifica nell'Antichità fu raggiunto nella prima età ellenistica (Russo 1999): fra il III e il II secolo a.C., il cosmo divenne oggetto di studio *quantitativo*, come testimoniano la misura precisa della circonferenza terrestre da parte di Eratostene, e quella più approssimativa delle distanze e delle dimensioni della Luna e del Sole da parte di Aristarco di Samo. Lo stesso Aristarco fu il primo a comprendere che il moto della sfera celeste e quello del Sole possono essere spiegati assumendo che la Terra ruoti su se stessa e orbiti intorno al Sole. Furono proposte teorie della gravità alternative a quella aristotelica (come quella descritta nel dialogo di Plutarco *De Facie quae in Orbe Lunae Apparet*). Risale all'epoca ellenistica anche il celebre meccanismo di Antichitera, un vero e proprio calcolatore meccanico grazie al quale era possibile calcolare la posizione del Sole e della Luna (e forse dei pianeti) per una data qualsiasi (Freeth *et al.*, 2006). L'epoca d'oro della scienza antica si spense con la conquista romana dei regni ellenistici, anche se nei primi due secoli dell'Impero Romano si ebbe un parziale risveglio dell'interesse scientifico, senza però l'impulso creativo di un tempo. Risale a questo periodo l'*Almagesto* di Tolomeo, il cui raffinato

¹ Il libro è eccellente; unica pecca sono alcune affermazioni di carattere storico e filosofico a mio parere discutibili che si trovano nel capitolo iniziale e in quello conclusivo.

modello geocentrico avrebbe costituito il punto di riferimento dell'astronomia e della cosmologia fino alla rivoluzione copernicana.

Nel corso dei decenni successivi alla pubblicazione del libro di Copernico *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (1543), il sistema eliocentrico rese implausibile l'esistenza di una sfera delle stelle fisse, che fu pertanto sostituita da un cosmo popolato di altri soli. Dopo la pubblicazione nel 1687 dei *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis* di Isaac Newton fu infine possibile descrivere la dinamica dell'universo, una volta stabilita la distribuzione iniziale della materia nello spazio, tranne nel caso in cui la materia sia disposta uniformemente in uno spazio infinito: oltre a un problema matematico di definizione della forza di gravità, si pone in questo caso anche il paradosso di Olbers: poiché il flusso luminoso proveniente da una stella diminuisce con l'inverso del quadrato della distanza, ma il numero di stelle aumenta col quadrato della distanza, e se l'universo è infinito il flusso tende all'infinito; anche tenendo conto che le stelle più vicine nascondono quelle più lontane, il cielo dovrebbe essere luminoso come la superficie del Sole. La soluzione che oggi sappiamo essere valida è l'età finita dell'universo: poiché anche la velocità della luce è finita, noi non possiamo osservare stelle la cui distanza è superiore a quella che può percorrere la luce in un tempo uguale all'età dell'universo (Harrison, 1989).

Non è stato facile stabilire la struttura dell'universo: William Herschel a cavallo del XVIII e XIX secolo scoprì l'esistenza di un gran numero di nebulose. Si trattava di ammassi di stelle paragonabili alla Via Lattea ma di cui non era possibile distinguere le stelle a causa della distanza, oppure di vere e proprie nebulose di gas? Inoltre nel 1796 Pierre Simon de Laplace pubblicò in coda alla sua opera *Exposition du système du monde* una settima nota, nella quale spiegava le regolarità osservate nel Sistema Solare ipotizzandone la formazione in seguito alla contrazione gravitazionale di una nube di gas in rotazione. Le nebulose osservate erano forse ricollegabili a questo processo? L'ipotesi di Laplace fu discussa nel corso del XIX secolo, analogamente a quello che sarebbe avvenuto nel XX secolo con la teoria del *Big Bang*, senza che si arrivasse ad un risultato conclusivo. Fu lo sviluppo della fotografia e della spettroscopia a permettere di identificare la natura dei diversi tipi di nebulose.

3. Redshift e relatività: la nascita della cosmologia moderna

All'inizio degli anni '20 del XX secolo cominciavano ad esserci forti indizi che le nebulose come quella di Andromeda fossero grandi sistemi stellari come la Via Lattea. Nel 1923 l'astronomo americano Edwin Hubble, avvalendosi del telescopio di 2,5 metri di diametro di Mount Wilson, riuscì ad identificare alcune Cefeidi nella nebulosa di Andromeda. Le Cefeidi sono stelle variabili, e il periodo di variazione della loro luminosità è correlato alla loro luminosità intrinseca. La misura della loro luminosità apparente e del periodo permette così di misurarne la distanza. I risultati di Hubble, annunciati nel 1925, mostravano che le nebulose come quella di Andromeda erano lontani sistemi stellari paragonabili alla Via Lattea.

Nel frattempo, l'astronomo americano Vesto Slipher aveva scoperto che le righe negli spettri delle galassie erano quasi sempre spostate verso il rosso (il *redshift*) il che, interpretato come effetto Doppler, indicava un loro sistematico allontanamento. Lo stesso Hubble, nel 1929, a partire dalle misure dei *redshift* e delle distanze delle galassie, mostrò che il *redshift* z di una galassia è proporzionale alla sua distanza D : $z=(H/c)\times D$ (dove H è la costante di Hubble e c è la velocità della luce). L'interpretazione naturale della legge di Hubble nel contesto della relatività generale è che le galassie si allontanino le une dalle altre perché l'universo è in espansione. In tal caso la proporzionalità fra *redshift* e distanza vale solo per piccole scale: la relazione fra distanza e *redshift* dipende infatti dai parametri del modello cosmologico. Si noti che H è costante nello spazio ma non nel tempo: il suo valore all'epoca attuale è solitamente indicato con H_0 . Infine, va precisato che le galassie legate da attrazione gravitazionale, come quelle che appartengono a gruppi o ammassi, non si allontanano fra loro.

Se l'interpretazione cosmologica del *redshift* è la più immediata e si è imposta fin dall'inizio, vi è stata anche qualche voce critica. In particolare l'astronomo Halton Arp, in base alle osservazioni di coppie di galassie (o associazioni galassie-*quasar*) apparentemente collegate da ponti di materia ma con *redshift* molto diversi, sostiene da molti anni che il *redshift* non sia di natura cosmologica. Di questo si parla in un altro contributo del presente volume; qui mi limito a sottolineare che l'interpretazione standard è ampiamente confermata dalle numerose misure di distanza indipendenti dal *redshift*, mentre nessuna analisi statistica è riuscita a dimostrare che gli allineamenti di Arp non siano casuali.

Ma in che cosa consistono i modelli cosmologici relativistici? Attraverso la soluzione delle equazioni della relatività generale, a partire da alcune ipotesi semplificatrici, si ottengono dei modelli matematici che descrivono

la dinamica dell'universo; questi modelli sono definiti da un certo numero di parametri, legati alla costante di Hubble e ai contributi delle varie componenti di materia ed energia. L'ipotesi più importante alla base dei modelli standard è che l'universo sia omogeneo e isotropo, ovvero che la densità di materia ed energia abbia lo stesso valore in tutti i punti dello spazio, anche se può variare nel tempo, e che non esistano direzioni privilegiate. Da ciò deriva come conseguenza la legge di proporzionalità tra velocità di allontanamento e distanza delle galassie. Naturalmente l'ipotesi non è vera *localmente*: le galassie si trovano in gruppi ed ammassi, e vi sono strutture ancora più estese e grandi vuoti; ma si presume che a grandi scale l'universo sia omogeneo. Pietronero e collaboratori hanno messo in discussione questa convinzione, osservando che le proprietà statistiche sono quelle di una distribuzione frattale senza alcuna evidenza di una scala dell'omogeneità (Gabrielli *et al.*, 2005). La maggioranza dei cosmologi rimane però convinta dell'esistenza di questa scala, anche se la sua esatta definizione è difficile.

Fu lo stesso Einstein nel 1917 a proporre il primo modello cosmologico relativistico, in cui l'universo non ha limiti, ma ha un volume finito. Siccome un tale universo collaserebbe su se stesso per la propria gravità, Einstein introdusse nelle equazioni una costante, la celebre costante cosmologica, che assumendo un valore positivo ha l'effetto newtoniano di una forza repulsiva. Ben presto risultò però evidente che l'equilibrio era instabile e che comunque l'universo deve o contrarsi o espandersi, come dimostrato dal russo Alexander Friedmann nel 1922 e indipendentemente nel 1927 dal belga Georges Lemaître. In questi modelli l'omogeneità permette di definire un tempo cosmico, col quale si possono sincronizzare tutti gli osservatori semplicemente misurando lo stesso valore della densità.

Nei modelli cosmologici con sola materia e senza costante cosmologica, la densità di materia ρ determina sia la geometria dello spazio che l'evoluzione dinamica dell'universo. Se la densità è superiore ad una soglia critica ρ_c , allora l'universo è destinato in futuro a rallentare e fermare la propria espansione, per poi collasare su se stesso e la geometria dello spazio è l'equivalente tridimensionale della geometria su una superficie sferica: il volume dell'universo è finito, ma non ha limiti, come nel caso dell'universo di Einstein. Di solito si usa il rapporto fra densità dell'universo e densità critica per definire il parametro $\Omega = \rho/\rho_c$; in questo caso $\Omega > 1$, e si parla di universo "chiuso". Se l'universo ha invece una densità inferiore alla densità critica ($\Omega < 1$), allora, pur rallentando, è destinato ad espandersi per sempre, è infinito spazialmente ed ha una geometria iperbolica; infine, se l'universo ha esattamente la densità critica

($\Omega = 1$), allora esso è infinito e destinato ad espandersi per sempre ed ha una geometria euclidea (universo “piatto”). Il valore della densità critica è legato alla costante di Hubble: $\rho_c = 3H / (8\pi G)$, e all’epoca attuale vale circa 10^{-29} g/cm³.

Oggi però sappiamo che la costante cosmologica è diversa da zero: in questo caso rimane il legame fra densità e geometria, ma non quello fra densità ed evoluzione dinamica. Anticipiamo comunque che, dato il valore misurato della costante cosmologica, il destino dell’universo è quello di un’espansione accelerata e senza fine.

4. Il Big Bang

4.1. L’istante iniziale

Se l’universo è in espansione, allora nel passato le galassie dovevano essere più vicine fra loro. Andando indietro nel tempo, l’universo doveva essere sempre più caldo e denso, finché si arriva ad un’epoca in cui non potevano esistere le stelle, ma solo gli atomi, e prima solo i nuclei atomici, e così via fino ad arrivare alla remota epoca dei *quark*, le particelle elementari che costituiscono i protoni e i neutroni. Lemaître suggerì nel 1931 che l’universo fosse nato dalla frammentazione di “un atomo primordiale”, un’idea che rappresenta il primo passo verso la teoria del Big Bang (curiosamente ebbe un’idea molto simile, in versione newtoniana, lo scrittore americano Edgar Allan Poe, il quale nel 1848 sostenne che l’universo fosse nato dalla frammentazione di una particella primordiale; si veda Cappi, 1994). Andando ancora a ritroso nel tempo, si giunge ad un istante iniziale in cui la densità era infinita: è la singolarità iniziale, inevitabile nell’ambito della relatività generale. Il tempo cosmico viene misurato a partire da questo istante iniziale, che rimane però un’extrapolazione dei modelli: infatti la relatività generale non è più applicabile quando gravità e fenomeni quantistici divengono entrambi importanti su scale microscopiche. Per questo motivo è in corso già da molti anni un intenso lavoro teorico, su strade diverse, per edificare una nuova teoria che concili la teoria quantistica e la relatività generale. Una strada è quella della *Loop Quantum Gravity* (Rovelli, 2011); l’altra strada, molto più popolare, è la *String Theory*, o Teoria delle Stringhe (Mukhi, 2011).

4.2. Le conferme

Big Bang, o “grande botto”, è un termine che voleva essere spregiativo, coniato negli anni ‘50 da Fred Hoyle, il quale era scettico e filosoficamente ostile all’idea di un inizio dell’universo e concepì insieme a Bondi e Gold una teoria alternativa, la teoria dello Stato Stazionario, in cui l’universo esiste da sempre ed è in continua espansione, ma vi è creazione continua di materia che mantiene la sua densità costante nel tempo (per una storia della controversia fra le due teorie si veda Kragh, 1999). Le osservazioni hanno confutato la teoria dello Stato Stazionario mostrando che l’universo nel passato era diverso da come è nel presente.

La teoria del *Big Bang* descrive l’evoluzione dell’universo a partire da una fase primordiale ad alta densità e temperatura. Diverse e convincenti sono le conferme della sua validità, in particolare la spiegazione della formazione degli elementi leggeri e la predizione delle loro abbondanze. Infatti, attorno al primo secondo dopo il *Big Bang*, la temperatura era di 10 miliardi di gradi, e l’universo era popolato da protoni, neutroni, elettroni, fotoni, e neutrini. Non solo la densità, ma anche la temperatura era molto elevata. Per qualche minuto vi fu una serie di reazioni nucleari che portò alla formazione di nuclei di elio e, in misura minore, di altri elementi leggeri. Le abbondanze osservate di questi elementi sono in buon accordo con quelle previste dalla teoria, anche se c’è attualmente un problema riguardante l’abbondanza osservata del Li^7 , che è 3-4 volte inferiore alle predizioni della nucleosintesi primordiale sulla base della densità di barioni (un termine che propriamente definisce le particelle composte da tre quark come protoni o neutroni) stimata attraverso le misure della radiazione cosmica di fondo effettuate dal satellite della NASA WMAP. Vi sono comunque diverse possibili spiegazioni: errori sistematici nelle misure, risonanze poco note nelle reazioni nucleari, o forse nuova fisica (Fields, 2011). Col procedere dell’espansione, e la diminuzione di densità e temperatura (la temperatura della radiazione è inversamente proporzionale al fattore di espansione), la nucleosintesi primordiale si è arrestata senza poter produrre gli elementi pesanti, che troviamo in abbondanza sulla Terra e che sono essenziali per la vita, come il carbonio, l’azoto o l’ossigeno. Questi elementi sono invece stati prodotti dalla fusione nucleare all’interno delle stelle e diffusi nello spazio dall’esplosione delle stelle di grande massa (supernovae).

Circa 380.000 anni dopo l’istante iniziale, la temperatura divenne sufficientemente bassa, attorno al migliaio di gradi, da permettere ad elettroni e protoni di legarsi stabilmente, formando atomi di idrogeno: questa è detta l’epoca della ricombinazione. Soltanto allora i fotoni poterono

propagarsi liberamente nello spazio e l'universo divenne "trasparente". Oggi continuiamo ad essere circondati da quei fotoni che, perdendo energia durante l'espansione, si trovano ora ad una temperatura di 2,73 gradi sopra lo zero assoluto, e costituiscono la cosiddetta radiazione cosmica di fondo. Questa radiazione fu scoperta casualmente nel 1965: il suo spettro di corpo nero e la sua isotropia confermano le predizioni della teoria del *Big Bang*. In particolare la proprietà di isotropia è in accordo con l'ipotesi che l'universo su grandi scale sia omogeneo. Al tempo stesso, nel 1992 il satellite COBE della NASA ha rivelato piccole fluttuazioni, di ampiezza 10^{-5} rispetto alla temperatura media, corrispondenti alle fluttuazioni primordiali di densità da cui sono nate, per accrescimento gravitazionale, le grandi strutture osservate. Nel 2000, le osservazioni condotte con un pallone-sonda in Antartico (esperimento italo-americano BOOMERANG, de Barnardis *et al.*, 2000) hanno misurato le fluttuazioni su scale più piccole, e rivelato la traccia delle oscillazioni acustiche del plasma all'epoca della ricombinazione: l'analisi di queste tracce permette di ricavare preziosissime informazioni sui parametri cosmologici, tra le quali la densità totale di materia, che è risultata pari² alla densità critica: dunque lo spazio ha una geometria euclidea. Dopo il già citato satellite della NASA WMAP, il satellite europeo PLANCK ha ottenuto misure ancora più precise della radiazione cosmica di fondo.

4.3. Formazione delle galassie e materia oscura

Abbiamo visto che l'universo locale non è omogeneo: negli ultimi decenni sono state osservate strutture complesse, grandi vuoti e filamenti di galassie, su scale di 100 milioni di anni-luce. La presenza di fluttuazioni nella radiazione cosmica di fondo conferma lo scenario dell'accrescimento gravitazionale delle strutture, ma c'è un problema con la loro ampiezza. Infatti le fluttuazioni sono così piccole, che non ci sarebbe stato il tempo per formare le galassie e le strutture che si osservano oggi con la sola materia barionica. È qui che si rende necessario l'intervento della materia oscura.

Nell'universo è effettivamente presente una grande quantità di materia che noi non vediamo, ma che possiamo rivelare indirettamente studiando il

² L'impressionante lista dei parametri cosmologici misurati da WMAP, in combinazione con altri tipi di osservazione, si veda <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/parameters.cfm>. La pagina web della missione Planck è invece al seguente indirizzo: <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=Planck>.

moto delle stelle e del gas nelle galassie, o delle galassie stesse negli ammassi. Si stima che nelle galassie vi sia ~10 volte più massa di quella che noi possiamo osservare sotto forma luminosa. Negli ammassi di galassie si misura addirittura una massa ~100 volte superiore a quella visibile sotto forma di galassie. Parte di questa materia oscura è gas caldo che si rende visibile soltanto alle osservazioni nella banda X, ma la maggior parte non può essere materia barionica, a causa dei limiti imposti dalla nucleosintesi primordiale. I neutrini sono un candidato possibile per la materia oscura, ed in effetti recenti esperimenti mostrano che sono dotati di massa, ma questa è troppo piccola per dare un contributo cosmologico dominante; inoltre si muovono a velocità relativistiche, il che non permette loro di formare strutture a piccola scala. Si ritiene invece che la materia oscura sia per la maggior parte costituita da particelle più massicce, suggerite dalle estensioni al modello standard della fisica delle particelle (il neutralino, oppure il neutrino sterile, per citarne un paio). In astrofisica, si parla di *Cold Dark Matter* (CDM), Materia Oscura Fredda, per indicare questa componente di materia ancora ignota, che si deve muovere a velocità non relativistiche e non interagisce se non attraverso la gravità. Questo tipo di materia avrebbe dunque cominciato a formare concentrazioni di materia per accrescimento gravitazionale prima della ricombinazione, senza provocare variazioni della temperatura della radiazione cosmica di fondo. Dopo la ricombinazione, le buche di potenziale degli aloni di materia oscura già formati avrebbero poi attratto la materia barionica, portando alla nascita di stelle e galassie. Grazie agli aloni di materia oscura, il processo di formazione delle strutture è dunque risultato accelerato. Per questo tipo di studi sono fondamentali le simulazioni numeriche, che permettono di riprodurre la formazione delle strutture e di confrontarne le proprietà statistiche con l'universo osservato.

5. L'inflazione

La cosmologia classica lascia però senza risposta un certo numero di interrogativi, legati sostanzialmente al fatto che assume come condizioni iniziali alcune importanti e specifiche proprietà del nostro universo. Rimangono in particolare prive di giustificazione: la presenza di fluttuazioni di densità in un universo che viene peraltro considerato omogeneo, e la loro origine; il fatto che in regioni distanti di universo, le quali secondo i modelli classici non avrebbero mai avuto alcun contatto causale, si misuri la stessa temperatura della radiazione cosmica di fondo; la piattezza della geometria dell'universo. Una spiegazione è invece data dalla teoria dell'inflazione,

nella quale si ipotizza che nei primi istanti dopo il *Big Bang* l'universo abbia avuto una fase di espansione accelerata. In tal caso, una regione microscopica di spazio avrebbe potuto dare origine a quello che oggi è l'intero universo osservabile, e qualunque regione noi oggi possiamo osservare sarebbe stata in contatto causale con le altre nel passato: ciò spiega l'alto grado di isotropia della radiazione cosmica di fondo. Inoltre, l'espansione rapidissima avrebbe reso trascurabile la curvatura spaziale rendendo piatta la geometria dell'universo. Infine, le particelle eventualmente presenti prima dell'inflazione (come i monopoli magnetici), sarebbero state diluite a tal punto da risultare inosservabili, mentre la materia che è oggi presente nell'universo si sarebbe formata dopo la fine di questa espansione esponenziale. Naturalmente l'inflazione è basata su un possibile processo fisico: potrebbe essere stata causata da una transizione di fase nell'universo primordiale, forse quella che ha portato alla rottura della Supersimmetria, associata all'esistenza di un campo scalare che, avendo pressione negativa, ha l'effetto repulsivo di una costante cosmologica.

Una predizione chiave della teoria è la forma dello spettro delle perturbazioni di densità iniziali, che risulta in accordo con le misure della radiazione cosmica di fondo. L'inflazione è divenuta così un'estensione "standard" del modello standard, anche se ne esistono numerose versioni.

6. L'accelerazione dell'Universo

L'attuale modello standard ha uno dei suoi fondamenti osservativi più importanti nella scoperta dell'accelerazione dell'universo.

Dati i parametri di un modello cosmologico (H_0 , densità di materia, densità di energia) si ha una relazione fra *redshift* e distanza. Cambiando i parametri del modello, cambia la relazione. Per determinare dunque qual è il modello che descrive il nostro universo si può utilizzare una classe di oggetti di luminosità intrinseca nota, in modo tale che misurando la luminosità apparente se ne possa determinare la distanza indipendentemente dal *redshift*. In un diagramma distanza – *redshift*, i punti seguono una certa curva, e il confronto con i vari modelli permette di determinare qual è quello che meglio si accorda con le osservazioni. Le Cefeidi possono essere osservate solo in galassie relativamente vicine e sono state utili per la determinazione della costante di Hubble, ma per andare oltre occorre un'altra classe di oggetti: le Supernovae.

Le Supernovae sono suddivise in due grandi classi, in base all'assenza (classe I) o alla presenza (classe II) delle righe dell'idrogeno nel loro spettro.

Nel 1985 fu identificata una sottoclasse della classe I, definita Ia, caratterizzata dalla presenza della riga del silicio ionizzato a 6150 Å. Si ritiene che una supernova di tipo Ia abbia origine dall'esplosione termonucleare di una nana bianca in un sistema binario, nel momento in cui la nana bianca riceve dalla sua compagna una quantità di materiale tale da farle superare la massa limite di Chandrasekhar di 1,4 masse solari. Queste supernovae raggiungono tutte un valore simile di luminosità al loro massimo, con una dispersione del 40%, dovuta alle differenze di composizione dell'atmosfera delle nane bianche. Il massimo di luminosità è però correlato con la curva di luce: maggiore è la luminosità massima, maggiore è il tempo di decadimento della curva di luce. Riscaldando dunque la curva di luce, si ottiene un indicatore di distanza quasi ideale. Verso la fine degli anni Novanta, due gruppi indipendenti hanno compiuto osservazioni sistematiche di Supernovae Ia, scoprendo che la luminosità apparente delle supernovae lontane è più debole di quella predetta da un modello che contiene solo materia. Ciò indica che esse sono più lontane del previsto, e che l'espansione sta accelerando: il modello che descrive meglio i dati è proprio quello con una costante cosmologica positiva. Queste osservazioni sono ben riprodotte da un modello piatto alla cui densità contribuiscono per il 25% la materia e per il 75% l'energia legata alla costante cosmologica (Leibundgut, 2001). Studi più recenti hanno confermato questi risultati.

Come gli elementi di un puzzle, diverse osservazioni convergono nel fornire un quadro coerente: le misure della materia rivelata direttamente o indirettamente, luminosa od oscura, presente nell'universo, confermano che la densità di materia è circa il 25% della densità critica; l'analisi della radiazione di fondo dà un valore della densità totale di materia pari alla densità critica; mentre grazie alle Supernovae sappiamo che più del 70% della densità non è materia, ma una forma di energia che sta facendo accelerare l'universo. Dato il valore attuale della costante di Hubble (~70 km/s/Mpc), un modello con densità critica ma senza costante cosmologica darebbe un'età dell'universo troppo piccola (meno di 10 miliardi di anni) se confrontata con quella delle stelle più vecchie; con il valore misurato della costante cosmologica l'età dell'universo risulta invece essere pari a circa 13,8 miliardi di anni.

7. La costante cosmologica e le sue alternative

7.1. Il problema della costante cosmologica

Per chi voglia approfondire i problemi che qui passerò rapidamente in rassegna, mi limito a segnalare il libro introduttivo ed accessibile di Gasperini (2008) sulla cosmologia basata sulla teoria delle Supercorde e quello specialistico di Amendola e Tsujikawa (2010) sull'energia oscura.

L'interpretazione più immediata dell'accelerazione dell'espansione e della componente dominante della densità dell'universo è la costante cosmologica. Infatti nelle equazioni di Einstein, la costante cosmologica Λ rappresenta la curvatura dello spazio-tempo, in assenza di materia ed energia. Ma in maniera del tutto equivalente può essere spostata al membro destro delle equazioni ed inglobata nel tensore energia-impulso: è così possibile interpretarla come l'energia dello vuoto. L'effetto repulsivo è dovuto alla presenza di un termine di pressione: il contributo all'accelerazione o decelerazione dell'espansione dipende infatti da un termine $-(\rho + 3 P/c^2)$. Per la materia, $P=0$, dunque il termine vale $-\rho$, dove il segno meno indica una decelerazione; per la costante cosmologica l'equazione di stato è $P = -\rho c^2$, e si ha dunque un contributo netto di segno opposto alla materia pari a $+2\rho$, ovvero una repulsione.

Per quanto riguarda il valore dell'energia del vuoto, le osservazioni implicano:

$$\rho_{\Lambda} \equiv \Lambda / (8 \pi G) \leq 2 \times 10^{-10} \text{ erg/cm}^3$$

Il valore dell'energia del vuoto che ci si aspetterebbe invece dalla teoria assumendo un taglio alla scala dell'energia di Planck, è invece:

$$\rho_{\text{Planck}} \sim 2 \times 10^{110} \text{ erg/cm}^3$$

Data l'enorme differenza di 120 ordini di grandezza, il valore dell'energia del vuoto è talvolta citato come la più errata predizione nella storia della fisica!

Un secondo possibile problema è la coincidenza che la densità di energia del vuoto appaia oggi paragonabile (in realtà circa due volte superiore) alla densità di energia della materia. Infatti, mentre la densità di energia del vuoto rimane costante nel tempo, la densità di materia cala in proporzione all'inverso del cubo del fattore di espansione.

In passato, dunque, la densità di materia era la componente dominante ed ha inizialmente rallentato l'espansione, e solo a partire da un redshift di circa 0.7 è prevalso l'effetto repulsivo della densità dell'energia oscura.

7.2. La quintessenza

Dati i problemi posti dalla costante cosmologica, sono state e sono attualmente esplorate strade alternative. Una di queste ricorre all'ipotesi di un nuovo campo scalare: in effetti, se è concepibile che un campo scalare abbia prodotto in passato un'accelerazione dell'espansione, perché non cercare una spiegazione analoga anche per l'epoca attuale? A differenza della costante cosmologica, la densità di energia associata a questo campo è variabile nello spazio (a grandi scale) e nel tempo. Questa ipotetica componente dell'universo è stata battezzata con il nome di "quintessenza", il nome latino del quinto elemento aristotelico. L'evoluzione nel tempo della densità di energia del campo scalare potrebbe essere legata a quella della materia (*tracking solution*), una proprietà che serve a spiegare i valori attualmente simili della densità di materia e di quella dell'energia oscura, senza però eliminare la coincidenza legata al fatto che l'accelerazione è cominciata recentemente. Come nel caso dell'inflazione, si possono immaginare numerosi modelli di quintessenza, che danno luogo a diverse equazioni di stato: analogamente alla costante cosmologica, anche la quintessenza ha pressione negativa, ma il rapporto fra pressione e densità, $w=P/c^2$, è superiore a -1 e inferiore a -1/3 (che è la condizione per cui ci sia l'accelerazione dell'espansione), e può variare col tempo. I limiti osservativi impongono un valore di w molto vicino a -1, ovvero molto simile a quello corrispondente alla costante cosmologica.

7.3. Modifiche alla gravità

Sappiamo che la relatività generale non può essere la teoria ultima, dato che non include i fenomeni quantistici ed è inapplicabile a scale microscopiche (dunque agli istanti iniziali del Big Bang o al centro di un buco nero), e può essere vista come una teoria efficace. La domanda è allora se gli effetti che attribuiamo all'energia oscura non richiedano invece un'altra teoria della gravità. Ci sono diversi approcci in questa direzione: abbiamo le teorie scalari-tensoriali (il cui esempio storico è la teoria di Brans-Dicke), e quelle $f(R)$, dove l'azione di Einstein-Hilbert non dipende direttamente dallo scalare di Ricci R ma da una sua funzione $f(R)$.

È possibile poi che l'interpretazione della costante cosmologica richieda un salto concettuale più radicale, come quello costituito dai modelli di universo a brana (*braneworld models*). L'idea che vi siano altre dimensioni oltre alle quattro (tre spaziali e una temporale) previste dalla relatività fu avanzata nel 1919 dal matematico tedesco Theodor Kaluza e ripresa dal fisico svedese Oskar Klein nel 1926. Il loro contributo ha rappresentato un tentativo fallito di unificare relatività ed elettromagnetismo, ma si è invece rivelato fruttuoso nell'ambito della Supersimmetria e della teoria delle Supercorde, dove le particelle non sono più rappresentate come dei punti ma come corde in vibrazione.

Lo sforzo di cercare una teoria fondamentale che unifichi la gravità alle altre interazioni fondamentali ha condotto allo sviluppo della teoria M, che unifica le precedenti versioni della teoria delle supercorde e la supergravità, e nella quale lo spazio-tempo ha 11 dimensioni, 10 spaziali e una temporale. Il motivo per cui non ci accorgiamo dell'esistenza di dimensioni supplementari riprende l'idea già avanzata a suo tempo da Klein: le dimensioni "extra" sono compatte, e lo spazio ci appare a tre dimensioni semplicemente perché le dimensioni supplementari sono troppo piccole per essere percepite.

Si arriva così all'idea che il nostro universo sia una "ipersuperficie" (detta brana, una generalizzazione di membrana) a tre dimensioni spaziali in uno spazio a più dimensioni, detto *bulk*. Un aspetto importante di questo scenario è che le interazioni fisiche operano solo sulla nostra brana e non si diffondono nel *bulk*, tranne la gravità (e qualche particella esotica). Si giustifica così anche il fatto che la gravità sia un'interazione fondamentale così debole rispetto alle altre tre. 6 dimensioni spaziali possono essere compatte, lasciando dunque uno spazio-tempo a 4 dimensioni spaziali e una temporale. I vincoli sull'extra-dimensione spaziale sono dati dalle deviazioni dalla legge di gravitazione universale, verificata fino alla scala di un millimetro. Questi vincoli possono però essere aggirati: nel modello di Randall-Sundrum, ad esempio, la geometria dello spazio-tempo del *bulk* non è piana e il *bulk* ha una costante cosmologica negativa: in questo modo, sulla brana le deviazioni della legge di Newton rimangono piccole e in accordo con i limiti sperimentali anche se l'extra dimensione è infinita. In questo scenario, la costante cosmologica positiva da noi misurata è il residuo della somma fra la costante cosmologica negativa del *bulk* e la tensione della nostra brana. Però, sotto un'altra forma, si ritrova una coincidenza: come mai la costante cosmologica del *bulk* e quella della brana si compensano quasi esattamente? Un altro modello, quello epirotico di

Steinhardt e Turok (2002), reinterpreta il *Big Bang* come lo scontro fra due brane e resuscita l'idea di un universo oscillante.

Come è evidente, queste proposte sono altamente speculative, ed appare prematuro dare molto credito a modelli che non sono basati su una teoria coerente e pienamente sviluppata. Per discriminare i vari modelli proposti, un test importante è la misura del valore del parametro w nell'equazione di stato, ad esempio attraverso la misura della distorsione delle immagini delle galassie dovuta all'effetto di lente gravitazionale della distribuzione di materia che si trova fra noi e la galassia osservata (*weak gravitational lensing*) oppure misurando la correlazione e lo spettro di potenza delle galassie in un vasto volume dell'universo; in questo quadro, il progetto più importante è la missione spaziale EUCLID dell'ESA, che ha una significativa partecipazione italiana (Cimatti e Scaramella, 2012).

7.4. Vuoto e *Backreaction*

Veniamo ora a quello che nella lista di possibilità elencate rappresenta una sorta di *anticlimax*: supponiamo che l'energia oscura non esista e che la relatività generale sia corretta: è possibile trovare altre giustificazioni dell'accelerazione dell'universo? La risposta è in linea di principio affermativa.

Una possibile spiegazione è che noi ci troviamo in una regione dell'universo di densità inferiore alla media: un grande vuoto, insomma. Di conseguenza questa regione si espanderebbe più rapidamente del resto dell'universo. Ma siccome osservando più lontano andiamo indietro nel tempo, avremmo l'illusione che nel passato l'universo si espandesse più piano: staremmo confondendoci, in sostanza, fra spazio e tempo. Ci sono naturalmente limiti imposti da altre osservazioni, in particolare da quelle della radiazione cosmica di fondo. Naturalmente una caratteristica non appetibile di questa ipotesi è la sua natura "anticopernicana".

Un'altra possibile spiegazione è data dalla *backreaction*, che riguarda gli effetti dovuti alle disomogeneità sull'espansione. Infatti, come si è visto, i modelli cosmologici attraverso i quali stimiamo distanze e tempi a partire dalle quantità osservate sono soluzioni delle equazioni della relatività generale valide per un fluido omogeneo e isotropo. Però l'universo ha progressivamente sviluppato delle disomogeneità: forse otterremmo risultati diversi se prima risolvessimo le equazioni della relatività generale per un universo non omogeneo e facessimo la media successivamente. Secondo alcuni, le deviazioni dalla metrica di Robertson-Walker potrebbero effettiva-

mente produrre un effetto di accelerazione. Ci sono però sottili problemi tecnici ed è in corso un dibattito sulla reale rilevanza della *backreaction* per il problema dell'accelerazione.

8. Il principio antropico

Il principio antropico, la cui storia si ritrova nel classico libro di Barrow e Tipler (1988), sembrava inizialmente destinato a rimanere ai margini del dibattito scientifico, in una confusione di interpretazioni e varianti diverse (Bettini, 2001). Negli ultimi anni si è definita invece una ben precisa applicazione del principio antropico legata al concetto di multiverso, che ritengo abbia una sua plausibilità e non a caso è vista quantomeno con favore da molti specialisti.

Il principio copernicano (che, sia detto per inciso, non sarebbe certamente stato sottoscritto da Copernico) afferma che noi *non* siamo *osservatori privilegiati* nell'universo. Ma al tempo stesso *non* ci troviamo in un *luogo qualunque* dell'universo, indistinguibile da qualsiasi altro luogo. Siamo in orbita attorno ad una stella di tipo G vecchia di alcuni miliardi di anni, su un pianeta nella fascia di abitabilità, dove l'acqua si trova nelle tre fasi solida, liquida e gassosa. Tralasciando la possibilità che la vita possa nascere in condizioni completamente diverse da quelle terrestri, possiamo assumere che noi non siamo in condizioni privilegiate o diverse rispetto ad altri osservatori nell'universo, ma che al tempo stesso gli osservatori risiedono in regioni di universo che sono speciali rispetto ad altre: in sintesi, *essere un osservatore qualunque non significa essere in un luogo qualunque e in un tempo qualunque*.

L'accento posto sulla peculiarità delle condizioni che consentono la vita è alla base del principio antropico debole: i valori di tutte le quantità fisiche e cosmologiche che misuriamo non sono ugualmente probabili, ma sono vincolati dal fatto che devono esistere luoghi in cui la vita basata sul carbonio ha potuto evolvere e che l'universo deve essere abbastanza vecchio da aver permesso questa evoluzione. Si noti dunque che, contrariamente a quanto generalmente si afferma, il principio copernicano e quello antropico non sono in contraddizione, ma complementari: il principio copernicano riguarda l'equivalenza degli osservatori, mentre il principio antropico riguarda la specificità delle condizioni in cui si trovano gli osservatori rispetto al resto dell'universo.

In questa sua forma non controversa, il principio antropico permette di giustificare alcune coincidenze numeriche che sembrerebbero altrimenti

sorprendenti. Un esempio spesso citato è la predizione dell'esistenza di un livello di risonanza del carbonio da parte di Fred Hoyle. Il carbonio, che è fondamentale per l'esistenza della vita sulla Terra, è prodotto all'interno delle stelle, ma negli anni '50 i calcoli mostravano che le reazioni coinvolte nella sua produzione erano troppo lente per giustificare l'abbondanza osservata. Hoyle intuì che si doveva ipotizzare l'esistenza di un livello di risonanza ad una energia ben precisa che rendesse efficienti quelle reazioni, e indusse i fisici a verificarne l'esistenza, che fu poi confermata. Questo esempio ci porta ad affrontare un aspetto più profondo del principio antropico. Una leggera differenza di energia della risonanza avrebbe infatti portato all'assenza di carbonio; ma in ultima analisi quella risonanza dipende dal valore delle costanti fondamentali. L'esempio è tutt'altro che unico o isolato: i cosmologi si sono da tempo resi conto che, se i valori delle costanti fondamentali della fisica fossero diversi anche di poco, non si avrebbe un universo con le condizioni necessarie per la nascita della vita. Si può obiettare che è difficile prevedere tutte le possibili combinazioni ottenibili variando tutte le costanti fisiche: sembra però probabile che i valori che permettono l'esistenza della vita (naturalmente si sottintende che si arrivi alla vita intelligente e ad osservatori dotati di autocoscienza) siano molto rari. Una di queste costanti è proprio la costante cosmologica: se il suo valore fosse stato un po' maggiore, l'universo avrebbe cominciato subito la sua espansione accelerata e non vi sarebbe stato il tempo per la nascita delle galassie. Di qui la versione forte del principio antropico, secondo la quale le costanti fondamentali della fisica *devono* avere dei valori che permettono la nascita della vita intelligente in qualche momento della storia dell'universo. Ma che cosa significa questa affermazione? Escludendo l'interpretazione teologica, dunque extrascientifica, rimane un'interpretazione di tipo statistico. L'ipotesi è che possano esistere altri universi, e che i valori delle costanti della fisica possano variare da un universo all'altro (si veda Carr, 2007). Naturalmente c'è stata una forte riluttanza a considerare seriamente un'ipotesi del genere, che si è progressivamente affermata per mancanza di alternative. Infatti si è visto che la teoria delle Supercorde non appare in grado di spiegare in maniera univoca le proprietà del nostro universo: predice anzi una quantità enorme, $\sim 10^{500}$, di possibili universi con proprietà fisiche differenti, e non appare in grado di poter selezionare da questo cosiddetto "Paesaggio" (*Landscape*) i valori che corrispondono al nostro universo: ad esempio il valore piccolo ma non nullo della densità di energia del vuoto. Si può allora pensare che tutte queste possibilità del Paesaggio si realizzino in diversi universi, ad esempio

attraverso l'inflazione caotica di Andrei Linde, dove, essendo il vuoto metastabile, si generano a cascata nuovi universi (Susskind, 2003).

Se i valori delle costanti fondamentali non sono dunque rigidamente determinati da una teoria fondamentale, ma possono variare secondo una legge probabilistica da universo a universo, il risultato è che, per quanto improbabili siano i valori che portano alla formazione della vita, per un evidente principio di selezione solo questi potranno essere osservati: negli altri universi, rimasti sterili, non vi sarà invece nessuno che li possa osservare. Un esempio è proprio il valore della costante cosmologica, predetto da Steven Weinberg piccolo ma non nullo proprio sulla base di un ragionamento antropico (Weinberg, 1989).

9. Conclusioni

Abbiamo visto gli straordinari progressi della cosmologia negli ultimi decenni. I risultati ottenuti dal confronto fra osservazioni, teoria e simulazioni hanno decretato il successo di quello che viene definito il modello standard o “*concordance model*” e indicato come Λ CDM, dato che è caratterizzato dalla presenza di una costante cosmologica e della materia oscura fredda. Quasi ironicamente, però, il modello cosmologico standard richiede una fisica non standard, ponendoci di fronte a profondi problemi riguardanti la natura delle componenti di materia ed energia che sono dominanti nell’universo e di cui ignoriamo la natura. Al tempo stesso, le nostre osservazioni sono limitate dalla distanza alla quale è stata emessa la radiazione cosmica di fondo che riceviamo oggi da tutte le direzioni e che costituisce un ultimo orizzonte; questa situazione ricorda quella degli antichi astronomi di fronte alla sfera delle stelle fisse, anche se in quel caso il limite era illusorio.

Si può constatare un cambiamento di attitudine filosofica nel campo della cosmologia scientifica. In effetti, all’epoca della cosmologia classica e del dibattito fra teoria dello stato stazionario e *Big Bang*, vi era la convinzione diffusa che con la teoria della relatività generale si potesse arrivare ad una descrizione dell’universo nella sua totalità, e che non avesse senso chiedersi che cosa ci fosse prima del *Big Bang*. Ora però, nel corso di un processo che è già avvenuto in passato, ad esempio quando si è scoperto che la nostra galassia non rappresentava l’intero universo ma che certe nebulose erano altre galassie (non a caso battezzate per un certo periodo universi-isola), si affaccia l’ipotesi dell’esistenza di altri universi, con proprietà differenti dal nostro, portando ad una confusione semantica dovuta

al fatto che chiamiamo universo qualcosa che non è la totalità di ciò che esiste.

Ho il sospetto che questo sia il limite autentico della cosmologia scientifica. La scienza, contrariamente alle affermazioni di quei cosmologi che affermano di spiegare la nascita dell'universo dal nulla, ignari evidentemente della lezione di Parmenide, permette invece di ipotizzare la nascita dell'universo dal vuoto: un vuoto fisico, brulicante di particelle virtuali, descritto da leggi fisiche e dunque legato all'Essere, non al Nulla. Ma allorché la scienza cerca di spiegare la nascita dell'universo da qualcos'altro, inevitabilmente questo qualcos'altro ci obbliga a ridefinire la nostra idea di totalità.

Non vi è dubbio, comunque, che se in futuro nuove teorie ci offriranno una nuova visione dell'universo, la teoria del *Big Bang* rimarrà una descrizione valida entro i suoi limiti, così come entro i suoi limiti la fisica newtoniana rimane ancora oggi una valida descrizione del mondo fisico che ci circonda.

Riferimenti bibliografici

Amendola, L., & Tsujikawa, S., 2010, *Dark Energy: Theory and Observations*, Cambridge, Cambridge University Press.

Barrow J., & Tipler F., 1988, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford, Oxford University Press.

Bettini, S., 2001, *Il labirinto antropico*. On-line:
www.swif.uniba.it/lei/saggi/antropico/indice.htm

Bonometto, S., 2008, *Cosmologia e Cosmologie*, Bologna, Zanichelli.

Cappi, A., 1994, "Edgar Allan Poe's Physical Cosmology", *The Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 35, pp. 177-192.

Carr, B. (ed.), 2007, *Universe or Multiverse?*, Cambridge, Cambridge University Press.

Cimatti, A., & Scaramella, R., 2012, "Euclid: a Space Survey Mission for Dark Energy and High Precision Cosmology", *Memorie della Società Astronomica Italiana*, vol. 19, p. 314. On-line:
<http://sait.oat.ts.astro.it/MSAIS/19/PDF/314.pdf>

- de Bernardis, P., *et al.* 2000, *Nature*, 404, pp. 955-959.
- Fields, B.D., 2011, “The Primordial Lithium Problem”, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol.61, pp. 47-68 (arXiv:1203.3551v1).
- Freeth T. *et al.* 2006, “Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism”, *Nature*, 444, p. 587.
- Gabrielli, A., & Sylos Labini, F., & Joyce, M., & Pietronero, L., 2005, *Statistical Physics for Cosmic Structures*, Singapore, Springer.
- Gasperini M., 2008, *The Universe before the Big Bang: Cosmology and String Theory*, Singapore, Springer.
- Harrison, E., 1989, *Darkness at Night. A Riddle of the Universe*, Harvard, Harvard University Press.
- Kragh, H., 1999, *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*, Princeton, Princeton University Press.
- Leibundgut, B., 2001, “Cosmological Implications from Observations of Type Ia Supernovae”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol.39, pp. 67-98.
- Mukhi, S., 2011, *String Theory: a Perspective over the Last 25 Years*, Classical and Quantum Gravity 28 153001 (arXiv:1110.2569).
- Rovelli, C., 2011, *Quantum Loop Gravity: the First 25 Years*, Classical and Quantum Gravity, 28 153002 (arXiv:1012.4707).
- Russo, L., 1999, *La rivoluzione dimenticata*, Milano, Feltrinelli (*The Forgotten Revolution*, Singapore, Springer-Verlag, 2004).
- Steinhardt, P.J., & Turok, N., 2002, *Science*, 296, p. 1436.
- Susskind, L., 2003, “The Anthropic Landscape of String Theory”, *The Davis Meeting On Cosmic Inflation*, p. 26 (arXiv:hep-th/0302219).
- Weinberg, S., 1989, “The Cosmological Constant Problem”, *Review of Modern Physics*, 61, p. 1.

Quasar, redshift e controversie: l'espansione dell'universo è da rivedere?*

Giovanni Macchia
Università di Urbino "Carlo Bo"
lucbian@hotmail.com

On the other hand, if the interpretation as velocity-shifts is abandoned, we find in the red-shifts a hitherto unrecognized principle whose implications are unknown.

Edwin Hubble¹

You could write the entire history of science in the last 50 years in terms of papers rejected by Science or Nature.

Paul C. Lauterbur²

1. Introduzione: una lettera aperta indirizzata a menti chiuse

Il 22 maggio 2004, su *New Scientist*, viene pubblicata da Eric Lerner una *Lettera aperta alla comunità scientifica* dal titolo *Bucking the Big Bang*³. In essa numerosi scienziati lanciano i propri strali contro il modello standard

* Ringrazio Massimo Sangoi per aver migliorato alcune immagini. Le citazioni di testi che in bibliografia compaiono nella sola lingua straniera d'origine sono state da me tradotte.

¹ *The Realm of the Nebulae*, Dover Publications, New York, 1936, 201.

² *The New York Times* del 7/10/2003. Chimico americano, Premio Nobel per la medicina nel 2003 per le sue ricerche che hanno reso possibile lo sviluppo della tomografia a risonanza magnetica, e il cui articolo seminale su questo argomento fu rifiutato dalla prestigiosa rivista *Nature*.

³ *New Scientist* n. 2448, p. 20 (si noti che *Nature* l'ha rifiutata). Il testo della lettera e l'elenco dei primi firmatari sono disponibili anche all'indirizzo:
<http://www.cosmologystatement.org/>.

Giovanni Macchia, "Quasar, redshift e controversie: l'espansione dell'universo è da rivedere?", in Isabella Tassani (a cura di), *Oltre la fisica normale. Interpretazioni alternative e teorie non standard nella fisica moderna*, pp. 115-180.

© 2013 Isonomia, Rivista online di Filosofia – Epistemologica – ISSN 2037-4348
Università degli Studi di Urbino Carlo Bo
<http://isonomia.uniurb.it/epistemologica>

della cosmologia moderna, comunemente chiamato *big bang*, e ovviamente contro la comunità scientifica che lo sostiene⁴. Tale modello, essi affermano, si sostiene su un numero sempre più alto di entità mai rilevate – *in primis* l'inflazione, la materia oscura, e l'energia oscura – senza le quali esso non potrebbe sopravvivere a causa delle fatali contraddizioni fra le sue predizioni e le osservazioni fatte dagli astronomi⁵. In qualsiasi altro campo della fisica questo continuo ricorso a nuove entità del tutto ipotetiche solleverebbe seri dubbi sulla validità del modello, eppure ciò non accade in cosmologia, i cui ambiti di ricerca sono ormai monopolizzati dagli studi a favore del big bang. Non solo: il big bang non può vantarsi nemmeno di predizioni quantitative successivamente validate da osservazioni, al più è stato in grado di adattare *retrospettivamente*, grazie al continuo aggiustamento dei suoi parametri, le osservazioni, arrivando così a somigliare a una sorta di moderna versione della cosmologia tolemaica, che, come noto, fu tenuta in piedi, facendola combaciare con le osservazioni, grazie a continue aggiunte di epicicli⁶. Accade così che questo sistema “big bang centrico”

⁴ È risaputo che secondo tale modello l'universo è nato circa 13.7 miliardi di anni fa da una “grande esplosione”, appunto il big bang, che da un punto infinitesimo inimmaginabilmente caldo e denso ha dato origine a spazio, tempo e materia, e da allora l'universo è in espansione.

⁵ Senza l'inflazione il big bang non è in grado di predire l'altissima isotropia misurata nella radiazione cosmica di background, senza materia oscura esso non riesce a spiegare le misurazioni riguardanti la densità di materia nell'universo, e senza energia oscura l'universo risulterebbe avere soltanto circa 8 miliardi di anni di età, cioè sarebbe ben più giovane, di qualche miliardo di anni, di molte stelle. Per giunta, materia oscura ed energia oscura costituirebbero circa il 25% e il 70%, rispettivamente, dell'intero universo, cosicché noi avremmo conoscenza “diretta” del solo 5% (costituito essenzialmente da idrogeno libero ed elio, e poi stelle, neutrini ed elementi pesanti). Una conoscenza un po' limitata, parrebbe, per vantarsi della bontà di un modello che, alquanto singolarmente, «non dà molta enfasi a ciò che si vede ma a *ciò che non si vede*» (Narlikar 2006, 142). Non è questa la sede per approfondire queste critiche: si rimanda, tra i tanti, ad Arp et al. (1990), Burbidge (1989a), Rhoads e Zangari (1994), Van Flandern (2002).

⁶ La stessa radiazione cosmica di background a 2.7 °K, scoperta casualmente nel 1965 e anche per questo considerata come il tassello definitivo letteralmente “piovuto dal cielo” a incastrarsi perfettamente nel puzzle teorico del big bang, era in realtà già stata predetta, e con valori migliori, all'interno di modelli di universo non in espansione, nei quali, ovviamente, veniva spiegata in modo diverso. Alcuni esempi. Nel 1926 Eddington predisse, considerando che la radiazione fosse in equilibrio, una temperatura dello spazio interstellare di 3.2 °K all'interno di un universo infinito. Nel 1933, Regener derivò, attraverso un'analisi dell'energia dei raggi cosmici in arrivo sulla Terra, un valore di 2.8 °K per la temperatura di background. Seguendo questo lavoro, nel 1937 Nernst propose un modello di universo infinito senza espansione. Nel 1954 Finlay-Freundlich ottenne una temperatura di corpo nero dello spazio intergalattico che cadeva fra 1.9 e 6 °K, suscitando l'approvazione anche di Max Born. Diversi altri hanno sostenuto che dalla luce delle stelle (di una galassia

comporti atteggiamenti del tutto prevenuti nei confronti di osservazioni astronomiche discordanti, che vengono fatte rientrare nel modello standard con interpretazioni *ad hoc* oppure semplicemente ignorate. Eppure esistono approcci teorici differenti – quali, ad esempio, la cosmologia del plasma, le teorie dello stato stazionario, ecc. – che spiegano e hanno predetto fenomeni poi osservati, e laddove tali approcci sono carenti è anche perché nessun finanziamento è stato destinato alla loro verifica empirica. Il punto sono proprio i finanziamenti (e tutto l'apparato monolitico che ne articola la destinazione, quali il sistema dei *peer-reviewers*), destinati pressoché in toto alle ricerche sul big bang, il tutto a discapito sia dello spirito scientifico, che dovrebbe essere libero e basato sulla “pratica del dubbio”, sia del metodo scientifico, che dovrebbe fondarsi sulla costante verifica della teoria per mezzo delle osservazioni. Per questo – e ciò conclude il loro grido di allarme – si dovrebbero destinare più fondi allo studio delle teorie alternative, magari cominciando a costituire le commissioni che li assegnano con astronomi e fisici esterni al campo della cosmologia.

2. Fomentar dubbi

In questo mio scritto non voglio intessere un panegirico attorno a una qualche teoria cosmologica alternativa⁷, né, al contrario, fare un'apologia del modello standard. Lo dico sinceramente: anche lo volessi, non ne sarei in grado. Come forse traspare dal sunto della lettera poc'anzi vista, qui non si scontrano trascurabili dettagli, ma interi modelli, teorie, che spesso interpretano gli stessi dati in modi dissimili, ovviamente con risultati assai divergenti. Quindi, già da questo punto di vista avere uno sguardo critico dall'alto, *privo di pregiudizi*, è cosa molto difficile. A ciò si aggiunga il fatto che nel nostro caso, come avrò modo di mostrarvi, la battaglia si combatte anche sulla “materia grezza” delle pure osservazioni (senza certo dimenticare che ogni osservazione e ogni suo dato sono comunque, come si dice in filosofia della scienza, *theory-laden*), laddove, per esempio, può capitare –

isolata) termalizzata in fotoni di più bassa energia (l'energia è cioè ridistribuita in uno stato di equilibrio) si ottiene una temperatura vicina proprio a quella misurata del fondo cosmico. Da questo punto di vista, quindi, le previsioni pro-espansione di Alpher e Hermann, del 1949, a favore di una temperatura superiore a 5 °K, modificate poi da Gamow nel 1953 a 7 °K e nel 1961 a 50 °K, non brillano certo per “lungimiranza”. Insomma, commenta Ghosh, «alla luce di questa storia, la ‘prova’ più forte del modello del big bang risulta essere la sua più forte contro-evidenza» (2000, 137; lo si veda anche per i riferimenti degli autori citati).

⁷ Per una panoramica su alcune di esse si vedano Daigneault (2005) e Narlikar e Padmanabhan (2001).

detto un po' grossolanamente – che un dato software che riduce le immagini di un telescopio evidenzia certe strutture che un altro software non mostra, proprio quando la *reale* esistenza di quelle strutture sembrerebbe in grado di dirimere contese sanguinose a favore di uno dei contendenti. Insomma, per valutare con vera cognizione di causa certe questioni bisognerebbe anche essersi “sporcate le mani” negli osservatori e avere un'esperienza sul campo fatta di sottili competenze tecniche che io (ahimè!) non ho.

Fatta questa indecorosa professione di “modestia”, vi dico anche che ciò che in verità mi preme è uno scopo, sebbene nello specifico assai più limitato, in generale sensibilmente più presuntuoso: vorrei fomentare in voi un po' di dubbi, minando qualche certezza nella scienza e in questo caso nell'astrofisica e nella cosmologia, magari per ravvivare quello spirito, che oggi pare relegato in un silenzioso disuso, evocato da Richard Feynman – «la scienza è la cultura del dubbio» – citato nella suddetta lettera. Il tutto, ovviamente ma da rimarcare a scampo di antipatici equivoci, per rafforzare il nerbo della stessa scienza, cioè quello idealmente teso alla sola e pura comprensione del mondo.

Il punto è che ormai sono diversi decenni che siamo un po' tutti cresciuti col latte materno del big bang, arrivando talvolta a ingerire con esso anche alcune, e non marginali, “temerarietà teoriche” (si pensi anche, oltre a quelle già accennate, ai multiversi). Ebbene, siamo sicuri che sia così buono e nutriente quel latte? Siamo sicuri che la fiducia che quel modello, anche con sostanziose ragioni, si è conquistata – e che dopo tanti anni non può che restituirci un'immagine dell'universo che sentiamo *sinceramente* come “naturale” – non meriti qualche ripensamento radicale, non certo su basi aprioristiche ma alla luce di nuove evidenze empiriche? Purtroppo, come accade praticamente in tutti i campi del sociale, l'ideologia dominante, o, se preferite, chiamatela paradigma dominante, tende a dare poco spazio e ossigeno a modi diversi di vedere le cose (scioccamente, tra l'altro, poiché questi non necessariamente devono assurgersi a pericolo sovversivo, anzi, in una sana dialettica, la loro pratica potrebbe anche risolversi in un auto-annullamento). Risulta così che, fra quelle variopinte e, ammettiamolo, spesso ridicole proposte alternative, si rischia di far soffocare anche ipotesi che in realtà meriterebbero almeno un po' di attenzione e ascolto.

Cercherò questo ascolto raccontandovi, nei limiti (o quasi) dello spazio concessomi, alcune delle idee e dei risultati di Halton Arp, l'astrofisico che è un po', se vogliamo, il Gran Maestro (non a caso il primo firmatario della

succitata lettera⁸) di quella camarilla di astrofisici eretici che ordisce trame contro i soloni del modello standard, le spiegazioni delle cui credenze verranno ridotte al minimo data la ridondanza di altre tribune che essi possiedono per elargire il loro verbo. Come già forse subodorate, questo mio racconto si dispiegherà con una certa partigianeria pro-Arp, sia per rendere più viva l'esposizione stessa, sia per iniettare con più facilità, negli interstizi dell'impari contesa Arp-resto del mondo, il germe del dubbio, una partigianeria, però, in fondo soltanto, come dire, empatica, semplicemente perché, come dicevo, non sono in grado di dire chi ha ragione. Anzi, vi confesso che fatico non poco a tenere a bada le conseguenze "reazionarie" di un'istintiva banale considerazione: ma insomma, come è possibile che un'intera comunità scientifica abbia preso abbagli così grossi e dopo anni e anni di ricerche si sia fossilizzata in un'immagine del cosmo sostanzialmente infondata?

Per difendersi da questa domanda e magari dalla tentazione di lasciarsi andare a una sorta di suicidio (metaforico, *ça va sans dire...*) nichilistico, verrebbe da rifugiarsi nella considerazione che del resto la storia della scienza è piena ai suoi margini di "malcapitati", spesso nemmeno balzati oltre agli onori di una cronaca locale, che propongono tronfie idee rivoluzionarie che in percentuale schiacciante si afflosciano poi in innocue bislaccherie.

Epperò, se ci si pensa bene, è anche vero che quella stessa storia della scienza vanta cantonate "pubbliche" non da poco (teoria del flogisto, teoria del calorico, per esempio) che dovrebbero sempre servire di monito⁹.

Si consideri, per di più, che la cosmologia moderna è sì una scienza straordinaria che ha spinto l'angusto sguardo dell'uomo a varcare confini veramente impressionanti, ma è anche una scienza giovane, molto speculativa, e quindi, in un certo senso, profondamente delicata, e il cui modello standard si poggia, comunque lo si voglia giudicare, su alcuni principi magari plausibili ma nient'affatto certi. Essa, dovendo ovviare alla nostra castrante impossibilità di andare là fuori nell'universo a farci esperimenti, deve ricostruire l'intera storia del cosmo da poche indirette osservazioni. Di conseguenza è intrinseco alla cosmologia il fatto che i suoi modelli si sviluppino attorno a strutture teoriche innalzate, per così dire, "a domino", costruite cioè su successive estrapolazioni magari singolarmente

⁸ Fra le dozzine di altri, ci sono personalità del calibro di Hermann Bondi, Thomas Gold, Jayant Narlikar, Franco Selleri.

⁹ Si veda Laudan (1981) per un elenco di teorie scientifiche di successo in seguito rivelatesi radicalmente sbagliate, e Lyons (2002), che sottolinea anche la capacità di alcune di queste teorie di fare persino predizioni giuste.

sensate ma a rischio di far precipitare a cascata intere sequenze della struttura non appena una di loro, intermedia, fa cilecca¹⁰. È quanto succede nell'analisi di Arp, il quale, con un lento lavoro in specie osservativo, avrebbe eroso, per non dire sbriciolato, proprio il pilastro centrale del modello standard, e da lì il suo intero castello teorico. E avrebbe fatto questo, vedremo, non con chissà quali dinamitardi congegni teorici, ma a partire da una evidenza osservativa da un punto di vista concettuale straordinariamente semplice, quasi imberbe: puntando il dito verso certi oggetti celesti e urlando: perbacco, ma questi sono tra loro vicini!

Prima di cominciare, una riflessione “propedeutica”. L'esperienza comune ci invita a un cauto e sacrosanto scetticismo iniziale: immagino che ognuno di noi ha prima o poi incontrato (o saputo di) qualcuno che, di un qualunque campo dell'umana esperienza, professava opinioni intimamente originali, innovative e vieppiù magicamente risolutive, le quali, viste poi un po' più da vicino, più che rivelare sconvolgenti risultati, rivelavano soltanto la poca dimestichezza e la misera infarinatura del loro ideatore, non di rado dalla psicologia traballante. Ovviamente vi invito a questo salutare scetticismo anche nelle pagine seguenti. Qui però la situazione è assai diversa: a batter i pugni sul tavolo non è un astrofisico “della domenica” armato di un raffazzonato cannocchiale, ma è uno scienziato che è appartenuto a quella generazione di pionieri che hanno contribuito *fattivamente* all'astrofisica (si pensi al suo *Atlas of Peculiar Galaxies*, per esempio), per decenni e ai più alti livelli, livelli probabilmente inaccessibili alla maggioranza di quei *referees* che spesso bocciano, talvolta con scherno e astio, i suoi articoli (comunque spesso pubblicati, certo a fatica, sulle più importanti riviste del settore)¹¹. È vero che l'argomento di autorità, in ogni ambito della conoscenza, andrebbe usato con parsimonia, ma ha la sua

¹⁰ Si veda, ad esempio, Ruphy (2011).

¹¹ Arp, newyorkese, classe 1927, laurea *cum laude* in astronomia ad Harvard nel 1949 e dottorato *cum laude* al *California Institute of Technology* nel 1953, ha ricevuto il primo incarico di ricerca da Edwin Hubble; negli anni '50 era considerato uno dei maggiori giovani talenti, e per 29 anni è stato astronomo di ruolo agli osservatori più prestigiosi dell'epoca, quelli di Monte Wilson e Monte Palomar, finché, nel 1984, per le sue opinioni dissonanti non gli è stato rinnovato l'incarico e ha lasciato gli USA, accolto (senza stipendio) dal *Max Planck Institute für Astrophysik* di Monaco. Ha inoltre vinto l'*Helen Warner Prize* dell'*American Astronomical Society* (per giovani scienziati), il *Newcombe Cleveland* dell'*American Association for the Advancement of Science*, il prestigioso *Alexander von Humboldt Senior Scientist Award* (nel 1984), ed è stato Presidente della Società Astronomica del Pacifico (1980-1983). Nel seguito di questo scritto, gran parte delle sue considerazioni e immagini sono tratte dal suo ultimo libro del 1998 (l'indicazione delle pagine è del testo italiano), il più aggiornato e completo.

importanza sapere – soprattutto qui che non state leggendo direttamente Arp ma un lavoro di “seconda mano” – che il Nostro ha un carico di conoscenza ed esperienza che pochi possono eguagliare e che io certo non riuscirò a rendere in così poche pagine.

Dopo queste doverose premesse cominciamo a fare una capatina nell’universo, prima in quello “standard”, dove ci sentiremo a casa, poi in quello di Arp, dove forse faticheremo ad ambientarci senza il tepore di quel nostro latte materno...

3. L’espansione dell’universo

Secondo il modello standard della cosmologia, il fenomeno più rilevante che riguarda il nostro universo è la sua espansione. Fu Edwin Hubble il primo che, nel 1929, mostrò una relazione lineare fra la velocità di allontanamento V delle galassie e la loro rispettiva distanza D , relazione che poi confluì nella cosiddetta *legge di Hubble* $V = HD$, dove H è la *costante di Hubble* (che in realtà dipende dal tempo, e il cui valore attuale è $H_0 \cong 72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$)¹². Ciò che questa formula ci dice è semplicemente che la distanza fisica fra una coppia di galassie, non legate gravitazionalmente fra loro, aumenta con il tempo a una velocità di circa 70 chilometri al secondo ogni megaparsec di distanza¹³. Quindi, tanto più è la distanza tra due oggetti, tanto più è la loro velocità di allontanamento, e questo si verifica indipendentemente dalla direzione verso cui si osserva (quindi isotropicamente). Alle piccole scale la reciproca attrazione gravitazionale vanifica gli effetti di questa espansione (“residuo inerziale” del big bang¹⁴), quindi la legge di Hubble vale con buona approssimazione solo alle grandi scale, nel *range* degli ammassi di galassie per intenderci, laddove gli oggetti cosmici sperimentano soltanto questa reciproca recessione gli uni dagli altri. Si parla di espansione dell’universo proprio per indicare questo allontanamento reciproco. L’immagine intuitiva è quella di un palloncino (didimensionale) – la cui superficie rappresenta l’intero universo – che si gonfia (nello spazio tridimensionale) distanziando i suoi punti che rappresentano gli ammassi incastonati sulla sua superficie. È un’immagine che comunque va presa *cum gràno sàlis* poiché non è affatto detto che il nostro universo

¹² Di fatto Hubble osservò che lo spostamento verso il rosso (si veda il par. 4) delle righe spettrali delle galassie aumentava per gli oggetti meno luminosi.

¹³ Un megaparsec (Mpc) corrisponde a circa 3.262.000 anni luce.

¹⁴ Nel 1998 si è addirittura scoperta un’accelerazione dell’espansione, ma possiamo qui trascurare questo fatto.

(ovviamente spazialmente tridimensionale) abbia forma sferica, né che si espanda in una quarta dimensione spaziale. L'immagine è però efficace in quanto rende bene due caratteristiche fondamentali dell'espansione a larga scala dell'universo, ossia il fatto che l'espansione non ha punti privilegiati, quindi non ha alcun centro, e, soprattutto, che non è data da un moto delle galassie *nello* spazio ma in qualche modo è lo spazio fra loro a crescere. La ragione teorica di questa deduzione la vedremo fra poco.

Sono essenzialmente tre i pilastri osservativi su cui si sostiene il modello del big bang: i redshift della radiazione emessa dalle galassie distanti; la radiazione cosmica di fondo, interpretata come il residuo elettromagnetico di un neonato universo altamente energetico post-big bang; e infine le abbondanze cosmiche degli isotopi leggeri dell'elio, del deuterio e del litio, comparabili con quelle originatesi, secondo le previsioni del modello standard, nella nucleosintesi primordiale nelle prime fasi successive al big bang. Ma è sul redshift che ora ci soffermeremo, perché è su una diversa interpretazione delle sue cause fisiche che Arp gioca buona parte della sua partita.

4. I redshift

È ben noto che è possibile riconoscere l'origine atomica della radiazione elettromagnetica dal tipo di linee spettrali ricevute, ogni linea essendo una sua ben precisa frequenza, potendo così risalire all'elemento chimico emittente. Naturalmente si deve assumere che gli atomi si comportino dovunque allo stesso modo, quindi che le frequenze della radiazione da loro emessa, per esempio da un lontano oggetto astronomico in un remoto passato, siano identiche a quelle emesse dallo stesso elemento chimico in quiete nei nostri laboratori, solo così ha senso una comparazione dei loro spettri al fine di ricavarne informazioni sia, appunto, sull'elemento chimico emittente, sia sullo stato fisico della sorgente stessa. In certe circostanze, però, la frequenza emessa non è la stessa di quella ricevuta, vale a dire le righe spettrali sono "spostate" sullo spettro.

In generale, lo spostamento frazionario delle linee spettrali è definito da $z \equiv (\lambda_{ric} - \lambda_{em})/\lambda_{em}$, dove λ_{em} è la lunghezza d'onda alla quale la radiazione è emessa, come misurata alla sorgente, e λ_{ric} è la lunghezza d'onda quando è ricevuta dall'osservatore. Se λ_{ric} è spostata verso lunghezze d'onda più lunghe (quindi verso la zona rossa dello spettro) rispetto a λ_{em} si ha per l'appunto uno *spostamento verso il rosso* o *redshift* (e $z > 0$); se λ_{ric}

è spostata verso lunghezze d'onda più corte si ha uno *spostamento verso il blu* o *blueshift* (e $z < 0$).

Il responso che le nostre osservazioni astronomiche danno è che tutti gli oggetti cosmici (a parte i più vicini) mostrano redshift (con valori di z che arrivano fino a circa 7), e che, in gran parte dei casi di interesse astronomico, tutte le linee in uno spettro hanno lo stesso z , e quindi il redshift misurato è una proprietà del corpo in questione, non solo di una qualche linea spettrale, quindi è indipendente dalla lunghezza d'onda.

La fisica moderna conosce tre fenomeni fisici in grado di produrre redshift indipendenti dalla lunghezza d'onda: due empiricamente verificati, ossia il *redshift gravitazionale* e il *redshift Doppler*, e uno dedotto dalla teoria, cioè il *redshift cosmologico*. È soltanto quest'ultimo ad essere rilevante in campo cosmologico¹⁵. Dalla cosiddetta metrica di *Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker*, che rappresenta la struttura spaziotemporale a larga scala del nostro universo, si ricava¹⁶

$$1 + z = \frac{\lambda_{ric}}{\lambda_{em}} = \frac{R(t_{ric})}{R(t_{em})}$$

Premettendo che $R(t)$ è il cosiddetto *fattore di scala* – che grossolanamente rappresenta la distanza, variabile nel tempo, di due oggetti cosmici – risulta da questa formula che il *redshift cosmologico* è dato dal rapporto fra il valore del fattore di scala all'istante della ricezione del fotone e quello all'emissione. Come dicevo, per tutti gli oggetti distanti si misura $\lambda_{ric} > \lambda_{em}$ (ossia z è sempre positivo), cosicché $R(t_{ric}) > R(t_{em})$, e quindi l'universo sta diventando sempre più grande. La misura di z , così, ci dice di

¹⁵ Il redshift gravitazionale, che si manifesta quando l'emissione della luce avviene in regioni dove la gravità è maggiore di quella presente nella regione dell'osservatore, è dovuto alla perdita di energia del fotone che "risale" il campo gravitazionale allontanandosi dal corpo emittente (attraente). È un redshift in genere troppo lieve per essere osservato nella luce che ci arriva dalle galassie. Il redshift Doppler è il risultato della velocità relativa v tra emittente e ricevente dovuta al loro moto relativo nello spazio (nel caso di onde sonore, per esempio, lo si sperimenta nelle differenze nel suono emesso da una sirena di un'ambulanza al suo avvicinarsi o allontanarsi da noi). Se $v \ll c$ (cioè della velocità della luce nel vuoto), allora $z = v/c$, quindi la misura di z ci dà informazioni sulla velocità relativa della sorgente. Per v comparabili a c vale un'altra equazione, generalizzazione della precedente, dedotta dalla relatività speciale. Il problema è che in spazitempo curvi quali quelli cosmologici, dove perciò vige la relatività generale, la velocità relativa per oggetti molto distanti è un concetto indefinito, e quindi il redshift Doppler ha senso solo alle piccole scale spaziali.

¹⁶ Si veda un qualsiasi testo di cosmologia.

quanto l'universo (il suo spazio¹⁷) si è espanso *durante* il tempo che la luce ha impiegato per arrivare fino a noi. Ad esempio, se per una galassia si misura uno $z = 4$, se ne deduce che il fattore di scala dell'universo, al tempo dell'emissione della luce che *oggi* vediamo, era solo $1/5$ di quello che è oggi. Ciò significa che la distanza fra gli oggetti cosmici era allora solo il 20% di quella odierna. È per questo una prassi fra gli astronomi usare proprio il termine "redshift" (indicato *tout court* con z) per indicare distanze di oggetti nell'universo e quindi epoche passate.

5. L'importanza dei redshift

Ora, che il redshift sia «il fatto più importante della cosmologia moderna», come scriveva nel lontano 1965 Jacques Merleau-Ponty (p. 28), uno dei più grandi filosofi della cosmologia, non c'è alcun dubbio. E infatti, trent'anni dopo, Allan Sandage, uno dei maggiori cosmologi osservativi, fra i 23 problemi astronomici irrisolti poneva al primo posto fra quelli riguardanti l'universo il problema cosmologico riassumibile nella domanda: «L'espansione è reale?» (Sandage 1995, 7). In altre parole, il problema consiste nel trovare «la prova favorevole o contraria al fatto che il redshift è una vera espansione» (Sandage 1987, 22). Ancora più recentemente, gli anziani coniugi Burbidge, astronomi di fama mondiale, ribadiscono questa centralità: «I redshift sono la linfa vitale della cosmologia» (Burbidge e Burbidge 2006, 17). E potrei continuare con le citazioni.

La ragione di tale indubbia centralità è palese: senza questa generalizzata misura di spostamenti verso il rosso noi perderemmo quella che è considerata la prova più diretta a favore dell'espansione. Ma il dato di fatto è che noi questi spostamenti li misuriamo. E quindi: possiamo dire con certezza che l'universo si espande?

Sì, se interpretiamo quei redshift come redshift cosmologici e in parte Doppler, ossia, rispettivamente, come effettivi allontanamenti delle galassie dovuti all'espansione *dello* spazio (nel qual caso si parla di *velocità di recessione*), e come moti effettivi di allontanamento *nello* spazio (*velocità peculiari*) delle galassie stesse.

No, se adottiamo altre interpretazioni. Ma queste sono possibili? È possibile che alcuni redshift cosmologici non rappresentino *sempre e soltanto* velocità e quindi distanze?

¹⁷ Lasciamo da parte qualunque problematica ontologica riguardante lo spazio in espansione (si veda Macchia 2011).

Già dai tempi di Hubble in molti hanno messo in dubbio la validità dell'interpretazione a favore dell'espansione dell'universo. Hubble stesso:

La possibilità che il redshift possa esser originato da qualche altra causa, connessa con il lungo tempo o la grande distanza coinvolti nel passaggio della luce dalla nebulosa all'osservatore, non dovrebbe essere prematuramente abbandonata [...] Se il redshift non è dovuto a moti recessivi, la sua spiegazione probabilmente implicherà dei principi fisici del tutto nuovi. (Hubble e Tolman 1935, 303)

Nel 1929 Fritz Zwicky propose la cosiddetta *teoria della luce stanca* (*tired-light theory*), la cui idea base è che i fotoni potrebbero progressivamente perdere parte della loro energia mentre viaggiano attraverso le enormi regioni degli spazi intergalattici, in un universo quindi sostanzialmente *statico*. Ciò potrebbe esser causato dall'interazione con grani di polvere, atomi o elettroni, o da altri meccanismi fisici sconosciuti. Negli anni sono state fornite varie versioni basate su questa idea (per esempio, nel 1937 Walther Nernst suggerì che potrebbe essere l'etere ad assorbire tale energia), ma nessuna è risultata tanto soddisfacente da convincere la comunità astronomica.

La morale della favola, insomma, la mutuiamo da uno dei più noti cosmologi appartenenti al *mainstream*: «La legge velocità-distanza $V = H D$ e la legge espansione-redshift $1 + z = R(t_{ric})/R(t_{em})$ sono le due leggi più importanti nella cosmologia» (Harrison 2000, 303). Ne consegue che la misura della frequenza osservata, conoscendo la frequenza alla sorgente, permette di dedurre la velocità della sorgente nel caso di redshift Doppler, o l'aumento di distanza nel caso di redshift cosmologico, tanto che: «Questa è la meraviglia dei redshift cosmologici: essi misurano direttamente l'espansione dell'universo» (*ibid.*).

Ma se così non fosse?

Andiamo subito al sodo: per Arp, e per tutti quegli studiosi che sostengono le sue ricerche, *non* è così! I redshift extragalattici non misurano affatto l'espansione dell'universo, quindi non hanno a che fare con le velocità e con le distanze degli oggetti emittenti, ma hanno invece a che fare con la loro massa ed età.

Per arrivare a spiegare questa rivoluzionaria (giusta o sbagliata che sia) idea sono necessarie alcune nozioni preliminari dell'astrofisica "standard", che daremo nel prossimo paragrafo, e un'analisi (che daremo più oltre) di alcune di quelle osservazioni contrastanti che hanno portato Arp a sviluppare la sua immagine dell'universo.

6. Galassie attive e quasar

Si parla di galassie *attive* per riferirsi a quelle galassie che emettono grandi quantità di radiazione di alta energia (raggi UV, X e gamma), ma anche di più bassa energia (onde radio, infrarossi, visibile), non dovute ai normali componenti di una galassia (stelle, polveri, gas interstellare). Tali galassie sembrano essere “alimentate” da una regione compatta posta al loro centro, detta *nucleo galattico attivo* (AGN). Ne esistono varie tipologie: galassie di Seyfert, galassie di Markarian, radiogalassie, oggetti BL Lac, blazars, quasar. Alcune di queste regioni emettono getti di materia anche di notevoli dimensioni, trasportando energia verso strutture estese (come in fig. 1).

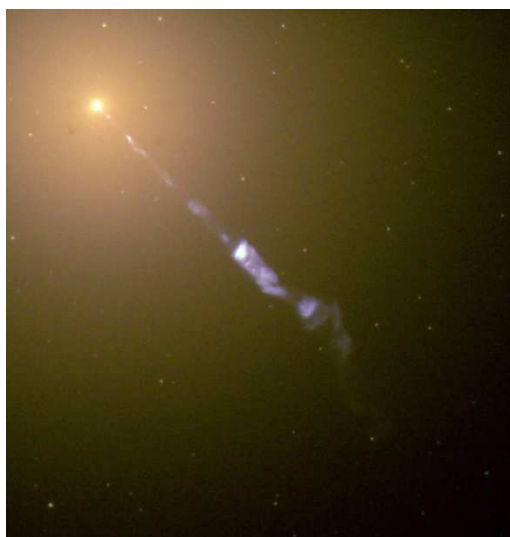


Fig. 1: Nell'Ammasso della Vergine, la radiogalassia attiva M87 emette un getto di particelle cariche, irradianti emissione ottica di sincrotrone, della lunghezza di circa 5 mila anni luce.

Secondo alcuni modelli unificati degli AGN, tutti gli oggetti precedentemente elencati sono in realtà oggetti del tutto simili che a noi appaiono con caratteristiche diverse essenzialmente perché li osserviamo sotto angolazioni differenti (le diversità risulterebbero nell'assorbimento da parte di polveri presenti nella galassia e negli effetti relativistici del getto rivolto verso l'osservatore) (si veda la fig. 2).

Qui si è in particolare interessati ai *quasar*, acronimo di *quasi-stellar radio source*, ossia sorgenti radio quasi stellari scoperti nel 1963. Un quasar è un oggetto astronomico che somiglia a una stella in un telescopio ottico

(cioè è una sorgente puntiforme, non estesa come è una galassia), spesso associato a fenomeni di emissione radio e X. Negli anni si è scoperto che solo il 10% hanno forti emissioni radio. Si usa così, più genericamente, il nome *quasi-stellar object* (QSO) per riferirsi anche ai quasar “radioquieti”.

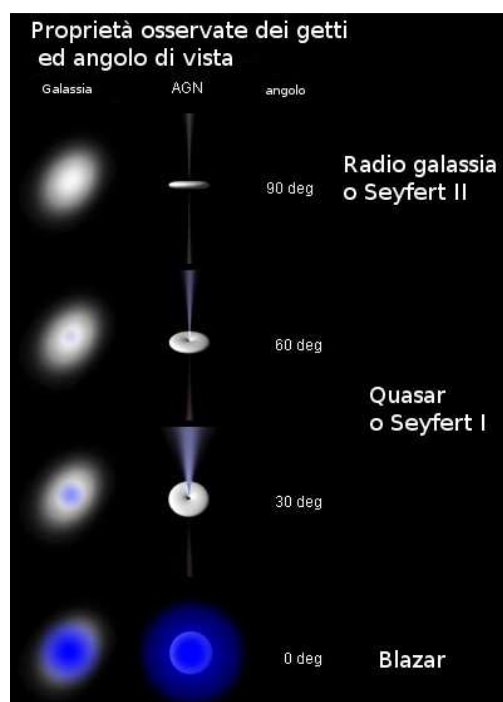


Fig. 2: Solo l'angolo di vista distingue questi oggetti: si va dai Blazars, che noi osserviamo “frontalmente” (0 gradi) con un getto che viene verso di noi, alle radiogalassie, che osserviamo di taglio, con i due getti la cui direzione forma un angolo di 90° con la nostra linea di vista.

I QSO emettono attraverso tutto lo spettro, dai raggi X al lontano infrarosso con un picco nelle bande ottiche dell'ultravioletto. Alcuni sono anche forti sorgenti di emissioni radio e di raggi γ . Spesso hanno alti z . Si conoscono più di 200000 QSO, con z compresi fra 0.056 e 7.085, quindi con una distanza da noi compresa fra 600 milioni e 29 miliardi di anni luce. La maggior parte sono molto distanti: più di 3 miliardi di anni luce.

Va da sé che per esser visti a tali distanze i QSO devono essere molto luminosi, anche 10000 volte più luminosi delle più luminose galassie conosciute. Sono quindi considerati tra gli oggetti più luminosi dell'universo osservabile. Inoltre, alcuni mostrano rapidi cambiamenti di luminosità nel *range* ottico e, ancor più rapidi, in quello dei raggi X (si va

da pochi mesi, a settimane, giorni, ore). Ciò significa che questa energia è generata ed emessa da una regione molto piccola¹⁸. Tali cambiamenti, quindi, definiscono un limite superiore al volume dei QSO che risultano così di dimensioni assai ridotte, poco più grandi del Sistema Solare. Risultato: densità d'energia enormi. Come spiegarle?

Il modello standard dei QSO prevede che sia il rilascio di energia gravitazionale di materia che cade verso un buco nero supermassiccio (10^6 - 10^{11} masse solari) il solo processo possibile in grado di produrre con continuità una tale potenza energetica. L'enorme luminosità del QSO (che copre del tutto quella della galassia che lo ospita) è quindi il risultato dell'energia generata all'esterno dell'orizzonte degli eventi del buco nero da tensioni gravitazionali e immensi attriti del gas e delle polveri che cadono nel buco nero formando un cosiddetto *disco di accrescimento* (come nella ricostruzione di fig. 3).

Tale meccanismo – una sorta di equivalente cosmico del gettare continuamente altra legna sul fuoco!, commenta Arp – può convertire massa in energia in maniera molto più efficiente dei processi di fusione nucleare che dominano la produzione di energia nelle stelle di tipo-Sole. Si suppone che la galassia diventi “normale”, ossia smetta di emettere questa enorme flusso di radiazione, quando il combustibile circostante si esaurisce. Per tutto questo si pensa quindi che un QSO sia una regione compatta (circa un milionesimo della galassia massiccia al cui centro è posta) che circonda un buco nero supermassiccio e la cui dimensione è da 10 a 10000 volte il raggio di Schwarzschild di quest'ultimo.

¹⁸ Piccola perché il tempo a disposizione del QSO per uniformare queste variazioni di luminosità in tutte le parti che lo compongono (dalle più vicine alle più lontane da noi), data la rapidità di questi variazioni, è poco (si ricordi che un oggetto non può cambiare la sua luminosità più velocemente del tempo impiegato dalla luce ad attraversarlo). Dalla rapidità con cui osserviamo la variazione dello splendore del QSO possiamo dunque risalire al suo diametro massimo (si veda Maffei 1976, 232).



Fig. 3: Il buco nero attrae la materia fredda circostante, l'attrito la riscalda e ne cambia lo stato in plasma il cui movimento forma un forte campo magnetico al cui interno si producono enormi quantità di radiazione di sincrotrone e termica sotto forma di raggi X. L'energia rilasciata dal disco si allontana, secondo un meccanismo non ben compreso, in getti gemelli di particelle relativistiche altamente collimate.

7. L'oltraggiosa analogia di Arp

Fra le galassie attive, dicevamo, ci sono anche le radiogalassie. Diamo un'occhiata a quella che probabilmente è la più famosa, la Cygnus A (il pallino al centro della fig. 4). Ai suoi lati si notano i due getti altamente collimati che fuoriescono dal nucleo confluendo in giganteschi lobi. È evidente che si tratta di materiale espulso (associato a radioemissioni) in direzioni opposte dalla galassia centrale.

I radiolobi della Cygnus A sono stati i primi ad essere scoperti. Oggi sono conosciuti diversi altri casi di espulsione, per esempio quello della radiogalassia NGC 1265 (fig. 5). Ricorda Arp (1998) che, negli anni '50, quando furono scoperte le prime sorgenti radio, che stranamente tendevano ad apparire in coppie, e subito dopo fu notato che si trovavano delle galassie in mezzo a queste coppie, eminenti esperti dell'epoca sostenevano che tali galassie non avevano niente a che fare con quelle coppie radio. Poi, non appena furono scoperti i lobi radio e i filamenti che si diramavano dai nuclei delle galassie, quegli stessi esperti repentinamente si convinsero di aver *sempre* saputo dell'origine espulsiva dei lobi.

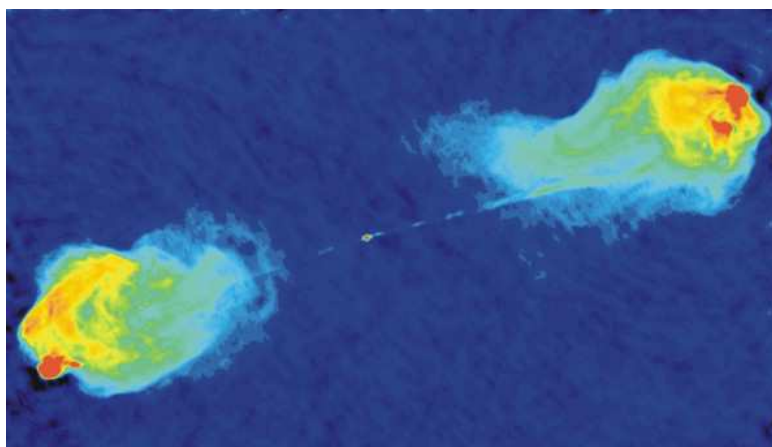


Fig. 4: Immagine a falsi colori della Cygnus A: le regioni in rosso hanno l'emissione radio più brillante, quelle in blu più debole.

A parte questo aneddoto “sociologico” che la dice lunga sulla mancanza di autocritica di certi ambiti scientifici, l'importanza di questa scoperta sta nel fatto che essa «ha modificato radicalmente l'idea che le galassie siano in genere enormi e tranquille aggregazioni di stelle, polveri e gas in maestosa rotazione intorno ai loro centri di massa, per far posto a una rappresentazione in cui i loro nuclei sono caratterizzati da enormi e fortemente variabili emissioni di energia» (Arp 1998, 18).

Questo è un punto fondamentale poiché, per Arp, ciò che accade per le radiogalassie accade anche per i QSO, vale a dire, gli elettroni responsabili dell'emissione radio di sincrotrone nelle prime sono una manifestazione a bassi livelli energetici del medesimo processo che dà luogo all'emissione, soprattutto in X, dei secondi. Si hanno spesso, infatti, coppie di QSO ad alto z (emittenti in radio e in X) che mostrano evidenti indizi di espulsioni bipolari da parte di galassie attive. Eppure gli astronomi *non* riconoscono l'origine espulsiva di tali coppie. Perché? Per una ragione in fondo semplice:

verrebbe falsificata la “sacra” assunzione che tutti i redshift extragalattici sono causati da velocità e indicano la distanza. L'associazione deve essere negata ad ogni costo, perché i quasar hanno spostamenti verso il rosso molto più elevati delle galassie da cui vengono originati. (Arp 1998, 19)

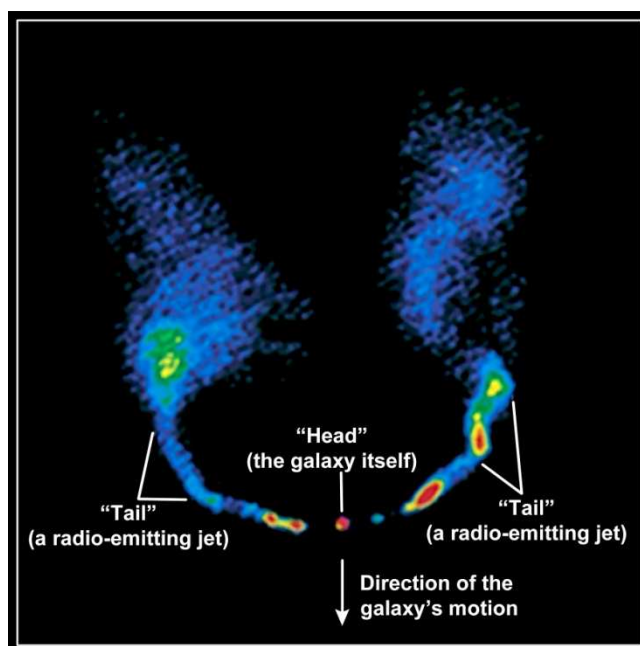


Fig. 5: Immagine a falsi colori della NGC 1265: in rosso i getti radio più intensi, in blu i più deboli. La galassia (il pallino rosso) si sta muovendo nell'Ammasso di Perseo a circa 2000 km/s. Si pensa che i due fasci di plasma espulsi dal nucleo siano piegati a "U" dalla pressione esercitata dal gas esterno.

In pratica, dice Arp, gli astronomi non possono riconoscere che i QSO stanno alle galassie attive come i radiolobi stanno alle radiogalassie poiché ciò significherebbe che QSO e galassie attive, essendo i primi espulsi dalle seconde, debbano essere molto vicini fra loro, e addirittura "toccarsi". Conseguentemente, stando all'interpretazione canonica del redshift (ossia come misura della distanza da noi), QSO e galassie attive dovrebbero avere z assai simili. Il punto è che invece si misurano z *nettamente* diversi, ossia questi oggetti *devono* essere, per la cosmologia standard, enormemente distanti fra loro.

8. Le osservazioni di Arp

Nei lavori di Arp si possono individuare essenzialmente due tipi di osservazioni, iniziate nel lontano 1966, tese a evidenziare questa associazione fisica fra QSO e galassie attive: 1) osservazioni che mostrano connessioni luminose fra gli oggetti in questione (ovvero se due cose "si toccano" devono essere vicine); 2) osservazioni di tipo statistico che

evidenziano le loro particolari posizioni e allineamenti sulla volta celeste (ovvero se certe cose si configurano in un certo modo non può essere un caso).

Analizziamole entrambe con alcuni di quegli esempi che la comunità astronomica non relega nemmeno nel limbo ma semplicemente nell'inferno dei meri "casi isolati"¹⁹.

Prima, però, alcuni risultati preliminari delle ricerche di Arp che ritroveremo poi nei casi specifici. Intanto egli nota la mancanza, per i QSO, di una relazione fra z e la luminosità apparente. Questa indipendenza del primo dalla seconda è alquanto strana se z è una misura di distanza, in quanto QSO giudicati più lontani dovrebbero avere in media una luminosità più bassa. Ancora: sempre secondo quest'ottica, ci si aspetterebbe una distribuzione uniforme dei QSO in cielo, in specie quelli a più alto z e quindi lontanissimi da noi, invece i QSO con z compresi fra 1.4 e 2.4, nella direzione della Galassia di Andromeda, sono 3-4 volte più numerosi che nella direzione opposta (più o meno verso l'Ammasso della Vergine).

Un altro aspetto centrale è la vicinanza di molti QSO a galassie. Arp ha notato che più è la distanza da noi della galassia (più alto è il suo z) e minore è la distanza angolare fra galassia e QSO. L'idea è che tali coppie siano molto simili ma semplicemente viste a distanze diverse (la distanza angolare è funzione inversa della distanza dall'osservatore, infatti). Secondo Arp, inoltre, la densità di QSO vicini a grandi galassie a spirale di basso z è circa di 20 volte maggiore della media, con una probabilità che questa disposizione sia casuale di circa 10^{-15} . Che alcune di queste vicinanze siano casuali, dovute quindi a banali ragioni prospettiche, è ovviamente possibile, anzi probabile, ma quando tali "casualità", unite ad altre peculiarità che ora iniziamo a vedere, cominciano a essere troppo frequenti allora l'invito della statistica verso *nuove* spiegazioni sembra farsi più pressante.

¹⁹ "*Just another isolated case*" ("Solo un altro caso isolato"): è il commento di un *referee* a un articolo nemmeno di Arp ma che ne sposava le tesi sulla base delle evidenze osservative. Sottolinea amaramente Arp che, in quel "another", che sembra proprio essere involontariamente "scappato" al *referee*, si svela la falsa coscienza di chi tratta ogni volta un caso anomalo come fosse il primo, in tal modo rendendolo preda di mille fattori accidentali e quindi trascurabile e scientificamente innocuo, ma in realtà sapendo che quel caso isolato è "un altro" *di una ormai lunga serie*.

8.1 Connessioni luminose

La fig. 6 mostra la galassia a spirale NGC 4319 e il QSO Markarian 205, con i rispettivi z di 0.006 e 0.070. È evidente che se questi ultimi fossero di tipo cosmologico, come vuole la cosmologia standard, i due oggetti dovrebbero essere distanti l'uno dall'altro più di un miliardo di anni luce e quindi quel ponte ottico luminoso (in giallo arancio nella fig. 6) che sembra connetterli non potrebbe esistere data l'enorme distanza.

Non solo, ma andando a osservare più da vicino il Markarian 205 si ottengono le immagini della fig. 7 dalle quali si evidenziano ponti luminosi fra questo QSO e altri tre QSO, due più grandi, con z di 0.464 e 0.633, e uno più piccolo con z di 1.259. Anche in questo caso ponti di materia (filamenti X) sembrano fuoriuscire dal Markarian 205, che ricordiamo ha uno z di 0.070, e arrivare agli altri tre QSO che hanno degli z molto maggiori. Come nel caso precedente, secondo l'interpretazione standard questi QSO dovrebbero essere molto distanti gli uni dagli altri, quindi quei filamenti che sembrano collegarli non potrebbero esserci.

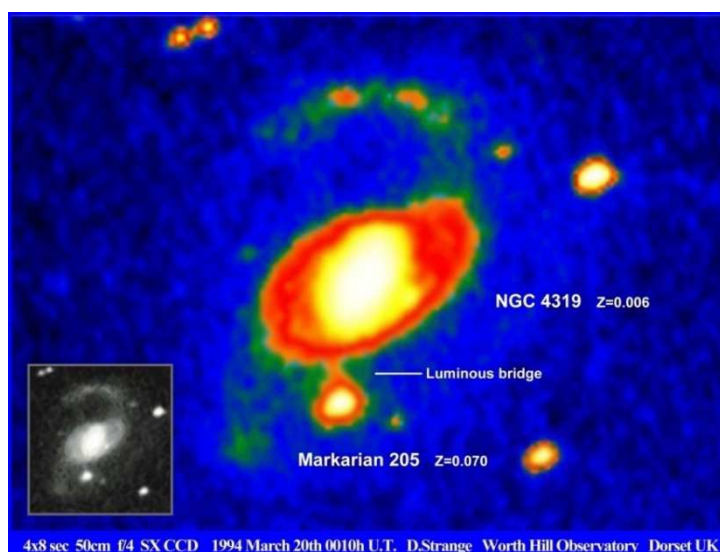


Fig. 6: La connessione luminosa fra la spirale NGC 4319 e il Markarian 205. Stessa immagine nel riquadro dove si evidenzia meglio la sua natura di spirale.

Per di più, quei tre QSO, che sembrano appunto connessi al Markarian 205 che a sua volta pare “toccare” la NGC 4319, risulterebbero anch’essi legati a quest’ultima, rendendo il tutto ancora più incredibile date le enormi discrepanze dei loro rispettivi z , che danno nell’interpretazione standard una

distanza ben superiore a quella già ragguardevole di un miliardo di anni luce fra il Markarian 205 e la NGC 4319!



Fig. 7: Tre immagini X ad alta risoluzione del Markarian 205 e dei suoi tre QSO “satelliti”. In quella a destra sono evidenziate le cosiddette isofote, ossia le linee continue che congiungono i punti di un’immagine caratterizzati dalla stessa luminosità²⁰.

Arp ritiene probabile che la NGC 4319 abbia emesso il Markarian 205 che a sua volta ha espulso gli altri QSO (ma vedremo meglio questo modello più avanti). Per la cosmologia “ufficiale” ovviamente è solo un caso (una sovrapposizione accidentale) che tutti questi oggetti appaiano in quelle posizioni.

La prima immagine della fig. 8 mostra un altro caso, quello della galassia a spirale NGC 4651 ($z = 0.002$). Già nota per avere un getto ottico, essa mostra anche un getto X che si allunga verso il QSO 3C 275.1 ($z = 0.557$). A sua volta, dal QSO esce del materiale che si estende verso il getto. Ovviamente, dati i loro z diversissimi, questi oggetti dovrebbero trovarsi a distanze enormi che non renderebbero sensato, nei termini di reciproca relazione, quell’apparente protendersi dell’uno verso l’altro. Nota Arp che tra le circa 7000 galassie a spirale più luminose, questo QSO è vicino proprio a quella che ha il getto più cospicuo. La probabilità di tale associazione, egli calcola, è minore di uno su un milione²¹. E conclude: «Se l’esposizione di 10500 secondi fosse stata solo un po’ più lunga avrebbe

²⁰ La “fusione” delle isofote dell’ultima immagine non è dovuta a un effetto strumentale, in quanto, nel caso di sorgenti non correlate, quella fusione assume forme circolari a clessidra (si veda Arp 1998, 47).

²¹ Il calcolo di questo tipo di probabilità, che nomineremo anche in seguito, non è banale e certo non può essere riportato qui. Basti dire che il fattore principale in gioco riguarda la densità media di una certa tipologia di QSO per unità di area del cielo, a una data luminosità apparente. Si vedano Arp (1987, 30; 1998, 29).

potuto mostrare che il ponte era fatto di un unico pezzo continuo» (Arp 1998, 44-5).



Fig. 8: La NGC 4651 con il suo getto ottico che fuoriesce “verso sinistra”, e il getto X, con le isofote, allungato verso il QSO.

La fig. 9 riguarda un caso simile: la radiosorgente 3C 343.1, con uno z di 0.34, e un QSO con uno z più che doppio di 0.75. La loro separazione angolare è di appena 0.25 secondi d’arco circa. Data la discrepanza fra i loro z queste sorgenti non dovrebbero “toccarsi”. Arp, Burbidge e Burbidge (2004) calcolano che la probabilità di un allineamento casuale prospettico (ossia dovuto alla particolare posizione del nostro punto di osservazione) è di circa 1 su 10^{14} .

Veniamo ora a un caso famoso, quello della cosiddetta *Croce di Einstein*, un piccolo agglomerato di 5 oggetti (fig. 10) ma che in realtà, secondo l’interpretazione corrente, è costituito da due soli oggetti: la galassia centrale, chiamata ZW 2237+030, con uno z di 0.04 (e quindi a una distanza da noi di circa 400 milioni di anni luce), e il QSO G2237+0305, con uno z di 1.70 (equivalente a una distanza di circa 8 miliardi di anni luce).

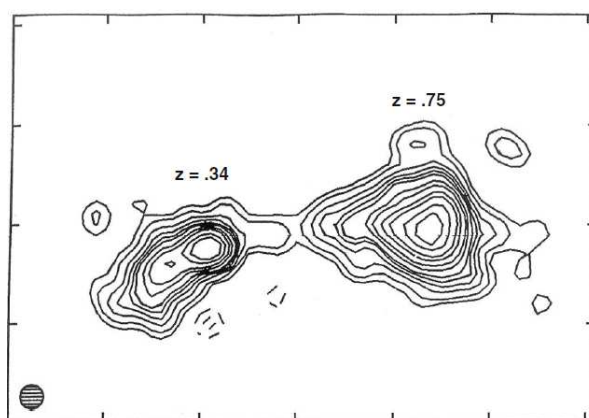


Fig. 9: Mappa radio (a 1.6 GHz) della 3C 343.1 (a sinistra) e del QSO (a destra).

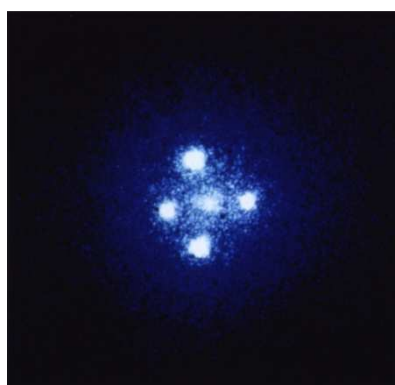


Fig. 10: La Croce di Einstein.

L'immagine del QSO sarebbe quadruplicata per il cosiddetto *effetto di lente gravitazionale* previsto dalla Relatività Generale. Secondo questa teoria, poiché la gravitazione – intesa come deformazione dello spaziotempo – può deflettere i raggi di luce, è possibile che quando un corpo di grande massa venga a trovarsi fra una sorgente di luce e l'osservatore (come nella prima immagine della fig. 11), i raggi subiscano una deviazione che provoca un'amplificazione del segnale e/o una immagine deformata della sorgente, che può apparire anche in immagini multiple. Questo sarebbe il caso della Croce di Einstein (seconda immagine della fig. 11), che quindi andrebbe considerata come una sorta di miraggio causato da una galassia centrale reale, relativamente poco distante da noi, la quale, agendo come lente formerebbe le quattro immagini virtuali di un unico QSO ben più distante.

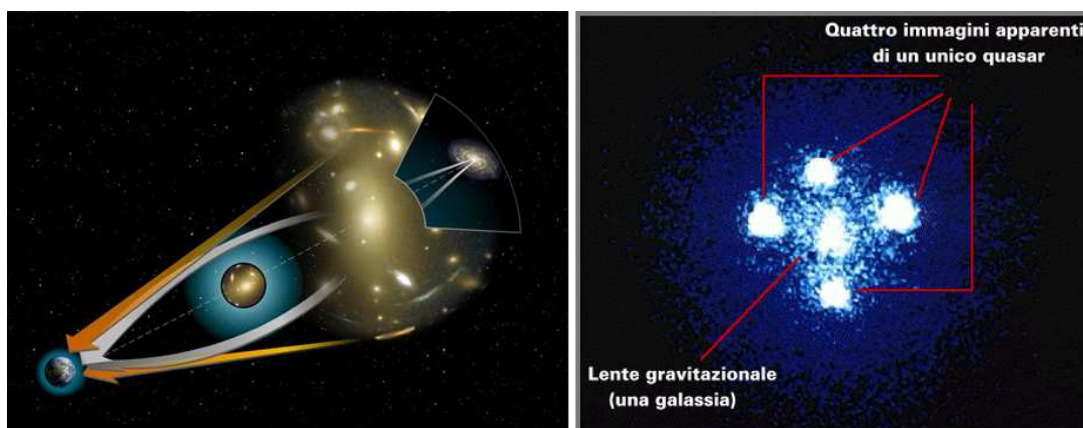


Fig. 11: A sinistra l'effetto lente gravitazionale per una galassia distante: la sua luce, il cui percorso effettivo è rappresentato dalle frecce bianche (incurvate dal corpo centrale), viene vista dalla Terra lungo le direzioni date dalle frecce arancioni, e quindi l'immagine della galassia può apparire o "spalmata" nel cielo a formare come dei tratti di archi, o anche "suddivisa" in posizioni apparenti e quindi in immagini multiple, appunto come accadrebbe per la Croce di Einstein (a destra).

Secondo Arp il fenomeno delle lenti gravitazionali, in generale, non è in grado di spiegare il particolare eccesso di QSO attorno alle galassie brillanti²². Più in particolare, i modelli teorici prevedono la formazione di immagini dei QSO, prodotte dalla lente, più allungate, a degenerare anche in anelli, segmenti di anello, archi. Secondo il modello di Peter Schneider, per esempio, uno dei maggiori esperti di teoria delle lenti gravitazionali, le isofote dei QSO dovrebbero risultare più allungate di un fattore 4 o 5 lungo la circonferenza centrata sul nucleo della galassia (prima immagine della fig. 12).

Il fatto più sensazionale, però, è che vi sarebbero addirittura connessioni materiali tra alcuni di questi oggetti. Dall'immagine della Croce di Einstein nella banda ultravioletta centrata sulla lunghezza d'onda di 3400 ångström (seconda immagine della fig. 12), ottenuta dall'*Hubble Space Telescope*, il QSO più a destra, indicato con D, apparirebbe connesso alla galassia centrale da ponti di materia. Tale banda include la riga Lyman Alpha, la riga di emissione più intensa dell'elemento più abbondante (l'idrogeno) nei QSO. Inoltre, è stata rivelata una riga Lyman Alpha anche

²² Si veda Arp (1990), che indica cinque ragioni indipendenti a favore di questa tesi. Per approfondimenti sul tema delle lenti gravitazionali e gli z anomali si veda Surdej et al. (2006).

fra i QSO A e B, insomma ci sarebbe del gas dello stesso alto z dei QSO vicino al nucleo della galassia. Tutto questo è ovviamente incompatibile con le suddette distanze fra questi oggetti desunte dall'interpretazione standard dei redshift.

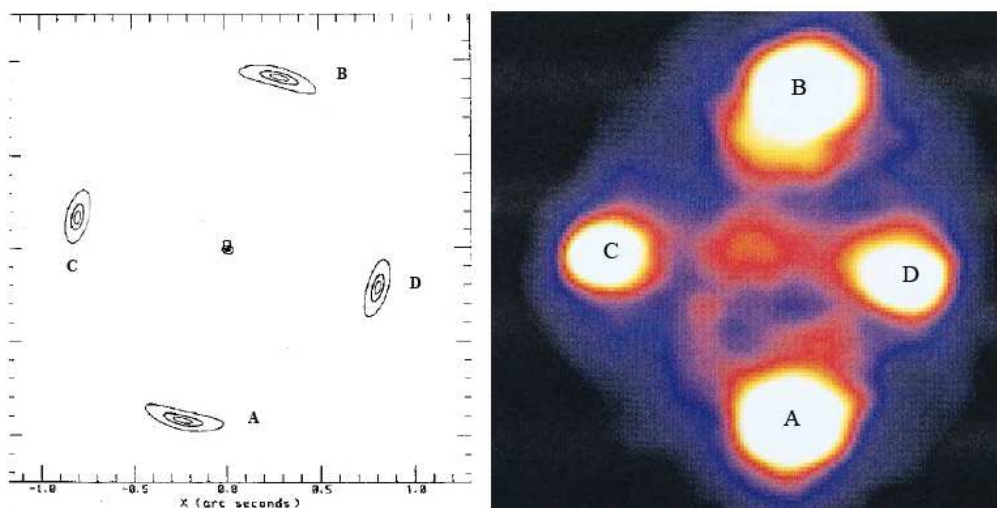


Fig. 12: La Croce di Einstein come risulta dall'effetto lente gravitazionale del modello di Schneider e nell'immagine ottenuta dall'*Hubble Space Telescope*.

Un'altra importante tipologia di osservazioni su cui Arp basa la sua analisi riguarda una classe di galassie a spirale che hanno galassie compagne minori con z più alti all'estremità dei loro bracci. Oltre ai QSO, quindi, anche tali sistemi galattici mostrerebbero interazioni tra oggetti con z diversi e quindi un eccesso di z non dovuto a velocità o distanze.

In questo tipo di sistemi, l'interpretazione canonica vede al più, se non sovrapposizioni prospettiche, delle collisioni e fusioni fra le galassie protagoniste. Arp, al contrario, ci vede delle espulsioni, poiché, «dal momento che è tipico delle galassie espellere del materiale che poi forma nuove galassie, se l'espulsione si verifica nel piano della galassia allora dovrebbe trascinare fuori del materiale sotto forma di un braccio di spirale attaccato a una nuova compagna» (Arp 1998, 88).

Facciamo subito un esempio: la spirale NGC 450, che ha uno z di 1900 km/s²³, e quella che sembra essere la sua più piccola compagna, la UGC

²³ Spesso Arp indica gli z in km/s soltanto per fissarne la quantità nei termini convenzionali di velocità, ma, come vedremo ancor meglio strada facendo, questi z non hanno per lui a che fare con le velocità degli oggetti in questione.

807, con uno z di 11600 km/s (fig. 13). Ovviamente per gli astrofisici questo non è nemmeno un caso di collisione poiché, dati gli z così diversi, le due galassie sono molto distanti fra loro, quindi si tratta di semplice sovrapposizione lunga la nostra linea di vista, e la 807 è in realtà una grande galassia molto distante, in rapida rotazione su se stessa, e dietro alla 450.

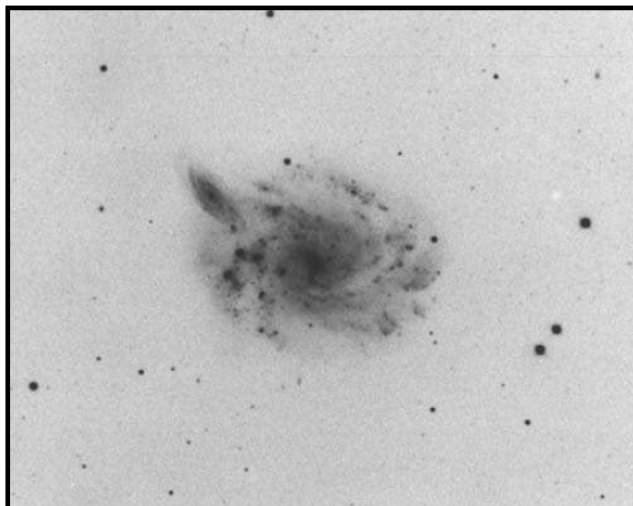


Fig. 13: La NGC 450 con la UGC 807 all'estremità di uno dei suoi bracci.

Le osservazioni evidenzerebbero, però, secondo Arp, oltre a delle peculiarità nelle curve di rotazione delle due galassie proprio in corrispondenza della regione di supposta interazione, una zona di interazione composta da tre enormi regioni HII (cioè nubi di idrogeno ionizzato, tipiche di zone di formazione stellare) con lo stesso z della 450 (fig. 14). Tali regioni anomale, proprio vicino al punto di contatto, sono eccezionalmente brillanti e potrebbero essere spiegate solo invocando una reale interazione tra le due galassie. In particolare – secondo il modello di Arp desunto anche da lavori non suoi – la 807, incuneata tra i bracci di spirale della 450 in rotazione in senso orario, ha i margini rivolti verso la 450 piuttosto estesi e deformati, e sembra attirare a sé la regione HII a lei più prossima, cominciando a farla precipitare dentro le sue parti più esterne²⁴. Tra l'altro, altri casi di questo tipo (si veda Arp 1987, cap. 6) mostrano per le compagne questi stessi spettri tipici di giovani popolazioni stellari che escludono la possibilità che esse siano galassie di sfondo appunto perché gli spettri tipici di queste ultime sono diversi.

²⁴ Si veda anche Moles et al. (1994).

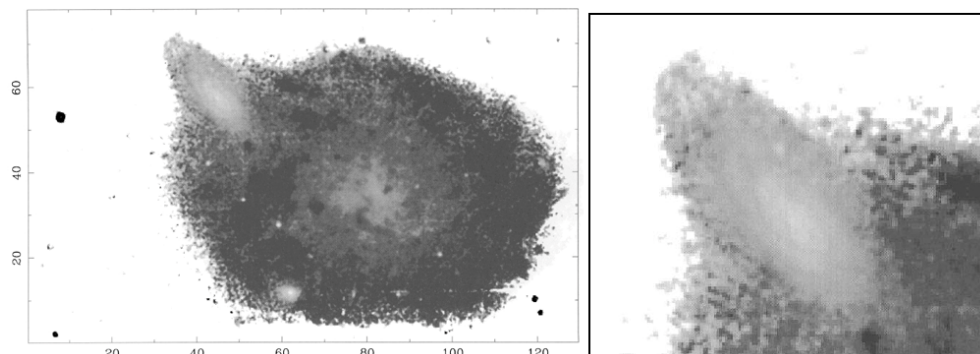


Fig. 14: Le stesse galassie di fig. 13 in un'immagine con indice di colore B-I e un suo ingrandimento della regione occupata dalla UGC 807.

In questo e nei successivi casi, inoltre, è da escludersi, commenta Arp, la possibilità che la galassia minore stia passando nei pressi della maggiore con una così alta velocità relativa (data dalla differenza dei loro z). Se così fosse, infatti, a quella velocità il suo passaggio non sarebbe in grado di strappare dei filamenti dalla galassia più massiccia: la forza di attrazione gravitazionale necessaria per far deviare le stelle dalle loro orbite normali non può originarsi nel tempo relativamente breve di un incontro tanto rapido.

Nella fig. 15 abbiamo un altro caso particolarmente significativo, quello della galassia di Seyfert NGC 7603²⁵, che ha uno z di 0.029 (in termini di velocità equivale a 8700 km/s). All'estremità di un suo braccio a spirale c'è la galassia "compagna", con uno z di 0.057 (17000 km/s).

²⁵ Le galassie di Seyfert, circa il 10% di tutte le galassie, sono un tipo di galassie attive (solitamente a spirale), con righe spettrali da gas di alta ionizzazione (H, He, N, O), caratterizzate da nuclei brillanti di luminosità variabile. Sono una sorta di versione a bassa luminosità dei QSO radioquieti.



Fig. 15: La NGC 7603 e la sua compagna.

Tra di loro, come si vede meglio nella fig. 16, ci sono altri due oggetti di tipo QSO, il 2 (con $z = 0.243$) e il 3 ($z = 0.391$) che sembrano sovrapporsi perfettamente sul filamento del braccio a spirale della galassia, filamento che ha uno z di 0.030 ovviamente quasi uguale a quello della galassia di appartenenza.

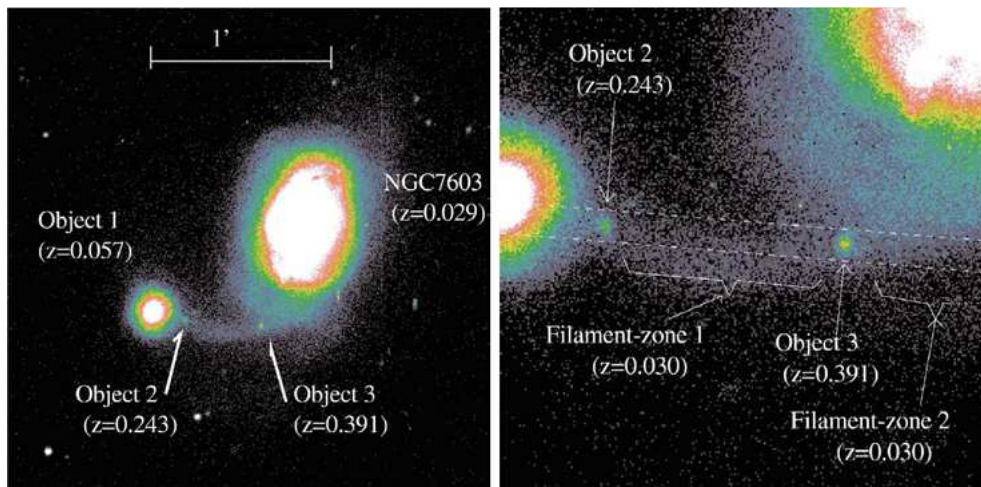


Fig. 16: Gli oggetti, e i rispettivi z , che sembrano appartenere al braccio a spirale della NGC 7603.

Secondo l'interpretazione standard dei redshift ovviamente questi tre oggetti non possono realmente trovarsi sul braccio della galassia, a noi ci appaiono così solo per un effetto prospettico. López-Corredoira e Gutiérrez (2004), però, hanno calcolato che la probabilità di una tale sovrapposizione

prospettiva *accidentale* sulla terminazione del braccio dei tre oggetti è straordinariamente bassa: circa $6 \cdot 10^{-13}$. L'ipotesi di Arp, corrispondente a un modello che vedremo meglio in seguito, è invece che la Seyfert, molto attiva, abbia espulso a intermittenza del materiale, il più vecchio già evoluto diventando la galassia compagna, mentre i due oggetti di tipo QSO più giovani sono ancora in evoluzione verso la stessa meta, il tutto rispettando l'assunto fondamentale che tali oggetti hanno uno z decrescente (il cui senso vedremo dopo) all'allontanarsi dalla Seyfert.

Un ultimo caso di questo tipo che qui presentiamo brevemente è quello della NGC 4151, una galassia di Seyfert molto attiva, e l'oggetto BL Lac 1207+39W4. Come si vede nella fig. 17 un ponte di materia a bassa brillantezza superficiale sembra legare i due oggetti. Il punto è che essi non potrebbero essere in connessione visto che il primo ha uno z di appena 0.003 mentre il secondo arriva addirittura a 0.615. Secondo Arp la probabilità di un'associazione casuale è di circa 2 su centomila.

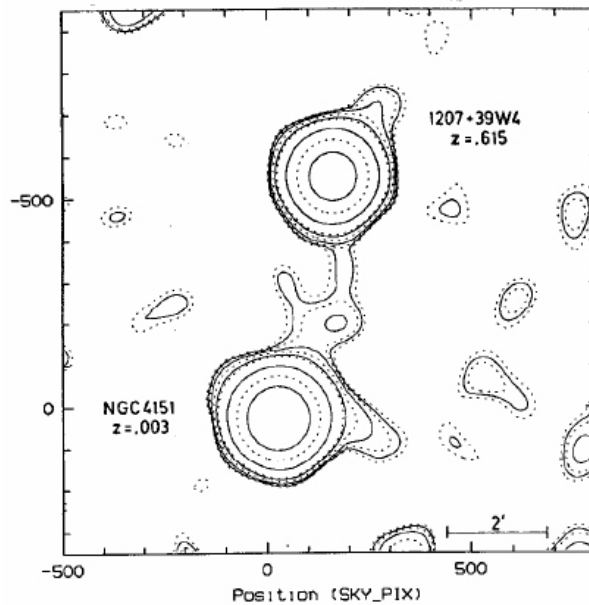


Fig. 17: Mappa X ad alta risoluzione che mostra il ponte di materia fra la NGC 4151 e l'oggetto BL Lac 1207+39W4.

8.2 Posizioni e allineamenti

Le radiosorgenti allineate sono solitamente considerate dagli astronomi il frutto di processi di emissione di materia (come nel caso dei radiolobi visti prima nel par. 7). Come dicevamo, l'idea di Arp è che questo valga anche nella banda X dove ad allinearsi è una coppia di QSO supposti espulsi dalla galassia attiva centrale. La prova più interessante e stringente dell'origine espulsiva delle galassie compagne e dei QSO è proprio questo loro allineamento lungo l'asse minore²⁶ della galassia dominante o della galassia attiva, dalle quali essi sarebbero stati espulsi in un più o meno lontano passato. L'origine delle galassie compagne non sarebbe altro che lo stadio finale dell'evoluzione dei QSO nel frattempo appunto diventati galassie normali. I casi che egli raccoglie sono innumerevoli. Vediamone solo alcuni.

La spirale IC1767 (fig. 18), dalla morfologia assai disturbata, si trova al centro di una coppia di radioQSO (le sorgenti radio più forti della regione in questione) con degli z significativamente quasi uguali²⁷. Inutile dire che per la cosmologia standard la coppia di QSO è molto distante dalla spirale.

Nella prima immagine della fig. 19 si evidenzia la coppia di QSO centrata sulla Seyfert NGC 2639. Si tratta dei due QSO con la minima differenza in z mai misurata fino a oggi (specifica Arp 1998): 0.018. La probabilità che due QSO non correlati abbiano z così vicini, pur non essendo legati in alcun modo (secondo la teoria standard), è di circa 1/100. E questa va moltiplicata per l'infinitesima probabilità di trovare per caso due sorgenti X vicine ad un punto arbitrario del cielo. Insomma, conclude Arp, siamo chiaramente di fronte a una coppia di QSO fisicamente legata alla Seyfert.

Nella seconda immagine, una mappa X delle sorgenti vicino alla NGC 2639, si notano altre 7 sorgenti X più deboli esattamente allineate lungo l'asse minore in direzione NE. Sono quasi certamente, afferma Arp, QSO di più recente espulsione (tanto più recente quanto vicine alla galassia). Si nota

²⁶ L'asse minore è l'asse di rotazione, cioè l'asse perpendicolare al piano del disco galattico attorno a cui, per l'appunto, una galassia ruota.

²⁷ Un radioQSO, infatti, solitamente ha uno z che va 0.1 a 2.4. Se questi non fossero correlati, ossia se non fossero stati espulsi dallo stesso oggetto, la probabilità di uno z così simile sarebbe assai bassa. Si noti inoltre che nello z misurato di un certo oggetto, secondo la teoria di Arp, c'è una parte intrinseca, sulla cui natura torneremo più avanti, e una parte dovuta all'effettiva velocità di espulsione, di circa $0.07c$ (per i QSO), con la quale tale oggetto è stato espulso dalla galassia (per un esempio si veda Arp 1998, 33).

anche come l'allineamento, l'"asse di espulsione", dei QSO maggiori, essendo questi più esterni, è probabilmente ruotato nel tempo.

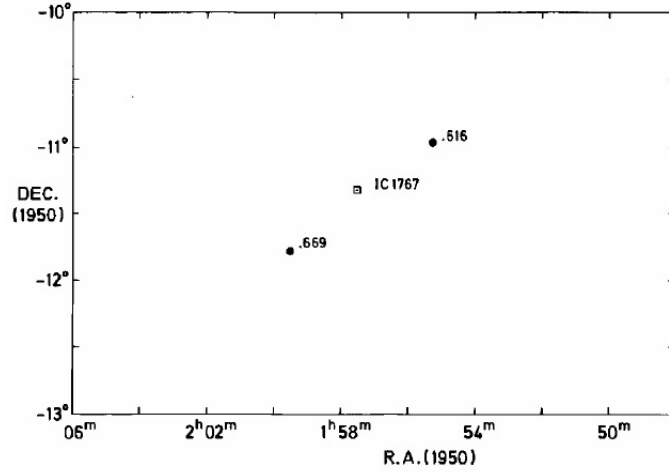


Fig. 18: La IC1767 ha uno z di 0.0175, mentre i due QSO di 0.669 e 0.616.

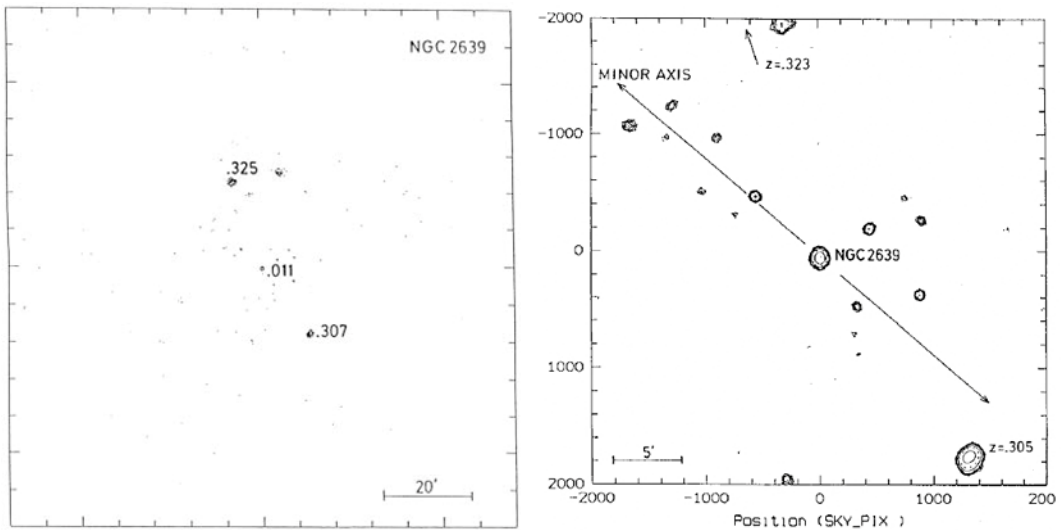


Fig. 19: La coppia di QSO attorno alla NGC 2639 e una mappa X di quest'ultima più dettagliata, dove si riconoscono anche le altre sorgenti X allineate (in particolare, vi sono 4 oggetti stellari blu, anch'essi quasi certamente QSO).

Altri casi di allineamenti nella fig. 20. Nella prima immagine una Seyfert, una delle 5 o 6 più brillanti nell'X di tutto il cielo, con $z = 0.056$, e la coppia di QSO PKS0402-362 ($z = 1.417$) e PKS0405-385 ($z = 1.285$). Nella seconda la NGC 3516, anch'essa una galassia di Seyfert estremamente attiva, con 5 sorgenti X (allineate lungo l'asse minore della galassia in un intervallo di $\pm 20^\circ$) i cui z decrescono in funzione della distanza dalla galassia. Contando anche l'oggetto BL Lac più scostato, in tutto sono 6 i QSO che sembrano fuoriusciti dalla Seyfert lungo il suo asse minore²⁸.

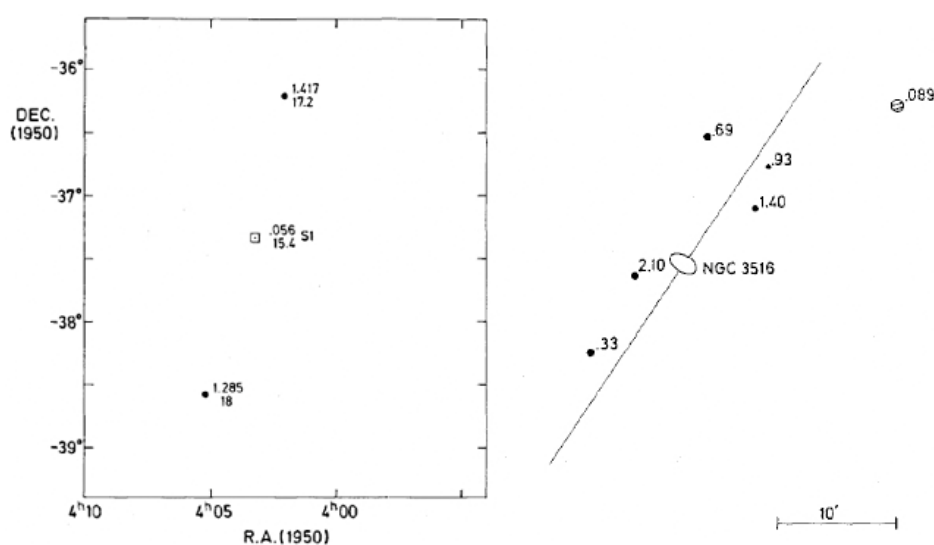


Fig. 20: A sinistra l'allineamento della Seyfert con la coppia di QSO; a destra la NGC 3516 con i 5 QSO e i relativi z .

La galassia di Seyfert/QSO PG 1211+143 (fig. 21) è un oggetto attivo allineato con radiosorgenti (ricordiamo che queste sono interpretate dalla cosmologia standard come il risultato di emissione di materiale da galassie attive). Non solo, esso ha ai suoi lati anche una coppia di QSO, e tutti emettono fortemente nell'X.

²⁸ Anticipo un fatto importante: tali valori degli z (detti *picchi di quantizzazione*) sono vicinissimi a quelli teoricamente previsti da una formula ritenuta codificare la cosiddetta quantizzazione dei redshift che fra poche pagine vedremo. Non solo, gli z decrescono in funzione della distanza dalla galassia mentre la luminosità aumenta. Queste evidenze osservative confluiranno nel modello di Arp sulle espulsioni dei QSO.

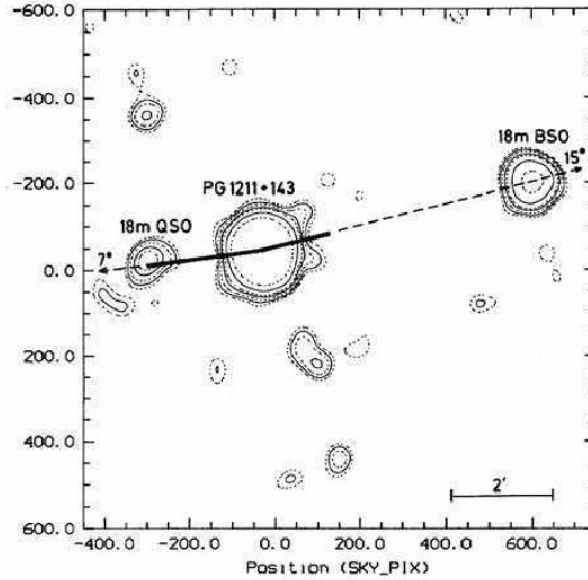


Fig. 21: Mappa X del sistema composto dalla PG 1211+143 ($z = 0.085$) e dalla coppia di QSO ($z = 1.28$ e 1.02).

Altri allineamenti in fig. 22. Nella prima immagine l'allineamento della M49, la galassia (attiva) più brillante al centro dell'Ammasso della Vergine, con la 3C274 (o M87), una delle radiogalassie più brillanti, e con la 3C273, il radioQSO più brillante del cielo. La domanda che (si) pone Arp è semplice: «È rilevante il fatto che il QSO più luminoso di tutto il cielo vada a cadere proprio al centro della più cospicua aggregazione di galassie che si conosca? Non è significativo che assieme a M87 formi una coppia di radiosorgenti quasi esattamente allineate ai due lati della galassia più brillante (M49) di tutto l'Ammasso della Vergine?» (1998, 156). Il calcolo della probabilità che si tratti di un'associazione casuale è stato pubblicato nel lontano 1966 su *Science* e nel 1967 sull'*Astrophysical Journal*: è una su un milione. Non solo: nel 1989 è stata scoperta una nube di idrogeno, sulla cui appartenenza all'Ammasso della Vergine tutti concordano, allungata verso il QSO 3C273 e allineata (a meno di appena 3 gradi) proprio verso il getto che fuoriesce da quest'ultimo²⁹.

²⁹ Per i dettagli si veda Arp (1998, 166-8).

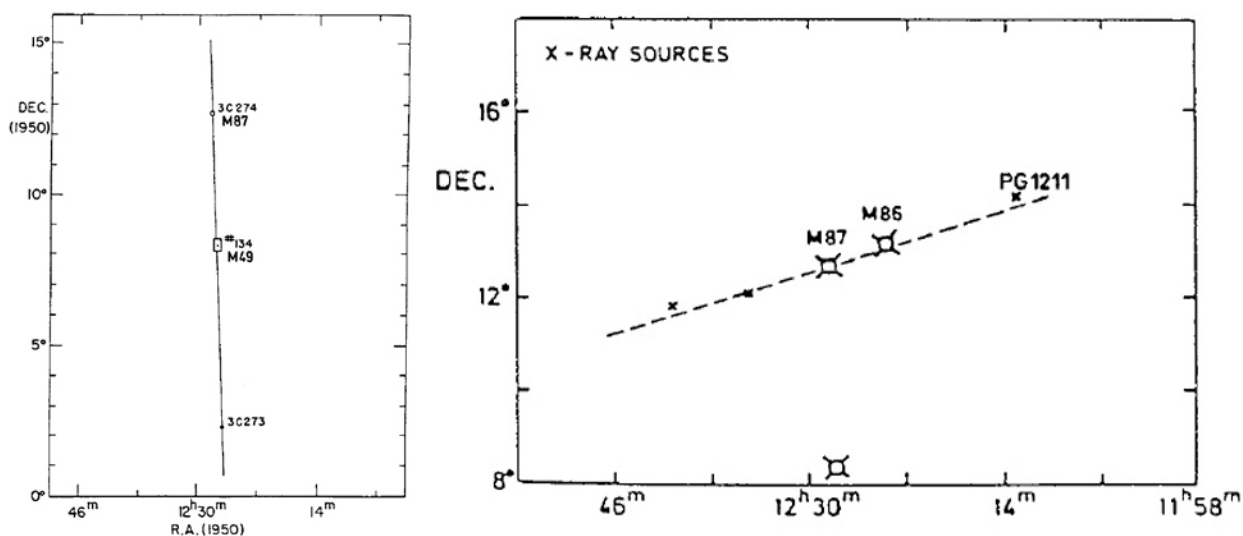


Fig. 22: Gli allineamenti riguardanti rispettivamente la M49 e la M87.

Nella seconda immagine un ingrandimento della parte nord dell'Ammasso della Vergine. Si riconosce ancora la M87 e precisamente lungo la direzione del suo getto ritroviamo la galassia di Seyfert PG1211+143 vista prima la quale, a sua volta, ha emesso due QSO. Come risulta anche visivamente da diverse fotografie (si veda la fig. 1 di questo scritto), nel getto stesso si osservano alcune condensazioni sempre più marcate all'aumentare della loro distanza dalla galassia. Nelle vicinanze di M87 siamo insomma di fronte, sempre secondo Arp, a diverse generazioni di oggetti, nelle quali i più giovani hanno z via via maggiori.

La Seyfert NGC 1097 (fig. 23) è quella che Arp definisce una vera e propria "fabbrica di QSO". Attorno a tale galassia, che possiede i getti di materiale otticamente attivo di bassa brillantezza superficiale più lunghi e più studiati di qualsiasi altra galassia, si concentrano almeno 40 QSO, i più brillanti dei quali si trovano proprio tra e lungo i getti ottici più intensi, e lungo particolari allineamenti (in una disposizione complessiva che ha relative bassissime probabilità statistiche). E quindi, «poiché è difficile non credere che i getti ottici siano emessi da NGC 1097, risulta ovvio che anche i QSO siano stati espulsi dalla galassia» (Arp 1998, 67)³⁰.

³⁰ L'analisi di Arp qui è particolarmente ricca e non riassumibile in poco spazio: si veda Arp (1998, 64-70).

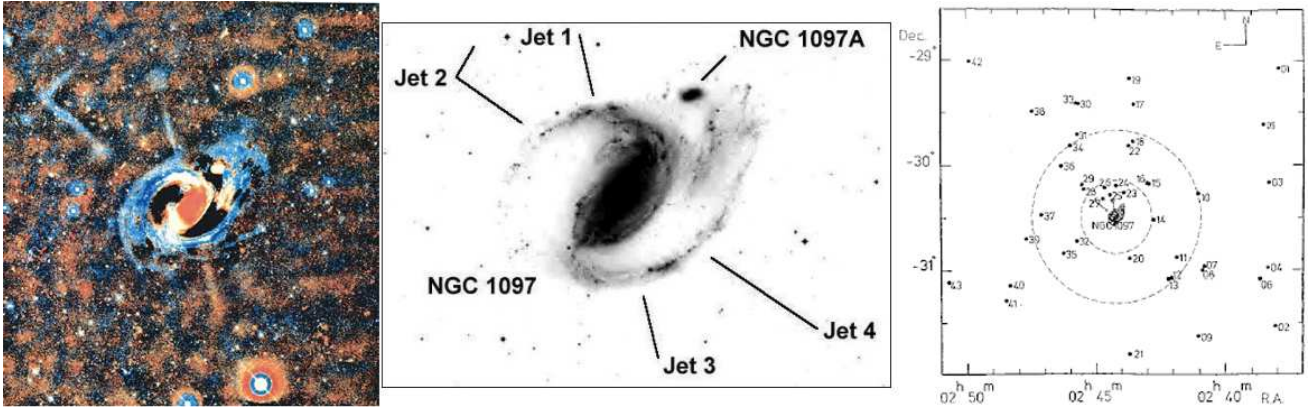


Fig. 23: Immagine nelle bande blu e rossa della NGC 1097 (si notino i due getti 1 e 2 in blu e l'arrossamento del contro getto 3), e i candidati QSO attorno ad essa.

La fig. 24 mostra la catena di 5 galassie VV172, due su entrambi i lati di una galassia centrale più grande. La galassia 2 ha uno z che è più del doppio degli altri che sono pressoché identici. La domanda è spontanea: è un caso che sia lì in mezzo? E come mai ha un colore abnormemente blu, quando, nel caso fosse una lontana galassia dello sfondo (come vuole il credo corrente), dovrebbe avere un normale colore rossastro?

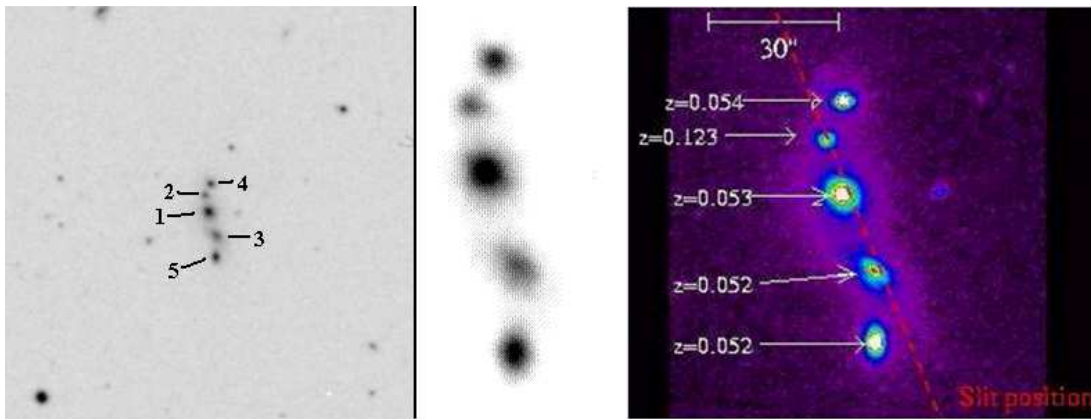


Fig. 24: Tre immagini della catena VV172 con i rispettivi z .

Gli astrofisici “standard” ritengono che i QSO mostrino complessivamente una distribuzione casuale come quella riguardante la regione centrale dell’Ammasso della Vergine dove è presente M49 (prima immagine in fig. 25). Ma, sottolinea Arp, se consideriamo i QSO più

brillanti nell'intervallo di mezza magnitudine (seconda immagine), appare un allineamento di oggetti in uscita da M49 con valori di z molto vicini a quelli previsti dalla quantizzazione (che vedremo più avanti).

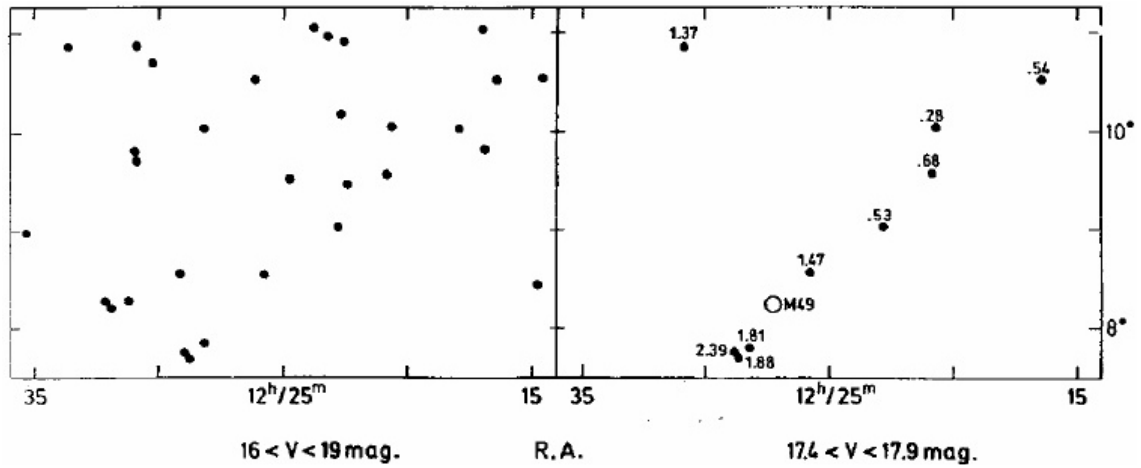


Fig. 25: Distribuzione dei QSO come risulta, rispettivamente, negli intervalli di 3 (fra 16 e 19) e di 0.5 (fra 17.4 e 17.9) magnitudini apparenti.

Guardiamo adesso a questa spirale barrata, la NGC 1073 (fig. 26). A soli 2 minuti d'arco dal suo nucleo galattico sembrano cadere 3 QSO ad alto z .

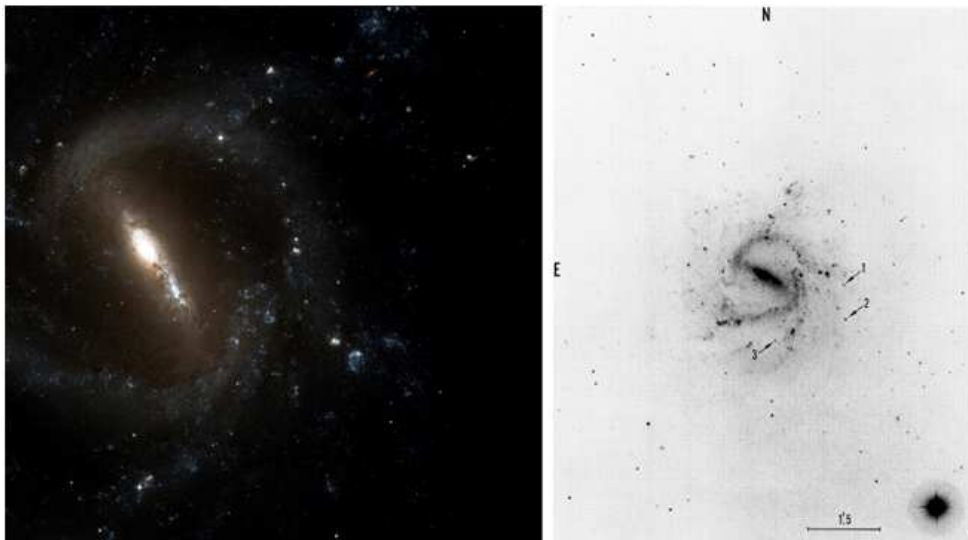


Fig. 26: La NGC 1073 e i 3 QSO indicati dalle frecce.

Si chiede Arp: essendoci mediamente meno di 20 QSO di questa grandezza per grado quadrato nel cielo, la loro presenza in quella zona è solo una sovrapposizione casuale, e quindi quei QSO non sono realmente vicini al nucleo³¹?

Ovviamente, per Arp, tutte queste, e molte altre che qui non ho potuto riportare, non sono associazioni casuali. Le sue osservazioni lo hanno portato a concludere che i QSO non sono uniformemente diffusi nell'universo ma si concentrano a meno di $\pm 20^\circ$ dall'asse minore delle galassie attive, mentre le galassie compagne a meno di $\pm 35^\circ$ (come mostrato in fig. 27). Già nel 1969, il famoso astronomo svedese Erik Holmberg aveva raccolto notevoli prove a favore di questa disposizione delle galassie compagne rispetto alla dominante. Quindi QSO e galassie compagne occupano sostanzialmente lo stesso volume di spazio lungo quest'asse. Il motivo per cui, al passare del tempo, non si sparpagliano tutt'intorno nella regione circostante alla galassia è che essendo stati espulsi lungo il suo asse minore non hanno momento angolare (moti di rotazione), quindi al passare del tempo mantengono sostanzialmente la direzione radiale iniziale di espulsione, e pian piano solo le perturbazioni gravitazionali causano un aumento della loro dispersione attorno a tale asse entro un range comunque limitato: appunto di $\pm 20^\circ$ per gli oggetti più giovani, in quanto hanno avuto meno tempo per risentire delle perturbazioni, e di $\pm 35^\circ$ per le compagne più vecchie³².

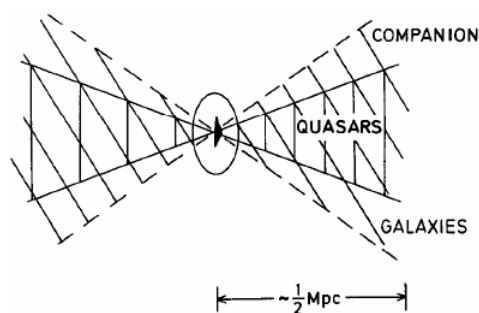


Fig. 27: Le zone in cui si rilevano i QSO e le galassie compagne.

³¹ Si noti che un minuto d'arco è 1/60 di grado d'arco. Per ottenere un grado quadrato immaginiamo di moltiplicare per circa 7 i lati della seconda immagine di fig. 26; in un'area così ottenuta si trovano mediamente meno di 20 QSO del tipo che invece la NGC 1073 pare ospitare in soli 2 minuti d'arco.

³² Vi sono comunque anche casi di probabili espulsioni di oggetti attraverso il piano galattico, espulsioni ovviamente "rallentate" dalla presenza di gas e polveri (si veda Arp 1998, 121-4).

Essendo i QSO relativamente “pochi” e distanti, tali associazioni possono essere soltanto casuali?

8.3 Eccesso di redshift

Arp sostiene che i risultati ottenuti per i QSO, e più in genere per gli AGN, valgono anche per le galassie “normali”. Egli analizza alcuni casi di gruppi di galassie nei quali la galassia centrale più massiccia (dominante e più grande) ha uno z minore delle galassie compagne (più piccole). Esponiamo brevemente tre casi e poi spieghiamo qual è il punto per Arp.

Nella fig. 28 sono rappresentati il gruppo di galassie M31 – detto anche Gruppo Locale (è l’insieme di galassie, di cui fa parte anche la Via Lattea, centrate sulla galassia M31, o Nebulosa di Andromeda) – e il gruppo M81 (centrato appunto sulla spirale M81), con le rispettive galassie e i loro z . Tutte e 22 le maggiori compagne di questi gruppi hanno z più alti delle loro rispettive galassie dominanti (M31 e M81).

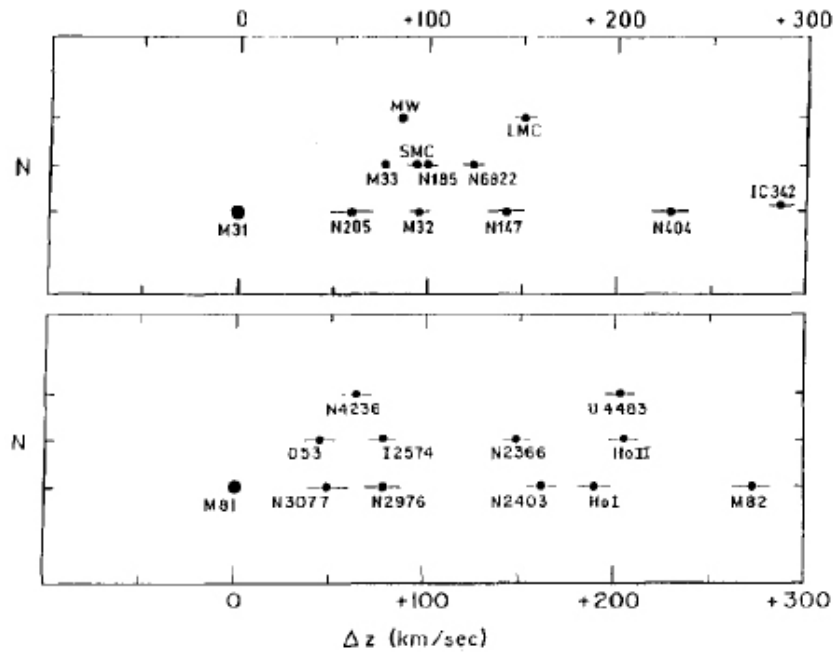


Fig. 28: In alto il Gruppo Locale e in basso il gruppo M81.

Ora, se gli z delle compagne fossero dovuti a velocità orbitali attorno alla galassia centrale, dovrebbero esserci *mediamente* sia redshift (moti di allontanamento) che blueshifts (avvicinamento). Ma così non è: gli z sono stranamente tutti positivi e quindi redshift. La probabilità di una tale disposizione delle velocità è di 1 su 4 milioni³³.

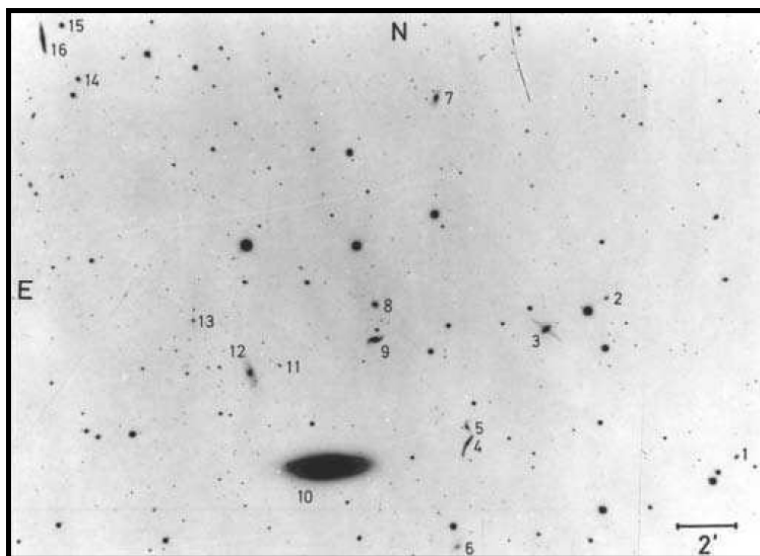


Fig. 29: La NGC 4448 e le sue compagne.

Stessa cosa accade per la galassia NGC 4448 (fig. 29), che ha uno z corrispondente a 693 km/s, mentre gli z del suo gruppo di compagne di bassa luminosità sono molto superiori (da 5200 a 36000 km/s).

Un altro caso è quello della galassia ellittica Arp 105 (NGC 3561B) e delle compagne (fig. 30), solitamente interpretato come un tipico caso di fusione e collisione fra galassie. Inutile dire che per Arp si tratta invece di un autentico esempio di espulsione. Ma il punto stavolta non è questo: il punto è che, collisione o espulsione che sia, ci si aspetterebbe di trovare in media lo stesso numero di oggetti con velocità più alta e più bassa di quella di Arp 105, e invece tutte e 9 le compagne a basso z hanno una velocità più alta, ossia hanno uno z più alto, di quella di Arp 105. Come nei precedenti

³³ Per approfondimenti si veda Arp (1994).

casi, quindi, anche qui si è in presenza di un caso dove il redshift delle compagne è superiore alla dispersione delle velocità dell'intero sistema³⁴.

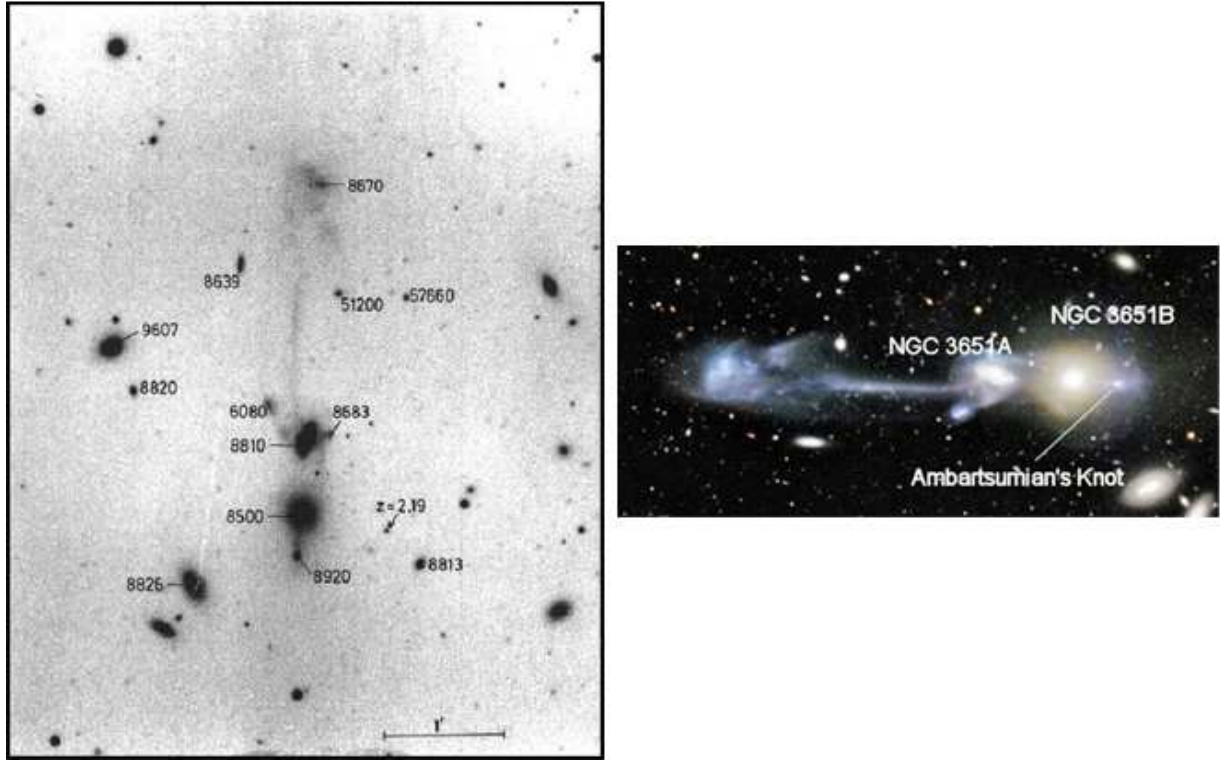


Fig. 30: L'ammasso centrato su Arp 105 (con $z = 8500$ km/s) con il cosiddetto *nodulo di Ambartsumian* (una galassia nana ellittica con $z = 8920$) da essa espulso in direzione sud, mentre verso nord è evidente la controespulsione che investe la spirale NGC 3561A ($z = 8810$). Nella seconda immagine, particolare dello stesso ammasso ma in direzione ruotata di 90° .

Situazioni analoghe si presentano anche a scale più grandi. Per esempio, nell'Ammasso della Vergine – al centro del Superammasso Locale che contiene circa un centinaio tra gruppi e ammassi di galassie, fra cui anche il nostro Gruppo Locale – ci sono galassie di ogni tipo morfologico, e le più piccole hanno degli z sistematicamente più alti di quelli delle più

³⁴ Commenta Arp che nel 1982 venne pubblicata una lista di 38 di queste galassie dallo z in disaccordo (in un range che va da 4000 a 36000 km/s) con quello della galassia progenitrice, ma nessuna ricerca più approfondita è stata approntata dall'*establishment*.

grandi. Ciò accade anche in altri 5 grandi ammassi: *tutte* le spirali più giovani hanno z più alti³⁵.

Come spiegare questi “strani” sistemi? Noi sappiamo che, sebbene galassie dominanti e galassie compagne abbiano stelle, gas e polveri simili, tipicamente quelle dominanti, centrali e massicce, sono caratterizzate dalla presenza di molte stelle vecchie, mentre gran parte delle compagne hanno una percentuale più alta di stelle più giovani e calde (i loro spettri sono dominati dalle righe, in assorbimento, di Balmer dell'idrogeno, caratteristiche di stelle giovani di 10^8 - 10^9 anni³⁶). Possiamo dedurre che le stelle più vecchie erano presenti già all'epoca della formazione del gruppo, mentre le galassie compagne si sono formate a seguito di successivi fenomeni di espulsione di materia? E quindi: non sarà che il redshift ha qualcosa a che fare con l'età!? Ossia, è alto per gli oggetti giovani e man mano decresce al loro invecchiare?

8.3.1 L'effetto K

Nel 1911 W. W. Campbell scoprì dei redshift in eccesso anche nelle stelle, fenomeno che divenne noto col nome di *effetto K*. Egli notò che le stelle brillanti blu della Via Lattea avevano uno z sistematicamente più alto di quello delle altre stelle. Ovviamente tali stelle blu non possiedono alcun moto d'insieme, d'allontanamento, rispetto al Sole, quindi una spiegazione Doppler non vale, né vale, calcoli alla mano, la possibilità di un redshift gravitazionale, in quanto la gravità sulla loro superficie è troppo debole. Questo eccesso di redshift è proprio anche di altre stelle giovani e luminose di altri sistemi stellari. Per esempio vale per tutte e dieci le stelle supergiganti della Piccola Nube di Magellano (l'eccesso medio è di 34 km/s), e per 20 delle 24 della Grande Nube (29 km/s). Calcola Arp, infatti, che questi z , dopo essere stati corretti per un fattore dovuto al vento stellare, risultano sistematicamente più alti dei valori medi di queste Nubi. Altri casi di effetto K sono stati misurati in galassie vicine (si veda tabella in Arp 1998, 137). Ovviamente è difficile lo studio delle singole stelle giovani in galassie più distanti.

Perché la materia più giovane ha z più alti?, si chiede Arp.

³⁵ Si vedano i diagrammi in Arp (1998, 94-5).

³⁶ Le stelle più vecchie arrivano a 10^{10} anni.

8.4 Due “curiosità”

Come visto, la teoria standard sostiene che i QSO sono ospiti di una galassia che li “nutre”. Il QSO 3C48 (fig. 31), scivolando fuori dalla “sua” galassia nana che dovrebbe nutrirlo, sembrerebbe sfatare questa credenza.

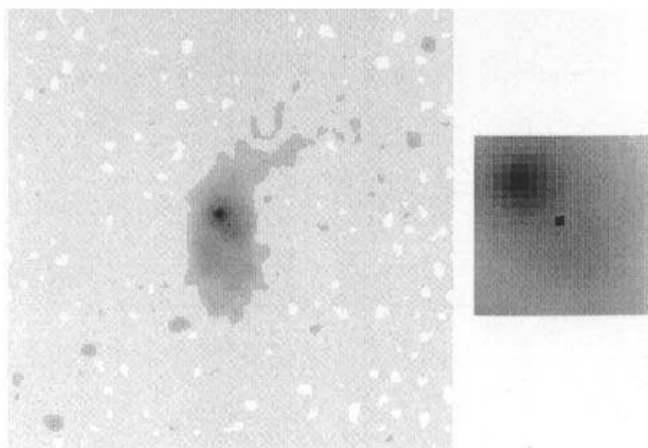


Fig. 31: Il QSO 3C48 all'esterno del nucleo della sua galassia nana.

L'eccesso di z di alcune galassie porta a conseguenze singolari. Ad esempio, la galassia a spirale NGC 309 di alta luminosità: raffrontando la distanza ottenuta tramite il suo z e tramite il metodo di Tully-Fisher³⁷, si ottiene una notevole discrepanza. Questo, tradotto in immagini, significa quanto possiamo vedere nella fig. 32: la NGC 309, se fosse alla distanza che si deriva dal suo z , apparirebbe inverosimilmente più grande della già gigantesca M81, una delle più grandi conosciute.

Alla fine di questa panoramica mi preme una importante sottolineatura. Questa successione di casi non solo è una piccola parte di quelli che Arp riporta nei suoi libri e articoli, ma è soprattutto una successione inevitabilmente superficiale che non rende merito ai dettagli delle sue analisi tecniche, correlate le une alle altre e corredate da calcoli, diagrammi, deduzioni, elaborazioni. Per di più, alla sua visione d'insieme andrebbero aggiunti anche i non pochi lavori di altri ricercatori a sostegno delle sue tesi, qui pressoché assenti.

³⁷ Tale metodo si basa sulla *relazione di Tully-Fisher*, una relazione empirica fra la luminosità intrinseca di una galassia a spirale e l'ampiezza della sua curva di rotazione.

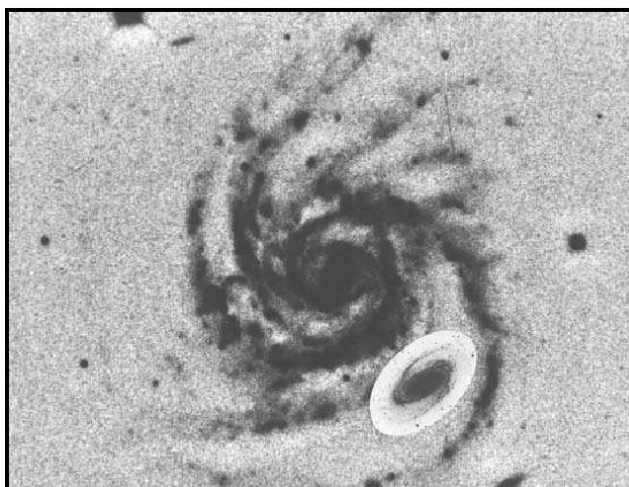


Fig. 32: In grande la NGC 309, nell'ovale la M81 aggiunta solo come termine di raffronto.

8.5 La quantizzazione del redshift

Secondo le misurazioni i valori degli z non varierebbero con continuità, ma si accentrerebbero su determinati valori. Questa è un'altra delle prove empiriche incontrovertibili (testata, con programmi computerizzati, su decine di migliaia di oggetti) su cui Arp basa le sue considerazioni teoriche. I QSO, le galassie, ecc., tendono ad avere certi valori particolari di z quando misurati rispetto allo z dell'oggetto "progenitore". Tali valori si accordano, secondo Arp, con la formula trovata nel 1971 dall'astronomo svedese K. G. Karlsson analizzando gli z di circa 600 QSOs, la quale suggerisce una periodicità di

$$\Delta \log(1 + z_{eff}) = 0.089,$$

dove z_{eff} , il redshift *effettivo* del QSO misurato relativo alla galassia vicina, è definito da

$$1 + z_{eff} = (1 + z_Q)/(1 + z_G),$$

con z_Q il redshift misurato del QSO e z_G quello della galassia associata. Il rapporto dei picchi successivi segue quindi la formula

$(1 + z_{n+1})/(1 + z_n) = 1.23$, che, a partire dal primo a $z = 0.061$, dà i seguenti valori approssimati:

0.06; 0.30; 0.60; 0.96; 1.41; 1.96; 2.64 ...

La fig. 33, che mette assieme gli z dei QSO rilevati dal 1990, conferma questa tendenza, mostrando come i picchi di quantizzazione si situino sui valori poc' anzi detti.

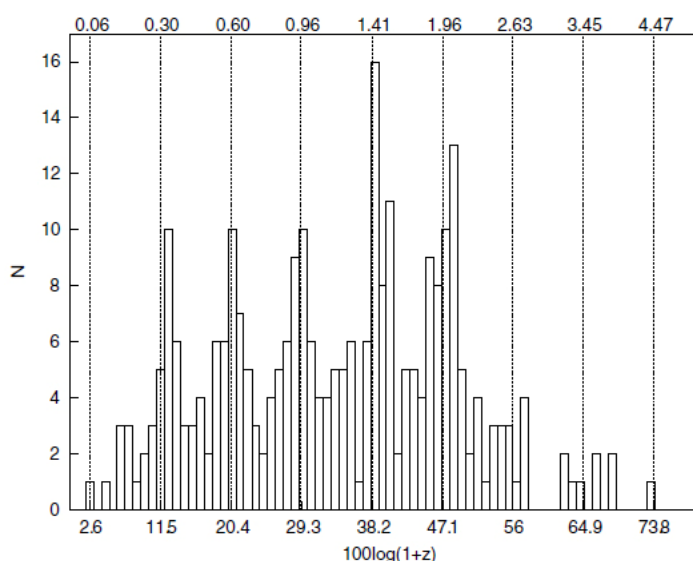


Fig. 33: Istogramma tratto da Pecker e Narlikar (2006, 204).

Giusto per un più specifico esempio lampo, si vedano gli allineamenti di QSO in fig. 34. Oltre all'essere significativi per le ragioni viste, questi tre tripletti sono assai simili fra loro nei valori dei loro z che si approssimano sui picchi di quantizzazione.

In genere, ovviamente, come risulta anche da questi tripletti, non tutti gli z misurati corrispondono *esattamente* ai suddetti picchi: intanto perché possono esserci componenti Doppler anche dovute alle velocità di espulsione, poi perché vi sono anche casi di oggetti in una fase di transizione tra questi stati preferenziali di z . Inoltre, come accade per esempio nel caso della 3C 343.1 (fig. 9), lo z del QSO, che è di 0.75 e che quindi non ricade in uno dei picchi di Karlsson, deve essere trasformato nel sistema di riferimento della galassia progenitrice, risultando così essere di 0.302, ossia proprio sul picco di 0.30 (si veda Arp 1998, 364). Va da sé che

per sistemi di galassie vicine le une alle altre la loro reciproca velocità orbitale cresce con la vicinanza e quindi altera e deteriora il grado di periodicità del redshift che diviene così irrilevabile.

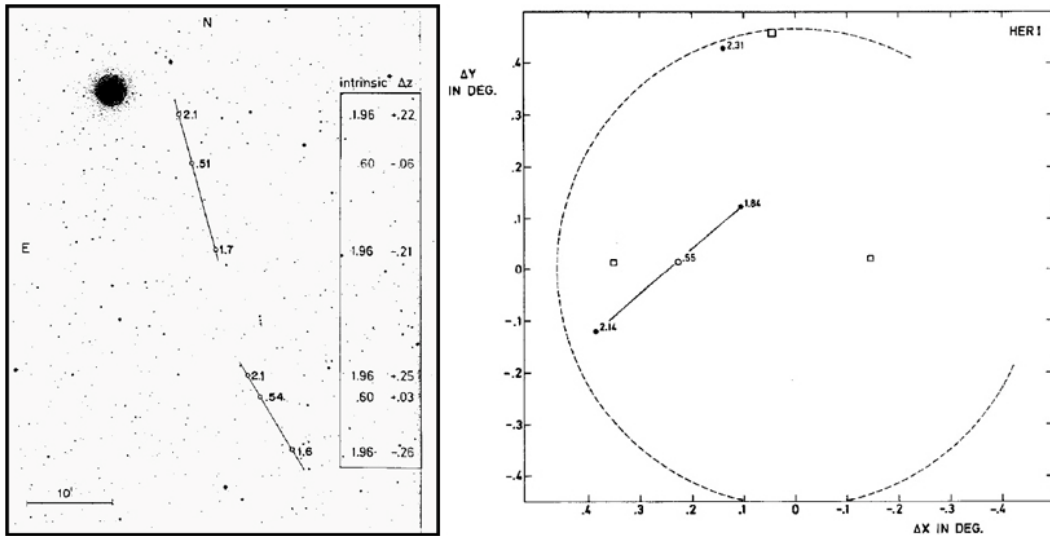


Fig. 34: I due tripletti di Arp/Hazard (a sinistra) e quello della Hercules II (a destra). Nel rettangolo della prima immagine sono mostrati i picchi di quantizzazione teorici dai quali è possibile ricavare, comparandoli con quelli misurati, le eventuali velocità di espulsione uguali e contrapposte (il Δz positivo significa che l'oggetto si allontana da noi; si avvicina nel caso negativo).

Sono state fatte diverse stime su questo fenomeno. Per esempio, Duari et al. (1992) su più di 2000 QSO hanno riscontrato una periodicità, in termini di velocità, di $\Delta cz \approx 0.0565$ (con un livello di confidenza superiore al 90%). Per galassie di redshift medio è risultato $\Delta cz \approx 0.06$, da $z = 0.06$ a 0.24 (Burbidge e Hewitt 1990). Per galassie a più basso redshift, già nel 1976 Tifft si accorse che le galassie dell'Ammasso della Chioma mostravano una periodicità nei loro z con periodo di $c\Delta z \approx 72$ km/s; calcoli più accurati di Arp del 1986, fatti per le galassie compagne nei gruppi M31 e M81, hanno mostrato multipli di 72.4 km/s. Guthrie e Napier (1996), usando spirali all'interno del Superammasso Locale con z molto accurati, hanno trovato $c\Delta z = 37.6$ km/s³⁸.

Inutile concludere dicendo che per l'astronomia ortodossa la quantizzazione dei redshift esiste solo come insignificante rumore che si sovrappone e disturba il segnale. Del resto, come poterla accettare, visto che

³⁸ Per recenti approfondimenti si veda Pecker e Narlikar (2006).

se lo z misura le componenti radiali delle velocità di recessione, e quindi delle distanze, si dovrebbero ottenere delle distribuzioni *continue* in ogni direzione rispetto alla nostra linea di vista. Invece la quantizzazione implicherebbe una immotivata distribuzione degli oggetti celesti su determinati cerchi concentrici, appunto i valori quantizzati, centrati sulla Via Lattea, ossia una sorta di quantizzazione delle distanze dei QSO e delle galassie dalla Terra, che verrebbe insomma a trovarsi al centro di un'espansione a "gusci" in un quadro generale obbrobriosamente anticopernicano.

9. L'universo machiano di Arp

9.1 I redshift intrinseci

Arp spiega tutti questi redshift anomali, sia nelle loro componenti in eccesso, sia nel loro presentarsi quantizzati, con quelli che ha chiamato redshift *intrinseci*, in quanto non dipendono da velocità, né da distanze, né dalla gravità, né da fenomeni di tipo luce stanca, ma dipendono, in modi che ora vedremo, dalla massa e dall'età degli oggetti emittenti. Questo tipo di z è insomma una proprietà intrinseca dell'oggetto in questione, più in particolare, «tutti i redshift che superano i 300 km/s circa [...] non indicano velocità di recessione» (Arp 1998, 368).

Altri autori sostengono questa tesi. Cito soltanto la significativa conclusione di Hoyle, Burbidge e Narlikar (2000, 124), i quali, sulla base di un'elaborazione al computer sul catalogo di tutti (circa 3000) i QSO conosciuti nel 1987, dichiarano, riguardo alle circa 400 coppie di QSO e galassie separate da meno di 10 minuti d'arco, «senza alcuna possibilità di dubbio che la schiacciante maggioranza delle coppie [...] sono fisicamente associate. E perciò che i QSO sono in ognuno dei casi alla stessa distanza della galassia associata, la qual cosa richiede che il grande redshift osservato del QSO abbia una proprietà intrinseca dominante».

Ma come si originano i redshift intrinseci e come spiegare la loro quantizzazione?

9.2 L'ipotesi della massa variabile

Narlikar (1977) generalizza le equazioni della Relatività Generale proponendo una variazione della teoria conforme della gravità eretta anni

prima da lui stesso e da Fred Hoyle³⁹. Se le equazioni di campo di questa teoria (le $G_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$) sono scritte in forma più generale, allora esse contengono dei termini in cui la massa delle particelle non è costante su tutte le distanze spaziali e in tutti gli intervalli temporali. Si ha in tal caso una soluzione più generale per la massa m di una particella in uno spaziotempo piatto⁴⁰:

$$m = a t^2 \quad \text{con } a = \text{cost.}$$

Quindi la massa di una particella cresce con il quadrato del tempo. È la cosiddetta *ipotesi della massa variabile*, la quale, pur accettando la Relatività Generale⁴¹ e la fisica delle particelle standard, rifiuta l'usuale assunzione che le masse delle particelle siano delle costanti universali⁴². Anzi, poiché il tempo sarebbe contato a partire da $t = 0$, quest'istante si configurerebbe come l'istante di creazione della particella (che quindi avrebbe massa nulla a quell'istante).

Arp specifica che parlando di "creazione" non si deve intendere che la materia arrivi dal "nulla", o da un misterioso "altrove" dell'universo, ma, più semplicemente, si deve pensare a una trasformazione di massa-energia preesistente, probabilmente un processo di materializzazione a partire da uno stato diffuso precedente⁴³.

Ma come si collega quest'ipotesi con il redshift intrinseco?

³⁹ Hoyle e Narlikar (1964; 1966; 1974).

⁴⁰ Si veda Narlikar e Arp (1993).

⁴¹ Nel caso di $m = \text{cost.}$, infatti, le equazioni di questa teoria si riducono a quelle della Relatività Generale.

⁴² Si noti che la massa varia su tempi di scala cosmica: su scala terrestre, dove si ha a che fare con intervalli di tempo relativamente brevi, si può fare l'approssimazione che la massa sia costante.

⁴³ Sovente, a chi sente parlare di "creazione di materia" gli si arriccchia il naso, a discapito così della sua già scarsa abilità a vedere più in là dello stesso. Infatti, ripensiamo, *senza pregiudizi*, al modello standard: forse che quell'atto unico esplosivo del big bang, di *tutta* la materia-energia esistente e dello spaziotempo stesso da un punto infinitesimo, è più facilmente digeribile di questi atti molteplici di "mini bangs"? Se vogliamo lasciarci cullare da considerazioni aprioristiche, per chi scrive l'ipotesi di un universo "eterno", che si "auto-genera" con continue trasformazioni dei suoi contenuti di massa-energia, sembra più appetibile, se non altro perché zittisce, o almeno lascia sfiatare, quella *big question*, invece ineludibile al big bang, sul senso (*laico*, si badi) da assegnare a una siffatta onnicomprensiva origine dell'universo a partire da un istante di cui non si può dire nulla di scientificamente sensato.

Dalle note relazioni $E = h\nu$ ed $E = mc^2$, risulta che $\lambda \propto m^{-1}$. Quindi si deduce, dall'equazione poc'anzi vista, che $\lambda \propto t^{-2}$ e, conseguentemente, che la relazione tra z e tempo (cioè età dell'oggetto emittente) è del tipo:

$$\frac{1 + z_1}{1 + z_0} = \frac{m_0}{m_1} = \frac{t_0^2}{t_1^2} \Rightarrow (1 + z) \propto t^{-2},$$

dove $z_0(z_1)$ è il redshift della materia creata $t_0(t_1)$ anni fa. È questa la legge empirica età-redshift, dalla quale risulta che z è inversamente proporzionale al quadrato del tempo, ossia alla massa, e decresce al crescere dell'età perché la massa delle particelle elementari aumenta con il tempo (su tempi di scala cosmica).

9.3 Verso una fisica machiana

Se $m = m(t)$ allora un elettrone più giovane (cioè creato più recentemente) ha una massa minore (nulla all'atto della creazione). Quando tale elettrone compie una transizione tra due orbite atomiche (“salta” da uno stato eccitato a uno di più bassa energia), allora il fotone emesso ha un'energia più bassa di quello emesso da un elettrone “normale” e la riga spettrale risultante è spostata verso il rosso. Risulta così che quanto più giovane è un oggetto, tanto minore è la sua massa e quindi tanto più alto risulta il suo z ⁴⁴.

L'ipotesi della massa variabile di Narlikar abbracciata da Arp s'inquadra in una teoria di tipo-machiano, nel senso che ogni particella nell'universo deriva la sua massa inerziale dal resto delle masse delle altre particelle nell'universo (appunto il, o meglio una delle forme del, *Principio di Mach*). Arp (1998, 146) descrive così questo aspetto:

Immaginiamo di avere un elettrone appena nato che non abbia ancora avuto il tempo di ‘vedere’ le altre particelle intorno a sé. La sua massa è nulla perché non può essere operativamente confrontata con quella di nessun'altra particella. Al passare del tempo, l'elettrone riceve segnali che gli arrivano da un volume di

⁴⁴ Ci si può chiedere: ma se z è funzione dell'età, come mai alcune galassie all'interno di ammassi hanno $z < 0$ (cioè un bluishift)? Una galassia con z negativo è più vecchia di quella dove siamo noi e da cui la osserviamo. Per esempio, all'esterno del nostro Gruppo Locale, generato dalla M31 che ha uno $z < 0$, ci sono solo 6 grandi galassie, appartenenti tutte all'Ammasso della Vergine, con $z < 0$, e quindi queste, essendo probabilmente più vecchie di qualsiasi altra galassia del nostro Gruppo Locale ed essendo le galassie originarie che formavano inizialmente l'Ammasso della Vergine, sono per così dire i nostri “nonni”, mentre la M31 è la nostra “madre”.

spazio che si allarga alla velocità della luce e che contiene un numero sempre più alto di particelle. La massa dell'elettrone cresce proporzionalmente con il numero e l'intensità dei segnali che riceve.

L'idea è che le particelle acquisiscano massa scambiando quelli che Arp battezza *machioni*, ossia i "portatori" del segnale per la massa inerziale (in analogia con il gravitone, il supposto responsabile della trasmissione della massa gravitazionale).

Quindi, ogni particella, a partire da quando nasce, scambia machioni all'interno di una "bolla" il cui orizzonte si espande a c , va da sé che particelle più giovani, avendo avuto scambi in un volume minore, hanno anche massa minore.

Dove avviene la creazione di materia e quali le sue conseguenze?

9.4 Il modello empirico di Arp

Una scoperta scientifica [...] non può essere ridotta alla semplice lettura di quanto di nuovo rimane casualmente impigliato nella rete di una strumentazione di laboratorio. Essa si configura piuttosto come un processo, a volte lungo e complesso, il cui significato non sta tanto in un particolare dato empirico [...], quanto nella progressiva definizione di un quadro paradigmatico che sia capace di fornire un preciso significato teorico a un insieme di risultati sperimentali.⁴⁵

Questa riflessione di Russo sembra proprio faccia al caso di Arp e della sua lunga ricerca. Quello esposto nella fig. 35 è lo schema del modello da lui ricavato dopo decenni di osservazioni e che racchiude tutti i dati raccolti tesi alla comprensione della nascita e dell'evoluzione dei QSO. Esso incorpora anche le predizioni teoriche di un modello, ricavato sulla base della teoria di Hoyle e Narlikar, elaborato da Narlikar e Das (1980) per spiegare l'espulsione della materia dagli AGN⁴⁶. In breve, possiamo forse dire che è la struttura *finora* innalzata da Arp del suo «quadro paradigmatico» alternativo a quello del modello standard, quadro che avrà poi le sue ripercussioni più generali, su scala cosmologica, che vedremo nel paragrafo seguente.

Partiamo dal centro dello schemino di fig. 35, dove il nucleo di una grande galassia attiva "progenitrice" di basso z emette in direzioni opposte

⁴⁵ Russo (2000, 2).

⁴⁶ A sua volta questo modello si rifà all'idea dell'astrofisico armeno Viktor Ambartsumian esposta nel 1957, secondo la quale *nuove* galassie si formano a partire dalle emissioni di materiale (in uno stato "superfluido") da galassie attive più vecchie. Lo stesso concetto di AGN fu da lui proposto nei primi anni '50 e accolto all'inizio assai scetticamente.

del materiale ad alto z appena creato. Tali particelle appena create hanno massa zero (sono essenzialmente onde di energia) e quindi devono emergere a c . Col passare del tempo la loro massa cresce, mentre le loro alte velocità iniziali (sia quelle sistematiche associate al moto di allontanamento, sia quelle associate a moti casuali, cioè la temperatura) devono calare affinché si conservi la quantità di moto.

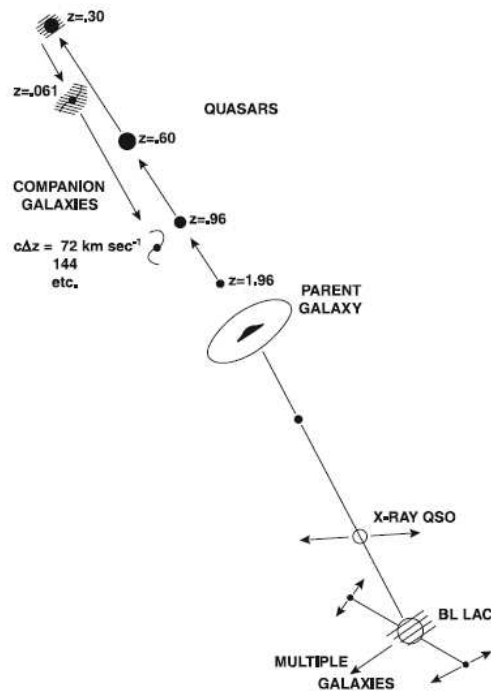


Fig. 35: Modello schematico dell'evoluzione dei QSO.

Questo plasma caldo di particelle, una sorta di proto-QSO, rallenta anche per l'interazione con il mezzo galattico e intergalattico, e si raffredda condensandosi: si formano gli atomi che danno luogo alle righe in assorbimento e in emissione da cui sono poi misurati gli spostamenti nello spettro. I QSO che così, man mano, si stanno formando, hanno inizialmente alto z , bassa luminosità e altissima velocità. Al distanziarsi dalla galassia, la loro evoluzione è tale che aumentano di volume, densità, e luminosità, mentre velocità e z decrescono.

Nel tempo in cui percorrono più o meno un tratto di circa un grado a partire dalla galassia progenitrice diventano molto brillanti nell'X e

nell'ottico, e, a una distanza da questa di circa 400 kpc⁴⁷ e a uno z di circa 0.3, sono costretti a emettere rapidamente una certa quantità di energia che può trasformarli per breve tempo in sistemi BL Lac⁴⁸. Arrivati a questa distanza, i QSO si fermano e cominciano lentamente a ricadere verso la galassia lungo la linea di emissione originaria (se non sono perturbati). È in questa fase che forse gli oggetti BL Lac possono disgregarsi in corpi minori emessi in direzioni opposte, che poi evolvono in più piccole galassie compagne di z un po' più alto, poi in ammassi (detti di Abell) di oggetti con z simili le cui singole galassie continuano a evolversi verso z minori e luminosità maggiori, e infine in galassie normali che daranno luogo a una seconda generazione di QSO ricominciando il ciclo.

A grandi linee, quindi, l'intero processo evolutivo – che ovviamente non va preso con rigidità assoluta, in quanto contingenze locali (esempio: interazioni con materia circostante) potrebbero alterare alcuni ritmi e modalità di questi stadi di evoluzione – si compie partendo da piccole “palle” di gas, passando da QSO inizialmente composti da materia giovane che evolvono fino a diventare sistemi maturi ricchi di stelle⁴⁹. Si badi che non tutti i dettagli di questo modello – che comunque spiega, tra l'altro, l'alta densità di QSO attorno alle galassie di Seyfert e a galassie più giovani – sono definiti e certi, cosicché, nel puro spirito empirico di cui si fa forte Arp, ogni nuova osservazione dissonante potrebbe migliorarlo. Ciò che è certo è che qui i QSO non sono più quegli oggetti lontanissimi (perciò vecchissimi) e luminosissimi descritti dalla teoria standard, né quindi indicatori di distanza, ma sono oggetti giovani, poco brillanti, e vicini alle galassie alle quali sono osservativamente associati⁵⁰. Si noti anche l'altra importante differenza: al “tutto cade dentro” della spiegazione classica dei dischi di accrescimento dei buchi neri negli AGN, si sostituisce qui il “tutto cade fuori” della creazione di materia dei QSO nella forma di nuclei piccoli e densi espulsi dagli AGN, la cui energia esplosiva, ipotizza Arp, potrebbe

⁴⁷ È la distanza prevista dal modello di Narlikar/Das ed è quanto osservato (per esempio i QSO della NGC 2639 di fig. 19).

⁴⁸ Gli oggetti BL Lac, dal punto di vista morfologico, sono l'anello di congiunzione fra QSO e galassie. E non a caso hanno uno z intermedio fra quello dei QSO e quello delle galassie degli ammassi. Tra l'altro se ne osservano pochi, ciò significa che la fase che li riguarda dura poco.

⁴⁹ Si ricordi che per l'astrofisica standard, invece, tutti i corpi celesti si formano a seguito di condensazioni, in un materiale omogeneamente diffuso, che poi crescono per aggregazione gerarchica fino a raggiungere le loro varie dimensioni.

⁵⁰ Dato che z è una proprietà intrinseca e non una misura di distanza, a un dato z la migliore indicazione di una grande distanza è una più debole luminosità. Perciò più la luminosità di un QSO è bassa, più in generale la sua distanza è grande.

provenire dalla presenza di un buco bianco, o da qualcosa di simile, al loro interno⁵¹.

È da sottolineare, inoltre, che i risultati sull'eccesso di redshift che discendono da questa teoria si accordano con i dati empirici disponibili sull'effetto K⁵².

Torniamo alla quantizzazione. Dato che z dipende dalla massa delle particelle (nel momento di emissione dei fotoni), gli z quantizzati che si osservano per la materia espulsa possono avere a che fare proprio con una periodica creazione di materia che avverrebbe a impulsi intermittenti, cosicché le particelle hanno impresse le varie epoche della loro creazione proprio nei loro discreti z intrinseci. Tra l'altro, questo potrebbe rappresentare – ipotizza Arp – una sorta di anello di congiunzione alla meccanica quantistica, che probabilmente gioca un ruolo fondamentale nel processo di creazione. In tale teoria, infatti, i fenomeni sono intrinsecamente di tipo discreto, e per di più sembra proprio che comportino una fisica non-locale (si pensi all'*entanglement*), e ciò farebbe bene il paio proprio con l'approccio machiano, laddove la soluzione di Narlikar sbriglia la Relatività Generale dalla località.

L'entità della deviazione dello z misurato da uno dei picchi di quantizzazione probabilmente – commenta Arp – dipende dai dettagli dell'evoluzione del corpo celeste. In genere, un oggetto appena espulso dovrebbe avere un alto z , che poi decresce man mano la sua età aumenta e diventa più luminoso. Ovviamente, affinché si osservino dei valori quantizzati lo z deve evolvere rapidamente tra un picco e l'altro, ma ancora non si sanno quanto durino gli stati intermedi e quale sia la probabilità di trovarvi un oggetto. Una delle ipotesi di Arp è che nel passaggio a un livello inferiore di redshift, un oggetto possa andare incontro a una fase di rottura o di frammentazione. Se, infatti, il redshift intrinseco è una funzione della sua età, e quindi della massa delle sue particelle fondamentali, la diminuzione di z equivale a un aumento della massa delle particelle, la qual cosa potrebbe spiegare un aumento dell'emissione di radiazione, una violenta variabilità e un'espulsione o frammentazione.

⁵¹ Un *buco bianco* è un oggetto teorico previsto dalla Relatività Generale, matematicamente una sorta di “inversione nel tempo” del buco nero, quindi una regione dello spaziotempo dove niente può entrare e dalla quale tutto “cade fuori”.

⁵² Si veda Arp (1998, 147-8).

9.5 L'universo di Arp

E qui, oh voi cari lettori che siete sopravvissuti, è il caso di tenervi forte poiché il «miglior modello attuale», come ci tiene a specificare Arp, dell'universo è ben lungi da quello a cui siamo abituati, intanto perché l'universo risulta non in espansione, ma statico, e in uno spaziotempo piatto, poi perché tale universo si rigenera continuamente dal suo interno grazie al perpetuarsi di creazioni episodiche di materia nel grembo degli AGN (si veda la tab. 1 riassuntiva)⁵³.

MODELLO STANDARD	MODELLO DI ARP
z esprime la distanza dell'oggetto emittente	z esprime l'età dell'oggetto emittente
Accrescimento e collasso gravitazionale	Eiezione e flusso verso l'esterno
Creazione dell'universo	Creazioni episodiche di materia
Universo in espansione	Universo statico (forse infinito)
Età dell'universo: 13.7 miliardi di anni	Universo forse eterno

Tab. 1: I punti salienti discordanti fra il modello standard e quello di Arp.

Se l'universo non si espande – e nemmeno collassa poiché il fattore rappresentato dalla massa delle particelle che varia nel tempo introduce alcuni termini che nelle equazioni garantiscono la stabilità – non c'è quindi nemmeno bisogno della fantomatica materia oscura (per non dire dell'energia oscura o dell'inflazione), si fregia Arp, necessaria, nello scenario convenzionale, per consentire la condensazione di galassie a partire dal gas caldo dell'universo del big bang. Queste, invece, si formerebbero dal raffreddamento del plasma eiettato dai QSO, come visto prima. In un universo statico, la radiazione cosmica di background è semplicemente l'emissione del mezzo intergalattico (gas e polveri, in specie H ionizzato) la cui temperatura media è vicina allo zero assoluto. È inoltre un universo

⁵³ Si noti che altri autori hanno dedotto conclusioni diverse sull'universo, pur accettando in buona parte la validità delle osservazioni di Arp. Per esempio la *teoria dello stato quasi stazionario*, introdotta nel 1993 da Hoyle, Burbidge e Narlikar, secondo la quale l'universo, esistente da sempre, alterna fasi di contrazione, durante le quali si verificano episodi di creazione di materia, e, su tempi scala più lunghi, fasi di espansione *accelerata* (in linea, così, con le recenti clamorose osservazioni sulle supernove di tipo Ia che appunto lascerebbero arguire, secondo l'interpretazione standard dei redshift, un'espansione accelerata dell'universo). Non solo l'universo, anche la posizione di Narlikar pare "oscillare": in Narlikar e Arp (1993) il modello di universo a cui pervengono è non espansivo.

machiano in quanto «ciò che succede nel resto dell'universo influenza ciò che accade da una qualunque altra parte di esso» (Arp 1998, 313).

Anche le dimensioni dell'universo, quelle raggiunte dalle osservazioni, non essendo più i QSO oggetti lontanissimi “si accorciano”. Attualmente possiamo essere sicuri di vedere soltanto oggetti all'interno del nostro Superammasso Locale (la distanza di altri superammassi potrebbe essere molto grande). Verosimilmente stiamo guardando solo una piccola porzione di un universo probabilmente indefinitamente grande. La regione con cui possiamo scambiare segnali ha un raggio R – detto «bordo dell'universo coevo» (fig. 36) – pari al prodotto di c per l'età della nostra galassia (circa 15 miliardi di anni), raggio che in pratica delimita la massima regione ipoteticamente attraversata in questo lasso di tempo dalla luce partita dalla nostra galassia (con le opportune differenze, è un po' l'equivalente della sfera di Hubble per il modello standard). All'esterno di tale bordo le galassie, anche quelle nate insieme alla nostra, non possono essere ancora viste ovviamente perché la loro luce non ha avuto il tempo per arrivare sino a noi. Per galassie più giovani il limite di visibilità è ancora più vicino a noi.

Se vogliamo, in questo universo statico l'unica cosa a espandersi nel tempo (a c) è proprio il raggio di quel bordo che rappresenta un po' l'orizzonte della nostra conoscenza che man mano acquisisce, almeno potenzialmente, nuova informazione dal resto dell'universo. Le nostre osservazioni, comunque, non hanno vita facile per i seguenti motivi: anche all'interno di quel bordo, galassie più vecchie della nostra potrebbero risultare difficili da osservare perché la loro formazione stellare dovrebbe essere generalmente bassissima; oltre il bordo, galassie antiche e così lontane dovrebbero avere una luminosità debolissima e oltremodo ridotta con il quadrato delle loro enormi distanze, e quindi dovrebbero avere luminosità spropositate per essere viste; anche galassie estremamente luminose potrebbero risultare a noi invisibili poiché i loro fotoni potrebbero esser giunti dalle “nostre parti” quand'ancora il nostro Sistema Solare non si era formato.

Insomma, l'universo (approssimativamente) conosciuto ha le dimensioni del nostro Superammasso Locale, il resto è un mare di ignoto dal quale, prima o poi, potremmo forse avere qualche sorpresa se solo fossimo in grado di inaugurare una nuova stagione di ricerche spezzando così le catene del vecchio paradigma.

Macchia: *Quasar, redshift e controversie: l'espansione dell'universo è da rivedere?*

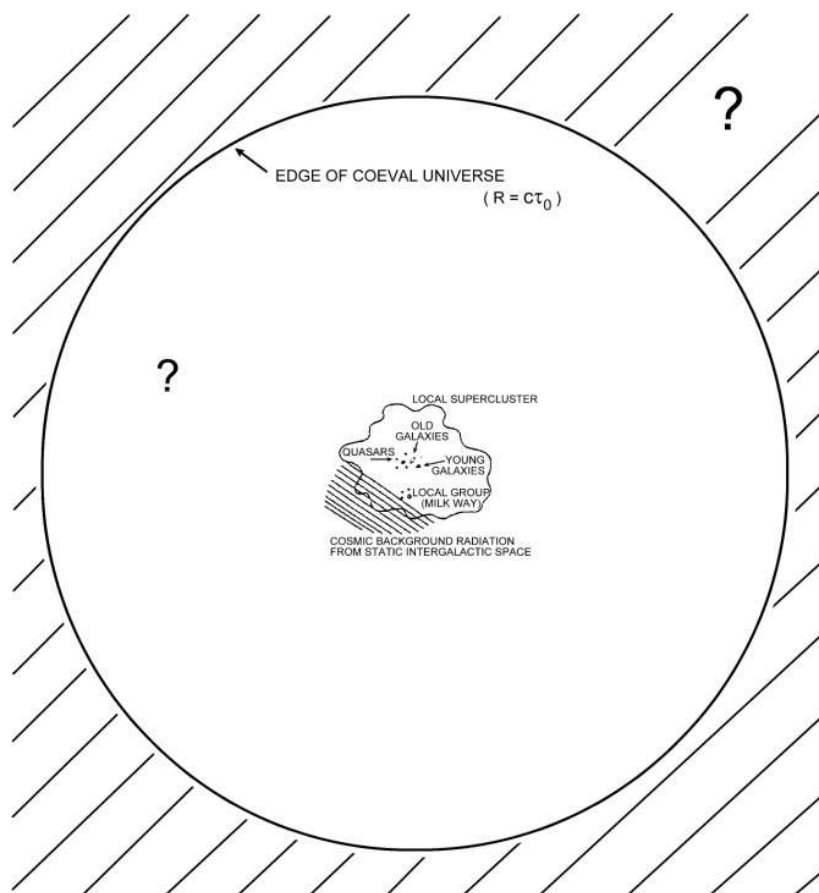


Fig. 36: Rappresentazione dell'universo attuale secondo Arp.

10. Arp: ciarlatano o novello Galileo?

Non è questa la sede per addentrarci in campi che appartengono più alla sociologia della scienza che alla scienza in sé⁵⁴. Ma parlando del “caso Arp” almeno due righe, benché generiche e superficiali, sulle critiche a lui mosse è doveroso spenderle. Riporto, senza osservazioni, due brevi elenchi, il primo di critiche generali alle ricerche di Arp, il secondo di alcuni commenti (direi ostracismi) che egli stesso racconta di essersi sentito rivolgere dal “clero scientifico” ortodosso.

⁵⁴ Si leggano Arp (1987, cap. 10; 1998, cap. 10); López-Corredoira (2009); López-Corredoira e Perelman (2008).

10.1 Critiche

- Non c'è alcuna vera spiegazione teorica dei redshift intrinseci, e di quale meccanismo sarebbe responsabile della loro “dissipazione”, *ergo*: no theory, no observation, no party!
- Le misurazioni di Arp sono obsolete: recenti e più moderne osservazioni hanno confermato che i QSO sono oggetti molto distanti con alto z , spesso non correlati a vicini AGN.
- Altre indagini hanno trovato sia diversi oggetti con alto z che non sono QSO, piuttosto sembrano essere galassie “normali”, sia QSO ad alto z con galassie ospiti dello *stesso* z .
- Alcuni dei calcoli di Arp sembrano semplicemente essere “cattiva matematica”, e le sue analisi sono metodologicamente povere.
- Arp evidenzia solo coincidenze peculiari e strane associazioni dovute a effetti prospettici *statisticamente* possibili nella vastità del cielo ma *fisicamente* irrilevanti.

10.2 Ostracismi

- «Naturalmente se si va abbastanza a fondo con la posa si trovano strutture, dovute al rumore del segnale o a imperfezioni strumentali, che collegano assieme tutto»
- «Se la connessione tra questi oggetti non può essere attribuita a del rumore allora deve esserci qualcosa di sbagliato nello strumento»
- «Bene, so che non puoi avere ragione, ma ti aiuterò come posso»
- Lei ha «manipolato i dati»
- «Ridicolo»
- «Si tratta di conclusioni bizzarre basate sul desiderio estremo degli autori nel voler trovare redshift di natura non cosmologica»
- Lei è stato colto da «fantasmagoria»
- «Teorie da folli»
- «Analisi contorta»
- «Assurdità»

- «Congetture rivoluzionarie»
- «Ipotesi insostenibili»

10.3 È la scienza, bellezza...

Racconta Burbidge (1989b, 172) che sono essenzialmente quattro le linee difensive usuali della scienza “ufficiale” nei confronti di quegli articoli eterodossi: 1) questi prima vengono bloccati dai *referees*; 2) se comunque vengono pubblicati, allora li si ignora; 3) se però provocano dei commenti, allora vengono stroncati dicendo che sono irrimediabilmente sbagliati⁵⁵; 4) se anche tutto questo fallisce, allora si minaccia di ridurre o annullare il tempo riservato alle osservazioni ai telescopi (impedendo di fatto il prosieguo delle ricerche).

È difficile non essere d'accordo con Narlikar (1989a, 190) quando afferma che dalla lettura di Arp (1987) «il lettore può ben ricavare l'impressione che in termini di intolleranza di nuove idee la comunità scientifica odierna non è differente dai contemporanei di Copernico e Galileo». Forse Arp esagera, forse no. A me tale lettura ha anche rammentato una considerazione di Einstein: «Ho poca pazienza con quegli scienziati che prendono un'asse di legno, cercano la sua parte più sottile, e là, dove è più facile perforarla, la tempestano di buchi» (citato in Frank 1949, 350). L'impressione è infatti che si tendano ad accantonare quelle osservazioni meno facili da “perforare”, ossia far rientrare nei modelli consueti, e si continui bel belli a ricamare sugli aspetti più comodi di tali modelli. Certo, le ricerche sulla materia oscura, per dire, non sono affatto un semplice dettaglio da elaborare per la cosmologia standard, ma queste e le altre difficoltose ricerche restano sempre nei confortevoli interni dello stesso paradigma (tra l'altro, come visto, è proprio quel paradigma che dà loro senso: invalidando il paradigma, si annullerebbe anche il bisogno di quelle ricerche). Nota Arp, per esempio, che un'enorme frazione del tempo di osservazione e del personale addetto ai moderni telescopi sono impiegati alla cosiddetta “misura dell'universo”, cioè alla misura dei redshift di deboli macchie di luce in cielo, sempre nell'ottica dei redshift intesi come misuratori di distanza, senza così lasciare tempo proprio a quegli oggetti anomali che quell'ottica potrebbero invece stravolgerla. È proprio questo il punto: guardando agli innumerevoli casi che Arp espone è difficile non

⁵⁵ Magari presentando contro-argomenti complessi e oscuri, e, come afferma Hoyle, «complicando il tutto fino al punto dell'incomprensibilità» (Arp 1987, 20).

lasciarsi continuamente invadere da una epidermica domanda, una domanda tipo quella che un giornalista olandese fece a Martin Rees (esponente principe della cosmologia standard) in occasione di un convegno a cui partecipò anche Arp: «Viste le prove presentate dal Dott. Arp, perché non sono stati usati i maggiori telescopi da terra e dallo spazio per osservare in dettaglio questi oggetti?» (Arp 1998, 40). Di una logica (e forse di un'ingenuità) schiacciante, si direbbe! Eppure come credere il contrario, ossia come non pensare che se ci sono dei "posti" dove mettere veramente alla prova il modello standard quelli sono proprio i casi più eclatanti individuati da Arp (si pensi al Markarian 205 di fig. 6): è nelle (presunte) anomalie la più ricca fonte di informazioni in ogni tipo di ricerca. Si badi che il modello standard, contrariamente alle conclusioni di Arp, potrebbe uscirne ancor più rafforzato⁵⁶!

Tuttavia Arp lamenta un comportamento tanto esiziale e sciocco dei *referees* che ricorda quasi la più trita metafisica aprioristica. Il ragionamento che essi spesso gli rivolgono è di questo tipo: gli oggetti in questione, poiché hanno *z* diversi, *non possono* essere vicini, quindi cerca di "aggiustare" le tue osservazioni conformandole a questo assunto, e se non ci riesci il problema è tuo. Se insomma le tue osservazioni non si accordano con la teoria corrente, *devono* essere sbagliate. In generale, il *modus operandi* che Arp critica nella scienza "ufficiale" è che i suoi professionisti tendono a interpretare le immagini partendo dalla teoria che gli è stata insegnata, con tutti gli obnubilamenti del caso, mentre invece si dovrebbe recuperare quell'atteggiamento, diciamo più empirico, tipico anche del non professionista, di colui che cerca di usare i dati per giungere poi a una teoria⁵⁷.

Il circolo vizioso, così, su cui a lungo andare la cosmologia "ufficiale" si è avviluppata è di questo tipo (Arp 1987, 231): i teorici tradizionali credono che non c'è alcun bisogno di modificare le teorie tradizionali poiché non ci sono valide osservazioni che le contraddicono, mentre gli osservatori conformisti che affrontano dati anomali sostengono che tali osservazioni non possono essere accettate poiché non ci sono teorie che le spieghino.

Ora, se anche solo una parte degli ostracismi lamentati da Arp è vera, come nascondere un certo disappunto? Devo però anche ammettere che certe sue affermazioni sul "fare scienza" non mi riescono del tutto

⁵⁶ Dimenticavo: se siete interessati alla risposta *adirata* di Rees, leggete Arp (1998, 39-42).

⁵⁷ Non a caso Arp, così attaccato all'aspetto empirico, evoca esplicitamente Percy Bridgman, e fa uso di definizioni operative, per esempio per i QSO, per il tempo, per la massa, e persino per l'intelligenza!

condivisibili: l'impressione è che forse pecchino di ingenuità, o di semplice scarsa dimestichezza con un "ragionar filosofico" sulla scienza, o, ancora, del comprensibile "campanilismo" di uno sperimentale. Per esempio, la sua esplicita professione di "fede induttivista": «Io sposo [...] il principio baconiano dell'induzione di leggi generali da un corpo di fatti osservati. Sembrerebbe ovvio che, se uno scienziato ragiona solo deduttivamente da leggi note, allora egli non potrà far altro che ritrovare le stesse leggi, e non scoprirà mai nulla di fondamentalmente nuovo» (1987, 225). Nel suo "tifo" per le osservazioni, Arp, oltre a dimenticare che è assai difficile attuare osservazioni intrinsecamente prive di teoria, trascura il fatto che il metodo che ha dato i maggiori successi alla scienza è quello – forse esplicitato chiaramente per la prima volta da Einstein ma usato ben da prima⁵⁸ – ipotetico-deduttivo, metodo che permette di scavalcare proprio quelle limitazioni che giustamente Arp ascrive alla mera deduzione, in quanto è proprio nell'"innalzarsi" dell'ipotesi *teorica*, poi ovviamente da verificarsi nella sua "ricaduta verso il basso" dell'esperienza, quel "balzo" che consente di superare quell'*impasse* che impedisce di scoprire nuove leggi⁵⁹. Balzo che, invece, non si riesce a fare con la sola induzione di leggi da un corpo di fatti osservati. Il punto di partenza per la ricerca (non solo) scientifica non sono tanto le osservazioni quanto le ipotesi che le guidano. Non si è insomma qui convinti che le leggi naturali siano in genere ottenibili dalla sola forza "distillatrice" che attende di esser liberata dai fatti sperimentali. Il dibattito filosofico sull'abbraccio fra empiria e teoria è ovviamente inesauribile, e l'essere in disaccordo con Arp certo non pregiudica l'eventuale validità delle sue altre ragioni. Diciamo soltanto, per buttarla sull'aneddotica e non farla ancor più lunga, che io non farei esclusivo affidamento su un credo induttivo-empirista, sentendomi più in sintonia con la tendenza riassunta, sebbene un po' "brutalmente", dall'Einstein che emerge da questo ricordo di Heisenberg: «Deve essere stata una sera dopo mezzanotte quando improvvisamente ricordai la mia conversazione con Einstein, in particolare la sua dichiarazione: *È la teoria che decide che cosa possiamo osservare*» (Heisenberg 1971, 77)⁶⁰.

⁵⁸ In un'intervista Popper mostra come già Kant (*Critica della Ragion Pura*, B XII-XIII, tr. it. Torino, UTET, 1967, p. 42) aveva scorto in Galilei e in Torricelli l'adozione di questo metodo.

⁵⁹ Arp stesso lo fa nelle sue ricerche, per esempio quando adotta il modello di Narlikar/Das.

⁶⁰ In questa lettera del 20 marzo 1952, a Besso, Einstein è più esplicito: «Un ampio materiale fattuale è indispensabile per stabilire una teoria che abbia delle probabilità di successo. Questo materiale, però, non fornisce di per sé alcun punto di partenza per una teoria deduttiva; sotto l'effetto di questo materiale si può però riuscire a "soddisfare" un

Resta il fatto che, più in specifico, lo *status* dei QSO somiglia curiosamente a quello più famoso in filosofia della scienza dei corvi neri. “Tutti i corvi sono neri”, infatti, è una verità che può fortificarsi dell’osservazione di quanti corvi neri si vuole, finanche miliardi, ma basta un sol corvo non-nero per spezzarla. Allo stesso modo, basterebbe un solo QSO dall’acclarata natura *non* cosmologica del suo *z* per dare di balta al modello standard, o perlomeno per far sì che molte sue pagine ormai date per scontate vadano riscritte da capo. Si comprende, da questo punto di vista più prossimo a una sorta di *pars destruens*, la predilezione di Arp per il “procedimento indiziario” induttivo, in grado, anche “solo” osservativamente, di sconfessare d’un fiato una verità (per di più dall’“essenza” ben più teorica rispetto al caso dei corvi!) confortata da un numero smisurato di evidenze. La si comprende meno quando egli lo richiede nelle vesti di una *pars construens*.

Al di là di tutto, sono due i possibili risultati finali della partita Arp–“resto del mondo” cominciata quasi mezzo secolo fa: o le osservazioni di Arp sono veramente sballate, e la comunità astronomica giustamente non dedica (più?) loro risorse, o, per svariate ragioni che ora non posso approfondire, tale comunità è preda della “dinamica” figurativamente colta da Hoyle, Burbidge e Narlikar (2000, 188; la didascalia è originale) nella seguente immagine:

principio generale che da parte sua può servire quale punto di partenza della teoria logica (deduttiva). Ma non esiste nessuna via *logica* che conduca dal materiale empirico al principio generale, su cui si sorregge poi la deduzione logica. Non credo dunque che esista un cammino della conoscenza per induzione, [...] perlomeno non in quanto metodo logico. Quanto più la teoria progredisce, tanto più chiaro diventa il fatto che non si possono trovare le leggi fondamentali per induzione a partire da fatti di esperienza» (in Gembillo 1995, 412-3).



Fig. 37: «Questa è la nostra opinione sull'approccio conformista alla cosmologia standard (big bang caldo). Abbiamo resistito alla tentazione di fare i nomi di alcune delle oche leader»⁶¹.

11. Considerazioni finali

A mo' di conclusione, anche per chiudere il cerchio della mia mancanza di certezze espressa all'inizio, vorrei semplicemente porre due domande.

⁶¹ Per darvi una vaga idea dell'aria che tira ho fatto una mini indagine su alcuni diffusi recenti testi di cosmologia. Il risultato parla da sé. Arp non esiste per: Bonometto: *Cosmologia & cosmologie* (2008); Hawley e Holcomb: *Foundations of Modern Cosmology* (2005); Heller: *Theoretical Foundations of Cosmology* (1992); Liddle: *Introduction to Modern Cosmology* (2003); Liebscher: *Cosmology* (2005); Mukhanov: *Physical Foundations of Cosmology* (2005); Raine e Thomas: *An Introduction to the Science of Cosmology* (2001); Rich: *Fundamentals of Cosmology* (2010); Rindler: *Relativity. Special, General and Cosmological* (2006); Roos: *Introduction to Cosmology* (2003); Ryden: *Introduction to Cosmology* (2002). Arp merita solo fugaci accenni per: Coles e Lucchin: *Cosmology. The Origin and Evolution of Cosmic Structure* (2002) (rimando a voce bibliografica p. 65); Coles e Ellis: *Is the Universe Open or Closed?* (1997) (rimando a voce bibliogr. p. 52); Harrison: *Cosmology* (2000) (ne parla a p. 312, in un paragrafetto intitolato: "Redshift curiosities"); Islam: *An Introduction to Mathematical Cosmology* (2004) (pp. 222-3); Peacock: *Cosmological Physics* (1999) (rimando a voce bibliogr. p. 118); Schneider: *Extragalactic Astronomy and Cosmology* (2006) (due accenni a pp. 12 e 370).

La prima di stampo scientifico. Alla luce di quanto visto, e lasciando aperte più strade, viene da pensare all'importanza che la seguente formula *potrebbe* assumere (se fosse riconosciuto un po' di credito ai modelli alternativi) per la cosmologia:

$$(1 + z) = (1 + z_D)(1 + z_C)(1 + z_i)(1 + z_{ls}).$$

Essa esprime il redshift misurato z nelle sue ipotetiche componenti: quella Doppler dei moti casuali lungo la linea di vista (z_D), quella dovuta al redshift cosmologico (z_C), al redshift intrinseco (z_i) e alla luce stanca (z_{ls}) (trascuriamo quella gravitazionale, assai modesta in ambito extragalattico). Il dibattito (se ci fosse) sull'espansione, magari esagerando un po', *potrebbe* stare tutto là dentro: qual è l'effettivo peso di queste componenti? Ha ragione il modello standard, che scarta le ultime due, o è la terza quella fondamentale come sostiene Arp, oppure è l'ultima che andrebbe rivalutata, o ancora c'è una sorta di coabitazione fra loro tutta ancora da decifrare?

La seconda domanda è di natura etica, e la mutuo pari pari da un saggio di Franco Selleri (1990, 306), dov'egli, al termine dell'analisi dei risultati di Arp, significativamente (si) chiede:

È possibile che per evitare una redistribuzione del potere scientifico ed accademico la verità venga scientemente calpestata e venga invece imposta una visione scorretta del cosmo?

Infine, mi piace lasciare ad Arp (1998, 11) un'ultima considerazione:

Penso che un dibattito dolorosamente onesto sia l'unico esercizio in grado di stimolare un cambiamento significativo.

Retorica a parte, mi sembra che questo esercizio sia doveroso, *sempre*, persino in ambiti più generali di quelli di ricerca, ogniqualvolta insomma si possa sperare di guadagnare, dall'abbandono certo inizialmente doloroso di comodi ma ormai stantii modi di pensare, un po' di conoscenza in più su noi stessi e sul mondo.

Riferimenti bibliografici

- Arp, H., 1966, *Atlas of Peculiar Galaxies*, Pasadena, California Institute of Technology.
- , 1987, *Quasars, Redshifts and Controversies*, Berkeley, Interstellar Media. Ed. it. *La contesa sulle distanze cosmiche e le quasar*, Milano, Jaca Book, 1989.
- , 1989, “Come la filosofia può far fronte alle mode mutevoli della scienza”, in U. Curi (a cura di), *Kosmos. La cosmologia tra scienza e filosofia*, Ferrara, Gabriele Corbo Editore, pp. 79-85.
- , 1990, “Quasar Numbers as a Function of Apparent Magnitude: Gravitational Lensing or Quasars Associated with Nearby Galaxies?”, *Astronomy and Astrophysics* 229, pp. 93-98.
- , 1993, “Fitting Theory to Observation – From stars to Cosmology”, in H. Arp et al. (eds.), *Progress in New Cosmologies*, New York, Plenum Press.
- , 1994, “Companion Galaxies: A Test of the Assumption that Velocities Can Be Inferred from Redshifts”, *The Astrophysical Journal* 430, pp. 74-82.
- , 1998, *Seeing Red. Redshifts, Cosmology and Academic Science*, Montreal, Apeiron. Ed. it. *Seeing Red: L'universo non si espande*, Milano, Jaca Book, 2009.
- , 2003, *Catalogue of Discordant Redshift Associations*, Montreal, Apeiron.
- Arp, H., Burbidge, G., Hoyle, F., Narlikar, J., Wickramasinghe, N., 1990, “The Extragalactic Universe: An Alternative View”, *Nature* 346, pp. 807-812.
- Burbidge, G., 1989a, “Modern Cosmology: The Harmonious and the Discordant Facts”, *International Journal of Theoretical Physics* 28(9), pp. 983-1003.

- , 1989b, “Problemi di cosmogonia e di cosmologia”, in U. Curi (a cura di), *Kosmos. La cosmologia tra scienza e filosofia*, Ferrara, Gabriele Corbo Editore, pp. 165-182.
- Burbidge, G., Burbidge, E.M., 2006, “The Redshifts of Galaxies and QSOs”, in J-C. Pecker e J. Narlikar (2006), pp. 17-36.
- Burbidge, G., Hewitt, A., 1990, “The Redshift Peak at $z = 0.06$ ”, *The Astrophysical Journal* 359, L33-L36.
- Burbidge, G., Hoyle, F., Narlikar, J., 1999, “A Different Approach to Cosmology”, *Physics Today* 52(4), pp. 38-44.
- Daigneault, A., 2005, “Standard Cosmology and Other Possible Universes”, in M. Mamone Capria (a cura di), *Physics Before and After Einstein*, Amsterdam, IOS Press, pp. 285-324.
- Duari, D., DasGupta, P., Narlikar, J., 1992, “Statistical Tests of Peaks and Periodicities in the Observed Redshift”, *The Astrophysical Journal* 384, pp. 35-42.
- Frank, P., 1949, “Einstein’s Philosophy of Science”, *Reviews of Modern Physics* 21(3), pp. 349-355.
- Gembillo, G., 1995, *Albert Einstein. Corrispondenza con Michele Besso (1903-1955)*, Napoli, Guida.
- Ghosh, A., 2000, *Origin of Inertia: Extended Mach’s Principle and Cosmological Consequences*, Montreal, Apeiron.
- Guthrie, B., Napier, W., 1996, “Redshift periodicity in the Local Supercluster”, *Astronomy and Astrophysics* 310(2), pp. 353-370.
- Harrison, E., 2000, *Cosmology. The Science of the Universe*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Heisenberg, W., 1971, *Physics and Beyond*, New York, Harp & Row.
- Hoyle, F., Burbidge, G., Narlikar, J., 2000, *A Different Approach to Cosmology: From a Static Universe Through the Big Bang Towards Reality*, Cambridge, Cambridge University Press.

- Hoyle, F., Narlikar, J., 1964, "A New Theory of Gravitation", *Proceedings of the Royal Society A* 282, pp. 191-207.
- , 1966, "A Conformal Theory of Gravitation", *Proceedings of the Royal Society A* 294, pp. 138-148.
- , 1974, *Action at a Distance in Physics and Cosmology*, W. H. Freeman, San Francisco.
- Hubble, E., Tolman, R., 1935, "Two Methods of Investigating the Nature of the Nebular Redshift", *Astrophysical Journal* 82, pp. 302-337.
- Laudan, L., 1981, "A Confutation of Convergent Realism", *Philosophy of Science* 48(1), pp. 19-49.
- López-Corredoira, M., 2009, "Sociology of Modern Cosmology", arXiv:0812.0537v2.
- López-Corredoira, M., Gutiérrez, C., 2004, "The Field Surrounding NGC 7603: Cosmological or Non-Cosmological Redshifts?", *Astronomy & Astrophysics* 421, pp. 407-423.
- López-Corredoira, M., Perelman, C. (a cura di), 2008, *Against the Tide: A Critical Review by Scientists of How Physics and Astronomy Get Done*, Boca Raton, Universal Publishers.
- Lyons, T. D., 2002, "Scientific Realism and the Pessimistic Meta-Modus Tollens", in S. Clarke e T. D. Lyons (a cura di), *Recent Themes in the Philosophy of Science*, Dordrecht, Kluwer, pp. 63-90.
- Macchia, G., 2011, *Fondamenti della cosmologia e ontologia dello spaziotempo*, Tesi di Dottorato in Scienze Umanistiche, Università di Urbino.
- Maffei, P., 1976, *I mostri del cielo*, Milano, Mondadori.
- Merleau-Ponty, J., 1965, *Cosmologie du XX^e siècle*, Paris, Gallimard. Ed. ital, *Cosmologia del secolo XX*, Milano, Il Saggiatore, 1974.
- Moles, M. et al., 1994, "Testing for Interaction Between the Galaxies NGC 450 and UGC 807", *The Astrophysical Journal* 432, pp. 135-147.

- Narlikar, J., 1977, "Two Astrophysical Applications of Conformal Gravity", *Annals of Physics* 107, pp. 325-336.
- , 1989a, "Review of Quasars, Redshifts and Controversies" di H. Arp, *American Journal of Physics* 57(2), pp. 189-190.
- , 2006, "The Quasi-Steady-State Cosmology", in J.-C. Pecker e J. Narlikar (2006), pp. 139-149.
- Narlikar, J., Arp, H., 1993, "Flat Spacetime Cosmology: A Unified Framework for Extragalactic Redshifts", *The Astrophysical Journal* 405, pp. 51-56.
- Narlikar, J., Das, P.K., 1980, "Anomalous Redshifts of Quasi-Stellar Objects", *The Astrophysical Journal* 240, pp. 401-414.
- Narlikar, J., Padmanabhan, T., 2001, "Standard Cosmology and Alternatives: A Critical Appraisal", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 39, pp. 211-248.
- Pecker, J.-C., Narlikar, J., (a cura di), 2006, *Current Issues in Cosmology*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Rhook, G., Zangari, M., 1994, "Should we Believe in the Big Bang?: A Critique of the Integrity of Modern Cosmology", *Philosophy of Science Association*, Vol. 1, pp. 228-237.
- Ruphy, S. 2011, "Limits to Modeling: Balancing Ambition and Outcome in Astrophysics and Cosmology", *Simulation & Gaming* 42(2), pp. 177-194.
- Russo, A., 2000, *Le reti dei fisici. Forme dell'esperimento e modalità della scoperta nella fisica del Novecento*, Pavia, La Goliardica Pavese.
- Sandage, A., 1987, "Observational Cosmology 1920-1985: An Introduction to the Conference", in A. Hewitt et al (eds.), *Observational Cosmology*, Dordrecht, Reidel, pp. 1-27.
- , 1995, "Astronomical Problems for the Next Three Decades", in A. Mamaso e G. Munch (eds.), *Key Problems in Astronomy and Astrophysics*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 1-48.

- Selleri, F., 1990, "I due modelli della realtà", in F. Selleri, V. Tonini (a cura di), *Dove va la scienza?*, Bari, Edizioni Dedalo, pp. 283-311.
- Selleri, F., 1993, "Fondamenti della fisica moderna", in V. Patricchio e F. Selleri (a cura di), *Fisica*, Milano, Jaca Book, pp. 15-35.
- Surdej, J., Claeskens, J.-F., Sluse, D., 2006, "Gravitational Lensing and Anomalous Redshifts", in J.-C. Pecker e J. Narlikar (2006), pp. 223-232.
- Tift, W., 1976, "Discrete States of Redshift and Galaxy Dynamics. I – Internal Motions in Single Galaxies", *The Astrophysical Journal* 206, pp. 38-56.
- Van Flandern, T., 2002, "The Top 30 Problems with the Big Bang", *Apeiron* 9(2), pp. 72-90.

La questione epistemologica del realismo nel programma di ricerca di Franco Selleri

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

Le nostre prospettive scientifiche sono ormai agli antipodi tra loro. Tu ritieni che Dio giochi a dadi col mondo; io credo invece che tutto ubbidisca a una legge, in un mondo di realtà obiettive che cerco di cogliere per via furiosamente speculativa. Lo *credo* fermamente, ma spero che qualcuno scopra una strada più realistica – o meglio un fondamento più tangibile – di quanto non abbia saputo fare io. Nemmeno il grande successo iniziale della teoria dei quanti riesce a convincermi che alla base di tutto vi sia la causalità, anche se so bene che i colleghi più giovani considerano questo atteggiamento come un effetto di sclerosi. Un giorno si saprà quale di questi due atteggiamenti istintivi sarà stato quello giusto.¹

1. L'intreccio critico tra scienza, filosofia e storia quale criterio ermeneutico della conoscenza

Ogni teoria scientifica appare essere un intreccio profondo di due tipi di contenuti: quelli irreversibili, vere e proprie riproduzioni (anche se imprecise, sia perché schematiche, sia perché “sfuocate”) di proprietà del mondo materiale; quelli arbitrari, immessi nella teoria a causa di pregiudizi filosofici degli scienziati che l'hanno creata, o a causa di forti spinte culturali e sociali che in

¹ Albert Einstein, lettera del 7 dicembre 1944 a Max Born, corsivo nel testo.

periodi particolari (come fu quello della Repubblica di Weimar) possono avere influenzato e distorto l'attività scientifica.²

Questa duplice, importante, considerazione è puntualmente richiamata, in modo peraltro programmatico, da Franco Selleri, nel suo rilevante, noto e diffuso “saggio sui fondamenti della microfisica”, *Paradossi e realtà*. Questo rilievo è richiamato in apertura dello studio proprio per sottolineare non solo l'intrinseca complessità della «sfida del labirinto» della conoscenza umana (che cerca di delineare un'immagine sempre più rigorosa e vera del mondo in cui viviamo), ma anche per sottolineare, al contempo, le differenti componenti teoriche, culturali e filosofiche che sempre e necessariamente si intrecciano nel possibile quadro del mondo delineato da una particolare teoria scientifica. In questa prospettiva palesemente epistemologica – appartenente, tuttavia, ad un'epistemologia che si dipana, per sua intima natura, sul terreno stesso dello sviluppo intrinseco della ricerca scientifica – l'intreccio tra gli «elementi cognitivi irreversibili», à la Planck, individuati dalle ricerche scientifiche e i molteplici elementi filosofici e, più in generale, culturali (entro i quali le stesse e pur differenti teorie scientifiche vengono comunque plasmate, concepite e delineate), costituisce allora l'orizzonte complessivo e storico entro il quale, in genere, il patrimonio delle tecno-scienze si viene costituendo³. Una tale complessa, ricca ed articolata visione della conoscenza scientifica costituisce, del resto, una consapevolezza critico-epistemologica e scientifica che ha sempre accompagnato le molteplici disamine che Selleri, nel corso di vari decenni, ha costantemente consacrato all'indagine critica di diversi problemi aperti, direttamente connessi soprattutto con l'analisi dei fondamenti della fisica

² Selleri (1987, 9) La citazione da questo volume che segue immediatamente nel testo è tratta da p. 10.

³ Per un preclaro esempio della costante sensibilità per la storia della scienza dimostrata in molteplici occasioni da Selleri è qui da ricordare, a livello emblematico, soprattutto il suo volume Selleri (1989), nel quale si può scorgere come il suo approccio critico allo studio delle teorie fisiche non possa mai andare disgiunto da una puntuale considerazione dello sviluppo storico-concettuale delle differenti teorie fisiche. Proprio per questa precisa ragione critica tale presentazione della fisica costituisce, perlomeno a mio avviso, anche un fecondo ed innovativo modello culturale, scientifico e didattico di riferimento per il suo insegnamento medio, secondario ed universitario, soprattutto in un paese come il nostro che dimentica, in modo sistematico, di spiegare la fisica valorizzando l'importanza metodologica, concettuale ed epistemologica di una sua puntuale considerazione storico-critica.

moderna⁴. Per questa ragione di fondo Selleri denuncia le unilateralità dogmatiche speculari di due approcci come quelli propri dello scientismo e dello storicismo:

Bisogna sfuggire al falso dilemma scientismo/storicismo ed accettare il fatto che una teoria scientifica può funzionare benissimo anche se pesantemente condizionata da scelte filosofiche dei più svariati tipi. Occorre considerare le diverse teorie per quello che sono veramente, fuori da ogni schematismo. Per fare questo, strumento indispensabile è una conoscenza abbastanza approfondita della storia della disciplina che si vuole studiare criticamente e delle sue connessioni reali con i più generali processi culturali e sociali.⁵

Lo studio della storia della scienza in tutta la sua articolazione, dei connessi e spesso decisivi cambiamenti concettuali propri delle varie teorie e anche dei paradigmi scientifici, nonché la considerazione, altrettanto puntuale, della dimensione tecnologico-strumentale, con le quali le differenti teorie scientifiche si confrontano, offrono, dunque, un terreno concreto e positivo a partire dal quale ci si può formare un'immagine precisa e rigorosa dello stesso sviluppo dell'immagine scientifica del mondo. Per questa ragione per Selleri l'epistemologia deve allora tener sempre ben presente la storia reale dei cambiamenti concettuali (e anche tecnologici, *of course!*) variamente posti in essere dalle differenti configurazioni delle differenti tecno-scienze. Il che, perlomeno a suo avviso, non vuole affatto dire che l'epistemologia debba rinunciare ad un ruolo critico – eminentemente attivo ed originale – nello sviluppare un suo puntuale confronto critico con le differenti teorie scientifiche. Ma, in ogni caso, questo suo libero e critico confronto con le differenti teorie scientifiche affermatesi nelle più differenti situazioni storiche e culturali, non può comunque mai prescindere anche da uno studio, altrettanto rigoroso e consapevole, della storia della scienza. Per questa precisa ragione Selleri parla anche, esplicitamente e programmaticamente, del «ruolo ineliminabile della storia della scienza, non più soltanto come curiosità culturale, ma anche come strumento di comprensione critica per ogni ricercatore della propria disciplina». Ma, si badi, per Selleri questa apertura alla dimensione storica della scienza deve sempre e necessariamente coinvolgere anche la riflessione filosofica perché proprio «legando la scienza alla filosofia si può

⁴ Proprio a questi temi Selleri ha del resto dedicata una sintetica e puntuale riflessione nel suo volumetto Selleri (1992) che, pur a vent'anni di distanza, ancora si segnala per la pregnanza concettuale del preciso quadro prospettico che offre al lettore.

⁵ Selleri (1987, 10). Le citazioni da questo volume che seguono nel testo sono tratte, rispettivamente, dalle seguenti pagine: p. 14; p. 15.

tentare di recuperare pienamente la dimensione storica del pensiero scientifico e di comprendere la natura dei travagli che hanno dato origine alle varie concezioni scientifiche».

2. Contro il pregiudizio epistemologico empiristico-positivista

Le considerazioni epistemologiche richiamate nel precedente paragrafo, che sono anche, al contempo, considerazioni metodologico-critiche radicate nello stesso sviluppo della disamina scientifica del mondo, urtano, tuttavia, contro un pregiudizio assai diffuso e oltremodo radicato. Diffuso e radicato non solo presso scienziati militanti, filosofi ed epistemologi, ma anche presso il senso comune proprio di vaste collettività umane e sociali. Questo pregiudizio è quello che, in ultima analisi, risale alla grande e feconda tradizione dell'empirismo filosofico (in tutte le sue molteplici formulazioni teoriche: antica, medievale, moderna e contemporanea) che è stato poi fatto proprio e variamente assorbito, nei suoi punti qualificanti, anche dalla tradizione del positivismo ottocentesco, nonché, successivamente, anche da quello novecentesco. Questa tradizione di pensiero insiste infatti su un punto che viene presentato come decisivo: quello in virtù del quale l'uomo debba sempre *imparare dall'esperienza*. Meglio ancora: quello in base al quale l'esperienza costituirebbe l'alfa e l'omega della nostra conoscenza del mondo. Il che, sotto un determinato aspetto, costituisce ancora, in verità, un'indicazione preziosa e per nulla fuorviante, proprio perché l'uomo deve pur sempre riferirsi al mondo della *praxis*, ovvero al mondo della sua propria esperienza diretta ed effettiva delle cose reali. Tuttavia, perlomeno nell'accezione metafisica dell'empirismo, questo richiamo all'orizzonte del mondo effettivamente esperito coi nostri sensi reca con sé anche un'esigenza molto più forte, quella in virtù della quale le nostre stesse idee, le nostre teorie, i nostri stessi pensieri, in ultima analisi, non sarebbero altro che un sintetico, comodo e sostanzialmente parassitario "riassunto" delle nostre molteplici esperienze di vita.

Insomma: per la tradizione dell'empirismo le nostre teorie non possono essere altro che delle traduzioni, sintetiche, riassuntive e, appunto, mimetiche e di comodità pratica, delle nostre stesse esperienze dirette. Conseguentemente per l'empirismo le nostre idee e le nostre teorie, tendenzialmente, devono sempre essere conformi al mondo e, più esattamente, alla dimensione della nostra esperienza del mondo reale. Il grande e clamoroso successo dell'immagine baconiana della scienza presso gli scienziati e il senso comune degli ultimi tre secoli si radica esattamente

su questo assunto pregiudiziale, in virtù del quale la nostra conoscenza teorica del mondo non sarebbe altro che l'esperienza tradotta in termini di pensiero e di teorie. In questa prospettiva empiristico-induttivista le teorie stesse non sarebbero allora altro che comodi "riassunti" di una molteplicità caotica di esperienze che, in tal modo, vengono dominate e concettualizzate più agevolmente. Inoltre, occorre rilevare come questa tradizionale immagine baconiana della conoscenza scientifica sembri anche associare un altro vantaggio che non va sottovalutato, giacché in questa prospettiva epistemologica il valore di verità delle nostre teorie può essere sistematicamente "scaricato" sui fatti empirici. *Fatti, non parole!*, questo slogan diviene allora l'espressione programmatica di questa mentalità positivistico-empirista, in base alla quale si reputa, appunto, che le nostre conoscenze siano effettivamente tali solo ed unicamente nella misura in cui si possono ridurre, *senza residui*, al mondo dell'esperienza. Come ha giustamente rilevato Albert Einstein

il pregiudizio- che a tutt'oggi non è affatto sparito – consiste nella convinzione che i fatti possano e debbano tradursi in una conoscenza scientifica di per sé, senza libera costruzione concettuale. Un tale errore è possibile solo perché è difficile rendersi conto dell'arbitrarietà di tali concetti, che, attraverso la verifica e il lungo uso, sembrano invece direttamente collegati con il materiale empirico.⁶

In realtà, se ci si pone il problema di spiegare la precisa natura epistemologica della conoscenza umana, tenendo presente soprattutto l'esplosione complessiva del patrimonio tecnico-scientifico realizzatosi dalla nascita della scienza moderna in poi, non è affatto agevole continuare a condividere tale dogmatico pregiudizio empiristico-positivista, peraltro ben espresso dalla fortunata immagine baconiana induttivista della scienza che pure ha goduto – e gode tuttora – di un grandissimo successo non solo presso il senso comune dei vari popoli, ma anche presso molti uomini colti e anche presso i diversi cultori delle discipline scientifiche ed umanistiche.

Né basta, naturalmente, illustrare tutte le molteplici insufficienze teoretico-metafisiche di questa prospettiva empiristico-positivista, soprattutto se non si riesce, preventivamente, a scorgerne anche l'indubbio punto di forza che aiuta a comprendere il suo successo (storico e culturale). Se infatti si guarda alla prospettiva dell'empirismo da questo specifico punto di vista – connesso, in ultima analisi, con la storia stessa dell'evoluzione della nostra specie nel mondo dei viventi e della loro lotta per la sopravvivenza – è invero assai difficile sottrarsi all'impressione che la stretta dipendenza

⁶ Einstein (1958, 26).

postulata dall'empirismo tra le nostre idee e le esperienze immediate dei *quinque sensibus* non possa non radicarsi in un preciso atteggiamento pragmatico che ha indubbiamente contribuito a rafforzare la speranza di vita dei primati sulla terra. Da questo punto di vista la stessa teoria corrispondentista costituisce, allora, il massimo prodotto teorico di questa precisa esperienza biologico-vitale pragmatica, in base alla quale la nostra specie si è progressivamente abituata, nel corso di alcuni milioni di anni, a prestar fede proprio a quei pensieri e a quelle immagini teoriche che sembravano trovare un riscontro diretto e pressoché immediato nella nostra stessa esperienza vitale. Proprio questa corrispondenza tra le nostre idee e la realtà ha così finito per imporsi come un criterio non solo pragmatico di vita, ma anche come un autentico criterio epistemologico di verità, in nome del quale si è così iniziato a controllare, sistematicamente, l'effettiva portata conoscitiva dei nostri stessi pensieri. Né può essere parimenti taciuto come anche questa esigenza di effettuare un "controllo" empirico delle nostre idee, dei nostri pensieri ed anche delle nostre eventuali teorie, rispondesse, in ultima analisi, ad una giusta istanza critica: quella di poter verificare l'effettiva portata conoscitiva dei nostri differenti pensieri sul mondo.

Tuttavia, questa giusta esigenza di controllo critico – basata su un raffronto sistematico con la dimensione dell'esperienza – ben presto ha anche finito per imporsi come una dimensione metafisica non più trascendibile, come una norma ed un metro assoluto, in nome del quale tutto quello che di primo acchito risulta esorbitare dall'esperienza, più o meno diretta e più o meno immediata, è stato considerato come non-valido e come non-affidabile. Il che spiega anche perché l'umanità occidentale, a partire dal quinto secolo avanti Cristo, fino al diciassettesimo secolo dopo Cristo, faticasse, non poco, ad ammettere la liceità – epistemologica e conoscitiva – di alcuni ragionamenti i quali, invece che prendere le mosse dall'esperienza diretta del mondo, cercavano, al contrario, di elaborare una più o meno complessa spiegazione concettuale del mondo prima ancora di affrontare il problema di sua verifica empirico-sperimentale.

La non lieve tardanza con la quale la scienza moderna, inaugurata da Galileo Galilei, si è infine configurata entro la tradizione del pensiero occidentale nel corso del Seicento può così essere spiegata anche da questo punto di vista squisitamente epistemologico, ricordando come per un numero notevole di secoli l'umanità abbia senz'altro preferito attribuire portata conoscitiva solo ed unicamente a quelle teorie che erano in grado di esibire, più o meno direttamente, il loro nesso con la dimensione dell'espe-

rienza sensibile⁷. Da questo punto di vista se si guarda allora alla storia delle teorie astronomiche, avendo appunto presenti soprattutto queste considerazioni epistemologiche, è allora veramente difficile sottrarsi all'impressione che il largo dominio della teoria tolemaica – geocentrica e geostatica – contro l'opposta teoria copernicana – eliocentrica ed eliostatica – sia anche da attribuirsi, in ultima analisi, alla difesa di un particolare, più diffuso e condiviso schema epistemologico del rapporto tra teoria (T) ed esperienza (E). La teoria tolemaica si è infatti avvalsa di uno schema epistemologico che, tendenzialmente, configurava proprio questo nesso T/E come una dimensione “mimetica”, entro la quale la teoria (T) doveva, appunto, limitarsi a rispecchiare e tradurre fedelmente, in concetti, quanto era manifestato dalla conoscenza sensibile (E).

Per questa precisa ragione fu allora rifiutata una teoria astronomica eliocentrica ed eliostatica: essa appariva, infatti, in contraddizione clamorosa con quanto attestato, *quotidie*, alla conoscenza sensibile, mediante la quale “vediamo” appunto “sorgere” il sole ogni giorno e, analogamente, lo “vediamo” poi “raggiungere” lo zenit per infine “vederlo” puntualmente “tramontare”. Di fronte a tali assai manifeste evidenze empiriche era allora veramente difficile accettare una teoria come quella delineata da Aristarco di Samo, in virtù della quale l'esperienza sensibile era messa completamente sottosopra per affermare, bizzarramente, una teoria eliocentrica ed eliostatica la quale, oltre a contrastare l'esperienza sensibile immediata del mondo comune di tutti gli uomini sani di mente, sembrava anche essere inutilmente complicata e alquanto barocca (appunto: complicava ciò che era molto semplice). Anche se le due teorie – quella tolemaica e quella di Aristarco – potevano esser geometricamente equivalenti, tuttavia la soluzione eliocentrica ed eliostatica sembrava un'autentica “pazzia”, proprio perché nel suo caso la componente teorico- astratta sembrava costituire una costruzione, inutilmente complicata, per spiegare un fatto di per sé del tutto evidente sul piano empirico-sensibile.

In realtà, proprio l'innovativo e più complesso rapporto tra teoria (T) ed esperienza (E) configurato dalla teoria eliocentrica di Aristarco costituiva, invece, un ben differente ed alternativo paradigma epistemologico che, non a caso, è poi riemerso, in modo programmatico e strategico, proprio nel cuore stesso della scienza moderna, nella strategia posta in

⁷ Per una disamina critica della nascita della scienza moderna in relazione alla lezione galileiana, considerata proprio secondo questa prospettiva prettamente epistemologica, sia comunque lecito rinviare al mio studio Minazzi (1994a) e, di contro, per una puntuale critica delle più note e diffuse immagini epistemologiche novecentesche dell'opera dello scienziato pisano, all'altro mio studio Minazzi (1994b).

essere dal «filosofo geometra» di galileiana memoria, onde poter sistematicamente «diffalcare» gli impedimenti della materia, nel tentativo di saper costruire una persuasiva e sperimentalmente provata spiegazione scientifica del mondo (fosse questo il mondo astronomico del sistema solare oppure anche quello della caduta dei gravi o quello dei moti dei corpi nello spazio). Il che è stato del resto ben colto, nuovamente, dallo stesso Einstein, il quale, proprio per combattere il pregiudizio empiristico-positivistico (ancora ben diffuso, egemone e radicato nella mentalità degli scienziati – e dei filosofi! – a lui contemporanei) ha avuto modo di ricordare la maggiore e più complicata articolazione del rapporto che sempre si instaura tra una teoria scientifica (T) e il mondo dell'esperienza sperimentale (E). Infatti a questo proposito Einstein ha puntualmente rilevato quanto segue:

Una teoria può essere verificata dall'esperienza, ma non esiste alcun modo per risalire dall'esperienza alla costruzione di una teoria. Equazioni di tale complessità, come sono le equazioni del campo gravitazionale, possono essere trovate solo attraverso la scoperta di una condizione matematica logicamente semplice, che determini completamente o quasi completamente le equazioni. Una volta in possesso di condizioni formali abbastanza forti, non c'è bisogno di una grande conoscenza dei fatti per costruire una teoria; nel caso delle equazioni della gravitazione, sono appunto la tetradimensionalità e il tensore simmetrico, quale espressione della struttura spaziale, che, insieme con l'invarianza rispetto ai gruppi di trasformazioni continue, determinano quasi completamente le equazioni.⁸

3. Descrivere o spiegare? Il “criterio di realtà” di Einstein, Podolsky e Rosen

Nel 1935 Einstein, in collaborazione con Boris Podolsky e Nathan Rosen, ha pubblicato, su «The Physical Review» (n. 47, pp. 777-780), il celebre saggio *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* la cui sintesi concettuale è la seguente:

⁸ Einstein (1958, 46-47); per un approfondimento di queste tematiche sia comunque lecito rinviare al mio studio Minazzi (2007) (apparso nell'ambito di un fascicolo monografico consacrato ad *Albert Einstein filosofo e metodologo*, a cura di V. Fano, F. Minazzi e I. Tassani, nel quale si sono raccolti gli atti del convegno einsteiniano di Cesena del 25-26 novembre 2005). Ma su questo tema sono naturalmente da tener presenti anche numerosi saggi di vari epistemologi presenti nel già citato Einstein (1958), nonché, pur nel quadro di una assai differente lettura critica, quanto si legge nel saggio di Schlick (1979), nonché nei seguenti studi: Aa. Vv. (1989), Holton (1991), Paty (1993), Aa. Vv. (1994), Holton (1997), Bachelard & Cassirer & Reichenbach & Schlick (2009).

In una teoria completa vi è un elemento in corrispondenza a ciascun elemento della realtà. Una condizione sufficiente per la realtà di una grandezza fisica è la possibilità di prevederla con certezza senza perturbare il sistema. Nella meccanica quantica, quando si hanno due grandezze fisiche descritte da operatori che non commutano, la conoscenza dell'una preclude la conoscenza dell'altra. Allora, o è incompleta la descrizione della realtà fornita dalla funzione d'onda della meccanica quantica, o non possono, queste due grandezze, essere simultaneamente reali. Studiando il problema di fare previsioni relative a un sistema sulla base di misure effettuate su un altro sistema, che abbia in precedenza interagito col primo, si giunge alla conclusione che se il primo enunciato è falso, è falso anche il secondo. Se ne deduce che la descrizione della realtà fornita da una funzione d'onda è completa.⁹

Non è allora privo di rilievo osservare come nell'affrontare questo specifico problema della descrizione quantica della realtà Einstein – in collaborazione con Podolsky e Rosen – abbia anche colto l'occasione non solo per meglio precisare la sua precisa immagine della conoscenza fisica in generale, ma anche per avanzare un suo preciso “criterio di realtà” in base al quale sarebbe appunto possibile valutare la portata effettivamente conoscitiva di una determinata teoria fisica. Affrontando infatti la natura specifica della conoscenza fisica, in questo studio si esordisce ricordando come

ogni serio esame di una teoria fisica presuppone la distinzione fra la realtà obiettiva, che è indipendente da qualsiasi teoria, e i concetti fisici con cui la teoria stessa opera. Questi concetti si presuppone corrispondano alla realtà obiettiva, e con essi noi ci rappresentiamo quella realtà.

In profonda sintonia con la tradizione del pensiero fisico, che risale allo stesso Galilei, Einstein ritiene, quindi, che la conoscenza fisica, pur dovendo necessariamente utilizzare sempre una precisa serie di differenti *concetti* fisici, tuttavia ha anche sempre a che vedere con una altrettanto specifica *realtà obiettiva*, la cui conoscenza effettiva costituisce, appunto, il suo obiettivo privilegiato. Insomma Einstein – in profonda sintonia con tutta la grande e composita tradizione della fisica moderna inaugurata da Galileo – ritiene che la fisica abbia appunto a che fare con un mondo reale che cerca di indagare approfondendone via via la sua conoscenza. Ma su questa base decisamente realista come è allora possibile giudicare il successo eventuale di una teoria fisica? Secondo Einstein per rispondere in modo soddisfacente

⁹ Einstein & Podolsky & Rosen (1988). Le citazioni di questo saggio, o successivamente richiamate nel testo, sono tutte tratte dalle seguenti pagine della trad. it. predisposta da Bellone: p. 375 e p. 376.

a questa domanda ineludibile, occorre poter risolvere perlomeno due altre questioni, strettamente interrelate:

- a) la teoria che prendiamo in considerazione può essere considerata “corretta”?
- b) la descrizione delineata dalla teoria può essere considerata “completa”?

A suo avviso, infatti,

solo in caso di risposta affermativa a entrambe le domande diremo che i concetti della teoria sono soddisfacenti. La correttezza della teoria è giudicata in base al grado di accordo fra le sue conclusioni e l'esperienza umana; questa esperienza, che sola ci consente di inferire alcunché sul reale, assume in fisica la forma di esperimenti e misure.

Il saggio di Einstein, Podolsky e Rosen si limita, quindi, ad approfondire, in relazione alla meccanica quantistica, proprio la seconda domanda concernente la “completezza” eventuale di questa teoria. Ma anche in questo caso, indipendentemente al diverso significato che si vuole eventualmente attribuire al termine “completo”, sembra comunque a questi autori che la “completezza” di una qualsiasi teoria debba essere in grado di soddisfare la condizione, ineliminabile, in base alla quale «*ciascun elemento della realtà fisica deve avere una controparte nella teoria fisica*» (il corsivo è degli Autori). Questa, che viene assunta quale “condizione di completezza” da Einstein Podolsky e Rosen, consente allora di sostenere che si può fornire una risposta alla seconda domanda proprio quando «si sia in grado di decidere quali sono gli elementi della realtà fisica». Il che induce appunto Einstein, Podolsky e Rosen a porsi il problema di poter individuare un affidabile “criterio di realtà”, proprio perché

gli elementi della realtà fisica non possono essere determinati da considerazioni filosofiche a priori, ma debbono essere trovati ricorrendo ai risultati di esperimenti e di misure.

Einstein, Podolsky e Rosen non offrono però una «definizione esauriente di realtà» perché si accontentano, invece, di avanzare un più delimitato e, tuttavia, assai «ragionevole» criterio che, con le loro stesse parole, è il seguente:

Se si è in grado di prevedere con certezza (cioè con probabilità uguale a uno), il valore di una grandezza fisica senza perturbare in alcun modo un sistema, allora esiste un elemento di realtà fisica corrispondente a questa grandezza fisica.¹⁰

Agli occhi di Einstein, Podolsky e Rosen questo criterio presenta, in primo luogo, il vantaggio, per nulla secondario, di risultare «in accordo sia con l'idea classica sia con quella quantica di realtà». Inoltre, in secondo luogo, certamente questo criterio, pur non essendo affatto in grado di esaurire tutti i diversi e possibili modi di individuare una determinata realtà fisica, tuttavia fornisce, perlomeno, «uno di questi modi, qualora le condizioni in esso stabilite si presentino».

Il criterio di realtà di Einstein, Podolsky e Rosen (d'ora in poi indicato più semplicemente con la sigla EPR) richiede, dunque, in primo luogo, che si possa effettuare una predizione specifica e, in secondo luogo, che tale predizione sia anche in grado di non “disturbare” l'oggetto fisico al quale si riferisce. A questo proposito Selleri ha così riassunto le «caratteristiche dell'elemento di realtà di EPR»:

1. È pensato esistente anche in assenza di un atto di misura concretamente effettuato. Ciò significa che si è fatto un passo nell'ontologia.
2. È considerato la *causa* del risultato della misura esattamente predetto, qualora la misura sia fatta. Pertanto realismo e causalità sono esattamente legati nel criterio di realtà di EPR.
3. È pensato associato *all'oggetto* misurato e non all'apparato misuratore. Quest'ultimo è stato controllato bene e potrebbe portare a risultati diversi da quello predetto. Se possiamo prevedere con certezza che l'apparato A darà un risultato noto a priori interagendo con l'oggetto O, ciò vuol dire che il fattore decisivo che produce il risultato della misura è in O.¹¹

Si badi: il criterio di realtà EPR, nella sua dichiarata e voluta limitatezza concettuale, presenta anche un aspetto decisamente convenzionale che concerne proprio le categorie teoriche che utilizza per sviluppare le proprie predizioni nell'ambito di una determinata teoria. In secondo luogo, e di conseguenza, le proprietà oggettive che si configurano entro l'interazione tra l'apparato della teoria e l'apparato sperimentale non è affatto detto che debbano necessariamente corrispondere alle proprietà specifiche del mondo che siamo in grado di percepire direttamente. Ancora una volta nella concezione di Einstein emerge così l'importanza e il ruolo specifico che

¹⁰ Il corsivo è sempre degli Autori.

¹¹ Selleri (1990a, 101, corsivi nel testo). Ma per un puntuale commento di Selleri del criterio di realtà EPR si veda anche quanto si legge nel suo già citato volume Selleri (1987, 165-207).

l'intero apparato della teoria svolge nella nostra costruzione concettuale del mondo reale. Non solo: questa stessa complessa costruzione teorica ha poi a che fare, a sua volta, con la non meno articolata mediazione sperimentale con la quale la dimensione teorica viene posta in relazione con la dimensione fisica del mondo entro uno specifico apparato sperimentale. Per questa ragione Einstein ha elaborato una visione complessa ed articolata del procedere scientifico, entro il quale si possono individuare *differenti livelli di concettualizzazione* e anche di astrazione, nonché *differenti piani di mediazione sperimentale*. La conoscenza scientifica è esattamente il risultato di tutte queste differenti componenti e della loro stessa specifica tensione ed intreccio teorico-sperimentale che si viene attuando entro un particolare ambito di ricerca. Il che spiega poi perché per Einstein la scienza stessa possa essere configurata come «il possesso intellettuale» del «mondo extrapersonale» per dirla con le parole che, ancora, si trovano nelle sue preclare *Note autobiografiche* in cui si legge questo emblematico rilievo in cui il fisico di Ulma ricorda il suo distacco dal «paradiso religioso della giovinezza» e il suo ingresso nel «paradiso» della ricerca fisica:

Fuori c'era questo enorme mondo, che esiste indipendentemente da noi, esseri umani, e che ci sta di fronte come un grande, eterno enigma, accessibile solo parzialmente alla nostra osservazione e al nostro pensiero. La contemplazione di questo mondo mi attirò come una liberazione, e subito notai che molti degli uomini che avevo imparato a stimare e ad ammirare avevano trovato la propria libertà e sicurezza interiore dedicandosi ad essa. Il *possesso intellettuale di questo mondo extrapersonale* mi balenò alla mente, in modo più o meno consapevole, come la meta più alta fra quelle concesse all'uomo. Gli amici che non si potevan perdere erano gli uomini del presente e del passato che avevano avuto la stessa meta, con i profondi orizzonti che avevano saputo dischiudere. La strada verso questo paradiso non era così comoda e allettante come quella del paradiso religioso; ma si è dimostrata una strada sicura, e non ho mai più rimpianto di averla scelta.¹²

Inoltre sempre questa complessa visione della conoscenza scientifica radicata, dunque, nel *possesso concettuale del mondo extrapersonale*, spiega allora anche la capacità critica e plastica con la quale Einstein ha inoltre saputo ben comprendere l'intrinseca articolazione epistemologica del procedere scientifico posto effettivamente in essere da uno scienziato militante nel corso delle sue ricerche. Non è del resto privo di significato che Einstein abbia delineato questa sua presa di consapevolezza epistemologica entro una pagina – di netta ascendenza kantiana – nella

¹² Einstein (1958, 4, il corsivo è mio) (segnalo che la citazione si trova invece alla p. 62 dell'edizione, curata da Bellone, delle *Opere scelte* einsteiniane già citate).

quale ha anche sottolineato, al contempo, il nesso inscindibile che, perlomeno a suo avviso, sempre si instaura tra il piano della riflessione epistemologica e quello della riflessione scientifica. Ma anche in questo caso sarà meglio dare direttamente la parola alla precisa riflessione einsteiniana:

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 come una specie di opportunist 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*, poiché 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 strumento indispensabile ed efficace per la sua ricerca.¹³

Onde poter meglio intendere, perlomeno nell'ambito del pensiero einsteiniano, il preciso significato, ad un tempo, fisico ed epistemologico, del criterio di realtà EPR, occorre allora tener presenti anche queste, pur successive, considerazioni prospettive. Il che consente anche di meglio intendere i punti deboli del criterio di realtà di EPR che possono indicarsi perlomeno nei due seguenti rilievi¹⁴:

1) il criterio di realtà di EPR possiede, inevitabilmente, un'applicabilità alquanto delimitata e circoscritta, come hanno del resto sottolineato gli stessi Einstein, Podolsky e Rosen. In ogni caso, perlomeno nel dominio specifico e circoscritto della meccanica quantistica, secondo il criterio EPR risulta "reale" solo ciò che può essere effettivamente misurato;

¹³ A. Einstein, *Replica ai vari autori*, in Einstein (1958, 629-630, i corsivi sono nel testo).

¹⁴ Per una più approfondita disamina dell'argomento di incompletezza di EPR cfr. le considerazioni delineate da Ghirardi (1997a, in particolare 443-463) e, più in generale, l'importante volume dello stesso Ghirardi (1997b).

2) in linea di principio, nell'ambito del carattere predittivo delle teorie fisiche, la quantità fisica misurata deve sempre essere predicibile con certezza il che, tuttavia, non tiene conto delle mille perturbazioni che possono sempre alterare una situazione fisica concreta e la possibilità, come è poi emerso successivamente, di poter utilizzare nell'ambito della ricerca fisica quantistica anche misure imperfette.

4. Selleri: il programma di ricerca scientifico di un realismo non metafisico

Prendendo spunto critico dal criterio di realtà EPR, Selleri ha quindi elaborato una prospettiva epistemologica di un realismo non-metafisico che ha anche indicato con il nome di *realismo di Einstein*. Del resto va anche rilevato come in Selleri l'approfondimento di questa interessante prospettiva epistemologica scaturisca dalla sua profonda condivisione del modo in cui lo stesso Einstein valutava, al contempo, il *valore* e il *limite* della meccanica quantistica. Come è noto Einstein non negava affatto che la meccanica quantistica costituisse un importante e decisivo passo in avanti, in un certo senso "definitivo" e, comunque, di assoluto rilievo, per l'approfondimento della nostra conoscenza del mondo microscopico. Tuttavia, Einstein era anche convinto che, prima o poi, la meccanica quantistica (come storicamente già successo per l'ottica geometrica che è stata successivamente inglobata nell'ottica ondulatoria) sarebbe stata, a sua volta, incorporata in una teoria più ampia, basata su dei principi fondamentali, necessariamente molto più approfonditi, oppure di ben diversa natura e di maggior generalità.

Se si considera una particella libera, descritta da una funzione spazialmente limitata in modo esauriente in un determinato istante (perlomeno secondo quanto espressamente previsto dalla meccanica quantistica), ci si può allora domandare – rileva Einstein – in quale preciso senso tale descrizione sia effettivamente in grado di rappresentare una determinata situazione reale. Per rispondere a questa domanda sono concepibili due differenti risposte e, quindi, due differenti teorie fisiche, perché si può immaginare:

a) che la particella libera posseda sempre una posizione e una quantità di moto ben definite che, tuttavia, la funzione spazialmente limitata ψ non è in grado di cogliere contemporaneamente, fornendo una descrizione completa della situazione fisica effettiva. In questo caso, allora, di fronte alla descrizione *incompleta* fornitaci dalla funzione ψ , occorre individuare un'altra funzione in grado di fornirci una descrizione *completa* della

situazione fisica reale. Questa soluzione, come è noto, costituisce proprio la risposta decisamente avversata dai fondatori della meccanica quantistica che hanno invece elaborato il cosiddetto paradigma di Copenaghen della fisica subatomica;

b) che la particella non possiede affatto una posizione determinata e una quantità di modo determinata. In questo caso la descrizione fornita dalla funzione spazialmente delimitata ψ offrirebbe allora una descrizione concettualmente soddisfacente e completa. Tuttavia, l'esatta localizzazione della particella non dipenderebbe solo dall'effettiva situazione della particella, ma sarebbe influenzata anche dallo strumento di misurazione che ne altererebbe, necessariamente, la precisa collocazione spaziale. Analogamente anche la misurazione della quantità di moto della particella sarebbe modificata dall'interazione della stessa particella con il meccanismo di misura. Questa seconda opzione fisica corrisponde – per dirla con le parole dello stesso Einstein – «in modo naturale, nel quadro della meccanica quantica, allo stato di cose empirico espresso dal principio di Heisenberg»¹⁵.

Inoltre Einstein, sempre in questo suo saggio *Meccanica quantistica e realtà* del 1948, osserva anche come occorra introdurre, contestualmente, un'altra assunzione, la quale non vale solo entro l'ambito delle ricerche microscopiche poste in essere dalla meccanica quantistica, ma coinvolge, più in generale, ogni ricerca fisica. Scrive infatti Einstein:

Se, indipendentemente dalla teoria dei quanti, ci chiediamo che cosa caratterizzi il mondo concettuale della fisica, viene subito alla mente il fatto che i concetti della fisica si riferiscono a un universo esterno reale, ossia che le rappresentazioni degli oggetti (corpi, campi, ecc.) stabilite dalla fisica aspirano a un'«esistenza reale» indipendente dai soggetti della percezione; d'altra parte queste rappresentazioni sono messe in relazione nel modo più certo possibile con le impressioni sensoriali. Inoltre, è caratteristico degli oggetti fisici l'essere concepiti come disposti in un continuo spazio-temporale; in questa disposizione, appare essenziale il fatto che in un dato istante gli oggetti considerati dalla fisica reclamino un'esistenza singola autonoma in quanto «collocati in regioni distinte dello spazio». Fuori dell'ipotesi di una simile esistenza autonoma (di un «essere così») dei singoli oggetti spazialmente separati – non sarebbe possibile un

¹⁵ La citazione è tratta direttamente dal saggio di Einstein, *Meccanica quantistica e realtà* che lo stesso Einstein inviò, nell'aprile del 1948, a Max Born, anticipandogli il testo di una sua prossima pubblicazione in cui difendeva la sua prospettiva realista (per la sua traduzione italiana, quella tenuta presente nel testo, cfr. A. Einstein, *Opere scelte, op. cit.*, pp. 719-723, dove la cit. si trova a p. 720). Segnalo, infine, che l'esemplificazione ricordata nel testo è ricavata nuovamente dal testo einsteiniano che esordisce proprio con l'illustrazione di questo specifico problema (cfr. pp. 719-720). Le citazioni da questo saggio di Einstein che figurano nel seguito del testo sono invece tratte, rispettivamente, dalle seguenti pagine: pp. 720-721; p. 721 e p. 723.

pensiero fisico nel senso per noi abituale; né si vede come potrebbero essere formulate e verificate delle leggi fisiche senza una netta distinzione di questo tipo.

Riconosciuto come la teoria dei campi abbia portato alle estreme conseguenze questo principio, Einstein sottolinea allora come sia caratteristico dell'indipendenza reciproca di due oggetti (A e B) separati spazialmente, il seguente principio (o postulato) II:

Un'azione esterna esercitata su A non ha alcun influsso diretto su B. La rinuncia radicale a questo "principio di contiguità" renderebbe impossibile l'idea dell'esistenza di sistemi (quasi) chiusi e quindi l'enunciazione di leggi empiricamente verificabili nel senso per noi abituale.

Ma proprio questo principio è quello che viene sistematicamente violato dalla meccanica quantistica, giacché la sua interpretazione standard (quella illustrata nel precedente punto b) non risulta essere compatibile proprio con questo principio.

A questo proposito così rileva, conclusivamente, Einstein:

Mi sembra inevitabile che quei fisici che considerano concettualmente definito il metodo descrittivo della meccanica quantica debbano assumere di fronte alla tesi sopra esposta il seguente atteggiamento: rinunciare al postulato II dell'esistenza autonoma di una realtà fisica in differenti regioni dello spazio. Essi potranno a ragione appellarsi al fatto che in nessun caso la teoria dei quanti fa uso esplicitamente di questo postulato.

Ciò posto, non posso fare a meno di osservare che quando considero i fenomeni fisici a me noti, e in particolare quelli così felicemente inquadrati dalla meccanica quantica, non riesco a trovare alcun fatto che mi faccia apparire probabile la rinuncia al postulato II. Sono perciò indotto a ritenere che la descrizione della meccanica quantica nel senso di cui al punto I-a [il nostro punto a)] debba essere considerata come una descrizione incompleta e indiretta della realtà, destinata a essere sostituita in futuro da un'altra descrizione, completa e diretta.

In sintonia di fondo con questi assunti critici prospettici il *realismo di Einstein* delineato da Selleri si qualifica per tre ipotesi cruciali che possono essere così riassunte:

1. *Realtà*: gli oggetti e le loro proprietà esistono indipendentemente dagli esseri umani e dalle loro osservazioni.
2. *Località*: dati due oggetti lontani fra loro le modifiche di uno di essi dovute ad interazioni dell'altro con un terzo corpo qualsiasi sono molto piccole.

3. *Freccia del tempo*: tutte le propagazioni naturali avvengono dal passato (o dal presente) verso il futuro.¹⁶

Di fronte alla diffusa plausibilità di queste tre assunzioni di fondo, occorre tuttavia anche ricordare, osserva giustamente Selleri, che esse sono apertamente negate e contestate, in relazione alla microfisica, da eminenti scienziati. Così fisici come Bohr ed Heisenberg contestano l'ipotesi della realtà per gli oggetti microfisici, pur accettandola per gli oggetti macroscopici, mentre fisici come Bohm, Stapp, Ne'eman negano l'ipotesi della località concependo mondi in cui risultano possibili azioni a distanza istantanee. Infine, anche la freccia del tempo¹⁷ è stata esplicitamente contestata e negata da fisici come Wheeler, Costa de Beauregard. Naturalmente la negazione di queste tre ipotesi per la realtà microfisica scaturisce sempre dalla decisione di voler salvare la meccanica quantistica che ha comunque conseguito successi innegabili. Ma proprio di fronte a questo esito, inevitabilmente paradossale, per quanto diffuso tra i fisici quantistici (per i quali «Bohr ha sempre ragione»), è allora giusto chiedersi, argomenta ancora Selleri, se la strada da seguire sia proprio quella di

negare delle affermazioni che nessun *fatto empirico* ha mai contraddetto, o non [sia] invece proprio quella di modificare l'esistente teoria [quantistica, *ndr.*], salvandone beninteso tutte le predizioni corrette.

Chi scrive cerca di portare avanti quest'ultimo punto di vista. È possibile farlo senza più rischiare accuse di metafisicità, proprio perché, come abbiamo detto, *il realismo di Einstein*, definito sopra, è stato inequivocabilmente dimostrato essere un punto di vista falsificabile, e perciò stesso non metafisico.

In questa prospettiva l'elemento nuovo e dirimente è rappresentato dalla scoperta della diseguaglianza di John Bell¹⁸:

È stato dimostrato nel 1965 da John Bell che esiste una quantità misurabile Δ che deve soddisfare la diseguaglianza $\Delta \leq 2$ se vale il principio di realtà separabile, mentre è predetta dalla meccanica quantistica avere il valore $\Delta_{\text{max}} = 2.83$. La conclusione è che la meccanica quantistica è incompatibile con l'idea della realtà

¹⁶ Selleri (1990a, 108, corsivi nel testo). La citazione che segue immediatamente nel testo è invece tratta dalla p. 109 (i corsivi sono sempre di Selleri).

¹⁷ Ad un approfondimento de *La natura del tempo* Selleri ha dedicato un omonimo volume, Selleri (2002), da lui curato, in cui si affrontano i problemi delle *Propagazioni superluminali* il *Paradosso dei gemelli* e il problema del *Teletrasporto* (in cui è da tener presente, in particolare, il contributo di Selleri, *È possibile inviare messaggi verso il passato?*, pp. 329-347).

¹⁸ Cfr. Bell (1965, 195).

separabile che, come abbiamo mostrato sopra, è la base naturale del realismo scientifico moderno.¹⁹□

Ma se si ritiene, con Bell, che la meccanica quantistica *non* sia una teoria completa, allora si può sostenere che essa risulta incompatibile con il principio di realtà separabile secondo il quale

dati due oggetti qualsiasi (macroscopici o microscopici) esiste una loro distanza relativa al di sopra della quale la modificazione di una qualsiasi grandezza fisica dell'uno o dell'altro oggetto, dovuta alla loro mutua interazione, non supera l'uno per cento.

Del resto in natura i quattro tipi di interazioni per ora note (ovvero quella gravitazionale, quella elettromagnetica, quella nucleare e quella debole) decrescono tutte con la distanza: nel caso delle interazioni gravitazionali ed elettromagnetiche le energie potenziali risultano infatti essere decrescenti in modo inversamente proporzionale alla distanza. Nel caso dell'interazione nucleare e di quella debole esse decrescono, invece, in modo esponenziale con la distanza. Pertanto anche nel caso di due oggetti microscopici (come due fotoni oppure due elettroni di carica opposta) posti ad una distanza macroscopica devono generare un'interazione reciproca trascurabile, in sintonia con quanto affermato dal postulato della separabilità che si configura, quindi, «la base più sicura di ogni realismo scientifico moderno». Questa, perlomeno, è proprio la soluzione difesa da Selleri che già nel 1987 dichiarava apertamente:

A me pare essenziale difendere il principio di realtà separabile che ha tutta l'aria di essere la base più sicura di ogni realismo scientifico moderno. Beninteso, la fisica che avanza può in linea di principio giungere a mostrare la non validità di questo principio. In un certo senso, si può obiettare, «la fisica che avanza» lo ha già rifiutato. Ma la presunta falsificazione dipende dai contenuti ideologici, storicamente determinati, logicamente arbitrari del paradigma quantistico e non da indiscutibili evidenze empiriche. Bisogna ovviamente ottenere che la chiarificazione avvenga su questo secondo terreno.²⁰

Su questo terreno sperimentale sono stati così compiuti numerosi esperimenti per controllare o meno la validità del realismo di Einstein. Il risultato è tuttavia in parte controverso giacché non tutti i fisici inclinano a ritenere che il problema sia stato sperimentalmente risolto a favore della

¹⁹ Selleri (1987, 168), mentre la citazione che segue nel testo è tratta da p. 167 (corsivo di Selleri).

²⁰ Selleri (1987, 168-169). In merito alla dimostrazione delle disuguaglianze di Bell cfr. i seguenti lavori dello stesso Selleri (1988a, 1988b, 1988c, 1999, 2001a).

teoria dei quanti, con la conseguente falsificazione del realismo einsteiniano²¹. Di fronte ai risultati sperimentali che violerebbero il teorema di Bell, si è così osservato che tutte le predizioni effettuate si sono tuttavia sempre basate su strumenti *ideali*, in grado, cioè, di operare con un'efficienza pari ad uno. Con riferimento ai rilevatori di fotoni questi ultimi dovrebbero quindi poter registrare *tutti* i fotoni che li colpiscono. Il che, però, è invece ben lontano dalla realtà sperimentale nella quale i rilevatori di fotoni posseggono un'efficienza molto inferiore (pari solo al 10%). Per questo motivo, basandosi sui *risultati sperimentali effettivi* prodotti da rilevatori di fotoni che hanno un'efficienza ridotta rispetto a quella ideale, il teorema di Bell non sembrerebbe essere violato. Né manca infine chi, come Gian Carlo Ghirardi, ritiene, invece, che «nessuno, prima di Bell, aveva saputo focalizzare in modo così conclusivo e acuto la natura fondamentale nonlocale dei processi naturali»²². Il che apre un diverso scenario alla luce del quale, per dirla con le parole di David Mermin, «le domande con cui Einstein attaccava la teoria quantistica ammettono risposte; ma esse non sono le risposte che Einstein si aspettava». Il che permette di ancor meglio di «apprezzare pienamente l'enorme valore concettuale sia della critica einsteiniana che del lavoro di Bell che essa ha stimolato».

5. Selleri e il programma di ricerca del neorealismo logico

La difesa del realismo di Einstein da parte di Selleri²³ non è tuttavia solo connessa con gli sviluppi delle dimostrazioni sperimentali del teorema di Bell. Infatti la sua adesione al realismo di Einstein si radica anche in una precisa *presa di posizione filosofica* che va al di là di tutte le pur possibili ed articolate argomentazioni empiriche che militano a favore di questa particolare forma di realismo scientifico non metafisico. Infatti l'accettazione da parte di Selleri della prospettiva del realismo di Einstein si basa

²¹ Cfr. perlomeno gli *Atti* della conferenza di Cesena, van der Merwe & Selleri & Tarozzi (1992).

²² Ghirardi (1997a, 495), mentre la citazione di N. D. Mermin che segue immediatamente nel testo è tratta dalla p. 496 (con riferimento al volume di Mermin (1990), in cui si trova anche la citazione finale che è sempre di Ghirardi).

²³ Realismo di Einstein ancora ben presente in altri studi di Selleri, in particolare nel suo importante volume, Selleri (1990b), nonché sia nel suo più recente contributo, Selleri (2011) (in particolare cfr. le pp. 40-42, ma a questo proposito “relativistico” sono anche da ricordare le sue precedenti *Lezioni di relatività da Einstein all'etere di Lorentz*, Selleri (2003).

anche, al contempo, su un tradizionale presupposto razionalista, in base al quale il Nostro ritiene che

i nostri sensi fondamentalmente non ci giocano brutti scherzi, ed esistono oggettivamente processi concreti che si sviluppano causalmente dal passato verso il futuro nello spazio tridimensionale e nel tempo.²⁴

Per questo motivo il suo realismo *à la* Einstein – inteso, peraltro come un programma di ricerca scientifico – lo induce anche a sviluppare una conseguente presa di posizione critica nei confronti di una differente tradizione di pensiero che ha trovato nelle filosofie di pensatori come Kierkegaard, Schopenhauer ed Heidegger degli spunti significativi che, a volte, hanno variamente e direttamente influenzato anche i fisici e i teorici della meccanica quantistica.

Tuttavia, perlomeno nella misura in cui Selleri presenta del tutto esplicitamente il suo realismo come non-metafisico, proprio perché la scelta a favore delle idee di Einstein oppure di quelle dei teorici della meccanica quantistica richiede di essere operata su piano sperimentale (del resto, come si è accennato, il contrasto tra le due posizioni teoriche scaturisce anche da un preciso e rilevante piano empirico), non bisogna comunque dimenticare che questo suo programma di ricerca, ad un tempo scientifico e filosofico, implica anche un doveroso confronto con la tradizione del pensiero epistemologico e anche, più in generale, con quella della riflessione filosofica. Del resto a questo proposito, in questa sede, meritano allora di essere ricordate alcune puntuali considerazioni che Selleri ha avuto modo di sviluppare, nel lontano 1993, in connessione diretta con le *Lezioni di filosofia della scienza* di un filosofo come Giulio Preti²⁵. Pur apprezzando,

²⁴ Selleri (1990a, 109).

²⁵ Selleri (1993), osservazioni scritte in relazione diretta al volume di Preti (1989) (volume pretiano che, a suo tempo, aveva suscitato un vivo interesse anche da parte di un epistemologo come Ludovico Geymonat del quale cfr. sia l'ampio saggio Geymonat (1991), sia il più breve, ma non meno significativo, articolo giornalistico, Geymonat (1990), apparso su *Il Sole-24 ore*). In relazione a questo intervento di Selleri desidero anche ricordare (come del resto ha puntualmente indicato lo stesso Selleri in chiusura del suo testo, cfr. p. 445) che esso era inizialmente scaturito da una lunga, articolatissima e puntuale lettera con il quale Selleri discuteva le idee di Preti con lo scrivente. Successivamente, soprattutto grazie alla generosa disponibilità di un pensatore come Giuseppe Semerari, questa lunga lettera di commento e discussione del testo pretiano si è poi sostanzialmente trasformata in una nota critica che fu appunto ospitata dalla rivista *Paradigmi*, allora diretta da Semerari. In questa occasione mi sia quindi concesso rivolgere, *per scripta*, un nuovo ringraziamento a Selleri che allora non solo ebbe modo di prestare attenzione a questo importante inedito di Preti, che avevo curato sotto la guida di un

notevolmente, tutto l'impianto analitico delle innovative lezioni pretiane, tuttavia Selleri non può fare a meno di segnalare la distanza critica che, inevitabilmente, esiste tra la presa di posizione decisamente anti-realista di Preti e la sua difesa del realismo di Einstein. Nella misura in cui Preti condanna apertamente ogni caduta realistico-metafisica e denuncia il linguaggio realistico come «filosoficamente inesatto e inadeguato», Selleri non può infatti non ricordare come queste prese di posizione non possano non costituire «un boccone troppo amaro per un razionalista convinto quale io sono»²⁶. Anche perché questo «boccone», determinato da una presa di posizione pregiudizialmente anti-realistica, gli sembra del tutto «superato dagli sviluppi della fisica fondamentale successivi al 1965» (anno accademico cui si riferiscono le lezioni universitarie pretiane svolte nell'ateneo fiorentino nel 1965-66). Anche in questo caso il riferimento privilegiato di Selleri è costituito proprio da tutto lo sviluppo della fisica fondamentale successivo al 1965 e il suo rilievo

vale ovviamente per la filosofia italiana contemporanea, o meglio, per quella sua parte notevole che non riesce a fare i conti con il *teorema di Bell*. Si tratta di una fantastica conclusione: la filosofia del realismo *locale* non è metafisica perché porta a conseguenze empiriche che sono in disaccordo con le predizioni della teoria quantistica, e può quindi essere falsificata. Il realismo locale evade dunque ogni accusa di metafisicità, e inoltre costituisce un punto di vista estremamente generale e ragionevole.

Sulla base di questo rilievo Selleri è poi indotto anche a criticare l'impianto complessivamente meta-riflessivo dell'indagine pretiana. Soprattutto nella misura questa impostazione neo-criticista e neo-fenomenologica rischia, appunto, di collocare il filosofo in una posizione eccessivamente subordinata rispetto alla dinamica intrinseca della ricerca scientifica. Al contrario, l'esigenza di un fisico come Selleri sarebbe infatti quella di poter eventualmente disporre di *autonome riflessioni teoretiche* sviluppate dai filosofi, in grado di porre in seria discussione critica alcune delle idee di

Maestro come Mario Dal Pra, ma che ebbe anche la disponibilità e la generosità umana di discuterne dettagliatamente con chi insegnava allora in un oscuro liceo di provincia, dovendo convivere con una assai difficile situazione familiare (avendo peraltro perso, da poco, in una manciata di tre soli mesi, i suoi due dioscuri e Maestri milanesi: Geymonat e Dal Pra). In questa non facile situazione, la lunga lettera di Selleri, nonché la sua vicinanza culturale ed umana, mi furono, allora, di grande aiuto e per questo desidero ora rinnovargli, da questa sede, un commosso ringraziamento, esprimendogli, nuovamente, tutta la mia riconoscenza umana e culturale.

²⁶ Selleri (1993, 442), da cui sono tratte anche le due citazioni che seguono immediatamente nel testo (nella seconda il corsivo è di Selleri).

fondo, solitamente condivise dai paradigmi dominanti nell'ambito della ricerca fisica fondamentale. Da questo punto di vista Selleri vorrebbe insomma poter disporre di una riflessione filosofica meno succube nell'accettare, senza adeguata resistenza critica, i discorsi scientifici che, di fatto, prevalgono entro le pur molteplici dinamiche delle diverse comunità di ricerca degli scienziati militanti. Considerando così nuovamente il netto contrasto teorico emerso nel dibattito tra Einstein e Bohr in relazione agli esperimenti condotti nell'ambito dei fondamenti della microfisica, Selleri non può infatti fare a meno di sottolineare come esistano molti problemi *aperti* che hanno, comunque, accompagnato (e anche variamente contrastato) l'egemonia culturale e scientifica del programma di ricerca connesso con il paradigma di Copenaghen. Sempre in questo contesto Selleri prende anche le distanze dall'idea di Preti secondo la quale la metafisica sempre presente (*more kantiano!*) entro l'impresa scientifica, svolga una funzione prevalentemente *regolativa* piuttosto che *costitutiva*. Anzi, a suo avviso, sarebbe semmai vero esattamente l'opposto, proprio perché, per richiamare un solo esempio emblematico, l'ipotesi atomica adottata da fisici come Boltzmann, Einstein, Rutherford e Perrin, concerneva direttamente la conoscenza (vera) della struttura fisica del mondo microscopico (e non costituiva, quindi, solo un punto di vista meramente *regolativo*).

Questi rilievi sono naturalmente importanti e concernono non solo una presa di posizione critica nei confronti di alcune affermazioni pretiane, ma sono nuovamente rilevanti per meglio intendere anche il modo preciso con il quale lo stesso Selleri intende il suo stesso programma di ricerca scientifico basato sulla difesa di un realismo non metafisico. Tuttavia, sia anche lecito rilevare come chi abbia ben presente il quadro complessivo dell'articolato programma di ricerca filosofico di Preti, possa comunque nutrire qualche motivata perplessità critica nei confronti di questa lettura di Selleri. In questa sede non è naturalmente il caso di richiamare l'andamento analitico delle differenti *fasi* e *forme* della complessa riflessione pretiana – cui personalmente ho comunque dedicato alcuni studi analitici²⁷ –, anche perché non si deve neppure richiedere ad un fisico come Selleri, attivamente impegnato nei dibattiti concernenti gli sviluppi della fisica fondamentale, una conoscenza specialistica dei testi di un filosofo come Preti. Semmai, può però essere interessante ricordare come il programma di ricerca

²⁷ In questa sede basti ricordare le mie seguenti tre monografie: Minazzi (1994c, 2004a, 2011a), cui si affianca, infine, un agile profilo biografico-intellettuale, Minazzi (2011b), cui senz'altro rinvio per ogni eventuale approfondimento analitico.

filosofico di Preti più maturo – quello appunto basato sulla delineazione di un neo-realismo logico e fenomenologico – non risulti in contrasto aperto con un realismo critico *à la* Einstein. Perlomeno se si tiene presente che questo realismo – in profonda connessione anche con la stessa riflessione epistemologica di Einstein – non può fare a meno di cogliere la natura profondamente *dialettica* della stessa conoscenza scientifica. Un'intrinseca conoscenza dialettica cui, non a caso, si rifà, del resto, anche lo stesso Selleri quando, proprio in apertura del suo articolo sulle lezioni di filosofia della scienza pretiane, ricorda espressamente come lo stesso Einstein sottolineasse

che la fisica è una creazione dell'uomo fatta nel tentativo di comprendere le proprietà del mondo reale. Questa è molto chiaramente una definizione dialettica: come *creazione* dell'uomo la fisica deve certamente essere, almeno in parte, arbitraria, perché l'idea stessa di creazione implica una certa libertà da parte di chi crea; come *comprensione* del reale, e nella misura in cui si tratta di una comprensione corretta, la fisica deve essere obiettiva, deve cioè contenere conquiste cognitive irreversibili che dovranno magari essere arricchite ed approfondite dagli sviluppi futuri, ma che non potranno essere più negate o abbandonate.²⁸

Ebbene, il neorealismo logico di Preti scaturisce anche dalla precisa volontà di poter meglio intendere, *criticamente*, il complesso gioco che sempre si instaura tra il piano del nostro discorso e il piano di una realtà oggettiva la quale non si costruisce in un mondo posto metafisicamente al di là di ogni nostra eventuale esperienza possibile, ma si costruisce, al contrario, proprio all'interno del piano trascendentale di oggettività instaurato dalle differenti ontologie regionali poste in essere dalle varie e differenti teorie (e anche dalle varie e differenti discipline scientifiche). Certamente il punto teoretico focale del complesso programma neorealista logico pretiano deve essere rintracciato all'interno della "rivoluzione copernicana" inaugurata da Kant con la scoperta del piano trascendentale, ma entro questo preciso orizzonte critico-trascendentalistico è anche vero che il realismo critico connesso con l'oggettività del conoscere umano finisce, allora, per assumere un suo ruolo preciso e costitutivo²⁹. Un ruolo e

²⁸ Selleri (1993, 437, corsivo nel testo).

²⁹ Per una discussione teoretica articolata ed analitica di queste tematiche mi sia comunque lecito rinviare sia al confronto filosofico che ho potuto svolgere con Ludovico Geymonat ed Evandro Agazzi, nel volume dialogico Agazzi & Geymonat & Minazzi (1989), sia nei miei studi monografici, Minazzi (1993, 2004b). In relazione alla specifica riflessione di Preti, queste tematiche del neorealismo logico-fenomenologico sono illustrate e discusse analiticamente soprattutto nel mio volume, già citato, Minazzi (2011a).

una funzione che non mi sembrano affatto in contrasto con la lezione einsteiniana, anche se dovrebbero allora indurci a non delineare una lettura necessariamente metafisica dello stesso realismo di Einstein richiamato da Selleri. Naturalmente può anche essere una questione di accenti e, da questo punto di vista, si può ben comprendere come un fisico come Selleri avverta in modo naturale l'esigenza di accentuare una componente realistica che fa tutt'uno con la difesa di un pensiero fisico in grado di studiare e cogliere il mondo fisico oggetto specifico delle sue indagini. Tuttavia, anche in questo ambito specifico la lezione pretiana ci invita a saper sempre cogliere la complessità intrinseca delle interconnessioni critiche entro le quali si costruisce il nostro *sapere oggettivo del mondo*. Un sapere che non è mai in grado di togliere il velo di Maia per farci conoscere, una volta per tutte, la realtà noumenale, proprio perché l'uomo, secondo un insegnamento già presente nella riflessione di uno studioso come Leonardo da Vinci, può semmai dipanare, con pazienza, qualche *filo di verità* dell'intricato gomitolo del mondo. Insomma: le nostre teorie scientifiche non sono mai l'«occhio di dio» sul mondo, proprio perché sono solo il prodotto di un occhio miope, finito, parziale e precario come l'occhio umano. Ma pur entro questi limiti le teorie sono comunque in grado di cogliere delle verità oggettive. Verità oggettive che, tuttavia, valgono per noi e che saranno tali solo fino a quando l'uomo esisterà. Del resto è stato lo stesso Selleri, ancora una volta nel capitolo conclusivo del suo volume *Paradossi e realtà* a ricordare la necessità di sviluppare un'*epistemologia evolutiva* nella quale, scriveva – e Preti sarebbe stato ampiamente d'accordo –

L'a priori appare non più storico o culturale, come molti in contrasto con Kant hanno sostenuto, ma, almeno a livello più profondo, esso ha i tempi della specie umana e non delle fasi della sua cultura superiore.³⁰

Il che allora non deve affatto indurci a riaprire le porte ad una greve metafisica realista dogmatica, ma, semmai, deve invece aiutarci a sviluppare una forma di *realismo critico* all'altezza del patrimonio tecnico-conoscitivo posto ora a disposizione dell'umanità dallo sviluppo complessivo delle molteplici ricerche scientifiche (in ogni loro ambito di applicazione, senza alcun indebito privilegiamento disciplinare). È del resto mia impressione che quell'ancora giovane fisico nel quale Selleri ha giustamente tratteggiato, *in chiaroscuro*, il proprio profilo – tipico di un fisico che «ha imparato che tutti possono sbagliare, anche Einstein, Heisenberg e Feynmann», che è stato parimenti influenzato «da fisici eretici, come de Broglie e Bohm» e

³⁰ Selleri (1987, 237).

che ritiene «possibile una conoscenza profonda dei fenomeni naturali nonostante il parere negativo di molti suoi colleghi»³¹ – non potrà che giovare, anche in ambito della ricerca fisica fondamentale, della feconda prospettiva del neo-realismo critico logico-fenomenologico delineato da Preti sulla scorta della sua profonda ed originale lezione filosofica.

Riferimenti bibliografici

- Agazzi, E., Geymonat, L., Minazzi, F., 1989, *Filosofia, scienza e verità*, Milano, Rusconi.
- Aa. Vv., 1989, *L'opera di Einstein*, a cura di Umberto Curi, Ferrara, Gabriele Corbo Editore.
- Aa. Vv., 1994, *L'eredità di Einstein*, a cura di Gualtiero Pisent e Jürgen Renn, Padova, il poligrafo.
- Bachelard, G., Cassirer, E., Reichenbach, H., Schlick, M., 2009, *Einstein e i filosofi*, cura e introduzione di Gaspare Polizzi, Milano, medusa.
- Bell, J., 1965, *Physics*, 1, p. 195.
- Einstein, A., 1958, “Note autobiografiche”, in Albert Einstein *et al.*, *Albert Einstein scienziato e filosofo. Autobiografia di Einstein e saggi di vari autori*, a cura di Paul Arthur Schlipp, trad. it. di Augusto Gamba, Torino, Paolo Boringhieri.
- Einstein A., Podolsky, B., Rosen, N., 1988, “La descrizione quantica della realtà può essere considerata completa?”, in A. Einstein, *Opere scelte*, a cura di Enrico Bellone, Torino, Bollati Boringhieri, pp. 374-382.
- Geymonat, L., 1990, “L’epistemologia secondo Giulio”, *Il Sole-24 ore*, CXXVI, n. 6, domenica 7 gennaio, p. 20.
- , 1991, “Sulle lezioni di filosofia della scienza di Giulio Preti”, *Belfagor*, anno XLVI, 31 maggio, fasc. III, pp. 245-259.

³¹ Cfr. Selleri (2001b, 6-7).

- Ghirardi, G.C., 1997a, “I fondamenti concettuali e le implicazioni epistemologiche della meccanica quantistica”, in *Filosofia della fisica*, a cura di Giovanni Boniolo, Milano, Bruno Mondadori, pp. 337-608.
- , 1997b, *Un’occhiata alle carte di Dio*, Milano, il Saggiatore.
- Holton, G., 1991, *Einstein e la cultura scientifica del XX secolo*, trad. it. di Erica Bassato, Bologna, il Mulino.
- , 1997, *La lezione di Einstein*, trad. it. di Silvio Ferraresi, revisione scientifica di Agnese Grieco, Milano, Feltrinelli.
- Mermin, N.D., 1990, *Boojums all the way through: communicating science in a prosaic age?* Cambridge, Cambridge University Press.
- Minazzi, F., 1993, *Realismo senza dogmi*, Milano, Guerini e Associati.
- , 1994a, *Galileo “filosofo geometra”*, Milano, Rusconi.
- , 1994b, *Il flauto di Popper*, Milano, Franco Angeli.
- , 1994c, *L’onesto mestiere del filosofare*, Milano, Franco Angeli.
- , 2004a, *Il cacodèmone neoilluminista*, Milano, Franco Angeli.
- , 2004b, *Le saette dei tartari*, Milano, Franco Angeli.
- , 2007, “Albert Einstein epistemologo”, *Il Protagora*, XXXV, gennaio-giugno, n. 9, pp. 115-151 (vol. mon. *Albert Einstein filosofo e metodologo*, a cura di V. Fano, F. Minazzi, I. Tassani, *Atti del convegno einsteiniano di Cesena*, 25-26 novembre 2005).
- , 2011a, *Suppositio pro significato non ultimato*, Milano-Udine, Mimesis.
- , 2011b, *Giulio Preti: le opere e i giorni*, Milano-Udine, Mimesis.
- Paty, M., 1993, *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Paris, Presses Universitaires de France.
- Preti, G., 1989, *Lezioni di filosofia della scienza*, a cura di Fabio Minazzi, Milano, Franco Angeli.

- Selleri, F., 1987, *Paradossi e realtà. Saggio sui fondamenti della microfisica*, Roma-Bari, Laterza.
- , 1988a, *Quantum Mechanics versus Local Realism: The Einstein, Podolsky, and Rosen Paradox*, edited by F. Selleri, New York-London, Plenum.
- , 1988b, “Il paradosso di Einstein, Podolsky e Rosen”, *Nuova Civiltà delle Macchine*, anno VI, n. 3, 23.
- , 1988c, “Il dualismo onda-corpuscolo secondo Einstein de Broglie”, *Il nuovo Saggiatore. Bollettino della Società Italiana di Fisica*, anno IV, n. 3.
- , 1989, *Fisica senza dogma. La conoscenza scientifica tra sviluppo e regressione*, Bari, Edizioni Dedalo.
- , 1990a, “La recente scoperta di un realismo non metafisico”, in Aa. Vv., *Che cos'è la realtà. Dibattito nella fisica contemporanea*, a cura di Franco Selleri, Milano, Jaca Book, pp. 99-112.
- , 1990b, *Quantum Paradoxes and Physical Reality*, Dordrecht, Kluwer.
- , 1992, *Fondamenti della fisica moderna*, Milano, Jaca Book, Milano.
- , 1993, “Le *Lezioni di filosofia della scienza* di Giulio Preti nel giudizio di un fisico”, *Paradigmi*, anno XI, maggio-agosto, n. 32, pp. 437-445.
- , 1999, *La fisica del Novecento. Per un bilancio critico*, Bari, Progedit.
- , 2001a, *La fisica tra paradossi e realtà. Le critiche dei fisici realisti alla teoria dei quanti*, Bari, Progedit.
- , 2001b, *Le forme dell'energia. La luce e il calore. Da $E=mc^2$ all'energia nucleare*, Bari, Edizioni Dedalo.
- , 2002, *La natura del tempo*, Bari, Edizioni Dedalo.
- , 2003, *Lezioni di relatività da Einstein all'etere di Lorentz*, Bari, Progedit.

Minazzi: La questione epistemologica del realismo nel programma di ricerca di Franco Selleri

—, 2011, *La relatività debole. La fisica dello spazio e del tempo senza paradossi*, Milano, Edizioni Melquíades.

Schlick, M., 1979, *Spazio e tempo nella fisica contemporanea. Una introduzione alla teoria della relatività e della gravitazione. Prefazione di Ludovico Geymonat (trad. it. di Eugenio Galzenati)*, Napoli, Bibliopolis.

van der Merwe, A., Selleri, F., Tarozzi, G., 1992, a cura di, *Bell's Theorem and the Foundations of Modern Physics*, edited by, Singapore, World Scientific.

La Scienza tra normalità e rivoluzione

Arcangelo Rossi
Università del Salento
arcangelo.rossi@unisalento.it

1. Introduzione

Effettivamente T. Kuhn ammette, già ne *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* (cfr. Kuhn, 1962) e poi in tutti gli scritti successivi dedicati al tema (cfr. Kuhn, 1987), che gran parte dello sviluppo scientifico è normale e cumulativo, anche se questo non esaurisce affatto la totalità dello sviluppo, in contrasto con una pur raffinata e rigorosa letteratura epistemologica, quella neopositivista. Secondo quest'ultima infatti il progresso scientifico non farebbe altro che aggiungere mattone su mattone all'edificio della scienza, cioè i dati empirici che, aggiungendosi e non contraddicendo ai mattoni precedentemente accumulati, porterebbero per generalizzazione a nuove leggi e teorie, una volta accreditati i mattoni o dati «compresi in precedenza» quali stabili basi di sviluppo. Per Kuhn non si tratta affatto di negare tale dinamica, ma di rapportarla a quella più complessiva della scienza vista come irriducibile a un processo puramente cumulativo, incapace da solo, nonostante l'indubbia produttività, di spiegare la crescita della scienza. Esso può tuttavia spiegare almeno quella parte del progresso scientifico in cui la stabilità dei dati osservativi «compresi in precedenza» sembra poter garantire la continuità dello sviluppo. Quando questa viene meno, quando si innescano processi rivoluzionari, quelle stesse basi prima indiscusse mostrano però tutta la loro problematicità, i limiti della loro efficacia e produttività. Le precedenti basi osservative, che sembravano indiscusse e indiscutibili, rivelano allora il loro carattere storico-evolutivo e la presenza in esse di quelle componenti teoriche che, solo una volta

Arcangelo Rossi, "La Scienza tra Normalità e Rivoluzione", in Isabella Tassani (a cura di), *Oltre la fisica normale. Interpretazioni alternative e teorie non standard nella fisica moderna*, pp. 209-221.

© 2013 Isonomia, Rivista online di Filosofia – Epistemologica – ISSN 2037-4348
Università degli Studi di Urbino Carlo Bo
<http://isonomia.uniurb.it/epistemologica>

accettate anche se inconsapevolmente, rendono possibili quelle leggi e teorie che nessuna logica e generalizzazione potrebbero giustificare di per sé, condividendosi comunque la critica del puro induttivismo sviluppata dallo stesso neopositivismo al suo interno (cfr. C. G. Hempel, 1965). In ogni caso, nella visione kuhniana persiste quella distinzione, propria della “received view” neopositivista, tra termini teorici e termini osservativi per cui i secondi, pur essendo, come abbiamo visto, carichi di componenti teoriche e interpretative tali da giustificare la nascita di leggi e teorie ulteriori, costituiscono, come rappresentazioni concrete ed esemplari operativi, lo strato giustificativo, pur esso teorico ma di livello inferiore, delle teorie e leggi accettate. Solo appunto finché non si inneschi una rivoluzione che rimetta in discussione l’intera struttura. I nuovi termini sono comunque sempre introdotti mediante nuove opzioni teoriche, siano essi più osservativi o più congetturali e teorici. In ogni caso si tratterà di una stratificazione di diversi livelli di termini, più o meno elementari e più o meno intuitivi, che la scienza normale tende a conservare il più a lungo e stabilmente possibile e la scienza rivoluzionaria a modificare e in definitiva a cancellare e sostituire evidenziandone il carattere storico contingente. Pertanto, quella stratificazione non funzionerebbe più come base, insieme osservativa e teorica, rispetto alle nuove teorie storiche.

2. Mutamenti normali e rivoluzionari nella scienza antica e nella prima età moderna

Un esempio di mutamento normale e non rivoluzionario, tale quindi da non richiedere l’abbandono e la sostituzione della gerarchia scientifica preesistente è in particolare, per Kuhn e non solo per Kuhn, quello della scoperta della legge di Boyle e Mariotte. Gli scopritori di quella legge dei gas partirono infatti da quella preesistente gerarchia di termini e concetti costituita in particolare dalla pressione e dal volume dei gas e dagli strumenti adottati per misurarne le grandezze, senza dover ricorrere affatto a nuovi termini e concetti-base per trovare la nuova legge, ma applicando quelli già posseduti allo studio del comportamento dei gas. Si tratterebbe comunque di un processo, definito da Kuhn «normale», che Peter B. Medawar (cfr. Medawar, 1970) chiama «induttivo», in contrasto con altri più creativi e innovativi, da lui definiti «intuitivi», in cui intervengano invece nuove idee e non solo applicazioni del vecchio «paradigma», essendo appunto l’induzione considerata semplice aggiunta ad una base già acquisita, e l’intuizione invece elaborazione di nuove ipotesi e interpreta-

zioni, inclusi nuovi strumenti di osservazione, termini e concetto osservativi e teorici. Dunque, i mutamenti rivoluzionari appaiono diversi da quelli normali, in cui peraltro consiste per Kuhn la maggior parte del progresso scientifico inteso come accumulo per semplice aggiunta di soluzioni di «rompicapo». Diversi appunto perché essi contraddicono i concetti preesistenti, postulando nuove basi per poter scoprire nuove leggi e teorie, a costo di modificare interi modi di pensare i fenomeni, tanto da giungere a modificare in modo irricognoscibile concetti che pure continuano ad avere lo stesso nome. Esempio decisivo di questo mutamento radicale è per Kuhn la formulazione del secondo principio della dinamica newtoniana, che ridefinisce, in modo appunto irricognoscibile i concetti di massa e di forza, comunque in uso già prima di tale ridefinizione nel quadro dei precedenti «paradigmi». Un esempio precedente (cfr. Kuhn, 1957), più semplice e immediato, riguarda la rivoluzione astronomica, nella quale gli stessi termini, in uso nella teoria geocentrica di Aristotele e Tolomeo a designare una certa categoria di corpi celesti, assunsero, senza cambiare suono, il ruolo di designare oggetti diversi nel passaggio dalla vecchia teoria alla nuova teoria copernicana, ponendosi come nuova base osservativa e teorica. In particolare, il significato del termine “pianeta” cambiò per designare in modo nuovo gli oggetti celesti, per cui, se nella teoria il termine designava anche il sole e la luna, cessò di farlo nella nuova teoria, dove arrivava sì a designare anche la terra, ma cessava di designare il sole, compreso invece nella categoria delle “stelle”, mentre la luna veniva designata come “satellite”, una nuova categoria di oggetti celesti diversa dalle altre due. Il cambiamento rivoluzionario non era comunque puramente linguistico, ma implicava, sulla base di nuovi referenti per i termini usati, diversi criteri di connessione dei termini alla natura e, con essi, diverse leggi e teorie relative agli oggetti e ai fenomeni studiati. Il cambiamento non poteva dunque essere puramente cumulativo, ma riguardava appunto i significati dei termini e le loro relazioni con gli oggetti in rapporto a nuove leggi e teorie con cui venivano introdotti i termini. In questi casi di cambiamento rivoluzionario, il cambiamento dei referenti linguistici si accompagna dunque a nuove leggi e teorie che impongono cambiamenti lessicali tali da rendere addirittura privi di senso determinati enunciati se si pretende di continuare ad usare il vecchio lessico con i suoi referenti. In particolare, sempre nel caso specifico della rivoluzione astronomica, è incoerente fino ad essere priva di senso l’affermazione secondo cui nel sistema tolemaico i pianeti ruotano intorno alla terra mentre in quello copernicano ruotano intorno al sole, dato che lo stesso termine designa ambigualmente oggetti diversi, connettendosi in modi contraddittori alla natura sulla base di usi del

termine e teorie irriducibili l'uno all'altro. Non si dà quindi alcuna interpretazione univoca del termine, tale da mostrare vera e non incoerente la frase che contiene ambedue le interpretazioni del termine. Ci sono comunque esempi ancora più efficaci e probanti di tale mutamento rivoluzionario, che riguardano intere concezioni scientifiche generali come quello relativo al passaggio dalla fisica aristotelica a quella moderna, in particolare per quanto riguarda il concetto di movimento meccanico. Inizialmente, quando cominciò a occuparsi del problema (cfr. Kuhn, 1987), Kuhn cadde nell'errore di identificare i concetti aristotelici con quelli newtoniani e galileiani per cercare di capire quanto i primi si avvicinassero ai secondi e quanto mancasse ad essi perché l'identificazione risultasse completa. Così, inevitabilmente, i concetti aristotelici risultavano inadeguati rispetto a quelli più moderni, presi come termine di paragone, mentre invece essi avrebbero dovuto essere compresi e valutati indipendentemente, come espressione di una fase scientifica diversa e precedente, distinta dalla rivoluzione scientifica moderna, senza lasciarsi ingannare dal fatto che i termini e i concetti propri delle due diverse tradizioni scientifiche avessero addirittura gli stessi nomi, ma essendo diversamente intesi. In particolare, il concetto di moto locale considerato dalla tradizione moderna il concetto-base della meccanica, era in quella aristotelica invece solo un caso particolare, come cambiamento di posizione, del movimento in generale, a sua volta riconducibile alla categoria più generale di mutamento. Questa a sua volta comprendeva anche i casi di trasformazione dal nulla a qualcosa e da qualche cosa al nulla, che non possono considerarsi semplici movimenti. Movimenti sono comunque non solo i semplici cambiamenti di posizione ma anche cambiamenti qualitativi di ogni tipo, di cui peraltro lo stesso cambiamento di posizione sarebbe esso stesso solo un esempio particolare. Nella fisica newtoniana, al contrario, gli stessi cambiamenti qualitativi sarebbero conseguenze di moti locali o cambiamenti di posizione delle particelle materiali, le cui qualità sarebbero a loro volta riducibili ai loro movimenti locali, fino ad arrivare a spiegare completamente le qualità dei corpi che esse compongono con il loro moto locale. Invece, nella fisica aristotelica la materia è trascurabile, è solo sostrato passivo delle qualità dei corpi di cui essa si impregna, così da conferire ai corpi stessi un'identità. Il cambiamento ha quindi luogo appunto modificando o sostituendo le qualità dei corpi, non la materia. Quelli descritti sono i caratteri principali della fisica di Aristotele, che solo considerati insieme danno significato a quella fisica a patto che si rinunci a dare ad essi il significato che hanno nella fisica galileiana e newtoniana. In particolare, va inteso diversamente, come abbiamo visto, il moto locale come vero e proprio cambiamento della

qualità o proprietà costituita dalla posizione dei corpi, dunque il moto dei corpi è cambiamento qualitativo o di stato in ogni caso per Aristotele e non è esso stesso uno stato come per Newton (stato di moto), distinto da ogni altro tipo di cambiamento, come, ad esempio, la crescita delle piante o lo sviluppo dalla salute alla malattia. Il movimento come cambiamento contrassegna dunque la fisica aristotelica nel senso di fisica qualitativa contraria a quella quantitativa, galileiana e newtoniana. Per tale motivo il moto locale partecipa delle proprietà attribuite al cambiamento in generale da Aristotele, quindi anche del carattere asimmetrico dei cambiamenti qualitativi. Pertanto, il movimento come cambiamento ha per lui sempre una direzione privilegiata, corrispondente al perseguimento di un fine, specie nel mondo organico e quando esso è spontaneo o naturale, non forzato o violento. Ebbene, come già detto, Aristotele attribuisce tale carattere qualitativo anche al moto locale, al cambiamento di posizione. E' questo il motivo per cui i corpi pesanti come le pietre cadono verso il basso e quelli lievi come il fuoco si dirigono verso l'alto, raggiungendo, con un movimento che è un cambiamento di stato, il loro luogo naturale, in cui trovano riposo una volta raggiunto tale luogo, realizzando le loro proprietà naturali. In ogni caso si tratta di un sistema piuttosto coerente in cui termini e concetti, che sono eventualmente ancora in uso, sono tra loro interconnessi diversamente a fornire una spiegazione coerente ed efficace dei loro significati. Importante per Kuhn è che termini e concetti siano inquadrati nel loro contesto, anche molto diverso dal nostro, per ricavarne pieno significato, cosicché tesi e affermazioni che utilizzino quei termini e concetti, ancora in uso ma con significati diversi, riacquistino nel loro contesto originario il loro significato. In particolare, la dottrina aristotelica del vuoto acquista piena chiarezza solo se si combinano tra loro diverse tesi non isolate, ma appunto interconnesse tra loro sostenendosi reciprocamente solo se si evita di considerarle singolarmente. Aristotele sostiene dunque ad esempio che il vuoto è impossibile e il suo concetto è incoerente facendo appello al sistema di termini e concetti che vi sono connessi, facendo riferimento alle nozioni aristoteliche di movimento e di mutamento. Abbiamo visto come anche la posizione sia per Aristotele una qualità che, come tale, non può esistere separata dalla materia che è da essa impregnata, per cui, dovunque ci sia una posizione, cioè dove possa esserci un corpo vi è materia. La materia appare dunque presente ovunque nello spazio, e così il vuoto, cioè lo spazio privo di materia non può esistere, essendo la sua stessa nozione contraddittoria. Si potrebbe obiettare che Aristotele non fosse obbligato a concepire la posizione come qualità materiale, con tutte le conseguenze derivabili, ma appunto la coerenza di tale concezione con

quella del movimento come cambiamento di stato e non come semplice stato e altro ancora, dato il riferimento al complesso della fisica aristotelica, porta a convincerci del carattere qualitativo anche della posizione e della sua presenza in tutto lo spazio, inteso come coestensivo alla materia e pertanto finito, all'interno della sfera più esterna, al tempo stesso confine dello spazio e della materia. Espandendola all'infinito, ci sarebbero difficoltà dovute al fatto che su di essa ruotano le stelle intorno alla terra in un tempo finito di 24 ore circa. Inoltre, in un universo infinito non ci sarebbe centro: ogni punto può essere centro come qualsiasi altro punto e dunque non è identificabile una posizione naturale o luogo naturale in cui i gravi possano realizzare con certezza la loro natura, essi non potrebbero cioè essere consapevoli del proprio «*ubi consistam*». È la materia finita, posta tra l'attuale posizione del grave e il suo luogo naturale che può consentire allo stesso grave di realizzare le sue qualità, conferendo una chiara struttura allo spazio. Sia il moto locale quindi, sia l'astronomia geocentrica richiedono coerentemente l'esclusione del vuoto. Dunque la fisica aristotelica appare come un tutto unito e completo i cui pezzi si incastrano tra loro coerentemente e che richiese di essere spezzata e riplasmata per poter fondare la meccanica di Newton. Questa presenta anzitutto un concetto diverso di luogo, inteso da Aristotele come superficie interna del corpo contenente o circostante altro corpo, mentre per Newton, non essendo più la posizione una qualità dei corpi, esso è definito dal puro spazio distinto dalla materia eventualmente occupato da corpi, ammettendosi così finalmente la possibilità dell'esistenza del vuoto.

3. Mutamenti normali e rivoluzionari nella scienza moderna

Analoghi mutamenti di significato di termini e concetti chiave nel passaggio da un paradigma all'altro, mutamenti peraltro che perfino persone esperte e perfino gli storici della scienza potrebbero non notare, sono inoltre evidenziati da Kuhn in relazione alle trasformazioni epocali di teorie e concezioni scientifiche da un lato, e di basi osservative e strumenti tecnici nel senso visto, dall'altro. Così la cosiddetta pila di Volta (cfr. Volta, 1800) mutò profondamente di significato dopo Volta e la sua concezione originaria della pila, pur conservando le stesse espressioni linguistiche. In particolare, la batteria di pile di dischetti metallici di Volta non muta denominazione ma acquista un diverso significato dopo Volta alla luce di una diversa concezione del suo funzionamento e dell'elettricità stessa dopo Volta. Per lui la batteria e la corrente sarebbero attivate da quel contatto

bimetallico rispetto a cui la carta assorbente acidulata avrebbe solo la funzione di addizionare la tensione elettrica della coppia precedente a quella della successiva. Non avrebbe il ruolo che essa assumerà, con l'affermarsi della teoria chimica della pila, di generatore di corrente, attribuito invece da Volta al contatto bimetallico che fungerebbe da condensatore o bottiglia di Leida che, a confronto con la stessa in elettrostatica, si caricherebbe da sola, per semplice contatto. La successiva teoria chimica della pila richiederà invece dunque, una volta abbandonata la concezione voltiana, perché si generasse elettricità e questa si trasmettesse da una cella alla successiva, che il liquido interposto tra un metallo e l'altro agisse come causa della tensione elettrica nella batteria senza cui non si produrrebbe neppure la tensione tra i due metalli. Ebbene, pur usando gli stessi termini, le due teorie o paradigmi ricostruivano in modo diverso se non contraddittorio il funzionamento della pila o batteria, usando Volta modelli elettrostatici, e gli "elettrici" successivi come de la Rive (cfr. de la Rive, 1856), modelli idrostatici, per definire concetti chiave come quello di resistenza, con l'effetto che solo i secondi riuscivano a essere in accordo con la nuova legge di Ohm della resistenza elettrica e la sua capacità previsionale. Si trattò comunque di un mutamento non cumulativo che, contraddicendo la teoria precedente incontrò, come nuovo paradigma, una forte resistenza: si trattava infatti di una legge nuova che urtava le concezioni e conoscenze acquisite e fu quindi, almeno inizialmente, respinta o ignorata.

Anche l'esempio successivo (cfr. Kuhn, 1987), relativo alla nascita della teoria dei quanti, mostra peraltro modalità e difficoltà simili. Si tratta della scoperta da parte di Max Planck della legge del corpo nero alle origini della teoria dei quanti. Kuhn sottolinea come la soluzione proposta da Planck nel 1900 al problema del corpo nero fosse solo uno sviluppo del metodo statistico classico adoperato da Ludwig Boltzmann in teoria cinetica. Planck però, suo malgrado, fu costretto a modificare almeno in parte l'approccio di Boltzmann nel 1906, riuscendo così a risolvere il problema, ma a costo di dover reinterpretare gran parte della fisica. Boltzmann aveva dunque anzitutto concepito il comportamento di un gas come un insieme di molecole in moto rapido dentro un contenitore, in collisione tra loro e con le pareti del recipiente. Nota la loro velocità media, Boltzmann si chiese quale fosse la percentuale delle molecole che si muovevano ad una data velocità, anche diversa dalla media. Se altri si erano posti il problema, Boltzmann scelse una strada nuova che ispirò poi anche Planck facendo appello alla teoria della probabilità. Boltzmann considerò l'energia cinetica totale delle molecole e poi suddivise mentalmente l'energia in celle elementari di grandezza ϵ , tra cui distribuì a caso le

molecole, escludendo le distribuzioni la cui energia totale fosse diversa da E . Per cui, se la prima molecola era assegnata all'ultima cella (di energia E) allora tutte le altre molecole erano assegnate alla prima cella (a energia 0). Ma ciò è improbabile, la maggior parte delle molecole avrà un'energia diversa da 0 e da E , variabile secondo il calcolo delle probabilità applicato da Boltzmann in modo ben più rigoroso che in passato. Ebbene, Planck applicò lo stesso approccio ad un problema apparentemente diverso, quello della radiazione di corpo nero, per spiegare come muta il colore dei corpi con la temperatura. In una cavità piena di radiazione Planck immagina molti "risonatori", ciascuno sensibile alla radiazione di una certa frequenza e non ad altre, per chiedersi quindi come l'energia captata da ogni risonatore dipenda dalla frequenza e quale sia la distribuzione energetica delle frequenze rispetto ai risonatori. A questo punto Planck applicò lo stesso approccio probabilistico applicato da Boltzmann allo studio della distribuzione delle molecole nelle varie celle energetiche, per scoprire così la distribuzione dei risonatori nelle diverse celle e ottenendo così una risposta conforme ai risultati sperimentali, e tuttavia con una differenza importante rispetto allo studio di Boltzmann delle distribuzioni energetiche delle molecole dei gas. Mentre in questo caso, sia pure con limiti superiore e inferiore, per cui le celle potevano avere date dimensioni massime e minime, ma entro quei limiti potevano avere un'infinità di valori possibili, nel caso di Planck le celle elementari non potevano avere che un valore ($\epsilon=h\nu$), e Planck si chiese perché. Ma, a parte ciò, in Planck, come in Boltzmann, la divisione in celle elementari era una divisione mentale di carattere statistico, per cui molecole e risonatori potevano trovarsi ovunque, lungo la linea dell'energia, obbedendo a tutte le leggi classiche. Nel 1906 Planck modificò quindi la sua trattazione statistica nel senso che un risonatore poteva avere un valore energetico solo pari a 0 o ad un multiplo intero della cella elementare, e se cambiava energia lo faceva solo in modo discontinuo per salti pari a ϵ o ad un multiplo intero di ϵ . Dal punto di vista matematico non mutava nulla e si vedeva l'argomentazione di Planck come se fosse già quella moderna. Ma dal punto di vista fisico, nonostante siano denominati con le stesse espressioni, i termini significano altro. Così, ad esempio, l'elemento ϵ non è più una mera divisione mentale dell'energia totale, per diventare atomo separato e separabile di energia fisica che ogni risonatore può possedere in quantità intere ($=0, 1, 2, 3, \text{ e così via.}$). Il caso richiama quello della pila di Volta, in cui la batteria muta natura e struttura, viene letteralmente rovesciata ma conserva la stessa espressione linguistica, a significare però altro. Lo stesso oggetto, il risonatore, perfettamente classico, diventa così qualcosa di diverso, incompatibile con le

concezioni della fisica classica, cioè oggetto non classico, caratterizzato dal possedere quantità atomiche o discrete di energia. Così peraltro si presentarono allora altri oggetti come la luce, inizialmente concepiti come oggetti classici continui per assumere invece proprietà quantistiche. La differenza tra la rivoluzione dei quanti e le precedenti rivoluzioni consiste, secondo Kuhn, nel fatto che in essa mutano in realtà le parole stesse, che mettono così in evidenza la nuova situazione fisica. Di fatto Planck, di fronte all'evidenza della discontinuità, adottò anche una nuova terminologia, pur essendo stato fino ad allora restio a farlo. Così, mentre prima si era riferito alla cella ϵ come ad un elemento di energia, ora comincia a parlare di quanti, intesi come grandezze separabili simili agli atomi. Prima, come prodotto ipotetico di una suddivisione mentale non era ancora un quanto. Un altro cambiamento anche terminologico e non solo concettuale è consistito nella sostituzione dell'espressione "oscillatori" a quella di "risonatori", essendo il primo termine neutro, indipendente da qualsiasi analogia classica, ad esempio acustica, al contrario di "risonatore", che allude piuttosto a un vibratore che reagisce in modo continuo e graduale a una stimolazione. Ebbene, quando nel 1909 Planck ammise definitivamente, suo malgrado, che l'energia cambia in modo discontinuo, allora ritenne che quel termine non fosse più appropriato. C'è da chiedersi che cosa, con tutto ciò, caratterizzi maggiormente la rivoluzione scientifica a confronto con la scienza normale. Anzitutto la caratterizza l'olismo, la globalità e l'intreccio tra le diverse generalizzazioni che contrassegnano un campo, facendo sì che un cambiamento rivoluzionario non avvenga un passo alla volta, gradualmente, pezzo a pezzo, come avvengono invece i cambiamenti normali, ad esempio la scoperta della legge di Boyle citata all'inizio. In questi casi si modificano singole generalizzazioni, mentre altre restano immutate. Se si adottasse una simile strategia nel cambiamento rivoluzionario, questo risulterebbe incoerente, e dunque occorre che il mutamento riguardi tutte le generalizzazioni correlate, superando l'insieme iniziale delle generalizzazioni nell'insieme finale, frutto della rivoluzione. Un insieme intermedio non potrebbe offrire una descrizione coerente della natura. Così nella rivoluzione quantistica, che pure ha anche un carattere piuttosto cumulativo nella sua prima fase, non bastò cambiare la definizione dell'elemento di energia ϵ , ma si dovette cambiare anche la nozione di risonatore per avere una rappresentazione coerente che la nozione preesistente di risonatore non avrebbe potuto offrire senza cambiare le leggi della meccanica e dell'elettromagnetismo. Così non bastò, per avere successo, modificare solo l'ordine degli elementi in una cella della batteria voltaica, senza cambiare insieme anche il significato del circuito esterno e

della resistenza elettrica. Infine, nel caso della fisica di Aristotele non basta assumere solo la possibilità del vuoto o lo status del movimento appunto come stato e non come cambiamento di stato. Altra caratteristica fondamentale dei casi di cambiamento rivoluzionario esaminati, oltre all'olismo, è quella relativa al mutamento del modo in cui parole e locuzioni si correlano alla natura, o viceversa del modo in cui si determinano i referenti, gli oggetti dell'esperienza cui la teoria si riferisce. In realtà ogni nozione dei referenti di un termine può essere modificata e arricchita per connettere quel termine alla natura, scoprendo nuove proprietà della natura in modo appunto da collegare quel termine alla natura. Le nuove proprietà scoperte permettono dunque di identificare i referenti dei termini in modo più analitico. Ora scoperte del genere non sono di solito rivoluzionarie, ma rientrano nella scienza normale. Il mutamento rivoluzionario non riguarda infatti la determinazione analitica dei referenti, ma anche un altro tipo di mutamento per cui non si modificano soltanto i criteri di riferimento dei termini alla natura, ma anche gli oggetti e le situazioni cui si riferiscono i termini, puntando cioè sugli aspetti oggettivi, pur attraverso quelli prettamente linguistici. Mentre quindi per Aristotele il termine movimento si incarnava in situazioni oggettive come il passaggio dalla ghianda alla quercia o dalla malattia alla salute, non così in Newton. Avvenne così la cessazione di una famiglia naturale di situazioni, i cui membri erano ricondotti a insiemi diversi, mentre ciascuno di essi continuava a chiamarsi con il vecchio nome. Così le celle della pila di Volta cessavano di essere referenti di determinati termini. Anche se i successori di Volta si occupavano ancora degli elementi della pila come i metalli, i liquidi e il fluido elettrico, questi erano oggetti diversi e diversamente correlati. Dunque, la rivoluzione scientifica si caratterizza per il mutamento interconnesso di diverse categorie tassonomiche (classificazioni in dispensabili per le generalizzazioni scientifiche, per poter distribuire oggetti e situazioni). Si tratta comunque di una modificazione di carattere olistico, radicato nella natura del linguaggio, dato che i criteri di caratterizzazione sono gli stessi che connettono al mondo i nomi delle categorie. Il linguaggio si riferisce da un lato al mondo e dall'altro al suo interno, dove il mondo si riflette nella percezione del simile e del diverso, nella natura referenziale del linguaggio. Questa caratteristica sembrava per Kuhn inizialmente la più ostica, per poi diventare la più ovvia e rilevante. Essa comporta mutamenti di modello, analogia o metafora, distinguendo ciò che è simile o è diverso in modo variabile. Un esempio è ricostruito da U. Eco (cfr. Eco, 1997) nel saggio *Kant e l'ornitorinco*, laddove una classificazione biologica tradizionale, identificata in termini di categorie kantiane che stabiliscono quali

oggetti possano essere determinati in un modo o nell'altro, cessa di corrispondere a oggetti che le contraddicano in quanto necessitano di definizioni diverse della percezione del simile e del diverso. Com'è noto,, l'ornitorinco è uno strano mammifero, con ghiandole mammarie come un mammifero, becco e artigli come un uccello, scaglie come un sauro o perfino come un pesce, e tale inoltre da riprodursi come gli animali ovovivipari, nonostante le sue proprietà di mammifero. Si tratta comunque (cfr. Kuhn, 1987) di variabili analogie e differenze di oggetti e situazioni che sono alla base delle rivoluzioni scientifiche. Ad esempio, rispetto ad Aristotele, si trattava di mutare il rapporto di somiglianza, in termini di metafore e analogie tra oggetti e situazioni, da un lato, eventualmente, dall'altro, di dissomiglianze, per poter dare luogo alla rivoluzione scientifica moderna. Si trattava in sostanza di modificare la categoria tassonomica del movimento che designava una famiglia naturale di esempi, da sostituire a quel punto con una diversa categoria tassonomica. A seconda dei casi, la somiglianza fondante la tassonomia può essere interna alla tassonomia stessa, come appunto in Aristotele quella tra un mutamento in generale e il semplice movimento locale come caso particolare, che la nuova fisica newtoniana disaccoppiò stabilendo una diversa classificazione e categorizzazione dei fenomeni, oppure esterna, non di piena identificazione, ma piuttosto analogica, come nel caso dei risonatori di Planck visti come molecole di Boltzmann o le celle della pila di Volta viste come bottiglie di Leida. Occorse anche qui, per il cambiamento rivoluzionario, abbandonare i vecchi modelli di somiglianza per sostituirli con altri modelli. Si operano sovrapposizioni tra oggetti secondo giudizi di somiglianza o dissomiglianza fino a considerare determinati oggetto o situazioni come esempi della stessa cosa, o a separarli da altri con cui potrebbero altrimenti essere confusi. E' un processo di associazione e dissociazione che viene svolto fino a compiere una vera e propria identificazione o, altrimenti, una vera e propria separazione. Sono così identificati tra loro metaforicamente i vari tipi di movimento in Aristotele come cambiamenti di stato tra punti estremi nel tempo, attraverso esemplificazioni che evidenziano tassonomicamente le somiglianze, laddove la fisica newtoniana evidenziò addirittura, al contrario, una somiglianza tra il moto uniforme e la quiete come stato stabile e non già come cambiamento di stato, operando così una vera e propria rivoluzione. Dunque, le giustapposizioni metaforiche mutano nel corso di rivoluzioni, portando così a nuove giustapposizioni e a mutamenti nel linguaggio scientifico, che è un affinamento e uno sviluppo dello stesso linguaggio non scientifico, che pure è basato su analogie e metafore, per produrre una sempre più ampia conoscenza della natura. In verità al tempo stesso così si

acquisiscono conoscenze sia del linguaggio che della natura. Attraverso un processo di confronto di somiglianze e dissomiglianze, termini chiave come “movimento”, “cella”, “elemento di energia” si mostrano oggetto di un processo di approfondimento che riguarda sia il linguaggio che il mondo. Al tempo stesso, lo studioso impara il significato dei termini e i loro tratti pertinenti rispetto alla natura evitando di cadere in contraddizione, e però così, anche quali categorie di cose ci sono nel mondo, i loro caratteri salienti, cosa è loro permesso o escluso. I due tipi di conoscenza, delle parole e della natura in realtà non sono affatto due generi distinti, ma solo due facce del rapporto tra linguaggio e realtà. Il linguaggio, nel corso delle rivoluzioni scientifiche, evidenzia questa sua doppia natura, indicando e modificando al tempo stesso la conoscenza della natura ad esso intrinseca e perciò preliminare a tutto ciò che si voglia definire descrizione o generalizzazione, scientifica o comune. Nuovi concetti e nuove conoscenze reclamano dunque formulazioni linguistiche nuove espresse da un linguaggio modificato per descrivere la natura. Il vuoto o il moto rettilineo infinito per essere acquisiti comportavano resoconti descrittivi formulati modificando il linguaggio con cui si descrive la natura e che resiste talvolta a cambiamenti del genere, tanto da richiedere ai rivoluzionari di cambiare e addirittura distorcere il linguaggio. Cosa che fece ad esempio Planck, costretto a ciò, pur riluttante, per esprimere nuove teorie e conoscenze.

Riferimenti bibliografici

- Aristotele, *Fisica*, voll. I-V, ed. ingl. di P. H. Wickstead e F. M. Cornford, Loeb, Oxford. Classical Library.
- Brown, T. M., 1969, “The Electric Current in Early Nineteenth Century Physics”, *Historical Studies in the Physical Sciences*, 1, pp. 61-103.
- Eco, U., 1997, *Kant e l'ornitorinco*, Milano, Bompiani.
- Hempel, C. G., 1965, *Aspects of Scientific Explanation*, New York, The Free Press.
- Koyré, A., 1970, *Dal mondo chiuso all'universo infinito*, Feltrinelli, Milano.
- Kuhn, T. S., 1957, *The Copernican Revolution. Planetary Astronomy in the Development of Western Thought*, Cambridge Mass, Harvard University Press (trad. it. *La rivoluzione copernicana. L'astronomia*

- planetaria nello sviluppo del pensiero occidentale*, Torino, Einaudi, 1972).
- , 1962, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, University of Chicago Press (trad. it. *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Torino, Einaudi, 1969).
- , 1978, *Black Body Theory and the Quantum Discontinuity. 1894-1912*, Oxford, Oxford University Press (ed. it., *La teoria del corpo nero e la discontinuità quantica*, Bologna, il Mulino 1981).
- , 1987, “What are scientific revolutions?”, in L. Krueger, L. J. Daston e M. Heidelberger (a cura di), *The Probabilistic Revolution*, Cambridge, Mass., MIT Press (trad. it. *Le rivoluzioni scientifiche*, a cura di P. Dessì, Bologna, il Mulino, 2008).
- Medawar, P. B., 1970, *Induzione e intuizione nel pensiero scientifico*, Armando, Roma.
- de la Rive, A., 1856, *Traité d’électricité théorique et appliqué*, Paris, J. B. Bailière, vol II.
- Sneed, W., 1971, *The Logical Structure of Mathematical Physics*, Dordrecht, Reidel.
- Stegmueller, W., 1976, *The structure and Dynamics of Theories*, New York, Springer.
- Volta, A., 1800, *Sull’elettricità eccitata dal semplice contatto di sostanze conduttrici di diversa natura*, in A. Volta, *Edizione nazionale dell’epistolario*, a cura di F. Bevilacqua, G. Bonera e L. Falomo, Milano, Hoepli, 2002 (edizione digitale).

Oltre la fisica *normale*.
**Realtà della funzione d'onda e delle proprietà fisiche prevedibili
nell'interpretazione di Selleri della meccanica quantistica**

Gino Tarozzi
Università di Urbino
gino.tarozzi@uniurb.it

1. Realismo e antirealismo in meccanica quantistica

La critica di Franco Selleri (d'ora in poi Franco) all'interpretazione ortodossa della meccanica quantistica si è costantemente concentrata sulla sua natura antirealistica, configurandosi come il presupposto filosofico di un programma di ricerca sui fondamenti della fisica che ha evidenziato l'esistenza di ulteriori paradossi e contraddizioni della formulazione *standard* rispetto a quelli già conosciuti, e cercato di individuare nuove vie verso interpretazioni alternative.

Franco ha per primo messo in risalto con estrema chiarezza attraverso argomentazioni rigorose, sia sul piano formale sia su quello fisico, come l'interpretazione ortodossa della scuola di Copenaghen (o meglio di Copenaghen e Gottinga, l'università da cui come egli ricorda più volte nelle sue analisi (Selleri 1990) provenivano o si erano formati i principali teorici tedeschi della seconda e terza generazione come Born, Heisenberg e Jordan), fosse in aperto conflitto con una prospettiva filosofica di tipo realistico da due diversi punti di vista: in primo luogo per quanto riguardava il concetto teorico fondamentale di funzione d'onda, svuotato di significato fisico nell'interpretazione di Born, in secondo luogo rispetto al problema più generale del cosiddetto realismo locale.

Gino Tarozzi, "Oltre la fisica normale. Realtà della funzione d'onda e delle proprietà fisiche prevedibili nell'interpretazione di Selleri della meccanica quantistica", in Isabella Tassani (a cura di), *Oltre la fisica normale. Interpretazioni alternative e teorie non standard nella fisica moderna*, pp. 223-250.

© 2013 Isonomia, Rivista online di Filosofia – Epistemologica – ISSN 2037-4348
Università degli Studi di Urbino Carlo Bo
<http://isonomia.uniurb.it/epistemologica>

Quest'ultimo corrispondeva secondo Franco alla simultanea assunzione di validità del criterio di realtà fisica di EPR e del principio di località einsteiniano, che appariva incompatibile sia dal punto di vista logico che empirico con la descrizione quantistica attraverso vettori di stato non fattorizzabili, che venivano in quegli anni definiti come stati di EPR o di seconda specie, per distinguerli dagli ordinari stati fattorizzabili di prima specie, mentre ora in letteratura è prevalsa la denominazione di stati *entangled*, o *entanglement*.

In questi ultimi anni, nonostante le violazioni del teorema di Bell emerse a livello sperimentale e la mancata rivelazione delle proprietà fisiche, la cui esistenza era stata congetturata da alcune interpretazioni realistiche, della funzione d'onda come quella proposta di Franco, che sarà analizzata e discussa nei § 3 e § 4, l'esigenza di un'interpretazione realistica della meccanica quantistica, è rimasta ancora molto viva. Questo è accaduto anche a seguito del progressivo recupero di una prospettiva realistica nell'ambito della filosofia tradizionale, sia pure all'interno di concezioni che evitano, come nel caso del cosiddetto "nuovo realismo", un confronto con le teorie scientifiche, ripresentandosi come nuove metafisiche.

Come Franco ha messo in luce con grande chiarezza (Selleri 1990), il dibattito tra interpretazione realistica e interpretazione ortodossa accompagna la teoria sin dagli anni della sua stessa fondazione, e trova le sue radici più profonde da un lato nella controversia sulla natura della funzione d'onda tra de Broglie e Schrödinger, che la interpretavano come un processo fisico reale che si propagava nello spazio e nel tempo, e Born, Heisenberg e Pauli che la consideravano invece come uno strumento matematico per calcolare probabilità di rivelazione di particelle, e dall'altro nel dibattito tra Einstein e Bohr sul problema della completezza del formalismo quantistico, che non riusciva a descrivere come contemporaneamente reali tutte le proprietà che era in grado di prevedere. In tale quadro, il principio di complementarità di Bohr si configurò come una sorta di compromesso nel senso di un'interpretazione della teoria quantistica che se è vero che cercava di dare una risposta basata su una prospettiva di rinuncia epistemologica meno forte rispetto alle posizioni di Born, Heisenberg e Pauli, al problema della natura della funzione d'onda, riconoscendo, con de Broglie e Einstein (Schrödinger, come è noto, negava realtà fisica alle particelle a favore di un'ontologia puramente ondulatoria), la natura duale e tuttavia complementare nel senso di reciprocamente esclusiva, di particelle e onde, è altrettanto vero che affermava la completezza del formalismo quantistico, rigettando l'identificazione della prevedibilità, caratteristica del principio di realtà fisica di EPR, con una

condizione sufficiente di realtà, a favore di una posizione radicalmente fenomenistica per la quale si può definire reale soltanto ciò che viene osservato e registrato da strumenti di misurazione, a partire da una concezione relazionale dello stato quantico, che nega la possibilità di parlare di proprietà fisiche indipendenti dalla situazione sperimentale complessiva e in particolare dall'apparato di misura, che altro non è tuttavia che un sistema macroscopico controllato da un osservatore.

Per queste ragioni Franco, pur nella consapevolezza di una differenziazione della posizione di Bohr rispetto a quella degli altri teorici di Gottinga, e primo tra questi il suo allievo Heisenberg, la riteneva ugualmente inaccettabile, e vedremo come nel corso delle sue ricerche sui fondamenti della meccanica quantistica abbia continuamente ritenuto che un'interpretazione realistica costituisca un'esigenza primaria, come già aveva sottolineato il nostro comune maestro Antonio Pignedoli:

Il berkeleyano *esse est percipi*, da cui tanto Albert Einstein quanto Max Planck rifuggono, farebbe sorgere effettivamente, a ben pensarci, tante fisiche quanti sono i fisici; tante scienze di un certo tipo quanti sono gli scienziati, senza possibilità di formulazione di leggi universali.¹

Franco ha sempre indirizzato le sue ricerche nella duplice direzione di un'interpretazione della microfisica in cui venisse salvaguardato da una parte il realismo locale di EPR, ovvero la tesi della realtà delle proprietà (prevedibili), e dall'altra la tesi più debole, caratteristica del realismo scientifico, che richiede l'attribuzione di un qualche grado di realtà fisica alla funzione d'onda, il concetto teorico fondamentale del formalismo.

Come cercherò di mostrare nella parte finale di questo contributo, alcuni recenti risultati sembrano indicare la possibilità di aderire a una prospettiva completamente nuova rispetto a quella tradizionale della contrapposizione tra realismo e antirealismo in meccanica quantistica. È stato recentemente proposto un esperimento, ispirato alle idee di Franco, che permetterebbe di discriminare non, come è stato fatto fino ad ora, tra interpretazione realistica e interpretazione ortodossa antirealistica, ma tra l'una o l'altra delle due precedenti interpretazioni realistiche della meccanica quantistica. In questo modo, in contrasto con quanto si è comunemente ritenuto finora realismo (empirico) delle proprietà e realismo (scientifico) dei concetti si configurerebbero come due prospettive incompatibili. Tuttavia (e questo è quello che più conta!), essendo queste due possibilità le uniche ammesse dai possibili esiti dell'esperimento, ne

¹ Pignedoli (1979).

seguirebbe un argomento decisivo a favore della necessità, sostenuta da Franco nel corso di tutta la sua straordinaria e infaticabile attività scientifica, di una reinterpretazione in senso realistico della meccanica quantistica, o in accordo con il realismo locale di EPR o, alternativamente, o con l'attribuzione di realtà fisica alla funzione d'onda.

2. Realismo locale vs. *entanglement*: significato e dominio di validità del teorema di Bell

Alle ricerche sul problema dell'incompatibilità sia logica che empirica tra meccanica quantistica e realismo locale, e al duplice problema delle ipotesi in gioco nella dimostrazione del teorema di Bell e del suo dominio di validità, Franco ha dato un contributo che può essere difficilmente sopravvalutato nella fisica del '900. Nella più autorevole ricostruzione del dibattito sui fondamenti e le interpretazioni della teoria quantistica dalle origini fino agli inizi degli anni '70 (Jammer 1974), l'autore metteva in risalto l'importanza di questo contributo, mostrando come, oltre ad avere dimostrato la forma più forte della diseguaglianza di Bell (Selleri 1972), Franco avesse individuato le radici logiche del problema nel conflitto tra stati *entangled* e stati non *entangled*, nonché l'esistenza di altre osservabili diverse da quella di Bell in grado di discriminare rispetto alle descrizioni che utilizzavano l'uno o l'altro di tali stati. Il grande storico della scienza si soffermò nuovamente sul ruolo dei contributi allo studio del problema dato da Franco e dai suoi collaboratori, nella sua relazione di apertura al simposio in memoria di John Bell del 1991:

Altri sviluppi attuali in materia di diseguaglianze di Bell, che promettono di chiarire ulteriormente il loro significato, includono alcune elaborazioni d'idee che erano state indicate già nel 1980 da A. Garuccio e F. Selleri, e nel 1981 da F. Selleri e G. Tarozzi, nel loro tentativo di derivare sistematicamente tutte le diseguaglianze del tipo di Bell, ma solo recentemente esplorate dal punto di vista delle loro conseguenze sperimentali.²

Il fatto che la meccanica quantistica faccia ricorso a due diversi formalismi nella descrizione di coppie di particelle correlate, corrispondenti rispettivamente agli stati *entangled* di seconda specie e agli stati non *entangled* di prima specie, fu evidenziato da Furry fin dal 1936, nella sua discussione del paradosso di EPR. Furono tuttavia soltanto Bohm e Aharonov che proposero l'ipotesi, nota in letteratura come ipotesi di Furry

² Jammer (1992).

(o di Bohm-Aharonov), che gli stati *entangled* si decomponessero spontaneamente in miscele di stati fattorizzabili di prima specie, attraverso qualche meccanismo fisico non conosciuto anche in assenza di qualsiasi processo di misurazione, come era invece richiesto dalla meccanica quantistica *standard*. Una simile possibilità di riformulazione del formalismo quantistico senza questa entità matematica scomoda, responsabile delle più gravi contraddizioni della teoria, venne condivisa da diversi autori, tra i quali Jauch che affermò

l'essenza della nuova nozione di stato è contenuta nell'affermazione: le miscele di seconda specie non esistono.³

Il grande interesse nei confronti di quest'ultima prospettiva era generato principalmente dal fatto che il paradosso di EPR poteva essere formulato da un punto di vista formale come una contraddizione tra stati *entangled* da una parte e stati fattorizzabili non *entangled* dall'altra, mentre il teorema di Bell appariva derivabile da una descrizione senza *entanglement* e sempre valido all'interno di questa "reduced quantum mechanics" (Selleri – Tarozzi 1981a).

Le ricerche si concentrarono ben presto sul tentativo di derivare conseguenze osservabili dall'ipotesi di Furry. Un ruolo importante fu giocato in quest'ambito dall'introduzione del concetto di *osservabili sensibili* (Capasso, Fortunato & Selleri 1973), che sono osservabili i cui valori di aspettazione su uno stato *entangled* sono osservabilmente diversi dai valori di aspettazione su una qualsiasi miscela di stati non *entangled*. Oltre ad introdurre questo nuovo concetto, Franco dimostrò (Fortunato, Garuccio & Selleri 1977) che se $|\eta\rangle$ è un vettore di stato *entangled* per una coppia di particelle correlate S_1, S_2 , l'operatore di proiezione $\Gamma_\eta = |\eta\rangle\langle\eta|$ è un'osservabile sensibile per il sistema $S_1 + S_2$. Essi applicarono quest'ultimo risultato a un sistema di due fotoni con momento angolare totale uguale a zero, descritto dal vettore di stato

$$(1) \quad |\eta_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|x\rangle|y'\rangle - |y\rangle|x'\rangle)$$

ove $|x\rangle, |y\rangle$ sono vettori di stato per il primo fotone con polarizzazione lineare lungo gli assi x e y, rispettivamente e $|x'\rangle, |y'\rangle$ descrivono analogamente il secondo fotone, individuando una nuova diseguaglianza,

³ Jauch (1971).

che non avrebbe mai dovuto essere trovata violata sotto l'assunzione della correttezza dell'ipotesi di Furry. Si tratta della importante disuguaglianza

$$(2) \quad K = -P\left(\hat{i}, \hat{i}\right) - P\left(\hat{j}, \hat{j}\right) - P\left(\hat{k}, \hat{k}\right) \leq 1$$

ove $P\left(\hat{i}, \hat{i}\right), P\left(\hat{j}, \hat{j}\right), P\left(\hat{k}, \hat{k}\right)$ sono funzioni di correlazione come nel caso di Bell, e $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ sono tre vettori unitari lungo i tre assi ortogonali x, y, z .

Lo stato *entangled* $|\eta\rangle$ dà per ogni possibile direzione \hat{a} una perfetta anticorrelazione

$$(3) \quad P\left(\hat{a}, \hat{a}\right) = -1$$

il che mette in luce l'esistenza di conflitto ancor più grave e insanabile sul piano empirico di quello emerso con il teorema di Bell, tra meccanica quantistica standard che prevede $K = 3$, e meccanica quantistica senza *entanglement*, che prevede $K \leq 1$.

La debolezza dell'ipotesi di Furry appariva ancor più evidente a Franco, non solo per la ragione precedente, ma anche per l'incapacità un formalismo quantistico "ridotto", basato sui soli stati fattorizzabili di prima specie a descrivere situazioni fisiche che erano invece perfettamente descrivibili dalla fisica classica, sottolineando la possibilità di costruire modelli classici di sistemi correlati in cui la (3) vale per ogni possibile \hat{a} .

Uno di tali modelli, proposto con Garuccio e Scalera (Garuccio, Scalera & Selleri 1977), consisteva di un insieme statistico di coppie di sfere che si propagavano in direzioni opposte a velocità costante. Tutte le sfere erano dotate anche di un movimento di rotazione che avveniva in due direzioni opposte, che nell'insieme statistico possono avere una distribuzione isotropica. Gli autori consideravano poi due apparati sperimentali A_1, A_2 , posti su ciascuno dei due percorsi delle sfere che si propagano in direzioni opposte, in modo tale da non perturbare il loro moto, ma di registrare soltanto il segno della proiezione della rotazione in una certa direzione \hat{a} . A causa delle opposte rotazioni se A_1 registra +1, A_2 registrerà -1, per cui la

funzione di correlazione $P\left(\hat{a}, \hat{a}\right)$, media dei prodotti dei risultati correlati

ottenuti da A_1 e A_2 è necessariamente -1 e questo rimane valido per ogni possibile scelta di \hat{a} . Si può così facilmente vedere che il modello di Garuccio, Scalera, Selleri viola la diseguaglianza (2), dato che prevede anch'esso $K = 3$, come la meccanica quantistica *standard*.

Questa conclusione che un formalismo quantistico privato degli scomodi stati *entangled* non sia in grado di riprodurre nemmeno le proprietà ordinarie di un elementare modello classico, come quello appena descritto, costituiva agli occhi di Franco una conferma del carattere illusorio di quelle soluzioni formali ai paradossi della microfisica che si basano su una modifica della struttura della teoria esistente. Tale modifica può riguardare non solo la struttura matematica, come nel caso appena considerato del formalismo quantistico senza *entanglement*, ma perfino la sottostante struttura logica, come nel caso delle logiche quantistiche non distributive (Dalla Chiara M. L. 1976), che venivano considerate dai loro sostenitori come apparentemente neutrali sotto un profilo filosofico (*model independent*), evitando di confrontarsi, in una prospettiva antimetafisica ma anche antifilosofica *post* empiristica, con le questioni concettuali ed epistemologiche ancora aperte, per non parlare di quelle ontologiche come la natura duale degli oggetti microscopici. Proprio rispetto a quest'ultimo problema, Franco, nel primo articolo che abbiamo scritto insieme, mise a confronto la propria interpretazione realistica, che sarà diffusamente discussa nel seguito, con l'interpretazione logico-quantistica non distributiva, nel caso del celeberrimo esperimento della doppia fenditura, evidenziando sia alcune conseguenze paradossali della logica quantistica, sia le ineludibili e pesanti concessioni di quest'ultima nei confronti di una concezione filosofica di tipo soggettivistico e idealistico (Selleri & Tarozzi 1978a).

Non posso fare a meno di concludere questa sezione con un breve cenno ad alcuni risultati del nostro lavoro di collaborazione sul problema di EPR-Bell.

Per quanto riguarda il problema del dominio di validità del teorema di Bell mi preme ricordare il nostro tentativo di estensione di tale dominio a teorie non locali come la meccanica classica e le teorie di variabili nascoste di de Broglie e Bohm, che pur prevedendo la possibilità di azioni a distanza superluminali, conservavano l'idea di separabilità delle proprietà dell'oggetto investigato da quelle dell'apparato utilizzato per la sua osservazione o

misurazione (Selleri & Tarozzi 1978b), in contrasto con l'inseparabilità quantica, che emergeva già dal postulato fondamentale di Planck, per poi venire radicalizzata dal principio di Heisenberg.

Del nostro contributo all'analisi delle ipotesi utilizzate nella derivazione del paradosso di EPR e del teorema di Bell, mi limiterò da una parte a menzionare la dimostrazione senza ricorso alla ipotesi di completezza del formalismo quantistico che metteva in luce l'esistenza di una situazione paradossale molto più seria di quella originale, dovuta a un diretto conflitto tra realismo locale e descrizione quantistica (De Muynck & Van Stekelenbor J.T.P.M 1986; Selleri & Tarozzi 1986; De Baere 1988), dall'altra a ricordare la generalizzazione probabilistica del criterio di realtà. Come è noto il criterio di realtà di EPR (Einstein, Podolsky & Rosen 1935) era stato proposto in forma strettamente deterministica dai tre autori, richiedendo che le proprietà del sistema fisico a cui viene attribuita realtà devono essere prevedibili con certezza per ogni singolo sistema. Così, le teorie a variabili nascoste che soddisfacevano la disuguaglianza di Bell dovevano essere non soltanto locali (vale a dire, in accordo con la località einsteiniana che vietava l'esistenza di azioni a distanza superluminali), ma anche deterministiche. Il risultato di Bell venne comunque presto esteso alle teorie probabilistiche locali di variabili nascoste da Clauser e Horne (Clauser & Horne 1974). Appariva quindi naturale generalizzare in senso probabilistico anche l'argomento di EPR.

La prevedibilità con certezza richiesta dal criterio di realtà di EPR, se per un verso costituiva una diretta conseguenza della descrizione quantistica nel caso di coppie di particelle correlate, dall'altro sembrava richiedere una forte idealizzazione rispetto alle situazioni fisiche reali, nelle quali, per poter compiere previsioni certe rispetto al risultato di una misurazione, dovremmo poter disporre di un apparato di misura ideale, che non esiste tuttavia nel mondo fisico, dato che ogni strumento di misura ha una certa probabilità p di errore, che per un buon apparato, sarà naturalmente molto bassa. Il criterio di EPR avanzava invece l'ipotesi semplificatrice di una precisione assoluta, una sorta d'infallibilità, dei risultati delle nostre misurazioni.

Per evitare quest'ultima difficoltà, si può cercare di formulare un nuovo e più ampio criterio di realtà di tipo probabilistico.

Un primo passo in questa direzione fu compiuto sostituendo la nozione di "prevedibilità con certezza", con quella "prevedibilità con un alto grado di probabilità induttiva" (Tarozzi 1979), che non appariva però realizzare un sostanziale progresso rispetto alla formulazione originaria.

Questa generalizzazione probabilistica del paradosso di EPR apparve tuttavia poco prima che entrasse in crisi la generalizzazione probabilistica

del teorema di Bell (Clauser & Horne 1974) che criticammo (Selleri & Tarozzi 1981b) in quanto fondata su un'assunzione addizionale nota come ipotesi di fattorizzabilità, che consisteva nell'identificazione della nozione fisica di località con il concetto di indipendenza statistica del calcolo delle probabilità, come apparve dalla nostra discussione di un modello realistico locale in grado di violare questa ipotesi addizionale.

Il nostro risultato fu interpretato come una dimostrazione dell'infondatezza di ciò che Popper definiva la "pretesa universalità" del teorema di Bell, vale a dire che

tutte le possibili teorie locali (di emissione e propagazione di particelle in direzioni opposte) portano a previsioni statistiche che differiscono dalle previsioni della meccanica quantistica" [Popper 1985],

dimostrazione che sembrava aprire la strada a una possibilità di conciliazione tra meccanica quantistica e un suo completamento realistico non deterministico:

F. Selleri e G. Tarozzi hanno trovato un modello che soddisfa la definizione della località di Bell, ma non la definizione di località di Clauser e Horne (nota anche come "condizione di fattorizzabilità").⁴

Questa possibilità di coesistenza tra meccanica quantistica e teorie probabilistiche locali apparve ben presto illusoria alla luce di una nostra dimostrazione del paradosso di EPR e del teorema di Bell, a partire da una ulteriore riformulazione in termini probabilistici del loro criterio di realtà (Selleri & Tarozzi 1983), dalla quale emergeva come anche una versione generalizzata in senso probabilistico del criterio di realtà di EPR non fosse compatibile con una formulazione autenticamente probabilistica della teoria quantistica (dello spin) in cui venga eliminato ogni residuo di determinismo.

3. La realtà debole della funzione ψ nell'interpretazione di Franco

Il primo tentativo d'interpretazione realistica della funzione d'onda risale, come già accennato, a Louis de Broglie (1927; 1955; 1956) e alla sua teoria dell'onda pilota, una teoria che, in estrema sintesi, sostiene che ogni particella è accompagnata e guidata nel suo moto da un fenomeno ondulatorio esteso. In questo modo possono essere perfettamente spiegati i

⁴ Popper (1985: 23).

fenomeni di diffrazione e autointerferenza delle particelle, ma non il fatto che le evidenze empiriche mostrano che tutta l'energia si trova concentrata nella particella. Il che poneva un serio problema epistemologico, quello dell'assunzione dell'esistenza di un'entità fisica (l'onda pilota, appunto), alla quale non era però direttamente associata alcuna quantità fisica osservabile, come accade invece nel caso dell'onda classica, una delle cui principali caratteristiche è proprio quella di trasportare energia.

Nel tentativo di individuare una soluzione alternativa per superare questo problema, Franco avanzò una nuova interpretazione realistica della funzione d'onda della meccanica quantistica basata sull'introduzione di un nuovo concetto, quello di onda vuota (alla quale sarà preferito in seguito di onda quantistica), che può essere considerato come un tentativo di sintesi rispetto a tre diverse concezioni della natura duale degli oggetti microscopici, sostenute storicamente dai principali padri fondatori della teoria quantistica.

La nuova nozione di Franco si richiamava in primo luogo al punto di vista di Einstein che, pur avendo reintrodotta in fisica una teoria corpuscolare della radiazione, attraverso la sua celeberrima ipotesi dei quanti di luce, riteneva che i fenomeni di interferenza e diffrazione non fossero spiegabili sulla base di una concezione puramente corpuscolare, ma richiedessero anche la presenza di un'onda, che accompagnasse e guidasse i quanti nel loro movimento. Tuttavia il fatto che tutta l'energia si trovasse concentrata nel quanto, e che l'onda associata apparisse conseguentemente priva di questa fondamentale proprietà, condusse Einstein a introdurre per tali onde il termine di *Gespensterfelder* (campo fantasma), che non fa propriamente pensare a onde reali.

Quando poi, con la sua meccanica ondulatoria de Broglie, estese il dualismo dalla radiazione ai costituenti fondamentali della materia, nel suo tentativo di superare la contraddizione dovuta *all'esistenza* di entità prive delle proprietà che caratterizzano qualsiasi altro oggetto fisico, non trovò altra via di uscita, per garantire la realtà fisica della sua onda pilota, che attribuirle una porzione straordinariamente piccola di energia, che sarebbe stata quasi interamente localizzata nel corpuscolo. Tuttavia nessuno era stato (e non è tuttora stato) in grado di rivelare questa bassissima quantità di energia delle onde di de Broglie dato che tutta l'energia e l'impulso si concentrano in modo reciprocamente esclusivo lungo uno solo dei due cammini in conformità con il postulato di unità e indivisibilità del quanto d'azione. Per questo motivo finì per apparire giustificata l'obiezione, mossa dai sostenitori dell'interpretazione ortodossa, che le onde di de Broglie

corrispondessero più a un assunto metafisico, che a un'autentica ipotesi fisica.

Una terza concezione dotata di considerevoli analogie con le due precedenti, ma anch'essa incapace di realizzare un'adeguata emancipazione rispetto alle nozioni classiche, era stata introdotta, poco prima di quella di de Broglie, dal massimo esponente dell'interpretazione ortodossa, Niels Bohr, nell'ambito del tentativo di riformulazione, compiuto insieme a Kramers e Slater, di una teoria puramente ondulatoria della radiazione (teoria di BKS), da opporre all'ipotesi corpuscolare einsteiniana dei quanti di luce. Si tratta del concetto di onda virtuale alla quale venne attribuita la caratteristica fondamentale di non trasportare né energia né impulso e di produrre soltanto "transizioni stimulate" negli atomi con cui essa interagiva. Le transizioni atomiche sarebbero così avvenute in aperta violazione delle leggi di conservazione di tali quantità fisiche dato che la teoria di BKS ammetteva la possibilità che un qualsiasi atomo passasse da un livello energetico a un altro, senza che avessero per questo luogo scambi di energia con il campo elettromagnetico. Il concetto di onda virtuale fu tuttavia ben presto abbandonato, a seguito degli esperimenti di Compton e Simon e Bothe e Geiger, che fornirono una conferma decisiva dell'ipotesi einsteiniana sulla natura corpuscolare della radiazione.

In questo modo nessuno dei precedenti padri fondatori della meccanica quantistica, pur elaborando prospettive basate su nozioni non *standard*, riuscì veramente ad approdare a un concetto realmente nuovo: né Einstein, che avendo contribuito più di ogni altro alla definizione del concetto di energia, e a trasformarlo attraverso il principio di equivalenza nella nozione centrale della fisica moderna, trovava contraddittorio e imbarazzante asserire l'esistenza di oggetti privi di questa fondamentale proprietà; né de Broglie, che dopo aver creato la teoria ondulatoria della materia, non riusciva a concepire onde prive di energia e quantità di moto e aveva quindi proposto di ascrivere ad esse una quantità non controllabile delle precedenti proprietà; né tantomeno Bohr, le cui onde virtuali erano state introdotte nella teoria di BKS come alternativa all'ipotesi corpuscolare dei quanti di luce, e che di fronte alla confutazione sperimentale della sua teoria ondulatoria della radiazione, sostituì prudentemente con l'interpretazione probabilistica di Born della funzione d'onda del 1926, per poi approdare un anno più tardi alla soluzione dualistica del principio di complementarità.

Già nel suo primo lavoro sui fondamenti della meccanica quantistica, Franco introduce gli elementi fondamentali della svolta concettuale nei confronti delle precedenti interpretazioni del dualismo onda corpuscolo (Selleri 1969). Partito dalla concezione realistica di Einstein-de Broglie,

secondo la quale onde e particelle esistono oggettivamente e al tempo stesso dalla constatazione che gli esperimenti realizzati in questo campo mostrano oltre ogni ragionevole dubbio che tutta l'energia, l'impulso, il momento angolare e la carica sono strettamente associati alle particelle, egli si pose il problema di che come si possa ipotizzare l'esistenza di un'entità che non ha associata ad essa alcuna proprietà (direttamente) osservabile. Considerando insoddisfacente la risposta di de Broglie, che prevedeva che le precedenti quantità fisiche fossero principalmente associate con le particelle, ma che una frazione infinitamente piccola di esse, così piccola da essere sfuggita a tutte le possibili osservazioni, fosse associata con l'onda, propose la nuova ipotesi secondo la quale,

anche se priva di una qualsiasi quantità fisica associata ad essa, la funzione d'onda può ancora dare origine a fenomeni fisicamente osservabili (...) noi non misuriamo, infatti, soltanto energie, impulsi o analoghe quantità fisiche, ma anche probabilità, come nel caso, ad esempio, della vita media di un sistema fisico instabile.⁵

La funzione d'onda avrebbe quindi potuto

acquisire realtà, indipendentemente dalle particelle associate, se essa può dar luogo a cambiamenti nelle probabilità di transizione del sistema con cui interagisce.⁶

A partire da questa originale intuizione, Franco presentò la prima versione del suo esperimento per rivelare le proprietà delle onde quantistiche, considerando un pezzo di materia composto di entità instabili, come nuclei, atomi o molecole eccitate attraversato da un flusso continuo di neutrini. Egli propose quindi di misurare la vita media di tali nuclei, confrontandola poi con la vita media delle stesse entità in assenza di qualsiasi flusso: se si osserva una differenza, la sola spiegazione logica secondo Franco è che

essa è dovuta all'azione della funzione d'onda, dato che i neutrini sono particelle che interagiscono molto debolmente e soltanto pochi di essi, nel migliore dei casi, possono avere interagito con il pezzo di materia.⁷

⁵ Selleri (1969).

⁶ *Ibid.*

⁷ *Ibid.*

4. Esperimenti e interpretazioni filosofiche di esperimenti per rivelare le proprietà fisiche delle onde quantistiche

L'idea originale venne ben presto perfezionata nella proposta di un esperimento (Selleri 1971) in cui una sorgente non più di neutrini, ma di fotoni, incide su uno specchio semitrasparente SMR che divide il fascio incidente in un fascio trasmesso e in un fascio riflesso che si propagano verso i rivelatori DT e DR, rispettivamente. Lungo il percorso del fascio trasmesso, tra SMR e DT, viene posto un tubo di guadagno laser LGT, che sostituisce il generico pezzo di materia instabile dell'esperimento originario.

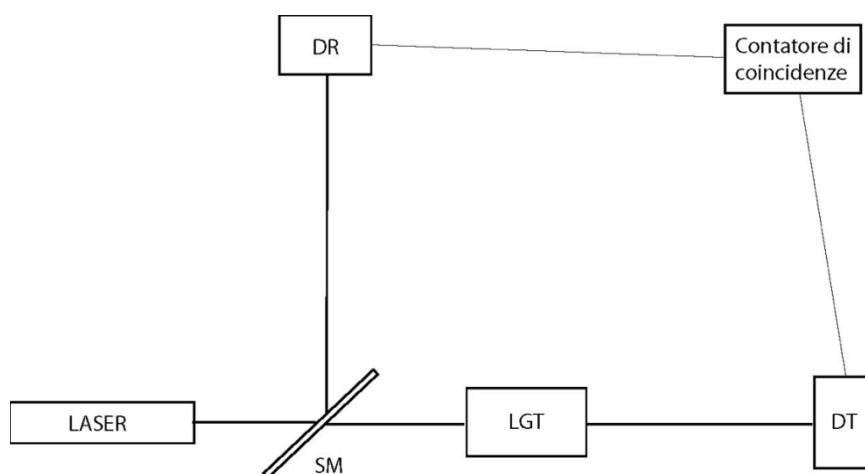


Fig. 1

Franco propose di concentrare, a questo punto, l'attenzione, sui casi nei quali DR che si trova lungo il fascio riflesso riveli la presenza di un fotone: questo significa che nel fascio trasmesso è presente la sola onda quantistica, che ha però la possibilità di rivelare la sua presenza nel passaggio attraverso LGT, generando emissione stimolata di fotoni: infatti le molecole contenute in LGT sono tenute in un livello eccitato, che include la lunghezza d'onda dell'onda incidente. Il fotone emesso da LGT potrebbe essere così rivelato da DT. In questo modo le coincidenze tra le rivelazioni di DT e DR indicherebbero inequivocabilmente la propagazione di un fenomeno ondulatorio privo di energia trasmesso da SRM. La propagazione spaziotemporale di tale entità potrebbe essere studiata controllando se le coincidenze DT DR spariscono quando viene inserito un ostacolo nel fascio trasmesso prima di LGT. Una risposta positiva da tale esperimento

mostrerebbe che “qualcosa che non trasporta energia o impulso ma che può produrre transizioni di probabilità si propaga nello spazio e nel tempo.”

Louis de Broglie, pur apprezzando l’idea di Franco, in cui individuò un importante tentativo volto a

ottenere un’interpretazione della meccanica ondulatoria più soddisfacente di quella che viene adottata attualmente e conferma delle idee che mi avevano guidato nel momento in cui avevo proposto nel 1923-24 le concezioni di base della meccanica ondulatoria,⁸

fu portato a inquadrare questa nuova idea all’interno della sua vecchia concezione dell’onda pilota:

L’esperimento che lei propone per rivelare l’esistenza dell’onda ψ sarà di estremo interesse per provare l’esistenza di questa onda debolissima (*très faible*) che trasporta le particelle...⁹

L’interpretazione di Franco fu accolta con notevole favore anche da un altro grande avversario dell’interpretazione di Copenaghen, il filosofo Karl Popper, che aderì incondizionatamente ad essa, abbandonando la sua originaria interpretazione statistica strettamente corpuscolare, ma cercando di ricondurla nei termini di una interpretazione oggettivistica delle probabilità:

Franco Selleri ha suggerito (continuando l’opera di Louis de Broglie) che possono esistere onde senza particelle. Io ho proposto una teoria in qualche modo simile, la teoria dell’esistenza di campi o onde di propensità. In questo contesto ci sono esperimenti molto interessanti da parte di H. Bonse e H. Rauch sulla realtà (probabilistica e anche di tipo causale) di campi di neutroni senza neutroni.

[...] Le conseguenze di [tale ipotesi] sembrerebbero rivoluzionarie. Esse stabilirebbero in luogo del carattere “complementare” di particelle e onde (ondicelle) l’interazione di due tipi di oggetti reali: onde e particelle.¹⁰

Né de Broglie, né Popper, tuttavia, pur manifestando grande interesse e apprezzamento per l’ipotesi delle onde quantistiche colsero pienamente il suo essenziale elemento di novità, che venne invece perfettamente compreso dal filosofo Evandro Agazzi, dato che l’ipotesi di onda quantistica rispondeva perfettamente all’istanza da lui sottolineata (Agazzi 1969), della necessità di concetti radicalmente nuovi per poter risolvere in modo

⁸ de Broglie (1969).

⁹ *Ibid.*

¹⁰ Popper (1985).

soddisfacente la contraddizione derivante dall'interpretazione complementare del dualismo onda corpuscolo. Nel suo contributo a un volume di studi italiani sui fondamenti e la filosofia della fisica, Agazzi osservava come l'importante novità concettuale dell'ipotesi delle onde quantistiche fosse costituita dal rifiuto della natura simmetrica del dualismo, tipica invece della prospettiva di de Broglie e, come abbiamo visto, anche di Popper: infatti, pur non aderendo alle interpretazioni che sostengono la necessità di un'immagine unica (inevitabilmente corpuscolare), né a quella complementare che sottolinea la contraddittorietà del ricorso reciprocamente esclusivo o all'una o all'altra di tali rappresentazioni, veniva esplicitamente riconosciuta una forma di priorità "ontologica" dei corpuscoli nei confronti delle onde.

La essenziale novità di questo concetto è rappresentata dall'accettazione della interpretazione realistica di de Broglie della dualità onda-particella, ma non della natura simmetrica di questo dualismo. Nella prospettiva di Selleri sia le particelle che le onde sono simultaneamente reali, ma queste ultime possono essere caratterizzate soltanto attraverso proprietà relazionali con le particelle: le proprietà osservabili di produrre interferenza ed emissione stimolata. Una tale possibilità implicherebbe una priorità ontologica delle particelle rispetto alle onde, che apparirebbero quindi a un livello di realtà fisica più debole, contenente oggetti che sono sensati portatori di predicati esclusivamente relazionali.¹¹

Dalle lunghe discussioni con Franco durante e subito dopo il congresso di Perugia in occasione del 90-esimo compleanno di de Broglie e dedicato appunto al problema della dualità onda particella emerse l'idea di due varianti del suo esperimento (Tarozzi 1982; 1984): la prima di queste varianti costituiva una proposta di controllo sperimentale dell'interpretazione realistica dell'esperimento della doppia fenditura che avevamo discusso come alternativa all'interpretazione logico quantistica (Selleri & Tarozzi 1978), mentre la seconda si proponeva di mettere in evidenza la coesistenza della nuova proprietà di generare emissione stimolata di luce delle onde quantistiche ipotizzata da Franco, con quella ben nota di produrre auto-interferenza di fotoni, mostrando come entrambe queste proprietà si riferissero al medesimo oggetto e non dovessero essere considerate complementari nel senso di Bohr e quindi reciprocamente esclusive.

Altri autori proposero in quegli anni diversi esperimenti più direttamente ispirati dalle idee originarie di de Broglie, per rivelare le proprietà fisiche delle onde quantistiche (Garuccio & Vigier 1980; Garuccio, Popper & Vigier 1981), cercando di provare la persistenza della

¹¹ Agazzi (1969).

figura d'interferenza anche in quelle situazioni fisiche in cui si riusciva a stabilire il percorso seguito all'interno di un dispositivo interferometrico dall'onda senza particella e, conseguentemente, anche dalla stessa particella.

Tuttavia, questi esperimenti, a differenza di quello di Franco, investigavano problemi che andavano ben oltre il controllo dell'interpretazione (realistica vs. ortodossa) della funzione d'onda, dato che controllavano anche la validità del postulato di riduzione della funzione d'onda stessa, uno dei presupposti fondamentali della teoria quantistica della misurazione, postulato che implicava la sparizione della figura d'interferenza, una volta che venisse stabilito il percorso seguito dalla particella nel dispositivo.

Il più avanzato di tali esperimenti (Garuccio, Rapisarda & Vigier 1982) sembrava in grado di ricostruire il percorso della particella senza perturbarla, partendo sul fallimento dell'ipotesi di Franco che l'onda quantistica producesse emissione stimolata di fotoni in un tubo di guadagno laser, che si sarebbe pertanto comportato esclusivamente come un duplicatore di fotoni.

Per quanto favorevolmente colpito dalle prospettive del nuovo esperimento, Franco non nascose una certa preoccupazione per questo conflitto tra le due interpretazioni realistiche, per cui fu veramente contento del fatto che io riuscissi a trovare una conciliazione (Tarozzi 1985a), mostrando la possibilità di combinare entrambe tali proposte in un singolo esperimento (Tarozzi 1985b), che illustrerò ora brevemente.

L'apparato sperimentale (Fig. 2), consiste di una sorgente incoerente e d'intensità molto bassa di fotoni monocromatici che, incidendo su uno specchio semitrasparente (ST_1), vengono scissi in un fascio trasmesso ed uno riflesso. Entrambi i fasci vengono nuovamente divisi da altri due specchi semitrasparenti (ST_2 e ST_3) in due componenti. Le componenti trasmesse si propagano verso i fotomoltiplicatori P_1 e P_2 rispettivamente, mentre entrambe le parti riflesse raggiungono il sistema interferenziale SI (composto da due fotomoltiplicatori P_C e P_D situati, rispettivamente, nelle zone di interferenza costruttiva e distruttiva). Lungo il cammino del fascio trasmesso, tra ST_1 e ST_2 , viene collocato un amplificatore laser AL.

Con un simile dispositivo possiamo, in primo luogo, controllare l'ipotesi dell'emissione stimolata dovuta a Franco, verificando l'esistenza di coincidenze non casuali tra le rivelazioni di P_1 e P_2 , una volta che ST_2 e ST_3 sono stati rimossi. La constatazione di tali coincidenze dimostrerebbe che l'onda relativa alla particella che è stata rilevata da P_1 è stata trasmessa da ST_1 producendo poi l'emissione di una seconda particella, attraversando AL, rilevata da P_2 .

Ora, indipendentemente dal risultato trovato, siamo comunque in grado di controllare sperimentalmente il postulato di riduzione della funzione d'onda. In primo luogo, infatti, supponiamo che le coincidenze non casuali tra le rilevazioni di P_1 e P_2 non vengano trovate, e che, dunque, l'onda quantistica non provochi l'emissione stimolata di fotoni. Questo riporterebbe la situazione all'ipotesi di base di Garuccio, Rapisarda e Vigier, secondo la quale AL si limiterebbe a duplicare le particelle che lo attraversano e che saranno, quindi, nei casi interessanti, rilevate da P_2 e da SI con probabilità $1/3$. In particolare, secondo i tre autori, la possibilità di isolare, nel fascio riflesso da ST_1 e ST_2 , l'onda quantistica priva della relativa particella, permetterebbe di avere interferenza in SI, e quindi, coincidenze tra P_2 e P_C (regione di interferenza costruttiva). Tale risultato sarebbe in contraddizione con le previsioni quantistiche basate sul postulato di riduzione della funzione d'onda che imporrebbero le coincidenze tra P_2 e P_D (e non P_C) a causa della scomparsa dell'interferenza in conseguenza della possibilità di stabilire il percorso seguito dalla particella nell'apparato.

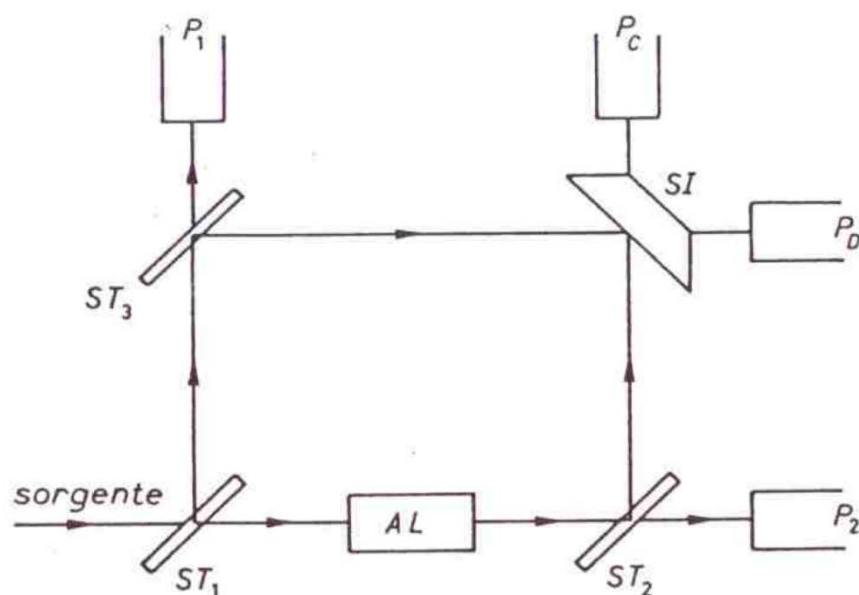


Fig.2

Supponiamo ora di trovare coincidenze tra P_1 e P_2 , confermando l'ipotesi dell'emissione stimolata. In questo caso la rivelazione delle coincidenze tra P_2 e P_C non sarebbe più in contraddizione con il postulato di riduzione dal momento che non saremmo ora in grado di stabilire se il

fotone rilevato da P_2 è una conseguenza della duplicazione della particella proveniente da ST_1 o dall'emissione stimolata provocata dalla sola onda quantistica nell'attraversare AL. Tuttavia, la rivelazione della particella in P_1 consente di stabilire che un'onda quantistica si è propagata da ST_3 a SI. La verifica della coincidenza tra P_1 e P_D (che contrastano le previsioni quantistiche delle coincidenze tra P_1 e P_C) non si limiterebbero a confermare l'interpretazione realistica della funzione d'onda ma costituirebbero anche una confutazione del postulato di riduzione.

Ci troveremmo quindi di fronte ad un livello intermedio di controllabilità della teoria quantistica: una falsificazione sperimentale del postulato di riduzione non comporterebbe soltanto l'esigenza di un abbandono dell'interpretazione di Copenaghen, implicata da una eventuale rilevazione delle proprietà dell'onda quantistica, ma anche una modifica della formulazione assiomatica della teoria, che, a differenza di quanto accadrebbe nel caso di una conferma sperimentale delle disuguaglianze di Bell, consentirebbe tuttavia di conservare i principi matematici basilari dell'attuale formalismo.

Gli esperimenti finora realizzati tuttavia, non sono riusciti tuttavia né a confermare l'interpretazione realistica della funzione d'onda sostenuta da Franco, né tantomeno a confutare il postulato di riduzione della funzione d'onda (Hardy, 1992; Zou et al. 1992)

5. Un nuovo esperimento come conferma della necessità di un'interpretazione realistica della microfisica

Dalla discussione del paragrafo precedente è emersa una relazione molto stretta tra il problema dell'interpretazione della funzione d'onda e il problema della misurazione. Si è anche visto come un esperimento che cerchi di dare una risposta a uno di questi problemi possa comportare una risposta anche all'altro, così come precedentemente (§ 2) era emerso un rapporto ancor più stretto tra il problema della misurazione e quello di EPR, dato che gli stati *entangled* costituiscono un particolare caso di sovrapposizione, per cui mentre una soluzione del problema di EPR avrebbe dovuto necessariamente comportare un'automatica soluzione anche del problema della misurazione, non vale necessariamente il reciproco. Per questo motivo Franco, pur consapevole della sua grande rilevanza epistemologica soprattutto per quanto riguarda la relazione soggetto osservatore/oggetto osservato, ha considerato la misurazione come problema secondario, rispetto a quelli della dualità onda-corpuscolo e delle

violazioni del realismo locale, dal punto di vista delle questioni aperte nei fondamenti della fisica.

Una possibilità che, invece, non era mai stata investigata era quella di un diretto rapporto tra l'interpretazione della funzione d'onda e paradosso di EPR, questione fondazionale che rimanda a quella filosofica del rapporto tra realismo scientifico (delle entità) e realismo empirico (delle proprietà). Esiste, tuttavia come rilevavo all'inizio, un esperimento (Auletta & Tarozzi 2004a; 2004b) che si propone di rilevare come proprietà fisicamente osservabile delle onde quantistiche quella che esse possano produrre correlazioni a distanza del tipo EPR: in questo modo l'*entanglement*, viene associato, come proprietà fisica, all'onda quantistica.

A tale scopo, consideriamo (Fig. 3) un cristallo non lineare (NL) che produce una coppia di fotoni inizialmente in uno stato fattorizzato (e quindi non-*entangled*). Qualsiasi fotone può essere rivelato o dai due rivelatori "vicini" (D_1 e D_2), che sono collocati dopo un breve percorso, o dai due rivelatori "lontani" (D_3 e D_4), collocati dopo un lungo percorso. Se, operando una post-selection, trascuriamo tutti i casi nei quali entrambi i fotoni vengono rivelati da D_1 o da D_2 , otteniamo un caratteristico stato non fattorizzabile, di tipo EPR,

$$(4) \quad |f'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle|4\rangle + |2\rangle|3\rangle),$$

in cui c'è correlazione tra la rivelazione in D_1 e la rivelazione in D_4 , da una parte, e tra la rivelazione in D_2 e la rivelazione in D_3 dall'altra. Infatti, dopo che un fotone è stato assorbito da D_1 , l'altro fotone, grazie all'interferenza distruttiva, non può raggiungere D_3 ed è "costretto" dall'interferenza costruttiva a raggiungere D_4 (allo stesso modo, quando il primo fotone è catturato da D_2 , l'altro sarà rivelato da D_3).

In questo caso, è chiaramente possibile prevedere con certezza quale dei due rivelatori lontani (D_3 o D_4) rivelerà un fotone, a seconda che D_2 o D_1 (rispettivamente) abbiano già rilevato l'altro fotone. Una piccola variazione del dispositivo sperimentale – consistente nello spostare i rivelatori D_3 e D_4 prima del secondo specchio semiriflettente (beam-splitter) BS2 – genererà una situazione completamente diversa, in cui D_3 e D_4 riveleranno fotoni in modo assolutamente e genuinamente casuale. In questa situazione, però, sarà possibile sapere, una volta che o D_3 o D_4 avrà rilevato, il percorso seguito da ogni fotone e dunque quale fotone è stato rilevato da quale rivelatore.

Il punto fondamentale da notare è che nella prima situazione sperimentale, quella in cui viene generato uno stato di tipo EPR, la possibilità di prevedere in quale dei due rivelatori lontani arriverà il fotone è data dal fatto che entrambi gli specchi semiriflettenti svolgono la loro funzione propriamente e quindi danno vita a un comportamento ondulatorio (interferenza) prima di entrambe le coppie di rivelatori. La previsione è resa possibile dalla correlazione espressa nello stato (4), la quale, come abbiamo appena visto, è indotta dal comportamento ondulatorio determinato dalla presenza di BS1 e BS2. Ciò può essere visto chiaramente perché eliminando uno o entrambi gli specchi semiriflettenti la correlazione non viene più prodotta.

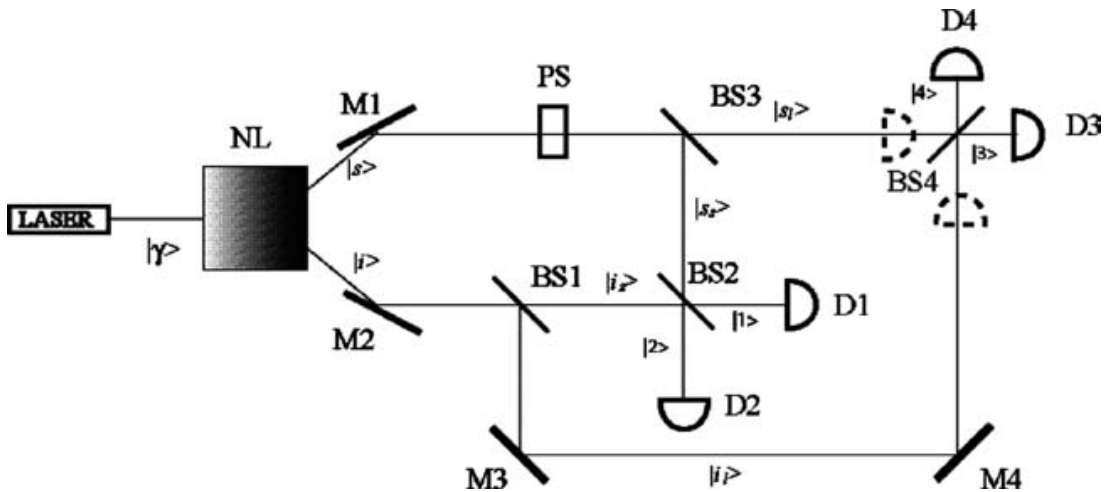


Fig. 3

Ora, il fatto che grazie al comportamento di tipo ondulatorio possiamo prevedere qualcosa di nuovo e differente (precisamente quale dei due rivelatori lontani scatterà) rispetto a ciò che il comportamento corpuscolare permette di predire (il cammino seguito dai fotoni), fornisce forti ragioni empiriche per attribuire una qualche realtà ontologica all'onda e quindi non soltanto alla particella. Questo è possibile perché il particolare dispositivo sperimentale considerato permette di associare al comportamento ondulatorio proprietà che sono empiricamente controllabili, esattamente quelle proprietà che dipendono dall'*entanglement*, cioè dalle correlazioni tra gli eventi di rivelazione.

Nel contesto di tale esperimento, dunque, l'*entanglement* è associato a un comportamento di tipo ondulatorio. Come abbiamo già accennato in precedenza, proprio questo costituisce l'aspetto più sorprendente della nostra proposta; infatti, quelle proprietà che, associate al comportamento ondulatorio, indurrebbero ad attribuire all'onda quantistica realtà fisica, sono proprio quelle proprietà che violano il realismo locale!

In questo modo, l'esperimento proposto sembra, dunque, aprire alla possibilità di discriminare sperimentalmente tra il realismo locale di EPR e un'interpretazione realistica dell'onda in cui gli stati *entangled* sono stati posti in relazione con comportamenti di tipo ondulatorio.

Per chiarire meglio i due termini dell'alternativa, vorrei sottolineare come il realismo locale si configuri essenzialmente come un realismo (empirico) sulle proprietà, mentre l'interpretazione realistica della funzione d'onda, corrisponda a una forma di realismo (scientifico) sulle entità.

L'interpretazione del nostro esperimento appena presentato si distingue da quella complementare "classica" in un importante aspetto filosofico: è ovviamente molto difficile comprendere quale tipo di realtà si possa attribuire alle onde. Appare chiaro che esse non possono avere lo stesso genere di realtà degli eventi o delle particelle, che sono ben localizzati e possiedono proprietà direttamente misurabili. Al contrario è intrinsecamente impossibile misurare direttamente onde o stati quantistici: l'esistenza di tali oggetti può essere soltanto inferita. D'altra parte, soltanto la rilevazione delle correlazioni previste sulla base del modello sperimentale permetterebbe di inferire la realtà dell'onda, nel momento in cui essa si trovasse associata, come pare molto plausibile, con nuove previsioni fisicamente controllabili. In caso contrario saremmo di fronte a una vera e propria confutazione sperimentale della meccanica quantistica. Proprio quest'ultimo aspetto costituisce la forza della proposta, che riprendendo le idee di Franco espone nel § 3), potrebbe permettere per la prima volta di evidenziare che un'entità esiste senza che per questo le sue proprietà siano intrinseche. Come abbiamo visto, infatti, le proprietà ondulatorie dei due fotoni dipendono fortemente dal contesto sperimentale. Questo significa che la ragione decisiva per la quale non è possibile rilevare direttamente le onde quantistiche è che esse appartengono a un livello di realtà essenzialmente relazionale e interazionale. Per l'interpretazione ortodossa, che nega realtà fisica all'onda, questo carattere sarebbe tipico della realtà corpuscolare. In una certa misura questo appare vero, dato che in un esperimento di tipo complementare, come in quello sopra considerato, ciò che noi riveliamo dipende dalla disposizione del nostro apparato. Tuttavia, l'atto stesso di rivelazione, come abbiamo già accennato, è per natura, in meccanica

quantistica, la rivelazione di una particella o la registrazione di un evento (e questo risultato può anche essere memorizzato e comunicato), e questo spiega l'asimmetria ontologica tra eventi registrabili (rilevamento di particelle) ed entità relazionali (onde quantistiche, che possono esser soltanto inferite).

L'esperimento proposto, dunque, pone un'alternativa tra due possibilità:

- 1) le correlazioni verranno effettivamente osservate, imponendo di attribuire realtà ontologica alle onde quantistiche e producendo una ulteriore evidenza empirica contro il realismo locale;
- 2) oppure le correlazioni non saranno trovate, confermando il realismo locale e confutando le previsioni della meccanica quantistica.

In questa seconda prospettiva, che appare sicuramente la meno probabile a causa dell'evidenza empirica contro la validità della disuguaglianza di Bell, non si porrebbe neppure il problema di una reinterpretazione realistica della meccanica quantistica, quanto piuttosto l'esigenza di una nuova e diversa teoria in grado di descrivere come reali alcune proprietà dei sistemi quantistici coinvolti, come il percorso seguito e, dunque, la loro posizione spaziale determinata in contrasto con il principio di sovrapposizione di cui l'*entanglement* rappresenta una diretta conseguenza logica.

La prima possibilità comporterebbe la necessità di una rinuncia al realismo locale, ma al tempo stesso anche di un impegno ontologico nei confronti del principale termine teorico del formalismo quantistico.

La grande novità di questo esperimento è che, a differenza di tutti quelli che sono stati finora proposti e a volte realizzati, che discriminavano tra interpretazione realistica e interpretazione ortodossa della funzione d'onda, oppure tra realismo locale ed *entanglement* quantistico, esso consente di discriminare tra proprietà ondulatorie prodotte da quest'ultimo e realismo locale di EPR, e quindi tra due diverse interpretazioni realistiche. Ne segue l'ineludibilità di un'interpretazione realistica della meccanica quantistica, che è sempre stato uno dei motivi ispiratori e uno degli obiettivi fondamentali delle ricerche di Franco, insieme alla sua costante critica alle conseguenze contraddittorie dell'interpretazione *standard*.

Per questa ragione concludo con la breve presentazione di una variante del precedente esperimento, che ho discusso lo scorso anno al workshop di Berlino-Urbino tenutosi al Max Planck Institute e al congresso annuale dell'AIPS di Urbino, nella speranza di riuscire a distogliere per un attimo Franco dalle sue nuove ricerche sui fondamenti nella "sabbia relativistica"

einsteiniana e a riportarlo nel mondo dei “dannati quanti” che non può fare a meno delle sue lucide analisi critiche.

Introduciamo ora un piccolo ma significativo cambiamento nel dispositivo sperimentale della Fig.3 collocando tra gli specchi a riflessione totale M_3 e M_4 un amplificatore laser LGT, presente nei nostri esperimenti degli anni ‘80 (Fig. 1 e 2), o meglio, come è stato suggerito da Tito Arecchi un secondo cristallo lineare NL’, che si comporteranno entrambi come duplicatori ideali di fotoni: questo significa che per ogni singolo fotone incidente, LGT o NL’ emetteranno due fotoni gemelli identici.

Possiamo così facilmente discriminare tra le due seguenti situazioni:

- 1) se non c’è amplificazione da parte di LGT, abbiamo soltanto due fotoni;
- 2) nel caso invece che LGT abbia duplicato il fotone incidente abbiamo tre fotoni simultaneamente presenti nel dispositivo.

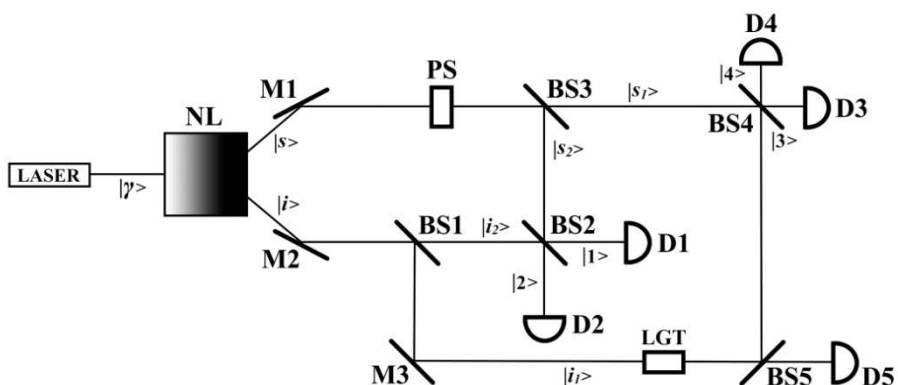


Fig. 4

Tralasciamo per un attimo il secondo caso in cui è l’interazione tra il fotone e LGT che produce, o almeno dovrebbe produrre, il collasso della funzione d’onda e concentriamo la nostra attenzione sul caso (1), in cui è l’assenza d’interazione o la fallita interazione che produce la riduzione dello stato *entangled* (4) e la conseguente sparizione della correlazione o dell’interferenza in D_3 e D_4 . In questa situazione, tuttavia, non abbiamo semplicemente a che fare con una misurazione di risultato negativo o senza rivelazione dell’oggetto che dev’essere misurato, come nel classico paradosso di Renninger (Renninger 1960), utilizzato qualche anno più tardi da Wigner (Wigner 1963) in una forma leggermente differente contro le teorie della misurazione che spiegavano la riduzione come risultato di una

interazione microscopico/macroscopico, ma semplicemente e soltanto l'assenza di interazione tra il fotone e l'amplificatore laser LGT (o come suggeriva Arecchi, per eliminare il disturbo delle emissioni casuali di fotoni da parte di LGT, un secondo cristallo non lineare NL'), rivelandoci il percorso del fotone attraverso l'informazione della non avvenuta duplicazione, che produrrebbe il processo di riduzione.

Consideriamo ora il caso (2), sostituendo (Fig. 4) lo specchio a riflessione totale M_4 con il beamsplitter BS5, e ponendo dietro quest'ultimo un ulteriore rivelatore D5.

In questa seconda situazione fisica per l'interpretazione ortodossa sarebbe la rivelazione da parte dell'apparato di misura D5 a causare la riduzione, mentre per teorie macrorealistiche tale processo avrebbe luogo prima, come conseguenza dell'interazione del fotone con LGT, mentre nella situazione precedente senza D5, la riduzione della funzione d'onda avrebbe luogo per l'interpretazione ortodossa, solo con la misurazione finale da parte di D3 o D4.

Ci troviamo così di fronte a un paradosso leggermente diverso e più serio dato che non coinvolge soltanto le interpretazioni macrorealistiche del processo di misurazione, supportato come nel caso dei paradossi di Renninger e Wigner, l'interpretazione soggettivistica di von Neumann, (Tarozzi, 1996, Renninger 1960, Wigner 1963) ma rappresenta piuttosto una grave difficoltà per quest'ultima interpretazione. Nella situazione fisica appena descritta non possiamo infatti invocare l'intervento della coscienza di un osservatore assente, che non controlla LGT, per rompere la catena di von Neumann, poiché la riduzione della funzione d'onda non può essere interpretata come conseguenza di una mancata misurazione, come nel caso del classico paradosso di Renninger, o di una misurazione del *nulla* come in una più recente variante (Afriat & Tarozzi 2006), ma, come abbiamo mostrato qui, persino di una mancata o fallita interazione tra un sistema microscopico e un sistema macroscopico.

Questa estensione del paradosso da misurazioni a ordinarie interazioni di risultato negativo appare inoltre minare la distinzione caratteristica dell'interpretazione soggettivistica *standard* che sta alla base della prospettiva sia di von Neumann che di Bohr e che a Franco è sempre apparsa inconcepibile, tra ordinarie interazioni microscopico/macroscopico e interazioni corrispondenti a processi di misurazione, con l'inevitabile conclusione che la misurazione di una particella con una camera a bolle dev'essere considerata diversa dall'interazione della stessa particella con la stessa massa di idrogeno liquido, nel senso che soltanto il secondo tipo di

interazione è in grado di produrre il processo di riduzione, che non potrebbe invece verificarsi nel primo caso.

Riferimenti bibliografici

- Afriat, A., Tarozzi, G. 2006, “Can Nothing Cause Nonlocal Quantum Jumps?”, in *Quantum Mechanics. Are There Quantum Jumps?*, a cura di A. Bassi et al., American Institute of Physics, Melville, New York: 3
- Agazzi E. 1969, *Temi e problemi di filosofia della fisica*, Manfredi, Milano
- , 1988, “Waves, Particles and Complementarity”, in Tarozzi G. & van der Merwe A. (Ed), *The Nature of Quantum Paradoxes. Italian Studies in the Foundations and Philosophy of Modern Physics*, Kluwer, Dordrecht: 53.
- Auletta G. & Tarozzi G. 2004a “Wave-like Correlations versus Path Detection: Another Form of Complementarity”, *Found. Phys. Lett.* 17: 882.
- , 2004b “On the Reality of Quantum Waves”, *Found. Phys. special number for Franco Selleri’s Seventieth Birthday*, 34: 1695.
- Bell J.S. 1964, “On Einstein Podolsky Rosen Paradox”, *Physics* 1: 195
- Capasso V., Fortunato D. & Selleri F. 1970, “Von Neumann’s Theorem and Hidden Variable Models”, *Riv. Nuovo Cimento* 2:149.
- , 1973, “Sensitive Observables of Quantum Mechanics”, *Int. J. Theor. Phys.* 7, 319.
- Clauser J.F. & Horne M. A. 1974, “Experimental consequences of objective local theories”, *Phys. Rev. D* 10, 526.
- Dalla Chiara M. L. 1976, “A general approach to non-distributive logics” *Studia Logica* 25: 139.
- de Baere W. 1988, “Some further comments on the Selleri-Tarozzi proof of the nonlocality of quantum mechanics”, *Phys. Letters A* 131: 13.

- de Broglie, L. 1927, “La structure de la matière et du rayonnement et la mécanique ondulatoire”, *C. R. Acad. Sc. Paris*: 184.
- , 1969, *comunicazione privata a F. Selleri*, 11 aprile
- De Muynck W.M. & Van Stekelenbor J.T.P.M 1986, “Discussion of a proof, given by Selleri and Tarozzi, of the nonlocality of quantum mechanics”, *Phys. Letters A* 116: 420.
- Einstein A, Podolsky B. & Rosen N. 1935, “Can Quantum-Mechanical Description of Reality Be Considered Complete?”, *Phys. Rev.* 47
- Fortunato D., Garuccio A. & Selleri F. 1977 “Observable consequences from second-type state vectors in quantum mechanics”, *Int. J. Theor. Phys.* 16: 1
- Garuccio A., Popper K. R. & Vigier J.-P. 1981 “Possible Direct Physical Detection of de Broglie’s Waves”, *Phys. Letters* 86: 397.
- Garuccio A., Rapisarda V. & Vigier J.-P. 1982, “New experimental set-up for the detection of de Broglie’s waves”, *Phys. Letters A*, 90: 17.
- Garuccio A., Scalera G. & Selleri F. 1977 “On local causality and the quantum mechanical state vector”, *Lett. Nuovo Cimento* 18, 26
- Hardy L. 1992, “On the Existence of Empty Waves in Quantum Theory”, *Phys. Letters* 167A: 11-16.
- Garuccio A. & Vigier J.-P. 1980 “Possible Experimental Test of the Causal Stochastic Interpretation of Quantum Mechanics: Physical Reality of de Broglie Waves”, *Found. Phys.* 10: 797.
- Jammer M. 1974, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, New York, Wiley: 311.
- , 1992, “John Stuart Bell and the Debate on the Significance of His Contribution to the Foundations of Quantum Physics”, in Tarozzi G., van der Merwe A. & Selleri F. (Ed) *Bell’s Theorem and the Foundations of Modern Physics*, World Scientific, Singapore: 20.
- Jauch, J.M. 1971, in *Foundations of Quantum Mechanics. Proceedings S.I.F.*, Course II, ed. by d’Espagnat, Academic Press, New York

- Pignedoli A. 1979, "Il fondamentale problema del rapporto tra relatività e teoria quantistica", *Atti e memorie del Centro studi in Trento dell'Università di Bologna*:1.
- Popper K. 1985, "Realism in Quantum Mechanics and a New Version of the EPR Experiment", in Tarozzi G. & van der Merwe A. (Ed.) *Open Questions in Quantum Physics*, Dordrecht, Reidel: 3.
- Renninger M. 1960 "Messungen ohne Störung des Messojects", *Z. Phys.* 158: 417.
- Selleri F. 1969, "On the Wave Function of Quantum Mechanics", *Lett. Nuovo Cimento* 1: 908.
- , 1971, "Realism and the wave function of quantum mechanics", in *Foundations of Quantum Mechanics. Proceedings S.I.F., Course II*, ed. by d'Espagnat, Academic Press, New York
- , 1972, "A Stronger Form of Bell's Inequality", *Lett. Nuovo Cimento* 3: 581
- , 1984, "Gespensterfelder", in Diner S. et al. (Ed) *The Wave particle Dualism*, Dordrecht: Reidel.
- , 1990, *Quantum Paradoxes and Physical Reality*, Kluwer, Dordrecht
- Selleri F. & Tarozzi G. 1978a, "Is Nondistributivity for Microsystems Empirically Founded?", *Nuovo Cimento* 43B: 31
- , 1978b, "Nonlocal Theories Satisfying Bell's Inequality", *Nuovo Cimento* 48B: 120
- , 1981, "Quantum Mechanics, Reality and Separability", *Riv. Nuovo Cimento* 2: 1
- , 1981, "Is Clauser and Horne's factorability a necessary requirement for a probabilistic local theory? ", *Lett. Nuovo Cimento* 29, 533
- , 1983, "A Probabilistic Generalization of the Concept of Physical Reality", *Speculations in Science and Technology* 6: 55

- , 1986, “Why Quantum Mechanics is Incompatible with Einstein Locality”, *Phys. Letters* 119A: 101
- Tarozzi G. 1979, “The Conceptual Development of the E.P.R. Argument”, *Mem. Acc. Naz. Sci. Lett. Arti Modena XXI*, 353.
- , 1982, “Two Proposal for Testing Physical Properties of Quantum Waves”, *Lett. Nuovo Cimento* 35(2): 553.
- , 1984, “From Ghost to Real Waves: a Proposed Solution to the Wave-Particle Dilemma”, in Diner S., Fargue D., Lochak G. & Selleri F. (Ed), *The Wave-Particle Dualism*, Dordrecht: Reidel: 139.
- , 1985a, “Experimental Tests of the Properties of the Quantum Mechanical Wave-Function”, *Lett. Nuovo Cimento* 42: 439-442.
- , 1985b, “A Unified Experiment for Testing Both the Interpretation and the Reduction Postulate of the Quantum Mechanical Wave Function”, in Tarozzi G. & van der Merwe A. (Ed): 337.
- , 1996, “Quantum Measurements and Macrophysical Reality: Epistemological Implications of a Proposed Paradox”, *Found. Phys.* 26: 907
- Tarozzi G. & van der Merwe A. (Ed.) 1985, *Open Questions in Quantum Physics*, Dordrecht: Reidel.
- Wigner E.P. 1963, “The Problem of Measurement”, *Am. J. Phys.* 31: 6
- Zou X.Y, Grayson T.P., Wang T.P. & Mandel L., “Can an Empty de Broglie Pilot Wave Induce Coherence?”, *Physical Review Letters* 68: 3667.

Nella sua straordinaria opera scientifica, Franco Selleri si è sempre opposto alla rinuncia alla comprensione della struttura della realtà e della natura degli oggetti fisici, che egli considera come l'elemento caratterizzante delle principali teorie della fisica del Novecento e che è stata stigmatizzata da Karl Popper come tesi della "fine della strada in fisica". Sin dalla fine degli anni '60, egli ha sviluppato quella riflessione critica nei confronti delle teorie fondamentali della fisica moderna, in particolar modo della teoria delle particelle elementari e della meccanica quantistica, e in un secondo tempo delle teorie relativistiche, che contraddistingue il suo programma di ricerca. Nel corso della sua intensa e infaticabile attività scientifica, Selleri è entrato in proficuo contatto con molti grandi fisici e filosofi della scienza, instaurando un intenso dialogo critico con Louis de Broglie, John Bell e Karl Popper. Le sue originali e non convenzionali ricerche lo hanno portato a risultati significativi non solo nell'ambito dei fondamenti della fisica, ma anche della storia e della filosofia della fisica. Per questo abbiamo voluto dedicare un numero speciale di *Isonomia* al nostro impareggiabile amico e collega, sia per la sua passione instancabile e la sua profonda conoscenza dei fondamenti formali, concettuali e filosofici delle teorie della fisica contemporanea, sia e forse ancor più come maestro di una prospettiva perennemente critica che egli ha sempre seguito e proposto con particolare rigore ed estrema determinazione.



Nella sua straordinaria opera scientifica, Franco Selleri si è sempre opposto alla rinuncia alla comprensione della struttura della realtà e della natura degli oggetti fisici, che egli considera come l'elemento caratterizzante delle principali teorie della fisica del Novecento e che è stata stigmatizzata da Karl Popper come tesi della "fine della strada in fisica". Sin dalla fine degli anni '60, egli ha sviluppato quella riflessione critica nei confronti delle teorie fondamentali della fisica moderna, in particolar modo della teoria delle particelle elementari e della meccanica quantistica, e in un secondo tempo delle teorie relativistiche, che contraddistingue il suo programma di ricerca. Nel corso della sua intensa e infaticabile attività scientifica, Selleri è entrato in proficuo contatto con molti grandi fisici e filosofi della scienza, instaurando un intenso dialogo critico con Louis de Broglie, John Bell e Karl Popper. Le sue originali e non convenzionali ricerche lo hanno portato a risultati significativi non solo nell'ambito dei fondamenti della fisica, ma anche della storia e della filosofia della fisica. Per questo abbiamo voluto dedicare un numero speciale di *Isonomia* al nostro impareggiabile amico e collega, sia per la sua passione instancabile e la sua profonda conoscenza dei fondamenti formali, concettuali e filosofici delle teorie della fisica contemporanea, sia e forse ancor più come maestro di una prospettiva perennemente critica che egli ha sempre seguito e proposto con particolare rigore ed estrema determinazione.

Isabella Tassani, *OLTRE LA FISICA NORMALE*

OLTRE LA FISICA *NORMALE*

**INTERPRETAZIONI ALTERNATIVE
E TEORIE NON STANDARD
NELLA FISICA MODERNA**

a cura di

Isabella Tassani



NEITHER DEAD NOR ALIVE



ISSN 2037-4348

Isonomia Epistemologica