

LE BELLE LETTERE 54
Le immagini dinamiche

Davide Fiscaletti

Le immagini dinamiche

Forma e qualità nella scienza moderna

Asterios Editore

Trieste, 2020

Prima edizione nella collana Le Belle Lettere Settembre 2020
©Davide Fiscaletti, 2019
©Asterios Abiblio Editore, 2019
posta: info@asterios.it • www.asterios.it • www.volantiniasterios.it
I diritti di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento totale o parziale
con qualsiasi mezzo sono riservati.

ISBN: 978-88-9313-174-2

*Alla memoria di mio padre,
alla sua straordinaria forza d'animo e al suo grande coraggio.*

INDICE

Introduzione, 11

CAPITOLO I

La visione meccanicistica e riduzionista del mondo

- 1.1. *L'ascesa del meccanicismo: Galilei, Cartesio e Newton*, 19
- 1.2. *Il meccanicismo in biologia*, 26
- 1.3. *Il meccanicismo sociologico*, 32

CAPITOLO II

Gli indizi fondamentali della crisi del paradigma
meccanicistico-riduzionista

- 2.1. *Il quadro generale della fisica moderna*, 37
- 2.2. *Il problema della misurazione e l'interpretazione ortodossa
della meccanica quantistica*, 42
- 2.3. *Il confine tra mondo classico e mondo quantistico....
e la non-località*, 52
- 2.4. *L'impasse nella teoria quantistica dei campi*, 67
- 2.5. *Dalla superconduttività... al ruolo delle interazioni fondamentali
nella strutturazione dell'universo*, 75
- 2.6. *Biologia organica, psicologia della Gestalt ed ecologia*, 93

CAPITOLO III

La chiave per uscire dall'impasse:
la scienza delle qualità di Leonardo da Vinci

- 3.1. *Premessa*, 99
- 3.2. *Leonardo da Vinci:
il fondatore del pensiero scientifico moderno*, 100
- 3.3. *Una scienza delle forme viventi e della qualità*, 107
- 3.4. *Una concezione dinamica della geometria*, 118

CAPITOLO IV

- Qualità e forma nella scienza moderna: dalla visione di Bohm della fisica quantistica... al ruolo dell'emergenza nella teoria quantistica dei campi... al pensiero sistemico moderno, 123
- 4.1. *La visione di Bohm della fisica microscopica: dal potenziale quantico all'ordine implicito*, 124
 - 4.2. *Principio dell'organizzazione collettiva e rottura spontanea della simmetria*, 134
 - 4.3. *L'emergenza in teoria quantistica dei campi*, 157
 - 4.4. *Gli sviluppi del pensiero sistemico dalla tectologia... alla teoria della complessità*, 175

CAPITOLO V

- Dalla visione sistemica della vita... all'antropologia cosmica nella scienza della qualità
- 5.1. *La teoria dell'autopoiesi di Maturana e Varela*, 185
 - 5.2. *La prospettiva sistemica nel dominio sociale*, 190
 - 5.3. *Mente, cognizione e coscienza: dalla teoria di Maturana e Varela... all'idea della consapevolezza come proprietà dello spazio universale*, 198
 - 5.4. *Che cosa ci rende essere umani: verso nuove chiavi di lettura*, 207
 - 5.5. *Dalla sostenibilità ecologica... all'antropologia cosmica*, 228

Bibliografia, 255

Introduzione

Durante la prima metà del XX secolo, la visione ampiamente condivisa dagli storici e dai filosofi della scienza era che il progresso scientifico è un processo graduale caratterizzato dal costante miglioramento delle teorie e dei modelli scientifici, che vengono continuamente perfezionati e sostituiti da versioni nuove e sempre più precise, nel tentativo di descrivere un insieme sempre maggiore di fenomeni interconnessi. Negli anni '60, questa visione di un progresso continuo della scienza venne radicalmente messa in dubbio dal fisico e filosofo della scienza statunitense Thomas Kuhn (1922-1996). In un famoso libro intitolato *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* (1962) Kuhn introdusse il concetto cruciale di “paradigma” scientifico, definito come un insieme di successi (concetti, valori, idee, ecc....) condivisi da una comunità scientifica ed utilizzati da quella comunità per stabilire la validità di problemi e soluzioni. Nella visione di Kuhn, l'evoluzione della scienza sarebbe caratterizzata da lunghi periodi di progresso graduale (che può anche essere chiamato “scienza normale”) interrotti talvolta da delle rotture discontinue e rivoluzionarie, corrispondenti a dei mutamenti di paradigma, per questo chiamate “cambiamenti paradigmatici”, le quali generano nuove modalità di “ritagliare” il mondo della natura con conseguenti slittamenti di significato dei vari concetti. In altre parole, Kuhn suggerì che nell'evoluzione del pensiero scientifico possiamo individuare delle fasi ben distinte e il progresso della conoscenza avverrebbe “a strappi”: in un dato periodo storico, dominerebbe uno specifico insieme di teorie, metodi e valori di conoscenza, usati dagli scienziati per affrontare un dato insieme di problemi, finché ad un certo punto la scoperta di nuovi fenomeni determinerebbe la crisi della visione delle cose in quel momento dominante, generando delle vere e

proprie rivoluzioni le quali portano a nuovi schemi e nuovi valori conoscitivi con cui porsi di fronte al mondo della natura.

Il lavoro di Kuhn ha avuto un rilevante impatto sulla filosofia della scienza nonché sulle scienze sociali. Durante gli ultimi decenni, infatti, i concetti di paradigma e cambiamento paradigmatico sono stati usati sempre più frequentemente anche nelle scienze sociali, in quanto gli scienziati hanno constatato che molte caratteristiche dei cambiamenti paradigmatici possono essere osservate anche in un più ampio contesto sociale. Per comprendere queste trasformazioni sociali e culturali, Fritjof Capra (1996) ha allora esteso la definizione di Kuhn di paradigma scientifico a quella di paradigma sociale, definendolo come “una costellazione di concetti, valori, percezioni e comportamenti condivisi da una comunità, che dà forma a una visione peculiare della realtà come base del modo in cui la comunità si organizza”.

Analizzando la storia della scienza dal punto di vista dei paradigmi e dei cambiamenti paradigmatici, ad uno sguardo complessivo, possiamo notare che la tensione essenziale è quella tra le parti e l'insieme, e, di conseguenza, tra materia (sostanza, struttura) e forma (schema, ordine, pattern). Lo studio della materia inizia con la domanda: “Di cosa è fatta la realtà?”; ciò porta alla nozione dei costituenti fondamentali, i mattoni della materia, alla misurazione e alla quantificazione. Lo studio della forma si domanda invece: “Qual è il pattern di un fenomeno?”. E ciò porta all'idea di ordine, di relazione e di organizzazione. Invece che alla quantità porta alla qualità; invece della misurazione richiede la mappatura. Si tratta di due linee di ricerca molto diverse tra loro, che sono state in competizione l'una con l'altra durante tutto il corso della nostra tradizione scientifica e filosofica.

Strettamente connessa alla tensione tra sostanza e forma è la tensione tra le parti e l'insieme. Si può dire, infatti, che nella natura umana esistono due impulsi primari in conflitto tra loro: da un lato cerchiamo di suddividere, di frazionare un fenomeno o un problema in parti via via più semplici, vale a dire cerchiamo di semplificare le cose fino a giungere all'essenza, dall'altro lato analizziamo l'essenziale cercando di arrivare alle sue più vaste implicazioni. Il mondo naturale è governato sia dai

principi essenziali sia dagli straordinari principi organizzativi che ne scaturiscono, i quali hanno la proprietà fondamentale di restare validi anche se i principi essenziali dovessero subire qualche piccolo cambiamento. Nella storia della scienza, in corrispondenza alla competizione tra studio della sostanza e studio della forma, esiste da sempre un conflitto tra la concezione in cui predomina l'attenzione che viene data alle parti e quella in cui predomina l'attenzione data all'insieme, e di conseguenza tra la concezione che prevede che sono le leggi microscopiche a determinare l'organizzazione che si osserva in natura e quella opposta che prevede che è l'organizzazione a determinare le leggi microscopiche: questo conflitto può essere considerato l'asse portante del processo di comprensione del mondo della natura.

L'attenzione data alle parti può anche essere chiamata *visione meccanicista*, riduzionista o atomista; quella data all'insieme, invece, può essere definita *visione olistica*, organicista o ecologica. Nella scienza del XX secolo la prospettiva olistica è diventata anche nota come *visione sistemica* ed essa contiene, come sottoprodotto, quella concezione nota come emergentismo, secondo cui le leggi della natura non vanno intese come realtà fondamentali, ma emergono piuttosto attraverso un'auto-organizzazione collettiva.

Riguardo a questi dibattiti, strettamente correlati, tra sostanza e forma e tra parti ed insieme, oggi si può affermare che ci troviamo in un periodo storico in cui la descrizione dei fenomeni nel tentativo di pervenire alle loro cause ultime sta subendo una metamorfosi: dalla sostanza e dallo studio dei comportamenti delle singole parti alla forma e allo studio dei comportamenti collettivi, in un quadro in cui le leggi sono viste come conseguenza di un ordine ed un'organizzazione superiori che caratterizzano i sistemi in considerazione (e in cui le leggi che caratterizzano ciascun livello di descrizione non possono essere viste separatamente dagli altri livelli ma esiste una stretta interdipendenza tra i diversi livelli di descrizione dei processi).

Questi punti sono stati ben chiariti già nel 1972 dal premio Nobel per la fisica Philip Anderson nel suo fondamentale articolo-manifesto intitolato *More is different*, e poi in successivi lavori di alcuni eminenti fisici della

materia condensata, tra cui il premio Nobel Robert Laughlin¹. In questi scritti, viene sottolineato che, nonostante la ricerca scientifica abbia individuato dei costituenti chiave a più livelli energetici ed organizzativi, come può essere la sequenza “classica” molecole-atomi-nuclei-quarks..., è assolutamente illusorio pensare che esista un livello fondamentale dal quale poter ricavare tutte le strutture superiori applicando l’armamentario matematico a partire soltanto dalle interazioni fondamentali. Per poter fornire una descrizione efficace e soddisfacente del mondo della natura è necessario invece considerare più scale di grandezza e livelli organizzativi, e ognuno di questi richiede un’attenzione particolare e precise ipotesi di “ricordo” tra i vari livelli. L’idea chiave, introdotta da Anderson e successivamente sviluppata da Laughlin, consiste quindi nella seguente semplice constatazione: l’universalità dei comportamenti collettivi è compatibile con i costituenti elementari di un sistema, ma non è deducibile dalle proprietà di tali costituenti. Il riduzionismo, allora, semplicemente non funziona con sistemi di questo tipo, che del resto sono la maggioranza dei sistemi interessanti e si collocano in quella zona che è stata definita da Laughlin la “terra di mezzo” (e che i fisici chiamano anche “regime mesoscopico”), e sta tra la fisica delle particelle e la cosmologia.

D’altra parte, come evidenzia Ignazio Licata nel suo recente brillante libro *I gatti di Wiener. Riflessioni sistemiche sulla complessità*, l’adozione di un riduzionismo radicale, e quindi un’attenzione esclusiva ai “costituenti”, non è una procedura coerente e sensata dal punto di vista epistemologico, in quanto introduce una maniera asimmetrica nella descrizione della natura. Prendendo in considerazione il caso della fisica, Licata sottolinea che, in generale, una legge fisica descrive classi di eventi, non eventi singoli e per discriminare all’interno di una classe tra eventi singoli è necessario considerare anche il qui ed ora dell’evento, il gioco specifico di vincoli che hanno condizionato quella particolare condizione fisica. In altre parole, una legge fisica in generale ci dice qualcosa su una classe di

¹ Vedi per esempio: R. Laughlin e D. Pines, “The theory of everything”, *PNAS*, Vol. 97, n. 1, pp. 28-31, 2000; R. Laughlin, D. Pines, J. Schmalian, B.P. Stojkovic e P. Wolynes, “The middle way”, *PNAS*, Vol. 97, n. 1, pp. 32-37, 2000; R. Laughlin, *Un universo diverso. Reinventare la fisica da cima a fondo*, Codice Edizioni, Torino, 2005.

fenomeni ma all'interno della classe quel particolare fenomeno si realizzerà in situazioni specifiche che sono fisicamente rilevanti e possono modificare notevolmente la fisica del problema. E ci sono sistemi fisici in cui i vincoli globali a cui sono soggetti risultano essere altrettanto importanti delle leggi relative ai costituenti, e allora si manifestano proprietà emergenti e l'approccio puramente riduzionistico fallisce in quanto si generano correlazioni non banali tra i diversi livelli descrittivi del sistema le quali fanno sì che le relazioni tra costituenti e tra sistema ed ambiente non sono fisse ma si modificano, inducendo di conseguenza alcune forme organizzative piuttosto che altre. Inoltre – continua nella sua analisi Licata – prendendo in considerazione i sistemi biologici, economici, cognitivi e sociali, la situazione si complica ulteriormente nel senso che la storia, i vincoli, il qui ed ora degli eventi diventano spesso e progressivamente più importanti delle leggi e questo fa sì che la distinzione tra sistema ed ambiente diventa molto complessa e le dinamiche che connettono micro e macro determinano uno scenario di continue ridefinizioni.

Identificare il momento specifico in cui ha avuto luogo questa transizione dalla sostanza e dallo studio dei comportamenti delle singole parti alla forma e allo studio dei comportamenti collettivi non è facile, perché si è trattato di fatto di un processo graduale, in qualche misura occultato dalla persistenza dei miti, ma non c'è dubbio che nella scienza attuale il paradigma dominante si possa ormai considerare di carattere olistico, emergentistico ed organizzativo. All'atto pratico scopriamo che il mito della sostanza, il mito che i fenomeni diventino via via più nitidi allorché vengono frazionati in parti sempre più piccole – e, di conseguenza, il mito del comportamento collettivo, dell'organizzazione che discende dalle leggi – deve essere completamente capovolto: l'insieme risulta essere qualcosa di più della somma delle singole parti che lo costituiscono e, pertanto, sono le leggi che scaturiscono dal comportamento collettivo. La fisica, la biologia e le altre scienze ci insegnano che considerare l'intero come qualcosa di più della somma delle sue parti non è soltanto una teoria ma un vero e proprio fenomeno della natura. È vero che la natura si gestisce sia ricorrendo a leggi microscopiche fondamentali sia mediante universali principi di organizzazione, tuttavia quando si raggiungono livelli profondi di sofisticazione, ci si rende conto che un semplice fenomeno può realmente ac-

quisire indipendenza rispetto alle leggi essenziali da cui deriva e così non siamo più in grado di stabilire se la generazione gerarchica delle leggi che ritroviamo nei fenomeni primari sia rimpiazzata da qualcos'altro. Analizzando le varie teorie scientifiche volte a comprendere i vari fenomeni, il mondo naturale ci appare insomma come una struttura gerarchica a generazione interdipendente in cui, ad ogni livello, i principi di organizzazione, o più precisamente le loro conseguenze, diventano esse stesse leggi, le quali possono organizzarsi a loro volta in nuove leggi, da cui ne possono derivare altre ancora, all'infinito, il che ci fa capire che l'organizzazione ha di fatto una realtà ontologica primaria rispetto alle leggi. Per esempio, possiamo osservare immediatamente che dalle leggi del moto degli elettroni si generano le leggi della termodinamica e della chimica, che producono le leggi della cristallizzazione, che a loro volta generano le leggi della rigidità e della plasticità, da cui si arriva poi alle leggi dell'ingegneria e della tecnica, in un quadro in cui è appunto l'organizzazione, il comportamento collettivo superiore a determinare le leggi di ciascun livello. In particolare, riguardo all'importanza dei principi organizzativi nell'ambito della fisica, il premio Nobel Robert Laughlin scrive nel suo stimolante libro *Un universo diverso*: "In effetti possiamo prevedere e gestire il comportamento del mondo fisico, ma non perché siamo dei geni: la natura ce ne facilita la comprensione, organizzandosi e generando leggi. [...] La scienza sta ormai passando dall'Era del Riduzionismo, una fase cioè in cui predominava quella visione secondo cui i fenomeni diventano via via più nitidi quando vengono frazionati in parti sempre più piccole, all'Era dell'Emergenza, una fase nella quale tende a prevalere la visione secondo cui è l'*organizzazione* a determinare le leggi, secondo cui le leggi della natura emergono attraverso un'auto-organizzazione collettiva e non è indispensabile conoscere ciò di cui sono fatte per comprenderle e farne uso. Passando all'Era dell'Emergenza impariamo ad accettare il valore del comune buon senso, ci poniamo alle spalle l'abitudine di banalizzare le meraviglie organizzative della natura, e ci rendiamo conto che l'organizzazione è importante in sé, anzi che in certi casi è la cosa più importante. Le leggi della meccanica quantistica, le leggi della chimica, le leggi del metabolismo e le leggi dei conigli che sfuggono alle volpi nei parchi discendono tutte l'una dall'altra, ma in fin dei conti, almeno per i conigli, contano soprattutto queste ultime!

[...] Non ci troviamo alla fine del percorso delle scoperte (la frontiera è ancora là, splendidamente selvaggia e tutta da esplorare) ma alla fine dell'Era del Riduzionismo, un periodo storico in cui la falsa ideologia del dominio dell'uomo sulla natura, esercitata mediante le leggi microscopiche, sta per essere spazzata via dagli eventi e dalla logica. Con ciò non voglio dire che le leggi microscopiche siano errate o insensate, ma solo che in molti casi diventano irrilevanti per colpa dei loro figli e nipoti, le leggi superiori di organizzazione che sovrintendono il mondo."².

Il passaggio all'era attuale caratterizzata da una visione olistica, ecologica ed emergentista porta con sé alcune conseguenze rilevanti ed in particolare possiamo dire che segna la fine del mito del potere assoluto della matematica. Benché da un lato questo mito sia ancora ben radicato nella nostra cultura (nel senso che per molti la ricerca delle leggi ultime appare come l'unica attività scientifica che valga realmente la pena di intraprendere), il mito riduzionista in base al quale i fenomeni diventino via via più nitidi quando vengono frazionati in parti sempre più piccole può essere confutato dimostrando la correttezza dei principi organizzativi superiori che generano le leggi a ciascun livello e poi sfidando i più capaci a servirsi delle semplici leggi di un dato livello, visto separatamente dagli altri (e senza considerare la possibilità di interdipendenze tra i vari livelli), per prevedere qualcosa. I nostri avversari si troveranno allora di fronte allo stesso irrisolvibile problema affrontato dal Mago di Oz nel momento in cui doveva far ritornare Dorothy nel Kansas. In effetti, il Mago di Oz avrebbe potuto riuscirci, se non fosse stato per alcuni fastidiosi dettagli tecnici di non facile risoluzione. Il fatto è che Oz si trova in un universo diverso da quello del Kansas, e passare dall'uno all'altro non è possibile. La stessa cosa succede alla matematica che riguarda ciascun livello della natura, visto separatamente dagli altri: in svariati casi da sola la matematica non basta per poter spiegare quello che si genera ad un livello superiore immediatamente contiguo. All'atto pratico scopriamo che, per comprendere e spiegare, fin nei minimi dettagli, i processi della natura, a ciascun livello le leggi che lo descrivono – analogamente a tutto ciò che ne deriva, come la logica e la ma-

² R. Laughlin, *Un universo diverso. Reinventare la fisica da cima a fondo*, Codice Edizioni, Torino, 2005, pp. 237, 246, 249.

tematica – in molti casi diventano irrilevanti per colpa delle leggi superiori di organizzazione. Se non si tiene conto dei principi superiori di organizzazione, la matematica da sola non è sufficiente per comprendere le cose. Alla fine dei conti, scopriamo insomma che con lo sviluppo delle teorie scientifiche del '900 la forma, il quadro olistico dell'intero come qualcosa di più della somma delle singole parti e i principi di organizzazione collettiva non costituiscono una semplice nota di colore, ma di fatto occupano tutta la scena del mondo della natura.

In questo libro, facendo un'analisi critica di alcune delle teorie più importanti sviluppate nella storia del pensiero scientifico, ci proponiamo di mostrare in che senso nella scienza moderna la visione olistica e sistemica basata sullo studio della forma, dell'insieme e dei comportamenti collettivi tende a prevalere sulla sostanza, sul meccanicismo e sul riduzionismo. Nel capitolo I analizzeremo lo sviluppo della visione meccanicistica e riduzionistica del mondo dalla fisica per arrivare alla biologia e alle scienze sociali. Nel capitolo II vedremo quali sono gli elementi fondamentali che, nella scienza moderna, portano alla crisi del paradigma meccanicistico-riduzionista, segnatamente in fisica, biologia, ecologia e psicologia. Nel capitolo III mostreremo quale deve essere considerata, secondo noi, la vera chiave che permette di uscire dalla situazione di impasse generata dal meccanicismo e dal riduzionismo, vale a dire la scienza della qualità, della forma e delle immagini dinamiche introdotta originariamente da Leonardo da Vinci nel XVI secolo. Nel capitolo IV vedremo come molti aspetti significativi della scienza moderna (segnatamente, la visione di David Bohm della fisica quantistica, la rottura spontanea delle simmetrie e l'organizzazione collettiva in diversi ambiti della fisica, il ruolo dell'emergenza nella teoria quantistica dei campi, per arrivare al pensiero sistemico moderno nelle diverse discipline scientifiche) siano la naturale conseguenza della scienza della qualità di Leonardo e costituiscano di fatto gli elementi cruciali del nuovo paradigma che sta emergendo nella scienza contemporanea. Infine, nel capitolo V mostreremo come questa scienza della qualità, della forma e delle immagini dinamiche porti a rilevanti progressi nell'interpretazione della mente e della coscienza all'interno di una visione olistica che unifica spazio, materia e vita.

CAPITOLO I

La visione meccanicistica e riduzionista del mondo

1.1. *L'ascesa del meccanicismo: Galilei, Cartesio e Newton*

In termini del tutto generali, possiamo dire che la visione del mondo predominante fino agli anni '20 del Novecento – e che, tutto sommato, continua ancora oggi a far sentire la sua influenza in vari ambiti nella società contemporanea – è la *visione meccanicistica e riduzionista*, secondo la quale l'universo sarebbe una macchina inerte, governata da esatte leggi matematiche, nella quale i vari fenomeni diventano via via più nitidi allorché vengono frazionati in parti e componenti sempre più piccole. La visione meccanicistica e riduzionista del mondo si sviluppò e si affermò, a partire dal Seicento, grazie al contributo rivoluzionario di svariati grandi pensatori: Copernico, Galilei, Bacone, Cartesio e Newton.

Galileo Galilei (1564-1642) postulò che, per fornire una descrizione matematica della natura, gli scienziati dovevano limitarsi a studiare quelle proprietà dei corpi materiali che potevano essere descritte in modo matematico, quantitativo, e di conseguenza dovevano dimenticare proprietà come il colore, l'odore, il gusto, vale a dire le qualità, le quali, essendo meramente soggettive, dovevano essere escluse dall'indagine scientifica. Due fra le più celebri dottrine filosofiche di Galilei sono quella relativa alla distinzione fra le qualità soggettive e quelle oggettive e quella riguardante la struttura geometrico-matematica del gran libro della natura. La prima di queste dottrine prende le mosse da una serie di considerazioni che Galilei fa nella sua opera *Il Saggiatore* (1623) attorno alla proposizione che afferma “essere il moto causa di calore”. Galilei, in primo luogo, respinge l'opinione secondo cui il calore sia

un'affezione o qualità “che realmente risegga nella materia dalla quale noi sentiamo riscaldarci”. Poi sottolinea che, se noi in quanto esseri umani non fossimo dotati di sensi, la nostra ragione ed immaginazione non giungerebbero mai a sospettare l'esistenza di proprietà come colore, suono, odore, sapore: tali proprietà “tengono solamente lor residenza nel corpo sensitivo, sicché, rimosso l'animale, sono levate e annichilate tutte queste proprietà”. Così – sostiene Galilei – una volta “rimosso il corpo animato e sensitivo, il calore non resta altro che un semplice vocabolo” e che ciò che in noi produce la sensazione di calore “siano una moltitudine di corpicelli minimi in tal e tal modo figurati, mossi con tanta e tanta velocità” e che il loro contatto con il nostro corpo “sentito da noi sia l'affezione che noi chiamiamo calore”. Oltre alla figura e alla moltitudine di quei corpicelli, al loro moto, alla penetrazione e al tocco, non ci sarebbe nel fuoco altra qualità. Nella visione di Galilei, il mondo reale è perciò contesto di dati quantitativi e misurabili, di spazio e di “corpicelli minimi” che si muovono nello spazio e il sapere scientifico è capace di distinguere ciò che nel mondo è obiettivo e reale e ciò che invece è soggettivo e relativo alla percezione dei sensi. Questa “esclusione dell'uomo” dall'universo della fisica implicava la piena sottoscrizione di un modello meccanicistico, con l'eliminazione, dalla fisica, delle cause finali e di ogni forma di antropomorfismo.

La seconda, celebre dottrina contenuta nel meccanicismo galileiano consiste nella ferma convinzione che la natura rechi al suo interno un ordine ed una struttura armonica, di tipo geometrico. Scrive testualmente Galilei al riguardo: “[...] la filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intender se prima non c'impara a intender la lingua, e a conoscere i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri sono triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto”¹. I caratteri in cui è scritto il libro della natura – sottolinea Galilei – sono dif-

¹ G. Galilei, *Opere*, Barbera Edizioni, Firenze, 1890-1909, VI, p. 232.

ferenti da quelli del nostro alfabeto, e non tutti sono in grado di leggere in quel libro. Su questo presupposto Galilei fonda la fermissima, quasi ostinata convinzione di tutta la sua vita, che la scienza non si limita a formulare ipotesi, a formulare discorsi coerenti, ma che è anche in grado di dire qualcosa di vero sulla costituzione delle parti dell'universo in rerum natura, di rappresentare la struttura fisica del mondo. Nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernicano*, Galilei sosterrà addirittura la possibilità, per la conoscenza matematica, di eguagliare quella divina: “[...] pigliando l'intendere intensive, in quanto total termine importa intensivamente, cioè perfettamente alcuna proposizione, dico che l'intelletto umano ne intende alcune così perfettamente, e ne ha così assoluta certezza, quanta se n'abbia l'istessa natura; e tali sono le scienze matematiche pure, cioè la geometria e l'aritmetica, delle quali l'intelletto divino ne sa ben infinite proposizioni di più, perché le sa tutte, ma di quelle poche intese dall'intelletto umano credo che la cognizione agguagli la divina nella certezza obiettiva.”².

Il paradigma meccanicistico culminò successivamente nell'opera dei due massimi protagonisti del XVII secolo, vale a dire Renè Descartes (Cartesio) e Isaac Newton. Cartesio (1596-1650), che può essere di fatto considerato il fondatore della filosofia moderna, sviluppò il potente apparato scientifico e filosofico in cui *il mondo veniva visto come una macchina governata da esatte leggi matematiche*. Il metodo di ragionamento che Cartesio sviluppò nel suo libro *Discorso sul metodo* si basava sulla fede nella certezza della conoscenza scientifica e, allo scopo di raggiungere la verità scientifica, proponeva che il pensiero costituisse l'essenza della natura umana e che le cose che concepiamo chiaramente e distintamente fossero vere. Il metodo cartesiano è analitico, consiste nel dividere i pensieri e i problemi in parti distinte e nel disporli nuovamente nel loro ordine logico. Il metodo analitico di ragionamento rappresenta forse il maggior contributo di Cartesio alla scienza, rivelandosi molto utile nello sviluppo delle teorie scientifiche nonché nella realizzazione di progetti tecnologici complessi. Dall'altro lato, un'enfasi

² G. Galilei, *Opere*, Barbera Edizioni, Firenze, 1890-1909, VII, pp. 128-129.

iperbolica su questo metodo ha causato quella frammentazione e parcellizzazione caratteristiche del sapere contemporaneo e, soprattutto, la prevalenza dell'approccio riduzionista nella scienza, cioè la credenza che tutti gli aspetti dei fenomeni complessi possano essere compresi riconducendoli ai loro componenti più piccoli.

Cartesio riteneva che la chiave dell'universo fosse la sua struttura matematica, che la matematica fosse il linguaggio primario della natura. Egli sosteneva inoltre la visione secondo cui tutti i fenomeni naturali fossero legati al movimento e al contatto reciproco di piccole particelle materiali: l'universo materiale veniva insomma visto come una macchina che funzionava secondo leggi meccaniche, tutto nel mondo naturale poteva essere spiegato nei termini della disposizione e dei movimenti delle sue parti. Il movimento dei corpi, quale è concepito da Cartesio, non è un processo, bensì uno stato dei corpi ed è sullo stesso piano ontologico della quiete: il fatto di essere in quiete o in moto non provoca nei corpi alcun cambiamento. Movimento e materia sono i due soli ingredienti che costituiscono l'universo cartesiano: tutte le forme dei corpi inanimati possono essere spiegate senza che a tale scopo sia necessario attribuire alla loro materia altro che il movimento, la grandezza, la forma e l'organizzazione delle sue parti. Infatti, un aspetto fondamentale della visione di Cartesio consiste nella *divisione tra due mondi indipendenti e separati: la mente (res cogitans) e la materia (res extensa)*. Res cogitans e res extensa vengono considerate realtà rigidamente separate. Questa scissione concettuale di mente e materia ha di fatto ossessionato in modo persistente la scienza e la filosofia occidentale per più di 300 anni.

In una prospettiva meccanicistica, Cartesio fa uso di modelli per l'interpretazione della natura, sostenendo che il mondo delle idee non rappresenta affatto lo specchio del mondo reale, che non c'è alcuna ragione di credere (anche se normalmente tutti ne siamo convinti) che le idee contenute nel nostro pensiero siano del tutto simili agli oggetti dai quali derivano. Nella visione cartesiana, la natura non ha nulla di psichico e non può essere interpretata con le categorie dell'animismo. Il mondo materiale è privo di spiritualità: la materia è meramente ridotta ad

estensione, ossia alla proprietà di occupare uno spazio, e si identifica con tale proprietà; l'unica differenza che ha rispetto allo spazio da essa occupato è la mobilità, nel senso che un corpo materiale è una forma dello spazio che può essere trasportata da un luogo ad un altro senza perdere la propria identità.

Per Cartesio il mondo della natura era insomma una macchina e nulla più, non era dotato di vita e di spiritualità. Nel periodo post-cartesiano questo concetto meccanico della natura sarebbe diventato il paradigma dominante della scienza, guidando la formulazione di tutte le teorie sui fenomeni naturali e influenzando profondamente anche l'atteggiamento delle persone verso il mondo della natura. Infatti, mentre prima del '500 prevaleva una visione del mondo organica la quale sottintendeva un sistema di valori che promuoveva comportamenti ecologicamente coerenti (le persone vivevano in piccole comunità coese e avevano una relazione personale con la natura, caratterizzata dall'interdipendenza di interessi spirituali e materiali e dalla subordinazione dei bisogni individuali a quelli della comunità) e quindi compiere delle azioni distruttive nei confronti della natura (essendo questa organismo vivente e madre nutrice) veniva considerato come una violazione del comportamento etico umano, l'idea cartesiana dell'universo come sistema meccanico sancì il diritto "scientifico" al controllo e allo sfruttamento della natura tipici della civiltà moderna.

Allo scopo di costruire una scienza naturale completa, Cartesio estese la sua visione meccanicistica della materia anche agli organismi viventi. Nella sua visione, piante ed animali erano considerati mere macchine, automi in cui i movimenti e le varie funzioni biologiche potevano essere ricondotti ad operazioni meccaniche. I processi vitali, scrive Cartesio, "conseguono del tutto naturalmente, nella macchina del corpo, dalla semplice disposizione dei suoi organi, né più né meno come i movimenti di un orologio o di qualsiasi altro automa seguono dai suoi contrappesi e dalle sue ruote". Le funzioni biologiche sono nient'altro che modalità diverse di trasmissione del movimento sulla base del meccanismo stimolo-risposta.

La concezione cartesiana degli organismi viventi ebbe un'influenza de-

cisiva sullo sviluppo delle scienze della vita, facendo sì che nei tre secoli successivi il compito primario di biologi, medici e psicologi diventasse quello di fornire una descrizione dettagliata dei meccanismi che costituiscono gli organismi viventi. Benché l'approccio di Cartesio sia stato applicato con grande efficacia, tuttavia ha anche limitato il progresso della ricerca come conseguenza del fatto che molti scienziati, incoraggiati dal successo di questo approccio meccanicistico, sono stati propensi a credere che gli organismi viventi fossero solo macchine.

Nella seconda metà del XVII secolo, la visione cartesiana della natura come macchina perfetta governata da leggi matematiche esatte trovò la sua espressione definitiva e completa nell'opera di Isaac Newton (1642-1727), il quale sviluppò una formulazione matematica complessiva della visione meccanicista della natura, con una teoria matematica coerente che rimase il caposaldo del pensiero scientifico fino al ventesimo secolo. Newton presentò la sua visione dell'universo nel suo libro fondamentale, *I principi matematici della filosofia naturale* (1687). In quest'opera, che comprende una vasta gamma di definizioni, proposizioni e dimostrazioni che gli scienziati considerarono la corretta descrizione della natura per oltre 200 anni, Newton sviluppò la metodologia sulla quale si sarebbe basata da allora la scienza naturale, mostrando come nessun esperimento privo di un'interpretazione sistematica e nessuna deduzione dai principi primi priva di verifiche sperimentali avrebbe potuto portare ad una teoria affidabile.

Nella visione di Newton, il teatro in cui avvengono tutti i fenomeni fisici è un background spazio-temporale fisso avente una realtà ontologica primaria: lo spazio e il tempo hanno una loro realtà oggettiva, sono enti assoluti dotati di una realtà fondamentale e la loro esistenza è indipendente dalla materia. Lo spazio è in pratica interpretato come un contenitore infinito, vuoto ed indipendente dai fenomeni che hanno luogo al suo interno, che si estende ovunque e tiene assieme la materia istante per istante e l'evoluzione degli oggetti materiali obbedisce a leggi dinamiche ben definite, che regolano la loro velocità e il loro percorso, misurati in termini di un tempo assoluto, vale a dire un tempo che scorre in modo perfettamente uniforme e che non può essere influenzato da alcunché.

Nella meccanica newtoniana, tutti i fenomeni fisici sono ricondotti al moto, in questo background spazio-temporale fisso, di particelle materiali, di oggetti piccoli, solidi e indistruttibili di cui è composta tutta la materia³, causato dalla loro attrazione reciproca (ed, in sostanza, sotto l'azione della forza di gravità). Nella prospettiva newtoniana, dopo che Dio al principio creò le particelle materiali, le forze esistenti tra loro nonché le leggi fondamentali del moto, l'universo si sarebbe messo in moto e avrebbe continuato a muoversi comportandosi, di fatto, come una *macchina inerte, priva di vita, regolata da leggi immutabili*. Newton portò così a compimento la visione meccanicistica della natura associandola ad un *determinismo rigoroso in cui la gigantesca macchina cosmica risulta completamente regolata da meccanismi causali*.

Durante i secoli XVIII e XIX la meccanica newtoniana fu applicata con grande successo a una vasta gamma di fenomeni naturali, permettendo di spiegare, nei minimi dettagli, svariati fenomeni legati alla gravità come il moto di pianeti, lune, comete, il flusso delle maree e, inoltre, poté essere estesa con efficacia molto al di là della descrizione di corpi macroscopici (per esempio, alla trattazione del moto dei fluidi e delle vibrazioni dei corpi elastici, nonché ai fenomeni del calore e del suono, anch'essi spiegati efficacemente in termini di moti vibratorii elementari delle particelle materiali costituenti). Nel '700 e nell' '800 questi incredibili successi del modello della natura intesa come macchina perfetta confermarono l'opinione che l'universo fosse in effetti un enorme sistema meccanico che funzionava secondo le leggi del moto di Newton, e che la meccanica newtoniana dovesse essere considerata la teoria corretta della realtà, la teoria definitiva dei fenomeni naturali, generando entusiasmo non solo tra gli scienziati ma anche tra il pubblico profano.

In realtà, nella seconda metà dell' '800 la scoperta e l'esplorazione dei fenomeni elettrici e magnetici da parte di Faraday e Maxwell che portarono all'introduzione di un nuovo concetto fondamentale nella fisica, il campo, nonché la teoria dell'evoluzione di Darwin in biologia, secondo

³ In Newton la differenza tra diversi tipi di materia era spiegata in termini di diverse concentrazioni di atomi, intesi come i costituenti elementari degli oggetti materiali.

cui tutto il mondo degli organismi viventi è un sistema in continua evoluzione e cambiamento, nel quale strutture complesse si sviluppano a partire da forme più semplici, coinvolgevano concetti che andavano chiaramente al di là del modello di Newton e indicavano che l'universo era molto più complesso di come lo avevano immaginato Cartesio e Newton. Tuttavia, l'approccio metodologico meccanicistico e i pilastri della fisica newtoniana furono ancora ritenuti corretti.

D'altra parte, da un punto di vista epistemologico, va sottolineato che la concezione meccanicistica, per cui il mondo era concepito come una macchina priva di vita, favorì le idee di Francesco Bacone (1561-1626), contemporaneo di Galilei, secondo cui la scienza e la tecnica dovevano servire a piegare la natura ai bisogni dell'uomo, di fatto per sfruttare la natura secondo le esigenze dell'uomo. Nella visione di Bacone compare il concetto del "sapere come potenza", di una scienza che si fa "ministra della natura" per prolungarne l'opera e portarla a compimento, che giunge infine a farsi padrona della realtà e piegarla, quasi per astuzia e attraverso una continua tortura, a servizio dell'uomo⁴.

1.2. Il meccanicismo in biologia

La rigida immagine cartesiana degli organismi viventi come sistemi meccanici fornì un chiaro quadro concettuale di riferimento anche per le ricerche in biologia. Sulla base della concezione meccanicistica del mondo di Cartesio, dovremmo essere capaci di comprendere tutti gli aspetti delle strutture viventi complesse – le piante, gli animali e il corpo umano – riducendole ai loro minimi costituenti fondamentali. Benché Cartesio non si fosse molto dedicato alle osservazioni fisiologiche, il suo approccio riduzionista alla biologia ebbe rilevanti sviluppi nei secoli successivi⁵.

⁴ Vedi P. Rossi, "Il fascino della magia e l'immagine della scienza", in *Storia della scienza, vol. 1: La rivoluzione scientifica: dal Rinascimento a Newton*, a cura di P. Rossi, UTET, Torino, 1988, pp. 31-57.

⁵ Cfr. F. Capra e P.L. Luisi, *Vita e natura. Una visione sistemica*, Aboca Edizioni, Sansepolcro, 2015, pp. 55-62.

Se nel '600 l'approccio meccanicistico fu applicato con successo per la prima volta da Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) all'azione muscolare e da William Harvey (1578-1657) al fenomeno della circolazione sanguigna, è a partire dal XVIII secolo che si ebbero i principali progressi: la dimostrazione da parte di Antoine Lavoisier (1743-1799), il padre della chimica moderna, che la respirazione è una forma speciale di ossidazione, fatto che mette in evidenza la rilevanza dei processi chimici nel funzionamento degli organismi viventi, nonché i contributi di Luigi Galvani (1737-1798) e Alessandro Volta (1745-1827) riguardo al ruolo dell'elettricità nella trasmissione degli impulsi nervosi e all'impulso dato alla neurofisiologia e all'elettrodinamica rispettivamente. Questi progressi portarono l'approccio meccanicistico cartesiano riguardo al funzionamento degli organismi viventi ad un nuovo livello di sofisticazione in cui gli animali erano ancora considerati macchine, sebbene più complicati di meccanismi ad orologeria in quanto includevano fenomeni chimici ed elettrici. Così la biologia rimase radicata nel riduzionismo cartesiano in un senso lato, nel senso che *tutti gli aspetti degli organismi viventi venivano ricondotti alle interazioni fisico-chimiche dei loro costituenti elementari*.

Nel XIX secolo, nonostante la visione del mondo meccanicista ebbe validi critici negli artisti, poeti e filosofi romantici (pensiamo per esempio a Goethe) i quali propendevano per una visione più unitaria e organicista del mondo, la lista degli innumerevoli successi della teoria di Newton fece sì che la concezione meccanicista della vita avanzasse sempre di più, grazie soprattutto alla formulazione della teoria cellulare, all'ascesa della microbiologia, all'avvento della embriologia moderna e alla scoperta delle leggi dell'ereditarietà, sempre all'interno di un quadro riduzionista, rapportato cioè alle molecole basilari e alle loro interazioni. In particolare, una delle più importanti scoperte fu la realizzazione che tutti gli animali e le piante sono costituiti da *cellule*. La formulazione della moderna teoria cellulare da parte di Robert Virchow (1821-1902) diede un nuovo significato al paradigma meccanicistico-riduzionista cartesiano, riconducendo tutte le funzioni degli organismi viventi alle interazioni tra i vari elementi cellulari, intesi come le unità fondamentali

della vita. Con la teoria cellulare di Virchow i biologi pensarono di aver finalmente identificato le unità fondamentali della vita. Alla luce di questa teoria, tutte le funzioni degli organismi viventi venivano ricondotte alle *interazioni tra i vari elementi cellulari*, piuttosto che riflettere l'organizzazione dell'organismo nel suo complesso.

Nel XIX secolo, se da un lato i progressi della teoria cellulare e della microbiologia supportavano la visione meccanicistica della vita, dall'altro lato la teoria dell'evoluzione darwiniana – secondo cui tutti gli organismi viventi discendono da un antenato comune attraverso un processo di modificazioni lungo miliardi di anni⁶ – introdusse un radicale cambiamento di prospettiva nel pensiero biologico, dall'essere al divenire, proponendo un'immagine totalmente olistica e sistemica: una vasta rete planetaria di esseri viventi connessi nello spazio e nel tempo. Ciononostante, la teoria di Darwin presentava il grave difetto di non essere in grado di spiegare l'emergenza di nuove caratteristiche nell'evoluzione degli organismi viventi. La soluzione a questo problema fu fornita poco tempo dopo da Gregor Mendel (1822-1884) ma fu completamente ignorata fino al XX secolo. Mendel scoprì che vi erano delle unità di ereditarietà – chiamate in seguito *geni* – che non si mescolavano nel processo della riproduzione, ma che venivano invece trasmesse di generazione in generazione senza cambiare la loro identità. La scoperta di Mendel non solo ebbe un ruolo decisivo nel consolidare la teoria dell'evoluzione di Darwin, ma aprì anche un campo di ricerca del tutto nuovo: lo studio dell'ereditarietà attraverso lo studio delle proprietà chimiche e fisiche dei geni.

Nel XX secolo, la *genetica* (termine coniato dal biologo William Bateson all'inizio del XX secolo) divenne l'area più attiva nell'ambito della ricerca biologica, rafforzando di nuovo notevolmente l'approccio riduzionista cartesiano agli organismi viventi. Benché nella prima parte del

⁶ L'idea di Darwin era appunto che gli esseri viventi, tutte le specie, non sono sempre stati così come li vediamo oggi, ma si sono diversificati partendo da antenati comuni in ere geologiche lontane e che l'evoluzione può essere vista come il risultato della propensione degli organismi biologici a cambiare più o meno spontaneamente, per potersi adattare meglio all'ambiente.

Novecento fossero sorte significative opposizioni al paradigma meccanicistico e riduzionista (si pensi, in particolare, alla teoria del Gestalt in psicologia, con la famosa frase di Ehrenfels che “il tutto è più della somma delle parti”, e, negli anni '20, ai primi progressi della nuova scienza dell'ecologia, con l'introduzione dei concetti di catena alimentare e di ciclo alimentare), negli anni Cinquanta si sarebbe assistito al trionfo spettacolare della *biologia molecolare* che avrebbe dato così un nuovo significativo impulso al riduzionismo cartesiano nelle scienze della vita. Mentre nell' '800 le cellule erano considerate i mattoni fondamentali degli organismi viventi, verso la metà del '900, quando i genetisti iniziarono ad esplorare la struttura molecolare del gene, l'attenzione si spostò dalle cellule alle molecole.

Durante la prima metà del XX secolo i primi passi importanti verso una genetica molecolare avvennero con la scoperta che le cellule contengono degli agenti, chiamati enzimi, che sono in grado di mediare delle specifiche reazioni chimiche e con il riconoscimento che la funzione primaria dei geni è quella di regolare la produzione degli enzimi, di determinare i tratti ereditari controllando la sintesi degli enzimi responsabili delle reazioni chimiche corrispondenti a quei tratti. Tuttavia, la vera natura del gene rimase sconosciuta per molti anni, finché non venne decifrato il codice genetico.

Un elemento cruciale nella decifrazione del codice genetico fu il passaggio di molti fisici alla biologia, i quali introdussero una nuova prospettiva e nuovi metodi che modificarono profondamente la ricerca genetica. Nel 1944 il fisico quantistico Erwin Schrödinger (1887-1961) pubblicò un breve libro, dal titolo *What is life?*, in cui suggerì in modo chiaro che il gene poteva essere visto come un veicolo di informazioni la cui struttura fisica corrisponde a una serie di elementi in un codice ereditario. Più in dettaglio, il libro di Schrödinger si pone i seguenti tre problemi: in che modo l'organismo vivente resiste alla tendenza alla distruzione della propria organizzazione, implicita nel secondo principio della termodinamica; in che modo la sostanza ereditaria si mantiene inalterata nonostante l'agitazione termica; infine, con quale meccanismo tale sostanza si può riprodurre con tanta fedeltà. Al primo

problema Schrödinger risponde introducendo il principio di “entropia negativa”, cioè l’uso di una fonte di energia esterna, che in ultima istanza è data dalla luce solare usata per la fotosintesi clorofilliana, il processo ben noto, che inizia con la cattura della luce solare da parte dei pigmenti di clorofilla delle piante, il quale è responsabile della creazione della gran parte della biomassa del nostro pianeta. Ma è soprattutto la soluzione fornita agli altri due quesiti che ebbe un’influenza rilevante sugli studi delle funzioni degli organismi viventi in chiave riduzionistica. Per Schrödinger il vero problema è appunto la spiegazione del meccanismo ereditario, e il rapporto fra questo problema e le dimensioni dei geni. A questo proposito, riprendendo un modello chimico del gene, che era stato proposto da Max Dellbrück (1906-1981), introduce il modello del “cristallo aperiodico” che porta il codice ereditario. In questo modello, il gene viene interpretato come un cristallo, in quanto solo un cristallo può mantenere una morfologia regolare in modo da portare alla formazione di altri cristalli e allo stesso tempo può non essere regolare per assicurare la variabilità necessaria per il substrato materiale dell’ereditarietà. Alla luce di questo modello, il libro di Schrödinger segnò una rilevante tappa nell’affermazione dell’approccio riduzionistico cartesiano nelle scienze della vita in quanto metteva in evidenza chiaramente il concetto che i geni erano i componenti chiave delle cellule e che avevano una struttura la quale, essendo data da una serie di elementi in un codice ereditario, poteva essere analizzata con metodi chimici e fisici in termini delle proprietà dei costituenti elementari.

L’approccio concreto con cui Schrödinger trattò il gene convinse molti fisici, biochimici e genetisti del fatto che si stava aprendo una nuova frontiera nella scienza, quella che poi sarebbe divenuta nota come “biologia molecolare”. Così, all’inizio degli anni ’50, grazie anche all’influenza di tre poderosi metodi di osservazione, vale a dire l’analisi chimica, la microscopia elettronica e la cristallografia a raggi X, i biofisici James Watson e Francis Crick (1916-2004) riuscirono a determinare la struttura fisica, l’architettura precisa del DNA (la componente molecolare dei cromosomi, vale a dire quei corpi filamentosi presenti nel nucleo

di ogni cellula, in cui i geni occupano posizioni specifiche). Un decennio dopo gli stessi Watson e Crick riconobbero in modo esplicito che l'informazione genetica è codificata nei cromosomi, pervenendo così alla *decifrazione del codice genetico* (che esprime lo stretto legame tra geni e tratti biologici in ogni organismo vivente). Con la scoperta della struttura del DNA e la decifrazione del codice genetico, avanzando verso livelli sempre più fini nell'esplorazione della vita biologica, i biologi molecolari scoprirono che le caratteristiche di tutti i sistemi viventi sono codificate nei loro cromosomi usando la stessa sostanza chimica e lo stesso codice. In particolare, grazie alla scoperta del codice genetico, il legame tra i geni e i tratti biologici apparve chiaro, elegante e molto semplice: i geni determinano tutti i tratti biologici e il comportamento dell'organismo in considerazione in quanto specificano gli enzimi che mediano tutti i processi cellulari. Questa spiegazione – definita da Crick il “dogma centrale della biologia molecolare” – costituisce il vero core di quella visione generale della genetica che può essere chiamata *determinismo genetico*, in cui il DNA viene visto come il “programma” genetico dell'organismo e il codice genetico come l'universale “linguaggio della vita”.

La comprensione della struttura fisica del DNA e la decifrazione del codice genetico possono sicuramente essere considerate due delle più grandi scoperte della scienza del XX secolo. Questi due trionfi della biologia molecolare possono essere visti come l'ultima tappa dell'approccio riduzionista al fenomeno della vita, che portò i biologi a ritenere che tutte le funzioni biologiche potessero essere ricondotte a meccanismi molecolari. *Con la scoperta della struttura e delle funzioni del DNA e la conseguente decifrazione del codice genetico, nelle scienze della vita si arriva insomma alla convinzione molto diffusa che tutte le funzioni biologiche possano essere spiegate in termini di strutture e di meccanismi molecolari.* La genetica diventa la scienza più popolare, il riduzionismo genetico il paradigma dominante.

Tuttavia, con l'inizio del nuovo millennio, i progressi più recenti nella genetica stanno inducendo i biologi molecolari a mettere in dubbio il primato del gene come nucleo concettuale esplicativo primario della struttura e della funzione biologica. D'altra parte, comprendere la

struttura e il funzionamento delle cellule introduce un problema che è diventato caratteristico di tutta la biologia moderna. Benché la biologia cellulare abbia fatto enormi progressi nella comprensione delle strutture e del funzionamento di molte delle sub-unità cellulari, si sa ancora davvero molto poco delle varie attività di coordinamento che integrano queste operazioni nel funzionamento della cellula nel suo complesso. Col passare del tempo, i biologi si sono resi conto che *le cellule sono di per sé sistemi viventi e che le loro attività di integrazione non possono essere comprese all'interno di uno schema teorico prettamente riduzionista.*

1.3. *Il meccanicismo sociologico*

Parallelamente all'ascesa del meccanicismo in fisica e in biologia, dal XVII secolo agli inizi del XX secolo si assiste nella sfera sociale allo sviluppo del meccanicismo sociologico, in cui l'idea principale consisteva nell'applicare i principi della fisica newtoniana allo studio della società umana. I concetti di base del *meccanicismo sociologico* furono originariamente sviluppati da John Locke (1632-1727), il quale suggerì una visione atomistica della società, di una società umana cioè governata da leggi simili a quelle dell'universo fisico, in cui i fenomeni sociali erano ridotti ai comportamenti di singoli individui. Postulando l'esistenza, nella società umana, di uno stato di equilibrio, il governo avrebbe avuto il ruolo di scoprire e rinforzare le leggi naturali che esistevano prima che ogni governo si fosse formato (e che per Locke includevano la libertà e l'uguaglianza di tutti gli individui nonché il diritto alla proprietà). Le idee di Locke diventarono il fondamento del sistema di valori dell'Illuminismo ed ebbero una grande influenza sullo sviluppo del pensiero politico ed economico moderno.

Il pensiero sociale tra fine '800 ed inizio '900 fu molto influenzato dal positivismo di Auguste Comte, il quale insisteva sul fatto che le scienze sociali dovessero ricercare leggi generali del comportamento umano in termini quantitativi, rifiutando le spiegazioni in termini di fenomeni soggettivi. Con la rivoluzione scientifica e l'Illuminismo comparve anche la

teoria economica e vi fu parallelamente l'ascesa della mentalità capitalistica. L'economia politica moderna trovò una formulazione organica con il contributo di Adam Smith (1723-1790), il quale propose che i lavoratori avrebbero gradualmente migliorato il loro lavoro ed aumentato la loro produttività grazie alle macchine ed introdusse il concetto di "mano invisibile" del mercato come elemento fondamentale che guida l'interesse individuale degli imprenditori, dei produttori e dei consumatori verso un armonioso miglioramento per tutti, in termini anche della ricchezza materiale, nonché il concetto collaterale che i prezzi siano determinati dall'equilibrio domanda/offerta. Poi, nella seconda metà del XIX secolo, vanno menzionate figure come John Stuart Mill (1806-1873) e soprattutto Karl Marx (1818-1883), con la sua poderosa critica sociale rivolta in modo particolare all'insorgente scenario capitalista. Marx capì che le forme capitalistiche di organizzazione sociale, se è vero che inizialmente avrebbero portato ad un aumento della produttività dei beni e ad un'accelerazione del processo di innovazione tecnologica, dall'altro lato avrebbero modificato le relazioni sociali in modo dialettico generando gravi recessioni e favorendo lo sviluppo del socialismo. Riguardo al pensiero marxiano, va sottolineato che le sue ampie vedute riguardo i fenomeni sociali gli permisero di trascendere la cornice cartesiana in diversi modi significativi. Infatti, Marx non adottò l'ideale classico dell'osservatore oggettivo ed imparziale, ma sottolineò fortemente il suo ruolo di attore, affermando che la sua analisi sociale era strettamente legata alla critica sociale e, benché spesso sostenesse l'opinione che lo sviluppo tecnologico determini un cambiamento sociale, ebbe profonde intuizioni riguardo le correlazioni tra tutti i fenomeni, vedendo la società come una totalità organica in cui ideologia e tecnologia hanno uguale peso.

Nonostante le idee rivoluzionarie di Marx e nonostante la grande depressione a cui andò incontro l'economia mondiale, tra fine '800 e inizio '900 la sorte del capitalismo fu tuttavia salvata grazie ad una serie di interventi economici e sociali effettuati da parte dei governi. Queste politiche erano basate principalmente sulla teoria economica di John Maynard Keynes (1883-1946) la quale suggerisce l'idea dell'economia

come attività politica, con la conseguente teorizzazione degli interventi governativi sull'economia, ma sempre all'interno di un quadro che può ancora essere definito di stampo cartesiano, in quanto si concentra sull'economia nazionale, dissociandola dalle rete economiche globali. Nella visione di Keynes si prendono in considerazione variabili macroscopiche come il reddito nazionale, il consumo e gli investimenti totali, il volume complessivo dell'occupazione, ecc... e, nell'ipotesi che tra di esse ci siano rapporti semplificati, si trova che queste risultano essere soggette a cambiamenti di breve periodo che possono essere influenzati da politiche appropriate.

Nel XX secolo, il pensiero economico è stato fortemente influenzato dal modello keynesiano. Oggi, i limiti della visione keynesiana risultano tuttavia evidenti: essa trascura completamente la struttura specifica dell'economia e la natura qualitativa dei suoi problemi, dissocia l'economia nazionale dalle reti economiche globali, non tiene conto degli accordi economici internazionali e dell'immenso potere politico delle multinazionali di oggi e ignora i costi sociali e ambientali delle attività economiche⁷.

In sostanza, possiamo dire che l'economia contemporanea è un insieme di concetti, teorie e modelli che, pur provenendo da varie epoche della storia economica, sono di fatto ancora *profondamente radicati nel paradigma meccanicistico cartesiano*. I loro approcci sono *frammentari e riduzionisti*, manifestano una preferenza per i modelli quantitativi astratti e non tengono conto che l'economia è soltanto uno degli aspetti di un intero tessuto ecologico e sociale, cosa che genera un profondo gap tra teoria e realtà economica effettiva. La caratteristica predominante dei modelli economici odierni (di stampo cartesiano) è l'assunto che sia possibile una crescita economica perpetua. L'obiettivo della maggior parte delle economie nazionali è quello di raggiungere una crescita illimitata del PIL (quel sistema nel quale tutte le attività economiche associate a valori monetari vengono aggregate indiscriminatamente

⁷ Cfr. F. Capra e P.L. Luisi, *Vita e natura. Una visione sistemica*, Aboca Edizioni, Sansepolcro, 2015, pp. 78-81.

ignorando tutti gli altri aspetti non monetari dell'economia) attraverso la continua accumulazione di beni. Il dilemma principale che mette in luce i maggiori problemi della nostra epoca sembra essere *l'illusione che sia possibile una crescita illimitata in un pianeta limitato*. Osservando lo stato del pianeta, oggi ciò che risulta più evidente è il fatto che *i problemi principali della nostra epoca – energia, ambiente, cambiamento climatico, sicurezza alimentare, sicurezza finanziaria – non possono essere compresi separatamente ma costituiscono problemi sistemici, vale a dire sono tutti interconnessi ed interdipendenti*.

D'altra parte, nei secoli dopo Cartesio e Newton, la visione del mondo come sistema meccanico composto di parti elementari ha influenzato le percezioni non solo dell'organismo umano e della società, ma anche delle organizzazioni umane all'interno della società (compresa la stessa organizzazione del lavoro). Prese infatti corpo "la metafora della macchina del management", basato sulla meccanicizzazione delle organizzazioni umane. Con l'affermarsi della metafora delle organizzazioni come macchine, si generarono *teorie meccaniciste del management* in cui ciascuna organizzazione veniva progettata come un assemblaggio di parti perfettamente combacianti e legate attraverso linee di comando e comunicazione definite. Nella seconda metà del XX secolo la metafora della macchina del management come sistema non vivente costituito da frammenti indipendenti ha continuato ad avere un profondo impatto. La visione meccanicistica delle organizzazioni, avendo come impulso principale quello di raggiungere l'efficienza delle operazioni attraverso un controllo di tipo gerarchico dall'alto verso il basso, presenta tuttavia dei limiti evidenti. Il limite più rilevante di questa visione sta nel fatto che, se si considera un'azienda come una macchina, allora è implicito che questa finirà di funzionare a meno che non venga periodicamente revisionata e ricostruita dall'esterno.

CAPITOLO II

Gli indizi fondamentali della crisi del paradigma meccanicistico-riduzionista

2.1. Il quadro generale della fisica moderna

La nuova fisica sviluppatasi nel XX secolo, costituita dalle due teorie della relatività (speciale e generale) e dalla meccanica quantistica, con tutte le applicazioni e le implicazioni che hanno condotto ad una rottura nei più svariati settori, ha fornito svariati elementi significativi che hanno sembrato condurre ad una rottura significativa nell'affermazione del meccanicismo.

La relatività speciale di Einstein (1905) ha modificato drasticamente le nostre nozioni di spazio e di tempo obbligandoci ad abbandonare le idee classiche di uno spazio assoluto come teatro dei fenomeni e di un tempo assoluto come dimensione separata dallo spazio. Nella teoria della relatività speciale, le coordinate dello spazio e del tempo possono cambiare nel passaggio da un sistema di riferimento ad un altro nel senso che dipendono dal suo stato di moto e, quindi, spazio e tempo non possono essere considerate come grandezze fisiche separate e indipendenti tra loro: il tempo scorre in modo diverso per osservatori dotati di diversi stati di movimento e anche le lunghezze non sono assolute ma dipendono dallo stato di moto dell'osservatore. Nonostante spazio e tempo siano intrinsecamente legati e nonostante il tempo non sia più un'entità assoluta e l'idea della simultaneità debba essere conseguentemente abbandonata, nella relatività speciale c'è però ancora un background prefissato che funziona come arena di tutta la fisica. È il teatro in cui ha luogo l'evoluzione, i cui attori sono particelle e campi, che non sono in grado di influenzare

il teatro. La visione newtoniana di un background fisso in cui ha luogo la fisica non è di fatto alterata dalla relatività speciale.

Se è vero che l'idea di un teatro fisso in cui hanno luogo i fenomeni non subisce un mutamento cruciale rispetto alla meccanica newtoniana, ciononostante, la relatività speciale, in virtù della connessione inseparabile di spazio e tempo, determina una conseguenza straordinaria che va a minare alcune fondamenta dell'approccio meccanicistico-riduzionista di Cartesio e Newton, modificando in modo determinante la nostra maniera di descrivere le particelle materiali: l'equivalenza di massa ed energia. La scoperta che la massa è una forma di energia comporta che le particelle materiali devono essere interpretate come configurazioni dinamiche, pattern di attività che hanno un aspetto spaziale ed uno temporale. Il loro aspetto spaziale le fa apparire come oggetti con una certa massa, quello temporale come processi che coinvolgono una quantità equivalente di energia. Perciò, alla luce della teoria della relatività speciale, l'essere della materia e la sua attività non possono essere separati: non sono altro che due aspetti della stessa realtà spazio-temporale.

Un più rilevante cambiamento di paradigma riguardo al palcoscenico dei processi fisici è avvenuto successivamente con la relatività generale. Con questa teoria, che ha avuto la sua formulazione definitiva nel 1915, Einstein ha dimostrato che la dinamica del campo gravitazionale e di ogni altro oggetto dinamico è completamente relazionale, nel senso aristotelico-cartesiano. L'idea, semplice, bellissima e folgorante, che costituisce il fulcro della relatività generale, sta nell'aver mostrato che lo spazio-tempo di Newton equivale al campo gravitazionale (o, viceversa, che è la stessa cosa, che il campo gravitazionale equivale allo spazio-tempo di Newton), con la differenza che, rispetto allo spazio-tempo newtoniano, il campo gravitazionale è una sorta di mollusco flessibile, si muove e ondeggia. Questa teoria predice che la materia curva lo spazio-tempo e quindi che lo spazio-tempo non costituisce più un background fisso. Più precisamente, possiamo dire che in presenza di materia-energia lo spazio-tempo diventa curvo mentre in assenza di materia-energia sarebbe piatto. La distribuzione di materia-energia in una certa regione dello spazio-tempo determina delle modifiche nelle proprietà geometri-

che di quella regione: la gravità è appunto la curvatura della struttura spazio-temporale prodotta dalla distribuzione di materia ed energia. Il contenuto qualitativo essenziale di tutta la relatività generale può essere in sostanza riassunto nei seguenti immaginifici termini: ¹«Lo spazio-tempo agisce sulla materia-energia dicendole come muoversi; la materia-energia reagisce sullo spazio-tempo dicendogli come curvarsi». Di conseguenza, con la relatività generale, il teatro in cui avvengono i fenomeni fisici viene promosso ad attore attivo. Questo costituisce un cruciale cambiamento di paradigma rispetto al quadro newtoniano: lo spazio-tempo non è più qualcosa di prefissato, immune da cambiamenti e si deve incorporare la gravitazione nella geometria dello spazio-tempo, la geometria deve essere considerata un'entità fisica vera e propria che interagisce con la materia. In altre parole, per quanto riguarda la concezione dello spazio e del tempo, *la relatività generale implica un fondamentale relazionismo: la dinamica del campo gravitazionale, o di altri campi come il campo elettromagnetico e ogni altro oggetto dinamico, è totalmente relazionale*. La relatività generale descrive il mondo come un set di campi interagenti, di cui uno è proprio il campo gravitazionale e il moto può essere definito solo posizionando questi oggetti dinamici l'uno rispetto all'altro. In estrema sintesi, possiamo allora concludere che le due teorie della relatività (relatività speciale e generale) hanno messo in luce *il carattere intrinsecamente dinamico di tutto il tessuto cosmico*, vale a dire di spazio-tempo, materia e di tutti i campi fisici, evidenziando che la sua attività è l'essenza stessa del suo essere (e che la relatività generale porta ad un paradigma relazionale in cui il background spazio-temporale non risulta essere più qualcosa di prefissato, immune da cambiamenti).

Per quanto riguarda l'arena, il background dei processi, è tuttavia la rivoluzione quantistica che ha determinato, a parere dell'autore, le conseguenze più profonde e feconde portando ad una revisione significativa delle idee su cui è basata la fisica newtoniana. L'esplorazione della struttura microscopica della materia, vale a dire del mondo atomico e suba-

¹ F. Toscano, *Il genio e il gentiluomo*, Sironi, Milano, 2004, p. 241.

tomico portò gli scienziati a toccare con mano una realtà bizzarra ed inaspettata che demolì le basi della loro visione del mondo e li costrinse a pensare in modo del tutto nuovo. Ogni volta che gli scienziati ponevano una domanda alla natura, questa sembrava rispondere con un paradosso e, più provavano a chiarire la situazione, più i paradossi diventavano evidenti. La scoperta della natura duale (corpuscolare ed ondulatoria) della materia e del ruolo cruciale della probabilità nell'ambito dei processi microscopici ha frantumato la nozione classica di oggetti solidi. A livello subatomico, gli oggetti materiali solidi della fisica classica sembrano essere ricondotti a schemi di probabilità, simili ad onde, che sono probabilità delle loro interconnessioni. I processi di misura in ambito quantistico evidenziano che le particelle subatomiche non hanno significato come entità isolate, ma possono essere comprese solo come *interconnessioni tra vari processi di osservazione e misurazione*.

La meccanica quantistica, scoperta negli anni '20 da alcuni eminenti fisici che tentavano di ricucire lo strappo tra diversi fatti sperimentali (riguardanti lo studio del mondo microscopico), assai bizzarri ed inquietanti, e la visione di stampo newtoniano del mondo come macchina precisa governata da leggi esatte, che a quel punto risultavano assolutamente incompatibili, può essere considerata la teoria della natura che ha contribuito maggiormente a modificare la nostra concezione del mondo, introducendo molti più scenari e prospettive di quelli offerti da ogni teoria fisica precedente. Ciononostante, va tuttavia precisato che, in realtà, questa teoria, nella sua formulazione originaria, di fatto non portò all'abbandono del meccanicismo newtoniano, quanto piuttosto ad una profonda revisione concettuale dei suoi ingranaggi.

Nonostante dagli esperimenti fosse apparso subito evidente che le particelle subatomiche non erano cose ma interconnessioni tra cose e che, queste a loro volta, erano interconnessioni tra altre cose e così via, nonostante insomma fosse subito emerso il fatto ineludibile che, ad un livello fondamentale, il mondo non poteva essere analizzato in termini di unità esistenti indipendentemente l'una dall'altra, originariamente i fisici hanno evitato di attribuire un ruolo primario all'idea che il mondo atomico dovesse essere visto come una rete complessa di relazioni tra le

varie parti di un tutto indiviso, in cui il comportamento di una particella è determinato dalle sue connessioni non-locali con la totalità, cercando invece delle scappatoie, le quali peraltro hanno generato ulteriori problemi e paradossi.

La versione della meccanica quantistica sviluppata nel magico biennio 1926-1927 dai suoi padri fondatori (Niels Bohr (1885-1962), Werner Heisenberg (1901-1976), Max Born (1882-1970), ecc..), vale a dire dalle cosiddette scuole di Copenaghen e Göttingen, nota anche come interpretazione ortodossa, o di Copenaghen, della meccanica quantistica, ha postulato che l'evoluzione di un sistema quantistico quando non viene osservato è deterministica, mentre quando c'è un'interazione tra il sistema quantistico e un apparato di misura, le variabili classiche che caratterizzano l'apparato di misura subiscono dei "salti" casuali imprevedibili regolati dalle variabili del sistema quantistico e questo fa sì che lo stato finale del sistema quantistico si può determinare solo probabilisticamente². E così emerge l'aspetto di gran lunga più folle della meccanica quantistica proposta dai suoi padri fondatori, che genera paradossi su paradossi: *la mescolanza di rigoroso determinismo di stampo newtoniano e di inquietante indeterminazione probabilistica* (la cui presenza sembra richiesta allorché è necessario spiegare i risultati degli esperimenti). Dall'interpretazione ortodossa della meccanica quantistica si deduce che l'atto stesso della misurazione perturba in modo imprevedibile il sistema in esame, interrompendo appunto la sua evoluzione deterministica. Ma in questo modo si genera una evidente contraddizione interna nella nostra maniera di studiare il mondo: un fenomeno non può essere deterministico solo quando nessuno lo sta osservando!

L'interpretazione ortodossa della meccanica quantistica impone di rinunciare ai concetti di causalità e continuità del movimento a tutti i livelli possibili. Questa rinuncia implica quello che Bohr definì il "tratto

² D. Fiscaletti, *I fondamenti nella meccanica quantistica. Un'analisi critica dell'interpretazione ortodossa, della teoria di Bohm e della teoria GRW*, CLEUP, Padova, 2003; D. Fiscaletti, *I gatti di Schrödinger. Meccanica quantistica e visione del mondo*, Muzzio Editore, Roma, 2007; D. Fiscaletti, *I gatti di Schrödinger*, Editori Riuniti University Press, Roma, 2015.

irrazionale” del processo di trasferimento di un quanto da un sistema all’altro. Con ciò si intende che non si possono mai concepire razionalmente i dettagli del processo: se si abbandonano la continuità e la causalità, non si è più in grado di descrivere o anche soltanto di pensare connessioni ben definite tra i fenomeni in un istante dato e quelli in un istante precedente. Di conseguenza non esiste maniera di esprimere con precisione le qualità e le proprietà che definiscono le modalità d’essere dei singoli micro-oggetti, né di formulare leggi precise che valgano per questi micro-oggetti.

Vediamo allora di approfondire più in dettaglio questi aspetti.

2.2. Il problema della misurazione e l’interpretazione ortodossa della meccanica quantistica

Le ricerche condotte nel secolo scorso sul comportamento delle particelle subatomiche hanno portato ad una serie di risultati davvero singolarissimi e stupefacenti: in primo luogo, i risultati delle operazioni di misura risultano essere fundamentalmente aleatori; secondariamente, nonostante gli oggetti materiali occupino sempre un certo spazio, a livello microscopico esistono situazioni in cui essi non sembrano occupare alcuna particolare regione di spazio; terzo, ed è forse la cosa più sorprendente, le leggi fondamentali che regolano il comportamento degli oggetti fisici ‘ordinari’ non valgono, sotto qualche aspetto essenziale, per gli oggetti che fungono da ‘strumenti di misura’ o da ‘osservatori’. Queste sono le principali conclusioni a cui sono giunti, nell’analisi dei processi atomici e subatomici, i fondatori della meccanica quantistica e che per molto tempo hanno rappresentato il dogma più o meno ufficiale della fisica teorica.

Mentre in meccanica classica un sistema fisico è descritto da un certo numero di grandezze fisiche (per esempio la sua posizione e la sua velocità) e i valori di queste grandezze determinano, ad ogni istante, lo stato del sistema, in meccanica quantistica le variabili di un sistema non risultano avere un valore ben definito in ogni istante. In primo luogo, vale un principio fondamentale, il principio di indeterminazione di Heisen-

berg, il quale stabilisce che ogni sistema microscopico possiede coppie di grandezze fisiche (come per esempio la posizione e l'impulso) incompatibili, vale a dire che non si possono conoscere simultaneamente con assoluta precisione (più precisamente che il prodotto delle imprecisioni con cui si possono misurare le due grandezze non può mai scendere sotto un valore fissato dalla costante di Planck, la costante fondamentale della natura, che è di 6,625 per 10 alla meno 34 Joule per secondi, che assume un ruolo cruciale nel mondo microscopico mentre è del tutto trascurabile nell'ambito della fisica classica). E poi, soprattutto, c'è il fatto cruciale per cui ogni particella subatomica, per esempio un elettrone, se non interagisce con un sistema esterno sensibile alla sua posizione, può essere in uno stato che indica una sua sovrapposizione di presenza in diverse posizioni, in altri termini in una *sovrapposizione quantistica* di stati differenti, macroscopicamente distinguibili e percettivamente diversi. Consideriamo, per esempio, un fascio di particelle (per esempio, fotoni o elettroni) che vengono inviate, separatamente ed indipendentemente l'una dall'altra, verso una doppia fenditura per poi essere rivelate su uno schermo, dove si osserva una figura di interferenza costituita da bande di interferenza chiare e scure (si tratta del famoso esperimento di interferenza da doppia fenditura, che costituisce l'equivalente dell'esperimento originariamente effettuato dal medico inglese Thomas Young nel 1802). All'interno di un apparato di questo tipo, la singola particella si trova in una sovrapposizione della possibilità che attraversi la fenditura superiore e della possibilità che attraversi quella inferiore (le bande di interferenza chiare e scure si possono infatti interpretare come una sovrapposizione di onde che hanno attraversato entrambe le fenditure). Inoltre, in questo esperimento, la fisica quantistica ci pone di fronte a un'alternativa, cui sembra non si possa sfuggire: non è possibile osservare la figura di interferenza della doppia fenditura e contemporaneamente conoscere la traiettoria della singola particella; non si può assolutamente parlare della traiettoria di una singola particella se non si esegue effettivamente un esperimento apposito, che permette di determinarla. Infatti, se eseguiamo una misurazione, se installiamo dei rivelatori appositi, constatiamo sempre che ogni parti-

cella imbocca una traiettoria o l'altra ma allora, in presenza di questa informazione sulla traiettoria, non compare più la figura di interferenza. Esperimenti come questo indicano chiaramente che in meccanica quantistica lo stato di un sistema fisico non è specificato dando semplicemente il valore delle sue variabili ma abbiamo a che fare con una nuova nozione di stato. La spiegazione classica di un esperimento di questo tipo ipotizza l'esistenza di un'onda che attraversa entrambe le fenditure, causando l'interferenza, cioè il rafforzamento nelle zone chiare e l'annullamento in quelle scure (le bande chiare si formano quando le creste dell'onda che ha attraversato la fenditura superiore arrivano sullo schermo insieme alle creste provenienti dalla fenditura inferiore, generando in questo modo aree di grande ondità, mentre le bande scure si generano quando le creste provenienti da una fenditura toccano lo schermo assieme alle valli provenienti dall'altra, determinando così aree di ondità nulla). Nella cosiddetta meccanica ondulatoria, la versione della meccanica quantistica sviluppata da Erwin Schrödinger – originariamente proposta alla conferenza Solvay del 1927 – in cui le particelle sono pacchetti d'onda localizzati che si muovono nello spazio all'interno di uno schema in cui la realtà fondamentale è ondulatoria, il ruolo dell'onda è assunto dalla funzione d'onda, così chiamata dallo stesso scopritore. Nell'esperimento della doppia fenditura si parla in sostanza di sovrapposizione delle due funzioni d'onda che si ottengono quando è aperta ciascuna delle due fenditure singolarmente. Ma qui, nell'ambito della formulazione ortodossa della meccanica quantistica, la funzione d'onda non è assimilabile ad un'onda materiale del tipo di quelle del mare, bensì ha il significato di un'onda di probabilità: indica la probabilità di trovare la particella in una data regione dello spazio all'istante di tempo considerato³. Così, nel caso di una particella che ad un certo istante si trova in una data regione A, la funzione d'onda ad essa associata è in quell'istante nulla in tutto lo spazio, tranne nella regione A,

³ In base ad un risultato ottenuto da Max Born, noto come postulato interpretativo di Born, il modulo quadrato della funzione d'onda rappresenta la probabilità di trovare la particella, all'istante in esame, nel punto in considerazione.

dove ha valore non nullo. La funzione d'onda soddisfa poi una condizione, detta di normalizzazione, la quale, nell'interpretazione standard, corrisponde ad una sorta di conservazione della probabilità totale: la probabilità di trovare la particella in esame in qualche parte dell'universo è uguale a 1.

Schrödinger riuscì inoltre a scoprire un'equazione, di natura deterministica e lineare, con la quale, in determinate circostanze e in ambito non relativistico (vale a dire a velocità trascurabili rispetto alla velocità della luce), è possibile calcolare come la funzione d'onda del sistema fisico in considerazione si comporti concretamente, e come evolva nel corso del tempo, in un determinato esperimento o per la descrizione del fenomeno in esame. *L'equazione di Schrödinger* può essere considerata sicuramente una delle leggi più importanti che siano mai state scoperte, permettendo di comprendere il comportamento di molti materiali e sistemi fisici, come per esempio i semiconduttori e i laser. Tutte le prove sperimentali che abbiamo a disposizione hanno messo in luce il fatto che l'evoluzione delle funzioni d'onda di ciascun sistema fisico microscopico isolato avviene conformemente a questa legge di natura lineare e deterministica. Applicando questa legge ai processi di misura, invece, sembra che si ottengono delle conclusioni contraddittorie. A questo proposito, il problema cruciale è rappresentato dal principio di sovrapposizione, il fatto che gli oggetti quantistici possono esistere in stati di sovrapposizione di diverse possibilità.

Per approfondire più in dettaglio questo punto, consideriamo degli esperimenti sugli elettroni in cui vengono misurate due componenti della grandezza fisica comunemente chiamata spin⁴. Per semplicità chiamiamo queste componenti spin "orizzontale" e spin "verticale". Per quanto ne sappiamo, lo spin orizzontale di un elettrone può assumere solo due valori e lo stesso si verifica per lo spin verticale. Chiamiamo "destra" e "sinistra" i due possibili valori dello spin orizzontale e "su" e

⁴ Lo spin è la grandezza fisica che, in meccanica quantistica, si introduce per descrivere la rotazione della particella subatomica in considerazione attorno ad un asse passante per il suo centro, è una sorta di momento angolare che descrive la rotazione intrinseca della particella.

“giù” i due possibili valori dello spin verticale. Con le tecniche attuali è possibile misurare con facilità e precisione lo spin orizzontale e verticale degli elettroni. Di solito i dispositivi per la misurazione dello spin modificano la direzione del moto degli elettroni sulla base del loro valore di spin. Chiamiamo questi dispositivi “scatola orizzontale” e “scatola verticale”. Un altro fatto empirico è che non c’è correlazione tra il valore dello spin orizzontale e il valore dello spin verticale degli elettroni. Per esempio, se nell’apertura di ingresso di una scatola verticale viene introdotto un gran numero di elettroni con spin destro, allora esattamente metà di essi (in senso statistico) esce dall’apertura “su” e metà dall’apertura “giù”. Lo stesso si verifica per gli elettroni con spin sinistro che vengono immessi in una scatola verticale. In modo analogo, se nell’apertura di ingresso di una scatola orizzontale viene introdotto un gran numero di elettroni con spin su (oppure con spin giù), allora metà di essi esce dall’apertura “destro” e metà dall’apertura “sinistro”.

Fatte queste premesse, consideriamo il seguente esperimento. Immaginiamo una scatola che misuri lo spin verticale degli elettroni; da essa emergono, per quanto detto, elettroni con spin su nella traiettoria “su” ed elettroni con spin giù nella traiettoria “giù”. Collochiamo poi su questi due cammini due pareti riflettenti in modo che le due traiettorie si incrocino in un altro punto (vedi figura 2.a)*. Le pareti possono essere costruite in modo tale da non modificare minimamente le proprietà di spin degli elettroni. Collochiamo infine nel punto di intersezione delle due traiettorie una “scatola nera” la quale, sempre senza alterare i valori di spin, le fonde di nuovo in una sola traiettoria⁵.

*AVVERTENZA: tutte le immagini del testo, con le rispettive didascalie, sono raggruppate nel fascicolo a colori allegato al volume. Nel nostro sito www.asterios.it abbiamo anche creato un portfolio in digitale con tutte le immagini e, per una migliore ricerca, con la possibilità di reindirizzamento verso la fonte.

⁵ Vedi, per esempio: D.Z. Albert, “L’alternativa di Bohm alla meccanica quantistica”, *Le Scienze*, n. 311, 1994; D.Z. Albert, *Meccanica quantistica e senso comune*, Adelphi, Milano, 2000; D. Fiscaletti, *I gatti di Schrödinger. Meccanica quantistica e visione del mondo*, Franco Muzzio Editore, Roma, 2007; D. Fiscaletti, *I gatti di Schrödinger*, Editori Riuniti University Press, Roma, 2015.

Supponiamo di introdurre nella scatola verticale, uno alla volta, un gran numero di elettroni con spin destro. Allora, in base a quanto detto sopra, metà di questi elettroni uscirà dall'apertura "su" e seguirà la traiettoria contrassegnata con "su", mentre l'altra metà imbrocherà la traiettoria "giù". Consideriamo la prima metà. Lungo il percorso che va dalla scatola verticale al punto di uscita nulla può influire sui valori dello spin verticale degli elettroni, per cui ci aspettiamo che questi usciranno dal dispositivo tutti con spin su. Di questi il 50% avrà spin destro e il 50% avrà spin sinistro. In modo analogo, considerando gli elettroni che hanno imboccato la traiettoria "giù", questi dovranno uscire dal dispositivo tutti con spin giù. Di conseguenza, di questi il 50% avrà spin destro e il 50% spin sinistro. Componendo queste previsioni ci aspettiamo che, per qualunque insieme di elettroni con spin destro introdotti nel dispositivo, all'uscita metà di essi dovrà avere spin destro e metà spin sinistro. Quando però l'esperimento viene effettuato in pratica si osserva qualcosa di strano: degli elettroni con spin destro che vengono inizialmente introdotti nel dispositivo, quelli che alla fine escono con spin destro sono il 100%.

Modifichiamo adesso un po' l'esperimento, inserendo una barriera, per esempio sulla traiettoria "su", in modo tale che tutti gli elettroni che percorrono la traiettoria "su" siano bloccati e quindi solo quelli della traiettoria "giù" attraversino la scatola nera (vedi figura 2.b). Che cosa ci si deve aspettare in questo caso a proposito dello spin orizzontale degli elettroni che escono dalla scatola nera (e che sono la metà di quelli entranti)?

Quando non c'era la barriera, il 100% degli elettroni entranti con spin destro usciva ancora con spin destro, e questo a prescindere dalla traiettoria seguita. Quindi poiché la presenza o l'assenza della barriera sulla traiettoria "su" non può influire sugli elettroni della traiettoria "giù", il restante 50% dovrebbe essere formato tutto da elettroni con spin destro. L'esperimento fornisce invece un risultato diverso: gli elettroni in uscita sono sì ridotti della metà ma di questi, metà ha spin destro e metà spin sinistro.

Com'è possibile interpretare le discrepanze tra i risultati di questi

esperimenti e le nostre attese? Consideriamo un singolo elettrone che attraversa il dispositivo quando la barriera è assente. E' evidente che non può aver seguito né la traiettoria "su" né la traiettoria "giù" perché gli elettroni che imboccano una di queste strade hanno una distribuzione 50%-50% dello spin orizzontale. Ma non può neanche aver percorso entrambe le traiettorie in quanto se andiamo a vedere dove si trova l'elettrone mentre questo sta attraversando l'apparecchiatura, in metà dei casi lo troveremo sulla traiettoria "su" mentre sulla traiettoria "giù" non vi sarà nulla; nell'altra metà dei casi lo troveremo sulla traiettoria "giù" e non si osserverà nulla sulla traiettoria "su". Ma non può neanche aver seguito nessuna delle due traiettorie perché se le sbarriamo entrambe non passa nulla. Insomma, un elettrone che viene immesso in questo dispositivo non è vero che segue la traiettoria "su", non è vero che segue la traiettoria "giù", non è vero che le segue entrambe e non è vero che non segue nessuna delle due traiettorie. Si potrebbe pensare che è come se, contemporaneamente, l'elettrone in parte seguisse la traiettoria "su" e in parte seguisse la traiettoria "giù". In altre parole, visto che considerando un qualunque insieme di elettroni con spin destro – o spin sinistro – immessi in una scatola verticale, metà di questi imboccano la traiettoria "su" e metà la traiettoria "giù", si potrebbe affermare che il singolo elettrone (entrante con spin destro, o con spin sinistro), all'uscita da una scatola verticale ha una probabilità del 50% di seguire la traiettoria "giù" e una probabilità del 50% di seguire la traiettoria "su". I fisici dicono allora che l'elettrone in considerazione è in una *sovrapposizione del passare per la traiettoria "su" e del passare per la traiettoria "giù"* (in questo caso con uguali pesi per le due traiettorie in quanto, appunto, come già detto, nell'esperimento in esame, degli elettroni uscenti dalla scatola verticale metà imboccano la traiettoria "su" e metà imboccano la traiettoria "giù").

Ora, va sottolineato che i risultati degli esperimenti appena analizzati sono legati a fattori puramente casuali e come tali non si possono spiegare sulla base dell'equazione di Schrödinger, cioè della legge del moto, che è deterministica. Infatti, l'equazione di Schrödinger prevede che se l'elettrone si trova inizialmente in uno stato che è dato da una sovrappo-

posizione (cosa che succede, per esempio, all'uscita di una scatola verticale nel senso che qui, come si è appena visto, l'elettrone è in uno stato dato dalla sovrapposizione del passare per la traiettoria "su" e del passare per la traiettoria "giù"), quando si effettua una misurazione della posizione di quell'elettrone, il dispositivo finirà certamente anch'esso in una sovrapposizione. In altri termini, se l'elettrone si trova inizialmente in una sovrapposizione del passare per la traiettoria "su" e del passare per la traiettoria "giù" (con pesi uguali per ciascuna delle due traiettorie), l'equazione lineare del moto prevede che dopo la misurazione si avrà una sovrapposizione di presenza dell'elettrone sulla traiettoria "su" e sulla traiettoria "giù" (con pesi uguali per le due traiettorie). Sulla base dell'equazione di Schrödinger, l'indice dell'apparato misuratore dovrebbe indicare che l'elettrone dopo l'operazione di misura è come se si trovasse in parte sulla traiettoria "su" e in parte sulla traiettoria "giù" (precisamente per il 50% sulla traiettoria "su" e per il 50% sulla traiettoria "giù"). Lo stato finale previsto dall'equazione di Schrödinger è quindi uno stato di difficile interpretazione, veramente ambiguo: infatti si tratta di uno stato fisico in cui in pratica non ci sono fatti relativi a ciò che l'indice dello strumento di misura sta indicando. Insomma, sulla base delle equazioni dinamiche, il dispositivo di misura dovrebbe indicare che l'elettrone non è vero che ha seguito il percorso "su", non è vero che ha seguito il percorso "giù", non è vero che ha seguito entrambi i percorsi e non è vero che non ne ha seguiti nessuno dei due. Quando si effettuano operazioni di misura, com'è noto, gli apparati indicano invece che l'elettrone si trova sempre in un dato punto oppure in un altro (nel caso in esame, quindi, l'elettrone viene sempre trovato o nella traiettoria "su", o nella traiettoria "giù"). Questo significa che nelle operazioni di misura, se uno si basa sull'equazione di Schrödinger, le sovrapposizioni non sembrano fornire una descrizione veritiera di ciò che accade. Il concetto di sovrapposizione, unito all'equazione di Schrödinger, determina così quello che può essere considerato uno dei problemi fondamentali che riguardano i fondamenti della meccanica quantistica, vale a dire il cosiddetto *problema della misurazione*.

Per trattare il problema della misurazione, e quindi per poter ripro-

durre il fatto che in ogni operazione di misura di qualsiasi grandezza fisica si ottiene sempre un unico, ben definito risultato, gli esponenti delle scuole di Copenaghen e Göttingen postularono che *occorre distinguere*, per quanto riguarda quello che succede nel mondo, *due categorie di leggi*; un aspetto decisamente singolare di questa formulazione è che *le leggi di una di queste due categorie* (quelle espresse sotto forma di equazioni lineari e che sono deterministiche) *valgono quando i sistemi fisici sotto studio non vengono osservati direttamente, mentre quelle dell'altra categoria valgono quando vengono osservati*. Queste leggi della seconda categoria hanno una natura esplicitamente probabilistica. Esse operano nel seguente modo. Per esempio, se si misura la posizione di un elettrone in uscita da una scatola verticale, il quale all'inizio sia in una sovrapposizione di presenza nella traiettoria "su" e nella traiettoria "giù" (con uguali pesi), si richiede che vi sia una probabilità del 50% di trovarlo sul percorso "su", vale a dire che finisca in uno stato in cui il dispositivo indica che l'elettrone ha seguito il percorso "su", e una probabilità del 50% di trovarlo nel percorso "giù", vale a dire che finisca in uno stato in cui il dispositivo indica che l'elettrone ha seguito il percorso "giù". In altri termini, se si misurasse la posizione di questo elettrone ci sarebbe una probabilità del 50% che durante la misurazione la funzione d'onda dell'elettrone venisse alterata in modo da assumere un valore nullo ovunque tranne che nel percorso "su" e una probabilità del 50% che la funzione d'onda venisse alterata in modo da assumere un valore nullo ovunque tranne che nel percorso "giù" (questa alterazione è chiamata dai fisici "*collasso della funzione d'onda*", o "*riduzione del pacchetto d'onde*").

Per spiegare quello che avviene nei processi di misurazione, gli esponenti delle scuole di Copenaghen e Göttingen introdussero così il cosiddetto *postulato del "collasso della funzione d'onda"*: quando si misura un'osservabile A, la funzione d'onda del microsistema in considerazione collassa nello stato specificato dal risultato della misura. In questa formulazione, lo stato finale del microsistema non è predicibile con certezza: solo a misurazione avvenuta, e noto il risultato della misura, è possibile conoscere lo stato del sistema.

Come si fa a distinguere le situazioni in cui valgono le leggi della prima categoria da quelle in cui valgono le leggi della seconda? I fondatori della meccanica quantistica si limitarono a dire che questa distinzione ha a che fare con la differenza che sussiste tra 'misurazione' e 'fenomeno fisico ordinario' ossia tra chi osserva e ciò che è osservato, tra soggetto e oggetto. In sostanza, i seguaci dell'interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica postularono che *tra la dinamica (descritta dall'equazione di Schrödinger) e il postulato del collasso esiste un'ineludibile contraddizione*: l'equazione di Schrödinger è erronea per quanto riguarda ciò che avviene quando c'è una misurazione, un'osservazione diretta del sistema quantistico in considerazione, pur essendo corretta su tutto il resto; e l'elemento cruciale che è all'origine di questi fatti può essere considerato il concetto di sovrapposizione quantistica.

Per quel che riguarda il principio di sovrapposizione, un fatto cruciale è che esso porta a delle situazioni paradossali allorché viene applicato alla trattazione dei sistemi macroscopici. A questo proposito, l'assurdità del paradosso dell'osservazione quantistica fu analizzata in modo approfondito e con deliziosa ironia da Erwin Schrödinger, nel suo famoso esperimento mentale del gatto, in cui mostrò come la situazione oggettiva di un gatto che si trova all'interno di una scatola assieme ad una sorgente radioattiva che ha una probabilità del 50% di disintegrarsi in un'ora sia rappresentata da uno stato risultante dalla sovrapposizione di morte e vita. Nel caso del gatto di Schrödinger il principio di sovrapposizione è quindi, per così dire, portato alle sue estreme conseguenze. La comicità della faccenda illustrata da Schrödinger è evidente e dimostra chiaramente come nell'investigazione dei processi di misurazione ci sono delle cose che ancora non abbiamo compreso. Come accade che, quando eseguiamo un'osservazione, cioè se osserviamo il gatto, lo troviamo in uno stato preciso, cioè o morto o vivo? Quando il gatto viene osservato, a causa del collasso della funzione d'onda, viene sì sempre trovato o morto o vivo (e quindi la sovrapposizione scompare) ma non è chiaro perché durante la misurazione si verifica proprio la possibilità osservata e non l'altra.

D'altra parte, il principio di sovrapposizione è stato ampiamente di-

mostrato e la fisica quantistica è una teoria degna di questo nome proprio grazie all'esattezza delle sue predizioni empiriche e alle loro conferme, straordinariamente precise. In pratica, le regole probabilistiche introdotte dai fisici della scuola di Copenaghen descrivono in modo corretto gli esperimenti e in tal senso corrispondono a verità. Di conseguenza, dobbiamo porci i seguenti interrogativi cruciali. Com'è possibile che partendo da una legge certa si possa giungere ad un risultato sperimentale incerto? Inoltre, dove può essere collocata la linea di confine tra ciò che è classico e ciò che è quantistico?

2.3. Il confine tra mondo classico e mondo quantistico e la non-località

Sulla base dei risultati sperimentali, i sistemi quantistici sembrano abitare un livello esotico, indefinito e la teoria quantistica, quale è stata sviluppata dai suoi padri fondatori, è formulata in un modo tale da implicare un confine drammatico tra il dominio classico e quello quantistico. In altre parole, nell'interpretazione di Copenaghen, la distinzione tra microscopico e macroscopico, così come quella tra livello classico e livello quantistico, mancano di una definizione precisa.

In particolare, Bohr riteneva che la descrizione fornita dalla teoria quantistica fosse completa (vale a dire che tutto ciò che c'è da sapere riguardo ad un sistema fisico in qualsiasi istante assegnato possa essere ricavato dalla sua funzione d'onda) e insisteva sulle seguenti quattro importanti caratteristiche della fisica quantistica⁶:

(a) *l'impossibilità di separare il comportamento degli oggetti atomici dall'interazione con apparati di misura atti a definire le condizioni sotto le quali i fenomeni si manifestano;*

(b) *il fatto che il formalismo quantistico non consente rappresentazioni mentali o basate sul senso comune dei fenomeni atomici, ma mira direttamente a stabilire relazioni tra le osservazioni, ottenute sotto con-*

⁶ N. Bohr, *Atomic Physics and Human Knowledge*, Science Editions, New York, 1961.

dizioni ben definite;

(c) la necessità, in ogni resoconto dell'esperienza fisica, di descrivere sia le condizioni sperimentali sia le osservazioni per mezzo degli stessi mezzi di comunicazione usati nella fisica classica;

(d) il fatto che dobbiamo fare i conti con una scelta arbitraria, tra numerose possibilità, sulla parte della natura che ci proponiamo di investigare.

I quattro punti di Bohr qui elencati possono essere considerati un po' gli elementi cardine che stanno alla base dell'interpretazione di Copenhagen nello studio dei processi atomici.

Nell'ambito dell'interpretazione ortodossa della meccanica quantistica, in base a quanto stabilito da Bohr, proprietà quantistiche ed oggetti quantistici esistono soltanto se ci sono corrispondenti apparati classici di misura con i quali interagiscono: si potrebbe dire, usando delle parole del fisico tedesco Gunther Lüdwig, che "solo oggetti classici esistono realmente: microsistemi o oggetti quantistici costituiscono solo relazioni tra macrosistemi classici"⁷. Questa è l'idea fondamentale che caratterizza la filosofia operativa a cui si ricorre nel dominio quantistico, all'interno dell'interpretazione standard.

In altre parole, per Bohr non ha alcun significato porsi la domanda: prima di una misura un oggetto quantistico che cosa è? E' un'onda o una particella? Per Bohr esistono solo l'esperimento e i suoi risultati, che vanno interpretati in senso classico, in quanto è questo che l'osservatore rileva, sottoforma di onde o di particelle.

Per esempio, un elettrone, da questo punto di vista, può essere visto come una relazione tra i seguenti complessi oggetti macroscopici: una sorgente di elettroni, le operazioni connesse alla loro preparazione e il luogo dove gli elettroni vengono rivelati (per esempio, uno schermo). Alcune operazioni sulla sorgente elettronica riguardano la preparazione della funzione d'onda dell'elettrone. L'apparizione di una macchia di

⁷ G. Lüdwig, *An Axiomatic Basis for Quantum Mechanics*, volumi 1 e 2, SpringerVerlag, Berlino, 1985.

elettroni su uno schermo è ciò che si verifica in seguito ad una misura. Il fenomeno riguardante l'apparizione di un singolo elettrone in un ben determinato punto dello spazio non è predicibile, nel senso che non è possibile predire con certezza la posizione dell'elettrone. Ma ciononostante è determinato dalla sorgente di elettroni, in quanto senza di questa non si genera nessuna relazione. Se eseguiamo la preparazione dell'elettrone in un dato stato iniziale molte volte, e usiamo l'equazione di Schrödinger per determinare lo stato dell'elettrone ad istanti successivi, allora possiamo effettivamente predire la frequenza della distribuzione di singoli eventi di rivelazione sullo schermo e a questo proposito è importante enfatizzare che esiste uno stretto determinismo.

In questo quadro, la funzione d'onda non descrive qualche oggetto esistente, ma gli apparati di preparazione e di misura. Questa è la ragione per cui Bohr non amava asserzioni come "le proprietà dell'oggetto quantistico emergono come definite in una misura", perché qui, ad un livello fondamentale, non c'è nessun oggetto – per Bohr non esiste un mondo quantistico, ma c'è solo una descrizione fisica astratta – e, se per effettuare la stessa misurazione utilizziamo un altro strumento, troveremo che al sistema in esame può corrispondere un'altra proprietà⁸. In questo schema, *cambiamenti della funzione d'onda sulla base dell'equazione di Schrödinger o in seguito al collasso non costituiscono eventi oggettivi riguardanti l'oggetto quantistico inteso come qualcosa avente un'esistenza fisica primaria ma sono solo regole matematiche per calcolare le probabilità di ottenere certi valori di alcune osservabili in operazioni di misura eseguite mediante appropriati strumenti.*

Per chiarire ancora meglio questo punto, consideriamo per esempio il processo di osservazione di un atomo. In un tale esperimento – sostiene Bohr – i quanti attraverso i quali l'apparato di osservazione interagisce con l'atomo modificano quest'ultimo in un modo imprevedibile, incontrollabile e indescrivibile. In un certo senso, si può dire che ogni dispositivo diverso crea un atomo di tipo diverso; prima di una misurazione l'atomo non possiede oggettivamente nessuna proprietà. Nell'interpre-

⁸ N. Bohr, *Atomic Physics and Human Knowledge*, Science Editions, New York, 1961.

tazione ortodossa, l'unico modo che un atomo ha di esistere è quello di essere osservato, l'atomo non ha insomma nessuna proprietà quando non viene osservato.

Se si deve abbandonare il concetto che esistano atomi e altri microoggetti con proprietà univocamente definibili – concluse così Bohr – la meccanica quantistica non si può occupare delle qualità dei sistemi microscopici in quanto tali, ma unicamente delle relazioni tra fenomeni osservabili su grande scala. In questo quadro, i fenomeni atomici debbono però essere visti come insiemi indivisibili i quali non possono essere analizzati – anche sul piano astratto e concettuale – come se fossero composti da parti diverse formate da vari tipi di microoggetti. Il ruolo della fisica quantistica è insomma ridotto al solo calcolo delle distribuzioni di probabilità dei vari tipi possibili di fenomeni. Così la funzione d'onda di Schrödinger non può essere considerata come un modello concettuale di un singolo sistema, in quanto non è capace di fornire una descrizione precisa e ben definita del suo comportamento, ma consente tutt'al più la descrizione del comportamento medio di un aggregato statistico di sistemi. Nell'ambito della visione suggerita da Bohr, insomma, l'oggetto della fisica sarebbe implicitamente e ineludibilmente ristretto al solo calcolo delle distribuzioni di probabilità dei vari generi di fenomeni possibili, distribuzioni derivabili dal modello generale imperniato sull'equazione di Schrödinger. In altri termini, si suppone che nell'universo non ci sia nulla che non rientri in questo modello, le cui caratteristiche essenziali sono considerate assolute e finali.

In questo modo, si capisce immediatamente che *l'interpretazione ortodossa della meccanica quantistica può essere vista, dal punto di vista del paradigma epistemologico, come il naturale proseguimento dell'atteggiamento meccanicistico della fisica classica, il quale viene appena modificato e revisionato – in chiave indeterministica – in modo da tener conto che la teoria fondamentale dei processi microscopici è di natura probabilistica e non deterministica*. Con la visione di Copenhagen si perviene insomma al punto di vista di un *meccanicismo indeterministico*: l'universo viene concepito come un gigantesco sistema meccanico il cui comportamento è riconducibile al solo effetto di un in-

sieme di parametri meccanici sottoposti a cambiamenti puramente quantitativi e nel corso del suo movimento può essere caratterizzato da alterazioni irregolari. Il meccanicismo indeterministico che caratterizza i processi atomici – sulla base dell’assunto che le proprietà dei sistemi fisici non possono essere considerate oggettivamente esistenti finché il sistema non viene misurato – vale soltanto per i fenomeni osservabili su larga scala. Negando la realtà oggettiva a livello microscopico, e rinunciando alla causalità e alla continuità, la visione ortodossa permette in sostanza di salvare la caratteristica più essenziale della posizione meccanicistica: il presupposto che *ogni qualità oggettiva e definibile del mondo sia descrivibile in base ad un insieme di leggi meramente quantitative che rientrano in un modello generale, fisico e matematico, assoluto e finale*. In altre parole, il punto di vista meccanicistico dei seguaci dell’interpretazione di Copenaghen comporta, come conseguenza, il presupposto che la varietà delle qualità fondamentali esistenti in natura sia limitata.

Inoltre, riguardo alle caratteristiche fisiche del postulato del collasso nelle misurazioni, è importante menzionare che Carlo Rovelli, eminente fisico teorico italiano attualmente all’università di Marsiglia, a partire dagli anni ‘90 ha suggerito una linea di ricerca, nota anche come *interpretazione relazionale*, che sembra chiarire in modo elegante in che senso proprietà quantistiche e oggetti quantistici non hanno un’esistenza fisica primaria, in che senso la meccanica quantistica non si può occupare delle qualità dei sistemi microscopici in quanto tali. L’idea fondamentale è che i valori delle osservabili di ogni sistema fisico sono *relazionali*: essi non hanno una realtà fisica primaria perché si riferiscono

⁹ Per quanto riguarda l’interpretazione relazionale della meccanica quantistica, il lettore interessato può fare riferimento ai seguenti classici lavori: C. Rovelli, “Relational quantum mechanics”, *International Journal of Theoretical Physics*, Vol. 35, n. 8, pp. 1637-1678, 1996; C. Rovelli, “Half way through the woods”, *The Cosmos of Science*, a cura di J. Earman e J. D. Norton, University of Pittsburgh Press, Pittsburgh, 1997; M. Bitbol, “Physical Relations or Functional Relations? A non-metaphysical construal of Rovelli’s Relational Quantum Mechanics”, preprint <http://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/3505>, 2007; B. van Fraassen, “Rovelli’s World”, *Foundations of Physics*, Vol. 40, n. 4, pp. 390-417, 2010.

alla relazione tra quel sistema ed un altro sistema⁹. In questa visione, non ha senso dire che una certa grandezza del sistema oggetto di misurazione ha oggettivamente un dato valore, ha solo senso dire che quella grandezza ha quel valore in relazione ad un altro sistema (in particolare, rispetto ad un apparato classico di misura). Per esempio, considerando la misurazione dello spin orizzontale di un elettrone tramite l'esperimento descritto dalla figura (2.b), il risultato "spin destro" non costituisce un fatto oggettivo, avente una realtà fisica primaria, ma vale soltanto in riferimento a un sistema opportuno con cui quell'elettrone interagisce. Se effettuando una misura su un elettrone un dato osservatore A trova che quell'elettrone ha spin orizzontale destro, si può solo dire che quell'elettrone viene visto dall'osservatore A con spin destro, in seguito all'interazione con un apparato classico di misura, ma il fatto che l'elettrone possieda spin destro non è qualcosa di oggettivo, che vale in sé, che ha una natura fisica primaria. Nella versione relazionale, pertanto, il collasso della funzione d'onda non costituisce un fatto oggettivo riguardante un oggetto quantistico avente una realtà primaria nel senso che è semplicemente un fenomeno che registra le modalità con cui sistemi fisici distinti incidono l'uno sull'altro quando interagiscono. Questa registrazione che deriva dall'interazione tra sistema misurato e sistema misuratore (e che esprime l'effetto del collasso) esaurisce di fatto tutto quello che può essere detto riguardo al mondo fisico. Il mondo fisico può essere descritto come una rete di componenti che interagiscono dove non ha senso parlare di "stato oggettivo di un sistema isolato": lo stato di un sistema fisico è la rete delle sue relazioni con i sistemi circostanti.

Inoltre, è importante sottolineare che, nella visione relazionale, quello che appare rispetto ad un primo osservatore come una misura di una data variabile di un dato sistema fisico (con un determinato risultato), appare rispetto ad un altro osservatore come un processo dinamico che stabilisce una correlazione tra quel sistema fisico e il primo osservatore: per quanto riguarda il secondo osservatore, l'unico elemento di realtà rilevante è che si è stabilita una correlazione tra il sistema fisico ed il primo osservatore. Finché non interagisce con il sistema composto co-

stituito dal primo osservatore e dal sistema fisico in considerazione, il secondo osservatore non ha accesso ai risultati effettivi delle misurazioni eseguite su quel sistema dal primo osservatore: questi risultati sono reali solo rispetto al primo osservatore. L'esistenza di una correlazione tra i possibili risultati di una misura eseguita dal secondo osservatore sul sistema e i risultati di una misura eseguita sempre dal secondo osservatore sul primo osservatore può essere interpretata in termini di informazione. D'altra parte, se interagiamo un numero sufficiente di volte con il sistema fisico in considerazione, possiamo predire la distribuzione di probabilità dei futuri risultati delle nostre interazioni con questo sistema. In questo senso, interagendo con un dato sistema fisico possiamo avere "informazione" su di esso. Possiamo perciò dire che, alla luce dell'interpretazione relazionale, quello di cui si occupa la meccanica quantistica è l'*informazione* che i sistemi fisici hanno l'uno dell'altro.

L'interpretazione relazionale di Rovelli, stabilendo che, in seguito ad un'operazione di misura, una data grandezza di un certo sistema fisico ha un dato valore solo rispetto ad uno specifico sistema con cui ha interagito, chiarisce che *il vero ruolo dell'osservatore è quello di registrazione dell'esito di una specifica interazione tra sé stesso e il sistema oggetto di misurazione*. Il postulato del collasso presente nella visione di Rovelli mostra che la meccanica quantistica non si può occupare delle qualità dei sistemi microscopici in quanto tali nel senso che le qualità di un sistema fisico vanno sempre riferite alla rete delle sue relazioni con i sistemi circostanti. In questo schema, le famose asserzioni di Bohr "Un fenomeno non è tale finché non viene osservato. [...] È sbagliato pensare che compito della fisica sia di scoprire come la natura è. La fisica verte su ciò che della natura possiamo dire" di fatto possono essere viste come la conseguenza di un'opportuna specifica *interazione* tra il sistema in considerazione ed un altro sistema.

D'altronde, se proprietà quantistiche ed oggetti quantistici esistono soltanto in relazione ad altri sistemi (in particolare, a corrispondenti apparati classici di misura), nello schema della visione ortodossa ne consegue un'altra idea fondamentale: gli stati di un microsistema associati ai valori possibili che può assumere una sua data osservabile non hanno

una realtà fisica primaria, ma possono essere visti di fatto come un insieme di potenzialità oggettivamente esistenti (tra le quali poi, in seguito ad una misura, soltanto una risulta essere quella che si attualizza realmente). In base a questa idea, la realtà fisica dei sistemi microscopici è diversa da quella che percepiamo nel mondo macroscopico dell'esperienza quotidiana che descriviamo mediante la fisica classica: si tratta di una realtà astratta di potenzialità oggettivamente esistenti, il che significa che soltanto rispetto ad un apparato di misura e ad un osservatore che si trova al di là di esso una possibile proprietà del sistema quantistico in considerazione è in grado di acquisire uno stato specifico ben definito e di diventare quindi un evento reale effettivo. In questo schema, la funzione d'onda descrive insomma qualche *potenzialità oggettivamente esistente che viene attualizzata, e quindi diventa realtà, solo se avviene una misurazione (e, più precisamente, un'interazione oggetto-apparato di misura-osservatore)*.

La funzione d'onda descrive lo stato del sistema quantistico in considerazione e consente la predizione delle relative probabilità per i risultati di misura delle osservabili del sistema in accordo al postulato interpretativo di Born. Sulla base del fatto che la funzione d'onda può evolvere in modo deterministico sulla base dell'equazione di Schrödinger oppure subire salti casuali dovuti al collasso della funzione d'onda, John von Neumann (1903-1957), Fritz Wolfgang London (1900-1954), Friedrich Ludwig Bauer (1924-2015), nonché Eugene Paul Wigner (1902-1995), hanno suggerito che il collasso della funzione d'onda che si verifica nei processi di misura ha luogo a causa del ruolo speciale della *consapevolezza dell'osservatore* (essendo quest'ultima non descrivibile mediante l'equazione di Schrödinger).

Sulla base della proposta originale di von Neumann, in ogni misura effettiva, abbiamo a che fare con la seguente catena: (i) particella quantistica; (ii) apparato di misura, composto anche di particelle quantistiche; (iii) osservatore con i suoi organi percettivi¹⁰. L'osservatore

¹⁰ J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Theory*, Princeton University Press, Princeton, 1955.

acquisisce alcune informazioni riguardo la particella legate al processo di misurazione. Alla luce del tentativo di risoluzione del problema della misurazione quantistica fornito da von Neumann, è sempre possibile considerare organi di percezione dell'osservatore come occhi, orecchie, ecc... come altri apparati di misura, che misurano proprietà dell'apparato iniziale di misura (che ha interagito con la particella quantistica). Questi organi sono composti anche da particelle quantistiche, sicché l'intero sistema costituito dalla particella studiata, dall'apparato di misura e dagli organi di percezione, può essere descritto mediante l'equazione di Schrödinger. Ma alla fine della misurazione, come osservato da von Neumann, c'è sempre un qualche ultimo osservatore, che rappresenta il soggetto di una relazione cognitiva e che acquisisce informazione sull'oggetto. Questo ego astratto non è descritto dall'equazione di Schrödinger ed è tale osservatore che produce il collasso della funzione d'onda, il quale determina la localizzazione dell'indice dell'apparato misuratore in una ben definita posizione. Un tale effetto implica di fatto una rottura dell'evoluzione degli stati fisici rispetto all'equazione di Schrödinger. A questo proposito, un ruolo importante, secondo von Neumann, è giocato dal *principio dello spostamento della frontiera soggetto-oggetto*, che stabilisce che il collasso della funzione d'onda non può dipendere da dove noi poniamo la frontiera tra l'oggetto misurato e l'apparato di misura. Così, è possibile collocare questa frontiera tra il nostro micro-sistema e il primo apparato misuratore, che viene poi trattato classicamente, o tra i nostri occhi e la particella, più il primo strumento di misura che in questo caso deve essere trattato in modo quantistico. Possiamo perfino andare oltre, collocando la frontiera dentro il nostro cervello... Quello che è veramente fantastico è che questa frontiera può essere mossa non soltanto nello spazio, ma anche nel tempo. Così, considerando lo strumento di misura come una continuazione dei nostri organi di percezione¹¹, possiamo dire che "qualche apparato ha fatto un controllo definito prima che io, come soggetto consapevole, registri

¹¹ V. Fock, *Quantum Physics and the Structure of Matter*, (in Russian), LGU Press, Leningrad, 1965.

l'evento, ma è possibile collocare questa frontiera solo adesso a questo istante dentro il mio cervello, quando il collasso ha luogo a causa della registrazione effettuata dalla mia consapevolezza!".

London e Bauer hanno poi sviluppato l'idea di von Neumann nel loro libro *La Théorie de l'Observation en Mécanique Quantique* tentando di connetterla a quella speciale proprietà della consapevolezza chiamata introspezione¹². Idee simili furono anche discusse da Pauli nei suoi colloqui con Jung riguardo alla differenza tra consapevolezza e sotto-consapevolezza¹³. Seguendo la trattazione di London e Bauer, un sistema complesso, composto da un oggetto quantistico X, un apparato Y e un osservatore Z, può essere descritto da una funzione d'onda data da una generica sovrapposizione di stati macroscopicamente distinguibili e percettivamente diversi, ciascuno dei quali è individuato da uno dei valori possibili che può assumere la variabile fisica misurata dell'oggetto X, e quindi dalla posizione dell'indice dell'apparato Y, nonché dallo stato dell'osservatore Z, corrispondenti a tale valore. Inoltre, riguardo al ruolo dell'osservatore London e Bauer scrivono: "Per l'osservatore solo l'oggetto X e l'apparato Y appartengono al mondo esterno. Al contrario, l'osservatore ha con sé stesso speciali relazioni: ha qualche capacità ben conosciuta, che può essere chiamata capacità di osservazione di sé stesso (introspezione) senza alcun agente che può fare una verifica del suo proprio stato. [...] È la consapevolezza dell'osservatore l'elemento responsabile della trasformazione di uno stato dato dalla sovrapposizione di stati macroscopicamente distinguibili e percettivamente diversi in un singolo termine, vale a dire che determina il collasso della funzione d'onda.". Alla luce della visione sviluppata da London e Bauer, possiamo dire che nell'ambito dell'interpretazione standard *la consapevolezza gioca un ruolo attivo nell'attualizzarsi dei fenomeni*: mentre nella fisica classica essa ha solo il ruolo di registrare in modo passivo quello che è

¹² F. London e F. Bauer, *La Théorie de l'Observation en Mécanique Quantique*, Hermann & Cie., Paris, 1939.

¹³ K.V. Laurikainen, *Beyond the Atom: The Philosophical Thought of Wolfgang Pauli*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1986.

effettivamente avvenuto nella natura, nel mondo quantistico essa realmente modifica e regola l'attualizzarsi degli eventi. Se questa interpretazione è vera, allora il collasso della funzione d'onda può essere descritto come un processo in cui uno va dalla sotto-consapevolezza alla consapevolezza, come coscienza di qualcosa di oggettivo, fenomeno questo che sembra invocare anche una relazione interdisciplinare con psicologia e neurofisiologia.

L'idea della consapevolezza come agente fondamentale che determina il collasso della funzione d'onda in un processo di misura è stata anche analizzata in modo preciso da Wigner¹⁴. Secondo l'approccio di Wigner, nel mondo vi sarebbero due tipi fondamentalmente diversi di sistemi fisici:

A. Sistemi puramente fisici (cioè sistemi che non contengono osservatori senzienti). Questi sistemi, purché isolati da ogni influenza esterna, evolvono sempre conformemente alle equazioni dinamiche del moto.

B. Sistemi coscienti (cioè sistemi che contengono osservatori senzienti). Questi sistemi evolvono in modo da provocare il collasso della funzione d'onda, più precisamente nel modo seguente: nel corso di un'evoluzione dinamica (di una misurazione, per esempio) di tanto in tanto il cervello di un essere senziente può accedere a uno stato in cui sono sovrapposti stati associati a diverse esperienze coscienti; e in tali momenti la mente associata a quel cervello apre il suo occhio interno e scruta quel cervello, causando il collasso dell'intero sistema (cervello, strumento di misura, sistema oggetto di misurazione e tutto il resto). Quest'ultimo precipita in uno di quegli stati associati a diverse esperienze coscienti; a quel punto l'occhio si chiude e tutto torna a procedere in accordo alle equazioni dinamiche del moto, finché non si verifica la successiva sovrapposizione, e allora l'occhio si riapre e avviene un altro collasso. In altre parole, nella visione di Wigner, il collasso della funzione d'onda non è determinato dall'apparecchio di misura, ma si attua con la percezione cosciente, da parte dell'osservatore, dell'atto di misura: la mente, intesa come coscienza dell'osservatore, a un certo punto deve de-

¹⁴ E.P. Wigner, "Die Messung Quantenmechanischer Operatoren", *Zeitschrift für Physik*, Vol. 133, pp. 101-108, 1952.

terminare la riduzione oggettiva della funzione d'onda e con essa l'esplicazione, l'attualizzazione di un dato evento nella realtà. In un'interpretazione come questa, quello che salta immediatamente agli occhi è il ruolo assolutamente sproporzionato che l'osservatore cosciente assume, fino a concludere che è egli stesso a determinare l'attualità del reale ogni volta che compie misurazioni. Questo porta a conclusioni paradossali, come il principio antropico, secondo cui l'universo è così com'è perché ci siamo noi a porci questa domanda.

Ora, la motivazione ultima, fondamentale del fatto che, nell'interpretazione di Copenaghen, il confine tra mondo classico e mondo quantistico è formulato in modo ambiguo e non è possibile spiegare in modo soddisfacente come, nei processi di misurazione, si possa passare da una legge deterministica (l'equazione di Schrödinger) ad una legge incerta (il postulato nel collasso), a parere dell'autore va ricercata in quanto segue. *I fisici della visione ortodossa hanno sempre evitato di attribuire un ruolo primario al fatto che il mondo subatomico costituisce una rete complessa di interconnessioni tra le varie parti di un tutto indiviso, che la non-località delle correlazioni tra i vari oggetti rappresenta la realtà ontologica primaria dell'universo* (in grado di portare alla possibilità dell'esistenza, in natura, di un'infinità di qualità potenzialmente significative). Per quanto riguarda la geometria del mondo fisico, va infatti enfatizzato che un elemento molto intrigante che emerge dal formalismo quantistico sta nel fatto che le particelle subatomiche sono in grado di comunicare tra di loro informazioni in modo istantaneo, in altri termini sono connesse in modo non-locale. *La non-località quantistica, introducendo la possibilità che la natura abbia un'infinità di qualità potenzialmente significative, può essere considerata l'elemento che mette maggiormente in discussione il meccanicismo indeterministico insito nella visione ortodossa della meccanica quantistica.*

Riguardo al fenomeno della non-località, tutto è iniziato a partire dalla pubblicazione nel 1935, da parte di Albert Einstein (1879-1955), Boris Podolski (1896-1966) e Nathan Rosen (1909-1995), di un famoso articolo dal titolo *La descrizione quantistica della realtà può considerarsi completa?* in cui è stato sviluppato quello che è poi stato chiamato il pa-

radosso, o meglio, *argomento EPR* (dalle iniziali dei tre autori). Consideriamo due particelle A e B che hanno condiviso una particolare esperienza di accoppiamento alla loro nascita, vale a dire sono emesse da una sorgente comune, e che poi vengono separate, allontanate l'una dall'altra e portate in due regioni diverse; allora, in base al formalismo della meccanica quantistica, se ad un certo istante effettuiamo una misura sulla particella A, è possibile conoscere istantaneamente lo stato della particella B, a prescindere dalla distanza che c'è tra di esse (vedi Figura 2.c). L'argomentazione fornita da Einstein, Podolski e Rosen introduce così un altro concetto essenziale e sconcertante della meccanica quantistica, dopo quello della sovrapposizione (e che in qualche maniera è legato ad esso), vale a dire l'*entanglement*, l'intreccio tra due particelle separate, lo stretto legame tra le misurazioni di due particelle, quando cioè accade che l'osservazione di una particella influenza in modo immediato e diretto i possibili risultati dell'osservazione di un'altra.

Il paradosso EPR era, in realtà, una critica di Einstein all'idea che la meccanica quantistica sia una teoria completa nel descrivere la natura (per Einstein l'incompletezza della teoria quantistica nel fornire una descrizione di un sistema fisico in una maniera indipendente da ogni atto di osservazione era la sorgente di tutti i problemi). I fisici hanno cercato di spiegare questo fenomeno assumendo che ci sia una sorta di "messaggero" che parte dalla particella A per raggiungere la particella B e informarla di assumere un certo comportamento. Ma l'informazione arriva istantaneamente e quindi l'idea di un ipotetico messaggero non solo non funziona ma sembra avere poco senso.

Le correlazioni non-locali tra particelle subatomiche che caratterizzano esperimenti di tipo EPR risultano essere inspiegabili ed incomprendibili all'interno di uno schema classico. Fenomeni di questo tipo hanno tuttavia trovato una loro compiuta spiegazione e formalizzazione in un noto teorema dimostrato nel 1964 dal fisico irlandese John Stewart Bell (1928-1990), che è considerato da molti esperti nel campo dei fondamenti concettuali della meccanica quantistica come il più importante recente contributo alla scienza. Bell mostrò infatti che le predizioni della teoria quantistica sono incompatibili con quelle di ogni altra teoria fisica

che soddisfa una nozione naturale di ‘realismo locale’ (con il quale si intende l’idea secondo cui non ci sono interazioni istantanee tra sistemi arbitrariamente lontani). La ricerca di Bell ha determinato profonde implicazioni nello studio dei processi atomici, portando in particolare al seguente risultato: “Quando due particelle sono emesse in direzioni opposte e le proprietà di una di esse sono attualizzate da una misurazione, le proprietà dell’altra particella – anche esse misurate – saranno correlate indipendentemente dalla distanza che le separa.”. La dimostrazione del *teorema di Bell* implica di fatto che un’esperienza avvenuta nel passato tra due particelle subatomiche crea tra di esse una forma di *connessione* per cui il comportamento di ciascuna delle due condiziona in modo diretto ed istantaneo il comportamento dell’altra a prescindere dalla distanza che c’è tra di esse. Per esempio, nel caso di due particelle subatomiche inizialmente accoppiate e che poi vengono separate e allontanate l’una dall’altra, se ad un certo istante invertiamo lo spin di una delle due, in quello stesso istante anche l’altra inverte il suo spin, indipendentemente dalla distanza che separa le due particelle. La dimostrazione di Bell del 1964 utilizza il ragionamento di Einstein, Podolski e Rosen ed è proprio in virtù di tale ragionamento che le conclusioni di Bell sono del tutto generali. In base al teorema di Bell, la meccanica quantistica, e in generale qualunque teoria in accordo con l’evidenza sperimentale, è necessariamente non-locale. Ai giorni nostri, di fatto non è stata trovata ancora alcuna contro-argomentazione significativa in grado di mettere in discussione la validità del teorema di Bell: tutti gli esperimenti effettuati finora hanno confermato il risultato ottenuto da Bell, e di conseguenza che la non-località deve essere considerata una caratteristica fondamentale e irrinunciabile del mondo microscopico.

Ora, nell’interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica le correlazioni non-locali che caratterizzano il mondo microscopico emergono di fatto come un ospite inatteso che si trova nascosto dietro l’interpretazione puramente probabilistica della funzione d’onda e il meccanismo di casualità ad essa associato: la funzione d’onda descrive alcune potenzialità oggettivamente esistenti che vengono attualizzate e diventano realtà solo se viene eseguita una misurazione; è solo quando

un osservatore compie una scelta mettendo in una data regione un apparato di misura che un dato evento o una data proprietà di un sistema fisico si attualizzano, emergono come realtà fisica. La visione della non-località quantistica caratteristica dell'interpretazione di Copenaghen comporta che l'attualizzazione di una determinata proprietà in una misurazione non avviene in una maniera oggettiva, ma invoca la presenza di osservatori coscienti: come si è detto prima, il collasso della funzione d'onda ha luogo proprio al livello della consapevolezza e da qui scaturiscono svariate problematiche, per esempio l'idea di un universo partecipatore, o l'idea di un universo psicologico in cui c'è un'unità tra materia e consapevolezza, e così via¹⁵.

D'altra parte, quanto stabilisce la visione ortodossa riguardo alla non-località non rappresenta altro che una sola di molte possibilità interpretative. Come, per esempio, ha evidenziato lo scienziato svizzero Nicholas Gisin dell'università di Ginevra in un articolo del 2010¹⁶, possono essere prese in considerazione diverse prospettive alternative per formulare e spiegare la natura intrinsecamente non-locale delle correlazioni tra le particelle:

1° - in qualche modo, a un livello fondamentale, riguardo al funzionamento della natura, Dio gioca a dadi con un dado non locale con la conseguenza che un evento casuale può manifestarsi in diverse regioni dello spazio a prescindere dalla loro distanza;

2° - le correlazioni non locali semplicemente hanno luogo, in qualche modo, dall'esterno della struttura spazio-temporale, nel senso che nessuna storia nello spazio-tempo è in grado di descrivere come avvengono (in questo quadro, di fatto bisognerebbe abbandonare la ricerca di ogni storia spazio-temporale per spiegare queste correlazioni: se "l'evento A influenza a distanza l'evento B" oppure "l'evento A causa un collasso della funzione d'onda in una regione B", non è possibile fornire un ordinamento temporale tra gli eventi A e B);

¹⁵ Vedi, per esempio: A.A. Grib e W.A. Rodrigues, *Nonlocality in quantum physics*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999, 2012.

¹⁶ N. Gisin, "Are there quantum effects coming from outside space-time? Non-locality, free will and "no many worlds"", arXiv:1011.3440v1 [quant-ph], 2010.

3° - la comunicazione di informazioni tra due particelle quantistiche, oltre la scena avviene al di fuori della struttura spazio-temporale;

4° - quello che noi osserviamo riguardo ai fenomeni microscopici costituisce soltanto l'ombra della realtà in uno spazio tridimensionale.

Queste considerazioni sulla non-località mostrano chiaramente che, per rendere conto dei dati empirici riguardanti il mondo atomico, esistono molti più scenari e prospettive rispetto a quanto previsto dalla visione ortodossa, e di conseguenza *mettono in crisi l'essenza della filosofia meccanicistica secondo cui esisterebbero qualità fondamentali fisse, secondo cui le leggi sarebbero relazioni puramente quantitative*. In altre parole, possiamo dire che l'esistenza di correlazioni non-locali tra le particelle subatomiche mette definitivamente in discussione l'idea che le entità fondamentali presenti in natura, le qualità che definiscono le loro modalità d'essere e le relazioni complessive in base alle quali vengono espresse le leggi generali, rientrino in un modello fisico e matematico limitato. Per quel che concerne la questione della non-località quantistica, sia il carattere stesso dei dati empirici sia i risultati di un'analisi logica più dettagliata illustrano come, al di là dei limiti di validità di qualsiasi teoria atta a rendere conto dei processi atomici, c'è sempre la possibilità che esista una varietà illimitata di ulteriori proprietà, qualità, entità, sistemi, livelli, ecc... in cui valgono nuovi generi di leggi di natura.

2.4. *L'impasse nella teoria quantistica dei campi*

Altri significativi problemi e situazioni di impasse si incontrano andando a considerare le teorie più complesse che sono nate a partire dalla meccanica quantistica, come per esempio la *teoria quantistica dei campi*, lo schema matematico fondamentale che specifica le caratteristiche che l'aspetto quantistico del mondo dà alle interazioni e, come tale, fornisce la vera sintassi della fisica teorica contemporanea (si pensi, soprattutto, al Modello Standard della fisica delle particelle nonché alla gravitazione quantistica).

Storicamente, la teoria quantistica dei campi è nata in seguito al tentativo di trattare processi di emissione (creazione) ed assorbimento (distruzione) di radiazione e di materia, in altre parole fenomeni di diffusione, o scattering, nel corso dei quali una particella può scomparire dando luogo ad altre particelle. La teoria quantistica dei campi, sviluppatasi originariamente con la costruzione di una teoria quantistica della radiazione, una riformulazione della teoria elettromagnetica classica la quale rendesse conto della quantizzazione, della scomposizione della radiazione in quanti discreti, dei fenomeni di interazione tra fotoni ed elettroni, considera la materia allo stesso livello dei campi di radiazione, e questo può essere considerato un rilevante passo in avanti verso l'unificazione nei fondamenti della scienza fisica. Infatti, un principio generale di tutte le teorie quantistiche dei campi è che i campi sono tutto ciò che esiste in natura. Scrive per esempio il fisico statunitense Robert Laurence Mills nel capitolo 16 del suo libro *Space, Time, and Quanta: An Introduction to Modern Physics*: “L'unico modo per ottenere una consistente teoria relativistica è di trattare tutte le particelle della natura come i quanti di campi, alla stregua dei fotoni.”¹⁷. Replica il premio Nobel 2004 Frank Wilczek nell'articolo *Mass Without Mass I: Most of Matter*: “In teoria quantistica dei campi, gli elementi primari della realtà non sono particelle singole, ma i campi sottostanti. Così, per esempio, tutti gli elettroni non sono altro che eccitazioni di un campo sottostante, il campo degli elettroni, che ricopre tutto lo spazio-tempo”¹⁸. In maniera simile, il premio Nobel 1979 Steven Weinberg nel suo libro *Facing Up: Science and its Cultural Adversaries*: “Proprio come c'è un campo elettromagnetico la cui energia e il cui impulso si manifestano in minuscole entità chiamate fotoni, così c'è un campo dell'elettrone la cui energia e il cui momento si trovano localizzati in elementi che chiamiamo elettroni, e una cosa analoga vale per ogni specie di particella elementare.

¹⁷ R. Mills, *Space, Time, and Quanta: An Introduction to Modern Physics*, W. H. Freeman, New York, 1994.

¹⁸ F. Wilczek, “Mass Without Mass I: Most of Matter”, *Physics Today*, Vol. 52, n. 11, pp. 11-13, 1999.

Gli elementi fondamentali della natura sono i campi; le particelle sono fenomeni derivati.¹⁹ Nell'ambito della teoria quantistica dei campi, quindi, la funzione d'onda non descrive più la particella ma un campo quantistico, in cui le particelle stesse assumono il significato di quanti del campo. Il cosiddetto Modello Standard, la teoria matematica universale che identifica le particelle elementari e specifica il modo in cui interagiscono, formulata negli anni '70 del secolo scorso e poi impostasi gradualmente grazie a esperimenti svolti agli inizi degli anni '80 fino a diventare di fatto la teoria di maggior successo di tutti i tempi, è essa stessa basata sul linguaggio della teoria quantistica dei campi e quindi comporta che le entità più fondamentali di tutto ciò che osserviamo sono campi. Si può insomma dire che, nella teoria quantistica dei campi, in pratica, tutte le particelle materiali della fisica – come per esempio gli elettroni o gli atomi – sono quanti di campo, ma quanti di campi di materia piuttosto che quanti di campi di forza.

Va enfatizzato che l'affermazione secondo cui, nella teoria quantistica dei campi, “i campi sono tutto ciò che esiste” deve essere presa in senso letterale. Per esempio, è un fraintendimento comune di immaginare l'elettrone come una minuscola particella incorporata in qualche modo nel campo costituito dalla funzione d'onda di Schrödinger. Dal punto di vista della teoria quantistica dei campi, non c'è in realtà nessuna particella: un elettrone equivale al suo campo. La teoria quantistica dei campi comporta che, ad un livello fondamentale, la natura non può essere di fatto descritta né da onde né da particelle, che vanno considerate un dualismo residuo del linguaggio classico, ma da modi del campo che vibrano, trasportano impulso e possono legarsi assieme in forme intrecciate assai più forti e strutturate di quelle della “ordinaria” meccanica quantistica. La particella, intesa come oggetto localizzato, qui risulta semplicemente la rivelazione di un quanto di campo ad opera di un apparato di misura. E del resto non è affatto strano che modi vibrazionali del campo quantizzato mostrino caratteristiche assieme corpu-

¹⁹ S. Weinberg, *Facing Up: Science and its Cultural Adversaries*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 2001.

scolari e ondulatorie. A tutti gli effetti, la teoria quantistica dei campi non è soltanto l'evoluzione della meccanica quantistica, ma ne rappresenta una vera e propria interpretazione *realistica*²⁰.

Il primo esempio di teoria quantistica dei campi ad essere stato storicamente elaborato è rappresentato dall'*elettrodinamica quantistica* (o *QED*), la teoria fisica fondamentale che fornisce una rilettura in un quadro unitario di elettromagnetismo, meccanica quantistica e relatività speciale, e che di fatto fornisce un fondamento completo alla fisica atomica e alla chimica. Si tratta, questo, di uno schema teorico che ha ottenuto fin dall'inizio enormi successi sul piano predittivo, consentendo calcoli di grandezze fisiche con precisione senza uguali. Nella QED è descritta in modo dettagliato l'interazione tra elettroni e fotoni, entrambi trattati come quanti del campo. In particolare, nella formulazione sviluppata da Richard Feynman (1918-1988) la QED è basata su alcune specifiche strutture grafiche, note come *diagrammi di Feynman*, che hanno il vantaggio di fornire una rappresentazione in qualche modo intuitiva del processo in considerazione (per esempio, un determinato processo di scattering tra varie particelle subatomiche), una sorta di rappresentazione visiva del processo fisico che dà luogo ad una data struttura matematica.

In generale, una teoria quantistica dei campi associa ad ogni punto dello spazio-tempo un operatore di creazione/distruzione o, in altre parole, un oscillatore lineare, la cui attività, per il principio di indeterminazione non è mai nulla. In ogni teoria quantistica dei campi, il principio di indeterminazione di Heisenberg comporta infatti che sono possibili, per tempi molto brevi, notevoli fluttuazioni energetiche alle quali corrispondono, in virtù dell'equivalenza massa-energia, particelle non osservabili (dette anche *particelle virtuali*). Queste fluttuazioni di energia sono espressioni del nuovo ente caratteristico dei campi quantistici: il *vuoto quantistico*, una sub-struttura invisibile, capace di esibire delle

²⁰ I. Licata, "Vision of Oneness. Space-Time Geometry and Quantum Physics", in *Vision Of Oneness. A Journey in Matter*, a cura di I. Licata e A. Sakaji, Aracne, Roma, 2011; I. Licata, *I gatti di Wiener. Riflessioni sistemiche sulla complessità*, Bonanno Editrice, Acireale-Roma, 2015; G. Preparata, *An Introduction to a Realistic Quantum Physics*, World Scientific, Singapore, 2002.