



UNIVERSITÀ
degli STUDI
di CATANIA

Dipartimento
di Fisica
e Astronomia
"Ettore Majorana"



CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN FISICA

CRISTIAN FARGETTA

L'INTERPRETAZIONE DI COPENAGHEN
ANALISI STORICO-EPISTEMOLOGICA DELLA TEORIA QUANTISTICA
ORTODOSSA E DELLE POSSIBILI PROPOSTE ALTERNATIVE

—————
ELABORATO FINALE
—————

RELATORI:
CHIAR.MO PROF. A. PLUCHINO

ANNO ACCADEMICO 2020/2021

Abstract

In questo lavoro viene fornita un'analisi storico-epistemologica dell'interpretazione di Copenaghen. Dal punto di vista storico, attenzionando i momenti salienti che ne hanno permesso l'accettazione quasi unanime da parte della comunità scientifica. Da un punto di vista filosofico, vedremo in che rapporti stanno la meccanica quantistica ed il realismo scientifico, e l'influenza che la filosofia neopositivista dei primi decenni del '900 possa aver avuto nella formulazione della teoria quantistica. Ci concentreremo inoltre sul significato della misurazione nel contesto della meccanica quantistica, soffermandoci sulla problematica di fornire una descrizione coerente ed omogenea del mondo nel passaggio dal microcosmo al macrocosmo e sul ruolo che assumono l'apparato di misura e la coscienza dell'osservatore durante l'atto di misurazione, e discuteremo le diverse difficoltà che si affrontano nel dare un significato chiaro alla funzione d'onda in meccanica quantistica; esamineremo in particolare il problema ontologico ed il problema dell'oggettivazione della funzione d'onda. Successivamente, descriveremo alcune proposte alternative all'ortodossia di Copenaghen, con particolare riferimento al modo in cui esse tentano di risolvere il problema della misura. Affronteremo soprattutto due esempi di teorie a variabili nascoste, come la teoria di de Broglie-Bohm e la meccanica stocastica nella formulazione originaria di Bohm-Vigier, e altre alternative alla meccanica quantistica standard che lasciano il formalismo inalterato, ma ne modificano drasticamente la visione della realtà, come la teoria a multi-mondi di Everett e il QBism. Dopo aver esposto queste diverse alternative, discuteremo possibili criteri che permettano allo scienziato di orientarsi di fronte alla sottodeterminazione teorica.

Indice

1	Introduzione	7
2	Cenni storici	11
2.1	Dibattito Bohr-Einstein	13
2.1.1	Prima parte	14
2.1.2	1930: il nuovo attacco di Einstein	19
2.1.3	1935: il paradosso EPR	22
2.2	Incomprensioni sul paradosso EPR	25
2.3	Il punto di vista di Schrodinger	27
2.4	Il teorema di von Neumann	32
2.5	Teoria dell'onda pilota	35
2.6	Risposte a Bohm	38
2.7	Disuguaglianza di Bell	41
2.8	Esperimento di Aspect	43
2.9	L'analisi di Clauser	44
3	Realtà e meccanica quantistica	48
3.1	Contro il positivismo	50
3.2	Realismo ed Idealismo	56
3.3	Critiche al Realismo	62
3.4	Le posizioni dei protagonisti	66
3.5	Realtà velata	71

4	Il successo del paradigma	74
4.1	Le "teorie chiuse" di Heisenberg	78
4.2	La difesa del paradigma di Hanson	80
5	Il problema della misura	85
5.1	Formalismo generale	88
5.2	Collasso della funzione d'onda	93
5.2.1	L'amico di Wigner	94
5.2.2	Il paradosso di Einstein	100
5.3	Rapporto tra macrocosmo e microcosmo	102
5.4	Il problema ontologico	106
5.5	Il problema dell'oggettivazione	110
6	Teorie a variabili nascoste	115
6.1	Teoria di de Broglie-Bohm	116
6.1.1	Formalismo per una particella	117
6.1.2	Estensione a più particelle e non località	123
6.1.3	Particella in una scatola	125
6.1.4	Pacchetto d'onda gaussiano	127
6.1.5	Atomo di idrogeno	134
6.1.6	Misura	135
6.1.7	Determinismo	139
6.1.8	Contestualità	140
6.1.9	Realismo	141
6.2	Meccanica quantistica stocastica	142
6.3	Modello di Bohm-Bub	147
7	Alternative alla visione standard	152
7.1	Interpretazione statistica	155
7.2	Interpretazione relazionale	158
7.3	QBism	160
7.4	Collasso spontaneo (teoria GRW)	166
7.5	La teoria a multi-mondi	175
7.5.1	Reazioni	184
7.5.2	Interpretazione di Deutsch	187
7.6	Interpretazione a molte menti	189

<i>INDICE</i>	5
8 Sottodeterminazione teorica	192
8.1 Aspetti generali	193
8.2 Origine della sottodeterminazione	193
8.3 Descrizioni linguisticamente equivalenti	195
8.4 Sottodeterminazione e realismo	198
9 Conclusioni	203
Bibliografia essenziale	208
Ringraziamenti	213

- 1913 → Niels Bohr propone il suo modello dell'atomo di idrogeno con livelli energetici quantizzati
- 1924 → Louis De Broglie introduce il dualismo onda-corpuscolo per l'elettrone
- 1925 → Werner Heisenberg elabora la sua meccanica delle matrici
- 1926 → Erwin Schrodinger introduce la funzione d'onda e la meccanica ondulatoria
- 1926 → Max Born propone l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda
- 1927 → Werner Heisenberg enuncia il principio di indeterminazione
- 1927 → Nasce l'interpretazione di Copenaghen
- 1927 → Louis De Broglie elabora la sua idea dell'onda-pilota
- 1927 → Prima fase del dibattito Bohr-Einstein
- 1930 → Seconda fase del dibattito Bohr-Einstein
- 1932 → John von Neumann enuncia i «teorema dell'impossibilità»
- 1935 → Terza fase del dibattito Bohr-Einstein, con l'introduzione del paradosso EPR
- 1935 → Erwin Schrodinger espone il famoso paradosso del «gatto di Schrodinger»
- 1952 → David Bohm riprende l'idea dell'onda-pilota di de Broglie e formula la meccanica bohiana
- 1957 → Hugh Everett III introduce quella che in seguito verrà denominata teoria a multi-mondi
- 1964 → John Stewart Bell formula la disuguaglianza che porta il suo nome
- 1982 → Alain Aspect insieme ai suoi collaboratori realizza un esperimento con cui verifica
sperimentalmente la disuguaglianza di Bell, e pertanto viene provata la non-località
della meccanica quantistica
- 1986 → Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini e Tullio Weber formulano la teoria del collasso spontaneo
- Anni 2000 → Qbism e decoerenza quantistica

Figura 1: Teoria Quantistica: indice cronologico

Capitolo 1

Introduzione

Il ventesimo secolo fu segnato dall'avvento della *Teoria dei quanti*. Dopo quasi 3 secoli di fisica classica, il mondo microscopico diede una serie di risultati in disaccordo con la meccanica newtoniana. Ancora oggi, i fisici hanno diverse difficoltà quando si tratta di spiegare il significato profondo della meccanica quantistica. Infatti, non possono certamente dire di aver compreso appieno il significato fisico di questa teoria.

Negli anni '20 e '30 del ventesimo secolo, i fisici più importanti dell'epoca tentarono di spiegare cosa si nasconde dietro il mistero dei quanti. Nonostante ciò, il mistero non è ancora svelato.

D'altra parte, la struttura matematica della teoria è in grado di darci un quantità innumerevole di predizioni in accordo con gli esperimenti, in diversi campi della fisica e non solo. Per questa ragione, credo che l'indiscussa validità del formalismo dovrebbe stimolarci a chiederci: perché questo formalismo è corretto? Cosa c'è dietro?

L'indiscusso successo del formalismo ha portato la nascita di due modi radicalmente diversi di porsi rispetto al problema di "fare scienza", e metteremo in evidenza come, per alcuni tra i padri fondatori della teoria quantistica, abbia avuto grande rilevanza ricorrere all'intuizione e rifarsi a schemi concettuali ben collaudati. Altri, al contrario, sono stati spinti, dallo sconcerto di fronte alle nuove evidenze sperimentali, ad avventurarsi nell'ignoto lasciandosi guidare esclusivamente dagli sviluppi formali, senza preoccuparsi minimamente dello loro intuibilità.

Questa breve analisi serve per far capire come atteggiamenti personali

e motivazioni psicologiche, che oltrepassano l'irrinunciabile pretesa del puro e semplice accordo coi dati sperimentali, possano giocare un loro specifico ruolo nel determinare le modalità con cui si sviluppa l'indagine scientifica.

Personalmente, sono molto severo nei confronti della scuola di pensiero comunemente riassunta, per dirla con una battuta, nel motto "zitto e calcola", perché ritengo che riflettere sul significato fisico di un formalismo ci permetta di affrontare diversi problemi ai quali nessun fisico dovrebbe sottrarsi dicendo "non importa, andiamo avanti!". Ovviamente non sarà possibile affrontare tutte le problematiche interpretative della teoria in quest'unico lavoro, ma ci soffermeremo in particolare sul **problema della misura**(cap.5), probabilmente il più importante. Avremo modo di vedere che, per quanto all'apparenza il problema possa risultare banale, in meccanica quantistica è ben lungi dall'essere così, soprattutto quando si adotta la visione dominante della teoria, comunemente nota come **Interpretazione di Copenaghen** (dal nome della città dove Niels Bohr e Werner Heisenberg formularono i principi cardine della teoria), detta anche *standard* o *ortodossa*. Secondo l'interpretazione di Copenaghen, ogni speranza di ripristinare il senso di una realtà fisica sottostante deve essere abbandonato, in quanto futile metafisica priva di significato. La fisica del micromondo sembra essere arrivata alla fine della strada, dove non è possibile acquisire una conoscenza più approfondita. Il mondo della fisica ha così subito uno scisma tra filosofie realiste e anti-realiste, con gli anti-realisti in ascendente. Parleremo delle implicazioni epistemologiche di tale dibattito nel cap.3.

Tornando al sistema della misura, la questione è facile da descrivere: come fanno i sistemi microscopici a passare da piccole particelle localizzate a versioni ondulatorie di sé stessi, dispersi nello spazio, e poi tornare a comportarsi in maniera assolutamente ragionevole, cioè come piccole particelle localizzate, non appena li guardiamo?

Nonostante tutti i suoi successi, la meccanica quantistica non riesce a spiegare il passaggio dalle equazioni che descrivono un elettrone in un atomo a ciò che effettivamente vediamo quando osserviamo l'elettrone nella pratica. Per questa ragione, i padri fondatori della meccanica quantistica si inventarono una serie di regole *ad hoc*, in aggiunta alla teoria, postulati che forniscono una sorta di manuale di istruzioni su come tradurre le

previsioni matematiche delle equazioni in proprietà tangibili e osservabili come, ad esempio, dove si trova un elettrone in un dato momento. Nessuno conosce l'effettivo processo per cui un elettrone passa istantaneamente da uno stato "sia qui che là" a uno stato "o qui o là" quando lo guardiamo; la maggioranza dei fisici si accontenta di seguire il punto di vista pragmatico di Niels Bohr, che diceva "succede così". Lo chiamano "processo di amplificazione", ed è incredibile che per quasi tutti i fisici quantistici del secolo XX (e anche di questo secolo) fosse sufficiente. Bohr operò una distinzione *arbitraria* tra il mondo quantistico e il mondo macroscopico. Lo strumento di misurazione che osserva l'elettrone dev'essere parte del macromondo. Ma come, quando e perché questo processo di misurazione avvenga, non è per niente chiaro.

Dati questi problemi legati all'interpretazione standard, risulta naturale porsi le seguenti domande: esistono interpretazioni alternative ad essa che risolvono il problema della misura? E in caso affermativo, perché si continua ad adottare una visione discutibile come quella ortodossa? Affronteremo la prima domanda nei cap.6 e 7, in cui attenzioneremo soprattutto la teoria a variabili nascoste di de Broglie-Bohm, quella a molti-mondi di Everett e la teoria GRW del collasso spontaneo. Il secondo quesito presenta motivazioni storiche e filosofiche (cap.2,3 e 4).

Questo lavoro non toglie nulla al successo predittivo del formalismo, ma contesta il poter chiamare "teoria" un qualcosa che presenta un formalismo predittivo ma che è carente di una descrizione "convincente" della realtà che ci circonda.

Ciò che personalmente mi preoccupa è il fatto che queste alternative alla visione di Copenaghen vengano deliberatamente ignorate, e non si insegnino a scuola e, cosa molto grave, neppure all'università. Non dovremmo mai dimenticare che la scienza è nata come rivendicazione di libertà di pensiero e di espressione, e come tale, le giovani menti dovrebbero essere stimolate a ragionare con le loro teste, mettendole a confronto con teorie diverse che danno varie spiegazioni di uno stesso risultato sperimentale, o almeno dovrebbero essere consapevoli delle problematiche di una teoria, nonostante i suoi successi.

Un'altra alternativa è adottare la scuola di pensiero del tipo "zitto e calcola", meglio nota come "salvare i fenomeni", di cui parleremo ampiamente nei cap.3 e 4. Tale visione pragmatica porta spesso a considerare queste

problematiche di natura esclusivamente filosofica, e come tali esse possano, anzi persino debbano, essere affrontate solo dai filosofi, e non dagli scienziati. Ma, come ha evidenziato il fisico John Bell: *"I think there are professional problems. That is to say, I'm a professional theoretical physicist and I would like to make a clean theory. And when I look at quantum mechanics I see that it's a dirty theory. The formulations of quantum mechanics that you find in the books involve dividing the world into an observer and an observed, and you are not told where that division comes – on which side of my spectacles it comes, for example – or at which end of my optic nerve. You're not told about this division between the observer and the observed. What you learn in the course of your apprenticeship is that for practical purposes it does not much matter where you put this division; that the ambiguity is at a level of precision far beyond human capability of testing. So you have a theory which is fundamentally ambiguous...¹"*.

Ciò che personalmente mi preoccupa è che oramai sembra che le giovani menti non debbano neppure essere "zittite", in quanto non vengono messe a conoscenza di altre teorie alternative, altri punti di vista, pensando che l'unico modo di fare scienza sia eseguire calcoli. Possiamo, ad oggi, sostituire la frase "zitto e calcola" con "calcola".

Dopo aver attenzionato queste possibili alternative, è naturale porsi la domanda: quale scegliere? Nel cap.8 discuteremo possibili criteri che possano aiutare lo scienziato a dare una risposta a questa domanda.

¹P.C.W. Davies, R. Brown (eds.), *The Ghost in the Atom*, intervista a J.S. Bell (Cambridge University Press, Cambridge, 1986). Si è deciso di lasciare tutte le citazioni presenti in questo lavoro di tesi nella lingua con cui compaiono nei testi da cui sono state estratte, allo scopo di non perdere in immediatezza e forza espressiva.

Capitolo 2

Cenni storici

In questo capitolo esploreremo le radici storiche della meccanica quantistica, cogliendo gli eventi di maggior rilievo per la formulazione di quella che è oggi nota come **interpretazione standard**. Inoltre vedremo anche i dissensi nei riguardi di questa visione e le ragioni che portarono la grande maggioranza della comunità scientifica ad adottare l'interpretazione di Copenaghen nel descrivere ciò che ci circonda.

L'interpretazione di Copenaghen fu la prima e più diffusa interpretazione della teoria quantistica. Essa si ispirò ai lavori svolti nella capitale danese principalmente da Niels Bohr e Werner Heisenberg attorno al 1927 e riguarda la teoria della misurazione quantistica, il principio di complementarità e la dualità onda-corpuscolo. In particolare, i due studiosi estesero l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda, comunemente nota come *regola di Born*, elaborata dal fisico Max Born nel 1926¹, secondo la quale il quadrato della funzione d'onda fornisce la densità di probabilità della posizione della particella, dove non si intende la probabilità che la particella sia nel punto r , ma quella che essa venga trovata in r se si esegue una misura di posizione. Secondo questa interpretazione, le affermazioni probabilistiche della meccanica quantistica sono irriducibili, nel senso che non riflettono la nostra conoscenza illimitata di qualche variabile nascosta. Secondo l'ortodossia, sono prive di senso domande co-

¹Max Born, I.2, in Wheeler (a cura di), *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge*, *Zeitschrift für Physik*, vol.37, (Princeton University Press, Princeton, 1926)

me: "dov'era la particella prima che ne misurassi la posizione?", in quanto la meccanica quantistica studia esclusivamente quantità osservabili, ottenibili mediante processi di misurazione. L'atto della misurazione causa il *collasso della funzione d'onda*, nel senso che quest'ultima è costretta dal processo di misurazione ad assumere uno dei valori permessi, secondo una probabilità verificabile solo da misurazioni.

Albert Einstein, che è stato sotto diversi aspetti uno dei padri della meccanica quantistica, ha sempre avuto un rapporto di amore-odio con quest'interpretazione. Il suo dibattito, tenutosi tra gli anni '20 e '30 del ventesimo secolo, con Niels Bohr, di cui parleremo nella sez.2.1, divenne famoso nella storia della scienza, e viene considerato da molti il dialogo più affascinante tra due scienziati che si sia mai visto. È generalmente accettato dalla maggior parte dei fisici che Bohr vinse ed Einstein ne uscì sconfitto. Credo che questo resoconto non sia corretto.

Ad Einstein non piaceva l'indeterminismo della meccanica quantistica. La sua frase più famosa è probabilmente "*God does not play dice*"², ma non è esatto dire che questo fosse l'aspetto della meccanica quantistica a preoccuparlo di più.

Ma se non era la perdita del determinismo a preoccuparlo, allora cosa? Da questa sua frase forse possiamo capirlo: "*It seems hard to sneak a look at God's cards. But that he plays dice and uses 'telepathic' methods (as the present quantum theory requires of him) is something that I cannot believe for a single moment*". Da ciò si deduce come la sua preoccupazione non fosse tanto l'indeterminismo, quanto l'azione a distanza (*telepathic methods*), o meglio la non-località della meccanica quantistica.

Pertanto, egli ideò astuti *Gedanken experiments* (esperimenti mentali) al fine di provare che la visione ortodossa fosse sbagliata, o almeno incompleta. Ma Bohr rispose con "successo" (approfondiremo quest'aspetto) a tutte le sue obiezioni.

Nel 1927, durante il Congresso di Solvay, de Broglie propose una visione

²La citazione completa proviene da una lettera a Max Born del 1926: "*Quantum mechanics is very worthy of regard. But an inner voice tells me that this is not yet the right track. The theory yields much, but it hardly brings us closer to the Old One's secrets. I, in any case, am convinced that He does not play dice*".[13]. Naturalmente, come Einstein ha sottolineato più volte, il suo "Dio" non aveva nulla a che fare con gli dei personali delle religioni "rivelate".

alternativa della meccanica quantistica, ma non fu in grado di sviluppare tutto il formalismo necessario, oltre a non riuscire a replicare ad un'obiezione sollevata da Pauli. Ciò portò de Broglie ad abbandonare la sua idea. Inoltre, nel 1932, von Neumann dimostrò matematicamente che le "variabili nascoste", le quali potrebbero fornire una descrizione più completa della meccanica quantistica, non possono essere introdotte senza entrare in contraddizione con le predizioni della meccanica quantistica³. Ciò pose la parola fine alla possibilità di avere una teoria a "variabili nascoste", almeno fino al 1952, anno in cui un giovane fisico, David Bohm⁴, riuscì a dare una formulazione rigorosa dell'idea dell'*onda pilota* avanzata in precedenza da de Broglie, andando in contraddizione con quanto affermato dal teorema di von Neumann.

Nel 1964 John Bell⁵ confutò la tesi di von Neumann e dimostrò un "no-go theorem" secondo il quale qualunque teoria realistica, alternativa alla meccanica quantistica standard, deve necessariamente essere non locale.

2.1 Dibattito Bohr-Einstein

Come abbiamo detto nell'Introduzione, questo è considerato uno tra i più celebri dibattiti intellettuali del ventesimo secolo, e probabilmente il più famoso tra due fisici. Esamineremo tre episodi chiave all'interno del dibattito, che rappresentano dei punti fondamentali per comprendere l'interpretazione standard della teoria quantistica.

La differenza fondamentale tra Einstein e Bohr consisteva nel fatto che il primo insisteva per una completa descrizione di un sistema fisico indipendente dall'osservatore, andando al di là del legame sistema-apparato che Bohr considerava indissolubile, e una descrizione che inoltre necessitasse di una località per evitare contraddizioni con la Relatività.

In contrapposizione all'ontologia di Einstein, Bohr conferiva alle teorie fisiche uno stato unicamente epistemologico, non preoccupandosi dun-

³J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, Princeton, 1955). Prima edizione in tedesco, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (1932)

⁴D.Bohm, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden variables', Parts 1 and 2. *Phys. Rev.* 89, 166–193 (1952)

⁵J.S. Bell, On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox. *Physics* 1, 195–200 (1964)

que di eventuali violazioni della condizione di località einsteiniana. In particolare, Bohr insisteva sulla validità del *Principio di Complementarietà*, secondo il quale il duplice aspetto di alcune rappresentazioni fisiche dei fenomeni a livello atomico e subatomico non possa essere osservato contemporaneamente durante lo stesso esperimento. Nella visione realista di Einstein, ciò comporterebbe un dualismo onda-corpuscolo a livello ontologico, cosa che Einstein non era disposto ad accettare, ma era fermamente convinto che una teoria fondamentale dovesse chiarire lo status ontologico del micromondo.

2.1.1 Prima parte

Il primo attacco di Einstein alla concezione ortodossa, la quale stava ricevendo sempre più consensi, avvenne durante il Quinto Congresso di Fisica nell'Istituto di Solvay⁶ nel 1927.

Lui si chiese se fosse possibile usare le leggi di conservazione di impulso ed energia per ottenere conoscenze aggiuntive riguardo lo stato delle particelle nei processi di interferenza. In questo modo, voleva dimostrare che il principio di indeterminazione di Heisenberg fosse sbagliato.

Secondo i documenti ufficiali, Bohr uscì vincitore da questo primo scontro. Ma c'è più di questo. Infatti, seppur senza ammetterlo esplicitamente, Bohr fu costretto a modificare certe sue precedenti asserzioni circa lo status dei macrosistemi ed il ruolo che essi giocano nella misurazione di variabili microscopiche. In particolare, egli dovette riconoscere, a differenza di quanto affermato in precedenza, che tali sistemi non possono essere sempre considerati come sistemi classici. Ciò comporta un'ambiguità nella definizione di sistemi microscopici e macroscopici, di cui parleremo nella sez.5.3, che giocò un ruolo importante nel dibattito sui fondamenti della meccanica quantistica dal 1930 fino ai giorni nostri.

Ora analizziamo più in dettaglio l'argomento proposto da Einstein: consideriamo un raggio luminoso opportunamente direzionato, con un'e-

⁶Ricordiamo che Ernest Solvay è stato l'inventore del processo per la produzione della soda che porta il suo nome e che gli procurò fama e ricchezza. Egli nutriva un vivo interesse per la scienza e fondò gli istituti Solvay per la Chimica, la Fisica e la Sociologia. Finanziò anche importanti convegni scientifici che rappresentarono un momento stimolante ed unico di confronto tra i più brillanti protagonisti della scienza moderna.

stensione sufficientemente grande, che incontra uno schermo S1 con una piccola apertura in direzione x , come mostrato in Fig.2.1. Dopo il passaggio attraverso la prima apertura, il fascio diffrange ed incontra lo schermo S2 che ha due aperture. La successiva propagazione della luce causa la formazione di una figura di interferenza sullo schermo F. Consideriamo la situazione in cui passa un fotone alla volta. Sappiamo che, al passaggio attraverso le due fenditure in S2, l'aspetto ondulatorio della luce gioca un ruolo essenziale. Notiamo anche che qualunque tentativo di rivelare la particella distruggerebbe inevitabilmente l'aspetto ondulatorio, come accade quando la particella incide sullo schermo F, mostrando un puntino luminoso. Anche il tentativo di sapere da quale fenditura è passata distruggerebbe la figura di interferenza, che verrebbe rimpiazzata da una linea di diffrazione, confermando la nostra conoscenza sulla fenditura in cui è passata la particella.

A questo punto, Einstein sposta la sua attenzione sul primo schermo argomentando come segue: dal momento in cui le particelle incidenti hanno una velocità praticamente perpendicolare all'asse x , e poichè solo l'interazione con lo schermo può dare loro una componente verticale della velocità, e dato che la legge di conservazione dell'impulso richiede che la somma dei momenti dei corpi interagenti rimanga costante dunque, se la particella è deflessa verso l'alto, lo schermo verrà spinto verso il basso, e viceversa. In condizioni reali la massa dello schermo è talmente grande tale per cui lo schermo dovrebbe restare praticamente fermo ma, in principio, dovrebbe essere possibile misurare anche un piccolissimo movimento. Se noi immaginiamo di effettuare questa misura dopo il passaggio di ciascuna particella del fascio luminoso, dovremmo essere in grado di sapere sia per quale fenditura di S2 passa la particella, sia l'impulso della stessa, dallo spostamento dello schermo S1. Ma dal momento in cui la misura della direzione del movimento di S1, dopo che le particelle lo hanno attraversato e vanno verso il secondo schermo S2, non può influire sugli sviluppi successivi del processo, la figura di interferenza comparirà nuovamente sullo schermo F. Ma noi sappiamo che la figura di interferenza richiede che lo stato del fascio al passaggio nello schermo S2 sia una sovrapposizione di due stati che corrispondono al passaggio attraverso una o l'altra fenditura, e ciò significa che l'aspetto ondulatorio sta governando il processo in quel momento. Nonostante ciò, secondo

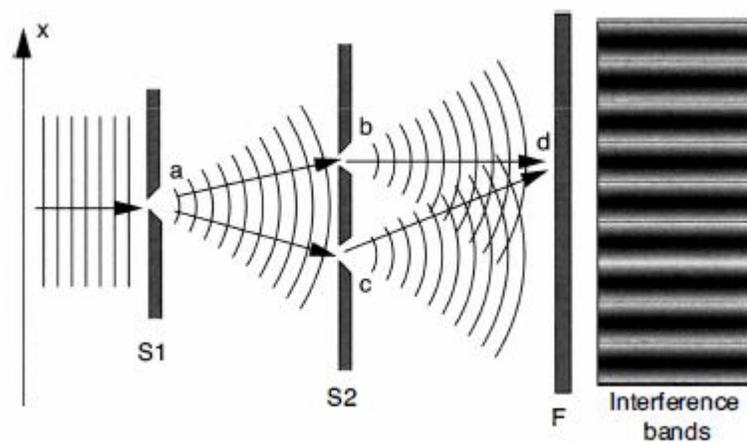


Figura 2.1: *Situazione descritta da Einstein*

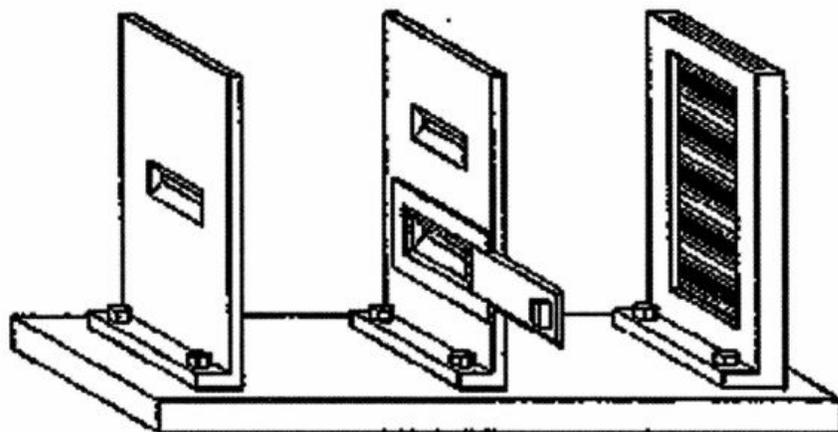


Figura 2.2: *Preparazione preliminare della proposta di Einstein per mostrare l'aspetto corpuscolare e ondulatorio del fascio al passaggio per il secondo schermo.*

il ragionamento di Einstein, per ogni particella noi saremo in grado di sapere (dagli effetti del fascio sullo schermo S1) se la particella è passata per la fenditura in alto o in basso del secondo schermo. Quest'esperimento ideale ci ha permesso (almeno in principio) di osservare l'aspetto particellare del fascio, senza distruggere l'aspetto ondulatorio dello stesso, contro quanto stabilito dal principio di complementarità. Inoltre lo stesso esperimento ci ha permesso di determinare contemporaneamente posizione e velocità delle particelle con una precisione di gran lunga maggiore rispetto a quanto stabilito dal principio di indeterminazione.

Quale fu la risposta di Bohr? Usando due illustrazioni che racchiudono l'esperimento mentale proposto da Einstein (fig.2.2 e 2.3), Bohr replicò così. La fig.2.3 mostra come il primo schermo dovrebbe essere modificato (idealmente) così da poter rivelare il movimento in alto o in basso dello stesso. Questo è perché l'idea di Einstein non tiene: una conoscenza estremamente precisa del movimento verticale dello schermo è stata presupposta da Einstein. Infatti, se la velocità dello schermo lungo la direzione x prima del passaggio della particella non fosse nota con una precisione di gran lunga maggiore del cambiamento causato dal passaggio della particella (cioè, se lo schermo si sta già muovendo in alto o in basso con una velocità sconosciuta, e maggiore di quella che si ha con il passaggio della seconda particella), la rivelazione di un suo movimento al passaggio della particella non ci darebbe la conoscenza desiderata. Tuttavia, Bohr argomentò, una precisa conoscenza del movimento trasverso dello schermo, quando viene applicato il principio di indeterminazione, porta ad un'inevitabile imprecisione riguardo la posizione nella direzione x dello schermo stesso. Prima del processo, la posizione dello schermo sarebbe indeterminata, come stabilito dal principio di indeterminazione. Consideriamo, ad esempio, il punto d della figura 2.1, dove appare la figura di interferenza. Chiaramente, uno spostamento del primo schermo dovrebbe cambiare la lunghezza dei cammini $a-b-d$ e $a-c-d$, rendendoli differenti da come mostrati in figura. Se la differenza tra i due cammini è di circa mezza lunghezza d'onda, ci sarà un'interferenza costruttiva nel punto d , piuttosto che distruttiva. Allora, quest'esperimento ideale richiede una sorta di media su tutte le possibili posizioni di S1. Dunque, il nostro tentativo di rivelare la natura particellare del fascio ha distrutto la figura di interferenza nello schermo F, che essenzialmente dipendeva

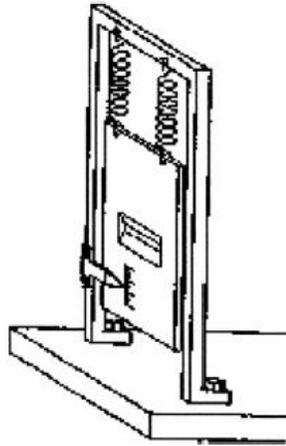


Figura 2.3: Per eseguire l'esperimento di Einstein, il primo schermo deve essere rimpiazzato con uno che può muoversi verticalmente, come in figura

dalla natura ondulatoria delle particelle.

L'argomento di Bohr sembra convincente. Dobbiamo notare che il ragionamento di Bohr riguardo l'impossibilità di usare l'apparato sperimentale proposto da Einstein come controprova dell'indeterminismo ha fatto uso del fatto che un sistema macroscopico (schermo S1) debba obbedire alle leggi quantistiche. D'altra parte, Bohr mantenne il fatto che, se vogliamo rivelare aspetti microscopici della realtà, dobbiamo effettuare processi di amplificazione che coinvolgono strumenti macroscopici, la cui caratteristica fondamentale è quella di obbedire alle leggi classiche della fisica, e poter essere cioè descritti in termini classici.

Se Einstein avesse preso pieno vantaggio da questa forzatura di Bohr di "inghiottire" una porzione del mondo macroscopico nel mondo dei quanti, avrebbe potuto articolare ulteriormente le sue argomentazioni, e criticare il suo oppositore per aver ipotizzato che anche una parte del macrocosmo sia governata dalle leggi quantistiche. Come possiamo comprendere il fatto che almeno una parte del macrocosmo, con la sua determinatezza, debba essere "riassorbito" dentro la nube dell'indeterminismo quantistico? E cosa ancora più importante, quali criteri devono essere soddisfatti (poiché essere macroscopico in sé non è evidentemente sufficiente) per identificare le parti di un sistema che obbediscono alle

leggi quantistiche e quelle che rispettano le leggi classiche? Torneremo in seguito su queste domande. Per il momento, è sufficiente notare che l'importanza di questa problematica, all'epoca del dibattito, non era stata ancora pienamente avvertita.

2.1.2 1930: il nuovo attacco di Einstein

Alla sesta Conferenza di Solvay del 1930, la relazione di indeterminazione fu oggetto di un nuovo serio attacco da parte di Einstein. La sua idea era abbastanza semplice: lui immaginò un apparato sperimentale che in seguito Bohr avrebbe abbozzato in dettaglio (vedi fig. 2.4) per far emergere gli elementi essenziali dell'argomentazione e sottolineare i punti della sua replica. Einstein immaginò una scatola contenente radiazione elettromagnetica ed un orologio che controllava l'apertura di un lato della scatola con un "cancello". Il cancello viene aperto per un intervallo di tempo Δt , che può essere arbitrariamente scelto. Mentre il cancello è aperto, immaginiamo che uno dei fotoni sfugga. Naturalmente, se vogliamo ricorrere alla relazione di indeterminazione tempo/energia, dovremo trovare un modo per determinare con la giusta precisione l'energia trasportata del fotone. A questo punto Einstein fece ricorso alla celebre relazione tra massa ed energia della relatività ristretta: $E = mc^2$. Da ciò segue che la conoscenza della massa di un oggetto ci fornisce una conoscenza precisa della sua energia. L'idea è semplice: se la scatola viene pesata prima e dopo l'apertura del cancello, e se la scatola emette un certa quantità di energia, dopo sarà più leggera. La variazione di peso moltiplicata per c^2 ci fornirebbe così una conoscenza precisa dell'energia emessa. Ovviamente, poichè in linea di principio il peso della scatola potrebbe essere determinato con un qualsiasi grado arbitrario di esattezza, l'energia emessa potrebbe essere determinata con la precisione desiderata. Quindi il prodotto $\Delta E \Delta t$ può essere reso più piccolo del limite imposto del principio di indeterminazione.

L'idea era, come tutte quelle avanzate da Einstein, particolarmente acuta, e l'argomento sembrava inattaccabile. Riviviamo questo episodio attraverso la vivida descrizione che ne ha dato, alcuni anni dopo, Léon Rosenfeld, uno degli scienziati che partecipò al convegno:

Fu un vero shock per Bohr... che, a tutta prima, non ne vedeva una soluzione. Per

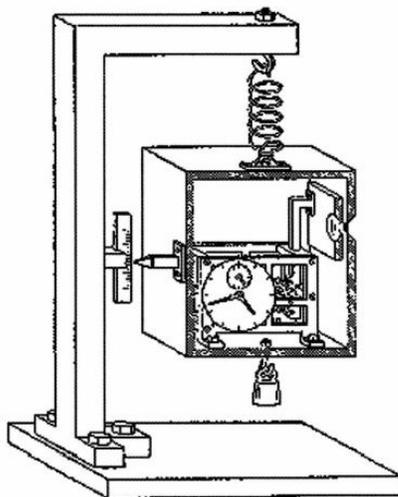


Figura 2.4: Il setup sperimentale dell'esperimento mentale di Einstein del 1930, con cui lo scienziato intendeva mostrare una violazione della relazione di indeterminazione energia-tempo

tutta la sera fu estremamente angustiato, e continuava a passare da uno scienziato all'altro, cercando di persuaderli che non poteva essere, che sarebbe stata la fine della fisica se Einstein avesse avuto ragione; ma non riusciva a trovare un modo di confutare il paradosso. Non dimenticherò mai l'immagine dei due antagonisti mentre se ne andavano dal club (della Fondation Universitaire): Einstein, con la sua figura alta e maestosa, che camminava tranquillo, con un sorriso leggermente ironico, e Bohr che gli trotterellava appresso, pieno di eccitazione ... Il mattino dopo vide il trionfo di Bohr.

L'espressione "il trionfo di Bohr" si adatta molto bene a questo avvenimento per due motivi. Innanzitutto perché Bohr, ancora una volta, riuscì a dimostrare che il sottile argomento di Einstein non risultava conclusivo, ma ancor di più perché per ottenere questo risultato egli fece ricorso proprio ad una delle grandi idee di Einstein, vale a dire il principio di equivalenza tra massa gravitazionale e massa inerziale. L'argomento può riassumersi nel modo seguente: nell'analisi del processo risulta necessario tenere conto dell'inevitabile incertezza della posizione dell'indice (altrimenti esso, a causa del principio di indeterminazione, potrebbe avere una velocità trasversa che vanificherebbe il procedimento). Questa

incertezza si tramuta ovviamente in un'incertezza nella determinazione del peso e perciò dell'energia. D'altra parte, poiché il sistema si trova immerso in un campo gravitazionale che varia con la posizione q , proprio secondo il principio di equivalenza l'incertezza nella posizione dell'orologio implica un'incertezza circa la sua scansione temporale e quindi nel valore dell'intervallo Δt . Una valutazione precisa di questo effetto porta a concludere che, di fatto, la relazione $\Delta E \Delta t \geq h$ non può essere violata.

Ancora una volta Bohr è costretto, per invalidare l'argomento di Einstein, a trattare come quantistiche, e quindi a considerare soggette alle restrizioni derivanti dal principio di indeterminazione, parti macroscopiche dell'apparecchio quali l'indice della bilancia e l'orologio. Vorrei inoltre sottolineare che la rilevanza particolare che la comunità scientifica attribuì a quest'evento, il quale fu considerato un vero e proprio trionfo, è legata al fatto che Bohr vinse lo scontro con Einstein facendo uso di una delle più profonde scoperte del suo rivale. Questa conclusione, tuttavia, si basa su un malinteso. Come potrebbe, la coerenza interna della meccanica quantistica, dipendere dalla validità della relatività generale? La meccanica quantistica è stata sviluppata in un contesto perfettamente "classico", cioè ammettendo la struttura spazio-temporale classica, con la sua invarianza galileiana, senza considerare la relatività generale o alcuna teoria della gravitazione. Inoltre, ancora oggi, rimane un problema aperto combinare la meccanica quantistica con la relatività generale. Quindi appare difficile giustificare un argomento basato sulla relatività generale per "salvare" la consistenza della meccanica quantistica. È vero che l'argomentazione utilizzata da Einstein, come ricordato da Bohr, utilizza la relazione massa/energia della relatività ristretta, ma in tale argomento non vi è alcun riferimento alla relatività generale.

Quest'episodio, e l'anno in cui si verificò (1930), segnarono un cambiamento decisivo nell'atteggiamento di Einstein nei confronti della meccanica quantistica. Sembrava adesso convinto che esistessero limitazioni, in linea di principio, alla possibilità di determinare con la precisione desiderata la velocità e la posizione di una particella, accettando così il principio di indeterminazione. Ma mantenne la ferma convinzione che queste proprietà potessero essere considerate come appartenenti ai sistemi, e non come "create" dall'atto di misurazione. Da questo momento in poi, i suoi attacchi non saranno più rivolti contro l'incoerenza della teoria, ma contro

la sua *incompletezza*. Mentre Einstein riconosceva che fosse praticamente impossibile determinare simultaneamente i valori di grandezze incompatibili, non era disposto a concedere, in opposizione all'ortodossia di Copenaghen, che non si potesse nemmeno *pensare* che esistessero valori precisi di queste grandezze. In altre parole, come abbiamo accennato prima, Einstein era molto riluttante all'idea di accettare la natura non-epistemica delle probabilità quantistiche, e insisteva sul fatto che la teoria non raccontasse l'intera storia. È importante sottolineare che questa è stata la prima volta in cui venne ammessa la possibilità di un completamento della teoria, sebbene non si usarono queste parole. Questa linea di pensiero avrebbe portato David Bohm a formulare il primo esempio esplicito di *teoria a variabili addizionali*. Ciò fu dovuto, in larga misura, alle frequenti discussioni avute con Einstein a Princeton.

Contro l'incompletezza, Einstein elaborerà un altro ingegnoso Gedanken experiment, il famoso paradosso EPR.

2.1.3 1935: il paradosso EPR

Nel 1935, in collaborazione con Boris Podolsky e Nathan Rosen, Einstein ideò un esperimento mentale che sarebbe diventato famoso come *il paradosso EPR*⁷. Sulla base di ipotesi naturali di realismo ed utilizzando i principi relativistici universalmente riconosciuti come validi, da quest'argomento ne consegue che la meccanica quantistica è *incompleta*.

Poiché in questo capitolo ci stiamo concentrando su una prospettiva storica degli aspetti cruciali che hanno segnato lo sviluppo delle fondamenta della meccanica quantistica, non spenderemo molto tempo sugli aspetti tecnici del paradosso, ma desideriamo illustrare l'importanza di quest'argomento all'interno degli sviluppi storici della teoria dei quanti.

Gli autori hanno considerato due particelle che partono dallo stesso luogo e si muovono in direzioni opposte, cosicché la quantità di moto totale, pari a zero, si conservi. Quindi, misurando la quantità di moto di una particella, si può conoscere quella dell'altra particella. Ma se si misurasse la posizione di una particella, saprei anche la posizione dell'altra, poiché si muovono alla stessa velocità e in direzioni opposte. Tuttavia, se le

⁷A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, Can quantum mechanical description of reality be considered complete? Phys. Rev. 47, 777–780 (1935)

due particelle sono distanti, e se la località è valida, la scelta che facciamo sulla grandezza da misurare su una particella, non può influenzare lo stato dell'altra particella. Quindi, ciascuna particella deve possedere una quantità di moto e una posizione ben definite, e questo mostra che la meccanica quantistica è incompleta, poiché lo stato quantico non include queste variabili.

È importante sottolineare che la preoccupazione di Einstein nei confronti del determinismo non riguardava tanto il determinismo in sé (a differenza di come viene spesso enfatizzata la questione), quanto piuttosto la località.

La sua argomentazione venne poi ripresa da Bohm⁸, che semplifica la trattazione parlando di spin e non di posizione ed impulso, ed è la seguente: consideriamo due particelle preparate nel seguente stato entangled:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|A \uparrow\rangle |B \downarrow\rangle - |A \downarrow\rangle |B \uparrow\rangle) \quad (2.1)$$

se si misura lo spin nella direzione 1 in A, si può ottenere, ad esempio:

$$|A1 \uparrow\rangle |B1 \downarrow\rangle \quad (2.2)$$

se misuro lo spin nella direzione 2 in B, possiamo ottenere:

$$|A2 \downarrow\rangle |B2 \uparrow\rangle \quad (2.3)$$

Quindi, se assumiamo la località della teoria, conosciamo la proiezione dello spin in due direzioni diverse della stessa particella (B) ed è contro ciò che dice la teoria standard. Ma, secondo l'ortodossia di Copenaghen, la ragione per cui non è possibile misurare *simultaneamente* lo spin nella direzione 1 in A e nella direzione 2 in B è che una di queste misurazioni influenzerà lo stato quantico, "facendolo collassare", e lo influenzerà in entrambi i punti, cioè non localmente, in modo che la misurazione dello spin nella direzione 1 in X cambierà generalmente i risultati di una misurazione nella direzione 2 in Y, ed è ciò che Einstein non era disposto ad

⁸D. Bohm, *Quantum Theory* (Dover Publications, New York, 1989) First edition (Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1951)

accettare. Ma poiché la località implica una contraddizione con la teoria, Einstein conclude dicendo che la teoria quantistica deve essere incompleta, al fine di salvare la località. Tuttavia, l'argomento EPR venne frainteso. Un equivoco piuttosto comune fu quello di pensare che l'obiettivo di EPR fosse negare il principio di indeterminazione, mostrando che si potrebbero misurare, ad esempio, lo spin nella direzione 1 in A e nella direzione 2 in B, e quindi conoscere i valori degli spin di entrambe le particelle in entrambe le direzioni associate ad operatori che non commutano (cosa che, secondo la meccanica quantistica standard, non sarebbe possibile). In realtà Einstein, in una sua lettera a Schrodinger del 19 giugno 1935, negò esplicitamente che il suo obiettivo fosse confutare il principio di indeterminazione.

EPR scrisse⁹ che: *"If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e. with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity."*

Bohr replicò¹⁰: *"the wording of the above-mentioned criterion [...] contains an ambiguity as regards the meaning of the expression 'without in any way disturbing a system'. Of course there is in a case like that just considering no question of a mechanical disturbance of the system under investigation during the last critical stage of the measuring procedure. But even at this stage there is essentially the question of an influence on the very conditions which define the possible types of predictions regarding the future behaviour of the system[...] their argumentation does not justify their conclusion that quantum mechanical description is essentially incomplete[...] This description may be characterized as a rational utilization of all possibilities of unambiguous interpretation of measurements, compatible with the finite and uncontrollable interaction between the objects and the measuring instruments in the field of quantum theory"*. Come fu notato da Bell[6] in seguito, questa risposta è davvero difficile da capire. In realtà, Einstein pensava che Bohr rifiutasse la premessa di EPR secondo cui "la situazione reale in B non poteva essere influenzata (direttamente) da alcuna misura su A[36]". Ma questo non è chiaramente affermato e,

⁹A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, Can quantum mechanical description of reality be considered complete? Phys. Rev. 47, 777–780 (1935)

¹⁰N. Bohr, Can quantum mechanical description of reality be considered complete? Phys. Rev. 48, 696–702 (1935)

dalla reazione di Bohr alla Conferenza di Solvay del 1927 (in cui ammise di non capire Einstein) e da un suo commento nel 1949 ad una lettera di Ehrenfest del 1935, dove evidentemente non afferrò il punto di vista di Einstein, si può dubitare che Bohr abbia davvero capito la visione del suo rivale.

2.2 Incomprensioni sul paradosso EPR

Come abbiamo già notato, è importante comprendere il fatto che uno dei motivi per cui Bohr fu considerato il vincitore nel dibattito con Einstein è legato all'incomprensione dell'argomentazione EPR da parte della comunità scientifica. Molti fisici, anche di rilievo, non capirono il paradosso EPR e, in generale, il ragionamento di Einstein. Ad esempio, Born disse[13]: *"The root of the difference between Einstein and me was the axiom that events which happens in different places A and B are independent of one another, in the sense that an observation on the states of affairs at B cannot teach us anything about the state of affairs at A"*. Come sottolineò giustamente Bell[6]: *"Misunderstanding could hardly be more complete. Einstein had no difficulty accepting that affairs in different places could be correlated. What he could not accept was that an intervention at one place could influence, 'immediately', affairs at the other"*. Ciò che afferma Born è che non ci sia nulla di sorprendente nel pensare che fare un esperimento in un posto possa fornirci informazioni su eventi che accadono in un altro luogo. Infatti, nei suoi commenti sulle argomentazioni di Einstein, Born fornisce il seguente esempio: *"When a beam of light is split in two by reflection, double-refraction, etc., and these two beams take different paths, one can deduce the state of one of the beams at a remote point B from an observation at point A"*. Ma qui Born fornisce un esempio classico, dove le proprietà del fascio esistono *prima* della loro misurazione. Ciò suggerisce che Born pensasse che ci siano risposte preesistenti, vale a dire che, riprendendo l'argomentazione di EPR, gli spin siano su o giù prima delle misurazioni e che le particelle abbiano velocità e posizioni correlate. In altre parole, sembra che Born fosse effettivamente d'accordo con Einstein sul fatto che la meccanica quantistica sia incompleta, ma semplicemente non capiva cosa intendesse dire Einstein. In seguito, venne posta un'altra critica contro il paradosso EPR, che



Figura 2.5: La divertente illustrazione del signor Bertlmann che compare nell'articolo di John Bell il 17 giugno 1980, pubblicato per *Journal de Physique*

è descritta da Bell in un famoso articolo, *Bertlmann's socks and the nature of reality*(1980)[6]. In quest'articolo viene illustrata la critica ipotizzando una situazione ironica, quella di una persona (Reinhold Bertlmann) che indossa sempre calzini di colori diversi. Se vediamo che un calzino è rosa, sappiamo subito che l'altro calzino non lo è (diciamo che è verde). Ciò sarebbe vero anche se i calzini fossero arbitrariamente lontani. Quindi, guardandone uno, impariamo qualcosa sull'altro calzino. Quindi il "filosofo dilettante", usando le parole di Bell, conclude dicendo che questo è un esempio di una situazione classica, ma *identica* al caso di EPR, quindi non ci sono problemi nel mondo quantistico, poichè questo caso "classico" è perfettamente ragionevole. Ma Bell spiega l'errore di quest'argomentazione: nel caso di Bertlmann, i calzini hanno un colore stabilito *prima* della misura, quindi non c'è alcun problema. Nel caso dell'argomento di EPR, non è così, poichè le due particelle non hanno un autovalore definito di s_z prima della misura. È interessante notare come quest'errore, all'apparenza banale, sia stato commesso anche da uno dei più famosi filosofi della scienza Karl Popper.

2.3 Il punto di vista di Schrodinger

Schrodinger è stato, insieme ad Einstein, uno dei più noti critici dell'interpretazione standard della meccanica quantistica. Con l'esempio del "gatto" divenuto famoso, che dovrebbe essere "sia vivo che morto", Schrodinger sperava di fornire un argomento decisivo contro l'ortodossia di Copenaghen. Sfortunatamente, il gatto di Schrodinger si è rivelato essere l'argomentazione forse più fraintesa sui fondamenti della meccanica quantistica.

Schrodinger viene spesso citato da Bohr, ad esempio quando afferma: "*If we are going to stick to this damned quantum-jumping, then I regret that I ever had anything to do with quantum theory*". A questo Bohr rispose: "*the rest of us are thankful that you did*"¹¹.

Il "salto" a cui si riferisce Schrodinger è probabilmente l'evoluzione discontinua non prevista dalla sua equazione, che viene descritta come il "collasso" o "riduzione" della funzione d'onda. Lui comprese il problema, non ancora risolto (ed aggiungerei, irrisolvibile nell'interpretazione di Copenaghen), di questi "salti": perché dovremmo avere questa regola in più, e a quale livello (microscopico, macroscopico, intermedio) si verifica il collasso?

Questa era una delle cose che maggiormente infastidiva Schrodinger, espressa in un famoso articolo: *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. Naturwissenschaften*(1935), tradotto "La situazione attuale della meccanica quantistica", in cui il famoso esempio del gatto occupa solo poche righe. Lui disse: "*But serious misgivings arise if one notices that the uncertainty affects macroscopically tangible and visible things, for which the term "blurring" seems simply wrong. The state of a radioactive nucleus is presumably blurred in such a degree and fashion that neither the instant of decay nor the direction, in which the emitted alpha-particle leaves the nucleus, is well established. Inside the nucleus, blurring doesn't bother us. The emerging particle is described, if one wants to explain intuitively, as a spherical wave that continuously emanates in all directions and that impinges continuously on a surrounding luminescent screen over its full expanse. The screen, however, does not show a*

¹¹Questa storia è raccontata da Heisenberg in: W. Heisenberg, *The Physical Principles of Quantum Theory*, tradotto da C. Eckart, F. Hoyt (Dover publications, New York, 1949). First edition: University of Chicago Press, Chicago (1930)

more or less constant uniform glow, but rather lights up at one instant at one spot". In altre parole, il problema è che ciò che vediamo macroscopicamente è localizzato, mentre la funzione d'onda non lo è.

Con l'esempio del gatto, Schrodinger voleva evidenziare la *reduction ad absurdum* dell'idea che la meccanica quantistica sia completa, poichè un'indeterminazione che potrebbe essere accettabile nel dominio microscopico, a cui non abbiamo accesso diretto, si trasforma in un'indeterminazione macroscopica inaccettabile. Secondo Schrodinger, per il gatto, la descrizione "sia vivo sia morto" non è certamente completa.

Alcune persone sembrano pensare che la meccanica quantistica predica che il gatto è "sia vivo sia morto" e che, poichè la meccanica quantistica è completa (sempre una loro assunzione), il gatto debba trovarsi in tale stato. Questo è un enorme malinteso del punto di vista di Schrodinger. Lui non intendeva questo, ma anzi voler esprimere la necessità di *completare* la teoria quantistica. È molto più sensato considerare, secondo Schrodinger, che l'esempio del gatto mostra che c'è un problema nella meccanica quantistica ordinaria, che inoltre può essere risolto con la teoria di de Broglie-Bohm (cosa che Schrodinger non dice, sebbene fosse a conoscenza della teoria dell'onda pilota). Usando le sue parole: "*It is typical of these cases that an indeterminacy originally restricted to the atomic domain becomes transformed into macroscopic indeterminacy, which can then be resolved by direct observation. That prevents us from so naively accepting as valid a 'blurred model' for representing reality. In itself it would not embody anything unclear or contradictory. There is a difference between a shaky or out-of-focus photograph and a snapshot of clouds and fog banks*".

Ritengo molto emblematica soprattutto la parte finale: "C'è una differenza tra una fotografia mossa o sfocata ed un'istantanea di nuvole e banchi di nebbia". Sta suggerendo che le funzioni d'onda non descrivono stati fisici oggettivi delle cose, cioè non sono come "fotografie di nuvole", ovvero riproduzioni fedeli di qualcosa che è *realmente*, oggettivamente, sfocato. Invece, dovremmo considerare le funzioni d'onda come *fotografie sfocate di oggetti che sono, di per sé, perfettamente nitidi*. In questo secondo caso, il carattere sfocato non appartiene all'oggetto descritto, ma è invece una sorta di mancanza o imperfezione del processo di riproduzione, cioè la funzione d'onda riflette la nostra *incompleta* conoscenza del sistema fisico in esame.

Inoltre, prosegue Schrodinger, non ci può essere una distinzione fondamentale tra sistemi microscopici e macroscopici (essendo il secondo letteralmente fatto dal primo). Da ciò segue che non c'è un punto particolare lungo la catena continua tra micro e macro dove avrebbe senso tracciare una linea netta e dire "diverse leggi dinamiche iniziano ad applicarsi qui". Ma se il micro ed il macro devono essere trattati allo stesso modo, e se la descrizione quantistica dei sistemi macroscopici è incompleta, questo è anche il caso dei sistemi microscopici.

Torneremo più volte su queste argomentazioni e sulle varie risposte che sono state date dalle diverse teorie alternative all'interpretazione di Copenaghen. Per il momento, è importante capire il *vero* significato del gatto di Schrodinger, *quasi sempre* mal spiegato nelle scuole e nelle università, dando l'impressione che Schrodinger fosse un sostenitore dell'interpretazione ortodossa della meccanica quantistica, mentre non è chiaramente così.

Una lettera che Einstein inviò a Schrodinger sembra descrivere la stessa problematica. Questa lettera è molto importante, perchè racchiude in poche righe il punto di vista dello scienziato:

Dear Schrödinger,

.... I am as convinced as ever that the wave representation of matter is an incomplete representation of the state of affairs, no matter how practically useful it has proved itself to be. The prettiest way to show this is by your example with the cat (radioactive decay with an explosion coupled to it). At a fixed time parts of the ψ -function correspond to the cat being alive and other parts to the cat being pulverized.

If one attempts to interpret the ψ -function as a complete description of a state, independent of whether or not it is observed, then this means that at the time in question the cat is neither alive nor pulverized. But one or the other situation would be realized by making an observation. If one rejects this interpretation then one must assume that the ψ -function does not express the real situation but rather that it expresses the contents of our knowledge of the situation. This is Born's interpretation, which most theorists today probably share. But then the laws of nature that one can formulate do not apply to the change with time of something that exists, but rather to the time variation of the content of our legitimate expectations.

Both points of view are logically unobjectionable; but I cannot believe that either

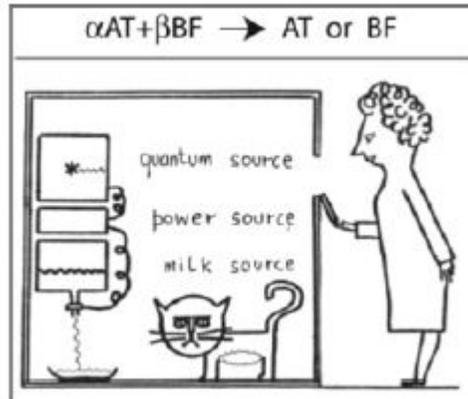


Figura 2.6: La versione di Bell del gatto di Schrodinger. Lo stato del nucleo radioattivo ('A' per 'no decaduto' e 'B' per 'decaduto') rimane impigliato nella consegna(o meno) del latte nel piatto del gatto e quindi anche con le dimensioni dello stomaco del gatto ('T' per 'tiny(magro)' e 'F' per 'flat(grasso)')

of these viewpoints will finally be established.

There is also the mystic, who forbids, as being unscientific, an inquiry about something that exists independently of whether or not it is observed, i.e., the question as to whether or not the cat is alive at a particular instant before an observation is made (Bohr). Then both interpretations fuse into a gentle fog, in which I feel no better than I do in either of the previously mentioned interpretations, which do take a position with respect to the concept of reality.

I am as convinced as ever that this most remarkable situation has come about because we have not yet achieved a complete description of the actual state of affairs.

Of course I admit that such a complete description would not be observable in its entirety in the individual case, but from a rational point of view one also could not require this....

Best regards from

Yours, A. Einstein[13]

Qui di nuovo Einstein, scrivendo a Schrodinger, subito dopo che Schrodinger pubblicò il suo lavoro:

...your cat shows that we are in complete agreement concerning our assessment of

*the character of the current theory. A ψ -function that contains the living as well as the dead cat just cannot be taken as a description of a real state of affairs. To the contrary, this example shows exactly that it is reasonable to let the ψ -function correspond to a statistical ensemble that contains both systems with live cats and those with dead cats.*¹²

Dunque, per Einstein e Schrodinger, queste situazioni suggerivano fortemente che, piuttosto che fornire descrizioni dirette, letterali e complete dei sistemi fisici, le funzioni d'onda vanno intese come descrittive della nostra conoscenza incompleta - la nostra ignoranza - sugli stati fisici di questi sistemi. Come dice qui Einstein, la funzione d'onda (che attribuisce, tipicamente, un intervallo di possibili valore di varie proprietà al sistema) non deve essere intesa come una descrizione completa del sistema, ma piuttosto come caratterizzante un insieme statistico di sistemi con qualche variazione tra i singoli membri dell'ensemble. Discuteremo questo punto di vista nella sez.7.1.

Nella figura in altro troviamo una simpatica esposizione di John Bell durante una lezione tenutasi a Trieste, in occasione del 25esimo anniversario del Centro Internazionale di Fisica Teorica, il 2 novembre 1989¹³.

La visione di Einstein e Schrodinger venne abbandonata soprattutto a causa del teorema dell'impossibilità di John von Neumann.

Per tutta la vita, Schrodinger cercò di screditare il concetto di Bohr di "salto quantico". I suoi attacchi culminarono in un articolo del 1952, intitolato *Are there Quantum Jumps?*. In quest'articolo presentò alcune obiezioni contro l'interpretazione probabilistica di Born. Ma, in sostanza, Schrodinger ripeté le sue precedenti argomentazioni, avvolte in una buona dose di retorica. Secondo Schrodinger, la fisica stava correndo il rischio di allontanarsi dal suo glorioso passato e dalla sua cultura millenaria. I fisici, prosegue Schrodinger, dovrebbero occuparsi non solo di ingegnosi costrutti teorici e del loro accordo con i dati sperimentali, ma anche dell'idoneità dei loro concetti ad essere assorbiti all'interno della cultura generale dell'umanità: *"Science is not a soliloquy. It gains value only within its cultural milieu, only by having contact with all those who are now, and who in future will be, engaged in promoting spiritual culture and knowled-*

¹²A. Fine, *The Shaky Game* (University of Chicago Press, Chicago, 1996)

¹³J.S. Bell, The trieste lecture of John Stewart Bell, trascritta da A. Bassi, G.C. Ghirardi. *J. Phys. A: Math. Theor.* 40, 2919–2933 (2007)

ge"(Schrodinger, 1952).

Non tutti i concetti, secondo Schrodinger, sono destinati a sopravvivere: "A theoretical science ... where the initiated continue musing to each other in terms that are, at best, understood by a small group of close fellow travelers, will necessarily be cut off from the rest of cultural mankind, in the long run it is bound to atrophy and ossify"(Schrodinger, 1952). Il concetto di salto quantico, prosegue Schrodinger, non è un candidato adatto per la "sopravvivenza a lungo termine". Ci sono altri ingegnosi costrutti della mente umana che hanno permesso accurate descrizioni dei fenomeni osservati e che in seguito hanno perso tutto il loro interesse, eccetto che per gli storici. Ad esempio, gli epicicli del sistema planetario. L'analogo moderno degli epicicli, prosegue Schrodinger, è il concetto di salto quantico.

2.4 Il teorema di von Neumann

Nel 1932, von Neumann pubblicò quella che è considerata una delle più basilari esposizioni matematiche della meccanica quantistica, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, tradotto "Fondamenti matematici della meccanica quantistica". In questo libro von Neumann sviluppa il formalismo della misurazione in meccanica quantistica, e fornisce un argomento a favore della completezza della teoria ortodossa, dimostrando con un teorema diventato famoso (noto come "teorema dell'impossibilità"), che non è possibile introdurre variabili nascoste che riproducano i risultati della meccanica quantistica standard.

Von Neumann considera la possibilità di introdurre variabili $v(A)$ che darebbero, per ogni singolo sistema, il valore della quantità A prima della misura. Quindi $v(A)$ dovrebbe coincidere con uno degli autovalori della matrice (o operatore) associato alla quantità A . Egli assume, tra le altre proprietà, che le variabili nascoste soddisfino la seguente relazione:

$$v(A + B) = v(A) + v(B) \quad (2.4)$$

per valori arbitrari di A e B , anche nel caso in cui A e B non possano essere misurati simultaneamente.

Ma ecco una semplice dimostrazione del fatto che l'ipotesi (2.4) non è

sempre vera.

Sia:

$$A = \sigma_x \quad B = \sigma_y \quad (2.5)$$

che corrispondono, rispettivamente, alla misura dello spin lungo gli assi x e y . Consideriamo una loro combinazione:

$$C = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{\sqrt{2}} \quad (2.6)$$

che è l'operatore dello spin ad un angolo di 45° tra gli asse x e y . questi tre operatori hanno autovalori ± 1 dunque, se l'ipotesi di von Neumann fosse corretta, dovremmo avere:

$$\pm 1 = \frac{\pm 1 \pm 1}{\sqrt{2}} \quad (2.7)$$

che è chiaramente falso.

Usando questo presupposto sbagliato, von Neumann conclude che la meccanica quantistica sia completa, e che quindi non sia possibile introdurre variabili addizionali. Così si esprime: "*...The only formal theory existing at the present time which orders and summarizes our experiences in this area in a half-way satisfactory manner, i. e. quantum mechanics, is in compelling logical contradiction with causality. Of course it would be an exaggeration to maintain that causality has thereby been done away with: quantum mechanics has, in its present form, several serious lacunae, and it may be even that it is false, although this latter possibility is highly unlikely, in the face of its startling capacity in the qualitative explanation of general problems, and in the quantitative calculation of special ones. ...*". Da queste parole si evince che von Neumann non dimostra, né pretende di dimostrare, l'inesistenza di una teoria alternativa le cui previsioni siano equivalenti a quelle della meccanica quantistica. Suggestisce solo che l'esistenza di una tale teoria sia "altamente improbabile (*highly unlikely*)". Sfortunatamente, il suo lavoro venne in seguito interpretato erroneamente come una "prova" della non esistenza di qualsiasi teoria alternativa.

Born, nella sua risposta al punto di vista di Einstein, si riferì anche al teorema di von Neumann: sottolineò che le speranze di Einstein per una teoria più completa "non sono state realizzate", e che "*physicists have good reasons for believing this to be impossible, based mainly on studies carried out by J. von Neumann*[13]".

Questo teorema viene citato pure da Pauli: "*von Neumann's well known proof that the consequences of quantum mechanics cannot be amended by additional statements on the distribution of values of observables, based on the fixing of values of some hidden parameters, without changing some consequences of the present quantum mechanics*¹⁴".

D'altra parte, il difetto nell'assunzione di von Neumann venne subito notato nel 1935 dalla filosofa tedesca Grete Hermann, una dottoranda di Emmy Noether, ma pubblicò il suo risultato in una rivista filosofica poco conosciuta¹⁵, e fu generalmente ignorato, ma è difficile evitare di pensare che non fu presa sul serio come avrebbe dovuto perchè era una donna e perchè il suo articolo distruggeva uno degli argomenti principali usati per stabilire l'inevitabilità dell'ortodossia di Copenaghen.

Secondo quanto riferito, anche Einstein non era convinto dell'argomento di von Neumann, ma non ne ha mai pubblicato una critica. Sfortunatamente, non sembra esserci alcuna prova che von Neumann ed Einstein (che in quel periodo lavoravano entrambi a Princeton) abbiano mai discusso direttamente della validità del "teorema di impossibilità". Tuttavia, Abner Shimony racconta una storia, a sua volta raccontatagli da Peter Bergmann, su un episodio quando lui (Bergmann) chiese ad Einstein un'opinione su questa "prova". Secondo quanto riferito, Einstein la conosceva bene. In particolare, in risposta a Bergmann, ha preso il libro di von Neumann ed ha indicato una delle ipotesi del teorema, su cui si basa la dimostrazione, che è lo stesso assunto errato di cui abbiamo parlato sopra, e che in seguito venne "additato" da Bell nel 1965 e trovato insostenibile¹⁶. Data l'attenta formulazione dei passaggi di von Neumann, di cui abbiamo citato un esempio, forse Einstein non vedeva alcun motivo valido per pubblicare tali critiche, dal momento in cui lo stesso von Neu-

¹⁴W. Pauli, Editorial on the concept of complementarity. *Dialectica* 2, 307-311 (1948)

¹⁵G.Hermann, Die naturalphilosophischen grundlagen der Quantenmechanik. *Abhandlungen der Friesschen Schule* 6, 69-152 (1935)

¹⁶J.S. Bell, On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox. *Physics* 1, 195-200 (1964)

mann, come abbiamo detto, non ha mai effettivamente affermato che le variabili nascoste siano impossibili.

L'influenza della "prova" di von Neumann viene vividamente descritta nell'autobiografia del filosofo della scienza Paul Feyerabend: "*He [Bohr] came for a public lecture[...] At the end of the lecture he left, and the discussion proceeded without him. Some speakers attacked his qualitative arguments-there seemed to be lots of loopholes. The Bohrians did not clarify the arguments; they mentioned the alleged proof by von Neumann, and that settled the matter. Now I very much doubt that those who mentioned the proof, with the possible exception of one or two of them, could have explained it. I am also sure that their opponents had no idea of its details. Yet, like magic, the mere name 'von Neumann' and the mere word 'proof' silenced the objectors*¹⁷"

È interessante osservare come una "dimostrazione" falsa come il teorema di von Neumann possa avere avuto una così grande influenza sul progresso della scienza, e come l'intera comunità scientifica sia stata ingannata da questo teorema. Il fisico e premio Nobel Bridgman si esprime così: "*To me it is a curious spectacle to see the unanimity with which the members of a certain circle accept the rigor of von Neumann's proof*¹⁸". Con parole meno eleganti, in un'intervista per la rivista *Omni*, Bell considerò il teorema dell'impossibilità "*not merely false, but foolish!*¹⁹".

2.5 Teoria dell'onda pilota

Nelle sue note del 1924-1927, e nella sua tesi di dottorato, che precede tutti gli altri importanti lavori sulla fisica quantistica, de Broglie non solo associò le onde alle particelle, ma introdusse anche l'idea che il moto delle particelle debba essere guidato dalle onde. Il fisico francese Paul Langevin inviò una copia della tesi di de Broglie ad Einstein, il quale rispose dicendo che de Broglie aveva "sollevato un angolo del grande velo"²⁰ e

¹⁷P.Feyerabend, *Killing Time*, University Chicago Press, Chicago (1995)

¹⁸P.W. Bridgman, *Review of Louis de Broglie's book. Non-Linear Wave Mechanics: A Causal Interpretation*. Sci. Am. 203, 206 (Ottobre 1960)

¹⁹J. Bell, John Bell, Physicist, interview by Charles Mann and Robert Crease, *Omni Magazine* (May 1988), pp. 85-92, 121

²⁰A. Einstein, Letter to Paul Langevin (December 16, 1924) (Einstein Archives, Jerusalem),15-376

fece circolare la tesi in Germania. Ma de Broglie non riuscì a formalizzare la teoria matematicamente in tutti i suoi aspetti.

Fu invitato a presentare il suo lavoro alla 5a conferenza di Solvay a Bruxelles, nel 1927, dove sottolineò: "*if the propagation of a wave in space has a clear physical meaning, it is not the same as the propagation of a wave in the abstract configuration space*". Questo è ciò che spinse de Broglie a considerare le particelle come 'esterne' all'onda ψ , mentre il loro moto è determinato solo dalla propagazione dell'onda[2].

Einstein pensava che de Broglie fosse nella direzione giusta, cioè cercare di localizzare la particella durante la sua propagazione. Un altro partecipante della conferenza del 1927, il fisico francese Léon Brillouin, fu ancora più ottimista durante la discussione che seguì il discorso di de Broglie: "*Mr. Born can doubt the real existence of the trajectories calculated by Mr. de Broglie, and assert that one will never be able to observe them, but he cannot prove to us that these trajectories do not exist. There is no contradiction between the point of view of Mr. de Broglie and that of the other authors[...][2]*".

Ma la reazione generale fu negativa. In particolare, Pauli sollevò un'obiezione riguardante la descrizione, all'interno della teoria di de Broglie, di alcuni fenomeni di scattering. C'è qualche resoconto in letteratura sul fatto che de Broglie abbia risposto all'obiezione più o meno correttamente, ma de Broglie parlò di tale obiezione solo più tardi²¹, il che suggerisce che non fosse tanto sicuro della sua risposta. Una risposta completa all'obiezione di Pauli fu data nel 1952 da Bohm, al quale dovrebbe essere attribuito il merito di aver spiegato come la teoria di de Broglie-Bohm spieghi tutte le previsioni della meccanica quantistica.

In ogni caso, de Broglie lasciò la conferenza di Solvay scoraggiato. Non solo per le critiche di Pauli, o per le reazioni generalmente negative, ma anche perché non riusciva a dare un senso fisico alla funzione d'onda, definita nello spazio delle configurazioni, e ciò era essenziale per comprendere la teoria di de Broglie-Bohm. Già nel suo articolo del 1927, *La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement.*, scritto prima del congresso, de Broglie aveva scritto: "*Physically, there can be no question of a propagation in a configuration space whose existence is purely*

²¹In L. de Broglie, *Remarques sur la théorie de l'onde-pilote*. C. R. Acad. Sci. Paris 233, 641–644 (1951), de Broglie si riferisce ai "difensori dell'interpretazione attuale, soprattutto M. Pauli", dicendo: "sono rimasto molto colpito dai loro argomenti".

abstract: the wave picture of our system must include N waves propagating in real space and not a single wave propagating in the configuration space".

Per de Broglie la funzione d'onda ha un significato puramente probabilistico, quindi un valore soggettivo e non fisico, e solo l'esistenza di N soluzioni per N particelle, più o meno localizzate nello spazio, avrebbero dato un significato all'intero schema. Non potendo risolvere i problemi matematici legati a quest'idea, rinunciò alla sua alternativa e seguì l'ortodossia di Copenaghen per i successivi venticinque anni. Fino a quando non ricevette un manoscritto da un giovane fisico americano, David Bohm. De Broglie reagì menzionando la sua priorità, ma anche riaffermando le sue vecchie obiezioni alla sua stessa teoria²², ma è anche vero che de Broglie non ha mai preso sul serio l'idea dell'onda pilota per più di una particella, a causa della sua natura "astratta" e non locale.

Ciò che risulta molto strano, tuttavia, è perché persone come Schrodinger ed Einstein, che si opposero all'ortodossia, nel 1927 e anche più tardi, non seguirono l'idea di de Broglie.

Ciò è probabilmente dovuto ancora una volta alla natura apparentemente non fisica della funzione d'onda definita nello spazio delle configurazioni. Inoltre, Einstein aveva già sviluppato la sua teoria delle variabili addizionali, con una sorta di onda guida simile all'idea di de Broglie, ma con equazioni differenti e molto più complicate, e si rese conto che non funzionava, soprattutto per la sua non località²³. In seguito, Bell andò alla radice del problema, ma più tardi: "*No one can understand this theory [the de Broglie–Bohm theory] until he is willing to think of ψ as a real objective field rather than a 'probability amplitude'. Even though it propagates not in 3-space but in $3N$ -space*"[6]. E questo è qualcosa che nessuno prima di Bohm era stato disposto a pensare; certamente, non de Broglie, come abbiamo visto, né Einstein e neanche Schrodinger.

²²L. de Broglie, *La physique quantique restera-t-elle indéterministe?* (Gauthier-Villars, Paris, 1953)

²³Per una discussione su questa teoria, che Einstein non ha mai pubblicato, vedere: P. Holland, What's wrong with Einstein's 1927 hidden-variable interpretation of quantum mechanics? *Found. Phys.* 35, 177–196 (2005)

2.6 Risposte a Bohm

Nel 1952, David Bohm pubblicò due articoli su *Physical Review* che spiegano in dettaglio quella che è oggi nota come *Teoria di de Broglie-Bohm* o *Meccanica Bohmiana*. Parleremo in seguito della teoria (sez.6.1). Per il momento, soffermiamoci sulle questioni storiche e sociali che ostacolarono il diffondersi della teoria, favorendo l'"egemonia della visione di Copenaghen". Infatti, questo è un esempio in cui la storia della scienza è strettamente legata alle vicende politiche dell'epoca, in particolare alla Guerra Fredda.

Bohm fu membro del Partito Comunista Americano (CPUSA) per alcuni mesi nel 1942-1943, un periodo in cui gli Stati Uniti e l'Unione Sovietica erano alleate durante la Seconda Guerra Mondiale. In seguito lasciò il partito, ma rimase interessato alla filosofia "Marxista" ed in particolare alla nozione di dialettica nell'Hegelismo. Questo, insieme al fatto che lavorò per il PhD sotto la supervisione di Robert Oppenheimer, che era a capo del Progetto Manhattan, gli causò in seguito non pochi problemi. Poichè si rifiutò di deporre contro un suo collega, accusato di spionaggio sovietico, nel 1950 fu sospeso dall'Università di Princeton dove lavorava. Nonostante nel 1951 venne assolto da tutte le accuse, il presidente dell'Università di Princeton rifiutò di riassumerlo, mentendo sul fatto che questa scelta fosse stata dettata solo da ragioni scientifiche. Dopo diverse vicissitudini che lo portarono a trasferirsi in Brasile, Israele ed infine Inghilterra, nel 1951 scrisse un libro²⁴ in cui enfatizza la necessità di comprendere la meccanica quantistica *al di là* del suo formalismo matematico. Dopo la pubblicazione dei due famosi articoli in cui espose la sua teoria, la prima persona che espresse un parere negativo fu de Broglie, che non solo ribadì la priorità del suo lavoro, ma addirittura criticò la teoria ripetendo le stesse accuse rivolte alla sua teoria da Pauli nel 1927. Ma Bohm disse chiaramente che la sua teoria risponde esattamente alle obiezioni²⁵. Un'altra critica venne da Einstein, che scrive così a Born: "*Have you noticed that Bohm believes (as de Broglie did, by the way 25 years ago) that he is able to interpret the quantum theory in deterministic terms? That way*

²⁴D. Bohm, *Quantum Theory* (Dover Publications, New York, 1989) First edition (Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1951)

²⁵D. Bohm, lettera a Miriam Yevick

*seems too cheap to me*²⁶". La ragione dell'ostilità di Einstein nei riguardi di de Broglie e Bohm mostra, come già anticipato, che per lui il problema principale della meccanica quantistica non riguardava la natura indeterministica, quanto piuttosto la non-località, caratteristica che la teoria di de Broglie-Bohm possiede. Inoltre Einstein argomentò il suo dissenso in un articolo in onore di Max Born, ponendo un'obiezione: la teoria di Bohm, come vedremo nella sez.6.1, prevede che, in uno stato stazionario di un atomo, un elettrone stia fermo. Einstein obiettò affermando che "la scomparsa della velocità non soddisfa il fondato requisito che nel caso di un macrosistema il moto dovrebbe coincidere approssimativamente con il moto previsto dalla meccanica classica" ma, continua Einstein, la teoria dell'onda pilota non soddisfa questo requisito, poichè secondo la meccanica classica, l'elettrone non dovrebbe stare fermo²⁷.

Avrebbe dovuto essere immediatamente evidente che l'obiezione di Einstein era sbagliata, poichè gli atomi non sono "macrosistemi". Anche se, devo ammettere, non è ben chiaro cosa intendesse Einstein, probabilmente la sua confusione deriva dal pensare che le particelle "letteralmente puntiformi" descritte da Bohm si comportino come particelle classiche, ma non è così. Pertanto, quest'obiezione mette in luce quanto siano diverse le particelle dell'onda pilota da quelle della fisica newtoniana. Heisenberg rispose che dal punto di vista operativo le traiettorie delle particelle di Bohm costituivano una "sovrastuttura ideologica" estranea. Al di là degli aspetti tecnici David Peat, amico di Bohm²⁸, fa notare come molte reazioni alla teoria di de Broglie-Bohm furono dettate, più che da motivazioni scientifiche, da accuse personali nei confronti di Bohm, visto come un traditore, un Trotskista. Inoltre, spesso furono poste obiezioni alla teoria del tutto insensate: Pauli, ad esempio, criticò il carattere contestuale di alcune grandezze nella teoria di Bohm, quando in realtà ciò sembra essere sulla scia di Bohr, che riconosceva il "ruolo attivo" degli strumenti di misura. David Peat cita una lettera che ricevette dal filosofo

²⁶Albert Einstein, lettera a Max Born (12 maggio 1952)

²⁷A.Einstein, *Elementäre Überlegungen zur Interpretation der Grundlagen der Quanten-Mechanik*, in AA.VV., *Scientific Papers Presented to Max Born*, Hafner (New York 1953)

²⁸D. Peat, *Infinite Potential: The Life and Times of David Bohm* (Basic Books, New York, 1997)

della scienza Paul Feyerabend: *"The first Feyerabend heard of Bohm's new theory was during a seminar given by Niels Bohr. Following the lecture he asked Bohr to clarify certain points. The Danish physicist's reaction was, 'Have you read Bohm'? As Feyerabend put it, 'It seemed that, for him, the sky was falling in. . . . Bohr was neither dismissive, nor shaken. He was amazed.'* In the midst of explaining to Feyerabend why Bohm's paper so disturbed him, Bohr was called away. The discussion continued without him for two more hours. Some of those present argued that the objections to Bohm's theory were not at all conclusive. As Feyerabend put it, the orthodox Copenhagen supporters tried to reply 'in the Bohrian fashion'. When this attempt was not successful, they said, 'But von Neumann has proved. . .', and that put an end to the discussion. Feyerabend noted, however, that Bohr himself did not use von Neumann's supposed proof as a crutch in that fashion."

Tuttavia, la critica più veemente venne da Léon Rosenfeld, che ha scritto a Bohm²⁹: *"I shall certainly not enter into any controversy with you or anybody else on the subject of complementarity, for the simple reason that there is not the slightest controversial point about it. [...] It is just because we have undergone this process of purification through error that we feel so sure of our results. [...] there is no truth in your suspicion that we may just be talking ourselves into complementarity by a kind of magical incantation. I am inclined to return that it is just among your Parisian admirers that I notice some disquieting signs of primitive mentality".* Rosenfeld, infatti, considerava l'idea di "interpretare un formalismo" un falso problema e: *"[...] appears as a short-lived decay product of the mechanistic philosophy of the nineteenth century. [...] every feature of it [the quantum theory] has been forced upon us as the only way to avoid the ambiguities which would essentially affect any attempt at an analysis in classical terms of typical quantum phenomena³⁰".* Ha anche suggerito che l'introduzione di "variabili nascoste" sarebbe un "discorso vuoto".

Queste affermazioni sono notevoli sia per la loro spregiudicatezza che per il loro empirismo ingenuo: **i fatti non determinano mai da soli un formalismo, né tantomeno una teoria, poiché il formalismo da solo non include mai la propria "interpretazione".**

Mentre Bohm venne emarginato, in parte per ragioni politiche, ma anche

²⁹Léon Rosenfeld, lettera a Bohm (20 maggio 1952)

³⁰L. Rosenfeld, *Misunderstandings about the foundations of quantum theory, in Observation and Interpretation*, ed. by S. Körner (Butterworths, London, 1957)

a causa delle opinioni sulla meccanica quantistica giudicate "eretice", Rosenfeld era in una posizione di potere e, secondo lo storico della scienza A.S.Jacobsen, non era molto generoso con i suoi avversari: "*In addition, [Rosenfeld] served as consultant or referee in matters of epistemology of physics and the like at several well-reputed publishing houses and at the influential journal Nature. In this capacity he used his influence effectively, and several books and papers, among them some by Frenkel, Bohm, and de Broglie, were rejected on this account*³¹".

2.7 Disuguaglianza di Bell

Nel 1964, il fisico John Stewart Bell studiò un sistema quantistico composto da due particelle, riuscendo a dimostrare un potente teorema matematico che si rivelò di importanza cruciale per gli sviluppi futuri della ricerca sui fondamenti della teoria quantistica[6]. Poiché il nostro obiettivo è fornire una panoramica storica della teoria quantistica, non ci addentriamo nella dimostrazione e nella varie formulazioni dello stesso, ma ci limitiamo ad enunciarlo nella sua formulazione più semplice, che è quello che ci interessa.

Esso afferma, nella sua formulazione più immediata, che nessuna teoria fisica locale a variabili nascoste può riprodurre le predizioni della meccanica quantistica. Il teorema è essenzialmente indipendente dalla natura delle particelle e dalla fisica del sistema, e si concentra invece sulle regole della logica che governano tutti i processi di misurazione. Il risultato fu una disuguaglianza che permette di testare il carattere locale dei microsistemi: essa è nota come *disuguaglianza di Bell*.

Bell investigò le correlazioni che potrebbero esistere tra i risultati di misurazioni effettuate contemporaneamente e su due particelle separate. Queste misurazioni potrebbero riguardare le posizioni delle particelle, il momento, lo spin, la polarizzazione o altre proprietà dinamiche.

Considerando la misurazione della proiezione dello spin lungo diverse direzioni, dato un sistema di due particelle di spin 1/2 nella stato di singoletto come nella situazione di EPR nella formulazione di Bohm, ot-

³¹A.S. Jacobsen, Léon Rosenfeld's Marxist defense of complementarity. Hist. Stud. Phys. Biol.Sci. 37 (Supplement), 3–34 (2007)

teniamo la formulazione di Clauser, Horne, Shimony e Holt del 1969³², in cui la disuguaglianza di Bell assume la seguente forma, nota come disuguaglianza CHSH:

$$|C(\hat{a}, \hat{b}) - C(\hat{a}, \hat{c})| + |C(\hat{a}', \hat{b}) + C(\hat{a}', \hat{c})| \leq 2 \quad (2.8)$$

con \hat{n} che indica una particolare direzione di spin, ed \hat{a} e \hat{a}' possono indicare la stessa direzione. Denotiamo con:

$$C(\hat{n}_1, \hat{n}_2) = P_{n_1 n_2}(++) + P_{n_1 n_2}(--) - P_{n_1 n_2}(+-) - P_{n_1 n_2}(-+) \quad (2.9)$$

esso prende il nome di *coefficiente di correlazione*, definito come la somma delle probabilità di ottenere esiti concordi meno la somma delle probabilità di ottenere esiti discordi, misurando lo spin lungo la direzione \hat{n}_1 per la particella 1 e \hat{n}_2 per la particella 2. Occorre comunque tenere a mente che la validità della disuguaglianza ottenuta, come detto in precedenza, non dipende dalla particolare situazione fisica in esame, ma dalla logica delle misurazioni.

Questa disuguaglianza viene sperimentalmente violata dalla meccanica quantistica. Poiché questa disuguaglianza si ottiene assumendo la località del sistema fisico, la violazione implica che, qualunque teoria quantistica decidiamo di adottare, essa deve essere non locale.

La disuguaglianza CHSH viene utilizzata in diversi test sperimentali, in cui si misura il grado di correlazione della polarizzazione di fotoni. Un esempio di questo viene fornito dallo storico esperimento diretto da Alain Aspect, di cui parliamo nella prossima sezione.

La violazione della disuguaglianza CHSH comporta la verifica sperimentale di due aspetti strettamente collegati del mondo microscopico: l'entanglement quantistico e la non località. In tal senso, il microcosmo sembra collocarsi *al di fuori* dello spazio.

³²J.F. Clauser, M.A. Horne, A. Shimony, R.A. Holt, Proposed experiment to test local hidden variable theories. Phys. Rev. Lett. 23, 880–884 (1969)

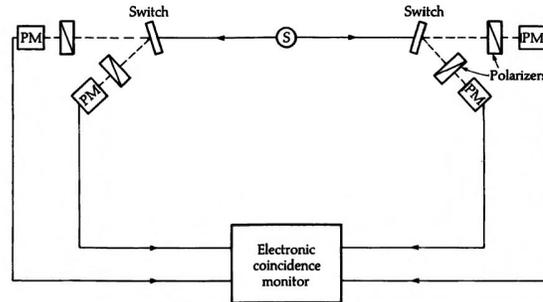


Figura 2.7: *Disposizione sperimentale dell'apparato. Coppie di fotoni partono dalla sorgente S e percorrono diversi metri fino agli interruttori ottico-acustici. Il percorso dei fotoni determina la polarizzazione degli stessi. Essi vengono in seguito rivelati utilizzando foto-moltiplicatori e coincidenze tra vari canali controllati elettronicamente.*

2.8 Esperimento di Aspect

Il primo test della disuguaglianza CHSH venne eseguito dal fisico Alain Aspect e dai suoi collaboratori nel 1982³³. Invece di usare coppie di particelle di spin 1/2 nello stato di singoletto, Aspect utilizzò coppie di fotoni (emessi da atomi di Ca eccitati) in cui le polarizzazioni sono intrecciate in un modo perfettamente analogo allo stato di singoletto.

L'esperimento consisteva in misurazioni di polarizzazione effettuate su coppie di fotoni in direzione opposta, emessi simultaneamente in singole transizioni da atomi di Ca. La situazione sperimentale è mostrata in Fig.2.7.

Si trovò un riscontro perfetto tra i risultati sperimentali e le predizioni della Meccanica Quantistica, ed il parametro CHSH (cioè la combinazione dei coefficienti di correlazione che compare a sinistra in 2.8, che non può essere maggiore di 2 per le teorie a variabili nascoste locali) ottenuto fu:

$$S_{expt} = 2.697 \pm 0.015 \quad (2.10)$$

³³A.Aspect, P.Grangier, G.Roger, Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm *Gedankenexperiment*: a new violation of Bell's inequalities. Phys.Rev.Lett.91-94(1982)

dunque ben al di sopra del valore massimo possibile (vale a dire 2) consentito dalle teorie a variabili nascoste locali.

2.9 L'analisi di Clauser

Nel 1992, il fisico John F. Clauser pubblica un lavoro, *Early History of Bell's Theorem*, in cui spiega come l'adesione alla visione di Bohr-von Neumann (Bohr aveva sconfitto Einstein e von Neumann aveva dimostrato con il suo teorema delle variabili nascoste che non c'era alternativa alla meccanica quantistica ordinaria) venne accettata dalla comunità scientifica come una *religione*, un dogma indiscusso e soprattutto indiscutibile (personalmente, credo sia ancora così), che si può riassumere nelle seguenti parole usate da Clauser: *"If a theory is self-consistent and elegant, and if it explains a significant body of experimental data that are inconsistent with previously held theories, then the theory must be accepted as gospel. Correspondingly, the theory needs no further testing, even in areas where its predictions may seem to be surprising and/ or paradoxical"*. Continua Clauser: *"In later years, the phrase 'it needs no further testing' became reinterpreted to mean, 'it is sacrilege to even suggest that further tests should be performed' [...] Also, given von Neumann's daunting intellect, his proof was held to be sacrosanct, even to those who had never even perused its details. Moreover, since its details were rarely perused, over time, von Neumann's proof became commonly (and incorrectly) misinterpreted to imply that 'No theory based on hidden variables is possible that gives the same experimental predictions as quantum mechanics!'"*.

Dopo aver caratterizzato l'adesione alle opinioni di Bohr-von Neumann come una religione, ha scritto: *"During the post-war years, the United States quickly became embroiled both in the cold war and in an internal anti-communist frenzy. Driven by Sen. Joe McCarthy, stigmas then became into vogue. [...] Unfortunately, acceptance of stigmas by the populace appears to foster the malignant creation of additional stigmas, specially in an environment that is dominated by religious fanaticism. Thus, in keeping with the times, a very powerful secondary stigma began to develop within the physics community towards anyone who sacrilegiously was critical of quantum theory's fundamentals. The stigma long outlived the McCarthy era and persisted well into the 1970 and 1980s. Sadly, it effectively kept buried most of the untidiness left behind by quantum theo-*

ry's founders, and physicists went on about their business in other areas. The net impact of this stigma was that any physicist who openly criticized or even seriously questioned those foundations (or predictions) was immediately branded as a 'quack'. Quacks naturally found it difficult to find decent jobs within the profession".

Clauser menziona Einstein, Schrodinger e de Broglie come ben noti critici dell'ortodossia, che difficilmente potrebbero essere considerati "quaccheri". Continua Clauser: *"Instead, gossip among physicists branded these men 'senile'. This is not a joke. On many occasions, I was personally told as a student that these men had become senile, and that clearly their opinions could no longer be trusted in this regard. This gossip was repeated to me by a large number of well-known physicists from many different prestigious institutions. Given this branding, their leadership role in charting the course of progress in physics was thereby severely limited. Under the stigma's unspoken 'rules', the worst sin that one might commit was to follow Einstein's teaching and to search for an explanation of quantum mechanics in terms of hidden variables, as Bohm and de Broglie did".*

Come conseguenza di questo *stigma*, Clauser menziona una politica dell'American Physical Society, redazione di The Physical Review e Physical Review Letters, secondo la quale si sarebbe dovuto rifiutare qualsiasi lavoro sui fondamenti della meccanica quantistica che non fosse matematicamente fondato e che non fornisse nuove predizioni sperimentali. Come osserva Clauser, in base a queste regole, la risposta di Bohr ad EPR certamente non avrebbe potuto essere pubblicata, e lo stesso vale per l'articolo di Bohm (queste regole risalgono agli anni '70). Spiega ancora Clauser: *"Religious zeal among physicists prompted an associated powerful proselytism of students. As part of the 'common wisdom' taught in typical undergraduate and graduate physics curricula, students were told simply that Bohr was right and Einstein was wrong. That was the end of the story and the end of the discussion. Of course, it was the end, because the concluding chapters of the story were not yet written. Bohm's and de Broglie's alternative [...] were neither thought, nor even cited. Any student who questioned the theory's foundations or, God forbid, considered studying the associated problems as a legitimate pursuit in physics was sternly advised that he would ruin his career by doing so. I was given this advice as a student on many occasions by many famous physicists on my faculty at Columbia and Dick Holt's faculty at Harvard gave him similar advice."*

In seguito, Clauser discute le posizioni di Bohm, de Broglie e Bell. Per Bohm, scrive: "*Given the era, no one dared trust his opinion since he was openly communist*". De Broglie era più prominente, data la sua posizione nell'Académie des Sciences, ma "le sue pubblicazioni sono rimaste in gran parte non lette, poichè, ovviamente, tutti 'sapevano' che avesse già una certa età". Quanto a Bell, Clauser spiega che egli fu molto attento: egli evitò di partecipare ad una cerimonia di premiazione per un premio consegnatogli da Charles Brandon, fondatore di *Federal Express*, per non apparire legato ad una fondazione non scientifica. Inoltre, non ha mai discusso dei suoi studi di fondamenti di meccanica quantistica coi suoi colleghi del CERN, conducendo una sorta di "doppia vita". Infine, quando Alain Aspect, che stava preparando i suoi esperimenti, venne a trovarlo, la prima domanda di Bell fu: "hai una posizione permanente?".

Clauser parla di *teorici evangelici* che non erano nemmeno disposti a prendere in considerazione test sperimentali delle disuguaglianze di Bell, perchè convinti che la meccanica quantistica fosse corretta in tutte le situazioni (e soprattutto perchè non hanno apprezzato quanto fossero radicali le conclusioni dell'argomento EPR-Bell). Lo stesso Richard Feynman, quando Clauser gli parlò del suo progetto di testare la disuguaglianza di Bell, lo buttò immediatamente fuori dal suo ufficio, dicendo: "*Well, when you have found an error in quantum-theory experimental predictions, come back then, and we can discuss your problem with it*".

Da studente lo stesso Clauser "aveva problemi a comprendere l'interpretazione di Copenaghen". E lui "ha ritrovato rinfrescante il lavoro di Bohm e de Broglie, dal momento che loro riescono a dare una spiegazione *realistica* di ciò che succede".

Come ben sappiamo, la verifica della disuguaglianza di Bell non fu quello che Clauser si aspettava, poichè non dimostrò che la meccanica quantistica standard fosse sbagliata, ma piuttosto stabilì la realtà della non località, qualcosa che probabilmente "scuote il mondo ancora di più".

La storia raccontata da Clauser illustra il fatto, spesso osservato, che nelle società *formalmente* libere, visioni impopolari e opinioni eterodosse possono essere messe a tacere in un modo talvolta più efficace che nelle semplici dittature. Invece di mettere in prigione o nei campi, è sufficiente, per imporre le opinioni dominanti, stigmatizzare i liberi pensatori, censurare pubblicazioni non ortodosse, e rifiutarsi di dare un lavoro a chi non è

in linea. Naturalmente, tali metodi sono meno spiacevoli per le vittime, di quelli più brutali delle dittature, ma ciò non significa che siano meno efficaci. È dimostrato dal fatto che, nonostante non ci sia nessuna prova a dimostrazione che *non possa* esistere una teoria alternativa a quella standard, e considerando diversi problemi concettuali presenti nell'ortodossia di Copenaghen (ne parleremo nel cap.5), in molti corsi universitari di fisica quantistica non si parli minimamente di questi aspetti, adottando la *religione* di Copenaghen o, ancor peggio, la sua estremizzazione pragmatica "zitto e calcola". Ad oggi, come abbiamo anticipato, non occorre neanche "zittire" lo studente, in quanto è spesso lasciato all'oscuro di tutti le problematiche inerenti ai fondamenti della meccanica quantistica. Inoltre, gli studenti universitari hanno ormai perso la visione storica della fisica, pensando che le cose siano andate avanti "senza intoppi", ignorando aspetti di enorme rilevanza storica come il teorema di von Neumann ed il dibattito Bohr-Einstein. Se, ai tempi di Clauser, si "raccontava una storia", attualmente non si racconta alcuna storia, dunque si stronca sul nascere la possibilità che lo studente faccia domande sui fondamenti della meccanica quantistica.

In questo capitolo abbiamo svolto un'analisi storica del processo che ha portato l'interpretazione di Copenaghen a divenire il paradigma dominante con cui la comunità scientifica lavora. Mi preme sottolineare che abbiamo evidenziato gli aspetti storici più significativi, ed in questi rientra la teoria di David Bohm. Con questo non vogliamo "convincere" il lettore che questa teoria sia quella corretta, sostituendola all'interpretazione di Copenaghen, ma soltanto criticare il profondo accanimento da parte della comunità scientifica nei confronti di una persona che aveva delle idee diverse. In seguito, nel cap.7, vedremo anche altre alternative, ma mi dispiace constatare come vengano quasi sempre ignorate. La vicenda di David Bohm è forse la più spiacevole, ma ancora oggi, nei congressi in cui si discute di fondamenti di meccanica quantistica, spesso non vengono invitati scienziati che non sostengono l'interpretazione di Copenaghen. Pertanto, anche se il più spiacevole, il caso di Bohm non è, purtroppo, un caso isolato.

Realtà e meccanica quantistica

Dovremmo accettare come perfettamente valida una teoria che è predittiva ma non descrittiva, cioè una teoria che fa buone predizioni, ma che non fornisce una descrizione degli eventi fisici? Che relazione c'è tra la meccanica quantistica e la realtà? Quale ruolo svolge l'interpretazione nella scienza?

Queste furono le domande che si posero i fisici negli anni successivi al 1927, quando la formulazione del nuovo schema teorico era ormai completata e la peculiarità dei microsistemi rappresentava un dato acquisito. In particolare, esisteva un consenso generale su alcuni punti:

1. La duplice natura ondulatoria e corpuscolare di tutti i sistemi fisici
2. La discontinuità dei processi naturali

Inoltre, con la sola eccezione di Einstein, la comunità scientifica era anche concorde nell'accettare:

3. La natura fondamentalmente aleatoria dei processi fisici
4. Il principio di indeterminazione

Come ovvia conseguenza di questi fatti, si riconosceva anche la necessità di attribuire dignità scientifica ad una teoria che non consentiva *in linea di principio* previsioni certe (una richiesta irrinunciabile dal punto di

vista classico), ma alla quale al più si poteva chiedere di fornire le probabilità dei possibili esiti dei processi fisici.

Questa situazione, come naturale e prevedibile, aprì un dibattito vivacissimo sul vero significato del formalismo, spingendo gli scienziati ad interrogarsi sugli obiettivi dell'indagine scientifica, fino a giungere a sollevare seri interrogativi circa l'oggetto stesso della scienza, vale a dire circa la realtà e l'oggettività dei fenomeni naturali. Molti scienziati persero la speranza di poter elaborare una visione coerente di quello che accade su scala atomica e subatomica. Il dibattito acquistò precise connotazioni filosofiche e, come vedremo, molti fisici, ben consci dei sempre maggiori successi che la nuova teoria andava registrando e influenzati da posizioni filosofiche positiviste e strumentaliste, giunsero ad accettare non solo che non si potesse costruire un quadro coerente dei processi naturali, ma addirittura che non si dovesse neppure tentare questa impresa. L'esigenza appena menzionata veniva considerata una pretesa metafisica, una sovrastruttura estranea allo spirito della genuina ricerca scientifica e conseguentemente il tenerla in conto venne ritenuto, se non biasimevole, per lo meno non professionalmente serio. Infine, il ruolo peculiare che gioca il processo di osservazione all'interno del formalismo divenne oggetto di accesi dibattiti e portò alcuni scienziati a negare che sia possibile attribuire ai costituenti microscopici una qualsiasi proprietà o perfino una realtà oggettiva, se non in dipendenza dai processi di osservazione a cui essi possono venire sottoposti.

Vari scienziati assunsero posizioni alquanto diversificate circa questi fondamentali problemi. Cercheremo di commentarle nelle sezioni seguenti e nel capitolo successivo, segnalando anche le sottili differenze tra i punti di vista dei membri di quel gruppo (Bohr, Heisenberg, Pauli, Jordan, ecc...) che elaborò l'interpretazione cosiddetta "ortodossa" o "di Copenhagen" del formalismo, quella che finì col risultare vincente. Non mancheremo di menzionare le opinioni di alcuni strenui oppositori di questo atteggiamento, primo fra tutti Einstein.

3.1 Contro il positivismo

Principalmente, il positivismo afferma che tutto ciò che non è osservabile non esiste, o almeno non dovrebbe apparire in una teoria fisica. I positivisti più radicali giungono ad affermare che le quantità non-osservabili abbiano una natura esclusivamente metafisica, essendo solo giudizi, e rischiano di essere elementi dannosi per il progresso della scienza. Un corollario del positivismo è l'operazionismo, secondo il quale i concetti scientifici devono essere definiti da operazioni concrete per mezzo delle quali essi possano essere misurati. Da ciò è facile capire che le teorie a variabili nascoste non soddisfano questi criteri, e dunque l'ideologia positivista porterebbe a considerarle come mere congetture metafisiche. Per contro, l'interpretazione ortodossa ben si presta ad essere definita una teoria "positivisticamente" adeguata: se le particelle non hanno posizione e nessuna traiettorie e, in generale, non hanno proprietà definite (come l'energia o la velocità di rotazione), nulla è rappresentabile, mentre nella fisica classica il movimento dei corpi è rappresentabile, anche se ciò che causa questi movimenti, le forze, non lo sono. Una tentazione, purtroppo comune, per risolvere questo problema, è quella di dare una valenza puramente operazionalista alle parole che si riferiscono a entità non-osservabili: dimentichiamoci completamente di quelle entità "metafisiche" e formuliamo le teorie fisiche unicamente in termini di quantità "osservabili". Esattamente ciò che fece Heisenberg nell'elaborazione della meccanica matriciale.

Per questo motivo, alcuni pensano che i Padri Fondatori dell'interpretazione di Copenaghen siano stati in stretto contatto con i neo-positivisti del circolo di Vienna. Anche se dal punto di vista epistemologico ci sono forti elementi in comune tra le due scuole di pensiero, è anche vero che Carnap, uno tra i più attivi partecipanti del Circolo, arrivò a Vienna nel 1926, l'anno in cui Schrodinger pubblicò la sua equazione, e già a quel tempo le fondamenta della visione ortodossa della meccanica quantistica erano state formulate. Tuttavia, ci sono evidenze di scambi di idee tra Heisenberg ed un rappresentante del Circolo di Vienna, ma la datazione di questo scambio è incerta (possiamo solo affermare che non sia avvenuto dopo il 1933). È inoltre indiscussa la vicinanza di Pascual Jordan al circolo di Vienna ed al positivismo logico. Nonostante ciò, l'influenza che

la filosofia positivista ebbe sulla formulazione della meccanica quantistica resta dubbia. Tuttavia, come abbiamo anticipato, è innegabile il fatto che l'interpretazione di Copenaghen presenti numerosi aspetti di natura positivista, soprattutto nella formulazione matriciale di Heisenberg. Quest'ultimo pensava che qualunque alternativa alla meccanica quantistica potesse avere solo due destini: o la nuova teoria formulava previsioni in disaccordo con quella della meccanica quantistica, nel qual caso era quasi sicuramente sbagliata, oppure prevedeva gli stessi fenomeni, ed in tal caso non aveva nulla di nuovo da offrire alla fisica. In ciò, e nella critica alle traiettorie bohmiene, considerate "sovrastrutture ideologiche", è difficile non leggere una presa di posizione chiaramente positivista da parte di Heisenberg.

D'altra parte, osservò Einstein, tentare di costruire una teoria unicamente su quantità osservabili è completamente errato. Su questo punto, si oppose ad Heisenberg in una discussione privata rivolgendosi così allo scienziato: "*for sure you do not seriously believe that only observable quantities can be included in a physical theory*¹". Contro il positivismo, è facile analizzare situazioni, nella storia della scienza, in cui l'introduzione di elementi "non-osservabili" portò ad un evidente contributo. L'esempio più importante è sicuramente l'esistenza degli *atomi*, oggetti che furono postulati inizialmente da Democrito e Leucippo, dimenticati per lungo tempo, ripresi dalla chimica moderna, e negati da Mach ed altri individui di orientazione positivista, prima di essere accettati dall'evidenza sperimentale. Prima dell'evidenza fenomenologica dell'esistenza degli atomi, essi furono rigettati dai positivisti, ritenendoli dei concetti "metafisici". Nell'antichità, i Greci avevano già affrontato l'argomento, ritenendo che gli atomi fossero visibili solo alla ragione poiché essa sola è in grado di postulare l'esistenza di cose invisibili. Dunque inserire concetti metafisici si è rivelato, in alcuni casi, un fatto positivo per il progresso della scienza. Per fare un altro semplice esempio, dovrebbero i paleontologi essere autorizzati a parlare di dinosauri? Presumibilmente sì. Ma in che senso il termine dinosauro è un osservabile? Dopotutto, ciò che sappiamo su di loro è dedotto da fossili, che sono le uniche quantità "osservate" diret-

¹W. Heisenberg, *Physics and Beyond. Encounters and Conversations*, translated by A.J. Pomerans (Harper and Row, New York, 1971)

tamente. Ovviamente tutte le inferenze sono basate su un qualche tipo di prova, ma il punto è che le prove sono tali per qualcosa di diverso da sé stesse. Ad esempio, le ossa di dinosauri sono prove per l'esistenza dei dinosauri, ma questi ultimi non sono fatti solo dalle loro ossa.

Questa frase di Bohm riassume efficacemente i limiti del positivismo: "*We can in no way deduce, either from the experimental data of physics, or from its mathematical formulation, that it will necessarily remain forever impossible for us to observe entities whose existence cannot now be observed. Now, there is no reason why an extraphysical general principle is necessarily to be avoided, since such principles could conceivably serve as useful working hypotheses ... for the history of scientific research is full of examples in which it was very fruitful indeed to assume that certain objects or elements might be real, long before any procedure were known which could permit them to be observed directly*"².

Un'altro aspetto da evidenziare è: esistono teorie che sono "pienamente" positiviste? Non credo, poiché se riflettiamo, in ogni teoria viene postulata l'esistenza di qualche entità "non-osservabile" (forze, campi, ecc.), o "beables" come le chiamava John Bell. Inoltre, dal momento in cui nessuna teoria è (ancora) da considerare finale, non c'è ragione di considerarle "letteralmente" vere e preoccuparsi troppo se le entità da loro postulate "esistono davvero". Tutte le teorie scientifiche devono riferirsi ad un'ontologia fondamentalmente "non-osservabile", solo che c'è un po' di vaghezza in ciò che effettivamente rappresenti questa ontologia fondamentale. In altre parole, ci sono sempre aspetti metafisici nelle teorie fisiche. Per Einstein, le osservazioni sono sempre "dipendenti dalle teorie", in un certo senso; il che non significa che siano arbitrariamente "costruite" da noi (socialmente o in altro modo), ma che non possiamo usare il concetto di "osservazione" come qualcosa di fondamentale, non problematico su cui basare le nostre teorie scientifiche[36]. Un esempio di ciò riguarda gli studi spettroscopici in ambito astronomico. È solo grazie alla telescopica gamma che possiamo osservare e studiare l'interno degli ammassi di gas che rimangono dopo l'esplosione di supernovae, in quanto in essi vi è un alto numero di atomi radioattivi che decadono emettendo fotoni gamma. Oppure possiamo osservare e studiare le pulsar, che nella maggior parte

²D. Bohm. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables. Part 2. *Physical Review*, 85:180–193 (1952).

dei casi sono stelle di neutroni, ossia residui stellari delle deflagrazioni di supernovae. Ebbene, nessun astronomo sosterrà che gli atomi all'interno dell'ammasso di gas non sono stati osservati, o che la pulsar non è stata osservata, solo perchè non possiamo osservare tutto ciò direttamente, tramite il nostro apparato percettivo.

Molti fisici credono di essere positivisti, e così di essere stati in grado di buttar fuori dalle loro teorie tutti gli aspetti metafisici, ma non è così. Per esempio, loro criticano l'esistenza delle "particelle virtuali", pensando che siano entità metafisiche ma, al tempo stesso, considerano "fisici" concetti come campo, fluttuazioni quantistiche, forze, ecc... come se davvero misurassero questi oggetti. Altri ancora, usando questi concetti, affermano: "non posso sapere come è fatta la natura, ma solo fare calcoli". Certamente questa visione non comprende concetti metafisici, perché non comprende alcun concetto, vedendo la fisica come un semplice strumento per fare calcoli. Nel capitolo successivo analizzeremo più a fondo quest'approccio alla ricerca scientifica.

Non possiamo negare che l'introduzione di non-osservabili all'interno di una teoria possa essere vitale per produrre una teoria coerente. Dovrebbe essere permesso introdurre tali entità se sono utili, aiutandoci a comporre un'immagine chiara per comprendere i fenomeni, non solo per prevederli ed evitare paradossi. Sappiamo il danno che può produrre un eccessivo uso di elementi metafisici nella scienza, ma dobbiamo anche essere consapevoli del danno prodotto dalla loro totale assenza. L'esperienza non deve essere dimenticata: è una regola metodologica. Tuttavia, come afferma il fisico Gerard Gouesbet: "*the agreement with experiments is the crowning achievement of a theory. It should not necessarily lie at its foundations.*"[23].

Ciò si allinea con il pensiero di Richard Feynman. Lui afferma che c'è una cosa sulla quale le persone hanno molto insistito dopo gli sviluppi della meccanica quantistica: l'idea che non dovremmo parlare di cose che non possono essere misurate. Tuttavia, aggiunge che non è vero che possiamo aiutare il progresso della scienza usando solo concetti che vengono direttamente dall'esperienza³. Il filosofo e fisico Pierre Duhem nega persino la possibilità di fare osservazioni che non siano esse stesse cariche

³R. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, vol. 3, *Quantum Mechanics* (Addison-Wesley, Reading, 1966)

di concetti teorici, o "metafisici" come direbbero i positivisti, arrivando a sostenere che senza un'interpretazione, infatti, è impossibile utilizzare apparati sperimentali di alcun genere: *"Go into this laboratory; draw near this table crowded with so much apparatus: an electric battery, copper wire wrapped in silk, vessels filled with mercury, coils, a small iron bar carrying a mirror. An observer plunges the metallic stem of a rod, mounted with rubber, into small holes; the iron oscillates and, by means of the mirror tied to it, sends a beam of light to a celluloid ruler, and the observer follows the movement of the light beam on it. There, no doubt, you have an experiment; by means of the vibration of this spot of light, this physicist minutely observes the oscillations of the piece of iron. Ask him now what he is doing. Is he going to answer: "I am studying the oscillations of the piece of iron carrying this mirror"? No, he will tell you that he is measuring the electrical resistance of a coil. If you are astonished, and ask him what meaning these words have, and what relation they have to the phenomena he has perceived and which you at the same time perceived, he will reply that your question would require some very long explanations, and he will recommend that you take a course in electricity⁴".*

Dovremmo allora chiederci se il positivismo non sia piuttosto un atteggiamento troppo cauto al fine di evitare qualunque alternativa, diventando proprio un dogmatismo metafisico, col risultato di rendere impossibile qualunque discussione. Non possiamo, a tal proposito, non fare un breve riferimento al filosofo della scienza Karl Popper. Lui criticò quella che definì la "teoria del secchio" della mente e della conoscenza, secondo la quale qualunque nostra conoscenza viene dall'esperienza, come versando acqua in un secchio, come se l'informazione costituisse un processo passivo⁵. Nella sua totalità, afferma Popper, la ricerca scientifica è un processo attivo e creativo, oltre che razionale, con congetture e confutazioni, producendo una conoscenza oggettiva, in cui gli esperimenti vengono usati per corroborare o falsificare una teoria scientifica.

Questa visione, alla quale aderisco, ammorbidisce, o addirittura distrugge, l'eccessiva rigidità del positivismo logico. Ciò si accorda abbastanza bene con la visione di Einstein, che dice: *"A theory can be tested by experience, but there is no way from experience to the setting up of a theory."*

⁴P.Duhem, *The aim and structure of physical theory*, (Princeton University Press, Princeton, 1954)

⁵K.R. Popper, *Objective Knowledge*, (Oxford University Press, Oxford, England, 1979)

Come abbiamo visto nel cap.2, l'ipotesi di de Broglie fu ignorata dalla comunità scientifica, ma anche la successiva teoria di Bohm fu rigettata. Quest'atteggiamento, che purtroppo ancora oggi rimane, nei riguardi delle teorie a variabili nascoste (ma in generale nei confronti di tutte le possibili alternative all'interpretazione standard della meccanica quantistica) è un esempio di approccio positivista, dove le "variabili addizionali", così come qualunque tentativo di interpretare il formalismo, sono da ritenere elementi metafisici da rifiutare. Un atteggiamento molto simile si osservò nei riguardi di Boltzmann e della sua ipotesi degli atomi (a volte le persone commettono un errore più di una volta).

Oggi, le cose vanno anche peggio, poichè la fisica viene spesso considerata un esercizio di calcolo ("shut up and calculate"), in cui non è importante comprendere la natura, ma ottenere risultati numerici in accordo con l'esperienza. Ad esempio, il fisico David Mermin afferma: *"If I were forced to sum up in one sentence what the Copenhagen interpretation says to me, it would be 'Shut up and calculate!'"*⁶. Ciò è probabilmente il miglior riassunto di come la maggior parte dei fisici oggi considerano (e purtroppo accettano) "l'interpretazione di Copenaghen". Esso cattura l'impazienza tipica del fisico per le speculazioni filosofiche "oziose" e il desiderio di andare avanti con attività pratiche, come usare la teoria per calcolare predizioni sui risultati sperimentali, testando queste previsioni con gli esperimenti. Quest'atteggiamento è peggio del positivismo, perché a mio avviso, come detto in precedenza, elimina qualunque concetto all'interno dell'ambito scientifico. Rimane da chiedersi cosa sia rimasto della fisica.

In conclusione, ritengo sia giusto attenzionare il fatto che teorie alternative alla meccanica quantistica, che prevedono elementi "metafisici" non compresi nella visione standard, non debbano essere screditate in quanto congetture metafisiche prive di fondamento. Dobbiamo mantenere aperte le nostre scelte e non fissarci limiti in anticipo.

Questo commento di Donald Gillies e Giulio Giorello riassume bene quanto detto fino ad ora:

La conclusione che ci sembra inevitabile è che le idee metafisiche sono non solo sensate, ma anche necessarie alla scienza: esse forniscono una struttura indispensabile entro la quale possono essere costruite e messe a confronto con l'esperienza

⁶N.D.Mermin, What's wrong with this pillow? Phys. Today (1989)

le specifiche teorie scientifiche. La metafisica allora funge da guida, o da euristica, per la scienza. Ma si tratta di una guida che, seppur necessaria per cominciare a muoversi in qualche direzione, può facilmente condurci nella direzione giusta, così come in quella sbagliata. Uno stesso sistema metafisico (sia il pitagorismo, il materialismo meccanico, il cartesianesimo o qualunque altro) può favorire il progresso scientifico in un dato contesto o in una data situazione problematica, e poi magari ostacolare la scienza in un altro ambito. Tutto ciò mostra che non esiste alcuna formula magica per fare della buona scienza. Nella ricerca scientifica è spesso necessario esplorare i sentieri sbagliati per trovare quelli giusti⁷."

3.2 Realismo ed Idealismo

Un altro aspetto importante nell'ortodossia di Copenaghen è che, come afferma il fisico Roland Omnès, la mancanza di oggettività della meccanica quantistica, non apprezzata da Einstein, Bohm, Schrodinger e de Broglie, mostra il suo aspetto più discutibile nel principio di complementarità, poiché modifica la chiarezza che istintivamente associamo alla realtà, giungendo ad un'ambiguità irriducibile⁸. Per questo motivo, l'idealismo sembra essere supportato da argomenti basati sulla meccanica quantistica. Un'altra ragione è legata all'influenza che il positivismo possa aver avuto su diversi padri fondatori della teoria quantistica, filosofia che porta in modo quasi naturale ad assumere posizioni strumentaliste circa la conoscenza scientifica, che risultano sotto vari aspetti simili a quelle dell'idealismo filosofico. Di fatto lo *strumentalismo* assume come principio di base che le teorie scientifiche non si occupino di "quello che esiste oggettivamente là fuori", ma siano semplicemente strumenti per prevedere risultati sperimentali, dunque è una visione anti-realista. In particolare, secondo questo punto di vista, non ha alcun senso porsi il quesito se le teorie scientifiche siano vere o false. Il loro significato deriva interamente, e si esaurisce, nella loro utilità pratica. Al contrario un realista crede nell'esistenza di una realtà esterna e ritiene scopo primario

⁷D.Gillies, G.Giorello, *La filosofia della scienza del XX secolo* (Biblioteca universale Laterza, 2010)

⁸R. Omnès, *The Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, Princeton, 1994)

della sua indagine il comprenderla.

Ci si potrebbe chiedere: cosa intendono coloro che affermano che la meccanica quantistica ci costringe ad "abbandonare il realismo"? Che tipo di realismo? Quello degli oggetti ordinari? Dovremmo davvero credere che il gatto di Schrodinger sia 'vivo e morto' prima di guardare? Se una misurazione è effettuata in un laboratorio e il risultato viene registrato da un computer, il segnale appare solo quando qualcuno lo guarda? È difficile pensare che qualcuno possa prendere sul serio tali proposte, nonostante tutte le affermazioni suggeriscano di doverlo fare. Ma allora, cosa può significare l'espressione "abbandonare il realismo? Forse si riferisce al *realismo scientifico*: la meccanica quantistica non sarebbe una teoria su un mondo microscopico, ma sugli effetti che quest'ultimo ha sul mondo macroscopico (cioè la misurazione), e nessuna teoria può essere direttamente collegata ad una descrizione quantistica del mondo microscopico. Sembra che la meccanica quantistica abbia messo in dubbio la possibilità di una conoscenza *reale* di ciò che ci circonda.

Cosa si intende qui per *realismo* è la seguente combinazione di idee:

- 1- Esiste un mondo indipendente dalla coscienza umana e questo ha una struttura e delle proprietà ben definite.
- 2- Una proposizione è vera o falsa a seconda che rifletta o meno le proprietà di quel mondo. Ciò significa in particolare che la verità o falsità di una proposizione è indipendente dalla persona che la esprime, o dal gruppo a cui "appartiene".
- 3- Possiamo affermare proposizioni sul mondo attraverso le nostre esperienze sensoriali.
- 4- Tuttavia, i nostri sensi possono ingannarci; quindi, non possiamo mai essere assolutamente certi che la nostra conoscenza sia vera e anche le esperienze più comuni potrebbero essere illusorie.
- 5- La nostra conoscenza è umana. È il risultato di una specifica interazione tra "noi" e il mondo; quest'interazione dipende da fattori biologici, ma anche dalla nostra storia e dalla nostra cultura. Altre specie hanno diverse interazioni con lo stesso mondo. Altre culture o persone che vivono in altri periodi storici avranno una conoscenza diversa dello stesso mondo. Il fatto che la nostra conoscenza sia umana implica che essa possa avere dei limiti, così come hanno dei limiti i nostri mezzi di percezione e le nostre capacità fisiche: vediamo solo una parte dello spettro elettroma-

gnetico e nessuno correrà mai un chilometro in meno di un secondo.

L'*idealismo* può derivare da una riflessione critica sul realismo; può iniziare con le seguenti (ovvie) osservazioni:

1- Per osservare il mondo, abbiamo bisogno dei nostri sensi.

2- Per parlarne, abbiamo bisogno delle nostre lingue.

3- Per poter dare un nome alle cose, abbiamo bisogno di concetti.

4- Per avere teorie sul mondo, abbiamo bisogno di schemi concettuali.

Il passo successivo è chiedersi se ciò che chiamiamo la "struttura del mondo" non sia in realtà un effetto prodotto dai nostri sensi, linguaggi o concetti. Quindi, quando parliamo di "mondo", in realtà non stiamo parlando solo dei nostri sensi, lingue o concetti? I nostri discorsi riguardano il "mondo esterno" o riflettono piuttosto il "mondo interno" (cosa è nelle nostre menti)?

La base di questi argomenti è sempre la stessa: abbiamo accesso diretto solo alle nostre percezioni, non alle percezioni di *cose* ma alle sensazioni *tout court*. Nulla garantisce che quelle percezioni corrispondano o siano prodotte da oggetti esterni.

Il filosofo australiano David Stove riassume così le argomentazioni avanzate dagli idealisti: "*You cannot have trees-without-the-mind in mind, without having them in mind. Therefore, you cannot have trees-without-the-mind in mind*⁹". Con "alberi senza la mente", Stove intende quelli che normalmente chiamiamo alberi, vale a dire le cose che esistono "là fuori", indipendenti dalla nostra mente. Poi segue una tautologia, "non si possono avere alberi-senza-la mente in mente, senza averli in mente", ed arriva ad una conclusione interessante, anzi radicale, ma falsa e giustificata: "pertanto, non puoi avere in mente alberi-senza-la mente". In altre parole, per vedere un albero fuori dalla mia mente, ho bisogno dei miei occhi e del mio cervello, quindi un albero deve essere rappresentato nel mio cervello; ma ciò non significa che non ci sia un albero né che io non possa pensare che esista al di fuori della mia mente. Ma dov'è la logica in tutto ciò? Perché non posso pensare cose che non sono pensate?

Einstein insisteva sull'esistenza di un mondo reale costituito da oggetti indipendenti dall'osservatore: "*Physics is an attempt conceptually to grasp reality...independently of its being observed. In this sense one speaks of 'physical*

⁹D. Stove, *The Plato Cult and Other Philosophical Follies* (Blackwell, Oxford, 1991)

reality"[36]. Questo è in conflitto con la non separabilità sistema-apparato nell'ortodossia di Copenaghen. Dalle parole di Bohr: "*Physics is not about how the world is, it is about what we can say about the world*" e "*There is no way to refer to reality without using the information we have about it*"¹⁰ emerge chiaramente una visione idealista della fisica. Infatti, esistono fondamentalmente tre "versioni" dell'idealismo: una radicale, vale a dire il solipsismo, l'idea che tutto sia un'illusione, che non ci sia nulla al di fuori della mia mente. L'altra idea è uno scetticismo radicale: forse c'è qualcosa al di fuori della mia mente, ma non riesco ad ottenere informazioni attendibili a riguardo. C'è anche una terza via: l'idea che sia più rigoroso o "scientifico" discutere solo delle nostre percezioni e non di ciò che è "là fuori", poichè abbiamo accesso "diretto" solo alle nostre percezioni. Possiamo sicuramente concludere che Bohr non intendesse mettere in dubbio l'esistenza di una realtà esterna all'osservatore, ma afferma, in accordo con la terza forma di idealismo sopra enunciata, un netto divario tra la conoscenza scientifica e la realtà esterna. Distinguere tra realtà e conoscenza della realtà credo ci conduca alla conclusione finale di David Stove: se la natura esterna a noi è un "albero-senza-la mente", e non posso averlo in mente, cosa descrive la fisica?

Credo fermamente in una fisica che rappresenti il tentativo che l'uomo compie per capire come è fatta la natura, come si comporta, indipendentemente dall'atto di misurazione. Nella visione di Copenaghen, ciò che possiamo dire dipende dall'osservazione, quindi un fisico ortodosso non può dire nulla riguardante la natura in sé. Secondo lui, l'osservazione "cambia" la natura, parlando di "collasso della funzione d'onda". Non solo questo "collasso" è qualcosa di molto problematico (ne parleremo più avanti, nel cap.5), ma è anche contro tutto ciò che la fisica dovrebbe rappresentare. I fautori della visione standard parlano spesso di "particelle" ad esempio, indicando enti che esistono indipendentemente dall'osservazione, ma l'interpretazione che loro adottano per descrivere la realtà afferma che le particelle esistono solo quando vengono osservate. In questo trovo una contraddizione. Altri, per ovviare a questo problema interpretativo, adottano la visione "shut up and calculate"(frase erroneamente

¹⁰10M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw Hill (1966), seconda edizione (1989).

attribuita a Richard Feynman).

Certamente, nella fisica quantistica abbiamo l'introduzione di concetti fisici come "l'indeterminazione" che ha portato numerosi fisici, anche importanti (Heisenberg, Pauli, Bohr, Jordan,...) a credere che le particelle non abbiano proprietà definite come posizione o velocità, ma che posseggano tali proprietà solo quando misurate. Ma, secondo me, credo siano stati un po' troppo frettolosi, commettendo due errori:

1- Se non posso predire una proprietà della particella, essa non è posseduta dalla particella finché non la misuro. Questo salto fisico-metafisico non mi sembra giustificato.

2- L'interpretazione di Copenaghen mi sembra quella più "economica" possibile, cioè quella che riesce, con il minimo sforzo, a giustificare il formalismo utilizzato. Una delle principali differenze tra la teoria quantistica e le teorie precedenti consiste nel fatto che essa sembra essere nata con il solo scopo di giustificare il formalismo utilizzato. Cioè i fisici dell'epoca sembrano essersi interessati unicamente a spiegare il formalismo. A mio avviso, questo è un problema della teoria quantistica.

L'obiettivo di un realista, e dunque di uno scienziato, deve essere l'elaborazione di una teoria che descriva ciò che accade su scala microscopica e che tenga conto delle previsioni ottenute su scala macroscopica. Vedremo nel cap.7 che esempi di queste teorie esistono.

Questo credo sia il motivo più importante che ci debba convincere ad abbandonare definitivamente la visione ortodossa. L'idealismo non è una dottrina ben definita, ma piuttosto una retorica della "via di mezzo", in un contesto, quello scientifico, in cui non deve esistere una via di mezzo. Questa retorica è anche alla base dell'idea che l'obiettivo della scienza sia quello di "salvare i fenomeni", cioè limitarsi a rendere conto di questi ultimi o delle nostre "osservazioni" o dei nostri "esperimenti". Ma il modo migliore per salvare i fenomeni è averne un numero minimo; chiudere gli occhi e tapparsi le orecchie. In questo modo, avremo "salvato i fenomeni". Ovviamente, non è questo quello che devono fare gli scienziati. Gli esperimenti sono elaborati dagli uomini per permettere loro di verificare se le nuove teorie forniscono una migliore descrizione di ciò che ci circonda. Tuttavia, l'idealismo è legato ad una domanda seria: come funziona l'in-

terazione cognitiva tra noi e il mondo? Come formiamo le rappresentazioni? Da dove vengono i concetti? E, infine, come nascono le sensazioni coscienti? Tutte queste sono domande difficili.

Ritengo che il punto di vista ortodosso attribuisca troppa importanza all'osservatore, giungendo ad una forma di "idealismo scientifico", e non credo sia la strada giusta da seguire. L'errore che viene commesso consiste nel pensare che la fisica predica le nostre esperienze o che abbia in qualche modo a che fare con la nostra conoscenza del mondo. Ma la fisica tace del tutto sui nostri processi cognitivi. Come ha spiegato Einstein in una lettera a Maurice Solovine¹¹, la fisica parte da "assiomi", come li chiamava lui, o da quelle che potremmo chiamare leggi di natura, che sono il risultato, sempre usando le sue parole, di "creazioni libere della mente umana". Ciò significa che non possono essere ricavati né induttivamente né deduttivamente. Da queste leggi, si deducono matematicamente conseguenze empiriche osservabili. Ad esempio, le leggi del moto di Newton prevedono il movimento di proiettili, satelliti e pianeti. Altre parti della fisica possono prevedere dove finiscono gli aghi su uno schermo o tracce di inchiostro sulla stampa di un computer. Ma il passo successivo, dove gli uomini acquisiscono la conoscenza di queste conseguenze osservabili, non è spiegato dalla fisica; è presupposto da essa. Come ha ulteriormente sottolineato Einstein, se quest'ultimo passaggio non fosse affidabile (anche in assenza di una teoria che spieghi perché è affidabile), allora niente lo sarebbe. I fisici non hanno altra alternativa che accettare che possiamo conoscere in modo affidabile, mediante l'osservazione diretta, alcuni fatti del mondo, almeno i dati macroscopici che sono i risultati degli esperimenti, che devono comunque essere considerati dati oggettivi del mondo microscopico.

È di enorme importanza rendersi conto di ciò, perchè mostra che tutte le chiacchiere sulla fisica che non hanno a che fare con il mondo ma con la nostra conoscenza di esso non possono essere prese sul serio. Forse la fisica si occupa solo di letture dei contatori, posizioni degli aghi su uno schermo, ecc... Cioè "risultati di esperimenti", ma questi sono comunque fatti oggettivi sul mondo che non hanno nulla a che fare con la nostra conoscenza di essi.

¹¹A. Einstein, Letter to Maurice Solovine (May 7, 1952)

Inoltre, l'idea di una scienza che si limiti a "salvare i fenomeni" porterebbe, come ha sottolineato il filosofo Hilary Putnam¹², a pensare che il progresso della scienza sia frutto di un "miracolo". Entro un certo dominio scientifico, il crescente successo predittivo riflette un'approssimazione sempre più adeguata alla verità. E proprio perché sequenze di teorie di successo formulano affermazioni diverse riguardo a specifici oggetti teorici (per esempio "elettroni", "campi gravitazionali", "geni"), tali oggetti devono esistere.

Ciò che è importante sottolineare è che la visione standard della meccanica quantistica non fornisce una descrizione realista di ciò che ci circonda, cioè non permette di descrivere la realtà che ci circonda in maniera indipendente dall'atto dell'osservazione.

Riassumendo, la visione di Copenaghen porterebbe la scienza in una tra queste due direzioni:

- 1- Dare un ruolo troppo "decisivo" all'osservatore
- 2- Salvare i fenomeni

Entrambe risultano incompatibili con un "vero" progresso scientifico, che come abbiamo detto può realizzarsi solo dando alla fisica lo scopo di descrivere un realtà esterna all'osservatore. Nei cap.6 e 7 vedremo alcune possibili alternative all'interpretazione ortodossa della fisica quantistica.

3.3 Critiche al Realismo

Incommensurabilità dei "Paradigmi"

Nel 1962, lo storico della scienza Thomas Kuhn scrisse un saggio che ebbe un enorme impatto su molti filosofi, sociologi e persino economisti, *The Structure of Scientific Revolutions*. L'autore ci fa un abbozzo di quelli che ritiene siano i caratteri principali della storia delle varie scienze in generale.

L'idea di fondo di Kuhn è che la scienza cambi attraverso delle *rivoluzioni*, in cui ognuna segna l'introduzione di un nuovo *paradigma*, che definisce un certo quadro attraverso il quale pensiamo e vediamo il mondo, e che

¹²H.Putnam, What is realism?, in J.Lepin (a cura di), *Scientific Realism*, (University of California Press, Berkeley (Calif.), 1984)

inoltre è *incommensurabile* con i paradigmi precedenti. Poiché le osservazioni sono "dipendenti dalla teoria", argomenta Kuhn, non c'è modo di fare appello a osservazioni pure e nude per discriminare tra le diverse teorie. Ecco un esempio con cui Kuhn, in modo radicale, espone la sua idea, parlando dell'introduzione degli atomi da parte di John Dalton all'inizio del XIX secolo:

Chemists could not, therefore, simply accept Dalton's theory on the evidence, for much of that was still negative. Instead, even after accepting the theory, they had still to beat nature into line, a process which, in the event, took almost another generation. When it was done, even the percentage composition of well-known compounds was different. The data themselves had changed. That is the last of the senses in which we may want to say that after a revolution scientists work in a different world.

There is, I think, no theory-independent way to reconstruct phrases like 'really there'; the notion of a match between the ontology of a theory and its 'real' counterpart in Nature now strikes me as illusive in principle. Besides, as a historian, I am impressed with the implausibility of the view.

Ciò sembra suggerire che gli atomi, secondo Kuhn, non siano "realmente lì", ma sono il risultato di un certo modo di guardare il mondo (o di creare un "mondo diverso"). Ma questa posizione assunta da Kuhn è davvero difficile da prendere sul serio: anche supponendo che gli atomi siano stati introdotti al tempo di Dalton sulla base di prove insufficienti, ora possediamo così tante prove diverse ed indipendenti sulla loro esistenza che sarebbe altamente irrazionale negare che essi esistano. Lo stesso vale per molte altre scoperte scientifiche, come le leggi di Newton, le equazioni di Maxwell, la teoria dell'evoluzione, ecc...

Maudlin confuta la teoria dell'incommensurabilità dei paradigmi in un modo interessante: *"The sense in which one's paradigm may influence one's experience of the world cannot be so strong as to guarantee that one's experience will always accord with one's theories, else the need to revise theories would never arise¹³".*

Sicuramente, la teoria influisce sul nostro modo di osservare la realtà, ma

¹³T. Maudlin, Kuhn defanged: incommensurability and theory-choice, tradotto da Jean-Pierre Deschepper e Michel Ghins e pubblicato in Francia col titolo: Kuhn édenté: incommensurabilité et choix entre théories. Rev. Philosophique de Louvain 94, 428-446 (1996)

ritengo forzato ed eccessivo affermare che la teoria non solo influisca sull'interpretazione dei risultati sperimentali, ma addirittura "crei" il mondo. Occorre precisare che in seguito Kuhn attenuò la sua visione, e nella seconda versione delle *Strutture* (1974), inserì un "Poscritto" in cui emerge una parziale revisione della sua posizione precedente. In essa, Kuhn rinuncia all'idea che i paradigmi siano qualcosa di simile a concezioni generali del mondo e non presume più che la scienza sia caratterizzata da grandi discontinuità. Così facendo la tesi dell'incommensurabilità perde la forza che tanto aveva fatto discutere.

Ciò nonostante, alcuni antirealisti sostennero la posizione del Kuhn "radicale", difendendo la posizione secondo cui la scienza non sia interessata a scoprire la "verità" o, nella misura in cui lo è, quel che vale come "la verità" è determinato da ciò che la comunità scientifica *permette*, piuttosto che da un qualche rapporto fra le teorie sul mondo ed il mondo stesso.

Inoltre, le idee di Kuhn, nella loro versione radicale, furono portate a nuovi estremi da un certo numero di sociologi e filosofi della scienza, i quali sostennero che tutta la nostra conoscenza scientifica sia "socialmente costruita" o addirittura che la realtà stessa sia "costruita", ma Kuhn non è responsabile della radicalizzazione delle sue opinioni in questa visione sociologica.

Torneremo sulla teoria dei paradigmi kuhniani, e sull'incommensurabilità, nel cap.4.

L'irrazionalità nel progresso scientifico

Nella seconda metà del XX secolo, il filosofo Paul Feyerabend espose una visione innovativa del progresso scientifico.

Egli sostiene che il credere o meno ad una teoria, da parte di un fisico, dipenda da fattori psicologici e sociali, e che il passaggio da un paradigma ad un altro dipenda da fattori irrazionali. Nel suo lavoro più importante, *Contro il metodo* (1975) sono contenute le basi di ciò che sarà definito "anarchismo metodologico", in cui Feyerabend critica le ricerche epistemologiche precedenti, concentrate sul trovare un unico metodo sul quale appoggiarsi. Egli fa un'analisi storica per dimostrare che la scienza è andata avanti senza un metodo, ma per scelte geniali ma irrazionali di scienziati che hanno portato avanti le loro teorie.

Un antirealista potrebbe essere tentato di sfruttare l'anarchismo metodologico, argomentando nel seguente modo: perché andare alla ricerca di una teoria che sia più "realistica"? Se la ricerca è irrazionale, chi mi garantisce che la teoria successiva sia più attinente alla realtà della precedente? Perché non limitarsi ad accettare la teoria standard della meccanica quantistica, anche se ci sono problemi nel darle una spiegazione realistica? Se non c'è un metodo da seguire, perché preferire una teoria che fornisce una descrizione della realtà ad una che si limita a "salvare i fenomeni"?

A mio avviso, la risposta è semplice: il successo predittivo delle teorie successive. Se il progresso è davvero irrazionale, come si spiega il fatto che le teorie successive hanno sempre un potere predittivo maggiore delle precedenti? Solo il fatto che danno una descrizione sempre più vicina alla realtà può giustificare ciò. Dunque, questo deve spingerci ancor più verso una teoria quantistica che dia una descrizione dei fenomeni adeguata, e non soltanto dotata di un formalismo predittivo che "salvi i fenomeni". Solo una ricerca scientifica che abbia come scopo quello di comprendere la realtà può progredire in maniera sana e sicura. Questo è a volte chiamato "argomento no-miracolo" (a favore del realismo scientifico): sarebbe davvero un miracolo se teorie che hanno molti successi empirici (le migliori teorie scientifiche) non fossero approssimativamente *vere*. Quest'idea è stata anche sfidata dai filosofi - infatti ciò non dimostra nulla (e se ammettiamo che lo scetticismo radicale è inconfutabile, effettivamente non prova nulla). Ma se ho ad esempio una perdita nel mio bagno, arriva l'idraulico, e la perdita scompare, è *naturale* supporre che lui abbia riparato la perdita. Ovviamente, è sempre ipotizzabile che l'idraulico non abbia fatto nulla e che la perdita sia scomparsa per caso. Ma ciò non sembra ragionevole e, in effetti, le obiezioni all'argomento "no-miracolo" sono dello stesso livello di quello che abbiamo appena detto.

Inoltre, anche lo stesso Feyerabend criticò l'interpretazione di Copenhagen, sostenendo invece la teoria di de Broglie-Bohm. Nonostante l'epistemologia di Feyerabend sembri idealista, lui stesso afferma che assumere un punto di vista realista abbia indubbiamente portato progressi scientifici. Pertanto, argomenta Feyerabend, il realismo scientifico è una guida da utilizzare per indirizzare la ricerca, pur essendo indimostrabile che la teoria fornisca una descrizione della realtà. In questo senso, poiché, come vedremo, la teoria di de Broglie-Bohm soddisfa certamente i

requisiti del realismo scientifico più dell'ortodossia, secondo Feyerabend, la prima sarebbe preferibile alla meccanica quantistica standard.

3.4 Le posizioni dei protagonisti

Per rendere ancor più chiaro il perché l'interpretazione di Copenaghen sia un visione antirealista, e che presenti molti caratteri in comune con la filosofia positivista e neo-positivista, concludiamo questa sezione analizzando le posizioni assunte dai principali protagonisti circa l'interpretazione della elusiva realtà dei microsistemi, ritrovando tracce della loro formazione filosofica. Ovviamente, non possiamo esporre tutti i pensatori che con i loro contributi hanno determinato la visione del mondo quantistico per come lo conosciamo noi oggi, ma ci concentreremo solo su alcuni, e sui punti essenziali del loro pensiero¹⁴:

Bohr

La posizione di Bohr è alquanto articolata e non sempre chiara. Tuttavia per i nostri scopi risulta sufficiente identificarne alcune caratteristiche fondamentali.

Innanzitutto, Bohr attribuisce un valore prominente al linguaggio, affermando che *il nostro compito consiste nel comunicare le nostre esperienze e idee agli altri. Dobbiamo continuamente lottare per allargare il campo della nostra descrizione, ma in modo tale che i nostri messaggi non perdano mai il loro carattere obiettivo e non ambiguo.*

Questa sua posizione giovanile si rafforza e si articola allorché egli entra da protagonista nel campo della scienza. Analizzando la pratica scientifica osserva che, di fatto, tutti i ricercatori usano nel loro lavoro, qualunque sia l'oggetto sotto esame, apparecchi di misura macroscopici i cui risultati vengono poi comunicati nel linguaggio tipico della fisica classica. Questo linguaggio diventa quindi una specie di prerequisito logico anche per una teoria che tratti con fenomeni e processi non classici. Gli eventi del microcosmo devono essere amplificati per poter essere osservati e descritti, ma

¹⁴per un ulteriore approfondimento, vedere: G.C. Ghirardi, *Un'occhiata alle Carte di Dio* (il Saggiatore, Milano, 1997)

l'amplificazione coinvolge apparecchi macroscopici e una descrizione che ricorre inevitabilmente al linguaggio che è diventato patrimonio comune della comunità scientifica dai tempi di Galileo e Newton, quello della fisica classica.

Si ritrova, in questa sottolineatura del ruolo assolutamente prominente del linguaggio, una chiara traccia dell'insistenza del positivismo logico sull'analisi linguistica e logica. La frase di Bohr in cui egli esprime la sua posizione circa i processi microscopici e nella quale sottolinea una volta di più il ruolo essenziale del linguaggio, potrebbe essere stata scritta da uno dei fondatori del positivismo logico: *non esiste un mondo quantistico. C'è solo una descrizione fisica astratta. È sbagliato pensare che sia compito della fisica scoprire come è fatta la natura. La fisica riguarda quello che si può dire sulla natura.* Risulta interessante confrontare questa frase di Bohr sugli obiettivi della fisica con la seguente del positivista logico Alfred Jules Ayer sugli obiettivi della filosofia: *l'originalità dei positivisti logici sta nel far derivare l'impossibilità della metafisica non dalla natura di ciò che può essere conosciuto ma dalla natura di ciò che può venir detto.*

Analogamente, elementi chiari di posizione positivista si possono ritrovare nella nozione di complementarità cui Bohr ha voluto dare tanta importanza. Il fatto che procedimenti diversi pongano in luce aspetti della realtà che, come notato da Bell, si contraddicono anziché completarsi a vicenda, non sembra disturbarlo minimamente. Quali ragioni adduce Bohr per giustificare questa peculiare posizione? Che risulta di fatto impossibile mettere in evidenza, nello stesso esperimento, aspetti contraddittori. Poiché esperimenti diversi e incompatibili non risultano confrontabili, la questione se i loro risultati siano consistenti gli uni con gli altri non ha alcun senso, non può neppure venire posta. Non è legittimo usare una descrizione al di fuori del suo stretto dominio di applicabilità.

Similmente, per Bohr, i problemi interpretativi della meccanica quantistica non hanno senso, in quanto ogni quesito sull'interpretazione viene posto nel linguaggio della fisica classica, ma si riferisce a campi estranei ad essa. Non a caso, le uniche asserzioni che Bohr considera legittime sono quelle riferite a situazioni per le quali vale il principio di corrispondenza, cioè a un contesto che in una notevole misura rientra nel dominio della fisica classica.

Vediamo così come, fin dal suo nascere, l'interpretazione ortodossa del

formalismo trova sostegno e al tempo stesso fornisce supporto scientifico al positivismo logico.

Heisenberg

Discuteremo più in dettaglio alcuni aspetti particolarmente interessanti, dal punto di vista epistemologico, del pensiero di Heisenberg. Per il momento, ci interessa esporre brevemente il suo punto di vista.

Egli è molto critico nei confronti dei tentativi di Bohr di salvare la visualizzabilità dei processi atomici. Di fatto, nel pensiero di Heisenberg va emergendo sempre più chiaramente la necessità di distinguere tra oggetto osservato e processo di osservazione, e la convinzione che solo il secondo possieda una realtà effettiva, quella costituita dai suoi esiti: *...negli esperimenti sui processi atomici noi abbiamo a che fare con cose e fatti, con fenomeni che sono altrettanto reali di qualsiasi fenomeno della vita quotidiana. Ma gli atomi o le particelle elementari non sono altrettanto reali; essi formano un mondo di potenzialità o possibilità piuttosto che uno di cose o fatti. E ancora: la nostra intuizione ci conduce ad attribuire agli elettroni lo stesso tipo di realtà fisica degli oggetti del mondo di ogni giorno. Ma questo è sbagliato perché l'elettrone e l'atomo non possiedono alcun grado diretto di realtà fisica del tipo di quello di questi oggetti[...].cosa significhino termini quale onda o corpuscolo, non lo sappiamo più.*

Di nuovo, emerge una posizione positivista che ricorda in una notevole misura quella di Mach nei riguardi dei microscopici costituenti di un gas: ogni asserzione che faccia riferimento a qualcosa al di là della specifica esperienza diretta è priva di senso.

Jordan

Jordan ha assorbito così profondamente le implicazioni della posizione di Heisenberg e dell'interpretazione probabilistica, da arrivare a dichiarare, con ferma convinzione, che la misura non solo disturba inevitabilmente ciò che viene misurato, ma addirittura lo produce. Per esempio, in un processo di misura della posizione con un microscopio, *l'elettrone viene forzato a prendere una decisione. Noi lo costringiamo ad assumere una posizione definita; in precedenza esso non era, in generale, né qui né là; non aveva ancora*

preso una decisione circa una definita posizione...Se, con un altro esperimento, si misura la velocità dell'elettrone questo significa: l'elettrone viene costretto a decidere di assumere qualche valore esattamente definito per la velocità...noi stessi produciamo il risultato della misura.

Pauli

Per questo pensatore, ci limitiamo a riportare una sua famosa citazione mirata a ribattere i reiterati attacchi di Einstein all'ortodossia di Copenaghen, una frase circa le asserzioni che risultano legittime che, ancora una volta, ha chiare connotazioni neopositiviste: *Come ha detto O. Stern recentemente, non si dovrebbe tormentare il proprio cervello con il problema se qualcosa di cui non si può sapere nulla esista, più di quanto si debba fare circa la antica questione di quanti angeli stiano sulla punta di uno spillo. Ma a me pare che le domande di Einstein di fatto siano tutte di questo tipo.*

Landau e Lifshitz

Landau e Lifshitz: La possibilità di una descrizione quantitativa del moto di un elettrone richiede anche la presenza di oggetti fisici che obbediscono alla meccanica classica[...]Se un elettrone interagisce con un tale 'oggetto classico', lo stato di quest'ultimo è, in generale, alterato[...]A questo proposito l'oggetto classico è solitamente chiamato apparato e la sua interazione con l'elettrone è definita come misurazione. Tuttavia, è necessario sottolineare che non siamo qui per discutere un processo di misurazione a cui prende parte il fisico-osservatore. Con misurazione intendiamo qualsiasi processo fisico di interazione tra oggetti classici e quantistici, che si verifica separatamente e indipendentemente da qualsiasi osservatore. L'importanza del concetto di misura nella meccanica quantistica è stato chiarito da N.Bohr.

Dirac

Dirac: L'unico oggetto della fisica teorica è calcolare risultati che possono essere confrontati con esperimenti, e non è necessario fornire una descrizione soddisfacente di ogni fenomeno osservato.

Da queste osservazioni risulta chiaro come l'atmosfera neopositivista che si respirava in quegli anni abbia contribuito non poco a preparare il terreno per l'accettazione della teoria che risulterà vincente. Nel capitolo successivo, affronteremo proprio quest'aspetto, analizzando gli elementi che hanno maggiormente contribuito a far sì che oggi l'ortodossia di Copenaghen sia ampiamente, e spesso incondizionatamente, accettata.

Va evidenziato che risulta forzato utilizzare una sigla unica e particolarmente caratterizzata (l'ortodossia) per indicare una serie di posizioni che presentano differenze anche notevoli. Le citazioni dai numerosi scritti di Bohr che spesso vengono riportate da vari autori per presentare questa interpretazione non risultano sempre chiare e neppure consistenti tra loro, ed inoltre le posizioni di Bohr differiscono non poco da quelle di altri membri del gruppo. Ad esempio, probabilmente non avrebbe sottoscritto la sopra riportata affermazione di Jordan che l'osservatore *crei* la proprietà misurata.

Ma al di là di queste differenze, esistono certamente alcuni punti che possono considerarsi condivisi da tutti coloro che elaborarono questa interpretazione. Innanzitutto, che l'obiettivo primario della scienza è quello di prevedere gli esiti di un processo di misura: scopo dell'indagine scientifica non è capire quello che esiste, ma quello che troviamo, assumendo dunque una posizione anti-realista, anche se in un senso moderato. Conseguentemente, l'interpretazione fa giocare all'osservatore un ruolo assolutamente primario: in un certo senso, la meccanica quantistica ha *disfatto la rivoluzione Copernicana*, rimettendo l'uomo al centro dell'universo. Nel cap.5 affronteremo i caratteri problematici legati a quest'aspetto. Infine, è di estrema rilevanza sottolineare la struttura concettuale dell'interpretazione della teoria in una prospettiva epistemologica: la teoria fa solo asserzioni *probabilistiche* circa i risultati dei procedimenti di misura sui sistemi fisici, ma condizionate dal fatto che le misure vengano *effettivamente eseguite*. Quest'aspetto probabilistico della teoria conduce verso diversi interrogativi, in gran parte non ancora risolti, come ad esempio il *problema dell'oggettivazione*, di cui parleremo nella sez.5.5.

Nei cap.6 e 7, analizzeremo possibili alternative per risolvere questo problema.

3.5 Realtà velata

Un'interpretazione filosofica molto interessante, dovuta al fisico e filosofo Bernard d'Espagnat, riesce a spiegare la meccanica quantistica in un quadro kantiano modificato. La sua concezione è chiamata *realtà velata*¹⁵. Passando dalla terminologia dell'illustre filosofo Immanuel Kant a quella di d'Espagnat, traduciamo la Cosa in Sé in Realtà Indipendente (nel senso di realtà indipendente dalla mente) e Fenomeno in Realtà Empirica. Possiamo quindi definire tre diverse concezioni riguardanti la Realtà Indipendente:

- 1- Può essere compresa dagli esseri umani (Descartes ed Einstein)
- 2- È completamente inconoscibile (Kant)
- 3- Non è totalmente conoscibile e non totalmente accessibile, ma *velata* (d'Espagnat)

Il punto di vista di Einstein definisce la più forte oggettività che possiamo immaginare. Ha dedicato la sua vita al tentativo di catturare "questo mondo enorme, che esiste indipendentemente da noi esseri umani e che ci sta davanti come un grande ed eterno enigma"[36]. A causa dell'indeterminatezza intrinseca nella meccanica quantistica, e poichè sembra funzionare *al di fuori* dello spazio e del tempo, la teoria quantistica non sembra compatibile con le idee di tempo, spazio e causalità, da ciò segue che non è una teoria nel senso oggettivo più forte (il senso presente nella mente di Einstein). Inoltre, non è conforme alle idee a priori kantiane. L'apice di questo conflitto culmina nel problema della misura.

Per Kant, non ci sarebbe alcun tipo di oggettività associata alla stessa Realtà Indipendente, perchè non possiamo dire nulla a riguardo. Tuttavia, potremmo definire un'oggettività associata alla Realtà Empirica, formata da un accordo intersoggettivo tra noi umani che la stiamo studiando. Questa era fondamentalmente anche la concezione di Bohr. Potremmo definire questo tipo di oggettività *Oggettività empirica* o *Oggettività fenomenica*. Sia Kant che Bohr si riferiscono alla necessità di una comunicazione intersoggettiva, cioè ad una struttura comune delle menti umane. Il filosofo Rom Harré aveva già anticipato questa analogia tra Kant e Bohr: "*It seems to me that there is a genuine parallel between the Kan-*

¹⁵B. d'Espagnat, *Veiled Reality. An Analysis of Present-Day Quantum Mechanical Concepts* (Taylor and Francis Inc, 2003)

tian ontology of phenomena and that proposed by Bohr. For both, phenomena are created by the application of something humanly created to something which, as far as human thought could go, must be taken to be undifferentiated. All we can say of it is that it has certain dispositions to permit shaping in this or that way, as apparatus would permit. New concepts realized in new equipments might reveal new dispositions of the glub (a word used by Harré to denote the ur-stuff of the world). But the concepts of physics, as a descriptive science, are constrained to those by which observable, manipulable apparatus and its reactions can be described. Immediately certain epistemological conclusions follow. Since the apparatus must be visible, tangible, and so on, and since the phenomena are shaped up by it, the concepts of classical physics must provide the only recourse for unambiguous communication between people about phenomena. This is Bohr's correspondence principle¹⁶".

Inoltre, l'oggettività fenomenica è anche vicina alla definizione di oggettività secondo Popper. Per lui, l'oggettività delle affermazioni scientifiche deriva dal fatto che possono essere sottoposte a prove intersoggettivamente e quindi, in questo linguaggio, la meccanica quantistica è oggettiva. Nell'epistemologia di Popper questa definizione stabilisce, in realtà, una regola metodologica, ponendo una linea di confine tra il regno scientifico e quello metafisico. Una forte oggettività rivela di più. Richiede l'indipendenza dell'osservatore e dell'osservato e che l'osservato evolva causalmente nello spazio e nel tempo. Una forte oggettività può essere testata da esperimenti ed è quindi oggettiva nel linguaggio di Popper ma, per come è oggi intesa la meccanica quantistica, essa corrobora il fallimento di questo tipo di oggettività. Tuttavia, se ci teniamo saldi, come fece Einstein, sulle condizioni extra per una forte oggettività, e se le consideriamo come richieste razionali obbligatorie che ogni teoria fisica apprezzabile dovrebbe soddisfare, allora esse sono di natura metafisica. Di nuovo, questo è in accordo con Popper, che non ha accettato o rifiutato il principio di causalità. Si accontenta semplicemente di escluderlo dal regno della scienza in quanto principio metafisico.

Con d'Espagnat, la realtà indipendente è *velata*, ma possiamo coglierne qualcosa. Certo, non sappiamo se quello che abbiamo afferrato sia davve-

¹⁶R. Harré. *Varieties of Realism, a Rationale for the Natural Sciences* (Blackwell, Oxford, England, 1986)

ro un pesce della più profonda Realtà Indipendente o uno che ha nuotato non troppo lontano dalla superficie, ma il confine tra Realtà Indipendente e Realtà Empirica, secondo d'Espagnat, non è così netto come Kant avrebbe creduto. Ad esempio, commenta d'Espagnat, la non-località dei fenomeni quantistici (da considerare un dato di fatto empirico, indipendente dal destino futuro della teoria quantistica) è qualcosa di così forte e strano che, ritiene d'Espagnat, è un elemento non solo della Realtà Empirica, ma anche della Realtà Indipendente. Ciò risulta chiaramente in accordo con la visione Kantiana secondo cui la Realtà Indipendente sarebbe al di fuori dello spazio e del tempo.

Il tipo di oggettività definito dalla concezione di d'Espagnat è da lui considerata *Oggettività Debole*. Secondo lui, ciò che Einstein non riusciva ad accettare nella teoria quantistica non era tanto la sua intrinseca indeterminatezza, quanto la sua debole oggettività. Questo non è difficile da immaginare se siamo consapevoli del desiderio di Einstein di mantenere un forte oggettività.

Questa visione di d'Espagnat può essere considerata una sorta di *agnosticismo epistemologico*, che come tale sembra ragionevole e non corre alcun rischio: non dice poco e non dice troppo. Inoltre, fornisce una possibilità di sintesi tra Kant (nessun pesce dalla Cosa in Sé) ed Einstein (tutti i pesci sono la Cosa in Sé). Può essere visto come una corda, un continuum di atteggiamenti più o meno scettici, con Kant ed Einstein alle estremità.

Capitolo 4

Il successo del paradigma

Se nel cap.2 abbiamo analizzato gli aspetti storici che hanno portato l'ortodossia di Copenaghen a divenire la teoria quantistica vincente all'interno dell'intenso dibattito che vide confrontarsi i più importanti fisici dell'epoca, in questo capitolo ci addentreremo all'interno delle radici culturali dello sviluppo della teoria quantistica, concentrandoci in particolare sui caratteri di natura epistemologica. Pertanto, ritengo interessante analizzare gli sviluppi della scienza moderna alla luce dell'analisi storico-epistemologica svolta da Kuhn nel suo famoso saggio *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* (1964).

Possiamo affermare che attualmente la scienza stia attraversando un periodo di fase "normale", in cui, usando la terminologia di Thomas Kuhn, il "paradigma" accettato sembra essere quello di Copenaghen, che proprio in quanto dominante viene insegnato alle giovani menti, plasmando il loro pensiero in modo tale che esso si accordi con le opinioni tradizionali dettate dal paradigma. Come analizzato da Kuhn, durante un periodo di fase normale, la natura viene fatta entrare a forza nelle "caselle" relativamente rigide fornite dal paradigma. Si suppone che il paradigma sia corretto e appropriato al suo compito (poichè lo scienziato è stato educato in questo modo), e le parti della natura che non si adattano in modo soddisfacente vengono semplicemente ignorate, poiché il modo di vedere il mondo proprio dello scienziato è in qualche modo "formato" dal paradigma secondo cui (o "sotto cui") egli lavora. Kuhn inoltre sottolinea che, in questa fase paradigmatica della scienza, possono presentarsi risultati

attesi o anomali, i quali vengono ignorati per un po', o trattati per mezzo di ipotesi *ad hoc*. Nel cap.2 infatti, abbiamo visto come il problema di definire i contorni tra microcosmo e macrocosmo fu affrontato da Bohr in una maniera ambigua, e il resto della comunità scientifica lo ignorò. Vedremo che, nel cap.5, altri problemi vengono ignorati, ed altri ancora, come il collasso della funzione d'onda, vengono affrontati introducendo ipotesi ad hoc, come assegnare un ruolo privilegiato all'osservatore cosciente (ipotesi di Wigner).

Nondimeno, può venire un momento in cui un paradigma è così gravato da queste ipotesi ad hoc da cominciare a crollare, e la scienza entra pertanto in un periodo di "crisi". In tale fase vengono messe in discussione le tecniche sperimentali di base (la metodologia del paradigma) e si hanno serissime discussioni sugli assunti fondamentali della struttura teorica del paradigma. Spesso vengono sollevate questioni metafisiche che non sarebbero mai emerse in periodi di scienza normale. In un periodo di crisi, inoltre, possono sussistere dissensi su ciò che è realmente il paradigma.

La visione di scienza normale ritengo, alla pari di Popper, che fornisca una descrizione particolarmente sgradevole del fare scienza, in quanto sembra una fase "dogmatica" in cui è del tutto assente una qualche forma di discussione critica. Usando le parole di Popper: "*Lo scienziato 'normale', come è descritto da Kuhn, è stato male istruito. È stato educato in uno spirito dogmatico: è una vittima dell'indottrinamento. Ha appreso una tecnica che può essere applicata senza chiedersene il perché ... Come conseguenza è divenuto ciò che possiamo chiamare uno scienziato applicato in opposizione a quello che chiamerei uno scienziato puro. Si accontenta ... di risolvere 'rompicapo'... Ammetto che esiste un atteggiamento di questo tipo ... Posso solo dire che vedo in questo un grande pericolo e lo vedo pure nell'eventualità che ciò divenga una cosa normale ... un pericolo per la scienza e, in verità, anche per la nostra civiltà¹*".

Purtroppo, sembra che questo pericolo si sia realizzato, osservando come nelle scuole e nelle università si parli solo dell'interpretazione ortodossa, senza neanche lontanamente accennare alle problematiche ad essa legate. Non solo, ma l'isolamento al quale spesso vengono sottoposti coloro che

¹K.R.Popper, La scienza normale e i suoi pericoli, in *Critica e crescita della conoscenza* (1976)

non accettano questo paradigma può ben essere descritto dall'ossimoro "totalitarismo scientifico", di cui abbiamo visto vari esempi nel cap.2. Dubito che una dogmatica adesione ad un paradigma possa condurre ad un *vero* avanzamento scientifico.

Le ipotesi ad hoc di cui parleremo nel cap.5, introdotte per giustificare il paradigma, potrebbero farlo crollare, facendo emergere una tra le visioni alternative di cui parleremo nei cap.6 e 7.

Una visione meno dogmatica appare nell'analisi del filosofo Alan Musgrave del "programma di ricerca" di Lakatos, secondo il quale, nonostante la comunità scientifica abbia scelto il "programma di Copenaghen", ciò non impedirebbe ai singoli scienziati di lavorare su quello che potrebbe sembrare, in un particolare momento, un programma insoddisfacente e regressivo². Ritengo che la comunità scientifica faccia una scelta razionale fra programmi di ricerca in competizione fra loro, anche se questa scelta non dovrebbe essere imposta ai ricercatori.

Personalmente non mi definisco un anarchico nello stile di Feyerabend, poiché non voglio si corra il rischio, per usare le parole di Giulio Giorello, di *insegnare il vodù nelle università*³, ma penso, ritornando all'analisi storica fatta nel cap.2, che ci siano stati diversi fattori psicologici che abbiano contribuito all'accettazione dell'interpretazione ortodossa. Basti pensare all'errato teorema di von Neumann, con un errore talmente grossolano da rendere quasi inverosimile il fatto che passò inosservato tra i più grandi fisici dell'epoca, o la "misteriosa" risposta che Bohr diede al paradosso EPR, che venne considerata come la definitiva vittoria dello scienziato nel dibattito. In questi ed in altri casi emerge un enorme desiderio di "rendere giusta" un'interpretazione a tutti i costi, anche contro una razionalità su cui dovrebbe sempre poggiare il comportamento di uno scienziato. Concordo con Feyerabend sul fatto che, una volta che uno scienziato si sia costruito un nuovo sistema concettuale, esso possa apparire "irrazionale" dal punto di vista di un altro scienziato, o sul fatto che, a sostegno di una tesi giudicata da uno scienziato "razionale", egli utilizzi argomentazioni a volte "irrazionali" (senza rendersene conto) con

²A.E.Musgrave, *Method or Madness*, in *Essays in Memory of Imre Lakatos* (Springer, 1976)

³Prefazione di Giulio Corelli in P.Feyerabend, *Contro il metodo. Abbozzo di una teoria anarchica della conoscenza* (Feltrinelli, 2002)

l'intenzione di corroborare la sua tesi. Vedo inoltre di buon occhio la tesi di Feyerabend che il progresso della scienza possa essere accresciuto con la libertà di pensiero e di espressione, e da una disponibilità ad adottare idee che non siano in accordo con la concezione tradizionale o con lo status quo del paradigma prevalente. Il salto che la comunità scientifica dovette fare nel passare da una visione classica ad una quantistica potrebbe in qualche maniera essere definito "irrazionale", soprattutto se pensiamo a concetti come "determinismo", "posizione" e "velocità", i quali erano ormai inquadrati in un paradigma classico, tale da richiedere uno sforzo notevole da parte della comunità scientifica per metterli in discussione. In tal senso, l'avvento della fisica quantistica rappresentò una *rivoluzione concettuale*, e nell'analisi epistemologica svolta dal filosofo Stephen Toulmin possiamo individuare alcuni aspetti che hanno segnato il prevalere della visione ortodossa. Secondo Toulmin, il progresso della scienza è segnato da un "evoluzionismo concettuale", inteso come un'applicazione dell'evoluzionismo darwiniano alla storia della scienza, in cui la comunità scientifica si domanda: dato che i concetti c_1, c_2, \dots , sono inadeguati ai bisogni esplicativi della disciplina, come possiamo fare per modificarli/estenderli/restringerli/qualificarli in maniera tale da riuscire a formulare quesiti di tipo empirico o matematico più fecondi in questo dominio?

Toulmin ritiene che lo sviluppo concettuale sia un'evoluzione nella quale la "selezione naturale" opera in base ad un insieme di "varianti concettuali". I concetti che sopravvivono sono i più "adatti". Notiamo come il modello evoluzionistico di Toulmin si intreccia bene con la descrizione kuhniiana delle rivoluzioni scientifiche. Dunque, in questa prospettiva, concetti come "dualismo onda-corpuscolo" e "indeterminismo" sembrano essere quelli che più sono riusciti ad "adattarsi" alle nuove problematiche di tipo empirico e/o matematico⁴.

C'è da chiedersi se questo cambiamento concettuale non sia stato "eccessivo", se forse è possibile interpretare il mondo microscopico in una maniera "meno quantistica" e "più classica". Forse la visione di Copenaghen rappresenta un'interpretazione troppo "anarchica", come a voler

⁴S.Toulmin, *Rationality and Scientific Discovery*, in K.Schaffer, R.Cohen (a cura di), *Boston Studies in the Philosophy of Science*, vol.XX (Reidel,Dordrecht,1974)

prendere *quasi* sul serio l'anarchismo metodologico di Feyerabend. Dico quasi perché non credo comunque si possa dire che la scelta di adottare l'interpretazione standard sia stata una decisione "irrazionale" essendo, non dimentichiamolo, comunque supportata da diverse osservazioni sperimentali. Tuttavia, giudico irrazionale, non tanto la visione ortodossa, quanto la decisione da parte di molti fisici di ignorare altre interpretazioni, considerando ormai chiuso l'argomento.

Nelle pagine successive vedremo due tentativi, alquanto discutibili, di difendere il paradigma ortodosso.

4.1 Le "teorie chiuse" di Heisenberg

La nozione kuhniana di paradigma ricorda in modo peculiare quella di Heisenberg di *teoria chiusa*. Secondo Heisenberg, il progresso della scienza avviene attraverso una sequenza di teorie chiuse. Una teoria chiusa è vera nel suo dominio limitato di validità e non è suscettibile di modifiche. Essa non può essere migliorata da piccoli cambiamenti; può essere sostituita solo da qualcosa di essenzialmente diverso. La nozione di teoria chiusa, come la nozione di paradigma kuhniano, ha un forte aspetto olistico, in comune con la nozione di paradigma kuhniano (almeno per quanto riguarda il kuhn "radicale"): *"The connection between the different concepts in the system is so close that one could generally not change anyone of the concepts without destroying the whole system"* (Heisenberg 1958). Di tanto in tanto, i fisici scoprono che quella che fino ad allora hanno ritenuto essere una teoria incrollabilmente vera (ad esempio, fisica classica) ha solo una gamma limitata di validità. Possiamo salvare la nozione di scienza esatta solo sacrificando quella di unità, rinunciando all'obiettivo einsteiniano di una teoria ultima unificante. La scienza, sempre secondo Heisenberg, è una raccolta di "isole" indipendenti, di domini diversi, che non possono essere uniti in una struttura comune. All'interno del dominio di una teoria chiusa, possiamo usare i suoi concetti di base con assoluta fiducia. Ma come faccio a sapere che nel dominio di una teoria chiusa i suoi concetti di base sono esatti? La risposta di Heisenberg è imprudente: *"When we use concepts unhesitantly, they are exact"*⁵. Heisen-

⁵W.Heisenberg, *Philosophical problems of quantum mechanics* (1979)

berg, ovviamente, non intende dire che quando usiamo concetti senza esitare allora sono corretti, sarebbe inverosimile, ma vuole soltanto dire che occorre usare concetti senza esitazione quando già crediamo che essi siano corretti ed esatti, ricadendo in una circolarità caratteristica degli argomenti di Heisenberg.

Ci sono altre evidenti debolezze nella nozione di Heisenberg di teoria chiusa: non fornisce argomenti per identificare la correttezza di una teoria con la sua completezza ("*Scientific systems must be complete in order to be correct*"(Heisenberg,1979)), né alcun criterio che determini i limiti di applicabilità di una teoria chiusa (di nuovo, con circolarità: "*classical physics extends just as far as its concepts can be applied*"(Heisenberg,1979)). Tuttavia, non è l'inadeguatezza filosofica che qui ci riguarda, quanto piuttosto il suo utilizzo. Un caso paradigmatico di una corretta teoria chiusa è, afferma Heisenberg, la meccanica quantistica. Secondo l'interpretazione di Copenaghen, la meccanica quantistica non può essere modificata né da piccoli cambiamenti né integrando eventuali *variabili addizionali*. Pertanto, ha sostenuto Heisenberg (così come Bohr e Pauli), i tentativi di contestazione da parte degli oppositori all'ortodossia e alla sua interpretazione sono futili. Infatti, spesso Heisenberg richiamava la nozione di teoria chiusa in difesa dell'interpretazione di Copenaghen. La nozione di teoria chiusa implica che il progresso da una vecchia teoria ad una nuova richiede un "salto intellettuale". Così dice Heisenberg: "*From the point of view of quantum theory ... Newtonian mechanics cannot be improved; it can only be replaced by something essentially different This realization can preserve us from [the] mistake, not always avoided in the past, of attempting to force new fields of experience into an outmoded unsuitable structure of concepts.... We shall serve the future best by ... easing the way for the newly won methods of thought rather than by combating them*"(Heisenberg,1979).

Né le argomentazioni storiche, né come abbiamo visto quelle filosofiche, sostenute da Heisenberg sembrano essere convincenti. La meccanica quantistica può essere integrata da variabili nascoste, nonostante la presunta "prova dell'impossibilità" di von Neumann. Né è vero che la meccanica quantistica non possa essere modificata da piccoli cambiamenti - un esempio notevole è la teoria di Ghirardi-Rimini-Weber, di cui parleremo nella sez.7.4, che affronta il problema della misurazione modificando l'equazione di Schrodinger. Né possiamo ragionevolmente sostenere che

la fisica classica sia una teoria chiusa, data la moltitudine di fenomeni nuovi integrati nel suo dominio di previsione dalla teoria del caos.

L'idea di Heisenberg di una teoria chiusa, concepita in un contesto di confronto, è una nozione ideologica, finalizzata alla difesa della teoria quantistica e della sua interpretazione ortodossa (difesa alquanto debole). È uno strumento di legittimazione nella retorica dell'inconfutabilità della teoria quantistica. Come abbiamo visto in varie occasioni nel corso di questo lavoro, la dottrina dell'inevitabilità dei concetti classici e dell'operazionismo sono potenti strategie sociali di legittimazione, mascherate da oggettivi argomenti filosofici, che sono stati utilizzati per legittimare l'interpretazione di Copenaghen. Anche la nozione di teoria chiusa rientra in questi tentativi, maldestramente costruita per sostenere l'inevitabilità e la finalit  della teoria standard ed incoraggiare un impegno acritico da parte dei suoi professionisti, molto simile al paradigma kuhniano vigente in un periodo di scienza "normale".

Ci sono, ovviamente, delle differenze tra i paradigmi kuhniani e le teorie chiuse di Heisenberg. I primi, quando sostituiti, sono "sepolti" per sempre nella storia. Le teorie chiuse di Heisenberg sono invece corrette per sempre, nel loro campo di validit . L'intento di Heisenberg, non a caso, risulta quello di divenire l'autore di un teoria *eternamente vera*. Nonostante questa differenza, sono le somiglianze tra teorie chiuse e paradigmi ad essere significative. Entrambi i concetti resistono a piccoli cambiamenti. Entrambi sono olistici. Entrambi richiedono che i progressi avvengano tramite "salti intellettuali" qualitativamente nuovi. Entrambi implicano l'incommensurabilit , di cui abbiamo parlato nella sez.3.3. E per finire, entrambi richiedono un impegno dogmatico e scoraggiano un atteggiamento critico.

4.2 La difesa del paradigma di Hanson

Nel 1958, il filosofo della scienza americano Norwood Hanson scrisse un libro, il quale fu ignorato per molto tempo, intitolato *Patterns of Discovery*. Il libro di Hanson si apre con un incontro tra un proCopernicano Keplero ed un Brahe anticopernicano e con la sorprendente domanda: "*Do Kepler and Tycho see the same thing in the east at dawn?*".

Hanson, nell'introduzione, ci informa che "l'approccio e il metodo di questo saggio è insolito". Deluso dall'inadeguatezza delle discussioni di natura filosofica come lo stato dei fatti osservativi e la causalità, Hanson decide di utilizzare l'attuale teoria atomica come *"the lens through which these perennial philosophical problems will be viewed"*. Tutte le discussioni nel libro, ci informa Hanson, "sono scritte con il capitolo finale in mente" - il capitolo in cui discute la rivoluzione quantistica.

In modo schietto, egli rifiuta di far fronte a qualunque materiale storico che non si adatti ai suoi obiettivi: *"Any argument not applicable to microphysics has been held generally suspect; conversely, arguments have been regarded as established if they help one to understand the conceptual basis of elementary particle theory"*.

Si discute di casi storici di incommensurabilità tra Tycho e Keplero, Descartes e Beckman, Mach e Hertz, riferendosi puntualmente alla situazione della fisica quantistica come esempio emblematico di incompatibilità di un nuovo modello concettuale (discontinuità logica) con il vecchio: *"To say that Tycho and Kepler, Simplicius and Galileo, Hooke and Newton, Priestley and Lavoisier, ... Heisenberg and Bohm all make the same observations but use them differently is too easy. It does not explain controversy in research science"* e ancora *"It is the sense in which Tycho and Kepler do not observe the same thing which must be grasped if one is to understand disagreements within microphysics"*. La maggior parte del capitolo finale è dedicato alla descrizione e all'approvazione del dogma di Copenaghen, e sostiene l'impossibilità di un'alternativa ad esso. Man mano che si avvicina alle nozioni di olismo e incommensurabilità, il linguaggio di Hanson perde di chiarezza.

La discussione di Hanson è molto vicina agli scritti di Heisenberg, a volte in modo imbarazzante. Ripete doverosamente gli argomenti di Heisenberg sull'impossibilità della visualizzazione nel dominio quantistico, sulla dualità onda-particella, e sull'inevitabilità dell'acausalità, che segue dalla relazione di indeterminazione di Heisenberg. Come per Heisenberg, la relazione di indeterminazione è una pietra angolare di tutta la teoria quantistica: la violazione di tale relazione è considerata una "impossibilità concettuale". Ciò non significa che il principio di indeterminazione sia una tautologia o una definizione: *"Had nature been other than it is ... the principle might never have been formulated at all"*.

Hanson utilizza la dualità onda-particella per dedurre l'"impossibilità

concettuale" della determinazione simultanea di posizione e velocità di una particella. Si noti che nella teoria di Bohm, posizione e velocità possono essere definite simultaneamente, sebbene non possano essere simultaneamente misurate. La versione bohmiana della meccanica quantistica costituisce pertanto la migliore confutazione di queste argomentazioni di "impossibilità". Hanson, in maniera acritica, si è affidato ai soliti presupposti di Copenaghen (quelli presentati dagli ortodossi come indiscutibili), come l'indispensabilità dei concetti classici in un'interpretazione della teoria quantistica. Ciò ha portato Hanson a ripetere la consueta strategia retorica di Copenaghen, presentando argomenti per la coerenza della descrizione teorica come argomenti per la sua inevitabilità.

Tuttavia, non sono i dettagli dell'argomentazione di Hanson che mi interessa discutere, ma la sua conclusione: lui arriva alla conclusione che una violazione dell'indeterminazione è una "impossibilità logica", dunque la meccanica quantistica semplicemente non può essere modificata - può solo essere completamente rovesciata: *"The uncertainty principle may of course be given up, but this would not be a reshuffling of one or two elements at the top of the pile of micro-physical knowledge: the whole structure of that pile would collapse One cannot maintain a quantum-theoretic position and still aspire for the day when the difficulties of the uncertainty relations will have been overcome To hold a quantum-theoretic position just is to accept the relations as unavoidable"*. La visione di Hanson dunque, al pari del paradigma kuhniano e delle teorie chiuse di Heisenberg, è una posizione olistica e scoraggia la critica. Nonostante ciò Hanson, con riserve, ha presentato la teoria di Bohm come possibile candidata: *"Observations and experiments cannot decide as yet between Bohm, de Broglie, and Einstein on one side, and Heisenberg, Born, and Dirac on the other"*.

In un'altra discussione più tecnica, Hanson ha sviluppato la nozione di incommensurabilità come di "intraducibilità linguistica". Questo sviluppo mira a difendere l'interpretazione di Copenaghen contro le critiche. Hanson spiega che i linguaggi della fisica quantistica e classica sono "discontinui", cioè non c'è connessione logica tra loro. Quando aumentiamo i numeri quantici, la meccanica quantistica non si "fonde" con continuità con la fisica classica; invece, ci sono "analogie formali" tra le espressioni in regni classici e quantistici. Il fatto che usiamo lo stesso simbolismo matematico, o formule, in entrambi i linguaggi, oscura il fatto che siano

logicamente distinti. Quest'idea però sembra sia stata sviluppata da Hanson per difendere l'ortodossia di Copenaghen, in risposta alle obiezioni poste da diversi fisici e matematici, in particolare Hermann Weyl, il quale argomentò il fatto che il principio di corrispondenza di Bohr e l'indeterminismo di Heisenberg si contraddicono a vicenda.

Hanson ha proiettato quest'intraducibilità linguistica indietro nella storia, a Keplero e Tycho ed alla loro presunta incapacità di comunicare: *"The conceptual differences here reflect earlier examples: Kepler and Tycho at dawn . . . , Beckman's problem and Descartes' problem, Kepler's law[s] as they were for him and then for Newton, ... for Mach ... and Hertz"*. Eppure Hanson non stava semplicemente, come potremmo aspettarci, proiettando astoricamente l'attuale situazione della fisica nel passato. Stava proiettando una certa versione - l'ortodossia - come una "lente" attraverso la quale avrebbe interpretato l'intera storia del pensiero fisico. Vediamo la strategia attraverso cui la posizione degli ortodossi viene canonizzata in una teoria generale della crescita della conoscenza. Hanson ha usato, per la prima volta, la teoria quantistica per interpretare il "passato", progettandolo e ricostruendolo sulla base della fisica quantistica. La storia stessa, in questo modo, viene utilizzata per giustificare l'attuale ortodossia. Questa difesa si dimostra chiaramente oscura, priva di un serio fondamento storico e filosofico, e chiaramente di parte, se pensiamo che Hanson si è unito ad Heisenberg per screditare tutti i fisici che hanno osato mettere in discussione il dogma di Copenaghen.

La difesa dell'ortodossia di Hanson è stata innescata dal sostegno alla meccanica bohmiiana da parte di Paul Feyerabend (1960), che si convinse del fatto che l'indeterminismo e la soggettività della meccanica quantistica standard non siano una necessità logica, ma una scelta teorica deliberata. Molti sostengono addirittura che l'alternativa bohmiiana ispirò la filosofia del pluralismo e dell'anarchia di Feyerabend. Il filosofo considerava l'interpretazione di Bohr non come una necessità, ma solo come aggiunta metafisica alla teoria "nuda". Quindi, secondo Hanson, Feyerabend concluse che siamo liberi di inventare alternative all'interpretazione standard. Hanson si oppose con forza a questo ragionamento: *"Let us suppose that Feyerabend is correct: would it follow that admitting this implies that we are ... free to invent and consider other metaphysical interpretations?"*

*Not at all!*⁶.

La conclusione di Hanson è netta: "*Certainly no reinterpretation yet suggested by philosopher or physicist presents a case for abandoning Bohr's views*". Bohm era l'obiettivo diretto di Hanson: "*There is little practical warrant for the alternative interpretations which have, since Bohm, been receiving prominence*"(1959). Poi Hanson ritenne la questione di un'interpretazione alternativa ingiustificata, difendendo il "risolutore di rimpicapi", direbbe Kuhn, che segue incondizionatamente la linea di Copenaghen: "*No one should think that because most quantum physicists are unperturbed by the type of question brought to prominence by Bohm, that therefore they are unreflective, resigned, . . . predicting machines*"(1959).

Tutti gli argomenti relativi all'"inevitabilità" del paradigma di Copenaghen sono della stessa tipologia di quelli qui esposti, e dunque altrettanto fallaci: si basano su un ragionamento circolare o su immagini metaforiche fuorvianti, (Bohr usava spesso un linguaggio profetico, favolistico e ricco di metafore e analogie) oltre ad essere supportati da una visione della storia falsificata, che rende determinati sviluppi dettati dalla logica interna del paradigma.

Screditare le critiche all'opposizione di Copenaghen risulta essere un potente espediente retorico per rafforzare l'ortodossia. Ciò rivela come sforzi interpretativi non impegnati siano celati da rigide ricostruzioni storiche.

⁶N.R.Hanson, *The Copenhagen Interpretation* (1959)

Il problema della misura

Come abbiamo accennato più volte, in meccanica quantistica tuttora rimangono diversi problemi concettuali, molti dei quali furono già individuati dai fondatori della teoria. Questo non toglie nulla al successo del formalismo. Anzi, la realtà è l'esatto opposto: infatti, indipendentemente da queste problematiche, il formalismo è probabilmente lo strumento matematico più efficiente, per le sue capacità predittive, che si sia mai visto. La sua indubitabile predittività è forse la sua caratteristica principale. Esso continua a dare predizioni accurate nei riguardi di nuovi esperimenti che vengono di volta in volta eseguiti, anche in situazioni che i padri fondatori non immaginavano neanche. Nonostante ciò, rimangono numerose difficoltà concettuali, molte delle quali legate al processo di **misurazione**.

Innanzitutto, perchè un determinato risultato, tra quelli possibili, viene fuori come risultato di una misura? In merito a questa domanda, sono state proposte diverse soluzioni: possiamo supporre delle cause *nasconde* che determinano il risultato che si osserva nel corso di una misura (es. teoria di de Broglie-Bohm), possiamo rifiutare le nozioni basilari di misurazione come il risultato di *uno* solo tra i possibili risultati (interpretazione di Everett). Oppure possiamo accettare il fatto che la meccanica quantistica sia fondamentalmente irriducibile (visione standard e QBism), cosicché il problema svanisce.

Ma c'è un secondo problema, più sottile del precedente: si tratta di spiegare le modalità con cui viene fuori un risultato da un esperimento, cioè

cosa rende tale un misura. Nell'interpretazione standard si assume che uno stato quantico possa essere sottoposto a due diversi processi. Il primo è l'evoluzione temporale continua, deterministica e unitaria descritta dall'equazione di Schrodinger o dalla sua controparte relativistica. Il secondo, chiamato comunemente **collasso** o proiezione, è un cambio discontinuo, probabilistico e non-unitario, dello stato quantico, che accade durante il processo di misura. Un modo per risolvere questo problema sarebbe quello di respingerlo, considerandolo uno pseudo-problema, come fatto con il precedente. Cioè, se la teoria quantistica viene intesa come una teoria fondamentale di osservazioni e dell'azione degli osservatori su queste osservazioni, allora l'atto di misurazione può essere introdotto come una nozione primitiva, che non può essere soggetta ad una completa analisi. Per molti, ciò si potrebbe motivare ricorrendo all'intuizione e all'esperienza quotidiana. Questa strada viene intrapresa dai fautori dell'interpretazione ortodossa e dai QBists. Ritengo questa risposta ambigua e problematica, come vedremo analizzando il caso del famoso "Amico di Wigner" nella sez.5.2.1.

Un terzo problema, legato al primo, riguarda la relazione tra microsistema e macrosistema. Come abbiamo accennato nel cap.2, al centro della visione epistemologica di Bohr c'è la considerazione che gli strumenti di misura stiano al di fuori del campo di validità della teoria quantistica, col solo scopo di permetterci di acquisire una conoscenza empirica. È importante comprendere che questo problema non può essere evitato, e che inevitabilmente coinvolge sistemi macroscopici. Infatti, data l'enorme differenza in scala tra l'essere umano ed un sistema microscopico che noi desideriamo studiare, il nostro tentativo di ottenere informazioni su di esso necessita di un processo di amplificazione che permetta di relazionare le proprietà microscopiche a situazioni che sono macroscopicamente percepibili, e dunque distinguibili dalle nostre percezioni.

Questi tre problemi vengono generalmente affrontati in riferimento al processo di misura ideale di von Neumann, che per primo affrontò queste problematiche, dandone una descrizione formulata in termini precisi. In questo capitolo analizzeremo il problema della misura in questo modo, strettamente connesso al problema di dare un significato ben preciso allo *stato quantico di un sistema*. Nei cap.6 e 7 analizzeremo diverse interpretazioni alternative a quella standard, concentrandoci sulla risposta che esse

danno ai problemi qui esposti. La misura, dopotutto, non è un evento *soprannaturale*, è un processo fisico, che coinvolge la materia ordinaria, e pertanto deve essere analizzato per mezzo delle leggi fisiche ordinarie.

In questo capitolo dunque, ci confronteremo sulla questione di grande rilevanza epistemologica che il fisico Abner Shimony ha appropriatamente sintetizzato come *chiudere il cerchio*, una felice espressione con la quale indica, tra l'altro, la possibilità di elaborare una visione coerente del mondo che risulti compatibile al tempo stesso con i fatti che caratterizzano il comportamento dei microsistemi e con i dati della nostra esperienza quotidiana con i sistemi macroscopici.

Fondamentalmente, questi tre problemi possono riassumersi in uno solo: la riduzione o collasso della funzione d'onda. Sono del parere che nel momento in cui riusciremo a dare una spiegazione chiara di cosa esso sia, e soprattutto se avviene "fisicamente" una riduzione del pacchetto oppure è un fatto puramente epistemico, allora saremo in grado di risolvere anche gli altri problemi. Sicuramente, all'interno dell'ortodossia, ciò rappresenta un problema sia fisico, in quanto non è molto chiara la natura reale di questo processo, sia formale, in quanto interrompe bruscamente la validità dell'equazione di Schrodinger.

Un'ulteriore importante motivazione per trattare la misurazione come un processo fisico deriva dal considerare la natura stessa del processo di "misura". Come è noto ai filosofi e ai fisici, il processo di misurazione è "carico di teoria". Cioè, per sapere come eseguire correttamente una misurazione, o come progettare uno specifico apparato di misura, è richiesta una teoria che orienti lo scienziato nella pratica sperimentale: in particolare, è necessaria una certa comprensione di come funzioni l'apparecchiatura e come *interagisca* con il sistema in esame. Per questo motivo, è difficile capire come possa, il processo di misurazione quantistica, essere compreso correttamente senza alcun corpo teorico antecedente che descriva l'attrezzatura stessa e la sua interazione con il sistema. E poiché l'attrezzatura di solito appartiene al regno macroscopico definito, e il sistema quantistico no, una corretta descrizione sembra richiedere un "resoconto omogeneo del mondo", cioè una teoria in cui venga fornito un resoconto oggettivo non solo dell'apparato macroscopico, ma anche del microsistema e della sua interazione con l'apparato. Da ciò è facile concludere che un resoconto coerente della misurazione quantistica ri-

chieda che la teoria quantistica sia in qualche modo estesa da una teoria dei microsistemi a una teoria fisica universale, cioè con un dominio di applicazione illimitato, in cui il realismo macroscopico con cui abbiamo a che fare quotidianamente venga in qualche modo esteso a livello microscopico.

Così, ad esempio, la teoria dell'onda pilota, o l'interpretazione di Everett, o i modelli dinamici di collasso (cap.6 e 7) possono essere applicati a situazioni in cui si sta effettuando una misurazione quantistica. Se la teoria fornisce un resoconto inequivocabile dei processi oggettivi in generale, fornirà un resoconto altrettanto inequivocabile del processo di misurazione quantistica in particolare. Il risultato sarà una teoria quantistica "senza osservatori", nel senso che gli osservatori sono sistemi fisici che obbediscono alle stesse leggi di tutti gli altri sistemi, e che pertanto non devono essere aggiunti alla teoria come elementi extra-fisici.

La problematica che ci accingiamo ad affrontare rappresenta un campo di indagine tuttora aperto e sul quale si sta svolgendo da più di mezzo secolo un dibattito molto acceso, nonostante esistano ancora scienziati che si ostinano a ritenere che la teoria quantistica, nella sua formulazione ortodossa, non presenti alcun problema concettuale.

5.1 Formalismo generale

Descriviamo formalmente il problema della misura. A tal proposito, consideriamo il caso di una particella in una scatola, e supponiamo di voler misurare l'energia della particella. Questa misurazione verrà eseguita utilizzando un apparato schematicamente raffigurato come un scatola nera (il cui funzionamento interno non ci interessa) con un puntatore macroscopico la cui posizione, dopo l'interazione, indicherà il risultato dell'energia misurata. Vedere la Fig.5.1.

La particella nella scatola è descritta da una funzione d'onda:

$$\psi_0(x) = c_1\psi_1(x) + c_2\psi_2(x) + c_3\psi_3(x) \quad (5.1)$$

all'istante iniziale, ed evolve secondo l'equazione di Schrodinger, fino a quando non viene eseguita la misura.

Adesso vogliamo descrivere il puntatore in termini quantistici, con una

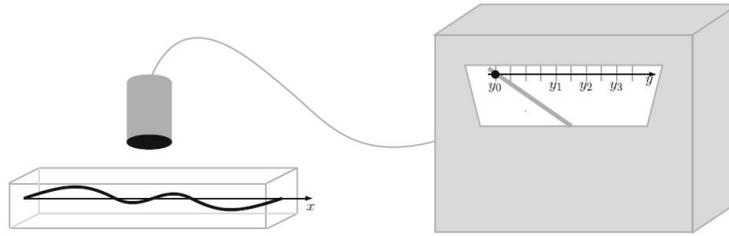


Figura 5.1: Viene mostrata la particella nella scatola (il cui grado di libertà spaziale è x) a sinistra; la curva ha lo scopo di indicare la sua funzione d'onda (non si faccia l'errore di prendere la figura troppo alla lettera). Poi c'è un dispositivo di misura dell'energia. Esso ha un puntatore macroscopico, che ipotizziamo essere come un'unica, pesante particella di coordinata orizzontale y . Prima dell'interazione, il puntatore indica la posizione "pronta" y_0 ; dopo la misura, il puntatore si sposterà in una nuova posizione che indicherà il risultato della misurazione.

funzione d'onda. Supponiamo che esso, nella sua "posizione pronta", possa essere descritto da un pacchetto gaussiano centrato sulla posizione y_0 :

$$\phi(y) = Ne^{-(y-y_0)^2/4\sigma^2} \quad (5.2)$$

All'istante $t = 0$, in cui inizia l'interazione del processo di misura, la funzione d'onda del sistema particella+puntatore sarà:

$$\Psi_0(x, y) = \psi_0(x)\phi(y) \quad (5.3)$$

che evolverà nel tempo in accordo con l'equazione di Schrodinger:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(x, y, t)}{\partial t} = \hat{H}\Psi(x, y, t) \quad (5.4)$$

con l'hamiltoniana \hat{H} che presenterà tre contributi. Il primo include i termini usuali corrispondenti alle energie cinetiche e potenziali della particella nella scatola, il cui grado di libertà è " x ":

$$\hat{H}_x = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \quad (5.5)$$

La seconda parte comprende l'energia cinetica del puntatore, il cui grado di libertà è "y":

$$\hat{H}_y = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (5.6)$$

Il terzo contributo, il più importante, è quello che descrive l'interazione tra la particella e il puntatore. Naturalmente, quest'interazione sarebbe piuttosto complicata, mediata da tutte le particelle che compongono l'apparato. Per la nostra schematizzazione, tuttavia, ciò che vogliamo veramente garantire è quanto segue: se la particella dovesse trovarsi inizialmente in un autostato di energia ψ_n , il puntatore dovrebbe spostarsi di una quantità proporzionale a E_n , il corrispondente autovalore di energia. Che è dopotutto ciò che fanno i puntatori sui dispositivi di misurazione, per definizione.

Si consideri un'hamiltoniana della seguente forma:

$$\hat{H}_{int} = \lambda \hat{H}_x \hat{p}_y = -i\hbar\lambda \hat{H}_x \frac{\partial}{\partial y} \quad (5.7)$$

Supponiamo adesso che la particella si trovi inizialmente in un autostato dell'energia, in modo che la funzione d'onda iniziale del sistema puntatore-particella sia:

$$\Psi(x, y, 0) = \psi_n(x)\phi(y) \quad (5.8)$$

e supponiamo, per semplicità, che λ (che rappresenta l'intensità dell'interazione) sia molto grande, cosicché - durante il periodo in cui avviene la misurazione - possiamo ignorare i primi due termini dell'hamiltoniana. Dunque, l'equazione di Schrodinger diventa:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}_{int} \Psi = -i\hbar\lambda \hat{H}_x \frac{\partial \Psi}{\partial y} = -i\hbar\lambda E_n \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad (5.9)$$

ed è facile vedere che la soluzione è:

$$\Psi(x, y, t) = \psi_n(x)\phi(y - \lambda E_n t) \quad (5.10)$$

Supponiamo che l'interazione duri fino a $t = T$. Dunque:

$$\Psi(x, y, T) = \psi_n(x)\phi(y - \lambda E_n T) \quad (5.11)$$

che può essere inteso come segue: la particella nella scatola rimane nell' n -esimo autostato dell'energia ed il puntatore rimane un pacchetto d'onda gaussiano, ma il cui centro è spostato a destra di una quantità $\lambda E_n T$ in modo che ora sia centrato in $y_0 + \lambda E_n T$, che possiamo pertanto identificare con y_n - la posizione finale del puntatore che registra il valore dell'energia della particella.

Dunque, osserviamo che la schematizzazione creata fa esattamente ciò che fisicamente si osserva, e pertanto possiamo considerare questo modello come un modo abbastanza fedele di "catturare" tutte le complicate interazioni fisiche che in effetti accoppiano la particella nella scatola al puntatore dell'apparato.

Ma noi non siamo interessati al caso in cui la particella ha un'energia ben definita *prima* della misura, ma vogliamo vedere cosa succede quando la particella inizia in uno stato di sovrapposizione. È facile vedere, data la linearità dell'equazione di Schrodinger, che se:

$$\hat{H} \approx \hat{H}_{int} \quad (5.12)$$

e

$$\Psi(x, y, 0) = \left(\sum_i c_i \psi_i(x) \right) \phi(y) \quad (5.13)$$

allora avremo:

$$\Psi(x, y, T) = \sum_i c_i \psi_i(x) \phi(y - \lambda E_i T) \quad (5.14)$$

Ciò rappresenta una sovrapposizione *entangled* di diversi stati, in ciascuno dei quali la particella ha un'energia definita e la posizione del puntatore

è centrata su una posizione definita dalla corrispondente energia della particella. E questo è molto problematico, perchè sembra che la particella non finisca in un particolare autostato dell'energia, e (peggio!) il puntatore non sia localizzato attorno ad un valore di y ben preciso.

Si potrebbe pensare che questo risultato sia semplicemente una conseguenza dell'aver trattato il processo di misura in maniera troppo schematica. Forse una descrizione più dettagliata, realistica, dell'apparato di misura e del processo di interazione tra il sistema e l'apparato ci darebbe il risultato sperato, senza la necessità di introdurre ad hoc l'ipotesi del collasso? È facile vedere che ciò non è possibile.

Supponiamo infatti di includere un altro grado di libertà intermedio, diciamo z . Lo stato iniziale sarà allora:

$$\psi(x, y, z, 0) = \left(\sum_i c_i \psi_i(x) \right) \phi(y) \chi_0(z) \quad (5.15)$$

dove $\psi_i(x)$ è la funzione d'onda descrivente l'autostato dell'energia con autovalore E_i . Ma, in seguito ad una misura, si avrà:

$$\psi(x, y, z, T) = \psi_n(x) \phi(y - \lambda E_n T) \chi_n(z) \quad (5.16)$$

dunque, anche in questo caso, quando lo stato iniziale della particella è una sovrapposizione, si ha:

$$\psi(x, y, z, T) = \sum_i c_i \psi_i(x) \phi(y - \lambda E_i T) \chi_i(z) \quad (5.17)$$

Dunque, il problema rimane. La trattazione semplice fatta prima ha già fatto emergere il problema essenziale e inevitabile. Questo chiarimento è necessario, poichè in passato (e a volte ancora oggi) sono state sollevate obiezioni rivolte alla semplice schematizzazione del processo di misura che si è adottata, facendo riferimento sia al processo di preparazione dell'apparecchio che alla sua perfetta efficienza, e ciò ha portato molti fisici a ritenere che il problema non esista. Da ciò visto, si vede chiaramente come il problema è legato *unicamente* alla natura lineare del formalismo, e non può essere risolto così facilmente. Ciò che conta è di poter disporre di un procedimento di preparazione dell'apparecchio che lo renda atto a servire quale strumento di misura. L'unica richiesta essenziale cui

deve soddisfare è quello di esibire una caratteristica macroscopica che ci permetta di asserire, diciamo, che il suo indice segna 0. Da ciò, la dinamica dell'interazione microsistema-apparecchio condurrà alla problematica qui discussa.

Per mettere meglio in luce l'inadeguatezza della critica ora analizzata, vale la pena considerare un analogo classico del processo di misura che stiamo discutendo. Si immagini infatti una situazione classica, in cui una particella si sta propagando verso una regione dove è posto un dispositivo (per esempio un contatore Geiger) che, se colpito dalla particella, scatta e fa aprire uno sportello che permette ad un gas di espandersi in un recipiente. Alternativamente, se la particella incidente percorre una traiettoria che non la porta ad attivare il contatore, non si ha alcun effetto sul contenitore del gas. Supponiamo di volere usare questo dispositivo per capire se la molecola si sta propagando lungo un cammino che investirà il contatore o lungo un cammino diverso. Quale rilevanza avrebbe, per il processo in esame, l'osservazione che noi non conosciamo lo stato preciso del gas, le posizioni e le velocità dei suoi costituenti? Non basta forse il fatto che esso abbia invaso il recipiente a garantirci che la particella abbia attraversato il contatore?

5.2 Collasso della funzione d'onda

Un aspetto strettamente legato al problema della misura riguarda come la teoria quantistica possa essere applicata al processo di misurazione stesso, poiché sembra inevitabile che debba essere possibile (in linea di principio) trattare l'apparato e gli osservatori come sistemi fisici, e discutere il processo di misurazione in termini puramente quantistici. Tuttavia, i tentativi in tal senso sono notoriamente controversi e generano paradossi e confusione. In effetti, sappiamo che nella maggior parte dei casi la funzione d'onda evolve con continuità, in modo perfettamente prevedibile e continuo, in accordo con l'equazione di Schrodinger; solo in alcuni casi, quando si ottengono nuove informazioni mediante l'osservazione, si verificano cambiamenti imprevedibili del vettore di stato, secondo l'ipotesi del collasso postulata da von Neumann, rendendo l'evoluzione di quest'oggetto molto insolita. Quest'ipotesi cosiddetta del *collasso* rap-

presentò una novità quando fu introdotta¹, ed ancora oggi rimane tale, ma è anche causa di difficoltà logiche legate al processo di misura, che non dovrebbe avere, secondo Einstein (sez.3.2), un ruolo speciale all'interno della teoria, tantomeno dovrebbe causare problemi. Per risolvere le difficoltà, spesso si descrive la misurazione come un'interazione tra un (possibilmente microscopico) sistema misurato ed un apparato di misura macroscopico, dove quest'ultimo dovrebbe essere trattato secondo le ordinarie leggi della fisica. Ma questa è davvero una soluzione? Niente affatto, è solo una maniera usata da certi fisici per evitare la discussione. Una teoria in cui non sia necessaria alcuna distinzione tra l'evoluzione "normale" di un sistema e la misurazione sembrerebbe molto più generale, e quindi preferibile. In altre parole, perché dare un carattere così speciale alle misurazioni in modo che sia necessario introdurre due postulati separati? Dove si ferma esattamente la gamma di applicazioni del primo postulato a favore del secondo? Più precisamente, tra tutte le interazioni - o perturbazioni - che un sistema fisico può subire, quali sono da considerare normali (evoluzione di Schrodinger), e quali misure (riduzione del vettore di stato)?

Dal punto di vista di un ortodosso come Bohr, gli atti e gli apparati di misurazione sono chiaramente "discriminati" dagli altri processi fisici, ma Bohr non è stato in grado di dirci *perché* sia così.

5.2.1 L'amico di Wigner

Nel paradosso dell'amico di Wigner², abbiamo la seguente situazione: uno sperimentatore A (Wigner) possiede una scatola contenente uno sperimentatore B (un suo amico) ed un sistema microscopico S. Supponiamo inizialmente che S si trovi, ad esempio, in una sovrapposizione di stati energetici:

$$|\psi_0 \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|E_1 \rangle + |E_2 \rangle) \quad (5.18)$$

¹J.von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (Berlino, Springer, 1932)

²E.P. Wigner, Remarks on the mind-body question, in *The Scientist Speculates*, ed. by I.J.Gould (Heinemann, London, 1961)

e che l'intera scatola si trovi in uno stato:

$$|\Psi_0\rangle = |B_0\rangle \otimes |\psi_0\rangle \quad (5.19)$$

(idealizzando B come inizialmente in uno stato puro $|B_0\rangle$).

Supponiamo che B esegua una misura ideale su S. Se A non effettua nessuna misura, allora dal punto di vista di A lo stato quantico dell'intera scatola evolve continuamente (secondo l'equazione di Schrodinger) in una sovrapposizione di stati:

$$|\psi(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|B_1\rangle \otimes |E_1\rangle + |B_2\rangle \otimes |E_2\rangle) \quad (5.20)$$

dove $|B_i\rangle$ è uno stato tale che l'osservatore B ha trovato il sistema S con energia E_i .

Adesso, se il "super osservatore" A volesse osservare gli effetti di interferenza che coinvolgono entrambi i rami della sovrapposizione in (5.20), cosa accadrebbe? In tal caso, potrebbe essere coerente con il punto di vista di B, secondo il quale la misurazione dell'energia di S ha avuto un risultato ben definito?

La maggior parte degli scienziati concorda sul fatto che l'apparecchiatura macroscopica sia soggetta alle leggi della fisica come ogni altro sistema, e che pertanto dovrebbe essere possibile descrivere il funzionamento di tale apparecchiatura esclusivamente in termini della teoria più fondamentale disponibile. Sullo status degli sperimentatori umani come sistemi fisici, c'è un po' meno consenso: alcuni fisici hanno suggerito, nel contesto della fisica quantistica, che un essere umano non possa essere trattato come un sistema fisico e che la coscienza umana giochi un ruolo fondamentale. Adottando questo punto di vista, Wigner ha concluso che l'unico modo per risolvere la situazione paradossale da lui descritta consista nell'attribuire all'essere con una coscienza un ruolo diverso, nella meccanica quantistica, rispetto al dispositivo di misurazione inanimato, e che per un sistema contenente un osservatore cosciente "le equazioni della meccanica quantistica non possono essere lineari". Così, Wigner conclude che, nella situazione da lui descritta, non ci sia disaccordo tra A e B, cioè tra i due sistemi coscienti. La conclusione inevitabile, argomenta Wigner, è che la riduzione deve essere avvenuta prima che lui possa chiedere all'amico:

cosa hai visto? Anche il suo amico, come lui, avrà certamente percezioni perfettamente definite. Negare questo, cioè pensare che sia l'atto di Wigner a produrre la riduzione, costringerebbe Wigner in una posizione solipsista estrema: egli può parlare soltanto delle sue percezioni. Infatti, se il collasso avvenisse in seguito all'osservazione di Wigner, significherebbe dire che la percezione di Wigner potrebbe essere diversa da quella del suo amico.

Ad oggi, la conclusione di Wigner, che gli esseri coscienti violino le leggi quantistiche, sembra sempre meno credibile, visti gli impressionanti progressi compiuti nella biologia umana e nelle neuroscienze, in cui l'organismo umano, cervello compreso, viene trattato come un complesso sistema elettrochimico. Non ci sono prove che gli esseri umani siano in grado di violare, ad esempio, le leggi di gravità, o della termodinamica, o principi fondamentali della chimica, e pertanto la conclusione che essi debbano essere al di fuori del dominio delle leggi quantistiche sembra difficile da accettare. Perché abbia luogo *effettivamente* una "misurazione", è necessaria la presenza di un essere cosciente? Non credo sia ragionevole rispondere affermativamente a questa domanda. Gli stessi osservatori umani sono costruiti presumibilmente anch'essi con minuti componenti quantistici. Nonostante ciò, Wigner sembra attribuire alla coscienza umana un ruolo determinante nel processo di misura.

Esaminiamo il discorso più da vicino.

Wigner ha osservato che, avendo accettato che la realtà fisica e l'atto di percezione cosciente sono posti su due livelli diversi, mentre in tutte le precedenti teorie scientifiche si attribuiva all'atto della coscienza un ruolo esclusivamente passivo (un essere percettivo diventa cosciente dello stato del mondo fisico che lo circonda), la meccanica quantistica, integrando in essa l'interpretazione della riduzione da parte della coscienza, attribuisce un ruolo assolutamente peculiare all'osservatore, e descrive con un linguaggio semplice un processo insolito, vale a dire il verificarsi di una reazione della mente cosciente sul mondo fisico che porta ad effetti di grande importanza: è l'atto di prendere coscienza di ciò che ci circonda che fa passare la realtà dal limbo delle potenzialità alla chiarezza dell'attualità.

In questo senso, la visione ortodossa della meccanica quantistica ha portato ad un "disfacimento della rivoluzione copernicana", ponendo l'uomo

ancora una volta, ed in maniera molto più radicale, al centro dell'universo. A lui spetta il ruolo di "rompere" la catena di von Neumann. Questa posizione ha una coerenza interna, ma implica alcune posizioni molto peculiari. Ad esempio, rende assolutamente prive di senso tutte le accurate affermazioni dei cosmologi sullo stato dell'universo milioni e milioni di anni fa. L'universo, fino a quando non apparve in esso un osservatore cosciente, era un regno di potenzialità infinite; al primo atto della percezione cosciente fu istantaneamente dotato di una precisa attualità. Questo sembra attribuire all'uomo un ruolo assolutamente sproporzionato.

Inoltre, anche assumendo che la coscienza giochi un ruolo fondamentale, e che dunque non debba essere considerata una realtà fisica, cioè soggetta alle leggi fisiche, ci si chiede: cos'è la coscienza? Come si relaziona la coscienza (mente) di un osservatore alla struttura corporea (corpo) con la quale sembra essere associata?

Sebbene i nostri corpi abbiano un aspetto esteriormente diverso, è la nostra coscienza che ci permette di percepire noi stessi come individui e di mettere in relazione quel senso di sé con il mondo esterno. La coscienza definisce chi siamo. È il magazzino dei nostri ricordi, pensieri, sentimenti ed emozioni e governa la nostra personalità ed il nostro comportamento. Il filosofo del diciassettesimo secolo René Descartes scelse la coscienza come punto di partenza per quella che lui sperava diventasse una tradizione filosofica completamente nuova. Nel suo *Discours de la méthode*, pubblicato nel 1637, enuncia i criteri che si era prefissato nello stabilire un approccio rigoroso basato sulla logica apparentemente incontrovertibile di geometria e matematica. Lui decise di non accettare nulla di cui avrebbe potuto dubitare: "*poichè volevo concentrarmi esclusivamente sulla ricerca della verità, ho pensato che avrei dovuto...rifiutare come essere assolutamente falso tutto ciò in cui potrei supporre il minimo motivo di dubbio...*³".

In questo modo, ha potuto costruire una nuova tradizione filosofica con fiducia nell'assoluta verità delle sue affermazioni. Ciò significava rifiutare le informazioni sul mondo ricevute attraverso i suoi sensi, poichè i nostri sensi sono facilmente ingannabili e quindi non ci si può fidare.

Descartes ha sostenuto che poichè pensa indipendentemente dai suoi sensi, il fatto stesso che lui pensa è qualcosa di cui può essere certo. Ha

³Tratto dalla versione italiana, *Discorso sul metodo*, del 2014

inoltre concluso che esiste una fondamentale contraddizione nell'attenersi alla convinzione che qualcosa che pensa non lo faccia anche esistere, e così anche la sua esistenza era qualcosa di cui poteva essere certo.

Mentre Descartes poteva essere certo della sua esistenza come entità cosciente, non poteva essere sicuro delle apparenze delle cose rivelate alla sua mente dai suoi sensi. Quindi proseguì affermando che la "sostanza" pensante (coscienza o mente) è ben distinta dal "macchinario" irriflessivo del corpo. La macchina è un'altra forma di materia estesa (ha estensione nello spazio tridimensionale) e può o meno esistere, mentre la mente non ha estensione e deve esistere. Descartes dovette affrontare il difficile problema di capire come qualcosa senza estensione possa influenzare e dirigere la macchina: come un pensiero possa essere tradotto in movimento del corpo. La sua soluzione era identificare la ghiandola pineale, un piccolo organo a forma di pera che si trova in profondità nel centro del cervello, come la "sede" della coscienza attraverso la quale la mente spinge delicatamente il corpo in azione.

Questo dualismo mente-corpo (dualismo cartesiano) nella filosofia di Descartes è del tutto coerente con la fede cristiana medievale nell'anima o nello spirito, che era prevalente ai tempi in cui Cartesio pubblicò il suo lavoro.

Nel suo libro fondamentale, *Il concetto della mente* (1976), il filosofo Gilbert Ryle si riferisce a questo dualismo come ad un "fantasma in una macchina".

I neuroscienziati hanno accesso ad una serie di tecnologie, come la risonanza magnetica funzionale (fMRI) e la tomografia ad emissione di positroni (PET), che possono sondare il funzionamento del cervello in modo accurato e non invasivo. Sperimentare qualcosa, o pensare qualcosa, stimola una o più parti del cervello. Quando queste parti si attivano, assorbono glucosio e ossigeno dal flusso sanguigno. Una scansione fMRI mostra dove si concentra l'ossigeno e quindi quali parti del cervello si "illuminano" a seguito di stimoli sensoriali, processi mentali, risposte emotive o memorie. Una scansione PET utilizza un marker radioattivo nel flusso sanguigno, ma per il resto fa più o meno la stessa cosa, anche se con una risoluzione inferiore. La neuroscienza, nella sua forma moderna, si è sviluppata solo nella seconda metà del secolo scorso, facendo molta strada in un tempo relativamente breve. Ma dobbiamo riconoscere

che, nonostante ciò, non ha ancora risolto quello che il filosofo e lo scienziato cognitivo David Chalmers ha definito un *hard problem*: "*The really hard problem of consciousness is the problem of experience[...]*When we see, for example, we experience visual sensations: the felt quality of redness, the experience of dark and light, the quality of depth in a visual field. Other experiences go along with perception in different modalities: the sound of a clarinet, the smell of mothballs. Then there are bodily sensations, from pains to orgasms; mental images that are conjured up internally; the felt quality of emotion, and the experience of a stream of conscious thought. What unites all of these states is that there is something it is like to be in them. All of them are states of experience⁴".

Ma oltre al problema di capire il collegamento tra il corpo e la coscienza, c'è un'altra questione di enorme importanza: cosa rende "cosciente" un oggetto? Solo l'uomo è cosciente, oppure anche il gatto di Schrodinger possiede una coscienza? Un sasso è davvero "incosciente" di sé stesso? Non esiste un'unica risposta a questi interrogativi, ma sono tre le risposte più importanti che vengono fornite:

1- La coscienza potrebbe essere causata dalla "complessità". Un sistema sufficientemente grande, con gradi di libertà sufficienti e sufficienti interconnessioni tra le sue varie parti, potrebbe essere cosciente. Pertanto, ci aspettiamo la presenza di diversi "gradi di coscienza"; la coscienza si verificherebbe per la prima volta in sistemi meno complessi del cervello umano, e presumibilmente esisterebbe in una forma più sviluppata in altri, forse in creature ancora sconosciute.

2- Qualcosa di "nuovo" e al di fuori della fisica conosciuta potrebbe essere richiesto. Quindi alcuni oggetti potrebbero averlo ed altri no. Potremmo allora chiederci dove esiste nell'essere umano.

3- Tutto è cosciente. È solo la nostra arroganza che nega la coscienza ad una pietra o ad un elettrone? Forse le particelle "scelgono" come comportarsi, decidendo consapevolmente cosa fare.

La verità potrebbe essere diversa da ognuna di queste e potrebbe non essere adeguatamente esprimibile nei termini che stiamo usando. La nostra

⁴D. J. Chalmers, Facing up to the problem of consciousness, *Journal of Consciousness Studies*, 2 (1995), 200-19.

mente, sebbene comprenda molte cose fuori di sé, incontra serie difficoltà quando si tratta di descrivere cosa c'è *dentro* di sé.

Detto questo, per poter effettivamente testare sperimentalmente la situazione descritta da Wigner, dovremmo avere a che fare con "cervelli quantistici". Sfortunatamente, il nostro cervello sembra non funzioni a livello di singoli eventi quantistici. Se lo facesse, saremmo in grado di "percepire" ogni singola transizione quantistica che si verifica all'interno del nostro cervello, anche se forse non è una prospettiva molto allettante. Tuttavia, il fisico David Deutsch ha suggerito che un giorno potrebbe essere possibile costruire un cervello artificiale in grado di funzionare a livello quantistico. Invece di eseguire questo esperimento con un osservatore umano, potremmo chiedere a questo cervello di eseguire l'esperimento per noi, chiedendogli cosa ha provato.

Dobbiamo comunque ribadire, come fatto in precedenza, che non è quest'apparente dualismo in sé il punto debole dell'interpretazione che stiamo ora considerando, ma piuttosto le paradossali conseguenze che ne derivano. Come Bell ha sottolineato in modo molto acuto, l'ortodossia presenta un grave difetto alla sua origine: la soluzione proposta da Wigner è stata dettata dalla volontà di rimuovere l'ambigua separazione tra quantistico e classico che caratterizza l'interpretazione di Copenaghen, individuando con precisione il "confine" tra i due. Dobbiamo però chiederci: il criterio adottato risponde efficacemente all'esigenza che lo ha motivato? Da una breve analisi ci siamo resi conto che questa individuazione fatta da Wigner risulta, al pari di quella di Bohr, ambigua. Il commento di Bell su questo punto è illuminante: "*Was the wave function of the world waiting to jump [the jump which led to macroscopic definiteness] for thousands of years until a single-celled living creature appeared? Or did it have to wait a little longer, for some better qualified system ... with a PhD?*"⁵. Torneremo su questo problema nella sez.5.3.

5.2.2 Il paradosso di Einstein

Al congresso di Solvay del 1927, Einstein propose un *Gedanken experiment* che coinvolge influenze non locali ed inoltre senza interazione.

⁵J.S. Bell, Against measurement, Phys.World 3, 33–40 (1990)

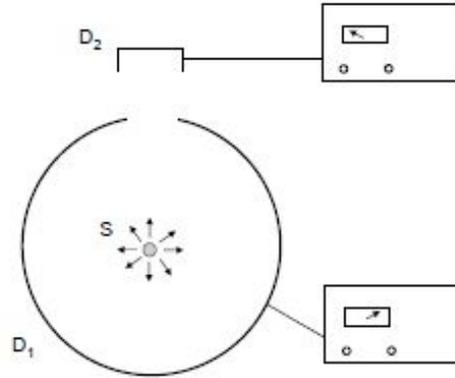


Figura 5.2: Schematizzazione del paradosso di Einstein

Si consideri una sorgente che emette una particella descritta da una funzione d'onda sferica. La sorgente, circondata da due rivelatori, è mostrata in Fig.5.2; uno dei rivelatori, D_1 , cattura la particella emessa in tutte le direzioni, tranne in un piccolo angolo solido Ω ; il secondo rivelatore D_2 cattura le particelle all'interno di quest'angolo solido, ma è posto ad una distanza maggiore. Assumiamo una situazione ideale in cui entrambi i rivelatori hanno un'efficienza del 100%.

Supponiamo che il pacchetto d'onda che descrive la particella raggiunga il primo rivelatore. Possono verificarsi due possibilità:

1- La particella viene rivelata da D_1 . Il vettore di stato quindi scompare e viene proiettato su uno stato che non contiene particelle ed un rivelatore eccitato (il primo); inoltre, il secondo rivelatore D_2 non registrerà mai una particella. Questa possibilità si verifica nella maggior parte dei casi.

2- La particella non viene rivelata da D_1 . Questo evento si verifica con una piccola probabilità, data dall'angolo solido sotteso dal foro nel primo rivelatore visto da S , diviso per 4π , ma a volte si verifica. Quindi, solo il fatto che il primo rivelatore *non abbia* registrato la particella, implica un riduzione della funzione d'onda all'interno di Ω , il che implica che il secondo rivelatore *rivelerà sempre* la particella. Abbiamo quindi una

situazione curiosa in cui la probabilità di rivelazione in questo secondo rivelatore è stata notevolmente aumentata da una sorta di "non-evento" sul primo rivelatore, cioè senza alcuna interazione tra la particella ed il primo apparato di misurazione. Ciò dimostra che l'essenza della misurazione quantistica è qualcosa di molto più sottile delle "perturbazioni inevitabili dell'apparato di misura", spesso invocate nell'interpretazione standard; la riduzione del vettore di stato può avvenire anche quando le interazioni non giocano alcun ruolo nel processo. In questo caso, non è avvenuta alcuna interazione tra il sistema macroscopico e quello microscopico, ma nonostante ciò il sistema microscopico ha subito un effetto, in contrasto con la visione di Bohr. Questo semplice paradosso ha profonde implicazioni epistemologiche sul significato della *misura* nel contesto scientifico. Ad esempio, la definizione del fisico D.Shapere: "[...] con 'osservazione' intendiamo qualsiasi interazione fisica in grado di fornire informazioni affidabili su una determinata situazione fenomenica⁶" non può più essere considerata attendibile, ed occorre pertanto ampliare, o modificare, il significato del termine "misura".

Naturalmente, se si presume che, inizialmente, la particella emessa avesse già una direzione di emissione ben definita, allora l'interpretazione di quest'esperimento mentale diventa semplice: il rivelatore D_2 registra solo la frazione di particelle che sono state emesse nella sua direzione. Non sorprende quindi che non si sia verificata alcuna interazione con il rivelatore D_1 . Ma la meccanica quantistica standard postula che questa direzione di emissione ben definita non esista prima di una qualsiasi misurazione. Vedremo una teoria che risolve questo problema: la teoria di de Broglie-Bohm, dove una particella ha sempre una posizione definita *prima della misura*.

5.3 Rapporto tra macrocosmo e microcosmo

Dalla visione di Bohr emerge una chiara distinzione tra il mondo macroscopico, soggetto alle leggi classiche, ed il mondo microscopico. Dunque, per ogni esperimento, dov'è il confine tra questi due mondi? Analizziamo questa problematica utilizzando il ragionamento presentato da John Bell

⁶D.Shapere, *The Concept of Observation in Science and Philosophy* (1982). Tratto da [12]

in due conferenze: la prima all'Università della California a Los Angeles nel marzo 1988 in occasione del settantesimo compleanno del Premio Nobel Julian Schwinger, la seconda a Trieste nel novembre 1989, in occasione del venticinquesimo anniversario della fondazione del Centro Internazionale di Fisica Teorica dell'Agenzia Internazionale dell'Energia Atomica a Vienna.

Bell analizzò il processo di diffrazione, attraverso una fenditura, di un fascio contenente un certo numero N di elettroni, e la formazione dell'immagine su una pellicola fotografica posta dietro la fenditura. Osservò che non ha senso trattare gli elettroni come se fossero corpi puntiformi che seguono traiettorie ben precise; devono essere descritti mediante una funzione d'onda diffratta. Poiché il numero di elettroni è molto grande ma finito, ciò che vediamo sulla pellicola sarà una serie di N punti neri che corrispondono alle posizioni in cui gli elettroni sono, per così dire, "rivelati" da quell'oggetto, che può essere pensato come un dispositivo di misurazione. Facendo quest'affermazione, abbiamo fatto un salto logico dal linguaggio delle funzioni d'onda, e delle potenzialità di un microsistema, al linguaggio della realtà dei punti. Ma noi sappiamo molto bene che, poichè la funzione d'onda è sensibilmente diversa da zero in tutti i punti della figura di diffrazione, in realtà, se dovessimo trattare la pellicola fotografica come un sistema quantistico (e cosa ci sarebbe di sbagliato nel fare ciò?), avremmo una sovrapposizione lineare di stati. In uno di essi, ad esempio, ciascuno degli N elettroni è in una posizione ben precisa tra gli infiniti possibili, e la pellicola è nello stato in cui i grani attivati di bromuro d'argento sono realmente quelli che corrispondono alle posizioni indicate. Ma esistono un'infinità di altri possibili esiti di questo processo, ognuno dei quali corrisponderebbe ad una diversa distribuzione degli N elettroni nella regione centrale della pellicola e ad una diversa raccolta di grani attivati dall'emulsione. Se siamo interessati a descrivere il processo, dovremmo guardare l'intero sistema elettrone+pellicola come veramente quantistico. Ciò significherebbe che non si potrebbe più parlare di punti in posizioni ben precise, ma solo delle potenzialità che risultino proiettati, nella pellicola, certi punti N piuttosto che altri. Abbiamo spostato il confine dal microcosmo del fascio di elettroni al macrocosmo del film, come mostrato nella seconda fase della Fig.5.3.

Ma non possiamo fermarci qui. Quando si guarda l'immagine sulla pel-

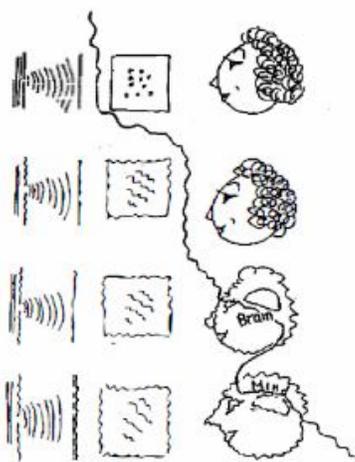


Figura 5.3: Dove dobbiamo porre il confine tra il vago mondo microscopico ed il preciso mondo della nostra esperienza sensoriale? Ecco un'immagine che Bell propose per illustrare questa profonda questione.

licola, il proprio apparato percettivo entra in scena. Ma c'è qualche motivo per pensare che la retina del nostro occhio non sia anche un sistema fisico e come tale sia soggetta alle leggi lineari della teoria? Se vogliamo descrivere quali segnali raggiungono effettivamente il nostro cervello, dovremmo ancora una volta riposizionare il confine tra il vago mondo quantistico ed il mondo degli eventi definiti, e siamo quindi portati a posizionarlo tra il nervo ottico ed il cervello. Ma anche il cervello è un sistema fisico costituito da fotoni, neutroni ed elettroni, attraversato da reazioni elettrochimiche ed altri processi, e pertanto non abbiamo motivo di pensare che non possa essere descritto dal nostro formalismo. E quindi ha perfettamente senso riposizionare nuovamente il confine tra microcosmo e macrocosmo. Questo ragionamento, è facile capire, si può ripetere "all'infinito", rendendo evidente l'ambiguità nel delineare una netta separazione tra i due aspetti della realtà. Riprendendo il caso del famoso gatto di Schrodinger, la catena (cioè l'albero delle possibilità) inizia a propagarsi a livello microscopico (atomo radioattivo) e continua senza limiti apparenti; la difficoltà è capire dove porre il limite micro-macro tra l'atomo e il gatto, interrompendo la catena. In teoria, essa potrebbe

propagarsi anche oltre il gatto. Quando affronteremo il cosiddetto *problema dell'oggettivazione* (sez.5.5), parleremo anche della *necessità* di impedire che l'indeterminismo microscopico coinvolga il macrocosmo.

Le cose stanno così: la possibilità *pratica* di mettere in evidenza che, di fatto, la situazione fisica è appropriatamente descritta da un'imbarazzante sovrapposizione macroscopica (gatto vivo e morto), richiede che si debbano effettuare misure di correlazione che interessino i costituenti. Se si pensa a quanto risulti problematico eseguire misure di correlazione per due soli microcostituenti di un sistema composto, fare ciò nel caso in cui i sistemi coinvolti siano macroscopici è alquanto proibitivo. Da ciò segue che non c'è modo di distinguere, in questo caso, se ho a che fare con uno stato puro (gatto vivo "e" morto), o con una miscela statistica (gatto vivo "o" morto). Pertanto, il problema che ci siamo posti è squisitamente concettuale, ed ha scarsa rilevanza pratica. Come ha ammesso Bell, si deve riconoscere che la meccanica quantistica, per quanto ne sappiamo, risulta perfettamente appropriata "per tutti gli scopi pratici". Ma la teoria prevede che anche i sistemi macroscopici debbano essere descritti da stati puri, e non da miscele statistiche, e ciò comporta che ad un certo livello si debba fare un salto concettuale di sostituire uno con l'altra. Il fatto che la teoria non precisi dove debba porsi questa linea di demarcazione tra il nebuloso mondo quantistico ed il mondo degli eventi precisi è "*Il problema della meccanica quantistica. Esso non rappresenta un problema dal punto di vista pratico - possiamo avvalerci del nostro intuito per collocare la linea di demarcazione giudiziosamente, in modo che non risulti molto importante spostarla leggermente. Ma ogni volta che noi poniamo questa linea di confine - e noi dobbiamo definirla - allora dividiamo arbitrariamente il mondo in due parti che richiedono due descrizioni del tutto differenti*" (Bell, 1989).

Dunque, l'analisi appena sviluppata mostra che l'ipotesi di sostituire un insieme formalmente omogeneo con uno fisicamente disomogeneo risulta appropriata per tutti i fini pratici e quindi rappresenta un'accettabile via d'uscita dalle difficoltà del formalismo, per chi assume un atteggiamento strumentalista nei confronti della conoscenza scientifica.

Ritengo che la fisica non debba limitarsi a ciò che sia utile "per tutti gli scopi pratici", ma debba andare più in profondità. Una teoria quantistica che si possa considerare soddisfacente dovrebbe permettermi con chiarezza di capire quando va bene l'utilizzo della teoria classica, e quan-

do invece risulta necessario passare ad una descrizione quantistica. Ciò ancora non è molto chiaro.

5.4 Il problema ontologico

Come abbiamo anticipato, una questione legata al problema della misura riguarda il ruolo da attribuire allo *stato quantico*.

A tal proposito, Schrodinger suggerisce una visione in cui la realtà fisica sia descritta fedelmente dalla funzione d'onda diffusa. Parla di "qualcosa che riempie continuamente l'intero spazio".

Per una singola particella, la cui funzione d'onda $\psi(\vec{x}, t)$ vive nello spazio ordinario, fisico, tridimensionale, si può intendere questa idea come se dicesse che la "particella" è in realtà una nuvola la cui densità è data dal quadrato della funzione d'onda. Per esempio, si potrebbe caratterizzare l'elettrone in termini della densità di massa

$$\rho_m(\vec{x}, t) = m|\psi(\vec{x}, t)|^2 \quad (5.21)$$

o della densità di carica elettrica

$$\rho_e(\vec{x}, t) = e|\psi(\vec{x}, t)|^2 \quad (5.22)$$

dove m e e sono rispettivamente la massa e la carica dell'elettrone.

Il problema, ovviamente, è che questa interpretazione non ha alcun senso appena si ha un sistema quantistico con più di una particella in esso. Infatti, in tal caso la funzione d'onda è definita nello *spazio delle configurazioni*, e quindi la "densità di carica":

$$\rho \sim |\psi|^2 \quad (5.23)$$

sarebbe anche la densità di carica in questo spazio astratto ad alta dimensionalità che, per usare le parole di Einstein, semplicemente "*does not smell like something real*"⁷.

Matematicamente, in breve, la funzione d'onda sembra apparire e agire

⁷In una lettera di Einstein a Paul Ehrenfest (18 giugno 1926): "*Schrödinger's works are wonderful – but even so one nevertheless hardly comes closer to a real understanding. The field in a many-dimensional coordinate space does not smell like something real*".

come un campo. Ma, a differenza dei campi elettrici e magnetici familiari e non problematici, $E(\vec{x}, t)$ e $B(\vec{x}, t)$, non possiamo chiedere il valore della funzione d'onda in un punto dello spazio tridimensionale ed in un momento particolare (stiamo facendo in discorso non relativistico): non è $\psi(\vec{x}, t)$, ma piuttosto $\psi(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_N, t)$. Quindi, se la funzione d'onda descrive un campo, non sembrerebbe essere un campo fisico nel senso in cui siamo abituati a pensare a \vec{E} e \vec{B} dell'elettromagnetismo. Questa preoccupazione è sorta immediatamente, quando Schrodinger scrisse la sua equazione dinamica per la funzione d'onda. Nel 1926 Schrodinger inviò copie del suo lavoro a diversi colleghi, chiedendo pareri a riguardo. Hendrik Lorentz, in risposta, ha elogiato il lavoro di Schrodinger per la sua comprensibilità fisica/intuitiva (rispetto alla matematica pura, e fisicamente "oscura", della meccanica matriciale sviluppata da Heisenberg e altri), ma sollevò una serie di problematiche sulla meccanica delle onde di Schrodinger, e la prima di queste aveva a che fare con il fatto che l'onda fosse definita in uno spazio delle configurazioni astratto⁸.

Un modo in cui Schrodinger tentò di risolvere il problema fu il seguente: dato un sistema di N particelle, definiamo la densità di massa dell' i -esima particella nel seguente modo:

$$\rho_i(x, t) = m_i \int |\psi(x_1, x_2, \dots, x_N, t)|^2 \delta(x_i - x) dx_1 dx_2 \dots dx_N \quad (5.24)$$

e la densità di massa totale:

$$\rho(x, t) = \sum_i \rho_i(x, t) \quad (5.25)$$

sperando così che questo campo $\rho(x, t)$ ricostruisca l'immagine che abbiamo del mondo macroscopico con cui abbiamo esperienza tutti i giorni. Ma in seguito Schrodinger abbandonò quest'idea per un semplice motivo: nell'esempio del gatto di Schrodinger, in cui abbiamo una sovrapposizione "gatto vivo" e "gatto morto", il campo ρ erediterebbe gli stessi problemi, non consentendoci di avere una descrizione coerente del mondo macroscopico.

Questo esempio serve ad illustrare la problematicità nel dare un senso

⁸K. Przibram, *Letters on Wave Mechanics*, Martin Klein, trans (Philosophical Library, NY, 1967)

fisico alla funzione d'onda. Vedremo, nei cap.6 e 7, come il problema viene affrontato da alcune teorie alternative alla meccanica quantistica standard.

Così, se la funzione d'onda fornisce una descrizione fisicamente reale, questa deve essere in qualche modo indiretta, astratta.

Una possibilità apparente (ipotizzata da Schrodinger) sarebbe che la funzione d'onda descriva la nostra incompleta *conoscenza* dello stato di un insieme di particelle (letterali, puntiformi). Da questo punto di vista, la funzione d'onda non è una cosa fisica (come un campo), ma ha una valenza epistemica, non ontologica. Ma questa interpretazione è molto difficile da conciliare, ad esempio, con il fenomeno di interferenza a due fenditure, in cui si osserva il comportamento diffrattivo tipico delle onde.

Questo problema sembrerebbe essere particolarmente preoccupante per il punto di vista ortodosso, secondo il quale la funzione d'onda fornisce una *descrizione completa* dello stato fisico del sistema considerato. La presa di posizione *ontologica* dell'ortodossia di Copenaghen nei riguardi della funzione d'onda sembra essere molto misteriosa.

Possiamo quindi riassumere il cosiddetto *problema ontologico* come segue: nella meccanica quantistica, in particolare nel formalismo utilizzato, non c'è niente al di fuori della funzione d'onda ψ con cui descrivere lo stato fisico di un sistema microscopico, ma non è chiaro come la funzione d'onda ψ possa essere intesa come la descrizione di strutture materiali nello spazio fisico tridimensionale. Vedremo vari tentativi di risolvere il problema nel cap.7, analizzando alcune alternative all'interpretazione standard, in cui il formalismo rimane fondamentalmente lo stesso.

Va considerato, infatti, che il problema si presenta tutte le volte che si considera un'interpretazione in cui lo stato ψ fornisce una descrizione completa del sistema, non riguarda unicamente l'ortodossia.

Adesso vediamo come quest'aspetto sia strettamente collegato al problema della misura. Riprendiamo la situazione descritta nella sez.5.1, in cui il nostro obiettivo principale era sottolinearne le difficoltà nel comprendere le sovrapposizioni macroscopiche descritte dall'Eq.5.14.

Ma adesso torniamo indietro e ci chiediamo: uno stato del tipo:

$$\Psi(x, y, T) = \psi_n(x)\phi(y - \lambda E_n T) \quad (5.26)$$

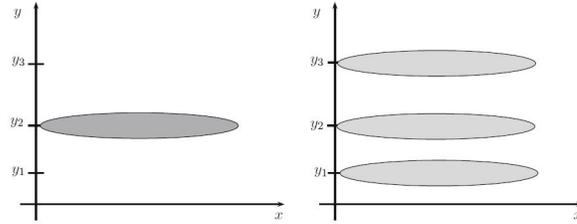


Figura 5.4: La figura mostra l'intensità di $\Psi(x, y, T)$ nei due casi descritti dalle Eq.5.11 e 5.14

è davvero non problematico? In precedenza, abbiamo semplicemente dato per scontato di aver compreso pienamente questo stato prodotto. Ma occorre considerare che le nostre descrizioni dei significati fisici dei singoli fattori erano un po' astratte. Ad esempio, dire che la particella in una scatola ha una certa energia è in realtà solo per dire che un appropriato misuratore di energia risponderà in un certo modo interagendo con la particella. Una descrizione *diretta e letterale* della particella direbbe semplicemente: la sua funzione d'onda ha una certa struttura spaziale, vale a dire, quella di $\psi_n(x)$. Il punto importante è che, se prendiamo la descrizione della meccanica quantistica *alla lettera*, allora lo stato del sistema particella-puntatore è descritto semplicemente dalla sua funzione d'onda Ψ . E questo, sempre preso alla lettera, significa che ci sono alcune regioni dell'astratto (qui, bidimensionale) spazio delle configurazioni dove ho "alta intensità". La situazione è descritta in Fig.5.4. Ciò che ci preme sottolineare è che anche nel caso a sinistra in figura, dove non ho una sovrapposizione, la situazione è relativamente non problematica, poichè abbiamo una descrizione che non sembra quella di una particella in una scatola e un puntatore.

L'ovvia soluzione sarebbe quella di considerare che questa rappresentazione è astratta o indiretta, facendo un parallelismo con la meccanica newtoniana e la meccanica statistica, in cui utilizzo lo spazio delle configurazioni per descrivere un insieme di particelle. Nella fisica classica, non ho alcun problema nell'usare questa descrizione. Allora, potrei pensare di fare lo stesso nella situazione quantistica, dov'è il problema? Il problema è che, a differenza del caso classico, dove siamo partiti da una chiara

ontologia delle particelle (che si muovono e interagiscono in uno spazio tridimensionale) e poi costruisco lo spazio delle configurazioni, nel caso della meccanica quantistica abbiamo *solo* la rappresentazione astratta, non sappiamo che tipo di realtà, che tipo di oggetti o cose fisicamente reali, nello spazio tridimensionale, le funzioni d'onda rappresentino in maniera astratta. Come sottolineato da David Bohm, l'aspetto sicuramente più rivoluzionario della meccanica quantistica è che essa è una *teoria essenzialmente statistica*⁹: essa non è partita da una trattazione delle leggi di singoli microoggetti, applicando da lì considerazioni statistiche a quelle leggi, come si fa in meccanica classica. Invece, fin dall'inizio, ha preso la forma di un insieme di leggi che in generale forniscono solo previsioni statistiche, senza nemmeno sollevare la questione di quali potrebbero essere le leggi dei singoli sistemi che entrano nella trattazione statistica della teoria.

È quindi chiaro sottolineare che la meccanica quantistica presenti un *problema di ontologia*. Chiunque dica che la meccanica quantistica *funziona*, dovrebbe essere in grado di spiegarci, in dettagli concreti e banali, come funziona la corrispondenza tra questa teoria e la realtà fisica. Dovrebbe dirci di che genere di *cose* (particelle o campi) si occupa la meccanica quantistica, e chiarire con precisi dettagli matematici le relazioni tra queste *cose*. Fino a quando, o a meno che, ciò non venga fatto, penso che dobbiamo ammettere che la connessione con la realtà tridimensionale dell'esperienza diretta rimane sconcertante. Inutile dire che i tentativi fatti fino ad ora (vedi sez.3.4), non forniscono una risposta chiara a queste domande.

5.5 Il problema dell'oggettivazione

Esistono alcune teorie alternative, come la teoria del collasso spontaneo, che vedremo nel cap.7, o la teoria della decoerenza, di cui non avremo tempo di discutere, che permettono di spiegare gran parte dei problemi legati alla differenza tra il mondo microscopico delle entità quantistiche ed il nostro mondo macroscopico dell'esperienza diretta, in un modo anche abbastanza convincente, aprendo verso la possibilità che un giorno

⁹D. Bohm, *Causality and Chance in Modern Physics* (Harper, New York, 1957)

saremo in grado di comprendere il mondo fisico utilizzando un unico quadro teorico - la meccanica quantistica - piuttosto che due diverse teorie per i due mondi. Esse forniscono collegamenti importanti tra il mondo quantistico e quello classico. Ci sono alcune cose, tuttavia, che non sono spiegate. Potremmo essere in grado di eliminare gli effetti di interferenza macroscopica, ma ci resta ancora da capire il meccanismo che chiarisca perchè una misurazione dovrebbe dare *quel* risultato specifico. Nell'esempio della doppia fenditura, non c'è nulla nella teoria che ci dica perchè l'elettrone dovrebbe essere trovato "qui" anziché "là". La teoria GRW, lo vedremo, ci permette di capire perchè da una misura venga fuori un risultato ben preciso, ma sembra lasciarci con una descrizione in cui tutti i risultati definiti sono possibili. L'interpretazione di Copenaghen ci dice che questa scelta è *indeterminata* prima della misura (tutti i risultati sono oggettivamente validi) e *determinata* dopo la misura.

Dunque, questi tentativi non risolvono del tutto il problema della misura. Uno dei primi ad affrontare il problema fu il fisico Paul Dirac:

According to quantum mechanics the state of the world at any time is describable by a wave function ψ , which normally varies according to a causal law, so that its initial value determines its value at any later time. It may however happen that at a certain time t_1 , ψ can be expanded in the form

$$\psi = \sum_n c_n \psi_n \quad (5.27)$$

where the ψ_n 's are wave functions of such a nature that they cannot interfere with one another at any time subsequent to t_1 . If such is the case, then the world at times later than t_1 will be described not by ψ but by one of the ψ_n 's. The particular ψ_n that it shall be must be regarded as chosen by nature¹⁰.

Si noti che Dirac considera ψ come una descrizione dello stato "del mondo" - presumibilmente il mondo intero. Quindi, secondo Dirac, in circostanze in cui ψ può essere espresso in termini di stati non interferenti ψ_n , il mondo viene successivamente descritto da uno dei ψ_n (una scelta fatta dalla natura, con probabilità $|c_n|^2$). Inoltre, sempre secondo Dirac, ci sono delle circostanze in cui l'interferenza sia irreversibilmente distrutta. In questi casi, la scelta del particolare ψ_n è "*an irrevocable choice of natu-*

¹⁰P.A.M. Dirac, The physical interpretation of quantum dynamics, Proceedings of the Royal Society A, 113,621-41 (1927)

re, which must affect the whole of the future course of events". Dunque Dirac ritiene che la natura faccia la scelta di un ramo, e l'interferenza con gli altri ramo sia impossibile in futuro. Pertanto, l'interferenza tra le varie alternative, una volta effettuata la scelta, non risulta più possibile.

Questa risposta data da Dirac risulta abbastanza ambigua: non specifica come accade questa decoerenza tra i vari termini ψ_n , ma soprattutto i risultati di una misura sembrano essere frutto di un'arbitraria "scelta della natura" (qualunque cosa possa significare).

Se è anche vero che la decoerenza può essere giustificata ricorrendo all'interazione con l'ambiente esterno o a modelli dinamici di collasso (es. teoria GRW, vedi sez.7.4), queste soluzioni non spiegano questa "scelta della natura".

Nelle parole di John Bell: "*The idea that elimination of coherence, in one way or another, implies the replacement of 'and' by 'or', is a very common one among solvers of the 'measurement problem'. It has always puzzled me*¹¹". Il matematico e fisico Roger Penrose fa osservazioni simili: "*[Decoherence] does not help us to determine that the cat is actually either alive or dead. . . . we need more[...]. What we do not have is a thing which I call OR standing for Objective Reduction. It is an objective thing — either one thing or the other happens objectively. It is a missing theory. OR is a nice acronym because it also stands for 'or', and that is indeed what happens, one OR the other*¹²".

Il teorico Roland Omnès ha chiamato questo *il problema dell'oggettivazione*. Nel suo libro *Understanding Quantum mechanics*¹³, Omnès nega che il problema esista davvero, sostenendo che la proprietà di unicità di un risultato alla fine di una misurazione è una questione di relazione tra la teoria e la realtà fisica (assunta da Omnès come una realtà) e quindi è una questione di interpretazione. L'oggettivazione o unicità della realtà deve sempre essere aggiunta ad una teoria come presupposto per entrare in contatto con la realtà. Secondo quest'assunto, il fatto che la teoria classica sia deterministica non implica che la realtà sia unica, poichè il determinismo è un'assunzione necessaria fatta dal teorico, non una caratteristica

¹¹J.S.Bell, *Physics world*, 3, 33 (1990)

¹²R.Penrose, *The Large, the Small and the Human Mind* (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000)

¹³R. Omnès, *Understanding Quantum Mechanics* (Princeton University Press, Princeton, 1999)

della teoria, né tantomeno della realtà. In questo senso, l'unica differenza tra la teoria quantistica e la teoria classica, è che la base probabilistica della prima crea un divario tra teoria e realtà molto più evidente, ma il divario esiste in tutte le descrizioni teoriche. In poche parole, anche supponendo di avere una teoria quantistica deterministica, essa non implica che la realtà sia deterministica.

Anche supponendo che la visione di Omnés possa essere corretta, stiamo semplicemente spostando il problema. Infatti, la questione non riguarda solo la comprensione della misurazione quantistica, ma anche il senso da dare alle *probabilità* quantistiche.

Supponiamo di avere una situazione classica come il famoso esempio del lancio di una moneta. In questo caso, sappiamo che affermare che la probabilità che il risultato di una misura dia testa/croce sia pari ad $1/2$ è dovuto alla nostra ignoranza sulle esatte dinamiche in una misurazione individuale. Al contrario, le probabilità quantistiche, date dal nostro stato quantico, non hanno questo significato nell'interpretazione di Copenaghen, poichè in quel caso lo stato fornisce una descrizione *completa* del sistema fisico, e non una conoscenza incompleta dello stesso. Dunque, il problema sussiste *prima* dell'interazione con la realtà, cioè prima della misura. In questo modo, non stupisce il fatto che la soluzione di Omnés non sia soddisfacente. Semplicemente, se prima la domanda era: perchè ho quel preciso risultato dopo la misura? Alla quale Omnés risponde dicendo che si assume ciò per entrare in contatto con la realtà, adesso mi domando: qual'è il significato di probabilità in meccanica quantistica? E ciò viene prima dell'interazione con la realtà, dunque non posso dare la stessa risposta di prima.

Dalle considerazioni fatte è chiaro come il problema dell'oggettivazione sia irrisolto all'interno dell'interpretazione standard, anche considerando la decoerenza o alternative come i modelli dinamici di collasso (es. teoria GRW, vedi sez.7.4) .

In conclusione, il problema della misura mostra che le funzioni d'onda (obbedendo all'equazione di Schrodinger) sembrano incapaci di catturare i risultati definiti che osserviamo nelle misurazioni. Non è chiaro come si possa considerare la funzione d'onda una descrizione completa, diretta e fedele di una realtà fisica tridimensionale, poichè le funzioni d'onda sono

(in generale) funzioni su uno spazio di configurazione astratto e multidimensionale ($\dim \geq 3$). Dunque, dalle discussioni viste fin qui emerge che, in qualunque modo si intenda la filosofia di Copenaghen, essa non è in grado di fornire un quadro uniforme coerente, realistico del mondo. Nonostante ci sia accordo con tutte le sperimentazioni effettuate fino ad ora, la filosofia di Copenaghen è semplicemente sbagliata.

Come accennato più volte, nei due capitoli successivi torneremo su alcune idee viste fin qui, quando analizzeremo diverse possibili alternative all'interpretazione ortodossa, alcune delle quali, come la teoria di de Broglie-Bohm, in netto contrasto con la visione standard della meccanica quantistica.

Capitolo 6

Teorie a variabili nascoste

Queste teorie sono caratterizzate dalla presenza esplicita di elementi non presenti nella formulazione ortodossa. Vengono aggiunte ulteriori variabili al vettore di stato quantistico per ottenere una descrizione più precisa di un singolo sistema. Queste variabili sono spesso chiamate "nascoste", anche se questa parola è alquanto paradossale, poiché spesso sono più visibili del complesso vettore di stato. Appaiono direttamente nei risultati delle misure in modo che, invece di essere nascoste, le variabili aggiuntive siano effettivamente visibili; Bell propose di usare il termine "beables". Le teorie con variabili aggiuntive sono spesso costruite matematicamente per riprodurre esattamente le previsioni della meccanica quantistica ortodossa. Se danno le stesse probabilità per tutte le misurazioni possibili, è chiaro che non c'è speranza di confutare sperimentalmente la meccanica quantistica ortodossa a favore di queste teorie, o il contrario. Ma, introducendo nuove variabili, è possibile dare una spiegazione degli esperimenti più chiara, invece di utilizzare l'ortodossia di Copenaghen "oscura" e, come abbiamo ribadito più volte, l'interpretazione è una parte importante di una teoria scientifica. Queste teorie potrebbero anche ripristinare una visione realista della natura, e risolvere le difficoltà legate alla presenza di due tipi di evoluzione del vettore di stato (cap.5). La teoria a variabili nascoste certamente più nota ed interessante è quella di de Broglie-Bohm, di cui parleremo in questo capitolo.

Chiariamo due aspetti importanti di queste teorie:

1- Tali teorie prevedono di assegnare a qualsiasi osservabile un valore preciso, determinato dalle variabili nascoste. È dunque ovvio che, in particolare, la "posizione del puntatore sull'apparato" osservabile avrà sempre un valore ben definito per ogni singolo sistema, e questo dipenderà dal valore delle variabili nascoste che lo caratterizzano.

2- Tuttavia non possiamo nascondere il fatto, dati i diversi No hidden variables theorems, che ogni teoria che costituisca un completamento della meccanica quantistica in senso deterministico, non può evitare di attribuire alla maggior parte delle variabili una validità contestuale. Ciò significa che, nel caso di una variabile contestuale, il valore che la teoria ci permette di attribuire a tale variabile non è determinato in maniera univoca dalle variabili stesse, ma dipende dall'intero contesto. Questo comporta che lo status concettuale di una proprietà contestuale è certamente meno "oggettivo" di una proprietà non contestuale. Quindi, sorge il problema di identificare le variabili non contestuali della teoria.

Specifichiamo inoltre che faremo una trattazione non-relativistica della teoria. In questo lavoro, il nostro compito è quello di mettere in luce i problemi interpretativi dell'ortodossia dalle sue fondamenta, dunque dalla famosa equazione di Schrodinger. Ci sono ad oggi, numerosi tentativi di estendere questa teoria ad un contesto relativistico, dove anche lì sono presenti ancor più complesse difficoltà interpretative. A mio avviso, queste problematiche non possono essere affrontate se non alle sue "fondamenta", e cioè ai primordi della fisica quantistica nella sua formulazione non relativistica. Inoltre, preferiamo fare ciò anche per ragioni storiche, in quanto queste alternative sono nate in risposta alla formulazione ortodossa della meccanica quantistica quando essa venne formulata all'interno di un quadro non relativistico.

6.1 Teoria di de Broglie-Bohm

La teoria fu proposta per la prima volta, ma poi prematuramente abbandonata, da de Broglie intorno alla metà degli anni '20. In seguito, venne sviluppata in modo indipendente da David Bohm nel 1952, ed è talvolta chiamata *meccanica bohmiana*.

Secondo la teoria dell'onda-pilota di de Broglie-Bohm, la maggior parte degli enigmi e dei paradossi della meccanica quantistica ortodossa derivano dall'utilizzo di descrizioni *incomplete* dello stato di un sistema. Non accade, ad esempio, che gli elettroni siano simili a onde quando non vengono osservati, ma poi magicamente "collassano" in posizioni ben precise in seguito a misurazione. Invece, secondo la teoria dell'onda pilota, l'elettrone è sempre una particella con una posizione ben precisa, che segue traiettorie definite nello spazio; i fenomeni statistici ondulatori (come la formazione di un pattern di interferenza nell'esperimento a due fenditure) sorgono perché il moto della particella è influenzato da un'onda ad essa associata. Quello che, nell'interpretazione ortodossa, è un singolo elettrone, secondo questa teoria, non è una sola cosa, ma due: un'onda ed una *particella* puntiforme, il cui movimento è controllato dall'onda.

6.1.1 Formalismo per una particella

Per formulare la teoria in modo rigoroso, abbiamo bisogno di conoscere le leggi dinamiche alle quali obbediscono l'onda e la particella. Per l'onda ciò è semplice, poiché essa non è altro che la funzione d'onda della meccanica quantistica standard ψ , che obbedisce all'equazione:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi \quad (6.1)$$

Ma per quanto riguarda il moto della particella? Qui riprendiamo la relazione di de Broglie:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k \quad (6.2)$$

che lega l'impulso p della particella con la lunghezza d'onda λ (o il numero d'onda k) dell'onda associata.

Ciò suggerisce che quando la funzione d'onda è un'onda piana

$$\psi \sim e^{ikx} \quad (6.3)$$

con un ben definito numero d'onda k , la particella dovrebbe muoversi con una velocità:

$$v = \frac{p}{m} = \frac{\hbar}{m}k \quad (6.4)$$

Ma quale sarebbe la velocità di una particella nel caso generale, quando la funzione d'onda non è del tipo onda piana, e pertanto non ha un numero d'onda k singolo ben definito?

Quanto segue sembra il modo più semplice per generalizzare l'ultima equazione. Scriviamo la funzione d'onda in forma polare:

$$\psi(x, t) = R(x, t)e^{iS(x, t)} \quad (6.5)$$

e

$$v = \frac{\hbar}{m} \frac{\partial S}{\partial x} \quad (6.6)$$

Osserviamo subito una cosa: per una funzione d'onda generica $\psi(x, t)$, il gradiente della fase della funzione d'onda $\frac{\partial S}{\partial x}$ sarà, in generale, una funzione di x e di t . Così dove, esattamente, dovremmo valutare la funzione per dare una velocità alla particella? La risposta ovvia è: valutarla nella posizione $X(t)$ della particella. Considereremo quindi quanto segue come l'equazione più semplice possibile per descrivere il moto della particella sotto l'influenza dall'onda:

$$\frac{dX(t)}{dt} = \frac{\hbar}{m} \frac{\partial S(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=X(t)} \quad (6.7)$$

che può essere scritta:

$$\frac{dX(t)}{dt} = \frac{\hbar}{m} \text{Im} \left[\frac{\frac{\partial \psi}{\partial x}}{\psi} \right] \Big|_{x=X(t)} \quad (6.8)$$

dove $X(t)$ viene chiamata *posizione bohmiana* della particella e la sua derivata temporale *velocità bohmiana*.

Questo è tutto ciò che dice la teoria: un singolo elettrone (ad esempio) è

un'onda e una particella, dove l'onda obbedisce all'equazione di Schrodinger e la particella si muove, sotto l'influenza dell'onda, in accordo con la (6.8), la quale prende il nome di *equazione guida*: essa guida il moto della particella. Date le condizioni iniziali (ψ_0, X_0) , l'equazione guida determina la posizione della particella a tempi successivi. Matematicamente, prima si ottiene la soluzione dell'equazione di Schrodinger, mostrando che ha una sola soluzione ad ogni istante di tempo, e si inserisce questa soluzione nella Eq.6.8, e si ottiene la soluzione $X(t)$ per ogni istante di tempo. Dal momento in cui le particelle hanno traiettorie ben definite, esse hanno anche velocità ad ogni istante di tempo; e così, contrariamente a quanto può suggerire la meccanica quantistica standard, le particelle hanno *sia posizione che velocità definite ad ogni istante*.

Adesso vediamo un altro aspetto della teoria, che ha a che fare con il modo in cui la natura probabilistica, che emerge nell'interpretazione standard, viene compresa all'interno della teoria di de Broglie-Bohm.

Cominciamo ricordando un fatto importante sull'equazione di Schrodinger, semplificando la trattazioni in una sola dimensione:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x, t)\psi \quad (6.9)$$

Dal complesso coniugato, facilmente otteniamo:

$$\frac{\partial}{\partial t} |\psi|^2 = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{i\hbar}{2m} \left(\psi \frac{\partial}{\partial x} \psi^* - \psi^* \frac{\partial}{\partial x} \psi \right) \right] \quad (6.10)$$

Questa ha la forma della cosiddetta "equazione di continuità":

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial j}{\partial x} \quad (6.11)$$

Essa è soddisfatta, ad esempio, in elettrodinamica per quanto riguarda la densità di carica elettrica ρ e la densità di corrente elettrica \vec{j} , dove assume il significato di conservazione locale della carica.

In questo modo, la (6.10) può essere compresa come la conservazione locale della *probabilità*, perché riconosciamo $|\psi|^2$ come l'espressione standard della densità di probabilità (di trovare la particella, in una misura)

in meccanica quantistica.
Identifichiamo dunque:

$$j = \frac{i\hbar}{2m} \left(\psi \frac{\partial}{\partial x} \psi^* - \psi^* \frac{\partial}{\partial x} \psi \right) \quad (6.12)$$

come la corrente di probabilità quantistica.

Ricordiamo che, in elettrodinamica, la densità di corrente elettrica è la densità di carica moltiplicata per la velocità della particella: $\vec{j} = \rho \vec{v}$. Possiamo scrivere così la velocità: $\vec{v} = \vec{j} / \rho$.

Nella meccanica quantistica ortodossa, abbiamo una densità di probabilità $\rho = |\psi|^2$ e una densità di corrente \vec{j} , e non ci sono *letteralmente* particelle (cioè puntiformi). Sarebbe molto naturale e ovvio - basato su un'analogia in elettrodinamica - intuire che la velocità della particella possa essere data da (sempre restando in una dimensione):

$$v = \frac{j}{\rho} = \frac{i\hbar}{2m} \frac{\psi \frac{\partial}{\partial x} \psi^* - \psi^* \frac{\partial}{\partial x} \psi}{\psi^* \psi} = \frac{\hbar}{m} \operatorname{Im} \left[\frac{\left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)}{\psi} \right] \quad (6.13)$$

che è la stessa della (6.8).

Questo permette di capire qualcosa sull'aspetto probabilistico della teoria. **In generale, secondo la teoria dell'onda pilota, ogni particella è sempre definita da qualche parte. Ma di solito non conosciamo esattamente la posizione!** Infatti, se prepariamo sperimentalmente un elettrone per avere una funzione d'onda $\psi(x, 0)$, non possiamo scegliere o controllare l'esatta posizione iniziale della particella $X(0)$ - che sarà pertanto *casuale*, e dunque ci si aspetta che questa imprecisione sulle condizioni iniziali possa essere quantificata da una distribuzione di probabilità $P(x, 0)$. **La distribuzione non è dovuta ad una preparazione non abbastanza precisa, ma postulata come fondamentale. Per una data realizzazione di un esperimento, non c'è modo di selezionare quale valore della posizione sia effettivamente realizzato all'interno della distribuzione; da una realizzazione all'altra, una nuova scelta di posizione viene fatta dalla natura, in maniera completamente casuale. Questa ipotesi conserva il carattere fondamentalemente casuale delle previsioni della meccanica quantistica. Ma c'è una profonda differenza: in questa nuova teoria, stiamo affermando**

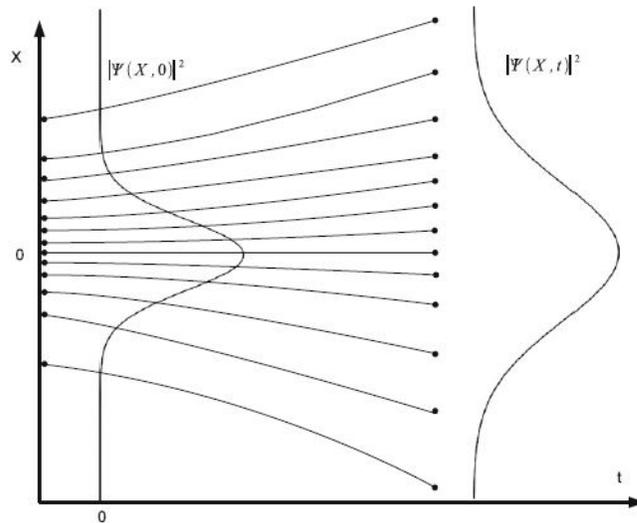


Figura 6.1: Illustrazione della proprietà di equivarianza della distribuzione $|\psi(x,t)|^2$ nei casi di una ψ gaussiana. Ogni punto rappresenta la posizione di una particella, al tempo $t = 0$ e al generico t . La densità delle particelle è circa $|\psi(x,0)|^2$ a sinistra e $|\psi(x,t)|^2$ a destra.

che la natura "sceglie" quale posizione iniziale ha la particella, ma noi non ne siamo a conoscenza. L'errore dell'interpretazione ortodossa sta nel partire dalla stessa incertezza, concludendo che la particella "non abbia", prima della misura, una posizione iniziale definita. Inoltre, poiché con la teoria di de Broglie-Bohm ci siamo impegnati in una formula specifica per la velocità che avrebbero le particelle in varie posizioni x e t , è chiaro che la distribuzione di probabilità iniziale $P(x,0)$ cambierà nel tempo. È facile ottenere:

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}[v(x,t)P(x,t)] \quad (6.14)$$

Ma allora si può vedere che $P(x,t) = |\psi(x,t)|^2$ è una distribuzione di probabilità di equilibrio (si parla di *equilibrio quantistico*) per la teoria dell'onda pilota.

Inoltre, se

$$P(x,0) = |\psi(x,0)|^2 \quad (6.15)$$

all'istante iniziale ($t=0$), allora sarà

$$P(x,t) = |\psi(x,t)|^2 \quad (6.16)$$

ad ogni istante t . Questa proprietà prende il nome di "equivarianza" della distribuzione $|\psi(x,t)|^2$. La situazione descritta è illustrata in Fig.6.1. Assumere che all'istante iniziale la distribuzione delle posizioni delle particelle sia descritta da $|\psi(x,0)|^2$ prende il nome di *ipotesi di equilibrio quantistico*.

Ciò fornisce uno stretto contatto con tutte le previsioni della meccanica quantistica, poichè tutte le previsioni riguardanti le probabilità di misure di posizione sono identiche.

La variabile aggiunta $X(t)$ dipende dalla funzione d'onda in due modi: sia dal suo valore iniziale, sia dalla sua evoluzione. In particolare, a causa del termine quantistico nell'equazione del moto, le posizioni di Bohm sono costantemente "trascinate" dalla funzione d'onda e non possono mai allontanarsi da essa.

Si può quindi ripristinare il determinismo e presumere che i risultati delle misurazioni rivelino semplicemente il valore pre-esistente delle posizioni, scelto tra tutti i possibili valori nella distribuzione di probabilità iniziale. Questa ipotesi risolve molte difficoltà, ad esempio quelle relative alla comprensione del motivo per cui i sistemi quantistici possono manifestare sia proprietà ondulatorie che corpuscolari negli esperimenti di interferenza. Il sistema contiene sempre due *entità* indissociabili, un'onda ed una particella; l'onda può produrre effetti di interferenza e guidare la particella in un modo che costringa la sua traiettoria a riprodurre lo schema d'interferenza, dunque niente di particolarmente "misterioso" concettualmente. Il famoso "dualismo onda-corpuscolo", come inteso da de Broglie, è *davvero* un dualismo, nel senso letterale del termine. Anche quest'aspetto viene spesso omesso quando si spiega la meccanica quantistica, facendo intendere che de Broglie avesse in mente quella forma di dualismo "enigmatica" tipica dell'ortodossia di Copenaghen.

Alcune critiche sorgono dal fatto che l'aggiunta di una seconda equazione abbia complicato il formalismo. Ma ciò non è affatto vero, poichè l'equazione del moto (6.8) è la più semplice da associare alla funzione d'onda. Se vogliamo descrivere il moto delle particelle, allora è naturale che il loro moto sia determinato da tali leggi. Come ha notato il filosofo e logico Hilary Putnam, rispondendo alle accuse che "la teoria di Bohm è matematicamente inelegante": "*The formula for the velocity field is extremely simple: you have the probability current in the theory anyway, and you take the velocity vector to be proportional to the current. There is nothing particularly inelegant about that; if anything, it is remarkably elegant!*¹". Inoltre, tutti i fenomeni quantistici, inclusi gli strani effetti di interferenza, gli esperimenti che coinvolgono lo spin della particella, ecc., possono essere derivati da quest'equazione del moto per la particella, insieme all'ipotesi di equilibrio quantistico alle condizioni iniziali. Cosa potrebbe essere più semplice?

Inoltre, dal mio punto di vista, credo che questo sia un prezzo più che accettabile da pagare, se ciò comporta una semplificazione concettuale di tale portata. C'è una grande differenza tra essere complicati ed essere misteriosi o incomprensibili. La meccanica quantistica ordinaria può sembrare semplice, ma ciò è vero solo finché non ci si chiede da dove viene la regola del collasso della funzione d'onda, o cosa la funzione d'onda significhi veramente. È solo trascurando la regola del collasso (che è indispensabile affinché le previsioni della teoria concordino con le osservazioni) che si può fingere che la meccanica quantistica ordinaria abbia una sola equazione (quella di Schrodinger) mentre la teoria di de Broglie-Bohm ne presenta due, e pertanto concludere che la seconda sia più complicata.

Nelle prossime sezioni, illustreremo qualche esempio che ci aiuti a comprendere meglio questa teoria.

6.1.2 Estensione a più particelle e non località

L'estensione della teoria di de Broglie-Bohm al caso di molte particelle è formalmente semplice, manifestando inoltre il carattere non locale della

¹H. Putnam, A philosopher looks at quantum mechanics, Br. J. Philos. Sci. 56, 615-634(2005)

teoria.

Consideriamo l'esempio di due particelle:

$$v_1(t) = \frac{dX_1(t)}{dt} = \frac{\hbar}{m_1} \operatorname{Im} \left[\frac{\left(\frac{\partial \Psi(x_1, X_2(t), t)}{\partial x_1} \right)}{\Psi(x_1, X_2(t), t)} \right]_{x_1=X_1(t)} \quad (6.17)$$

Il punto è che a destra abbiamo una dipendenza da $X_2(t)$, la posizione dell'altra particella, sebbene questa potrebbe essere molto distante, ed il suo moto condiziona *istantaneamente* il moto della particella 1, ed ovviamente viceversa. Questa dipendenza è immediata (con niente come il ritardo della velocità della luce) e indipendente dalla distanza tra le particelle.

La funzione d'onda:

$$\psi(x_1, X_2(t), t) = \psi_1(x, t) \quad (6.18)$$

prende il nome di funzione d'onda *condizionale* della particella 1. Essa rappresenta l'onda pilota che guida la particella 1 e, come possiamo notare, è definita nello spazio fisico tridimensionale. Lo stesso vale per la particella 2. In questo modo, la teoria di de Broglie-Bohm risolve il problema ontologico. Ciò è di enorme importanza, come sottolineato da John Bell: "*that the guiding wave, in general case, propagates not in ordinary three-space but in a multidimensional-configuration space is the origin of the notorious 'nonlocality' of quantum mechanics. It is a merit of the de Broglie-Bohm version to bring this out so explicitly that it cannot be ignored*"[6].

Senza entrare troppo in dettaglio, possiamo sviluppare l'equazione di Schrodinger per la funzione d'onda della particella 1, ottenendo:

$$i\hbar \frac{\partial \psi_1}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m_1} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x^2} + V_1^{eff}(x, t) \psi_1 \quad (6.19)$$

con:

$$V_1^{eff}(x, t) = V[x, X_2(t), t] + A_1(x, t) + B_1(x, t) \quad (6.20)$$

dove il primo termine è il *potenziale condizionale*, cioè il potenziale tra la particella 1 e 2, valutato nella posizione della particella 2, e gli altri due termini sono:

$$A_1(x, t) = i\hbar \frac{dX_2}{dt} \frac{\psi'_1(x, t)}{\psi_1(x, t)} \quad (6.21)$$

$$B_1(x, t) = -\frac{\hbar^2}{2m_2} \frac{\psi''_1(x, t)}{\psi_1(x, t)} \quad (6.22)$$

dove abbiamo definito:

$$\psi'_1(x, t) = \left. \frac{\partial \Psi(x, x_2, t)}{\partial x_2} \right|_{x_2=X_2(t)}$$

$$\psi''_1(x, t) = \left. \frac{\partial^2 \Psi(x, x_2, t)}{\partial x_2^2} \right|_{x_2=X_2(t)}$$

Notare che la posizione $X_2(t)$ della particella 2 ha una diretta influenza sull'evoluzione temporale della funzione d'onda condizionale della particella 1, data la presenza di dX_2/dt nel termine A_1 . Naturalmente lo stesso vale per l'influenza della particella 1 sulla funzione d'onda condizionale della particella 2.

Dunque, le funzioni d'onda pilota vivono nello spazio tridimensionale, ed i potenziali effettivi V_i^{eff} implicano interazioni istantanee a distanza. Sottolineamo che la teoria proposta (in cui il movimento di ciascuna particella è guidato da una funzione d'onda condizionale che vive nello spazio fisico ordinario) riproduce le esatte previsioni statistiche della meccanica quantistica ordinaria.

6.1.3 Particella in una scatola

Proviamo a vedere in maniera più chiara come funziona la teoria dell'onda-pilota, considerando il semplice esempio (unidimensionale) di una particella in una scatola (PIB= particle in a box) di lunghezza L . Supponiamo,

per cominciare, che il sistema sia nello stato fondamentale in modo che:

$$\psi(x, t) = \psi_1 e^{-iE_1 t/\hbar} \quad (6.23)$$

dove

$$\psi_1(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin(\pi x/L) \quad (6.24)$$

Così la fase complessa associata a ψ è:

$$S(x, t) = -iE_1 t/\hbar \quad (6.25)$$

che non dipende affatto da x , quindi la velocità della particella, secondo la (6.7), è *nulla*. Cioè la particella sta semplicemente a riposo. Questa, è facile vedere, risulta essere una caratteristica degli stati stazionari, che sono, secondo questa teoria, chiamati "appropriatamente" così.

Per vedere alcune dinamiche non banali in un sistema PIB, abbiamo pertanto bisogno che lo stato quantico sia una sovrapposizione di autostati energetici. Ad esempio, supponiamo che la funzione d'onda sia data da

$$\psi(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\psi_1(x) e^{-iE_1 t/\hbar} + \psi_2(x) e^{-iE_2 t/\hbar} \right] \quad (6.26)$$

che può essere scritta in forma polare, ottenendo:

$$\frac{dX(t)}{dt} = \frac{\hbar}{m} \operatorname{Im} \left[\frac{\frac{\pi}{L} \cos\left(\frac{\pi x}{L}\right) e^{-i\omega_1 t} + \frac{2\pi}{L} \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) e^{-i\omega_2 t}}{\sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) e^{-i\omega_1 t} + \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) e^{-i\omega_2 t}} \right] \quad (6.27)$$

Fondamentalmente, ciò che accade è che, mentre l'"intensità" $|\psi|^2$ dell'onda scorre avanti e indietro nella scatola, la particella segue lo stesso movimento. La situazione è illustrata in fig.6.2. In questa figura, tuttavia, l'insieme delle traiettorie è un po' irregolare e strano perché abbiamo scelto un insieme in cui le posizioni iniziali $X(0)$ sono distribuite uniformemente, cioè la distribuzione $P(x, 0)$ è costante, quindi è diversa da $|\psi(x, 0)|^2$. L'esempio serve principalmente per illustrare come le traiettorie siano "guidate" dalla funzione d'onda, e quindi la distribuzione

diventa molto instabile (con diverse traiettorie che si raggruppano strettamente) dopo un breve periodo di tempo. Come detto nella sezione precedente, tuttavia, esiste una distribuzione "speciale" la cui forma si conserva nel tempo:

$$P(x, t) = |\psi(x, t)|^2 \quad (6.28)$$

in cui la distribuzione delle traiettorie nell'insieme è proporzionale alla "intensità" $|\psi|^2$ della funzione d'onda (ciò che nella MQ ortodossa viene chiamata *densità di probabilità*). Questo caso è visualizzato in fig.6.3.

Quindi, quest'esempio illustra tutte le idee principali della teoria dell'onda pilota: un sistema quantistico è un "miscuglio" di particella e onda, con l'onda che è semplicemente la funzione d'onda che soddisfa l'eq. di Schrodinger. La particella ha un posizione iniziale casuale, che evolve nel tempo in accordo con quella che viene chiamata *equazione guida* (eq. 6.8). L'idea può essere riassunta dalle parole del fisico John Bell, nell'affermare che la particella "è attratta dove [i contributi di ψ] cooperano", cioè dove $|\psi|^2$ grande. Nel nostro caso, a $t = 0$, $|\psi|^2$ è grande a sinistra e piccolo a destra, ma dopo breve tempo la situazione si inverte; le particelle si muovono così da sinistra a destra per "seguire" $|\psi|^2$.

6.1.4 Pacchetto d'onda gaussiano

Consideriamo una funzione d'onda, a $t = 0$, data da:

$$\psi(x, 0) = Ne^{-x^2/4\sigma^2} \quad (6.29)$$

dunque:

$$\psi(x, t) = N(t)e^{-x^2/4(\sigma^2+i\hbar t/2m)} \quad (6.30)$$

dove $N(t)$ è una costante di normalizzazione dipendente dal tempo. Possiamo scriverla in forma polare, ottenendo:

$$\psi(x, t) = N(t) \exp \left[\frac{-x^2\sigma^2}{4(\sigma^4 + \hbar^2 t^2/4m^2)} \right] \exp \left[\frac{ix^2\hbar t}{8m(\sigma^4 + \hbar^2 t^2/4m^2)} \right] \quad (6.31)$$

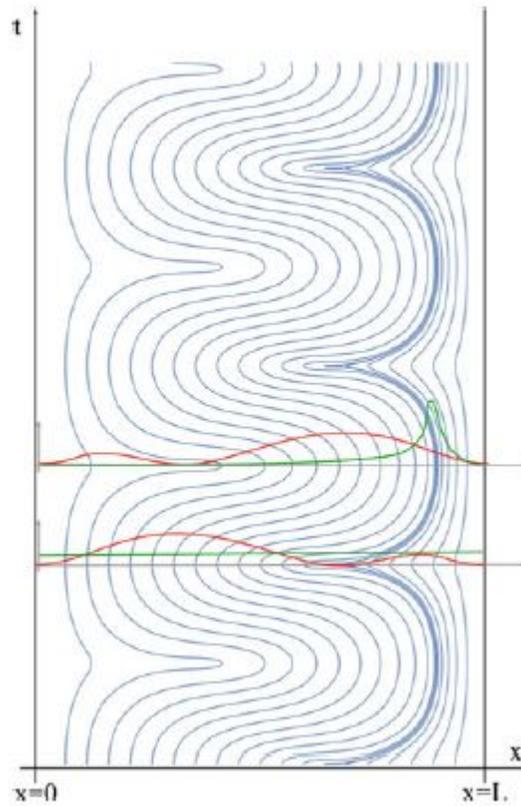


Figura 6.2: Le curve blu rappresentano un insieme di possibili linee di universo per una PIB con funzione d'onda data dalla sovrapposizione, equamente pesata, degli autostati con energia $n = 1$ e $n = 2$. Notare che a $t = 0$ le traiettorie sono equidistanti. Se pensiamo a questo come ad un insieme di traiettorie, diremmo che la distribuzione iniziale $P(x, 0)$ è costante. In seguito, la distribuzione in tempi successivi non è più costante, come illustrato dal "raggruppamento" delle linee d'universo. La distribuzione P è rappresentata, graficamente, in funzione di x , in due istanti diversi: si vedano le curve verdi. Le curve rosse associate mostrano l'aspetto di $|\psi|^2$ negli stessi istanti di tempo

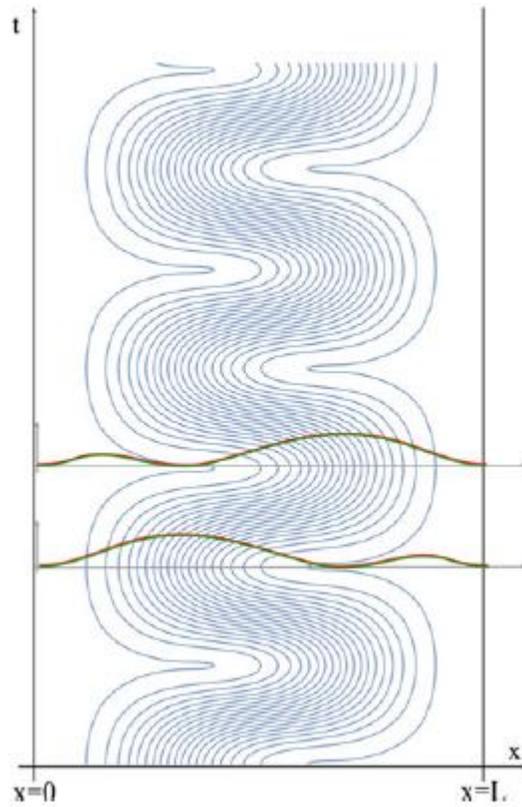


Figura 6.3: Come la figura 6.2, ma per un insieme di posizioni iniziali $X(0)$ che sono distribuite secondo $P(x,0) = |\psi(x,0)|^2$. Quindi, in questo caso, le curve verdi (che indicano P) e le curve rosse (che indicano $|\psi|^2$) coincidono sempre, diversamente dalla situazione descritta nella figura precedente.

Così abbiamo:

$$\frac{X(t)}{dt} = X(t) \frac{t}{t^2 + 4m^2\sigma^4/\hbar^2} \quad (6.32)$$

la quale può essere facilmente risolta, ottenendo:

$$X(t) = X_0 \left(1 + \frac{t^2}{4m^2\sigma^4/\hbar^2} \right)^{1/2} \quad (6.33)$$

che a sua volta può essere riscritta:

$$\left(\frac{X(t)}{X_0} \right)^2 - \left(\frac{t}{2m\sigma^2/\hbar} \right)^2 = 1 \quad (6.34)$$

Questa è l'equazione di un'iperbole, e quindi risulta che il pacchetto d'onda gaussiano che si diffonde ha la caratteristica che le traiettorie delle particelle sono iperboli. Alcuni esempi di traiettorie sono mostrati in fig.6.4.

Possiamo usare una tecnica simile per visualizzare le possibili traiettorie nel caso di interferenza a due fenditure. Partendo da una sovrapposizione di due pacchetti d'onda gaussiani, centrati in $x = a$ e $x = -a$:

$$\psi(x, t) = N(t) \left[e^{-\frac{(x-a)^2}{4(\sigma^2 + i\hbar t/2m)}} + e^{-\frac{(x+a)^2}{4(\sigma^2 + i\hbar t/2m)}} \right] \quad (6.35)$$

Questa è un po' più difficile da scrivere esplicitamente in forma polare, e l'equazione differenziale che si ottiene per $X(t)$ non ha soluzioni semplici. Questa equazione può comunque essere risolta numericamente. Il risultato è mostrato in Fig.6.5.

Ogni particella passa attraverso una sola fenditura, ma la funzione d'onda si evolve in modo diverso quando entrambe le fenditure sono aperte rispetto a quando una sola di esse lo è, e questo a sua volta influenza il moto delle particelle.

Ciò è piuttosto facile da capire intuitivamente: la funzione d'onda si propaga e si diffonde nello spazio (il che non è sorprendente per un onda) e naturalmente l'onda oltre le due fenditure sarà diversa in base a quale fenditura è aperta o meno. Pertanto, il comportamento della particella è

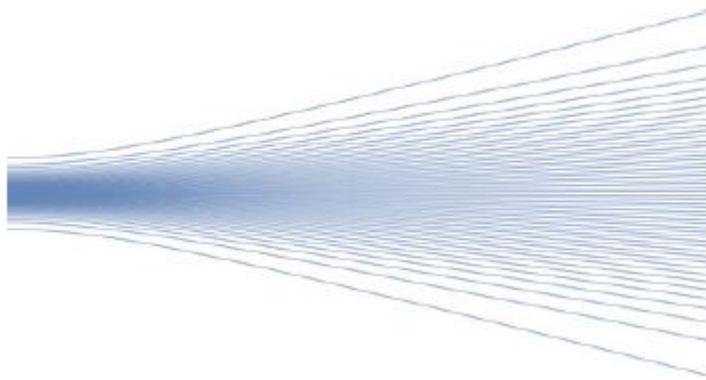


Figura 6.4: Esempio rappresentativo di traiettorie di particelle per un pacchetto d'onda gaussiano, in espansione. La figura può essere interpretata come la rappresentazione delle traiettorie che le particelle seguirebbero se guidate da una funzione d'onda diffratta. Si noti che la distribuzione delle posizioni $X(0)$ è data da $|\psi(x,0)|^2$, quindi le traiettorie si distribuiscono in modo da mantenere $P = |\psi|^2$ negli istanti successivi.

influenzato dal fatto che la fessura attraverso la quale non passa sia aperta oppure no.

Per analogia, si immagini un'onda d'acqua che passa attraverso due fessure ed un piccolo oggetto che viene da essa trasportato; evidentemente, la forma dell'acqua dipenderà dal fatto che una fenditura sola sia aperte o entrambe, e questo influenzerà il movimento dell'oggetto, anche se quest'ultimo passa attraverso una sola fenditura (ovviamente, questa è solo un'analogia).

Notare inoltre che ciò accade nel *vuoto* (non ci sono forze esterne o potenziali che agiscono direttamente sulle particelle). La teoria di de Broglie-Bohm è *non classica*: essa non soddisfa la prima legge del moto di Newton, poichè una particella libera non si propaga in linea retta.

È anche interessante confrontare questa soluzione numerica con un risultato sperimentale per l'esperimento a due fenditure, come mostrato in Fig.6.6. Questo è il risultato di una cosiddetta *misura debole delle velocità*, da cui si ricostruiscono le traiettorie. L'idea di misura debole venne

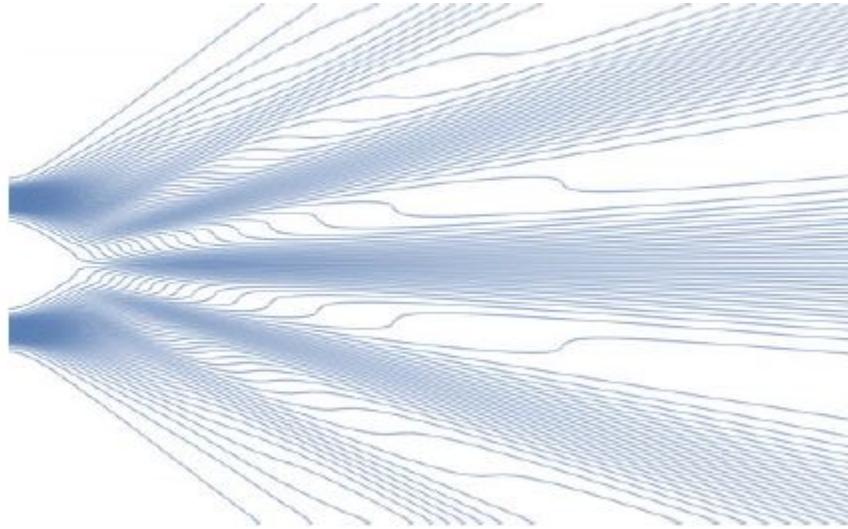


Figura 6.5: Campione rappresentativo di traiettorie di particelle per il caso di due pacchetti d'onda gaussiani, inizialmente separati. Si può pensare che mostri le traiettorie, attraverso lo spazio, di particelle che sono appena emerse, muovendosi verso destra, attraverso uno schermo a doppia fenditura. Questo tipo di immagine è diventato iconico per la teoria dell'onda pilota, perché cattura chiaramente come la teoria spieghi la dualità onda-corpuscolo in una maniera molto meno "sconcertante" rispetto all'ortodossia di Copenaghen. La figura di diffrazione corrisponde ai punti in cui le particelle (puntiformi) entrano in collisione con lo schermo; ma il movimento non-classico delle particelle è influenzato dall'onda pilota, in modo tale che le traiettorie si raggruppino attorno ai punti d'interferenza costruttiva. Un insieme di tali traiettorie (con condizioni iniziali opportunamente casuali) renderà quindi perfettamente conto del tipo di pattern di interferenza statistica visualizzato nel tipico esperimento a doppia fenditura

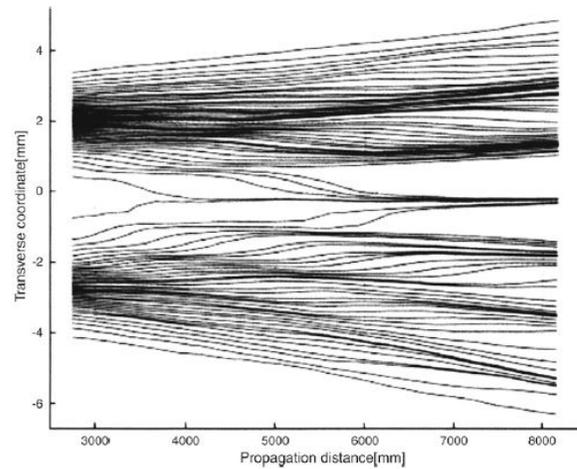


Figura 6.6: *Traiettorie ottenute in seguito a misure deboli.* Da S. Kocsis, B. Braverman, S. Ravets, M.J. Stevens, R.P. Mirin, L.K. Shalm, and A.M. Steinberg: Observing the average trajectories of single photons in a two-slit interferometer, *Science* 332, 1170–1173 (2011)

introdotta da Aharonov, Albert e Vaidman nel 1988². In parole povere, per ottenere una misura debole delle velocità, si misura prima la posizione della particella "debolmente", il che significa senza disturbare molto la funzione d'onda. Pertanto, non si ottiene una posizione precisa della particella. Poiché la misura è debole, si può fare, in seguito, una misura "forte", cioè ordinaria, ed ottenere la posizione precisa. Ripetendo più volte l'operazione, si può riprodurre una distribuzione statistica delle posizioni e, prendendo una media, ottenere la posizione iniziale. Avendo due posizioni consecutive ed un intervallo di tempo tra di loro, è possibile calcolare una velocità che si può associare alla prima posizione (ciò non contraddice il principio di indeterminazione di Heisenberg, poiché dobbiamo effettuare diverse operazioni, tra cui prendere i valori medi). Si può dimostrare che ciò è in accordo con la teoria di de Broglie-Bohm.

Ecco come Bell riassume la teoria di de Broglie-Bohm nel caso dell'esperimento a doppia fenditura: "Is it not clear from the smallness of the scin-

²Y. Aharonov, D.Z. Albert, L. Vaidman, How the result of a measurement of a component of the spin of a spin-1/2 particle can turn out to be 100. *Phys. Rev. Lett.* 60, 1351–1354 (1988)

tillation on the screen that we have to do with a particle? And is it not clear, from the diffraction and interference patterns, that the motion of the particle is directed by a wave? De Broglie showed in detail how the motion of a particle, passing through just one of two holes in the screen, could be influenced by waves propagating through both holes. And so influenced that the particle does not go where the waves cancel out, but is attracted to where they cooperate. This idea seems to me so natural and simple, to resolve the wave-particle dilemma in such a clear and ordinary way, that it is a great mystery to me that it was so generally ignored[6]".

È interessante confrontare quest'affermazione con quelle di Feynman e Landau e Lifshitz riguardo l'esperimento della doppia fenditura:

Feynman:

*Nobody knows any machinery. Nobody can give you a deeper explanation of this phenomenon than I have given; that is, a description of it.*³

Landau e Lifshitz:

*It is clear that [the results of the double-slit experiment] can in no way be reconciled with the idea that electrons move in paths. [...] In quantum mechanics there is no such concept as the path of a particle.*⁴

Ciò che sorprende è il dogmatismo di queste due affermazioni: come si fa a sapere che nessuno possa fare qualcosa che non è stato ancora fatto? O che in un esperimento non si può *in alcun modo* introdurre un concetto? Inoltre, la teoria di de Broglie-Bohm spiegava già quest'esperimento nel 1927 (se qualcuno si fosse preoccupato di guardarlo), e Feynman era abbastanza vicino a Bohm e sembrava avere una gran stima di lui.

6.1.5 Atomo di idrogeno

L'elettrone in un atomo di idrogeno nel suo stato fondamentale non è, secondo la teoria dell'onda pilota, in orbita attorno al nucleo, ma è fermo, in un punto fisso vicino al protone. Se questo infastidisce o sembra fisicamente impossibile (vedi obiezione di Einstein nella sez.2.6), è probabilmente perché ci si aspetta che se l'elettrone è *letteralmente* una particella, dovrebbe obbedire alle leggi classiche, e dovrebbe quindi accelerare ver-

³R. Feynman, *The Character of Physical Law* (MIT Press, Boston, 1967)

⁴L. Landau, E. Lifshitz, *Quantum Mechanics, vol. 3, A Course of Theoretical Physics* (Pergamon Press, Oxford, 1965)

so il protone a causa dell'interazione elettrostatica. Ma la teoria dell'onda pilota, come già anticipato, non è una teoria classica! Il moto della particella, secondo questa teoria, non è determinato dalle forze classiche che agiscono su di essa, ma dipende dalla struttura della funzione d'onda che la guida. Possiamo derivare un'equazione per la derivata seconda della posizione $X(t)$, in cui c'è un termine potenziale elettrico, dato dall'interazione tra l'elettrone ed il protone, ed un potenziale "quantistico" e si ha, in generale per un sistema di N particelle soggette ad un potenziale classico V :

$$m_k \frac{d^2}{dt^2} X_k(t) = - \left[\frac{\partial}{\partial x_k} (Q + V) \Big|_{x_j = X_j(t) \forall j \neq k} \right]_{x_k = X_k(t)} \quad (6.36)$$

dove Q prende il nome di *potenziale quantistico*, dato da:

$$Q = - \sum_{j=1}^N \frac{\hbar^2}{2m_j} \frac{1}{R} \frac{\partial^2 R}{\partial x_j^2} \quad (6.37)$$

con

$$\psi(x_1, x_2, \dots, x_N, t) = R(x_1, x_2, \dots, x_N, t) e^{iS(x_1, x_2, \dots, x_N, t)}.$$

Notare inoltre che per $\hbar \rightarrow 0$ si ha $Q \rightarrow 0$, dunque si riottiene la meccanica newtoniana.

Inoltre, il termine potenziale dell'eq.6.37 permette di spiegare tutti i processi quantistici non locali, come il paradosso EPR.

6.1.6 Misura

Nel cap.5.1 abbiamo descritto il formalismo della misura nella teoria quantistica, introdotto da von Neumann. In questo caso, secondo la visione standard, von Neumann dovette introdurre il postulato del collasso della funzione d'onda che è, come abbiamo visto, una soluzione problematica. Adesso vediamo che, a differenza dell'ortodossia di Copenaghen, la teoria dell'onda pilota non è affetta da alcun "problema di misurazione".

Si consideri ad esempio la misura dell'energia di una particella in una scatola effettuata con un apparecchio dotato di un puntatore, come descritto nella sez.5.1. Lo stato iniziale del sistema particella+puntatore è:

$$\psi(x, y, 0) = \left[\sum_i c_i \psi_i(x) \right] \phi(y) \quad (6.38)$$

dove $\sum_i c_i \psi_i(x)$ è lo stato iniziale della particella nella scatola e $\phi(y)$ lo stato iniziale del puntatore dell'apparato di misura.

Dalla linearità dell'equazione di Schrodinger:

$$\psi(x, y, t) = \sum_i c_i \psi_i(x) \phi(y - \lambda E_i t) \quad (6.39)$$

Cioè, invece di avere una posizione post-interazione ben definita, che possiamo interpretare come la registrazione del risultato (singolo, ben definito) della misurazione, il puntatore stesso si trova in una sovrapposizione quantistica. **La funzione d'onda da sola non riesce a cogliere un risultato particolare; invece contiene, per così dire, tutti i risultati in parallelo. La teoria dell'onda pilota risolve il problema nel seguente modo: l'idea cruciale è che, secondo la teoria, la funzione d'onda da sola non fornisce una descrizione completa della situazione fisica. C'è anche la posizione effettiva $X(t)$ della particella e la posizione effettiva $Y(t)$ del puntatore.**

L'idea è semplice: la posizione $X(t)$ della particella nella scatola evolve secondo:

$$\frac{dX(t)}{dt} = \frac{j_x}{|\psi|^2} \quad (6.40)$$

dove j_x è la componente x della corrente di probabilità quantistica associata al sistema particella. Allo stesso modo, la posizione $Y(t)$ del puntatore evolve secondo:

$$\frac{dY(t)}{dt} = \frac{j_y}{|\psi|^2} \quad (6.41)$$

dove j_y è la componente lungo y della corrente di probabilità quantistica

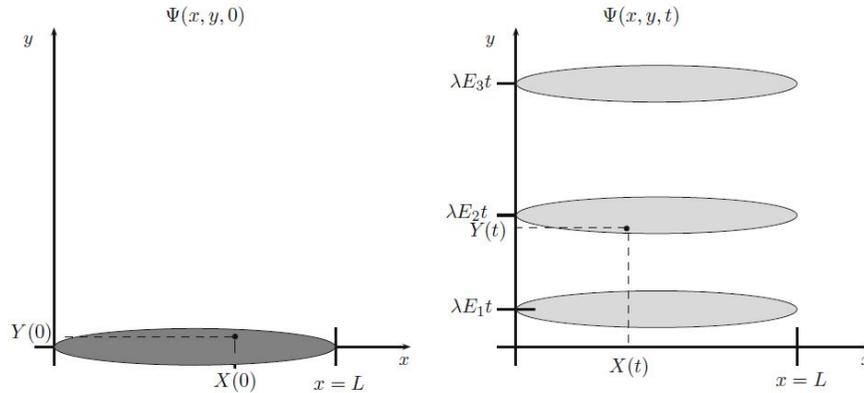


Figura 6.7: Il grafico a sinistra mostra la regione dello spazio bidimensionale delle configurazioni in cui si trova $\psi(x, y, 0)$. Successivamente, al tempo t , la funzione d'onda assume la forma a destra in figura, con diverse "isole" non sovrapposte. La presenza simultanea di tutte queste isole rende la misurazione nella meccanica quantistica standard problematica. Ma per la teoria dell'onda pilota, il risultato effettivamente realizzato dalla misurazione non si trova nella funzione d'onda, ma piuttosto nella posizione finale del puntatore. E questo sarà un valore perfettamente definito, anche se casuale, qui indicato dalla posizione verticale $Y(t)$ del punto che rappresenta la configurazione effettiva (X, Y) . $Y(t)$ indicato è nel supporto di $n = 2$ del ramo della funzione d'onda - cioè $Y(t)$ è approssimativamente $\lambda E_2 t$ - quindi in questo caso diremo che l'energia della particella è $E = E_2$.

associata al sistema puntatore.

Dalla teoria, sappiamo che i valori iniziali $X(0)$ e $Y(0)$ sono casuali, opportunamente distribuiti secondo $|\psi|^2$, e le posizioni rimarranno distribuite secondo $|\psi|^2$ per tutti gli istanti successivi. Così, le posizioni $X(t)$ e $Y(t)$ in seguito saranno casuali e in particolare si troveranno da qualche parte nel supporto $\psi(x, y, t)$.

La fig.6.7 mostra come la funzione $\psi(x, y, t)$ si evolva nel tempo man mano che procede la misurazione. A $t = 0$ l'onda ha un supporto tra $x = 0$ e $x = L$ e per $y \approx 0$. Col passare del tempo, i termini della sovrapposizione di ψ formano un supporto con un insieme di "isole" discrete e non sovrapposte, una per ciascun valore di y , nello spazio delle confi-

gurazioni. Ma le particelle hanno posizioni ben definite $X(t)$ e $Y(t)$, che insieme possono essere intese come la definizione di un "punto di configurazione effettivo" che segue una traiettoria nello spazio delle configurazioni. E così, in particolare, il puntatore ha una posizione post-interazione specifica $Y(t)$ che è approssimativamente $\lambda E_1 t$, $\lambda E_2 t$ o $\lambda E_3 t$, ecc... Quindi, alla fine dell'esperimento, la posizione del puntatore non è in alcun modo "sfocata" o "indefinita" o "sovrapposta". Si noti che la probabilità che il punto di configurazione $\{X(t), Y(t)\}$ si trovi nell' n -esima isola è uguale all'integrale $|\psi|^2$ su quell'isola, che è $|c_n|^2$, e dunque ritroviamo la regola di Born.

Ovviamente, una trattazione completa richiederebbe una formulazione matematica più rigorosa, ad esempio abbiamo considerato i termini $\phi(y - \lambda E_i t)$ come delle delta, e non come gaussiane. Le semplificazioni qui effettuate servono solo per comprendere l'idea generale, che è concettualmente identica a quella rigorosa.

Come possiamo vedere, con la teoria dell'onda pilota non abbiamo bisogno di dividere il mondo in "quantistico" e "classico" al fine di comprendere le misurazioni e i loro risultati. Invece, possiamo trattare il sistema e l'apparato di misura allo stesso modo. Questo è ovviamente in contrasto con la meccanica quantistica ordinaria che, come abbiamo discusso nel cap.5, richiede l'introduzione di quello che Bell definì *shifty split*, cioè una divisione *artificiale* del mondo in un regno "quantistico" ed uno "classico": "*There can be no question then of identifying the quantum system S with the whole world W. There can be no question – without changing the axioms – of getting rid of the shifty split. Sometimes some authors of 'quantum measurement' theories seem to be trying to do just that. It is like a snake trying to swallow itself by the tail. It can be done – up to a point. But it becomes embarrassing for the spectators even before it becomes uncomfortable for the snake*⁵".

Da ciò segue che, diversamente dalla teoria standard, la teoria di Bohm tratta l'atto di misurazione allo stesso modo di come tratta qualunque altra interazione fisica - un sistema segue, durante la misura, la stessa dinamica che segue in ogni altro istante di tempo.

Vale anche la pena di sottolineare che la teoria dell'onda pilota gene-

⁵J.S. Bell, *Against measurement*, in *62 Years of Uncertainty: Erice, 5–14 August 1989* (Plenum Publishers, New York)

ra le stesse *predizioni statistiche* della MQ ordinaria, anche se la teoria è *completamente deterministica*. La funzione d'onda segue sempre l'equazione di Schrodinger, che è deterministica, mentre la casualità è data dalle condizioni iniziali: non possiamo mai sapere in anticipo il risultato di una misura quantistica, poiché non possiamo mai sapere con esattezza le posizioni iniziali di tutte le particelle del sistema.

6.1.7 Determinismo

Una teoria è considerata deterministica se la specifica del valore iniziale di tutte le variabili rilevanti del sistema è sufficiente per calcolare i valori passati e prevedere i valori futuri di tali variabili, per qualsiasi istante arbitrario di tempo. Questa formulazione del determinismo implica anche che è possibile, per un arbitrario tempo, assegnare un valore a tutte le variabili che caratterizzano il sistema.

L'evoluzione temporale della funzione d'onda, descritta dall'equazione di Schrodinger, è deterministica. La meccanica quantistica, tuttavia, non lo è, a causa della natura probabilistica delle previsioni per i valori delle osservabili di un sistema quantistico. Nel contesto della meccanica quantistica, non è possibile formulare previsioni esatte (come "questa particella decadrà tra 15 secondi"), ma solo probabilistiche ("la vita media di questa particella è 20 secondi"). Ciononostante, c'è una profonda differenza tra l'ortodossia e la teoria dell'onda pilota.

L'interpretazione di Copenaghen considera le probabilità come caratteristiche intrinseche della meccanica quantistica: tutte le previsioni sui risultati di una misurazione quantistica possono essere espressi solo in termini di probabilità. Di conseguenza, la meccanica quantistica standard risulta essere una teoria non deterministica a livello ontologico.

La teoria di de Broglie-Bohm richiederebbe, per la definizione completa di un sistema quantistico, non solo la specifica della densità di probabilità, ma anche le posizioni iniziali di tutte le particelle appartenenti al sistema ("variabili nascoste" del modello). Le traiettorie precise sono quindi definite in qualsiasi momento, ma sono empiricamente sconosciute, in quanto le posizioni iniziali sono da considerare "variabili nascoste", stavolta nel senso letterale del termine. Poiché le posizioni delle particelle non possono essere determinate sperimentalmente con una precisione mi-

gliore di quella data dalla densità di probabilità $|\psi|^2$, l'interpretazione di de Broglie-Bohm non è in grado di produrre predizioni deterministiche, esattamente come la formulazione standard. Ma, a differenza di quest'ultima, il modello di de Broglie-Bohm è deterministico a livello ontologico, ma rimane un modello probabilistico rispetto alle possibili previsioni di una misura quantistica.

In questo caso, le probabilità sono epistemiche (cioè collegate ai limiti della conoscenza empirica dell'osservatore del sistema quantistico), piuttosto che ontologiche (cioè relative alle caratteristiche intrinseche del modello). Pertanto, nella teoria bohmiana, le probabilità quantistiche non hanno un carattere profondamente diverso dalle probabilità classiche, risolvendo così il problema dell'oggettivazione di cui abbiamo discusso nella sez.5.5.

6.1.8 Contestualità

Le variabili nascoste vengono aggiunte alla teoria quantistica standard per ottenere una conoscenza completa del sistema. Si richiede pertanto che esse abbiano un valore preciso (anche se sconosciuto), indipendentemente dal fatto che esso possa essere determinato da una misurazione o meno. Un ulteriore requisito è la possibilità di eseguire misure affidabili: se si attribuisce un valore preciso ad una variabile, una misura eseguita sul sistema per tale variabile dovrebbe avere il risultato atteso, indipendentemente dai dettagli della misurazione. Questo prende il nome di *principio di non-contestualità*, formulato da Bell[6]: tutte le misurazioni di un'osservabile dovrebbero dare lo stesso risultato, indipendentemente da tutte le altre misurazioni eseguite contemporaneamente su osservabili differenti.

Bell⁶ nel 1966 e S.Kochen ed E.P.Specker⁷ nel 1967 hanno dimostrato che i due requisiti sopra enunciati sono inconciliabili: le teorie a variabili nascoste violano il principio di non contestualità enunciato da Bell. La contestualità implica che il valore attribuito sperimentalmente ad una variabile in un sistema quantistico non dipende solo da quella variabile, ma dall'intero contesto sperimentale. Pertanto, il tentativo di completare la

⁶J. S. Bell, On the problem of hidden variables in quantum mechanics, Rev. Mod. Phys. 38, 447 (1966).

⁷S. Kochen and E. P. Specker, Jour. Math, and Mech. 17, 59 (1967).

meccanica quantistica standard in modo deterministico potrebbe essere fatto, ma solo a patto di accettare il carattere contestuale di tali modelli. Tuttavia, non tutte le variabili sono contestuali: **per ciascun sistema quantistico esiste almeno un insieme completo di variabili non contestuali compatibili, cioè che mi permettono di non violare i risultati ottenuti da Bell, Kochen e Specker. Queste sono le variabili che possono essere misurate in un modo obiettivo, indipendentemente da tutte le altre misurazioni eseguite sul sistema.**

Nella teoria di de Broglie-Bohm, le variabili posizionali sono le uniche variabili non contestuali della teoria.

Pertanto, non solo il termine "variabile nascosta" è fuorviante, ma lo sono anche le parole "osservabile" e "misurazione" poichè, per quanto riguarda la teoria di de Broglie-Bohm, tranne quando si misurano le posizioni, non viene misurata o osservata alcuna proprietà intrinseca del sistema. Ciò conferma in un certo senso l'enfasi di Bohr su:

*[...] the impossibility of any sharp distinction between the behavior of atomic objects and the interaction with the measuring instruments which serve to define the conditions under which the phenomena appear.*⁸

Ma, nella meccanica bohmiana, questo segue dalle equazioni della teoria, e non da qualche nozione a priori.⁹

6.1.9 Realismo

Il realismo è solitamente definito da un'ipotesi ontologica ed una epistemica: c'è una realtà esterna, che esiste indipendentemente dall'osservatore (ontologica), ed è possibile avere accesso diretto a questa realtà esterna (epistemica).

L'interpretazione di de Broglie-Bohm descrive un sistema quantistico in termini di particelle realmente esistenti, aventi una posizione precisa (anche se non nota) nello spazio ed in qualsiasi momento, e onde, che guidano le particelle. Inoltre, il risultato di una misurazione è considerato indipendente dall'osservatore, che semplicemente registra un risultato fisico, come nella fisica classica. Quindi, la teoria di de Broglie-Bohm deve

⁸N. Bohr, Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics, in [36]

⁹Per ulteriori approfondimenti, consultare [14]

essere considerata un modello realistico, purché le quantità misurate siano solo quelle posizionali. Tutte le altre variabili, come abbiamo detto in precedenza, sono contestuali, e pertanto non realistiche. Queste a volte sono definite come "quasi reali".

6.2 Meccanica quantistica stocastica

Nel 1951, ormai isolato dalla comunità scientifica, David Bohm si trasferì in Brasile. All'Università di San Paolo lavorò alla teoria causale, la quale divenne oggetto delle sue pubblicazioni nel 1952. Durante il suo soggiorno in Brasile, Bohm collaborò con moltissimi scienziati: Ralph Schiller (allievo del cosmologo Peter Bergmann), Tiomno e Walther Schutzer, Mario Burge, ma soprattutto lavorò per tre anni con il fisico teorico francese Jean-Pierre Vigièr.

I due scienziati elaborarono una nuova interpretazione della meccanica quantistica, partendo dalla precedente teoria di de Broglie-Bohm, definita *meccanica quantistica stocastica*¹⁰. Noi non entreremo troppo in dettaglio, ma ne descriveremo l'approccio generale, nella formulazione nota come *teoria di Bohm-Vigièr*, che fu in seguito sviluppato da Edward Nelson, seppur con certe differenze significative.

Come nel caso browniano, il moto delle particelle è un processo stocastico la cui origine va cercata a livello sub-quantico (allo stesso modo in cui il moto browniano risulta da azioni a livello molecolare). Le entità del livello sub-quantico interagiscono con le particelle oggettive mediante una sorta di impatti casuali, nello spirito della vecchia fisica di Cartesio, dove la trasmissione dalle cause agli effetti richiedeva effettivi contatti causali. In una simile struttura, dobbiamo introdurre nuovamente variabili addizionali nascoste, in realtà due "strati" di variabili: il primo appena sotto il livello della meccanica quantistica, e costituito da valori *reali* associati a particelle oggettive, come nella teoria di de Broglie-Bohm, mentre il secondo strato, sotto il primo, è costituito da valori *reali* associati alle entità del livello sub-quantico. Quindi, possiamo vedere la meccanica quantistica stocastica come un nuovo esempio di teoria a variabili nascoste.

¹⁰D.Bohm, J.P.Vigièr, Model of the Causal Interpretation of Quantum Theory in Terms of a Fluid with Irregular Fluctuations Phys.Rev. 96 (1954)

Per ragioni storiche, è opportuno richiamare brevemente questa teoria, in quanto su di essa si fonda il concetto di *fluttuazione quantistica*, utilizzato ormai in quasi ogni ambito di ricerca della fisica teorica, se non in tutti.

Le idee di base furono inizialmente applicate ad un singolo elettrone. In particolare, Bohm e Vigier considerarono l'elettrone come sospeso in un fluido, il cui movimento generale è determinato dall'equazione di Schrodinger, con densità

$$\rho(x) = |\psi(x)|^2 \quad (6.42)$$

e velocità locale

$$\vec{v} = \frac{\nabla S}{m} \quad (6.43)$$

con S data da eq.6.5.

La particella, sospesa in questo fluido, verrebbe trasportata per mezzo di questa velocità locale. Si è quindi ipotizzato che il fluido avesse un'ulteriore componente casuale della velocità la quale, come anticipato, potrebbe derivare da una realtà ad un livello più profondo rispetto a quello della meccanica quantistica¹¹. Tale movimento verrà comunicato alla particella, in modo che subisca un processo stocastico e che descriva una traiettoria con una velocità locale media ed una componente casuale. Pertanto, si suppone che la particella abbia una velocità media data da $\vec{v} = \frac{\nabla S}{m}$ insieme ad un contributo stocastico addizionale. Quest'ultimo, come proposto da Nelson¹², potrebbe essere dovuto ad un background casualmente fluttuante. Oppure può essere una sorta di "fluttuazione del vuoto", simile in qualche modo agli effetti di un mezzo che riempie lo spazio o "etere" che sta subendo movimenti casuali interni. Questa nozione è stata utilizzata anche dal fisico Bryce DeWitt¹³ e Vigier (Nelson, 1985).

Per l'interpretazione stocastica, vorremmo avere un processo di diffusione

¹¹Per ulteriori approfondimenti, consultare D.Bohm, *Causality and Chance in Modern Physics* (Routledge and Kegan Paul, London, 1957)

¹²E.Nelson, *Quantum Fluctuations* (Princeton University Press, Princeton, 1985)

¹³B.S.DeWitt in *General Relativity: an Einstein Centenary Survey*, ed. S.W.Hawking e W.Israel (Cambridge University Press, 1979)

casuale il cui stato di equilibrio corrisponda ad una densità di probabilità:

$$P = |\psi|^2 = \rho$$

e con una corrente media data da:

$$j = \rho \vec{v} = \rho \frac{\nabla S}{m}$$

Un tale stato è una possibilità consistente se la funzione d'onda

$$\psi = \sqrt{\rho} e^{iS/\hbar} \quad (6.44)$$

segue l'equazione di Schrodinger, poichè ciò implicherebbe l'equazione di conservazione:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla j = 0 \quad (6.45)$$

Per avere $\rho = |\psi|^2$ come densità di equilibrio sotto tale processo casuale, dovremmo assumere una velocità osmotica adeguata, la cui origine potrebbe essere data da un campo di fondo, come ipotizzato in seguito da Nelson.

Assumiamo quindi una velocità osmotica del tipo:

$$\vec{u}_0 = D \frac{\nabla \rho}{\rho} \quad (6.46)$$

con D coefficiente di diffusione, ed una corrente di diffusione:

$$\vec{j}^d = -D \nabla P \quad (6.47)$$

La corrente totale sarà pertanto:

$$\vec{j} = \frac{\rho}{m} \nabla S + D \rho \frac{\nabla \rho}{\rho} - D \nabla P \quad (6.48)$$

Dunque, l'equazione di conservazione diventa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \left(\rho \frac{\nabla S}{m} + DP \frac{\nabla \rho}{\rho} - D \nabla P \right) = 0 \quad (6.49)$$

Si può dimostrare che

$$P = \rho \quad (6.50)$$

è una condizione di equilibrio, ed inoltre che P tenderà verso ρ (ciò si collega all'ipotesi di equilibrio quantistico vista in precedenza con la teoria di de Broglie-Bohm).

In questo caso, la velocità media all'equilibrio è:

$$\vec{v} = \frac{\nabla S}{m} \quad (6.51)$$

In questo contesto, la dinamica fondamentale è determinata dall'equazione guida, dalla velocità osmotica e dagli effetti di diffusione stocastica. Tutti questi effetti contribuiscono a "tenere" la particella in una regione in cui $\rho = |\psi|^2$ è grande e dove la sua velocità oscilla attorno a $\frac{\nabla S}{m}$.

Per illustrare il modello stocastico, consideriamo l'interferenza delle due fenditure. Una particella che segue un movimento casuale passerà per una o l'altra fenditura, ma risentirà del campo di Schrodinger dovuto al fatto che entrambe le fenditure sono aperte. Nell'interpretazione causale della teoria di de Broglie-Bohm analizzata in precedenza, l'effetto di "guida" della funzione d'onda viene descritto unicamente con l'introduzione di un potenziale quantistico. Nell'interpretazione stocastica, invece, esso è espresso principalmente attraverso la velocità osmotica, che riflette i contributi della funzione d'onda per entrambe le fenditure, come illustrato in fig.6.8. La velocità osmotica "spinge" costantemente la particella nelle regioni dove $|\psi|^2$ ha i valori più alti, e questo spiega perchè la maggior parte delle particelle si trovano vicino ai massimi della funzione d'onda. Il campo di velocità osmotico permette, in questo modello stocastico, di spiegare il fenomeno grazie al quale la funzione d'onda "guida" la particella.

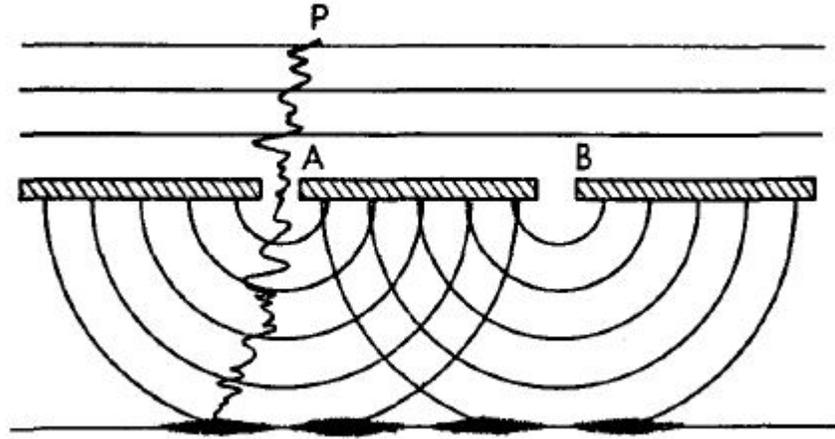


Figura 6.8: Interpretazione stocastica del passaggio di una particella attraverso una fenditura. Notare le fluttuazioni stocastiche del moto della particella

L'estensione al caso in cui ho più particelle è semplice. La funzione d'onda, definita nello spazio delle configurazioni ($dim = 3N$), soddisfa l'equazione di Schrodinger. Assumiamo che la velocità media per l' i -esima particella sia:

$$v_i = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial x_i} S(x) \quad (6.52)$$

la corrente di diffusione

$$j_i^{(d)} = -D \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (6.53)$$

con P un'arbitraria distribuzione di probabilità, mentre la velocità osmotica:

$$u_i^{(0)} = \frac{D}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (6.54)$$

Con $\rho = |\psi|^2$. In questo modo, la teoria si sviluppa esattamente come nel

caso di una sola particella, in cui la distribuzione limite sarà:

$$P = |\psi|^2 \quad (6.55)$$

Osserviamo, dall'eq.6.54, una connessione tra le velocità osmotiche delle diverse particelle. **Se la funzione d'onda generale non è fattorizzata, le velocità osmotiche di diverse particelle saranno correlate anche se le particelle sono molto distanti fra di loro. Ciò significa che il modello stocastico non permette di eliminare il carattere non locale della meccanica quantistica.**

Quest'interpretazione risolve il problema della misura nello stesso modo in cui lo risolve la teoria causale di de Broglie-Bohm; l'aspetto stocastico non influisce sulla descrizione dell'atto di misurazione.

6.3 Modello di Bohm-Bub

Nel 1966, i fisici Jeffrey Bub e David Bohm scrissero un articolo¹⁴ in cui elaborano un semplice modello di teoria a variabili addizionali: consideriamo il vettore di stato ψ descrivente il sistema, e supponiamo che possa scriversi così:

$$|\psi \rangle = a_1^\psi |S_1 \rangle + a_2^\psi |S_2 \rangle \quad (6.56)$$

dove $|S_1 \rangle$ e $|S_2 \rangle$ formano una base ortonormale.

La variabile nascosta è indicata con ϵ . A differenza della teoria di de Broglie-Bohm, non affermiamo che questa sia associata alla traiettoria della particella, ma lasciamo la natura di ϵ non specificata. Ci limitiamo a dire che è qualcosa di "nascosto" che partecipa ai processi quantistici. A questa variabile associamo un altro spazio di Hilbert (duale) bidimensionale. Scomponiamo gli elementi di questo spazio in questo modo:

$$\langle \epsilon | = a_1^\epsilon \langle S_1 | + a_2^\epsilon \langle S_2 | \quad (6.57)$$

¹⁴D. Bohm and J. Bub. A proposed solution of the measurement problem in quantum mechanics by a hidden variable theory. Review of Modern Physics, 38, 3:453–469 (1966)

Con a_1^ϵ e a_2^ϵ associati alla variabile nascosta ϵ .

Adesso vogliamo fare in modo che il ket $|\psi\rangle$ ed il bra $\langle\epsilon|$ insieme determinino i processi quantistici in maniera deterministica.

Definiamo il rapporto:

$$R_i = \frac{|a_i|^2}{|a_\epsilon|^2} = \frac{j_i}{|a_i^\epsilon|^2} \quad (6.58)$$

con $i=1,2$. Dove abbiamo definito:

$$j_i = |a_i|^2 \quad (6.59)$$

Durante la misurazione, postuliamo che l'evoluzione di $|\psi\rangle$ sia determinata da:

$$\begin{aligned} \frac{da_1^\psi}{dt} &= \gamma(R_1 - R_2)a_1^\psi j_2 \\ \frac{da_2^\psi}{dt} &= \gamma(R_2 - R_1)a_2^\psi j_1 \end{aligned} \quad (6.60)$$

con γ un costante reale positiva, che si suppone trascurabile fuori dalla misura.

È facile ottenere:

$$\begin{aligned} \frac{dj_1}{dt} &= \frac{d|a_1^\psi|^2}{dt} = 2\gamma(R_1 - R_2)j_1j_2 \\ \frac{dj_2}{dt} &= \frac{d|a_2^\psi|^2}{dt} = 2\gamma(R_2 - R_1)j_2j_1 \end{aligned} \quad (6.61)$$

dunque:

$$\frac{d}{dt}(j_1 + j_2) = \frac{d}{dt}(|a_1^\psi|^2 + |a_2^\psi|^2) = 0 \quad (6.62)$$

da ciò segue che, supposto $|\psi\rangle$ normalizzato prima della misura (e sappiamo che è sempre possibile realizzare ciò), esso rimarrà normalizzato durante la misura:

$$j_1 + j_2 = |a_1^\psi|^2 + |a_2^\psi|^2 = 1 \quad (6.63)$$

Adesso consideriamo il sistema 6.61. Osserviamo che, se $j_2 \neq 0$ ed $R_1 > R_2$, allora j_1 aumenterà fino a quando raggiungerà il valore massimo $j_1 = 1$. Parallelamente, j_2 diminuisce fino a 0. Pertanto, $|\psi\rangle$ tenderà a $|S_1\rangle$, entro un fattore di fase irrilevante. Allo stesso modo, se $R_2 > R_1$ e $j_1 \neq 0$, allora $|\psi\rangle$ tenderà verso $|S_2\rangle$. Dunque, una volta completata la misurazione, si otterranno i valori, supponiamo si tratti di una misura di spin, rispettivamente $\hbar/2$ o $-\hbar/2$. Abbiamo quindi scoperto che il risultato dello spin è determinato dal vettore di stato $|\psi\rangle$ e dal duale $\langle \epsilon|$.

Quello che è stato qui sviluppato è un modello (molto semplicistico) a variabili addizionali, che riproduce le usuali statistiche della meccanica quantistica, senza alcun collasso della funzione d'onda o, se c'è un collasso, non è nel solito significato quantistico, ma è un processo deterministico.

Ricordiamo che è il carattere lineare dell'equazione di Schrodinger che "ostacola" la soluzione al problema della misura. Osserviamo infatti la non linearità delle eq.6.61.

A differenza della descrizione originale del processo di misurazione di Bohm nel 1952 (sez.6.1), in cui si introduceva esplicitamente un'interazione tra il sistema misurato e l'apparato di misura, la presente descrizione è di natura fenomenologica, collegando $|\psi\rangle$ e $\langle \epsilon|$, senza alcun esplicito riferimento a qualsiasi dispositivo di misura. Nelle parole di Belinfante, questa descrizione "*remains valid through the entire measurement instead of oscillating between descriptions of the object alone and the object as part of a composite system together with the apparatus*¹⁵".

A mio avviso, **questo modello ha il vantaggio di rendere evidente la pos-**

¹⁵F.J. Belinfante. *A Survey of Hidden-Variable Theories* (Pergamon, Oxford, England, 1973).

sibilità di introdurre una descrizione della fisica quantistica che faccia uso di variabili addizionale, ma non è da prendere troppo sul serio. Infatti, abbiamo anche in questo caso dovuto separare la dinamica dello stato quantico in due evoluzioni distinte, considerando la misurazione come un processo dinamico a sé stante. Tuttavia, in modo semplice riesce a fornire una descrizione deterministica e senza l'introduzione di un'arbitraria separazione sistema-apparato, e ciò rappresenta un passo in avanti verso la realizzazione di una teoria quantistica più completa e coerente di quella standard.

Si potrebbe inoltre obiettare che il modello precedente sia stato sviluppato in un caso molto particolare (spin 1/2), e che forse sarebbe impossibile realizzarlo. Certo, potrebbe effettivamente sembrare un po' ad hoc e artificioso. Tuttavia, è un dato di fatto che un esempio formale è sufficiente per dimostrare che le teorie a variabili addizionali siano formalmente possibili, vanificando tutte le pretese delle prove di impossibilità. Inoltre, questo non è l'unico esempio possibile, come abbiamo potuto vedere nelle sezioni precedenti.

In aggiunta, come osservato da Bell, non solo le variabili nascoste sono possibili, ma lo sono *sempre*. Bell affermò questo risultato come segue: "*If no restrictions whatever are imposed on the hidden variables, or on the dispersion-free states, it is trivially clear that such schemes can be found to account for any experimental results whatever. Ad hoc schemes of this kind are devised every day when experimental physicists, to optimize the design of their equipment, simulate the expected results by deterministic computer programs drawing on a table of random numbers*". Ha precisato, tuttavia: "*such schemes ... are not very interesting. Certainly what Einstein wanted was a comprehensive account of physical processes evolving continuously and locally in ordinary space and time*"[6].

Il fisico Stanley P. Gudder spiega la contraddizione tra le prove di possibilità e di impossibilità nel seguente modo: "*The proponents of hidden variable theories have an idea of what these theories should be and have given examples of such theories. The antagonists have a different idea of what a hidden variable theory should be and have proved that such theories are impossible in the present general framework of quantum mechanics. These proofs are irrelevant since they do not refer to the hidden variable theories as formulated by the advocates of the-*

*se theories*¹⁶". Lo stesso Gudder dimostrò che è sempre possibile costruire una teoria a variabili nascoste.

Ovviamente, non stiamo affermando che la teoria quantistica standard sia incompleta, e che pertanto risulti necessaria una teoria a variabili addizionali, ma semplicemente che non può essere smentita la possibilità che ciò si possa realizzare.

¹⁶S.P. Gudder. On hidden-variable theories. *Journal of Mathematical Physics*, 11, 2:431–436 (1970)

Capitolo 7

Alternative alla visione standard

Nel cap.5 abbiamo compreso che, se la teoria quantistica (in particolare, solo il suo carattere lineare, cioè il principio di sovrapposizione) è analizzata come quadro concettuale per descrivere la realtà, allora ciò comporta il verificarsi di situazioni che non sono compatibili con la determinatezza e la precisione del mondo macroscopico che percepiamo. Dobbiamo inevitabilmente accettare il fatto che un sistema macroscopico possa essere descritto da uno stato che è una sovrapposizione lineare di due o più stati, ognuno dei quali corrisponde ad una situazione macroscopica distinta e ben definita ("il puntatore è in questa posizione"+"il puntatore è in quest'altra posizione" oppure "gatto vivo"+"gatto morto"). E ancora, a causa del + tra i termini della sovrapposizione, questa situazione non ci permette di affermare (a meno che non elaboriamo una nuova, più appropriata ipotesi riguardante l'interpretazione della meccanica quantistica) che una o l'altra tra le alternative è quella che caratterizza il sistema individuale quando esso viene sottoposto a misura.

Per questo motivo, durante gli anni in cui questo problema fu soggetto di dibattito, vennero proposte numerose alternative nel tentativo di darne una risposta soddisfacente. In questo capitolo esamineremo alcune tra queste proposte, concentrandoci sulle loro caratteristiche più importanti, con particolare riferimento al problema della misura e ai sistemi macroscopici. Inoltre, anche in questo caso ci limiteremo ad una trattazione non-relativistica, per le stesse ragioni espresse nel cap.6.

Un modo appropriato per comprendere gli elementi essenziali delle va-

rie soluzioni al cosiddetto problema dell'oggettivazione delle proprietà macroscopiche di un sistema fisico, consiste nel considerare gli elementi essenziali del formalismo. La meccanica quantistica, come ogni altra teoria fisica dai tempi della rivoluzione Galileiana, tiene conto dei processi fisici per mezzo di un formalismo che ci fornisce informazioni su:

- 1-Come gli stati di un sistema fisico di nostro interesse dovrebbero essere descritti
- 2-Quali entità saranno associate alle quantità fisiche misurabili
- 3-Come muoversi dalla conoscenza dello stato del sistema ad un certo istante di tempo, alla sua conoscenza in tempi successivi
- 4-Come ottenere da una conoscenza dello stato informazioni su risultati relativi ad eventuali misurazioni future

All'interno della struttura della meccanica quantistica, questi aspetti sono rappresentati, rispettivamente, da:

- 1-Il vettore di stato
- 2-Le osservabili del sistema
- 3-L'equazione di evoluzione
- 4-La regola di Born

Un prima distinzione tra le soluzioni che verranno proposte riguarderà come caratterizzeranno formalmente lo stato di un sistema fisico individuale. La questione può essere riassunta dalle seguenti domande: la meccanica quantistica è completa o deve essere completata? In altre parole, ci stiamo chiedendo: il vettore di stato rappresenta la descrizione più accurata possibile di un sistema fisico individuale? Se la risposta a questa domanda è affermativa, la posizione è *formalmente* identica a quella ortodossa. Se d'altra parte, la risposta è negativa, allora dobbiamo prendere la strada delle *teorie a variabili nascoste*, anche chiamate *teorie a variabili addizionali*, che abbiamo discusso nel capitolo precedente.

Adesso esaminiamo la prima ipotesi, cioè assumiamo che la teoria standard sia completa, che è come dire che gli stati descrittivi i sistemi fisici individuali siano esaustivamente descritti dai vettori di stato. Stabilito ciò, un'intera famiglia di possibili soluzioni tenta di aggirare il problema

che tanto ci tormenta, assumendo un posizione molto "strana" riguardo il mondo fisico. Questo è il caso delle interpretazioni a *molti mondi*.

Un altro elemento essenziale del formalismo a cui possiamo ricorrere per aggirare questi ostacoli è l'equazione evolutiva della teoria. Infatti, come già osservato, la meccanica quantistica, già nella sua formulazione ortodossa, assume che l'evoluzione lineare non abbia validità generale: quando avviene un processo di misura è necessario "sospendere" l'evoluzione lineare data dall'equazione di Schrodinger, per fare ricorso alla dinamica della riduzione del pacchetto. Emerge così un fondamentale dualismo dei processi fisici. Il vero problema diventa quello di identificare esattamente quando, per un dato sistema fisico ed una specifica situazione, occorre usare uno o l'altro principio. Un modo per risolvere il problema consiste nel modificare l'equazione di Schrodinger, sostituendola con un'equazione che soddisfi entrambe le dinamiche, non entrando così in conflitto con le predizioni della teoria standard per i microsistemi, e al tempo stesso inducendo una *riduzione dinamica spontanea*, risolvendo il problema delle "imbarazzanti" sovrapposizioni macroscopiche, ottenendo in questi casi la riduzione in uno solo dei termini non-ambigui, e ciò in un tempo brevissimo.

Le interpretazioni alternative che verranno descritte in questo capitolo, e le teorie a variabili addizionali analizzate nel capitolo precedente, non esauriscono tutte le soluzioni proposte nel corso degli anni. In questo capitolo ho scelto di descrivere solo quelle che rappresentano, a mio avviso, delle valide alternative all'interpretazione standard, anche se alcune (es. QBism) non danno una visione realista, cosa che invece ritengo strettamente necessaria. Nonostante ciò, tutte propongono una soluzione al problema della misura, di cui abbiamo parlato nel cap.5. Infatti, ci soffermeremo proprio su questo punto nel descrivere queste interpretazioni.

Desideriamo precisare che le teorie qui proposte non le consideriamo come leggi assolute e finali, o in generale come teorie definitive poste ad un livello superiore rispetto a quella attuale. Piuttosto, sono da considerare come considerazioni provvisorie con le quali partiamo, e con le quali speriamo di andare avanti, che necessitano di un processo di arricchimento e di affinamento. Ci auguriamo che questo processo porti a teorie superiori che ci permetteranno di risolvere gli attuali problemi della teoria quantistica nella sua formulazione ortodossa.

7.1 Interpretazione statistica

Questa classe di interpretazioni non elimina la possibilità di descrivere singoli sistemi fisici, ma specifica che la descrizione data da un vettore di stato si può applicare solo ad una collezione di sistemi preparati nelle stesse condizioni, non a singoli sistemi (o singoli esperimenti). Einstein sostenne questo punto di vista: per esempio, in una lettera a Schrodinger scritta nel 1935, scrive: *"The ψ function does not describe the state of a single system but (statistically) an ensemble of systems¹"*.

La funzione ψ conterrebbe dunque informazioni simili a quelle contenute in una distribuzione nello spazio delle fasi della fisica statistica classica, che infatti non è la descrizione più precisa di un sistema fisico. ψ è solo uno strumento matematico che rappresenta *informazioni statistiche* che ci permettono di calcolare le probabilità che si verifichino certi fenomeni. Ad esempio, nel caso del gatto di Schrodinger, ricaviamo l'informazione che, facendo l'esperimento molte volte, in metà di esse avremo un gatto vivo, nelle restanti uno morto.

In questo contesto è di interesse storico notare che Max Born sostenne l'interpretazione statistica almeno in due occasioni. La prima poco dopo aver proposto la sua originale interpretazione probabilistica della funzione d'onda:

"The quantum theoretical description...does not answer...the question of where a certain particle is at a given time. In this respect the quantum theory is in agreement with the experimentalists, for whom microscopic coordinates are also out of reach, and who therefore only count instances and indulge in statistics. This suggests that quantum mechanics similarly only answers properly-put statistical questions, and says nothing about the course of individual phenomena. It would then be a singular fusion of mechanics and statistics"(10 agosto 1926).

La seconda dopo la pubblicazione del volume di Shilpp[36], in cui si racconta che Born scrisse ad Einstein che era d'accordo con l'interpretazione statistica a che *"the difference[in their views] is not essential, but merely a matter of language²"*.

Un altro sostenitore dell'interpretazione statistica fu il fisico John Clarke Slater. In un simposio sulla meccanica quantistica, tenutosi sotto gli

¹A.Einstein, lettera a Schrodinger (8 agosto 1935)

²M.Born, Physical aspects of quantum mechanics, Nature, 119, 354-357 (1927)

auspici dell'American Physical Society a New York il 31 dicembre 1928, dichiarò: "*wave particle is an extension, not of ordinary Newtonian mechanics, but of statistical mechanics; and this simple observation is enough to explain many of its otherwise puzzling features*".

All'interno dell'interpretazione statistica, sono logicamente possibili due orientamenti:

1-Non potendo descrivere singoli sistemi, la teoria non è completa; devono essere specificate ulteriori variabili che identifichino il singolo sistema all'interno della collezione. Ciò porta ad introdurre nuovi elementi descrittivi in aggiunta al vettore di stato, cioè all'introduzione di variabili addizionali. Ballentine osserva che "l'introduzione di variabili nascoste è perfettamente compatibile con le predizioni statistiche della teoria quantistica³". Proprio come nel caso della meccanica statistica classica, questo punto di vista assume che ogni sistema, di qualunque dimensione, ha proprietà ben definite prima della misura e che la misurazione semplicemente riveli qualcosa di preesistente (come il termine "misura" suggerisce). Ovviamente, ciò non significa che possiamo predire o controllare queste proprietà, ma semplicemente possiamo pensarle come esistenti prima delle nostre misurazione e come rivelate da queste.

Viste in questi termini, le probabilità in meccanica quantistica non sono molto diverse da quelle classiche: riflettono semplicemente la nostra ignoranza, proprio come lo stato quantico riflette la nostra incompleta conoscenza del sistema fisico. Quando misuriamo una certa quantità fisica, semplicemente impariamo qualcosa riguardante il sistema, modificando il nostro stato (o le nostre probabilità) di conseguenza. Ciò comporta che la meccanica quantistica è incompleta; la definizione di incompletezza consiste nel fatto che un sistema individuale è caratterizzato da variabili aggiuntive allo stato quantico e che quest'ultimo ha solo un significato statistico.

Facendo un'analogia con il lancio di una moneta, dopo il lancio, apprendere che il risultato è testa o croce ha fatto sì che noi cambiassimo le probabilità di avere testa o croce da $(1/2, 1/2)$ (prima di guardare) a $(1, 0)$ o $(0, 1)$, in base al risultato. Così, il collasso della funzione d'onda altro non

³L.E. Ballentine, The statistical interpretation of quantum mechanics, Rev. Mod.Phys. 42, 358–381 (1970)

è che un "aggiustamento delle probabilità". Naturalmente, l'evoluzione temporale dello stato quantico, che tiene conto degli effetti di interferenza, è molto diversa da quella riscontrata nell'applicazione della teoria delle probabilità in fisica classica. Ma l'evoluzione temporale dello stato ed il suo status sono due cose separate, e non c'è nulla *a priori* di inconsistente nel pensare che lo spin di una particella sia up/down prima della misura o che la particella passi per una o l'altra fenditura. Dobbiamo semplicemente prendere in considerazione il fatto che il comportamento della particella dopo aver attraversato una fenditura sia influenzato dal fatto che l'altra fenditura sia aperta o meno.

2- Questa teoria, che descrive solo collezioni di sistemi, è perfettamente soddisfacente. Se un singolo esperimento è eseguito, avviene un processo fondamentalmente casuale da cui viene selezionato un singolo risultato; nessun tentativo viene fatto per spiegare questo processo. Questa è, in qualche modo, una versione moderna dei "salti quantici". Portare quest'atteggiamento alle sue estreme conseguenze condurrebbe verso quella che il fisico Anthony James Leggett chiama "interpretazione statistica estrema"⁴, secondo la quale nessun significato fisico può essere attribuito, dal formalismo della meccanica quantistica, a nessun livello, macroscopico o microscopico. Vedremo esempi di queste estremizzazioni nella sezione successiva.

Tralasciando il punto 2, il "problema della misura" in qualche modo rimane. La teoria quantistica diviene così una teoria incompleta che si riferisce solo a collezioni, e non descrive completamente sistemi fisici singoli o le loro relazioni con i singoli sistemi macroscopici. L'interpretazione statistica non dà conto di ciò che accade, ad esempio, quando un singolo elettrone viene osservato: essa parla solo di distribuzioni di (macroscopicamente registrati) risultati di misura su una collezione di esperimenti simili. Né l'interpretazione statistica fornisce una distinzione netta tra oggetti macroscopici e microscopici individuali, non avendo una descrizione di questi ultimi.

Nell'interpretazione statistica dunque, una soluzione al problema della

⁴A.J. Leggett, Probing quantum mechanics towards the everyday world: where do we stand?, *Physica Scripta* T102, 69–73 (2002)

misura in un senso generale richiede una descrizione completa di sistemi singoli. Probabilmente, Einstein apprezzava questa visione perché la considerava una sorta di "ponte" verso una teoria completa della meccanica quantistica.

Nonostante diversi fisici guardassero con favore all'interpretazione statistica della meccanica quantistica, fino agli anni '60 essa ebbe pochissimi sostenitori. Una delle ragioni di questo stato di cose era senza dubbio la grande autorità che Bohr, Heisenberg ed altri importanti protagonisti dell'interpretazione di Copenaghen esercitavano nell'ambito della meccanica quantistica. Il secondo riguarda il fatto che, in quegli anni, la prova dell'impossibilità di von Neumann era considerata conclusiva. Poiché l'esistenza di singoli sistemi fisici in natura è un fatto incontestabile, sarebbe ragionevole, come già detto, aspettarsi che un'interpretazione statistica sia solo il primo passo verso una teoria che descriva il comportamento dei sistemi singoli; ma una tale teoria, per conformarsi allo spirito del punto di vista statistico, e tralasciando il punto di vista 2 chiaramente antirealista (che Einstein e la maggior parte dei sostenitori dell'interpretazione statistica non avrebbero certamente approvato), sarebbe necessariamente una teoria a variabili nascoste, la cui validità era stata "smentita" da von Neumann.

7.2 Interpretazione relazionale

Il punto di vista "relazionale" della meccanica quantistica fu introdotto da Carlo Rovelli⁵ nel 1996.

Nell'interpretazione relazionale viene negata la nozione di stato assoluto, indipendente dall'osservatore, di un sistema fisico: osservatori diversi possono fornire resoconti diversi di eventi, utilizzando diversi vettori di stato. Ma la differenza non deriva dall'uso di diversi sistemi di riferimento; nasce da diverse informazioni a disposizione degli osservatori, o in modo più concreto dall'utilizzo di differenti apparati di misura per fare osservazioni. Le proprietà fisiche dei sistemi non sono quindi viste come assolute, ma come dipendenti dall'apparato utilizzato per misurarle. La

⁵C.Rovelli, Relational Quantum Mechanics, *International Journal of Theoretical Physics* (1996)

meccanica quantistica è considerata come una "teoria dell'informazione". Nelle parole di Rovelli: "*A quantum description of the state of a physical system S exists only if some system O, considered as an observer, is actually 'describing' S or, more precisely, has interacted with S. The quantum state of a system is always a state of that system with respect to other systems*"(Rovelli,1996).

In questa interpretazione, la riduzione (o collasso) assume un ruolo ben diverso da ciò che rappresenta nell'ortodossia di Copenaghen. Ad esempio, per un dato sistema quantistico, alcuni osservatori potrebbero considerare che il collasso si sia già verificato, mentre per altri esso non è ancora avvenuto, cioè per loro il sistema rimane in una sovrapposizione coerente. Nell'interpretazione di Copenaghen, gli apparati di misura e gli osservatori giocano un ruolo centrale, così come le differenze tra il mondo microscopico ed il mondo che è direttamente accessibile alla nostra esperienza umana. Nell'interpretazione relazionale, questo diventa superfluo. Tutti i sistemi fisici sono considerati uguali, senza alcuna considerazione riguardante il carattere necessariamente macroscopico degli apparati di misura. Secondo Rovelli, l'osservatore non fa alcun riferimento ad un sistema cosciente, animato o informatico, in maniera "speciale". Ogni sistema fornisce il proprio sistema di riferimento, rispetto al quale può essere assegnato uno stato ad un altro sistema. Spiega Rovelli: "*The thesis... is that by abandoning such a notion (in favour of the weaker notion of state - and values of physical quantities — relative to something), quantum mechanics makes much more sense*"(Rovelli,1996).

Ad esempio, considerando due elettroni entangled, si concluderebbe che, sebbene l'osservatore non abbia informazioni sullo stato di un singolo elettrone, l'elettrone "sa" in quale stato si trova l'altro. Rispetto ad un elettrone, l'altro ha uno stato definito. Ovviamente, qua stiamo incontrando i limiti del linguaggio, quando associamo il termine "conoscenza" ad un singolo elettrone, ma ciò è legato al fatto che Rovelli utilizza il termine *informazione* in un senso molto più fisico, in una forma che può essere manifestata anche in oggetti inanimati: "*a pen on my table has information because it points in this or that direction. We do not need a human being, a cat, or a computer, to make use of this notion of information*"(Rovelli,1996).

Rovelli non nega l'esistenza di una realtà oggettiva di entità come gli elettroni. Ci sono cose oggettive, indipendenti da qualunque osservatore, che esistono quando nessuno le guarda. Ma, come ha sostenuto Kant, non

possiamo scoprire nulla su questi. Ha senso parlare dei loro stati quantici e delle loro proprietà solo quando stabiliscono una relazione con un altro sistema. Ciò dunque non mette in discussione il realismo, ma piuttosto il realismo scientifico. Secondo Rovelli, la meccanica quantistica riguarda solo le *relazioni* tra le cose, non le proprietà reali delle cose fisiche indipendenti dalla relazione. Pertanto, le relazioni matematiche che si usano in meccanica quantistica non si riferiscono agli stati fisici indipendenti dei sistemi quantici, ma solo all'*informazione* sul sistema quantico derivata dalla nostra esperienza.

Quest'interpretazione relazionale di Rovelli non richiede in alcun modo di attribuire un significato speciale al processo di misurazione, il quale viene considerato un'interazione fisica come le altre, senza un ruolo speciale all'interno della teoria. Ma, ovviamente, la misurazione è fondamentale in quanto è così che acquisiamo informazioni sui sistemi quantistici.

7.3 QBism

Come abbiamo preannunciato parlando dell'interpretazione statistica, si può andare oltre, in questa direzione, e assumere un punto di vista informativo estremo, dove ψ è completamente disconnesso dalla realtà fisica; ciò che viene quindi considerato è solo il contenuto informativo del vettore di stato ψ . Quest'interpretazione si chiama *QBism*, ed è una tra le più recenti della meccanica quantistica, strettamente collegata a quella che il fisico Alain Aspect definisce come la "seconda rivoluzione quantistica", cioè l'avvento dell'informazione quantistica⁶.

QBism sta per Bayesianismo Quantistico. La visione Bayesiana soggettiva delle probabilità considera esse come semplici "giudizi": se viene lanciata una moneta e non guardiamo il risultato, è razionale, supponendo la simmetria della situazione, assegnare le probabilità $(1/2, 1/2)$ ad ogni faccia della medaglia. Ma se si guarda il risultato, quelle probabilità diventano $(1,0)$ o $(0,1)$. Se Alice ha visto il risultato, ma Bob no, le sue probabilità sono cambiate quelle di Bob no. Se Alice comunica il risultato a Bob (e lui pensa che lei sia affidabile), allora Bob aggiorna le sue probabilità. Pertan-

⁶Vedere l'introduzione di Alain Aspect in [6]

to, le probabilità riflettono semplicemente il nostro grado di conoscenza del mondo e nient'altro, quindi individui diversi assegnano probabilità diverse allo stesso evento. Ciò vale anche per le situazioni più complicate: un medico può assegnare probabilità diverse alla salute di un paziente rispetto al paziente stesso, e un meteorologo assegnerà probabilità diverse, sulle condizioni meteo di domani, rispetto all'uomo per strada. Fin qui non c'è nulla di sorprendente, paradossale o contro-intuitivo. QBism vuole estendere questa visione "soggettiva" alle probabilità quantistiche. Dal momento che esse sono definite in termini di stati quantici, perché non dare a questi ultimi un significato puramente soggettivo? Per un QBist, lo stato quantico è semplicemente qualcosa che *assegno* al mondo. Fuchs e Peres scrivono: "*the time dependence of the wavefunction does not represent the evolution of a physical system. It only gives the evolution of our probabilities for the outcomes of potential experiments on that system. This is the only meaning of the wavefunction*⁷".

Pertanto, per un QBist, non c'è nulla di sorprendente nella riduzione di un pacchetto: proprio come aggiorno le mie probabilità quando imparo qualcosa sul mondo, aggiorno il mio stato quantico dopo la misurazione, come spiegano Fuchs, Mermin e Schack: "*Quantum states determine probabilities through the Born rule. Since probabilities are the personal judgments of an agent, it follows that a quantum state assignment is also a personal judgment of the agent assigning that state. The notorious 'collapse of the wave-function' is nothing but the updating of an agent's state assignment on the basis of her experience*⁸". Adottando questa visione, è facile capire che non ci sono problemi nella situazione dell'amico di Wigner discussa nella sez.5.2.1, poichè per i QBists non c'è nulla di obiettivo sullo stato quantico, quindi non può esserci un collasso "oggettivo" dello stato; si ha solo un "aggiornamento di informazione". Una funzione d'onda che consiste solo di informazioni non è "obbligata" a subire una sorta di collasso fisico discontinuo.

Il QBism può essere considerato un ritorno all'interpretazione di Copenhagen, ma in maniera molto più drastica, poichè secondo quest'ultima (almeno per come è generalmente intesa) un sistema fisico viene descrit-

⁷C. Fuchs, A. Peres, Quantum theory needs no 'interpretation'. Phys. Today 53, 70–71 (Marzo 2000)

⁸C. Fuchs, N.D. Mermin, R. Schack, An introduction to QBism with an application to the locality of quantum mechanics. Am. J. Phys. 82, 749–754 (2014)

to da uno stato quantico, ed esso individua proprietà oggettive frutto del processo di amplificazione in seguito all'interazione sistema-apparato, e pertanto, anche se è solo uno strumento che ci permette di prevedere i risultati delle misurazioni, sono comunque risultati oggettivi, non giudizi. Ma sorge spontanea una domanda: se lo stato quantico ci fornisce informazioni e basta, informazioni su cosa? Se il mondo è fondamentalmente quantistico, e se il concetto quantistico più basilare è lo stato quantico e se questo non è oggettivo, allora cosa lo è? Nella meccanica quantistica ordinaria, si può ignorare il *vero* stato quantico, nel qual caso si assegna una distribuzione su questi stati, che è quindi simile ad una probabilità classica. Ma per il QBism non esiste uno stato quantico vero, così come non esiste una vera probabilità che la moneta sia testa o croce (prima di guardare). Ci sono solo gradi di informazione. Ma, sempre riprendendo l'esempio della moneta, c'è un dato di fatto che si tratta di testa o croce (dopo l'osservazione). Le nostre informazioni, o la loro mancanza, si riferiscono a qualcosa "là fuori". Se assegno 1 alla probabilità testa o croce, a seconda del risultato, è perchè ho imparato un fatto sul mondo esterno. Anche quando si assegnano probabilità (1/2,1/2), ciò è dettato dal fatto che si ipotizza che la moneta sia simmetrica, il che è un dato di fatto sulla moneta. È sempre la mia conoscenza di qualcosa che è fuori che mi guida.

A volte si suggerisce che le informazioni riguardino solo il mondo macroscopico, o anche solo i risultati delle misurazioni. Fuchs e Peres proseguono: *"The thread common to all the nonstandard "interpretations" is the desire to create a new theory with features that correspond to some reality independent of our potential experiments. But, trying to fulfill a classical worldview by encumbering quantum mechanics with hidden variables, multiple worlds, consistency rules, or spontaneous collapse, without any improvement in its predictive power, only gives the illusion of a better understanding. Contrary to those desires, quantum theory does not describe physical reality. What it does is provide an algorithm for computing probabilities for the macroscopic events ('detector clicks') that are the consequences of our experimental interventions. This strict definition of the scope of quantum theory is the only interpretation ever needed, whether by experimenters or theorists"*(Fuchs, Peres, 2000).

Ma così ci imbattiamo nel solito problema di come costruire un *vero* mondo macroscopico da uno *non reale* microscopico, come hanno evidenziato

Dennis e Norsen, in risposta a Fuchs e Peres: *"Instead, FP's answer is that the probabilities calculated in quantum theory refer only to macroscopic events. But this simply places a different name on the same ambiguity that had previously been shuffled under the idea of 'measurement'. Where exactly is the cut between micro- and macroscopic, and why should such a cut enter into the fundamental laws of physics? If one electron is not objectively real, and two electrons are not objectively real, why should a collection of 10^{23} electrons be real? Things like temperature and elasticity may be emergent properties, but surely existence as such is not. Nothing real can emerge from that which doesn't exist"*⁹.

Ma in molti casi, i QBists affermano che, a loro avviso, la meccanica quantistica riguarda solo le esperienze soggettive, e non il mondo esterno, nemmeno quello macroscopico. Ad esempio, riguardo alla questione di cosa siano le informazioni, Mermin scrive: *"Partly from my associations with quantum computer scientists and partly from endless debates with constructivist sociologists of science, I have come to feel that "Information about what?" is a fundamentally metaphysical question that ought not to distract toughminded physicists. There is no way to settle a dispute over whether the information is about something objective, or is merely information about other information. Ultimately it is a matter of taste, and, like many matters of taste, capable of arousing strong emotions, but in the end not really very interesting"*¹⁰, e Fuchs: *"Whose information?" 'Mine!' Information about what? 'The consequences (for me) of my actions upon the physical system!' Its all 'I-I-me-me mine', as the Beatles sang"*¹¹. Questo radicale idealismo sembra condurre ad una forma di relativismo, come si evince dalle parole di Fuchs: *"A child awakens in the middle of the night frightened that there is a monster under her bed, one soon to reach up and steal her arm—that we-would-call-imaginary experience has no less a hold on onticity than a Higgs-boson detection event would if it were to occur at the fully operational LHC. They are of equal status from this point of view — they are equal elements in the filling out and making of reality"* (Fuchs, 2010). Naturalmente, i Qbists affermano di non essere solipsisti (persone che scrivono articoli e libri per convincere gli altri delle loro opinioni rara-

⁹E. Dennis, T. Norsen, Quantum theory: interpretation cannot be avoided. arxiv.org/abs/quant-ph/0408178 (2018, preprint 2004)

¹⁰D. Mermin, Whose knowledge?, in [8]

¹¹C. Fuchs, QBism: the perimeter of quantum Bayesianism (2010). arxiv.org/abs/1003.5209v1

mente affermano di essere solipsisti), ma se la fisica è solo un aggiornamento delle mie esperienze soggettive, in che senso differisce dal solipsismo?

Notiamo inoltre che da questo punto di vista il paradosso EPR non presenta alcun problema: Alice, quando misura, sa un'informazione, e la descrive con un certo stato. Bob, d'altra parte, non ha le stesse informazioni di Alice, e descrive il sistema con un altro stato. Inoltre, il QBism descrive la situazione in termini perfettamente *locali*, poiché la non-località nasce dal supporre che lo stato sia unico per entrambi gli osservatori, e che venga modificato in maniera obiettiva. Infatti, nel momento in cui Alice e Bob decidono di diventare QBists, non dovrebbero chiedersi quali proprietà oggettive possieda il mondo in modo da aggiornare i loro stati quantici, ma devono limitarsi ad aggiornare i loro *stati mentali soggettivi*, che ognuno descrive formalmente con uno stato quantico.

Se la funzione d'onda è solo un'informazione codificata, non è necessario che essa sia conforme alle leggi fisiche o ai processi meccanici. Le informazioni non sono "locali" o "non locali". Esse possono cambiare istantaneamente (sebbene qualsiasi tentativo di comunicare queste informazioni sarà vincolato dalla teoria della relatività speciale).

In questi termini, si capisce che ciò non significa che abbiamo risolto il paradosso EPR in maniera locale. Semplicemente, il QBism non si pone il problema, poiché adotta un punto di vista che rifiuta di affrontare la questione, assumendo, in un certo modo, sì una visione locale, ma anche solipsista.

Infatti, questa è un'interpretazione a "utente singolo". Le esperienze e i gradi di credenza sono unici per l'individuo: le probabilità bayesiane non hanno senso se applicate a molti individui contemporaneamente. Con questa visione, la natura soggettiva delle nostre esperienze individuali comporta che tutti noi portiamo nella nostra mente "versioni differenti della realtà". Ma allora, come è possibile fare scienza in questo modo?

Le versioni della realtà che abbiamo nelle nostre menti sono comunque plasmate dalle nostre esperienze su un'unica, esterna, Realtà Empirica. Come risultato delle nostre esperienze, interagendo con i nostri simili,

sviluppiamo quello che il filosofo John Searle chiama *background*¹², uno sfondo ampio e vario rispetto al quale interagiamo con la realtà esterna. È tutto ciò che impariamo dall'esperienza e diamo per scontato, mentre viviamo la nostra vita quotidiana. Il background è dove troviamo tutte le regolarità e la continuità, l'aspettativa che il Sole domani sorgerà, che le cose si trovino dove le abbiamo lasciate, che le auto non si trasformino in alberi.

Ognuno di noi forma lo sfondo accumulando una serie di impressioni mentali. Ma queste hanno una grande somiglianza, derivata da un ampio insieme di esperienze comuni (comprese le esperienze di fisica quantistica), un corpo di conoscenza comune, forme di comunicazione comunemente accessibili. È la stretta somiglianza di questi background individuali che rende possibile l'interazione umana. Attraverso la straordinaria complessità delle nostre interazioni quotidiane, percepiamo queste realtà separate come una cosa sola.

È facile pertanto comprendere che il QBism è una posizione sfacciatamente antirealista, non ha nulla di significativo nei riguardi di ciò che sta alla base di tutte le nostre esperienze. Nel QBism, tutta la fisica al di là della nostra esperienza è in linea di principio inaccessibile.

È importante osservare che questo punto di vista può essere applicato, senza particolare problemi, anche alla meccanica classica, in cui codifichiamo la nostra esperienza in equazioni che rappresentano il comportamento degli oggetti classici, utilizzando grandezze come massa, velocità, quantità di moto ed accelerazione¹³. Probabilmente, questa visione bayesiana si è sviluppata in un contesto quantistico, poichè nel descrivere il microcosmo ci troviamo di fronte alle strane conseguenze derivanti dall'adozione di una prospettiva realista.

¹²*Intentionality. An essay in the philosophy of mind* (Cambridge University Press, Cambridge, 1983)

¹³David Mermin parla di CBism, l'analogo classico del QBism. Vedere a tal proposito N.D.Mermin, Making Better Sense of Quantum Mechanics (5 settembre 2018)

7.4 Collasso spontaneo (teoria GRW)

L'idea principale del collasso spontaneo risale alla teoria di Bohm-Bub (1966), che abbiamo accennato nella sez.6.3. In quest'ultima, le variabili nascoste sono una sorta di campo di fondo, che influenza l'evoluzione della funzione d'onda e comporta una deviazione dall'evoluzione "normale" descritta dall'equazione di Schrodinger.

Questo spinse Philip Pearle e anche, un po' più tardi, Nicolas Gisin - entrambi molto interessati al problema della misura nella MQ standard - a iniziare ad esplorare la possibilità di eventuali modifiche stocastiche nell'equazione di Schrodinger. Furono compiuti alcuni passi in avanti verso l'obiettivo di conciliare le dinamiche della funzione d'onda con la comparsa di risultati definiti, ma non è stato identificato alcun metodo sistematico per raggiungere lo scopo desiderato.

Una svolta è apparsa nel 1986, quando tre fisici italiani, Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini e Tullio Weber¹⁴, hanno preso in considerazione la *posizione*: se puoi ottenere le posizioni "esatte" delle cose macroscopiche, allora otterrai anche altre proprietà, poichè i risultati delle misurazioni di altre proprietà (energia, quantità di moto, spin, ecc...) sono sempre registrati dalla posizione di qualche oggetto macroscopico. Quindi GRW propose l'idea semplice ed elegante che le funzioni d'onda debbano occasionalmente (in maniera casuale, spontanea) localizzarsi in una posizione esatta. Nella teoria è "come se", in momenti selezionati casualmente, un osservatore esterno effettuasse una misurazione di posizione, e la funzione d'onda della particella collassasse (ma in un pacchetto d'onda gaussiano, piuttosto che in una delta). Ovviamente, il punto centrale della teoria GRW è evitare il problema di un misterioso "osservatore esterno", il cui intervento implichi un'eccezione al comportamento dinamico della funzione d'onda, per questo "come se". Secondo GRW, gli occasionali collapsi o "localizzazioni" della funzione d'onda dovrebbero essere considerati puramente naturali - cioè come parte del modo ordinario ed universale in cui le funzioni d'onda evolvono nel tempo. L'evoluzione GRW ammonterà a: le funzioni d'onda si evolvono semplicemente secondo l'equazione di Schrodinger per la maggior parte del tempo, ad eccezione

¹⁴G.C. Ghirardi, A. Rimini, T. Weber, Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems. Phys. Rev. D 34, 470 (1986)

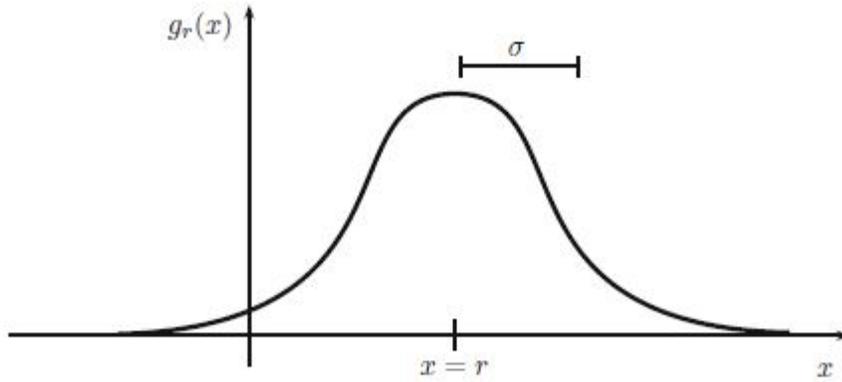


Figura 7.1: La localizzazione di una funzione d'onda, nella teoria GRW, consiste essenzialmente nel suo essere moltiplicata per la funzione gaussiana $g_r(x)$ mostrata in figura.

di questi momenti occasionali in cui invece subiscono una *localizzazione spontanea*. Alcuni pertanto ritengono che questa non sia un'interpretazione totalmente diversa dall'ortodossia di Copenaghen, ma piuttosto come un tentativo di sostituire le "chiacchiere" (su "misurazioni" e "osservatori") nella MQ standard, con una formalismo matematico ben preciso. Da questo punto di vista, la teoria del collasso spontaneo si viene a presentare come una "versione 2.0" della teoria standard.

Quindi, la teoria postula che la funzione d'onda di una singola particella evolva secondo l'equazione di Schrodinger

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} + V(x, t)\psi(x, t) \quad (7.1)$$

la maggior parte del tempo. Ma l'evoluzione di Schrodinger viene "interrotta" da localizzazioni occasionali. La parte legata all'evoluzione dell'equazione di Schrodinger è già stata ben compresa, quindi focalizzeremo la nostra attenzione sulla questione della localizzazione.

Si consideri la funzione gaussiana:

$$g_r(x) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{1}{4}}} e^{-(x-r)^2/4\sigma^2} \quad (7.2)$$

La funzione $g_r(x)$ è mostrata in Fig.7.1.

L'idea di base è che, durante un episodio di "localizzazione spontanea", la funzione d'onda venga moltiplicata per $g_r(x)$. Supponiamo che una localizzazione avvenga al tempo t . Dunque la funzione d'onda $\psi(x, t^+)$ subito dopo il tempo t sarà data da:

$$\psi(x, t^+) \sim g_r(x)\psi(x, t^-) \quad (7.3)$$

dove $\psi(x, t^-)$ è la funzione d'onda *prima* di t . Questa è l'idea di base. Dobbiamo notare che abbiamo scritto " \sim " invece di "=" perchè il prodotto sul lato destro non sarà, in generale, una funzione d'onda normalizzata in maniera appropriata.

Qual'è il valore di r , cioè *attorno* a quale punto la funzione d'onda viene localizzata? La risposta è *random*, con una distribuzione di probabilità:

$$P(r) = \int |g_r(x)\psi(x, t^-)|^2 dx \quad (7.4)$$

Ciò vuol dire che la probabilità di localizzarsi nel punto r è proporzionale a quella che possiamo considerare la probabilità associata al nuovo stato localizzato (ma non ancora normalizzato a 1), se la localizzazione avvenisse a r .

Analizziamo un paio di semplici esempi per chiarire l'idea.

Per cominciare, supponiamo di avere una funzione d'onda molto estesa, con un valore costante:

$$\psi(x, t^-) = \frac{1}{\sqrt{L}} \quad (7.5)$$

su una regione di larghezza L , con $L \gg \sigma$.

Adesso, al tempo t , diciamo che si verifica una localizzazione spontanea. Possiamo capire che la probabilità che si verifichi il collasso sia approssimativamente la stessa per ciascun punto r in cui la funzione d'onda $\psi(x, t^-)$ è diversa da zero. Infatti, è facile ottenere:

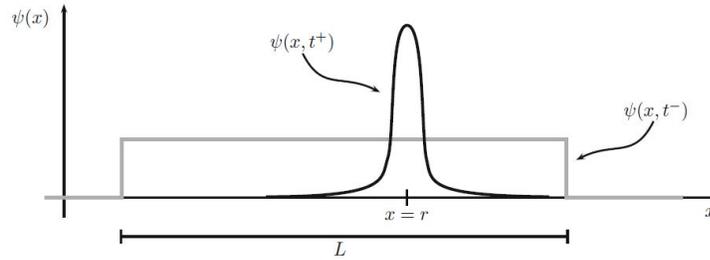


Figura 7.2: Se la funzione d'onda $\psi(x, t^-)$ è approssimativamente costante in una certa regione, una localizzazione spontanea la restringerà ad una gaussiana, di larghezza σ , centrata in un qualche punto r tra quelli per cui è diversa da zero, e la probabilità che ciò avvenga non dipenderà, approssimativamente, dal punto di localizzazione scelto, purché $\psi(x, t^-)$ sia diversa da zero in quel punto.

$$P(r) \approx \begin{cases} \frac{1}{L} & \text{dove } \psi(x, t^-) = 1/\sqrt{L} \\ 0 & \text{dove } \psi(x, t^-) = 0 \end{cases} \quad (7.6)$$

La situazione è descritta in Fig.7.2. Ovviamente, dopo la localizzazione, la funzione d'onda iniziale, essendo moltiplicata per la gaussiana $g_r(x)$, diventerà una gaussiana centrata casualmente in uno dei punti r , come si vede nella Fig.7.2.

Adesso vediamo un secondo esempio, in cui la funzione d'onda è inizialmente molto piccata:

$$\psi(x, t^-) \sim \delta(x - a) \quad (7.7)$$

Normalizzandola in una maniera non molto rigorosa, ma efficace per i nostri scopi:

$$\psi(x, t^-) = \frac{1}{\sqrt{\delta(0)}} \delta(x - a) \quad (7.8)$$

Supponiamo che si verifichi un localizzazione spontanea. Allora avremo:

$$P(r) = \int \left| \frac{g_r(x)\delta(x-a)}{\sqrt{\delta(0)}} \right|^2 dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(r-a)^2/2\sigma^2} = g_a(r)^2 \quad (7.9)$$

dunque $P(r)$ è una funzione gaussiana di larghezza σ centrata in $r = a$ dove la funzione era piccata all'inizio.

È facile ottenere che la funzione, dopo la normalizzazione, diventa:

$$\psi(x, t^+) = \psi(x, t^-) \quad (7.10)$$

E ciò ha perfettamente senso: una funzione δ è già massimamente localizzata, non può localizzarsi più di così!

Adesso ci chiediamo: quando accade questa localizzazione spontanea? Per una singola particella, assumiamo che la probabilità di localizzazione per unità di tempo sia:

$$\frac{dP}{dt} = \lambda \quad (7.11)$$

con λ una costante. Ciò comporta che la probabilità di localizzazione segue una legge Poissoniana, in cui:

$$\tau = t_{n+1} - t_n = 1/\lambda \quad (7.12)$$

Adesso, vediamo cosa accade per un sistema entangled di due particelle, ad esempio:

$$\psi(x_1, x_2, t^-) \sim \frac{1}{\sqrt{2}} [\delta(x_1 - a)\delta(x_2 - a) + \delta(x_1 + a)\delta(x_2 + a)] \quad (7.13)$$

Cosa accade se una delle due particelle è soggetta ad una localizzazione spontanea? Supponiamo che ciò accada alla particella 2:

$$\psi(x_1, x_2, t^+) = \frac{g_r(x_2)\psi(x_1, x_2, t^-)}{N(r)} \quad (7.14)$$

con $N(r)$ l'opportuno fattore di normalizzazione:

$$P(r) = N(r)^2 = \int |g_r(x_2)\psi(x_1, x_2, t^-)|^2 dx_1 dx_2 \quad (7.15)$$

ed ovviamente questa probabilità sarà grande attorno a $r = +a$ e $r = -a$. Supponiamo che questa particolare localizzazione accada per $r \approx +a$, allora:

$$\begin{aligned} \psi(x_1, x_2, t^+) &\sim g_a(x_2)\psi(x_1, x_2, t^-) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}[\delta(x_1 - a)\delta(x_2 - a)g_a(a) + \delta(x_1 + a)\delta(x_2 + a)g_a(-a)] \end{aligned} \quad (7.16)$$

Poichè il fattore $g_a(a)$ è il valore di g per $x = +a$, esso sarà molto grande, e $g_a(-a)$ molto piccolo, se la distanza $2a$ è molto maggiore di σ della gaussiana g . Così avremo:

$$\psi(x_1, x_2, t^+) = \delta(x_1 - a)\delta(x_2 - a) \quad (7.17)$$

(ignoriamo i fattori di normalizzazione, non importanti per i nostri scopi) che è lo stato in cui entrambe le particelle si trovano localizzate in $x = a$. Ovviamente avremmo potuto considerare la particella 1 quella localizzata, il discorso non cambia.

Adesso siamo nelle condizione per capire in che modo la localizzazione spontanea affronta il problema della misura.

Supponiamo di avere un numero molto grande di particelle:

$$N \approx 10^{23} \quad (7.18)$$

tipico ordine di grandezza di un sistema macroscopico. E supponiamo che si trovino in uno stato tipo quello considerato poc'anzi:

$$\begin{aligned} &\psi(x_1, x_2, \dots, x_N, t^-) \\ &\approx \frac{1}{\sqrt{2}}[\delta(x_1 - a)\delta(x_2 - a)\dots\delta(x_N - a) + \delta(x_1 + a)\delta(x_2 + a)\dots\delta(x_N + a)] \end{aligned} \quad (7.19)$$

dunque, se una qualunque particella si localizzasse, *tutte* le N particelle si localizzerebbero:

$$\psi(x_1, x_2, \dots, x_N, t^+) \approx \delta(x_1 - r)\delta(x_2 - r)\dots\delta(x_N - r) \quad (7.20)$$

come visto nel caso di due particelle, dove $r = a$ o $r = -a$ con probabilità 50/50.

Adesso, supponiamo che:

$$\lambda \approx 10^{-16} s^{-1} \quad (7.21)$$

da ciò segue:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \approx 10^{16} s = 3 * 10^8 \text{ anni} \quad (7.22)$$

Dunque, nel caso di una sola particella, il tempo medio tra due localizzazioni è circa 300 milioni di anni!!! Ciò comporta che la localizzazione spontanea è un evento molto raro per una singola particella. L'aver assunto un tempo così grande risulta giustificato dal fatto che, se ad esempio consideriamo il fenomeno della doppia fenditura, la delocalizzazione non avviene, infatti ho la figura di diffrazione.

Ma nel caso di $N = 10^{23}$ particelle, il tempo medio tra due delocalizzazioni diviene:

$$\tau \approx 30 \text{ ns} \quad (7.23)$$

Dunque, un sistema macroscopico subirà una rapida delocalizzazione (si parla spesso di *collasso spontaneo*) che spiega il perchè non si osservano fenomeni di interferenza a livello macroscopico ("gatto vivo" e "gatto morto").

In un modo simile si risolve il problema della misura. Come ormai dovrebbe essere familiare, considerando il tipico caso di una particella in una scatola, all'istante t l'unione sistema+apparato di misura è descritto da:

$$\psi(x, y, t) = \sum_i c_i \psi_i(x, t) \phi_0(y - \lambda E_i t) \quad (7.24)$$

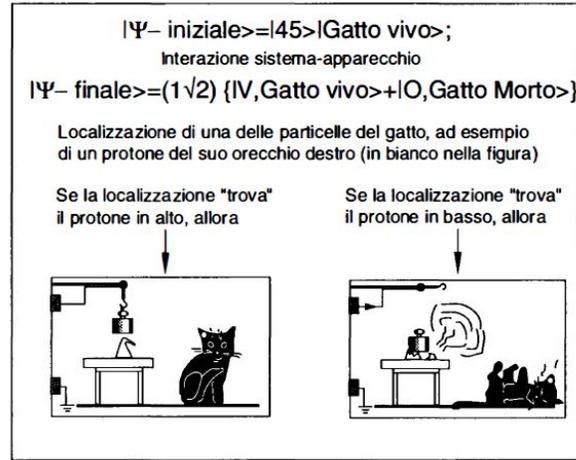


Figura 7.3: La visione del celebre gatto di Schrodinger che consegue all'adozione del punto di vista dei modelli di riduzione dinamica

con ψ_i gli autostati dell'energia della particella, e ϕ_0 un pacchetto gaussiano stretto che rappresenta la posizione del centro di massa delle 10^{23} particelle che formano il puntatore.

La particella nella scatola è una sola, così la probabilità di localizzazione spontanea è molto rara. Ma non è così per le tante particelle che compongono il puntatore dell'apparato di misura. In questo modo, prima che noi possiamo notare eventuali sovrapposizioni a livello macroscopico, sarà avvenuta la localizzazione per cui il puntatore avrà un ben definito valore, ad esempio $\lambda E_2 t$.

Dunque, a differenza della MQ standard, non è necessario introdurre un'ipotesi ad hoc come quella del *collasso* della funzione d'onda. Possiamo dunque osservare come questa interpretazione risolve due importanti problemi della teoria della misura: il collasso della funzione d'onda e la distinzione tra sistema microscopico e macroscopico, aspetti alquanto problematici nell'interpretazione standard, come abbiamo avuto modo di osservare nel Cap.5. Adesso vediamo altri aspetti di questa teoria.

Ontologia della funzione d'onda

Nella sez.5.4 abbiamo visto il problema che Schrodinger affrontò nel tentativo di costruire una teoria senza nient'altro che la funzione d'onda. Adesso, con la teoria GRW, il problema del collasso sembra essere risolto, dunque il problema della sovrapposizione nella funzione d'onda anche per un sistema macroscopico, che come abbiamo visto viene ereditato dalla ρ :

$$\rho(x, t) = m_i \int |\psi(x_1, x_2, \dots, x_N, t)|^2 \delta(x_i - x) dx_1 dx_2 \dots dx_N \quad (7.25)$$

non è più un problema, dato il rapido collasso che avviene per un sistema macroscopico. Adesso, $\rho(x, t)$ associata alla funzione d'onda corrisponderà ad una sola tra le possibilità macroscopiche.

Qualsiasi imbarazzante ambiguità macroscopica della teoria standard risulta, del tutto in generale, solo momentanea nella teoria di GRW. Il gatto non è sia vivo sia morto *per più di un'infinitesima frazione di secondo*. Ciò è illustrato in fig.7.3.

Dal mio punto di vista, questa soluzione non è del tutto soddisfacente, per diverse ragioni:

- 1-Non risulta spiegata l'origine di questo collasso spontaneo e la sua natura stocastica
- 2-Il parametro λ viene introdotto ad hoc per far quadrare i conti
- 3-Non risolve il problema dell'oggettivazione.
- 4-Personalmente, ritengo che la sovrapposizione macroscopica non sia da prendere in considerazione, neanche per una piccolissima frazione di tempo. Il modo in cui viene risolto il problema ontologico può sembrare corretto formalmente, ma ci pone di fronte all'imbarazzante situazione in cui una sovrapposizione macroscopica sia presente, seppur per un breve lasso di tempo.

Da ciò nasce la considerazione che questa idea sia una sorta di "ortodossia aggiornata", in cui anziché avere la riduzione della funzione d'onda,

abbiamo questo collasso spontaneo, la cui origine rimane comunque sconosciuta. Ciò nonostante, bisogna riconoscere che questa soluzione ha il vantaggio di rendere meno ambiguo il confine tra macrocosmo e microcosmo e risolve il problema ontologico, seppur *solo dopo un certo intervallo di tempo*.

7.5 La teoria a multi-mondi

Nel 1957 H. Everett III, un giovane dottorando sotto la supervisione di John Wheeler, pubblicò un articolo¹⁵ basato sulla sua dissertazione, in cui espresse molto chiaramente la sua insoddisfazione per il verificarsi di sovrapposizioni macroscopicamente distinguibili all'interno della teoria quantistica ("gatto vivo" e "gatto morto"). Era contrariato dal fatto che il formalismo standard richiedesse due principi di evoluzione (cioè l'equazione lineare di Schrodinger e la riduzione del pacchetto d'onda), e che non fosse in grado di specificare quando applicare l'uno o l'altro di questi due processi dinamici incompatibili. Per Everett, la soluzione richiedeva semplicemente di eliminare il processo di riduzione dal formalismo: l'equazione di Schrodinger ha una validità assolutamente universale. Così scrive:

No way is it evident to apply the conventional formulation of quantum mechanics to a system that is not subject to external observation. The whole interpretative scheme of that formalism rests upon the notion of external observation(Everett,1957)

Naturalmente, poichè siamo interessati non solo alla descrizione del processo fisico, ma anche alle nostre percezioni, è indispensabile includere l'osservatore stesso nella descrizione fisica. Lo stato risultante, ancora una volta, è governato dalla legge di evoluzione lineare della teoria.

Spieghiamo cosa significhi riprendendo il nostro esempio tipico: la misura dell'energia di una particella in una scatola (PIB) (le cui coordinate spaziali chiamiamo x) utilizzando un misuratore di energia (il cui puntatore ha la coordinata del centro di massa y). Il dispositivo di misurazione fornisce una misura fedele e accurata dell'energia della particella

¹⁵H. Everett, [The] 'Relative State' formulation of quantum mechanics. Rev. Mod. Phys. 29(3), 454-462 (1957)

se, quando quest'ultima si trova inizialmente in un autostato di energia $\psi_k(x)$ (con autovalore E_k), l'interazione fa muovere il puntatore di una distanza proporzionale a E_k . Assumendo l'equazione di Schrodinger, lo stato quantistico del sistema congiunto particella+puntatore si evolve come segue:

$$\psi_k(x)\phi_0(y - \lambda E_k t) \quad (7.26)$$

dove ϕ_0 è lo stato iniziale del dispositivo di misurazione e t la durata dell'interazione. Da ciò segue immediatamente che, se la PIB è inizialmente in una sovrapposizione di diversi autostati di energie differenti, il sistema evolverà in una sovrapposizione entangled del tipo:

$$\left[\sum_i c_i \psi_i(x) \right] \phi_0(y) \implies \sum_i c_i \psi_i(x) \phi_0(y - \lambda E_i t) \quad (7.27)$$

Il problema, nella visione di ortodossa, è che l'Eq.7.27 implica una sovrapposizione di diverse posizioni per il puntatore (macroscopico, osservabile direttamente) e non è nemmeno chiaro cosa significhi. Ma, a quanto pare, è una sorta di stato in cui il puntatore ha diverse posizioni *contemporaneamente*. Sembra che esso dovrebbe apparire in un certo senso "sfocato" tra le diverse posizioni. Ma, ovviamente, nessuno ha mai visto un puntatore in uno stato del genere. I "veri" indicatori puntano sempre in un modo o in un altro. Da ciò segue che l'Eq.7.27 semplicemente non può fornire una descrizione fedele, diretta, letterale e completa dello stato fisico dell'indicatore. O almeno ciò è quello che abbiamo dato per scontato fino ad ora.

Ma Everett dice che va bene, non ci sono problemi. Egli, infatti, ci invita a considerare più in dettaglio come - secondo la meccanica quantistica - il puntatore in uno stato come quello dell'Eq.7.27 dovrebbe apparire. Per analizzarlo, dovremmo considerare i diversi stati possibili in cui un osservatore potrebbe entrare interagendo con un puntatore. Supponiamo, per cominciare, che l'osservatore - i cui (molti!) gradi di libertà chiamiamo z - inizi in uno stato "pronto" $\chi_0(z)$. Supponiamo che interagisca con un puntatore con una posizione ragionevolmente ben definita $y = y_k$. Quindi l'osservatore dovrebbe essere in uno stato $\chi_k(z)$, in cui ha visto (e, per

esempio, ricorda di aver visto e, se gli viene chiesto, riferirà di aver visto) che il puntatore ha la posizione y_k . Cioè, durante il tempo di interazione tra il puntatore e l'osservatore, l'equazione di Schrodinger dovrebbe fare in modo che lo stato quantico del sistema puntatore-osservatore evolva come segue:

$$\phi_0(y - y_k)\chi_0(z) \implies \phi_0(y - y_k)\chi_k(z) \quad (7.28)$$

Ma, proprio come prima, segue immediatamente dalla linearità dell'equazione di Schrodinger, che se l'osservatore guarda la posizione del puntatore nel sistema puntatore-particella descritto dall'Eq.7.27, lo stato quantico del sistema particella-puntatore-osservatore evolverà così:

$$\left[\sum_i c_i \psi_i(x) \phi_0(y - y_i) \right] \chi_0(z) \implies \sum_i c_i \psi_i(x) \phi_0(y - y_i) \chi_i(z) \quad (7.29)$$

Così, nello stesso modo in cui il puntatore non è riuscito ad individuare un particolare risultato dall'insieme di "possibilità" sovrapposte, ma invece si è aggroigliato nella sovrapposizione, allo stesso modo l'osservatore (del puntatore) non finisce in uno stato che corrisponda alla visualizzazione di una posizione particolare per il puntatore. Invece, anche lui si unisce alla "sovrapposizione intricata".

Il vero significato dell'interpretazione non risulta facile da cogliere, ma esso può intuirsi contrapponendo il punto di vista che esso impone, a quello che tutti inconsciamente adottiamo e che rende imbarazzante la sovrapposizione di stati macroscopicamente distinti. In un certo senso, in modo del tutto naturale e tacito, siamo avvezzi a considerare l'osservatore come uno spettatore degli eventi sul palcoscenico del mondo, come un soggetto esterno al processo. Allora egli si "trova di fronte" ad uno scenario che non consente legittimamente di asserire che "il gatto è vivo" o, alternativamente, che "esso è morto". Ma l'interpretazione che stiamo considerando richiede, per così dire, un "coinvolgimento" radicale dell'osservatore nel processo: esso stesso non può sottrarsi alle ferree e universali leggi che governano tutti gli eventi, quindi l'unica realtà è rappresentata da una funzione d'onda che *contiene tutte le possibilità*. Tra di esse esistono anche quelle di osservatori con percezioni incompatibili.

Come sottolinea Everett, in un sistema descritto, ad esempio, dall'Eq.7.27, a nessuno dei due componenti - la particella o il puntatore - può essere attribuito uno stato definito. Questo è essenzialmente ciò che significa "entanglement". Ma Everett sottolinea inoltre che possiamo definire uno *stato relativo*, cioè relativo al fatto che l'altra componente si trovi in uno stato particolare. Ad esempio, lo stato del puntatore relativo alla particella nella scatola, la quale si trova nello stato $\psi_k(x)$, è definito come:

$$\phi^{\text{rel.to}\psi_k(x)}(y) \sim \int \psi_k^*(x) \Psi(x, y) dx \quad (7.30)$$

dove $\Psi(x, y)$ è lo stato congiunto particella-puntatore dato dall'Eq.7.27 ("~" perché la parte destra non è correttamente normalizzata). Così troviamo:

$$\phi^{\text{rel.to}\psi_k(x)}(y) \sim \int \psi_k^*(x) \sum_i c_i \psi_i(x) \phi_0(y - \lambda E_i t) = c_k \phi_0(y - \lambda E_k t) \quad (7.31)$$

In questo modo, lo stato relativo propriamente normalizzato è:

$$\phi^{\text{rel.to}\psi_k(x)}(y) = \phi_0(y - \lambda E_k t) \quad (7.32)$$

Vale anche il contrario: rispetto al puntatore che indica il risultato E_k , la PIB è nello stato $\psi_k(x)$. E possiamo generalizzare questo concetto per introdurre anche l'osservatore: quando la funzione d'onda complessiva particella-puntatore-osservatore è data dal lato destro dell'eq. 7.29, rispetto alla PIB nello stato $\psi_k(x)$, non solo il puntatore indica che la sua energia sia E_k , ma l'osservatore *vede* il puntatore che indica il valore E_k . Quest'idea di "stato relativo" fornisce un modo per cogliere il fatto che, sebbene rimanga sconcertante, uno stato come il lato destro dell'Eq.(7.29), non è il "caos totale". Non è una sorta di sfocatura incomprensibile in cui tutto sta accadendo in modo completamente confuso. Piuttosto, ci sono *correlazioni* definite nello stato: è una "miscela ordinata", in un certo senso, di diverse situazioni individuali perfettamente ragionevoli, in cui la PIB ha un'energia definita, il puntatore indica correttamente qual'è la sua energia, e l'osservatore vede il puntatore che indica la sua energia e riferisce correttamente qual'è la sua energia.

È chiaro che le interazioni successive funzioneranno esattamente allo stesso modo, e porteranno sempre più "mondo" nella miscela. È come se la grande (e in continua espansione) sovrapposizione, che in precedenza ritenevamo chiaramente sbagliata, descrivesse in realtà tutte queste storie perfettamente coerenti che si svolgono in parallelo. Solo che, per Everett, non è semplicemente "come se" fosse così. L'idea di Everett è che accada *letteralmente* questo.

Come abbiamo visto, per ciascuno degli stati sovrapposti, c'è una perfetta coerenza tra le "situazioni" di tutti i sistemi coinvolti. Se, con Everett, escludiamo la riduzione del pacchetto d'onda, lo stato effettivo delle cose corrisponde al fatto che, nel primo termine della somma, l'osservatore ha una percezione, e nel secondo un'altra, incompatibile con la prima. Cosa dobbiamo pensare di questa situazione? Poiché abbiamo percezioni definite, dovremmo in qualche modo sopprimere i termini dello stato che non corrispondono alla percezione che stiamo vivendo. Ma ciò equivarrebbe ad una riduzione del vettore di stato, una procedura assolutamente vietata dall'assunto di Everett che l'evoluzione di Schrodinger abbia validità illimitata.

C'è solo una via d'uscita, per quanto strana sia: immaginare che le varie parti della funzione d'onda che, come più volte sottolineato, corrispondono a situazioni macroscopicamente e percettivamente incompatibili ma che devono essere prese tutte in considerazione, si riferiscano a *mondi diversi*, tra i quali non c'è alcuna relazione. In altre parole, nell'interpretazione di Everett, che dopo la rilettura del fisico Bryce Seligman DeWitt (1971) divenne nota come *interpretazione a multi-mondi*¹⁶, tutti i possibili risultati si verificano effettivamente, ma hanno luogo in una molteplicità di mondi che non comunicano l'un l'altro.

L'argomento appena sviluppato è valido per ogni tipo di misura e/o processo che porti alla sovrapposizione di stati corrispondenti e a situazioni macroscopicamente diverse. Tutti i risultati si verificano effettivamente, tutti i risultati inclusi nello stato vengono realizzati in una raccolta di mondi distinti. In questa prospettiva, nessun processo di riduzione si è mai verificato, e l'equazione di Schrodinger governa l'intero processo fi-

¹⁶Per ulteriori approfondimenti, consultare: B.S. DeWitt, R.N. Graham (eds.), *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, Princeton, 1973)

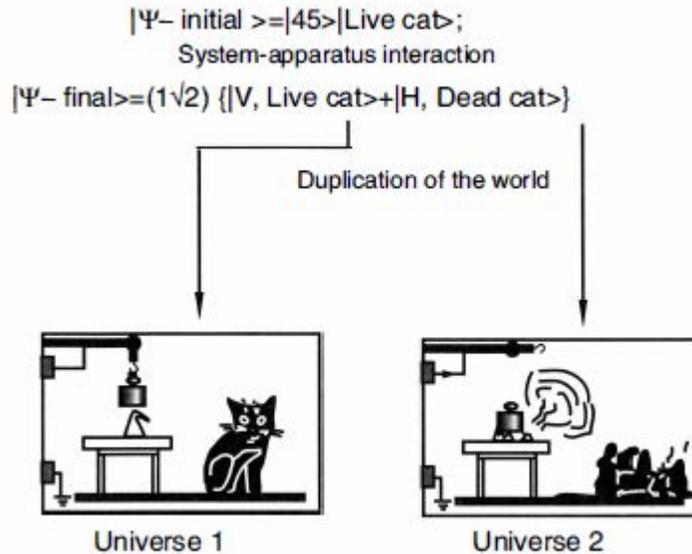


Figura 7.4: *L'interpretazione dei molti mondi del gatto di Schrodinger. C'è un universo in cui il gatto è morto ed un altro in cui sopravvive la sua replica.*

sico. Vediamo un esempio che ci aiuta a comprendere meglio. Supponiamo di avere uno stato così definito:

$$\psi_{+x} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{+z} + \psi_{-z}) \quad (7.33)$$

ed eseguiamo una misura della componente dello spin lungo l'asse z . Secondo la meccanica quantistica standard, avremo un 50% di possibilità che la misura dia spin up, 50% per il caso contrario. Nella visione di Everett, non è così, ma entrambi i casi accadono: l'atto della misura dello spin innesca una ramificazione della funzione d'onda universale, ed ogni risultato accade in uno dei due rami. Se pensiamo e ciò come al risultato "testa o croce" del lancio di una moneta, ed indichiamo con "H"(head) il risultato testa, e con "T"(tail) il risultato croce, accade ciò descritto nella Fig.7.5. Per riprodurre la regola statistica di Born, basta guardare alle strutture degli universi "tipici", cioè quelle presenti nella maggior parte degli universi. Certamente ci saranno universi in cui sarà osservata una statistica che poco rispecchia la regola di Born (es. N risultati del lancio

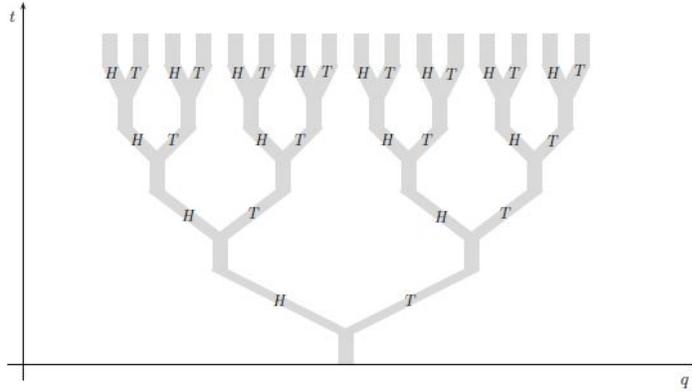


Figura 7.5: Ramificazione creata dal lancio di una moneta effettuato 4 volte

della moneta tutti H o tutti T), ma essi rappresenteranno una frazione molto piccola rispetto al totale, tale da poter essere facilmente trascurata. Ma c'è un problema: ciò detto funziona nel caso in cui i due eventi hanno la stessa probabilità di avvenire, cioè 50/50, e dunque la regola di Born può essere sostituita da un agevole "conteggio" dei rami, come spiegato poc'anzi. Ma supponiamo di avere ad esempio:

$$\psi_{+n} = \sqrt{p}\psi_{+z} + \sqrt{q}\psi_{-z} \quad (7.34)$$

con $p + q = 1$, con $p \neq q \neq 1/2$. Da ciò è facile capire che ogni universo, a differenza del caso precedente, non avrà lo stesso "peso". Ad esempio, se p è il risultato H, e si ha $p = 90\%$, allora su 100 lanci di moneta ci aspettiamo che circa 90 di questi siano H. Ma applicando il ragionamento di Everett, rimane vero che dovrei avere circa 50 volte H e 50 volte T, dunque le due probabilità non coincidono.

Pertanto, per risolvere il problema è necessario "pesare" i mondi in maniera diversa, così da ristabilire la regola di Born. Cioè, dopo una misura, la funzione d'onda universale avrà la seguente struttura:

$$\Psi = \sum_i c_i \psi_i \quad (7.35)$$

dove l'indice i indica un particolare risultato di misura. Il "peso" di ogni

singolo ramo è:

$$w_i = |c_i|^2 \quad (7.36)$$

Ma così sembra un circolo vizioso: applico la regola di Born per ottenere la stessa regola. Ci sono stati diversi tentativi di risolvere il problema, ad esempio si pensa che l'attribuzione del "peso" da dare a ciascun universo sia in qualche modo "ragionevole" e facilmente attribuibile matematicamente. Comunque, questa necessità dei pesi entra in conflitto con l'affermazione di Everett secondo cui "*none [of the branches is] any more 'real' than the rest*" (Everett,1957).

Ma la questione è più profonda di così. Con la visione di Everett, abbiamo a che fare con una funzione d'onda che descrive l'intero universo, e se da ciò ottengo rami con pesi diversi, viene naturale domandarsi l'origine di questi ultimi, e ciò potrebbe spiegarsi con la presenza di un Dio-osservatore dall'esterno che dà un peso diverso ad ogni singolo ramo. In tal senso l'idea di Everett viene spesso abbandonata, o relegata al semplice stato speculativo. Occorre comunque notare come in modo semplice sembra risolvere il problema della misura, eliminando l'ipotesi del collasso della funzione d'onda.

Anche in questo caso, affrontiamo il problema del valore ontologico da dare alla funzione d'onda.

Ontologia

Come visto nella sez.5.4, dare un significato fisico chiaro alla funzione d'onda è qualcosa di molto problematico, poichè non è affatto evidente come possa descrivere gli avvenimenti che accadono nello spazio fisico. Abbiamo visto come la teoria del collasso spontaneo risolve il problema, poichè in quel caso il collasso spontaneo fa sì che, usando la terminologia di Everett, solo uno dei rami sopravvive. Ma nel caso di Everett non è così, dunque la densità di massa (Eq.5.24) diventerebbe una confusione incoerente. Ma dobbiamo riflettere sul fatto che i rami di Everett non comunicano tra loro. Dunque, se è vero che c'è questa sovrapposizione, essa viene osservata solo dall'eventuale Dio-osservatore esterno ai singoli rami. Noi osservatori in un singolo ramo non avvertiamo l'esistenza degli

altri rami, dunque per noi la situazione è perfettamente chiara, osservando una situazione macroscopica coerente.

Spieghiamo più formalmente perchè i diversi contributi a $\rho(x, t)$ derivanti dai diversi rami della funzione d'onda possono essere pensati come non interagenti e causalmente indipendenti.

Supponiamo che la funzione d'onda possa essere scritta come combinazione lineare di pacchetti macroscopicamente distinti:

$$\Psi(x_1, x_2, \dots, x_N, t) = \sum_{\alpha} c_{\alpha} \Psi_{\alpha}(x_1, x_2, \dots, x_N, t) \quad (7.37)$$

dove i singoli pacchetti sono ben separati nello spazio delle configurazioni in modo che:

$$\int \Psi_{\beta}^*(x_1, x_2, \dots, x_N, t) \Psi_{\alpha}(x_1, x_2, \dots, x_N, t) dx_1 dx_2 \dots dx_N = 0 \quad (7.38)$$

con $\alpha \neq \beta$. Da ciò segue che la densità di massa dell' i -esima particella:

$$\rho_i(x, t) = m_i \int |\Psi(x_1, x_2, \dots, x_N, t)|^2 \delta(x - x_i) dx_1 dx_2 \dots dx_N \quad (7.39)$$

diventa

$$\rho_i(x, t) = \sum_{\alpha} |c_{\alpha}|^2 \rho_i^{\alpha}(x, t) \quad (7.40)$$

dove

$$\rho_i^{\alpha}(x, t) = m_i \int |\Psi_{\alpha}(x_1, x_2, \dots, x_N, t)|^2 \delta(x - x_i) dx_1 dx_2 \dots dx_N \quad (7.41)$$

Il punto importante è catturato dall'Eq.7.40, la quale esprime chiaramente il fatto che la densità di massa totale viene suddivisa in parti distinte che giocano ruoli indipendenti tra di loro. In questo modo, emerge chiaramente come l'ontologia della densità di massa ci permetta di ottenere, dall'evoluzione della funzione d'onda universale Ψ , una descrizione fisicamente coerente dell'interpretazione a multi-mondi di Everett.

Alcuni sostenitori dell'ortodossia criticano la teoria a molti-mondi in quanto, pur eliminando l'ipotesi del collasso ritenuta inconsistente, al tempo stesso aggiunge l'ipotesi di incomunicabilità tra i rami di universo, che sembra essere altrettanto ingiustificata. In realtà ciò può essere compreso introducendo la decoerenza all'interno della teoria: poichè in un processo di misura intervengono molti gradi di libertà, a livello macroscopico i rami risultano non interagenti tra loro.

Everett riassume l'idea generale come segue:

We thus arrive at the following picture: Throughout all of a sequence of observation processes, there is only one physical system representing the observer, yet there is no single unique state of the observer (which follows from the representations of interacting systems). Nevertheless, there is a representation in terms of a superposition, each element of which contains a definite observer state and a corresponding system state. Thus with each succeeding observation (or interaction), the observer state 'branches' into a number of different states. Each branch represents a different outcome of the measurement and the corresponding eigenstate for the object-system state. All branches exist simultaneously in the superposition after any given sequence of observations.(Everett, 1957)

7.5.1 Reazioni

Wheeler inviò la dissertazione di Everett a Bohr, e in seguito gli fece visita a Copenaghen nel tentativo di raccogliere sostegno per quello che giudicava un approccio promettente. Questi sforzi culminarono in una visita dello stesso Everett nel marzo 1959. Ma tutto fu vano. Bohr, sempre attento all'uso proprio e improprio del linguaggio nelle descrizioni fisiche, non voleva assolutamente discutere "*any new (strange) upstart theory*¹⁷". L'approccio di Everett metteva in discussione troppi elementi dell'ortodossia di Copenaghen, come la complementarità onda-particella e l'interpretazione della probabilità quantistica.

La scuola di Copenaghen respingeva qualunque suggerimento che la meccanica quantistica potesse essere applicata agli oggetti classici, tantomeno agli osservatori. In particolare, al gruppo di Copenaghen la formulazione di Everett appariva come un "limbo simbolico" privo di filo

¹⁷Nancy G. Everett, lettera a Frank J. Tipler (10 Ottobre 1983)

conduttore con la realtà sperimentale. Giudicava l'interpretazione di Everett della funzione d'onda troppo confusa e ingiustificata, poichè in essa diversi simboli predittivi della teoria convenzionale erano dotati di connotazioni descrittive, cosa proibita dall'ortodossia¹⁸.

In una lettera del 1956, il fisico Otto Stern scrisse a Wheeler:

Then there is the concept of state in quantum theory. An elementary system does not come with a "ready-made" state. It does not possess a state in the sense of classical physics.

Everett era sgomento. In quel periodo, lavorava già da due anni e mezzo al Pentagono, e respinse i tentativi di Wheeler di attirarlo di nuovo nel mondo accademico. Fu invitato a presentare la sua interpretazione della meccanica quantistica ad una conferenza del 1962, ma le sue idee furono in gran parte ignorate della comunità dei fisici dell'epoca. L'unico che si interessò all'analisi di Everett fu il fisico Bryce DeWitt. Egli aveva in precedenza scritto, nel 1957, una lunga critica a Everett. Se lo stato dell'osservatore si divide ogni volta che un'osservazione viene effettuata, allora perchè, si chiese DeWitt, l'osservatore non ne è consapevole?

Everett rispose con un'analogia. Non abbiamo motivo di mettere in dubbio le conclusioni della fisica classica che ci dicono che la Terra ruota sul suo asse mentre orbita attorno al Sole. Eppure, a causa della nostra inerzia, non sperimentiamo direttamente questo movimento. Allo stesso modo, commenta Everett, un osservatore mantiene il senso di un'unica identità e di un'unica storia che può essere costruita dai ricordi, ignaro che esistono più versioni di se stesso, tutte con diversi ricordi della sequenza degli eventi. Everett inserì quest'argomento nelle bozze del suo articolo del 1957 come nota a piè di pagina.

L'argomentazione convinse DeWitt, a tal punto che cercò di migliorare il profilo dell'interpretazione di Everett in un articolo pubblicato da Physics

¹⁸Ricordare la visione strumentalista del formalismo quantistico nell'interpretazione standard: "[...]The entire formalism is to be considered as a tool for deriving predictions, of definite or statistical character, as regards information obtainable under experimental conditions described in classical terms and specified by means of parameters entering into the algebraic or differential equations of which the matrices or the wave-functions, respectively, are solutions. These symbols themselves, as is indicated already by the use of imaginary numbers, are not susceptible to pictorial interpretation." (N.Bohr, On the notions of causality and complementarity, Dialectica 2,312-319 (1948))

Today nel settembre 1970¹⁹. Bohr era morto nel 1962, e potevano esserci dei segnali che l'interpretazione di Copenaghen stava iniziando a perdere il suo controllo. DeWitt potrebbe aver ritenuto che il tempo di utilizzare un linguaggio politicamente corretto fosse finito, e ha pertanto scelto di descrivere l'interpretazione usando parole che Wheeler non avrebbe mai approvato. Ha scritto:

I shall focus on one [interpretation] that pictures the universe as continuously splitting into a multiplicity of mutually unobservable but equally real worlds, in each one of which a measurement does give a definite result.(DeWitt, 1973)

Così, la formulazione dello stato relativo di Everett divenne l'interpretazione a molti mondi della meccanica quantistica, ed è considerata una delle interpretazioni più oscure e controverse.

Everett fu soddisfatto della parole usate da DeWitt. Wheeler una volta gli disse che, sebbene "per lo più" credesse nell'interpretazione, si riservava un giorno al mese per non crederci. Ma le sue riserve erano più forti di quanto quest'aneddoto potrebbe far pensare, e col tempo ritirò il suo sostegno, sostenendo che l'interpretazione "portava con sé troppo bagaglio metafisico", trasformando "la scienza in una sorta di misticismo"[16]. Ma nonostante il suo allontanamento, Wheeler riconobbe il contributo di Everett come uno dei più originali ed importanti degli ultimi decenni²⁰. Con l'aiuto del suo studente Neill Graham, DeWitt pubblicò il suo lavoro nel 1973, insieme all'articolo di Everett del 1957, in un unico volume. Il libro è intitolato *The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*.

Il gatto non è più vivo e morto contemporaneamente, ma vivo in un mondo e morto in un altro (fig.7.4). Con misurazioni ripetute, il numero di mondi che si separano l'uno dall'altro si moltiplica rapidamente. L'atto di misurazione non ha un posto speciale nell'interpretazione dei molti mondi, quindi non c'è motivo per definire la misurazione come distinta da qualsiasi processo che coinvolge una sovrapposizione quantistica.

Bell vide strette somiglianze tra l'idea di Everett e la teoria di de Broglie-Bohm, sostenendo che l'interpretazione di Everett potesse essere considerata come teoria dell'onda pilota senza traiettorie. In questo senso, la scissione o "ramificazione" implicita in molti mondi non è né più né me-

¹⁹Bryce S. DeWitt, *Quantum Mechanics and Reality*, *Physics Today*,23,30 (1970)

²⁰J. A. Wheeler, lettera a Paul Benioff (7 luglio 1977)

no stravagante delle "onde vuote" della teoria di de Broglie-Bohm. Come Wheeler, Bell considerava l'infinita moltiplicazione dei mondi piuttosto esagerata, sostenendo che potesse essere eliminata.

È importante notare che, come sottolineato dal fisico Adrian Kent, non esiste un insieme ben definito e generalmente concordato di assunzioni e postulati che insieme costituiscono "l'interpretazione di Everett della teoria quantistica", anche perchè il linguaggio utilizzato da Everett è poco chiaro.²¹.

7.5.2 Interpretazione di Deutsch

Il fisico David Deutsch elaborò una sua personale interpretazione della teoria a molti mondi di Everett. Egli sostiene che la nozione di universo "ramificato" con ogni transizione che coinvolge una sovrapposizione quantistica non poteva essere corretta. Il semplice fatto che l'interferenza sia possibile con una singola particella ci dice che la realtà consiste in un'infinità di universi paralleli, che formano quello che oggi è generalmente noto come *multiverso*.

Se ad esempio consideriamo il caso dell'interferometro di Mach-Zehnder, o l'esperimento delle due fenditure, secondo Deutsch gli effetti di interferenza, ammettendo che gli elettroni mantengano la loro integrità come particelle reali e localizzate, si possono spiegare solo considerando che ogni elettrone sia accompagnato da una serie di elettroni "ombra" o "fantasma", che passano attraverso entrambe le fenditure e interferiscono con il percorso dell'elettrone "visibile".

Sebbene questi elettroni-ombra influenzino chiaramente il percorso dell'elettrone visibile, essi stessi non sono rilevabili - non causano cioè impressioni tangibili. Una spiegazione di ciò è che gli elettroni-ombra non esistono nel "nostro" universo. Invece abitano un numero enorme di universi paralleli, ciascuno simile nella composizione a quello tangibile, e ognuno obbedisce alle stesse leggi della fisica, ma differisce in quanto le particelle si trovano in posizioni diverse in universi diversi[17]. L'interferenza tra particelle che vediamo non è dunque un'onda quantistica che interferisce con se stessa, ma piuttosto particelle in universi paralleli che

²¹S. Saunders, J. Barrett, A. Kent, and D. Wallace (eds), *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality* (Oxford University Press, Oxford, 2010)

interferiscono con una particella nel nostro universo tangibile.

Egli è un realista rispetto a questi molteplici coesistenti mondi paralleli, criticando lo strumentalismo. Sotto quest'aspetto, è pienamente d'accordo con Einstein, sostenendo che l'obiettivo di qualunque teoria fisica adeguata debba essere quello di descrivere e spiegare come stanno le cose nella realtà, piuttosto che limitarsi a "salvare i fenomeni". Il passaggio seguente, con riferimento al classico esperimento delle due fenditure, illustra il suo punto di vista:

The key fact is that a real, tangible particle behaves differently according to what paths are open, elsewhere in the apparatus, for something to travel along and eventually intercept the tangible photon. Something does travel along those paths, and to refuse to call it 'real' is merely to play with words. 'The possible' cannot interact with the real: non-existent entities cannot deflect real ones from their paths. If a photon is deflected, it must have been deflected by something, and I have called that thing a 'shadow photon'. Giving it a name does not make it real, but it cannot be true that an actual event, such as the arrival and detection of a tangible photon, is caused by an imaginary event such as what that photon 'could have done' but did not do. It is only what really happens that can cause other things really to happen. If the complex motions of the shadow photons in an interference experiment were mere possibilities that did not in fact take place, then the interference phenomena we see would not, in fact, take place (Deutsch, 1997).

A tal proposito, Deutsch critica l'ortodossia di Copenaghen, osservando che essa sia nata "durante il periodo di massimo splendore del positivismo nella filosofia della scienza", negando qualunque approccio realista ed esplicativo:

rejection (or incomprehension) of the Copenhagen interpretation, coupled with what might be called pragmatic instrumentalism, became (and remains) the typical physicist's attitude to the deepest known theory of reality. If instrumentalism is the doctrine that explanations are pointless because a theory is only an 'instrument' for making predictions, pragmatic instrumentalism is the practice of using scientific theories without knowing or caring what they mean (Deutsch, 1997).

Difficilmente si può trovare una posizione anti-strumentalista più forte e, al tempo stesso, come potrebbe sembrare, tanto in linea con le opinioni realiste sulla questione dell'interpretazione. Tuttavia, quest'aspetto

è ingannevole, poichè ciò che Deutsch intende per "realtà" quantistica, come abbiamo avuto modo di notare, è qualcosa di molto diverso dagli argomenti avanzati da Einstein, Bohm, e da altri difensori di un approccio realista alla meccanica quantistica, i quali giudicavano un requisito fondamentale di una corretta teoria quantistica quello di rimanere sufficientemente in contatto con la realtà esperienziale. Questo requisito, è facile vedere, non è soddisfatto né dall'ortodossia né dal multiverso di Deutsch.

Nonostante non si abbia alcuna prova empirica dell'esistenza di questi universi paralleli, Deutsch sostiene che l'interpretazione del multiverso è l'unico modo in cui possiamo spiegare lo straordinario potenziale del calcolo quantistico. In diverse parti del suo lavoro, afferma la verità della sua teoria come la più semplice inferenza realista dei fenomeni di interferenza, rivendicando che i fenomeni fisici necessitano di una spiegazione a molti mondi, condividendo, secondo la tesi del filosofo Christopher Norris[29], diversi caratteri della dottrina della necessità logica di Leibniz:

perhaps because the debate began among theoretical physicists, the traditional starting-point has been quantum theory itself. One states the theory as carefully as possible, and then one tries to understand what it tells us about reality[...]But as regards the issue of whether reality consists of one universe or many, it is an unnecessarily complicated approach.[...]I have not even stated any of the postulates of quantum theory. I have merely described some quantum phenomena and drawn some inescapable conclusions (Deutsch, 1997).

7.6 Interpretazione a molte menti

Quest'interpretazione può essere considerata una versione modificata dell'idea di Everett discussa poc'anzi. Essa è stata elaborata da David Z. Albert e Barry Loewer per superare alcune critiche rivolte all'interpretazione a molti mondi ed è nota come "interpretazione a molte menti"²². L'idea può, molto schematicamente, esprimersi dicendo che anziché un'infinità

²²D. Albert, B. Loewer, Interpreting the many-worlds interpretation. *Synthese* 77, 195–213 (1988). Quest'idea fu in seguito esposta da Albert in *Quantum Mechanics and Experience* (1992)

di mondi, e quindi un'infinità di copie di ogni osservatore cosciente, si considera un solo mondo ed un solo osservatore, ma lo si dota di un'infinità di menti (o una mente strutturata in infiniti fogli), ciascuna delle quali percepisce uno dei diversi esiti di ogni processo in cui possono darsi esiti percettivamente diversi. Con riferimento a questo schema, potrebbe dirsi che mentre nell'interpretazione a molti mondi si danno tutti gli eventi possibili, in quella a molte menti si danno tutte le percezioni possibili. Ovviamente, per garantire l'accordo intrasoggettivo, si dovrà ammettere che i vari fogli delle menti di tutti gli esseri percipienti siano in qualche modo "sincronizzati", cosicché se due persone assistono allo stesso processo fisico associato a stati percettivamente diversi (per esempio la sovrapposizione dello stato "un rivelatore ha emesso un suono" e "il rivelatore non ha emesso alcun suono"), allora la "mente" di quello dei due che acquista coscienza di aver percepito un suono deve essere sincronizzata (cioè nello stesso termine della sovrapposizione) con quella dell'altro osservatore. In questo modo si garantisce che se per esempio uno dei soggetti chiede all'altro "hai sentito un suono?" la mente del secondo che risponde "sì" viene percepita dalla stessa mente del primo che ha avuto la medesima sensazione e analogamente per quanto concerne l'altra risposta.

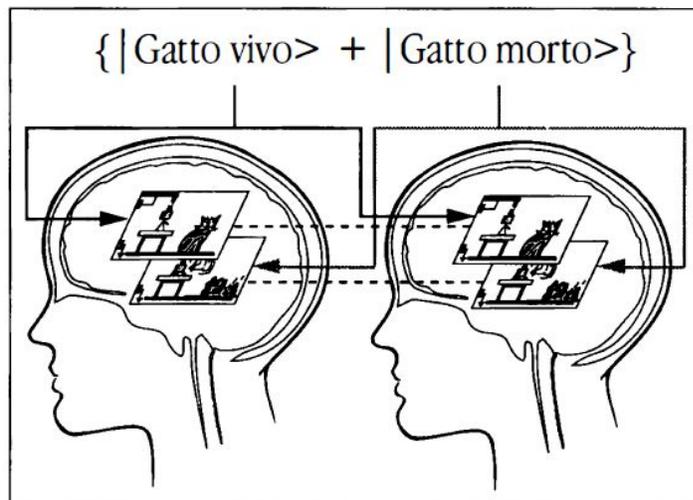


Figura 7.6: Interpretazione a molte menti, in cui a ciascun termine della funzione d'onda corrisponde una situazione percettiva diversa e si correla ad un diverso "strato percettivo" della mente di tutti noi. Le linee tratteggiate rappresentano la necessaria sincronizzazione dei diversi soggetti, necessaria per garantire l'accordo intrasoggettivo

Sottodeterminazione teorica

Alla luce delle diverse alternative proposte nei cap.6 e 7, ci chiediamo: quale scegliere? Esistono dei criteri che ci permettano di stabilire quale teoria preferire?

È facile capire che, se avessimo delle risposte chiare a queste domande, non avremmo più di un'alternativa. Ciò nonostante, è importante che ciascun fisico si faccia una propria idea di quale alternativa scegliere, non in base ad un proprio "gusto personale", ma argomentandolo in maniera convincente. Ciò non vale solo per questioni riguardanti i fondamenti della meccanica quantistica, ma in generale qualunque sia l'argomento scientifico che si sta trattando. Al tempo stesso, è necessario che un fisico mantenga le vedute aperte, rispettando le argomentazioni a volte contrarie proposte dai suoi colleghi. In questo capitolo, vedremo presentarsi diversi punti di vista contrastanti, che forniscono criteri per preferire una teoria ad un'altra.

In ciò detto, abbiamo implicitamente assunto che teorie che utilizzano lo stesso formalismo, ma che si distinguono per l'interpretazione dello stesso, siano da considerare teorie diverse. Questa visione è chiaramente realista, dando importanza al significato fisico del formalismo utilizzato, ma una posizione diversa, come quella di Heisenberg, porterebbe ad identificare una teoria unicamente col suo formalismo, considerando inutile la questione interpretativa all'interno di una teoria. Nelle pagine successive vedremo anche quest'aspetto, considerando l'esempio della meccanica ondulatoria di Schrodinger e quella matriciale di Heisenberg

in meccanica quantistica.

8.1 Aspetti generali

Consideriamo n entità osservabili O_1, \dots, O_n ; ebbene vi sono m descrizioni scientifiche D_1, \dots, D_m che le possono catturare egualmente bene, ovvero possiamo avere m *descrizioni empiriche equivalenti*. A questo proposito si dice che le descrizioni sono *sottodeterminate* rispetto agli osservabili, ovvero che vi è sottodeterminazione teorica rispetto ai dati empirici.

Questo fatto comporta una serie di problemi filosofici estremamente interessanti:

1. visto che abbiamo m descrizioni teoriche diverse, tale diversità è dovuta solo al modo in cui le si è scritte e, quindi, in realtà abbiamo m *descrizioni linguisticamente equivalenti* dello stesso ambito fenomenico osservabile, quindi una sola teoria scritta però in m modi diversi, oppure ogni diversa descrizione è una diversa teoria?

2. supponendo che si sia nel secondo caso, ossia nel caso di m diverse teorie, come possiamo dirimere le questione intorno a quale sia la teoria vera (o più vera) - se siamo realisti sulle teorie - o più valida (in un qualche senso) - se siamo antirealisti sulle teorie - visto che non possiamo ricorrere al tribunale dell'esperienza, dal momento che sono empiricamente equivalenti, almeno relativamente agli osservabili?

3. pur essendo empiricamente equivalenti relativamente agli osservabili, le m teorie sono però diverse rispetto ai non osservabili, ammettendone diversi; in questo caso, come dobbiamo tenerne conto?

Nel seguito di questo capitolo, cercheremo di fornire delle risposte a queste domande suddividendo l'intera questione in tre sotto-questioni:

- 1) l'origine contemporanea del problema
- 2) sottodeterminazione e descrizioni linguisticamente equivalenti
- 3) sottodeterminazione e realismo

8.2 Origine della sottodeterminazione

Gli anni a cavallo tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento sono stati caratterizzati - in tutta Europa, soprattutto in quella continen-

tale - da un fervido dibattito sui fondamenti della scienza condotto da scienziati come L.Boltzmann, H.Hertz, H.Helmholtz, E.Mach, P.Duhem, H.J.Poincaré, P.W.Bridgman, A.Murri, ecc. Proprio dalle loro riflessioni comincia a cristallizzarsi il problema della sottodeterminazione teorica. In particolare, colui che portò formalmente il problema sulla scena filosofica fu Hertz, nell'introduzione ai suoi *Principien der Mechanik*¹, in cui specifica che la teoria scientifica non dev'essere intesa né come qualcosa di vero, né come qualcosa di verosimile. In realtà, continua Hertz, la teoria scientifica è un'"immagine" con cui si prendono i fenomeni empirici già conosciuti e con cui si prevedono fenomeni nuovi. Dobbiamo, allora, formarci delle immagini degli oggetti in modo che le conseguenze delle immagini siano immagini delle conseguenze degli oggetti. Tuttavia, afferma Hertz: "*Per quanto chiare possano essere le immagini che vogliamo formarci delle cose, esse non sono determinate univocamente dalla richiesta che le conseguenze delle immagini siano a loro volta le immagini delle conseguenze. Sviate immagini sono possibili per gli stessi oggetti; e tali immagini possono differenziarsi secondo varie modalità*" (Hertz,1894).

Ecco precisato il problema della pluralità di *immagini* (le teorie) in relazione agli *oggetti del mondo* (i dati empirici).

Hertz non solo presenta il problema, ma tenta pure di risolverlo individuando quei criteri che dovrebbero consentire di dirimere quale immagine, fra quelle possibili, debba essere considerata valida. Innanzitutto, tra tutte le immagini sceglieremo quelle che sono "logicamente ammissibili", nel senso che non violano le "leggi del nostro pensiero". Poi, fra tutte quelle permissibili, sceglieremo quelle che non sono contraddette dall'esperienza, ovvero quelle che, con una terminologia più attuale, sono empiricamente adeguate. Infine, se ancora abbiamo teorie "concorrenti", sceglieremo quella più distinta, cioè che riesce a cogliere il maggior numero di relazioni essenziali fra i fenomeni, e la più semplice, ovvero quella che, oltre a rendere conto del maggior numero di rapporti essenziali, introduce il minor numero di relazioni superflue e vuote. Questo prende il nome di *requisito di appropriatezza*.

Dunque, dopo una prima scrematura di tipo logico-empirica, come sce-

¹H.Hertz, *Principien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt* (1894), traduzione italiana *I principi della meccanica (presentata in una nuova connessione)* (la Goliardica, Pavia, 1999)

gliere la teoria più valida? Il terzo criterio rimane un po' ambiguo, non potendo essere logico, in quanto abbiamo già eliminato le teorie non logicamente coerenti, e nemmeno empirico, avendo eliminato tutte le teorie empiricamente inadeguate. Pertanto, il criterio proposto da Hertz è extrascientifico: scegliamo la teoria, cioè risolviamo la sottodeterminatezza, in base a valori quali la semplicità e la distinzione.

Tutti coloro che hanno tentato di proporre una soluzione al problema della sottodeterminatezza, hanno fatto ricorso, volenti o nolenti, a criteri - quindi a valori - che sono extrascientifici. Commentando Hertz, Boltzmann mette in luce quest'aspetto: "[...]Hertz porta i fisici chiaramente alla consapevolezza già denunciata dai filosofi da lungo tempo, che nessuna teoria può essere qualcosa di oggettivo, effettivamente coincidente con la natura, che anzi ogni teoria è un'immagine mentale dei fenomeni, che si comporta con questi come fa il segno con ciò che designa. Ne consegue che non può essere nostro compito trovare una teoria assolutamente corretta, mentre lo è quello di trovare un'immagine il più possibile semplice che rappresenti i fenomeni nel modo migliore possibile. È perfino concepibile la possibilità di due teorie completamente differenti che siano entrambe semplici e concordino ugualmente bene con i fenomeni, e che dunque, sebbene completamente diverse, siano entrambe completamente giuste. L'affermazione per cui una teoria sarebbe l'unica giusta può essere solo espressione della nostra convinzione soggettiva, secondo cui non può esistere nessun'altra immagine ugualmente semplice e altrettanto adeguata²".

8.3 Descrizioni linguisticamente equivalenti

Dopo aver visto l'esplicitazione storica del problema, cominciamo ad affrontarlo teoricamente, considerando il fatto che vi è anche una "sottodeterminazione dei linguaggi": nel senso che più linguaggi descrivono uno stesso insieme di fatti empirici.

Pensiamo ad esempio alle equazioni di Maxwell: prima di Maxwell, ai vari fenomeni elettromagnetici corrispondevano altrettante rappresentazioni (o teorie, leggi: legge di Gauss, legge di Ampère, legge di Faraday, ecc.). Non esisteva una teoria unificata che desse conto, per esempio, dei

²L.Boltzmann, *Über die Entwicklung der Methoden der theoretischen Physik in neueren Zeit* (1899). La versione italiana in questo lavoro è presa da [12]

fenomeni dell'elettrostatica, dell'induzione magnetica, della polarizzazione della luce ecc. Maxwell operò una riduzione delle leggi fondamentali dell'elettromagnetismo in quattro sole equazioni, che prendono il suo nome. Queste possono essere espresse sia in forma differenziale, ricorrendo ad alcuni operatori vettoriali, sia usando il linguaggio tensoriale. In questo caso, siamo di fronte a teorie linguisticamente equivalenti, e non cambia nulla dal punto di vista fisico. Tutti sono convinti che la teoria sottostante sia la stessa, nella fattispecie l'elettromagnetismo, si tratta semplicemente di "vestiti matematici" diversi della stessa teoria.

Insomma, quando parliamo di descrizioni linguisticamente equivalenti, non dobbiamo riferirci a semplici "cambi d'abito matematico" di una stessa teoria. Ma allora, cosa dobbiamo intendere?

Il già citato nella sez.4.2 N.Hanson ci fornisce un'analisi della questione se la meccanica quantistica, scritta usando il linguaggio delle equazioni differenziali (meccanica ondulatoria elaborata da Schrodinger), sia effettivamente la stessa meccanica quantistica espressa in linguaggio matriciale (meccanica delle matrici formulata da Heisenberg). Dobbiamo porci una domanda: le due descrizioni empiricamente equivalenti, sono da considerarsi due teorie fisiche diverse, oppure sono semplicemente due descrizioni linguisticamente equivalenti della stessa teoria, come aveva dimostrato lo stesso Schrodinger nel 1926?

Per rispondere, bisogna tener conto che una teoria fisica non è solo matematica, ma è qualcosa di più, anzi molto di più, visto che essa intende catturare il mondo empirico. Una teoria deve essere caratterizzata anche da un'interpretazione, oltre a dover essere interpretata epistemologicamente (è vera? è una convenzione? è una buona approssimazione? ecc.). Inoltre, vi è la questione della sua validità conoscitiva relativamente al mondo empirico (quanti e quali sono i fenomeni di cui riesce a tener conto? quanti e quali sono i fenomeni che permette di prevedere?).

Alla luce di queste considerazioni, possiamo facilmente capire Hanson quando scrive:

"[...] come teoria fisica, la meccanica ondulatoria del 1926 era costituita dall'elegante algoritmo di Schrodinger più l'interpretazione di Schrodinger. La meccanica matriciale (nel 1926) era costituita dall'algoritmo di Heisenberg-Jordan-Born

*più una corrispondente interpretazione*³".

Ne segue che, per Hanson, la dimostrazione dell'equivalenza matematica del linguaggio differenziale e di quello matriciale non comporta affatto l'equivalenza delle due meccaniche, in quanto non si è affatto provata l'equivalenza dell'interpretazione di Schrodinger e quella di Heisenberg.

Non tutti sono d'accordo con Hanson. Per esempio, non lo sono quanti ritengono, da un lato, che l'interpretazione realistica del formalismo matematico sia una pura questione "metafisica", e che l'unico aspetto importante sia quello relativo all'inadeguatezza empirica di una teoria (abbiamo già discusso ampiamente questi punti di vista nel cap.3). Per questi la questione deve porsi nei seguenti termini: la meccanica ondulatoria e la meccanica matriciale, visto che sono sia empiricamente equivalenti rispetto al già osservato, sia predittivamente equivalenti rispetto a ciò che si potrà osservare, sono solo due descrizioni linguisticamente equivalenti, ovvero solo due formulazioni diverse della stessa teoria.

Ora siamo di fronte al problema se cambiando il linguaggio cambia la teoria. Siamo di fronte al problema se due descrizioni empiricamente equivalenti siano anche linguisticamente equivalenti, essendoci dei teoremi di isomorfismo fra le due, ossia essendoci dei teoremi che permettono di associare a definizioni nell'una definizioni nell'altra e a teoremi dell'una teoremi dell'altra. Qui in gioco vi è qualcosa che ha a che fare con l'interpretazione epistemologica: per i realisti sulle teorie, le due formulazioni della meccanica quantistica, pur essendo matematicamente equivalenti, non sono la stessa teoria, ma due teorie diverse; per gli antirealisti sulle teorie, le due formulazioni sono due descrizioni linguisticamente equivalenti di un'unica teoria.

Quando si parla di descrizioni equivalenti dovute a linguaggi diversi, è necessario pertanto usare molta cautela, perchè al riguardo è fondamentale la particolare credenza epistemologica sullo statuto delle teorie.

Tuttavia, ci chiediamo: possiamo stabilire le condizioni necessarie e sufficienti affinché due formulazioni scritte in due linguaggi differenti siano due descrizioni linguisticamente equivalenti, ossia una stessa teoria scritta in due modi diversi? Per rispondere a questa domanda, ci viene in

³N.R.Hanson, *The Concept of the Positron* (Cambridge University Press, Cambridge, 1963), traduzione italiana *Il concetto di positrone* (Piovan Ed., Abano Terme(Pd), 1989)

aiuto il filosofo Hilary Putnam, il quale evidenzia che prima di tutto vi dev'essere l'equivalenza formale (condizione necessaria), ovvero le due versioni T_1 e T_2 devono essere contraddistinte dall'"interpretabilità relativa", che accade quando:

"[...]esistono definizioni possibili[...] dei termini di T_1 nel linguaggio di T_2 con la proprietà che, se si "traducono" le asserzioni di T_1 nel linguaggio di T_2 mediante queste definizioni, allora tutti i teoremi di T_1 diventano teoremi di T_2 [12]".

La condizione sufficiente è già più difficile da stabilire, in quanto devono entrare in gioco sia le interpretazioni fisiche ed epistemologiche delle due formulazioni, sia la loro capacità di descrivere i fenomeni che già si conoscono e la loro potenza predittiva. A tal proposito, Putnam introduce la capacità di spiegare: condizione sufficiente affinché due formulazioni scritte in due linguaggi diversi siano due descrizioni linguisticamente equivalenti è che esse spieghino lo stesso ambito fenomenico.

Tuttavia, quest'indicazione di Putnam non è particolarmente soddisfacente: per esempio, sempre rifacendoci al caso della meccanica ondulatoria e di quella matriciale, queste spiegano lo stesso ambito fenomenico ma, se interpretate come due teorie diverse, lo spiegano in due modi diversi. Dunque, da un punto di vista realista, spiegare lo stesso ambito non è sufficiente, in quanto lo si può fare da punti di vista fisici e filosofici diversi. E allora? Forse potremmo dire che condizione sufficiente affinché due descrizioni siano linguisticamente equivalenti, è che le spiegazioni che loro forniscono siano tali da spiegare lo stesso ambito fenomenico *nello stesso modo*, ossia facendo riferimento ad una stessa interpretazione fisica e filosofica.

8.4 Sottodeterminazione e realismo

Andiamo più a fondo nella questione, considerando un esempio proposto da Reichenbach in *Experience and Prediction* del 1938⁴. Supponiamo che alcuni esseri vivano in un mondo cubico, le cui pareti consentono che della luce filtri in modo che, all'interno del cubo, si possano vedere le ombre di eventuali oggetti esterni. Supponiamo che fuori dal cubo viva-

⁴H.Reichenbach, *Experience and Prediction: An Analysis of the Foundation of Science* (University of Chicago Press, Chicago, 1938-1961)

no degli uccelli, ma, per via delle pareti, che questi non possano essere né visti direttamente, né sentiti dagli abitanti del cubo, i quali potranno, allora, osservare direttamente solo le loro ombre. Avendo esperienza solo di queste, quali teorie potranno essere formulate per rendere conto della loro presenza e dei loro moti? Un realista forse riuscirà a formulare una teoria che oltre a rendere conto delle ombre e dei loro moti, le indicherà come tracce di oggetti esterni non osservabili ma realmente esistenti che chiamerà, per esempio, "uccelli". Dal canto suo, un positivista riuscirà anche lui a rendere conto delle ombre e dei loro moti. Ma si arresterà qui. Non indicherà le ombre come tracce di oggetti non osservabili esterni.

Abbiamo qui due descrizioni equivalenti empiricamente, almeno relativamente a ciò che è osservabile. Sono anche due descrizioni linguisticamente equivalenti? Sicuramente non per il realista. Per quest'ultimo saranno teorie diverse, la cui diversità si manifesta non nell'osservabile, ma nel non osservabile. Sono invece la stessa teoria scritta in due linguaggi diversi per il positivista radicale, in quanto ciò che si dice sul non-osservabile è totalmente ininfluenza e non significativo.

Tuttavia né il realista, né il positivista radicale possono esimersi da argomentare a favore del rispettivo realismo e antirealismo sulle teorie. Ma prima di passare ad esaminare le principali argomentazioni a favore delle rispettive posizioni, è necessario fare qualche precisazione su sottodeterminazione e credenze epistemologiche.

Nell'esempio reichenbachiano, abbiamo considerato un realista sulle teorie, per il quale vi era un'effettiva sottodeterminazione di teorie empiricamente equivalenti che doveva essere risolta trovando la teoria più vera o più verosimile, e un positivista radicale, per il quale non solo si era in presenza di descrizioni linguisticamente equivalenti rispetto all'osservabile, ma anche di descrizioni linguisticamente equivalenti di una stessa teoria, interpretata epistemologicamente come una formulazione atta unicamente a salvare i fenomeni. Però non tutti gli antirealisti sono dei positivisti radicali. Per esempio, abbiamo visto che Hertz, pur essendo antirealista sulle teorie, considera le descrizioni empiricamente equivalenti come sottodeterminate; a suo parere, le varie descrizioni meccaniche del mondo non sono descrizioni linguisticamente equivalenti, ma sono teorie diverse fra cui una sola è quella valida e, oltre tutto, questa può essere scelta in base al requisito di appropriatezza. Un altro esempio di antirealismo

sulle teorie è quello proposto dal filosofo Bas van Fraassen, secondo il quale descrizioni empiricamente equivalenti non sono descrizioni linguisticamente equivalenti, ma sono teorie diverse sottodeterminate rispetto all'osservabile. Van Fraassen è perciò costretto a proporre un criterio per risolvere la sottodeterminazione, criterio che consiste nello scegliere quella teoria che offre un programma di ricerca "che prometta di più" di quelli offerti dalle teorie rivali. Infine, nemmeno un convenzionalista sui principi come Poincaré considera tutte le descrizioni empiricamente equivalenti come semplici descrizioni linguisticamente equivalenti, ma le considera come vere e proprie teorie fra le quali una sola, quella da scegliere, è formulata nel modo più semplice e più comodo da usare.

Se si riflette sui vari modi di risolvere la sottodeterminazione, o dissolvendola nell'equivalenza linguistica o individuando la teoria (in un qualche senso) migliore, ci si accorge che, come si è già avuto modo di mettere in evidenza, si ricorre sempre a criteri che si rifanno a credenze e valori extrascientifici: la teoria vera, o più vera, è quella più economica, quella più semplice, quella che promette di più, ecc. D'altronde, come detto, così dev'essere dal momento che è ovvio che si eliminano automaticamente le descrizioni autocontraddittorie e che le rimanenti sono tutte empiricamente equivalenti. Quindi, necessariamente il criterio per la soluzione del problema della sottodeterminazione dev'essere extra-logico ed extra-empirico.

Veniamo adesso agli argomenti del realista delle teorie. In generale, possiamo distinguere tre classi di argomenti:

1-Argomenti ontologici. Questi argomenti si basano sull'idea che le teorie non solo rendono conto di ciò che è osservabile, ma parlano anche del non osservabile: quindi teorie diverse sottodeterminate rispetto all'osservabile in realtà non sono sottodeterminate se si considera anche il non osservabile. Non osservabile che, per il realista delle teorie, esiste, anche se in forme diverse a seconda della forma di realismo che ha adottato.

2. Argomenti epistemologici. Molti realisti sulle teorie sostengono che la sottodeterminazione possa essere risolta con successo ricorrendo all'argomentazione dell'*inferire la miglior spiegazione*, ossia fra tutte le teorie empiricamente equivalenti la teoria vera, o più vera, è quella che spiega meglio. In realtà, coloro che propongono l'inferenza alla miglior spiegazione, espongono analogie con fatti quotidiani. Ad esempio, la notte

sento dei rumori, come uno zampettio ed uno squittio, vado a vedere e trovo del formaggio rosicchiato: ne inferisco che la causa del rumore sia stata un topo. Questa è la migliore spiegazione che posso dare, quindi la mia teoria è vera ed il topo esiste. Certo, potrei anche sostenere che la casa sia abitata da un folletto cui piace il formaggio, ma questa non è la migliore spiegazione. Analogamente, vedo delle tracce in una camera a nebbia, osservo che esse sono caratterizzate da una certa geometria, ecc.: ne inferisco che la camera a nebbia è stata attraversata da un elettrone. Questa è la migliore spiegazione che possa dare: dunque la mia teoria è vera (o verosimile) e l'elettrone esiste. Certo, potrei anche sostenere che le tracce sono opera di un diavolelto, ma questa non sarebbe la miglior spiegazione scientifica.

Contro tale argomento hanno obiettato molti autori (per esempio, Van Fraassen, Cartwright, Hacking, L.Laudan, A.Fine) i quali, peraltro giustamente, hanno sottolineato che se anche una teoria è la miglior spiegazione di un certo evento, non per questo la teoria è vera ed il fenomeno reale: l'assunzione di realtà non è implicata da una spiegazione valida. L'implicherebbe solo se noi prima assumessimo la verità della teoria esplicativa, ma così entreremmo in un circolo vizioso. Inoltre, su quali basi possiamo sostenere la validità di analogie tra lo scientifico ed il quotidiano? E come possiamo essere sicuri che la spiegazione che scegliamo sia di fatto la migliore?

3. *Argomenti metodologici.* Alcuni realisti, come Boyd e Popper, risolvono la sottodeterminazione di descrizioni empiricamente equivalenti ricorrendo ad un argomento che si basa su una variante metodologica dell'inferire la miglior spiegazione, ovvero grazie all'idea che si debba inferire la teoria che ha avuto maggior successo.

Sfortunatamente, neanche quest'argomento vale, poichè un aumento di informazione e di conoscenza empirica non implica che vi sia convergenza verso teorie sempre più vere.

Tenuto conto delle critiche, nessuna argomentazione sembra offrire ai realisti sulle teorie ciò che desidererebbero, ovvero una buona strategia a favore della loro credenza. Ma, e ciò è molto importante, questo non significa che la loro posizione sia errata. D'altra parte, le argomentazioni a favore dell'antirealismo sono varianti del seguente argomento:

1. il realista sulle teorie deve esporre le sue ragioni sul perchè dovremmo essere realisti
2. sfortunatamente tutte le ragioni del realista sono criticabili
3. quindi siamo antirealisti sulle teorie

Il passaggio alla 3 consiste in quella che viene definita fallacia *ad ignorantiam*: la mancanza di giustificazione di una tesi non è una prova né della sua verità, né della verità della sua contraddizione.

Pertanto, nonostante non si possa rigorosamente dimostrare la validità delle argomentazioni avanzate dai realisti, si possono certamente considerare molto più ragionevoli di quelle avanzate dagli antirealisti.

Conclusioni

Per riassumere, lo status ortodosso della funzione d'onda è una *sottile miscela tra diversi concetti riguardanti la realtà e la conoscenza che abbiamo della realtà*. I fantastici risultati della teoria quantistica standard comportano che essa fornisce la descrizione definitiva di un sistema quantistico? La teoria quantistica è compatibile con il realismo o richiede una posizione positivista? La questione non è risolta. Alla domanda sul rapporto tra la funzione d'onda e la realtà, Bohr avrebbe probabilmente detto che la funzione d'onda è uno strumento utile, ma il concetto di realtà non può essere definito correttamente solo al suo livello.

In generale, la questione che emerge dalle discussioni affrontate in questo lavoro è: cosa ci aspettiamo da una buona teoria fisica. È sufficiente che una tale teoria faccia previsioni corrette (cioè senza contraddizione con alcun risultato sperimentale), senza tentare di descrivere eventi reali, oppure l'interpretazione è parte integrante in una teoria fisica? E, nel secondo caso, quale tipo di descrizione può essere giudicata accettabile? Come possiamo aver capito, non tutti i fisici concordano sulla risposta da dare a queste domande. Ma se c'è una cosa sulla quale credo un fisico non dovrebbe (ma a volte lo fa) obiettare, è che ha senso *porsele* queste domande. Esse, come abbiamo avuto modo di discutere, necessitano di riflessioni di carattere epistemologico piuttosto che prettamente scientifico.

Ciò non toglie che molte domande che ci siamo posti in questo lavoro necessitano, direbbe Bell, di una risposta scientifica, non solo di consi-

derazioni filosofiche. Capire dove porre il limite tra micro e macro, o meglio elaborare una teoria *davvero* fondamentale, che come tale riesca a descrivere il passaggio dal micromondo al macromondo, e dunque anche il problema della misura, in modo consistente, e risolvere altre numerose problematiche quali la non-località (che non abbiamo avuto il tempo di trattare) ed il determinismo, sono questioni che richiedono una risposta da parte di un fisico teorico, e non solo riflessioni di natura epistemologica. Non a caso, diversi fisici e cosmologi lottano con i concetti quantistici non meno dei loro predecessori, e si trovano regolarmente a percorrere innumerevoli vicoli ciechi. Ma, nonostante tutto, sembrano più determinati che mai nel capire il senso dietro tutto questo. Trovare un vicolo cieco non è una buona ragione per tornare indietro e far finta che il vicolo non ci sia. Lo scisma tra realisti e anti-realisti in fisica rimane, come evidenziato dal realismo di teorici come Roger Penrose contro l'antirealismo di altri come Stephen Hawking, e l'interpretazione di Copenaghen rimane il "difetto visivo" di molti fisici.

Ma al tempo stesso, ritengo che considerazioni filosofiche possano aiutare il fisico a risolvere questi quesiti. Ovviamente non intendo dire che il fisico debba diventare un filosofo a tutti gli effetti, ma penso che escludere dai suoi ragionamenti qualunque concetto che viene definito, in tono dispregiativo, "metafisico", come a voler dire "inutile", rischi di portare lo scienziato ad inaridirsi, ripetendo sempre le stesse argomentazioni, sempre gli stessi passaggi matematici aspettandosi un risultato diverso, seguendo un comportamento che Einstein definirebbe folle.

Anche analizzando la storia della fisica, sono innumerevoli gli esempi di grandi cambiamenti scientifici che sono stati preceduti, e/o accompagnati, da considerazioni epistemologiche. La meccanica quantistica, come abbiamo visto, ne è un esempio. Come ha evidenziato con un'attenta analisi lo storico della scienza Alexandre Koyre¹, la nascita della fisica moderna è stata influenzata da profondi cambiamenti di natura filosofica. Ma se l'influenza della filosofia sulla storia del pensiero scientifico è innegabile, e se è vero che ciò è stato reso possibile dal fatto che scienza e filosofia hanno camminato insieme nel corso degli anni (molti fisici

¹Conferenza pronunciata a Boston in occasione dell'American Association for the Advancement of Science nel 1954. Raccolta in A.Koyrè: *Etudes d'histoire de la pensée philosophique* (Gallimard, Paris, 1971)

erano anche filosofi in passato), ora che la specializzazione dei saperi ha comportato una sempre più netta separazione tra le due, sarà in grado lo scienziato di effettuare "da solo" le successive rivoluzioni, qualora si renderanno necessarie?

Personalmente, mi rammarica il fatto che solitamente quasi nulla di ciò che ho esposto nel mio lavoro venga trattato nei corsi universitari di fisica quantistica. Ciò fa sì che le giovani menti ignorino del tutto questi aspetti della teoria, ricevendo l'impressione che termini come "misura" e "collasso" siano semplici e privi di difficoltà concettuali. Inoltre, a volte non si affronta neanche il paradosso EPR, o lo si fa in maniera superficiale, prediligendo lo svolgimento di esercizi matematici nei singoli dettagli, senza tralasciare un passaggio matematico. Da ciò nasce, nella mente dello studente, l'idea che un fisico si limiti a fare calcoli, o meglio dire, a "salvare i fenomeni". Personalmente, credo che un fisico debba fare di più.

La scienza appare interrogabile solo attraverso lo smontaggio di esperimenti, teorie, leggi, difficilmente riconducibili ad unità, cioè difficilmente considerabili in termini di specie di un unico genere sommo, ma piuttosto come paradigmi di realizzazione particolari della ragione scientifica, ma questi procedimenti eterogenei che compongono la scienza non dovrebbero mancare di quella che il filosofo Louis Althusser definisce come "la spontanea riflessione filosofica degli scienziati²". Queste parole del fisico Carlo Rovelli illustrano con chiarezza questo concetto:

[...]ridurre la scienza a una tecnica di predizione significa fare confusione fra la scienza e le sue applicazioni tecniche, oppure scambiare la scienza con un suo specifico strumento di convalida e verifica. La scienza non è riducibile alle sue predizioni quantitative. Non è riducibile a tecniche di calcolo, a protocolli operazionali, al metodo ipotetico-deduttivo. Predizioni quantitative, tecniche di calcolo, protocolli operazionali, metodo ipotetico-deduttivo sono strumenti, fondamentali ed estremamente acuminati. Sono elementi di relativa garanzia, di chiarezza, modi per cercare di schivare errori, tecniche per smascherare assunzioni erronee, eccetera. Ma sono solo strumenti, e sono solo alcuni degli strumenti in gioco nell'attività scientifica. Essi sono al servizio di un'attività intellettuale la cui sostanza consiste in altro. I numeri, le tecniche, le predizioni, servono per suggerire, per testare, per confermare, per utilizzare, le scoperte. Ma il contenuto

²L.Althusser, *Filosofia e Filosofia Spontanea degli Scienziati* (Unicopli, Milano, 2000)

di queste scoperte non ha nulla di tecnico: il mondo non gira intorno alla Terra; tutta la materia intorno a noi è composta solo di protoni, elettroni e neutroni; nell'universo ci sono cento miliardi di galassie, ciascuna fatta di cento miliardi di stelle simili al nostro Sole; l'acqua della pioggia è l'acqua che è evaporata dal mare e dalla terra; quattordici miliardi di anni fa l'universo era compresso in una palla di fuoco; le somiglianze fra genitori e figli sono trasmesse da una molecola di DNA; nel nostro cervello ci sono un milione di miliardi di sinapsi che saltano quando pensiamo; la complessità sconfinata della chimica è interamente riducibile a semplici forze elettriche fra protoni ed elettroni; tutti gli esseri viventi sul nostro pianeta hanno antenati comuni... Tutti questi sono esempi di fatti della natura, che il pensiero scientifico ha rivelato, che hanno cambiato in profondità la nostra immagine del mondo e di noi stessi, e che hanno un interesse ed una portata conoscitiva che sono umani, diretti ed immensi[35].

Per rispondere alla prima domanda che ci siamo posti, condivido il parere di Roger Penrose[34], secondo il quale la meccanica quantistica non è altro che un soluzione provvisoria, sotto certi aspetti inadeguata a fornire un quadro completo del mondo in cui viviamo. Al tempo stesso, considerare la teoria quantistica semplicemente come uno strumento di calcolo, che non ha nulla a che vedere con una descrizione reale del mondo, lo considero un atteggiamento troppo disfattista. Sembra come se fare calcoli, e trovare continui accordi tra il valore teorico e quello sperimentale, basti allo scienziato per credere di fare il proprio lavoro nel migliore dei modi. Ciò non ha, dal mio punto di vista, granché senso, per due motivi:

- 1- Non esiste una corrispondenza biunivoca tra il formalismo e il risultato sperimentale. Nel caso della meccanica quantistica, l'esperimento della doppia fenditura ci ha condotto all'introduzione della funzione d'onda. Ma nessuno può escludere che la stessa figura di diffrazione possa essere descritta da un altro tipo di calcolo, da un altro formalismo, non ancora noto, che forse non necessita della tanto problematica funzione d'onda.
- 2- Per una teoria scientifica, il formalismo non basta, ma è necessaria un'interpretazione della teoria. Questo secondo aspetto è sicuramente quello più problematico, e spesso tralasciato dallo scienziato.

Nonostante io abbia una mia preferenza tra le interpretazioni possibili della meccanica quantistica, in questo lavoro ho comunque deciso di

presentare anche altre teorie, esprimendo su ognuno personali pareri, in modo che chiunque legga questo lavoro ragioni con la sua testa e si faccia un'idea su quale interpretazione risulti a lui più convincente. Il mio obiettivo era quello di mettere in evidenza la vivacità di un dibattito che va avanti da oltre 70 anni, e di trasmettere il messaggio più importante che la meccanica quantistica *ha più di un'interpretazione*.

Inoltre, indipendentemente da dove partiamo nell'affrontare il problema, torniamo sempre agli argomenti filosofici centrali dell'antirealista contro il realista. Il conflitto tra queste posizioni, come abbiamo avuto modo di vedere, ha costituito la base del dibattito Bohr-Einstein e continua ancora oggi. Non importa quale sia lo stato dell'arte della scienza sperimentale, il conflitto tra la concezione antirealista di una realtà empirica e la concezione realista di una realtà esterna non potrà mai essere risolto.

Tuttavia, non condivido le opinioni intransigenti caratteristiche degli antirealisti. Sono convinto che il desiderio di mettere in relazione le proprie teorie con elementi di una realtà indipendente faccia parte della costituzione psicologica di molti scienziati, anche di coloro che adottano una visione antirealista come quella ortodossa. È necessario cercare continuamente di andare oltre i simboli del formalismo matematico e attribuire loro un significato più profondo. Senza questo continuo tentativo di penetrare sempre più in profondità in una realtà sottostante, la scienza sarebbe uno "zitto e calcola" sterile, passivo.

La ricerca di una realtà indipendente implica un impegno che non potrà mai essere raggiunto, ma ciò non significa che lo sforzo sia meno utile. Al contrario, quando si è liberi dalla camicia del dogma, è in questo processo di ricerca dell'impossibile che si compiono i *veri* progressi scientifici.

Su una cosa siamo certi, l'accettazione cieca dell'ortodossia di Copenaghen, che continua ad esserci, dato che le giovani menti sono spesso all'oscuro delle alternative, rallenta il progresso scientifico e non può produrre le sfide necessarie per spingere la teoria quantistica oltre il suo punto di rottura, e risolvere così i problemi che ad oggi si presentano nella cosmologia quantistica e nella gravità quantistica.

Certo, i dubbi sul realismo o meno della teoria persisteranno, ma avremo una teoria migliore.

Un altro messaggio importante che voglio lanciare è questo: la teoria quantistica standard presenta problemi concettuali e contraddizioni, e la

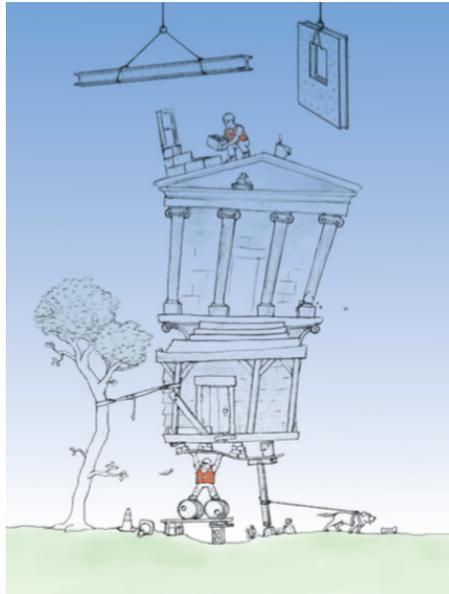


Figura 9.1: La Scienza oggi. Per gentile concessione del Prof. Gerald H. Pollack (Gerald H. Pollack. *The Fourth Phase of Water*. 2013. ISBN 978 0 9626895 3 6.)

sua interpretazione è antirealista. Se ad oggi la fisica quantistica viene considerata uno degli argomenti più difficili da capire, la colpa è della teoria, non dell'uomo.

Ciò che possiamo concludere è che non esiste una risposta che vada bene per tutto, una risposta che risolva tutti i problemi che ci siamo posti, ma ciò non significa che non dobbiamo porci certe domande. L'importanza ed il valore della ricerca scientifica risiedono nelle domande, più che nelle risposte.

Il paradosso vitale del nostro vivere e del nostro pensare è che noi agiamo e vediamo solo all'interno di un contesto; eppure smettiamo di vivere e di comprendere se smettiamo di combattere contro le limitazioni che questo contesto ci impone.

(Robert Unger, 2007)

Bibliografia

- [1] E. Agazzi. *Varieties of scientific realism: Objectivity and truth in science*. Springer, Berlin, 2017.
- [2] G. Bacciagaluppi and A. Valentini (eds.). *Quantum theory at the crossroads: reconsidering the 1927 Solvay conference*. Cambridge University Press, Cambridge, 2009.
- [3] J. Baggott. *Beyond Measure: Modern physics, philosophy, and the meaning of quantum theory*. Oxford University Press, Oxford, 2004.
- [4] J. Baggott. *Quantum Reality. The Quest for the Real Meaning of Quantum Mechanics - A Game of Theories*. Oxford University Press, Oxford, 2020.
- [5] J.A. Barrett. *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*. Oxford University Press, Oxford, 1999.
- [6] J.S. Bell. *Speakable and unspeakable in quantum mechanics: Collected papers on quantum philosophy, 2nd edn, with an introduction by Alain Aspect*. Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- [7] M. Beller. *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution*. University of Chicago Press, Chicago, 1999.
- [8] R.A. Bertlmann and A. Zeilinger (eds.). *Quantum [Un]speakables. From Bell to Quantum Information*. Springer, Berlin, 2002.

- [9] R.A. Bertlmann and A. Zeilinger (eds.). *Quantum [Un]speakables II. Half a Century of Bell's Theorem*. Springer, Berlin, 2017.
- [10] D Bohm. Non-locality in the stochastic interpretation of the quantum theory. In *Annales de l'IHP Physique théorique*, volume 49, pages 287–296, 1988.
- [11] G. Boniolo. *Filosofia della fisica*. Bruno Mondadori Editore, Milano, 1997.
- [12] G. Boniolo and P. Vidali. *Filosofia della scienza*. Bruno Mondadori Editore, Milano, 1999.
- [13] M. Born (ed.). *The Born-Einstein Letters*. Macmillan, London, 1971.
- [14] J. Bricmont. *Making Sense of Quantum Mechanics*. Springer, Berlin, 2016.
- [15] J. Bricmont. *Quantum Sense and Nonsense*. Springer, Berlin, 2017.
- [16] P.C.W. Davies and J.R. Brown (eds.). *The Ghost in the Atom: A Discussion of the Mysteries of Quantum Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1993.
- [17] D. Deutsch. *The Fabric of Reality*. Allen Lane, Londra, 1997.
- [18] J. Evans and A.S. Thorndike. *Quantum Mechanics at the Crossroads. New Perspectives from History, Philosophy and Physics*. Springer, Berlin, 2007.
- [19] P. Feyerabend. *Contro il metodo. Abbozzo di una teoria anarchica della conoscenza. Prefazione di Giulio Giorello*. Saggi Universale Economica Feltrinelli, Milano, 2002.
- [20] O. Freire Jr. *The Quantum Dissidents. Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950-1990)*. Springer, Berlin, 2015.
- [21] C. Garola, A. Rossi, and S. Sozzo (eds.). *The Foundations of Quantum Mechanics. Historical Analysis and Open Questions - Cesena 2004*. World Scientific Publishing, Singapore, 2006.

- [22] G. Ghirardi. *Un'occhiata alle carte di Dio. Gli interrogativi che la scienza moderna pone all'uomo.* il Saggiatore, Milano, 1997.
- [23] G. Gouesbet. *Hidden worlds in quantum physics.* Dover Publications, Mineola, 2013.
- [24] M. Jammer. *The Philosophy of Quantum Theory. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective.* John Wiley and Sons, New York, 1974.
- [25] A. Koyré. *Filosofia e Storia delle Scienze.* Mimesis epistemologia, 2003.
- [26] T. Kuhn. *La struttura delle rivoluzioni scientifiche.* Piccola Biblioteca Einaudi, Torino, 2009 (prima edizione *The Structure of Scientific Revolutions*(1962)).
- [27] F. Laloë. *Do We Really Understand Quantum Mechanics?* Cambridge University Press, Cambridge, 2012.
- [28] J. Losee. *Filosofia della scienza.* il Saggiatore, Milano, 2016.
- [29] C. Norris. *Quantum Theory and the Flight from Realism. Philosophical Responses to Quantum Mechanics.* Routledge, Londra, 2000.
- [30] T. Norsen. *Foundations of Quantum Mechanics. An Exploration of the Physical Meaning of Quantum Theory.* Springer, Berlin, 2017.
- [31] T. Norsen, D. Marian, and X. Oriols. Can the wave function in configuration space be replaced by single-particle wave functions in physical space? *Synthese*, 192:3125–3151, 2015.
- [32] D. Oldroyd. *Storia della filosofia della scienza.* il Saggiatore, Milano, 1989.
- [33] R. Omnès. *Quantum Philosophy. Understanding and Interpreting Contemporary Science.* Princeton University Press, Princeton, 1999.
- [34] R. Penrose. *The Emperor's New Mind.* Oxford University Press, Oxford, 1989.

- [35] C. Rovelli. *Anassimandro. La natura del pensiero scientifico*. Bompiani Editore, Milano, 2009.
- [36] P.A. Schilpp (ed.). *Albert Einstein: Philosopher-Scientist, The Library of Living Philosophers*. Evanston, Illinois, 1949.
- [37] L. Smolin. *La rivoluzione incompiuta di Einstein. La ricerca di ciò che c'è al di là dei quanti*. Giulio Einaudi Editore, Torino, 2020.
- [38] E.J. Squires. *The mystery of the quantum world*. CRC Press, 1994.

Ringraziamenti

Ringrazio me stesso per non essermi arreso, anche quando tutto ciò attorno a me sembrava mi spingesse a farlo. Non posso non ringraziare la mia famiglia per essere stata sempre il mio fianco, e ringrazio anche il mio relatore, il professore Pluchino, per avermi lasciato libero di esprimere il mio pensiero nella realizzazione di questo lavoro.