

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BERGAMO**

*Scuola di dottorato in Antropologia ed Epistemologia della Complessità*

**Dottorato di Ricerca in**

**ANTROPOLOGIA ED EPISTEMOLOGIA DELLA COMPLESSITÀ**

**Ciclo XX**

**IRREVERSIBILITÀ QUANTISTICA**

Un'analisi del ruolo del tempo in meccanica quantistica

Supervisore:

**Ch. mo Prof. Enrico Giannetto**

Tesi di

**Federico Tresoldi**

**Anno Accademico 2006/2007**

*Alla mia famiglia*

*Quanto poi a quel giorno o a quell'ora, nessuno li conosce, neanche gli angeli  
nel cielo, e neppure il Figlio, ma solo il Padre.  
(Vangelo di Marco 13,32)*

*Lascia dormire il futuro come merita. Se si sveglia prima del tempo, si ottiene  
un presente assonnato.  
(Franz Kafka)*

*Il tempo vola e noi no. Strano sarebbe se noi volassimo e il tempo no, il cielo  
sarebbe pieno di uomini con l'orologio fermo.  
(Alessandro Bergonzoni)*

## INDICE

Introduzione	1
<b>Capitolo 1</b>	
LE CARATTERISTICHE DELLA MECCANICA QUANTISTICA	8
1.1 – Brevissimi cenni sull’evoluzione delle scienze fisiche	9
1.2 – Caratteristiche delle teorie fisiche	12
1.3 – Meccanica quantistica standard	18
1.4 – Sovrapposizione ed <i>entanglement</i>	25
<b>Capitolo 2</b>	
IRREVERSIBILITÀ E MECCANICA QUANTISTICA	30
2.1 – Il “problema del tempo” all’interno della fisica	30
2.2 – Il “problema del tempo” e il rapporto tra fisica e matematica	41
2.3 – Il “problema del tempo” e la posizione di Prigogine	50
2.3.1 – Prigogine e la meccanica quantistica	55
2.3.2 – Wigner e l’operatore di inversione temporale	61
2.4 – Il “problema del tempo” e la asimmetria temporale della meccanica quantistica	66
2.5 – Decoerenza e asimmetria temporale	80
<b>Capitolo 3</b>	
LE INTERPRETAZIONI DELLA MECCANICA QUANTISTICA E IL LORO RAPPORTO CON IL “TEMPO”	90
3.1 – Interpretazioni “ <i>collapse</i> ” e “ <i>no collapse</i> ”	94
3.2 – L’interpretazione di Copenhagen	95
3.3 – La formulazione degli stati relativi di Everett	100
3.3.1 – <i>Many Worlds</i>	104
3.3.2 – <i>Many Minds</i>	113
3.4 – <i>Consistent Histories</i>	116
3.5 – Teoria di Bohm dell’onda pilota	125
3.6 – La teoria GRW	131
<b>Capitolo 4</b>	
MECCANICA QUANTISTICA E COMPLESSITÀ	139
Conclusioni	155
Appendice	160
Bibliografia	166
Bibliografia articoli	179
Ringraziamenti	195

## **INTRODUZIONE**

Nel presente lavoro si vuole analizzare il problema della (a)simmetria temporale presente nella descrizione quantistica della realtà, e della questione ad essa connessa riguardante una possibile “direzione del tempo”.

L’argomento dell’irreversibilità temporale delle teorie fisiche è stato protagonista, negli anni, di accesi dibattiti, sia nel campo della fisica classica, sia in quello della fisica quantistica. Per quanto riflessioni sul tema abbiano, in qualche modo, occupato tutta la storia della fisica, le questioni veramente stimolanti e problematiche sono sorte nella seconda metà dell’Ottocento, dopo la nascita della termodinamica e la formulazione del secondo principio sulla crescita dell’entropia di un sistema chiuso. In quel momento ci si è trovati di fronte ad una legge fondamentale temporalmente asimmetrica, che descriveva un mondo in cui passato e futuro erano distinguibili. Questo fatto è stato visto in contrasto con le leggi della dinamica classica, ritenute simmetriche per inversione temporale. Ci si è trovati dunque di fronte a due branche della fisica, entrambe fondamentali, che presentavano al proprio interno due concezioni del tempo differenti. Quale, delle due, poteva essere quella “corretta”? La Natura è simmetrica o asimmetrica per inversione temporale?

Entriamo un po' più nel dettaglio, e vediamo in cosa consiste effettivamente il problema della “direzione del tempo”.

La asimmetria temporale della “realtà che ci circonda” sembra essere del tutto evidente. Tutti siamo testimoni di fenomeni irreversibili, e tutti “sentiamo” che tra passato e futuro c'è differenza. Tutti noi invecchiamo, i fenomeni termici tendono naturalmente ad uno stato di equilibrio (stato di “entropia massima”), se in una tazza di latte aggiungiamo del caffè, la miscela ottenuta tenderà rapidamente ad un colore omogeneo. A memoria d'uomo non è mai successo che, mescolando del caffelatte, si ottenesse, in maniera naturale, una divisione netta del caffè dal latte.

Questa evidente asimmetria della natura è in contrasto con le leggi della dinamica classica, ritenute simmetriche per inversione temporale, cioè invarianti in seguito al passaggio dal parametro temporale  $t$  al suo opposto  $-t$ . Questo significa che se prendiamo una qualsiasi sequenza di stati del sistema prevista dalla legge dinamica, allora la sequenza inversa degli stati “invertiti temporalmente” è dinamicamente necessaria.<sup>1</sup>

Con Boltzmann inizia il tentativo di conciliare meccanica classica e termodinamica, o, per meglio dire, si tenta di “ridurre” la termodinamica ad una spiegazione meccanica. Indichiamo con  $S(t)$  lo stato di un sistema nello spazio delle fasi a sei dimensioni. Esso è chiaramente una funzione del tempo e, come insegna la meccanica statistica, ogni “macrostato” è costituito da più “microstati”  $S_i(t)$ . Boltzmann notò che i microstati  $S_i(t)$  che finivano in stati a più alta entropia dopo un'evoluzione temporale erano di gran lunga più numerosi (più “probabili”) di quelli che finivano in stati a entropia più bassa. Nello spazio delle fasi c'è dunque una predominanza degli stati che tendono verso l'equilibrio rispetto agli stati che se ne discostano.

---

<sup>1</sup> Si veda Zeh D., *The Physical Basis of the Direction of Time*, 5<sup>th</sup> Edition, Springer, 2007, pp. 11 e seguenti.

Il grande problema della “direzione del tempo” che scaturisce dalla meccanica statistica può essere riassunto nel seguente modo.<sup>2</sup> Se si considerano tutti i possibili microstati  $S_i(t)$  compatibili con il macrostato del sistema in esame, bisogna prendere in esame anche l’inverso temporale di ciascun microstato, dato che abbiamo visto che dinamicamente è uno stato previsto. Se poi si fa evolvere il sistema per un lasso di tempo  $\Delta t$ , allora l’evoluzione inversa sarà descritta da  $S_i(t-\Delta t)$ . La reversibilità implica che i microstati che vengono prima dello stato presente corrispondano ad un macrostato con un’entropia più alta di quest’ultimo. E quindi ciò significa che è molto probabile che lo stato presente sia evoluto da stati con entropia maggiore, il che è falso.

In sostanza, la reversibilità temporale della legge di evoluzione newtoniana porta alla conclusione che l’entropia dovrebbe aumentare verso il futuro e, simmetricamente, anche verso il passato.

Dall’analisi del problema si giunge a due conclusioni. Dato uno stato di non-equilibrio al tempo  $t_2$  e avendo  $t_1 < t_2 < t_3$ :

- 1) lo stato di non-equilibrio al tempo  $t_2$  evolverà verso uno più vicino all’equilibrio al tempo  $t_3$ ;
- 2) a causa della reversibilità dinamica, lo stato di non-equilibrio al tempo  $t_2$  è evoluto da uno più vicino all’equilibrio al tempo  $t_1$ .

E’ evidente che non possono accadere entrambe le situazioni (la situazione 2 è quella che non si verifica nella realtà).

Dunque la meccanica statistica fa una previsione che è falsificata dall’esperienza.

Negli anni sono state cercate diverse soluzioni a questo problema, dalla trattazione dell’entropia come una funzione delle distribuzioni di probabilità,<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Si veda, ad esempio, Callender C., *What is “The Problem of the Direction of Time”?*, *Philosophy of Science*, 64, 1996, pp. 223-234; Lebowitz J. L., *Boltzmann’s Entropy and Time’s Arrow*, *Physics Today*, American Institute of Physics, Settembre 1993, pp. 32-38.

<sup>3</sup> Sklar L., *Physics and Chance: Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993. L’approccio di cui si parla viene solitamente definito dei “molti sistemi” (“*many systems*”).

alla questione delle condizioni iniziali speciali.<sup>4</sup> Quest'ultimo tentativo è interessante, non solo a livello puramente teorico, ma soprattutto perché è paradigmatico del modo in cui spesso i problemi non vengano effettivamente “risolti”, ma semplicemente “modificati”.

In un certo senso, tentare di eliminare la situazione 2 descritta sopra senza cambiare le leggi della dinamica sembra un'impresa impossibile. Dunque si è pensato di ricorrere all'uso di “condizioni temporali al contorno asimmetriche”. Si è assunto che gli stati precedenti dell'universo siano caratterizzati da bassa entropia rispetto a quelli successivi. Insomma, non ci sono transizioni da stati ad alta entropia a stati a bassa entropia semplicemente perché “all'inizio” l'entropia era bassa.

Questo è un modo di spostare il problema che non è molto soddisfacente, e che sposta la questione, che diventa quella di capire come mai le condizioni iniziali dell'universo fossero proprio quelle lì.

Comunque, adesso, il nostro scopo non è quello di discutere le proposte per superare l'*impasse* che si è verificata a causa della “incompatibilità” tra termodinamica e dinamica classica. In questa breve introduzione si è voluto solamente tratteggiare quale è il problema temporale in fisica, in modo da poter più avanti sviluppare il lavoro sulla meccanica quantistica non relativistica. Anche in questo caso il discorso è sostanzialmente lo stesso: generalmente si pensa che l'equazione fondamentale sia simmetrica per inversione temporale, e ci si chiede come mai il mondo macroscopico (che dovrebbe “scaturire” da quello microscopico, regolato appunto dalle leggi quantistiche) presenti evidenti segni di asimmetria temporale.

---

<sup>4</sup> Lo stesso Boltzmann, nel 1897, affermava: “ La seconda legge della termodinamica può essere dimostrata dalla teoria meccanica se si suppone che lo stato attuale dell'universo, o almeno che quella sua parte che ci circonda, si sia evoluta da uno stato improbabile ed è ancora in uno stato relativamente improbabile. Questa è un'assunzione ragionevole da fare, poiché ci permette di spiegare i fatti di esperienza e non si dovrebbe pensare di potere dedurla da alcunché di più fondamentale.” (Boltzmann L., *Über irreversible Strahlungsvorgänge I*, Berl. Ber., 1897, p. 661. Trad. it. mia). A questo proposito si veda anche Price H., *Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*, Oxford University Press, New York, 1996; Price H., *Boltzmann's time bomb*, British Journal for the Philosophy of Science, 53, 2002, pp. 83-119.



E' necessario indicare che nel presente lavoro i termini "asimmetria temporale" e "irreversibilità" verranno spesso usati come sinonimi, anche se in letteratura questo non sempre accade.<sup>5</sup> Vengono a volte fatte delle distinzioni che sono importanti in ambito statistico. In questa sede, però, ci preoccupiamo in special modo della parte deterministica della meccanica quantistica e se si parlerà di "irreversibilità" dell'equazione di Schroedinger, si intenderà che l'equazione "non è reversibile", cioè non rimane invariante, nel momento in cui si operi l'inversione temporale.

Un altro aspetto importante da sottolineare è che di fenomeni irreversibili è piena la fisica. L'argomento è talmente ampio che servirebbero diversi volumi per poter trattare tutti i casi di ipotetiche "frece del tempo" nelle varie discipline fisiche. Si pensi, ad esempio, al fenomeno della radiazione elettromagnetica, in cui si è in presenza di soluzioni "ritardate" e "avanzate", sebbene solo le prime si manifestino in Natura. Oppure si pensi all'"auto-organizzazione" della materia, in processi fisici e biologici, che ha rivestito un'enorme importanza nelle riflessioni di Prigogine. Come è noto, l'entropia globale, nel momento in cui si consideri l'ambiente circostante, cresce sempre, in sintonia con la seconda legge della termodinamica, ma relativamente al singolo sistema (ad esempio, la cellula) si può essere testimoni di una decrescita dell'entropia.

Ancora si pensi alla legge di decadimento esponenziale, riguardante sistemi fisici instabili, oppure al fenomeno della gravità, sebbene la sua "direzione temporale" possa essere legata ad una questione di "condizioni iniziali" (la gravità descrive un'attrazione in entrambe le direzioni temporali, dato che le equazioni di Newton sono del secondo ordine rispetto al tempo).

Lo scopo di questo lavoro è tuttavia molto più limitato: si tratta di provare a vedere se davvero la meccanica quantistica non relativistica ha, nei confronti del tempo, quel rapporto di cui era convinto, fra molti altri, anche Ilya

---

<sup>5</sup> Uffink J., *Bluff your way in the second law of thermodynamics*, Studies in History and Philosophy of Science: Studies in History and Philosophy of Modern Physics, Volume 32, n. 3, Settembre 2001, pp. 305-394. <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000313>.

Prigogine: un rapporto caratterizzato dall'impossibilità di distinguere un passato da un futuro. Davvero la teoria quantistica è "senza tempo"?

Nel capitolo 1 verranno brevemente presentate le basi concettuali e teoriche della meccanica quantistica standard, quella cioè solitamente insegnata nell'ambiente accademico, quella più "in auge" nel mondo scientifico. Questo breve capitolo potrà essere utile per chi non conosce le caratteristiche di questa strana teoria. Non saranno certo pagine esaustive, però potranno fornire una prima idea per poter proseguire la lettura.

Nel secondo capitolo troveranno spazio delle riflessioni sul concetto di tempo in fisica e sulla relazione tra fisica e matematica. Questo perché non è vero che le "questioni temporali" in fisica siano solo legate a problemi di tipo tecnico e matematico, ma anche (forse soprattutto) a problemi di tipo filosofico-interpretativo. Si entrerà poi nel centro del capitolo e dell'intero lavoro, analizzando il pensiero di Prigogine circa la teoria quantistica e studiando più in dettaglio la meccanica quantistica e le sue equazioni: quella di Schroedinger, quella del momento, gli aspetti del collasso della funzione d'onda, la teoria della decoerenza. Vedremo come, tra i tanti punti interrogativi che rimarranno sospesi, può senz'altro essere ritenuto legittimo concludere che anche la meccanica quantistica standard sia una teoria "irreversibile".

Nel capitolo 3 passeremo all'analisi di alcune tra le più importanti "interpretazioni" della meccanica quantistica: da quella di Copenhagen a quella di Everett, da quella di Bohm a quella GRW. Questo breve studio è di fondamentale importanza, perché le meccaniche quantistiche sono molte: più che interpretazioni, si sosterrà che siamo in presenza di "teorie alternative", e ognuna di esse può "vedere" il tempo in maniera differente.

Infine, il capitolo 4 sarà dedicato ad una riflessione sull'importanza di una riscoperta del tempo all'interno della teoria quantistica per quanto riguarda la sua appartenenza a pieno titolo a quelle discipline "complesse", non meccanicistiche, irreversibili. Troppo spesso ci si è fermati alla teoria del caos come paradigma di una "fisica diversa" da quella classicamente accettata.

Ferma restando l'importanza di questa teoria, si vuole sottolineare come anche la meccanica quantistica possa ambire ad entrare in quel consesso di "scienze nuove" caratterizzate da una più stretta "alleanza" con la Natura. A differenza di quanto pensava Prigogine, la meccanica quantistica (o, perlomeno, alcune sue interpretazioni) porta con sé nuovi argomenti a favore dell'irreversibilità temporale, senza dover per forza operare dei sostanziali cambiamenti al suo interno. Probabilmente, però, il tempo che scaturisce dalla meccanica quantistica è qualitativamente diverso da quello descritto da Prigogine, e fa entrare prepotentemente in gioco l'osservatore, proprio ciò che Prigogine voleva evitare.

In Appendice si possono trovare alcuni particolari più prettamente tecnico-matematici che completano e precisano le riflessioni presenti nel capitolo due.

## **CAPITOLO 1**

### **LE CARATTERISTICHE DELLA MECCANICA QUANTISTICA**

La storia della fisica è, come probabilmente tutte le storie riguardanti le grandi imprese intellettuali dell'uomo, incredibilmente complessa. Tentare di districare le varie matasse in cui sono ingarbugliati i fili dei percorsi seguiti nello sviluppo delle teorie e delle scoperte è un'impresa titanica, che richiederebbe tempi, spazi e capacità intellettive di ordini di grandezza molto superiori di quelli a disposizione dell'autore di questo scritto.

Non è dunque nelle mie intenzioni proporre un lavoro di questo genere, anche se è innegabile l'importanza degli sviluppi storici della disciplina che andremo ad analizzare, e non solo per quanto riguarda la meccanica quantistica, ma soprattutto lo sviluppo che, *dalle teorie precedenti*, ha portato alla meccanica quantistica.

E' evidente che questo è un "viaggiare a ritroso" che potrebbe non trovare la propria fine, o perlomeno la troverebbe nella nascita dell'uomo stesso. Fare risalire l'inizio della scienza moderna a Cartesio, Copernico, Galileo, Newton,

è un fatto condiviso, ma nello stesso tempo non si può dimenticare tutto quello che c'era dietro questi pensatori. Perché è avvenuta *quella* rivoluzione scientifica? Si può parlare di rivoluzione scientifica, prima di tutto? Si può parlare di Galileo, o di Newton, senza aver presente Aristotele? Si può parlare di Aristotele senza avere in mente i miti precedenti l'inizio del cosiddetto "ragionamento filosofico"?

Insomma, il cammino sarebbe troppo complesso. E' bene essere consapevoli, dunque, che la panoramica che si vuole proporre in questo breve capitolo, di natura più che altro propedeutica, è molto incompleta, di sicuro imprecisa, insufficiente. Il mio scopo non è quello di delineare un tracciato preciso e non ambiguo del cammino che è stato fatto da Galileo ai nostri giorni (ci sono libri che hanno già adempiuto questo lavoro, e lo hanno fatto molto meglio di come potrei farlo io), ma è più che altro quello di dare alcune indicazioni, tecniche e concettuali, di come la fisica sia cambiata (e in molti aspetti sia rimasta la stessa) lungo i secoli. Vorrei soprattutto dare un'idea di cosa sia la meccanica quantistica non relativistica "standard", ovvero sia quella insegnata nelle università, quella maggiormente accettata a livello accademico: come funziona, cosa descrive, che strumenti utilizza.

Tutto questo tornerà utile, lo spero, per una migliore comprensione dei capitoli successivi.

## **1.1 – Brevissimi cenni sull'evoluzione delle scienze fisiche**

Si può far risalire a Galileo, alla cosiddetta "rivoluzione scientifica" del Seicento, l'inizio di quella che sarà la progressiva matematizzazione dello studio dei fenomeni naturali.<sup>1</sup> Questa matematizzazione trovò in Leibniz e

---

<sup>1</sup> Galileo Galilei, *Il Saggiatore*, Ed. Naz. VI, p. 232. In questo modo Galileo riprende idee platonico-pitagoriche. Si può sostenere che l'idea che il libro della Natura fosse scritto in carattere matematico fosse già presente nel Timeo di Platone. Bisognerebbe inoltre analizzare

Newton i maggiori esponenti, coloro cioè che “crearono” un nuovo strumento, in questo caso l’analisi differenziale, per poter affrontare la descrizione dei moti che stavano studiando.<sup>2</sup>

Questo nuovo strumento matematico si rivelò estremamente fecondo e potente, e si può pensare che insieme ad esso si accompagnò un forte carico di determinismo.

L’utilizzo delle equazioni differenziali, la possibilità di poter calcolare la variazione di una determinata quantità rispetto al tempo, permette di conoscere gli stati futuri di un sistema fisico a partire dalla conoscenza dello stato ad un certo tempo determinato.<sup>3</sup> Tutto lo sviluppo della meccanica classica nel Settecento fu una vera e propria “traduzione” rigorosissima e molto elegante dei fatti fisici sotto esame (moti di pendoli, moti di oggetti sottoposti a determinati vincoli, ecc.) in termini di matematica differenziale, sfociata nel 1788 nel famoso trattato *Mécanique analytique* di Joseph-Louis Lagrange<sup>4</sup> e

---

l’intenzione stessa di Galileo: intendeva dire che la matematica è l’alfabeto per interpretare il libro della Natura, o è ciò che la costituisce?

<sup>2</sup> Non è questa la sede per trattare il problema della priorità dell’invenzione del calcolo infinitesimale che scoppì tra Newton e Leibniz nella fine del XVIII secolo. Tradizionalmente si considera il 1684 come l’anno di nascita del calcolo infinitesimale, anno in cui Leibniz pubblica sugli *Acta eruditorum* la sua *Nova methodus pro maximis et minimis, itemque tangentibus, quae nec fractas nec irrationales quantitates moratur, et singulare pro illis calculi genus*. Quasi venti anni prima della pubblicazione della *Nova Methodus* di Leibniz, nel 1665-1666, Newton aveva già elaborato un suo calcolo. Gli elementi fondamentali, con l’uso sistematico degli sviluppi in serie, trovano una prima redazione nel *De analysi per aequationes numero terminorum infinitas* scritto nel 1669 ma pubblicato solo nel 1711. Comunque la pubblicazione dei risultati che Newton aveva ottenuto con il metodo del “calcolo delle flussioni” avvenne nel 1687 con i *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Newton riconosce la validità del suo metodo e di quello di Leibniz, metodo che i due si erano comunicati in una corrispondenza tenuta dieci anni prima. Si veda Cantelli G., a cura di, *La disputa Leibniz-Newton sull’analisi*, Bollati Boringhieri, Torino, 1958 (nuova edizione 2006).

<sup>3</sup> Qui bisogna essere un po’ più precisi. E’ probabile che sia abbastanza condivisibile l’idea di un determinismo fisico e matematico presente nei lavori di Newton, anche se ad onor del vero nei suoi scritti e in quelli di Leibniz non sono presenti le cosiddette “condizioni iniziali” (vedi più avanti nel testo), ma è presente un integrale variazionale. Questo significa che non è attraverso la conoscenza dello stato iniziale che si può determinare il futuro del sistema, ma solo attraverso la sua storia tra due istanti. Inoltre Newton introdusse l’intervento divino “*una tantum*” per correggere alcuni scostamenti del moto dei pianeti (che evidentemente non seguivano in maniera esatta le equazioni del moto). Il fatto però che Newton considerasse l’universo come un immenso orologio fa pensare che, pure con i suddetti limiti, un’idea deterministica fosse presente. Il determinismo universale come lo conosciamo noi nacque con Laplace nella sua opera *Mécanique céleste* del 1799.

<sup>4</sup> Trad. inglese, Lagrange J.L., *Analytical Mechanics*, Springer Edition, 2001.

poco più avanti con i lavori e le equazioni di *Sir William Rowan Hamilton*.<sup>5</sup> La possibilità di “matematizzare”, di “prevedere il futuro”, portò anche ad un indubbio progresso in campo tecnico, ed è probabilmente proprio da questo momento che la parziale sovrapposizione tra fisica e tecnica diventerà sempre più completa.<sup>6</sup>

La visione deterministica vera e propria arriverà al suo culmine con Laplace, alla fine del diciottesimo secolo.<sup>7</sup>

In questo periodo era predominante quella che viene solitamente definita “visione meccanicistica della Natura”, ovverosia il pensiero secondo cui questa può essere descritta come se fosse una grande macchina, perfettamente prevedibile e predicibile, e in cui le “quantità fisiche” fondamentali che ricorrono nel formalismo sono quantità di posizione, “spaziali”. La Natura è un insieme di ingranaggi, e di essa si possono descrivere precisamente le distanze e le variazioni di distanze tra i vari “punti” dell’insieme. Ad una causa segue un effetto, e tutto viene svuotato da quelle che si possono definire “forze vive”. Questo discorso, cominciato con Cartesio, è molto più complesso e sfaccettato, e non è questa la sede per approfondirlo.<sup>8</sup> L’unica intenzione è quella di segnalare come una matematica “forte”, che permette di prevedere e di maneggiare gli “avvenimenti fisici”, possa aiutare e rafforzare la

---

<sup>5</sup> Hamilton W. R., *On a General Method in Dynamics*, Philosophical Transactions of the Royal Society, Parte II, 1834. Questo lavoro è stato poi ripubblicato in *The Mathematical Papers of Sir William Rowan Hamilton, Volume II: Dynamics*, Royal Irish Academy, Cambridge University Press, 1940.

<sup>6</sup> Ovviamente la matematica veniva studiata ed utilizzata già da parecchio tempo. E’ però con Cartesio prima, con Galileo e Newton poi, e dopo con la meccanica analitica che il linguaggio matematico viene elevato al rango di “linguaggio vero” della Natura che permette di parlare dei fenomeni e di fare previsioni. Questo porterà poi ad applicazioni tecniche sempre più raffinate. Si veda Koyré A., *Dal mondo del pressappoco all’universo della precisione*, Einaudi, 1979.

<sup>7</sup> Nell’introduzione alla sua *Théorie analytique des probabilités* (1812), Laplace diede la formulazione più celebre del determinismo meccanicista: “solo un’Intelligenza superiore che conoscesse in un dato istante posizioni, velocità e forze agenti relative a tutti i corpi dell’universo potrebbe, per via analitica, determinare con precisione assoluta il comportamento passato e quello futuro della macchina del mondo.” (trad. it. mia).

<sup>8</sup> Si rimanda a Giannetto E., *La “meccanica classica” e la concezione meccanicistica della natura*, in *Saggi di Storie del Pensiero Scientifico*, Bergamo University Press, Bergamo, 2005, pp. 249-261.

convinzione che i sistemi che ci stanno attorno siano controllabili e “dominabili”.

Nell'Ottocento si aprirono poi altre strade di studio dei fenomeni fisici, difficilmente riconducibili all'area della meccanica analitica: i fenomeni legati al calore, descritti dalla termodinamica.<sup>9</sup> Si studiarono anche i fenomeni elettromagnetici, che trovarono una propria sintesi nelle equazioni di Maxwell.<sup>10</sup>

L'idea di unità e di eleganza che domina spesso le scelte e i ragionamenti degli scienziati portò a vari tentativi di ricondurre uno di questi campi ad un altro ritenuto più fondamentale, come dimostra il tentativo di Boltzmann di dare un'interpretazione meccanica ai fenomeni termodinamici.<sup>11</sup>

All'inizio del Novecento, inoltre, si aggiunse una delle più grandi “rivoluzioni” della storia del pensiero scientifico: quella della relatività ristretta,<sup>12</sup> seguita nel 1916 da quella generale.<sup>13</sup>

## 1.2 – Caratteristiche delle teorie fisiche

Siamo arrivati, in una maniera sfacciatamente veloce e superficiale, agli albori della meccanica quantistica. Prima di continuare, è bene vedere le caratteristiche che “accomunano” tutte, o quasi, le teorie cui abbiamo brevemente accennato.

---

<sup>9</sup> Per una trattazione esaustiva dell'argomento si può vedere Fermi E., *Thermodynamics*, New Ed edition, Dover Publications, 1956. Trad. it. *Termodinamica*, Bollati Boringhieri, Torino, 1958.

<sup>10</sup> Maxwell J.C., *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Vol. 1 e 2, Dover Publications, 1954 (Il testo venne pubblicato nel 1873).

<sup>11</sup> Boltzmann L., *Über die Mechanische Bedeutung des Zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie*, *Wiener Berichte* 53, 1866, pp. 195–220.

<sup>12</sup> Einstein A., *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, *Annalen der Physik* 17, 1905, pp. 891-921. Trad. it. *L'elettrodinamica dei corpi in movimento*, <http://matsci.unipv.it/persons/antoci/re/Einstein05.pdf>

<sup>13</sup> Einstein A., *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, *Annalen der Physik* 49, 1916, pp. 769-822. Trad. it. *I fondamenti della teoria della relatività generale*, <http://matsci.unipv.it/persons/antoci/re/Einstein16a.pdf>



La meccanica classica, la termodinamica, la teoria dell'elettromagnetismo e la teoria della relatività (che altro non è che una "ridefinizione" delle leggi della fisica classica partendo da postulati differenti, in particolare quello rivoluzionario dell'invarianza e della insuperabilità della velocità della luce) si basano tutte su delle leggi espresse in forma di equazioni differenziali (ordinarie oppure alle derivate parziali), in cui viene espressa la variazione di alcune quantità in funzione di determinati parametri.

In meccanica classica, ad esempio, proprio perché, come abbiamo visto, le quantità fondamentali sono "spaziali", in generale vengono espresse variazioni di spazio in funzione del tempo: la soluzione di queste equazioni porta alla definizione di una traiettoria. E' da notare che questa traiettoria non necessariamente rispecchia la traiettoria "reale" e "visibile" che abbiamo sotto gli occhi. Essa può essere anche una traiettoria descritta in uno spazio astratto denominato "spazio delle fasi", che può avere addirittura più dimensioni delle tre tradizionali.<sup>14</sup>

In termodinamica, in generale, avremo delle equazioni differenziali che regoleranno le variazioni di volumi, di calori o di entropie rispetto al tempo, o rispetto a qualche altra quantità.

Nell'elettromagnetismo, le equazioni di Maxwell rappresentano il comportamento di campi magnetici ed elettrici, che sono espressi tramite delle "funzioni d'onda": si parla infatti di "onde elettromagnetiche". Queste onde sono funzioni dello spazio e del tempo.

Insomma, senza voler allungare troppo il discorso, si deve notare come, a prescindere dalle quantità in gioco, che chiaramente variano a seconda della teoria e dell'oggetto di studio che si prende in considerazione, l'elemento in comune di tutte queste teorie è il fatto che l'evoluzione e il cambiamento di determinate quantità fisiche, con un preciso significato fisico, è descritto da equazioni differenziali. E' chiaro che, nel caso in cui l'equazione differenziale

---

<sup>14</sup> Goldstein H., *Classical Mechanics*, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1950. Trad. it. *Meccanica classica*, Zanichelli, 1971.

sia espressa in una variazione temporale, allora si potrà essere in grado di “predire” (perlomeno matematicamente) il futuro.<sup>15</sup>

La soluzione di un'equazione differenziale è una funzione. La conoscenza delle “condizioni iniziali” permette la ricerca di una “soluzione esatta”, cioè permette di venire a conoscenza di una funzione matematicamente ben definita in maniera univoca.<sup>16</sup>

Non ci sono in gioco delle probabilità, se non all'interno di una branca, peraltro fondamentale, della meccanica classica, ovverosia la meccanica statistica.<sup>17</sup> In questa disciplina si studia il comportamento non di singole particelle o punti materiali, ma di “insiemi”, di, diciamo così, “valori medi” di quantità fisiche relative ad un numero elevato di elementi. E' una meccanica che ha permesso, ad esempio, di comprendere il comportamento dei gas, cioè di un insieme di un numero di particelle troppo grande perché potesse essere studiato con le leggi della meccanica classica.

Dunque il risultato che scaturisce dallo studio di questi sistemi sarà sostanzialmente caratterizzato da “probabilità”, da “funzioni di distribuzione”, che indicheranno con buona approssimazione lo stato in cui può trovarsi l'insieme statistico in esame.

Torniamo al periodo storico in cui eravamo rimasti. All'inizio del secolo vengono studiati determinati fenomeni che non riescono ad essere spiegati all'interno delle teorie che abbiamo visto. Il principale tra questi è noto come la “radiazione di corpo nero”. Essenzialmente gli esperimenti fatti in quegli

---

<sup>15</sup> In alcuni casi si possono costruire, a partire da equazioni differenziali rispetto al tempo, soluzioni in cui il parametro  $t$  viene completamente eliminato. Ad esempio, dalle soluzioni tempo-dipendenti delle equazioni di Newton per un moto orbitale,  $r(t)$  e  $\varphi(t)$ , si possono costruire soluzioni del tipo  $r(\varphi)$ . Tutti i moti nell'Universo potrebbero essere rimpiazzati da traiettorie “senza tempo” in uno spazio delle configurazioni più ampio. Questo è un tema interessante, perché dimostra come l'interpretazione del parametro  $t$  possa presentare molte più sfaccettature di quanto si pensi, e inoltre, in un certo senso, porta ad una eliminazione di un generico “tempo assoluto”. Si veda Zeh D., *The Physical Basis of the Direction of Time*, op. cit., p. 12.

<sup>16</sup> Si veda Fusco N., Marcellini P., Sbordone C., *Analisi matematica due*, Liguori Editore, Napoli, 1996. Oppure Tenenbaum M., *Ordinary Differential Equations*, Dover Publications, 1985.

<sup>17</sup> Chandler D., *Introduction to Modern Statistical Mechanics*, Oxford University Press, 1987; Huang K., *Statistical Mechanics*, John Wiley & Sons, 1990.

anni mostravano che l'intensità della radiazione elettromagnetica emessa dal corpo nero ad una certa temperatura aveva un determinato tipo di andamento. Prima del 1900 ogni tentativo di spiegazione di questo andamento era fallito. Ci avevano provato Rayleigh e Jeans, e avevano ottenuto una predizione teorica che era in buon accordo con i dati sperimentali solo per grandi valori della lunghezza d'onda. La parte dello spettro relativa alle piccole lunghezze d'onda rimaneva un mistero.<sup>18</sup>

Un altro elemento di confusione lo portò il fenomeno chiamato “effetto fotoelettrico”. Investendo con un radiazione elettromagnetica una lastra metallica (storicamente, nel 1888, Hertz utilizzò radiazione ultravioletta e una lastra di zinco), si nota che la lastra di zinco perde la propria carica se inizialmente era carica negativamente, si carica positivamente se inizialmente era neutra e non muta di stato se inizialmente era carica positivamente.<sup>19</sup> Come può essere interpretato questo fatto? Ai tempi si suppose che la radiazione ultravioletta fosse capace di estrarre da alcuni materiali delle particelle dotate di carica negativa (di elettroni si iniziò a parlare dopo la scoperta di queste particelle da parte di Thomson, che avvenne nel 1897)<sup>20</sup>. Secondo l'elettromagnetismo classico, l'emissione di elettroni dovrebbe dipendere dall'energia portata dalla radiazione incidente. Dovrebbe essere del tutto

---

<sup>18</sup> La predizione di Rayleigh e Jeans formulata nel 1905 secolo portava a dire che un corpo nero in equilibrio termico avrebbe emesso radiazione con potenza infinita. Questo, ovviamente, è falso. Nel 1911 Paul Ehrenfest coniò la locuzione “catastrofe ultravioletta” per descrivere il problema della formulazione di Rayleigh e Jeans, dato che la regione dello spettro che non riusciva ad essere descritta era quella relativa alle alte frequenze. È storicamente interessante il fatto che nel 1900 la legge di Rayleigh aveva una forma leggermente diversa, in cui compariva un esponenziale negativo con esponente frazionario con al denominatore il prodotto della lunghezza d'onda per la temperatura. Questo fattore fu inserito *ad hoc* per rendere la legge più simile a quella di Wien, che all'epoca era la più vicina ai dati sperimentali.

<sup>19</sup> Per ulteriori informazioni storiche e tecniche riguardo a questo problema si rimanda all'introduzione di Rossetti C., *Istituzioni di Fisica Teorica*, Edizioni Leprotto & Bella, Torino, 1990 e a Ghiozzi M., *Storia della Fisica*, Bollati Boringhieri, Torino, 2005.

<sup>20</sup> L'elettrone fu la prima particella subatomica ad essere scoperta. Thomson ne determinò la carica elettrica (negativa) e la massa che risultò essere molto più piccola di quella del più semplice atomo conosciuto, l'idrogeno. Il modello atomico di Thomson (proposto nel 1898) prevedeva una sfera di materia caricata positivamente in cui erano immersi degli elettroni negativi. Questo modello fu temporaneamente accettato, ma fu poi sostituito da quello di Rutherford nel 1911 (nucleo carico positivamente ed elettroni che gli orbitano attorno).

indipendente dalla frequenza della radiazione. Invece si notò che l'energia degli elettroni emessi dipendeva proprio dalla frequenza della radiazione incidente. In più esisteva anche una frequenza di soglia, sotto la quale la radiazione non riusciva più a strappare l'elettrone.<sup>21</sup>

Questi problemi, brevemente accennati, furono risolti nel momento in cui si suppose che esistessero i cosiddetti “quanti d'azione”. Ad esempio, si suppose che l'energia della radiazione del corpo nero potesse presentarsi solamente in multipli di “pacchetti d'energia” discreti, e con questa ipotesi l'andamento della curva descrivente l'intensità della radiazione elettromagnetica del corpo nero veniva riprodotto con ottima approssimazione. All'inizio del secolo, Planck propose che i “pacchetti di energia” fossero proporzionali alla frequenza della radiazione, con la costante di proporzionalità uguale ad  $h$ , la famosa costante di Planck.<sup>22</sup>

Avvenne così che si scoprì una fondamentale “discretizzazione” della Natura, che si riversò sui modelli fisici che stavano nascendo. L'atomo di Bohr, con le sue orbite discretizzate, ne è l'esempio più eclatante.<sup>23</sup>

Questi nuovi fenomeni, queste nuove descrizioni della Natura, vennero infine “ordinati” in una nuova teoria, che si proponeva di essere più generale delle ipotesi *ad hoc* che caratterizzavano i modelli in vigore: la meccanica quantistica di Heisenberg, formulata nel 1925.<sup>24</sup> Nello stesso anno, Max Born e Pascual Jordan scrissero un articolo in cui riconobbero che gli oggetti

---

<sup>21</sup> Per maggiori dettagli si veda Caldirola P., Cirelli R., Prosperi G., *Introduzione alla Fisica Teorica*, UTET, Torino, 1996, pp. 214-216.

<sup>22</sup> La storia della nascita della fisica dei quanti è molto più complessa e dettagliata di quanto non risulti dalle introduzioni dei libri di fisica teorica. Una buona e, presumo, abbastanza completa (anche a livello tecnico e matematico) esposizione di questa storia si può trovare all'indirizzo internet [http://www.fisicamente.net/Nascita\\_di\\_quanti.pdf](http://www.fisicamente.net/Nascita_di_quanti.pdf).

<sup>23</sup> Bohr N., *On the constitution of atoms and molecules*, Philosophical Magazine 26, 1913, pp. 1-25, 476-502, 857-875. Gli articoli appena segnalati si possono consultare in lingua inglese sul sito <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Bohr/Bohr-1913a.html>.

<sup>24</sup> Heisenberg W., *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*, Zeitschr. für Physik, Vol. 33, 1925, p. 879, riportato in Dugas R., *A History of Mechanics*, Dover Publications, 1988, pp. 571 e seguenti (Dugas R., *Histoire de la mécanique*, Editions du Griffon, Neuchatel, 1955).

matematici usati da Heisenberg erano in realtà matrici.<sup>25</sup> Fu poi in un articolo del 1926 che Heisenberg, Born e Jordan, insieme, definirono in maniera completa la nuova formulazione della meccanica delle matrici.<sup>26</sup>

Il modo in cui Heisenberg pervenne alle equazioni della sua teoria è molto interessante: egli partì esclusivamente dalle quantità fisiche che si possono “conoscere”, effettivamente “sperimentare”.<sup>27</sup> Nella fisica atomica queste erano l'intensità della radiazione emessa o assorbita dagli atomi e la frequenza della stessa. La traiettoria, così fondamentale nella cornice della fisica classica, veniva a perdere non solo importanza, ma addirittura significato. Più avanti, con le relazioni di indeterminazione, Heisenberg dimostrerà che conoscere contemporaneamente la posizione e il momento di una particella con precisione assoluta è impossibile, facendo definitivamente crollare l'idea di traiettoria.<sup>28</sup>

Nel 1926, Erwin Schroedinger formula la sua meccanica ondulatoria,<sup>29</sup> che, più avanti, dimostrerà essere equivalente alla meccanica matriciale di Heisenberg.<sup>30</sup>

---

<sup>25</sup> Born M., Jordan P., *Zur Quantenmechanik I*, Zeitschr. für Physik, Vol. 34, 1925, p. 858, riportato parzialmente in Dugas R., *A History of Mechanics*, op. cit., pp. 575 e seguenti. In realtà c'è da dire che gli oggetti matematici presenti nel lavoro di Heisenberg potevano essere matrici, ma non solo. Dirac, nei suoi *Principles of Quantum Mechanics* del 1929, parlerà di *q-numbers*, in cui rientrano le matrici, ma anche i quaternioni e gli ottonioni.

<sup>26</sup> Born M., Heisenberg W., Jordan P., *Zur Quantenmechanik II*, Zeitschr. für Physik, Vol. 35, 1926, p. 557, riportato parzialmente in Dugas R., *A History of Mechanics*, op. cit., pp. 577-578.

<sup>27</sup> La posizione filosofica di Heisenberg è complessa, eppure anche decenni dopo la formulazione della meccanica quantistica egli si poneva in netta contrapposizione a quegli scienziati che avrebbero voluto ritornare al concetto di realtà classica o, come egli stesso dice, all' "ontologia del materialismo". Sua è la frase: "Il nostro compito non può essere quello di formulare voti su come dovrebbero essere i fenomeni atomici, ma soltanto quello di intenderli". Si veda Heisenberg W., *Fisica e Filosofia*, Edizioni Net, Milano, 2002, p. 154 (*Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*, Harper and Row, New York, 1958). La sua posizione filosofica è chiaramente influenzata (e influenza a sua volta, in una sorta di circolarità) dalla teoria dei fenomeni atomici, così diversa rispetto alla fisica classica macroscopica.

<sup>28</sup> Heisenberg W., *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, Zeitschr. für Physik, Vol. 43, 1927.

<sup>29</sup> Schroedinger E., *Quantisierung als Eigenwertproblem*, I, II, III, IV, in *Annalen der Physik* 79 (1926) pp. 361-376, 79 (1926) pp. 489-527, 80 (1926) pp. 437-490, 81 (1926) pp. 109-139.

<sup>30</sup> Schroedinger E., *Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen*, in *Annalen der Physik* 79, 1926, p. 734. Si può scaricare da internet la traduzione italiana dell'articolo all'indirizzo: <http://matsci.unipv.it/persons/antoci/tq.html>. La questione è controversa. In realtà Schroedinger dimostrò che da una funzione d'onda si poteva costruire una matrice, ma non viceversa. Si può sostenere che ci sono alcuni casi in cui non si

Grazie ai contributi di Louis de Broglie,<sup>31</sup> Schroedinger era riuscito a creare un edificio teorico coerente, in cui ad ogni particella materiale veniva associata un'onda, per mezzo della quale veniva descritta. Attraverso un procedimento che univa elementi di meccanica e di ottica ondulatoria, arrivò all'equazione che porta il suo nome e che regola l'evoluzione temporale della funzione d'onda che descrive il sistema in esame. L'equazione di Schroedinger riveste dunque, per la meccanica quantistica, la stessa importanza che l'equazione di Newton riveste per la fisica classica.<sup>32</sup>

Negli anni, la visione ondulatoria di Schroedinger ha prevalso su quella puramente matriciale (e, dunque, altamente “astratta”) di Heisenberg, sebbene con delle modifiche, *in primis* quella assolutamente fondamentale relativa all'interpretazione della funzione d'onda: da oggetto che descriveva una distribuzione di carica, come inizialmente pensava Schroedinger, essa è diventata un'ampiezza di probabilità, in seguito alle riflessioni di Max Born.<sup>33</sup>

### 1.3 – Meccanica quantistica standard

Addentriamoci adesso nella descrizione delle caratteristiche principali della meccanica quantistica standard, ovverosia di quella comunemente utilizzata nel mondo accademico, che richiama la teoria originale di Schroedinger (nel senso che utilizza la formulazione ondulatoria), e che è caratterizzata da quella che

---

può costruire una funzione d'onda, mentre una matrice sì. Si veda il saggio di Giannetto E., *La Rivoluzione della meccanica delle Matrici di Heisenberg, Born e Jordan e il Problema dell'Equivalenza con la Meccanica di Schroedinger*, in *Saggi di Storie del Pensiero Scientifico*, op. cit., p. 351, e tutti i riferimenti ivi citati.

<sup>31</sup> Si veda la dettagliata descrizione dei procedimenti di De Broglie in Dugas R., *A History of Mechanics*, op. cit., pp. 554 e seguenti. Inoltre si veda Messiah A., *Quantum Mechanics*, Dover Publications, 1999, pp. 49 e seguenti (Messiah A., *Mécanique Quantique*, Dunod, 1958. Trad. ing. *Quantum Mechanics*, John Wiley Sons, 1958).

<sup>32</sup> Per vedere il modo in cui Schroedinger arrivò alla sua equazione si veda: Caldirola P., Cirelli R., Prosperi G., *Introduzione alla Fisica Teorica*, op. cit., pp. 246-250; oppure Dugas R., *A History of Mechanics*, op. cit., pp. 561-566.

<sup>33</sup> Born M., *Quantenmechanik der Stossvorgänge*, Zeitschr. für Physik, Vol. 38, 1926, p. 803.

solitamente viene chiamata “interpretazione di Copenhagen”, la visione proposta da Bohr e da Heisenberg nel 1927, implementata dalla notazione di von Neumann e di Dirac.

Gli “oggetti” fondamentali della meccanica quantistica sono i “vettori di stato” e gli “operatori”. Dobbiamo ricordare che il primo postulato della teoria quantistica assume che “ad ogni sistema fisico venga associato uno spazio di Hilbert”.<sup>34</sup> Questo significa che tutte le volte che ci si appresta a studiare un sistema (in particolare microscopico, come una particella, ma si può generalizzare la questione fino a comprendere i sistemi macroscopici), ci si deve “mettere” in uno spazio matematico ben definito, uno spazio vettoriale, in cui vivono degli elementi, chiamati “vettori” che seguono determinate regole operazionali e altri elementi chiamati “operatori”.

Si avrà allora una corrispondenza tra gli oggetti matematici “vettori” e gli oggetti fisici che si sta studiando. Nel caso più semplice, ad esempio lo studio del comportamento di un elettrone, lo stato fisico di quest’ultimo sarà dunque descritto dal suo “vettore di stato”. In pratica, ad esso si assocerà una funzione d’onda (generalmente complessa, dato che la meccanica quantistica “vive” nel campo più allargato dei numeri e delle funzioni complesse. Questo sarà di estrema importanza per l’argomento trattato in questa tesi).

Gli “operatori” sono delle applicazioni che agiscono su un vettore e lo modificano, facendolo diventare un altro vettore.<sup>35</sup> In meccanica quantistica, agli operatori vengono associate le grandezze osservabili.<sup>36</sup> si pensi alle più comuni, la posizione, il momento, l’energia di una particella.

La funzione d’onda (generalmente indicata con la lettera greca  $\Psi(x,t)$ , indicando anche la sua dipendenza dalle coordinate spaziali e temporali) che descrive lo stato di un sistema fisico è, dal punto di vista informativo, “massimale”. Questo vuol dire che tutto ciò che possiamo conoscere di quel

---

<sup>34</sup> Caldirola P., Prosperi G., Cirelli R., *Introduzione alla fisica teorica*, op. cit., p. 484.

<sup>35</sup> Si veda Messiah A., *Quantum Mechanics*, op. cit., pp. 163 e seguenti.

<sup>36</sup> Questo è il postulato due della formulazione generale della meccanica quantistica. Si veda Caldirola P., Prosperi G., Cirelli R., op. cit., p. 485.

sistema è “inscritto” lì dentro, cioè l’informazione che essa trasporta è massima.<sup>37</sup> Se al tempo  $t_0$  la funzione d’onda assume una determinata forma, è possibile, nel momento in cui si conoscano i potenziali in gioco in tutto il sistema, calcolare la forma della funzione d’onda ad un tempo successivo  $t_1$ . Questo è possibile facendo “evolvere” la  $\Psi(x,t)$  nel tempo, ovvero risolvendo l’equazione di Schroedinger.

Dunque, da una parte, è riscontrabile un’analogia con il modo di procedere della meccanica classica: se pensiamo all’equazione fondamentale di Newton,  $F = m d^2 x(t)/dt^2$ , questa descrive la variazione nel tempo di una funzione (lo spazio in funzione del tempo) e ci permette dunque di conoscere il punto nello spazio in cui si troverà il sistema in un generico istante di tempo futuro, a patto che si conoscano le forze in gioco, cioè  $F$ .

Dall’altra parte c’è però una differenza che non può non saltare agli occhi: in meccanica quantistica si lavora con la funzione d’onda cui non si riesce a dare un significato fisico in modo immediato come si può invece fare con la  $x(t)$  presente nell’equazione di Newton, che è la traiettoria (o come si può fare, parlando più in generale, con le traiettorie nello spazio delle fasi).

La  $\Psi(x,t)$  di una particella è un’onda che si associa a quello che solitamente viene pensato come un corpuscolo: che cosa significa?

Max Born trovò la risposta (che, sottolineiamo, è la risposta più in voga nel mondo accademico, quella che caratterizza la visione standard della teoria, ma non è l’unica, e da alcuni non è accettata): la  $\Psi(x,t)$  del sistema rappresenta un’*ampiezza di probabilità*.<sup>38</sup>

L’equazione di Schroedinger mi permette dunque di fare evolvere nel tempo un’ampiezza di probabilità associata al sistema fisico in esame. Nel momento in cui si conosce la  $\Psi(x,t)$  ad un tempo  $t_0$ , si può calcolare il suo modulo

---

<sup>37</sup> Ripetiamo che stiamo trattando la visione “standard” della meccanica quantistica. Altre interpretazioni non condividono il fatto che la funzione d’onda abbia un carattere “massimale” per quanto riguarda l’informazione che trasporta (ad esempio, le teorie a variabili nascoste).

<sup>38</sup> Born M., *Quantenmechanik der Stossvorgänge*, op. cit., p. 803.



quadro, ottenendo così un numero:<sup>39</sup> questo numero rappresenta la *probabilità che la particella si trovi in un intorno del punto  $x$ , nel momento in cui si esegua una misura di posizione.*

Due sono le precisazioni che è necessario fare. La prima riguarda il carattere intrinsecamente probabilistico dei risultati appena enunciati. Non siamo più nel caso della meccanica statistica classica, in cui la probabilità interveniva a causa della nostra ignoranza delle posizioni e delle velocità di un numero molto grande di particelle. Adesso la probabilità è il significato della funzione d'onda: pur conoscendo “tutto” (ricordiamoci che  $\Psi(x,t)$  rappresenta l'informazione massimale sul sistema) non si può ottenere una “certezza” come risultato di una misurazione di posizione.

Il secondo aspetto da precisare riguarda il fatto che il modulo quadro di  $\Psi(x,t)$  non indica semplicemente la probabilità che la particella sia nei dintorni di  $x$ , ma che sia così *nel momento in cui* si decide di misurare la posizione. Questa precisazione è importante perché la meccanica quantistica standard non fa supposizioni di “realtà” a prescindere dal processo di misurazione che si attua. Supporre che la particella “possa” essere lì prima della misurazione esula dai postulati e dalla logica interna della teoria, così come, invece, in meccanica classica si pensava comunque ad una traiettoria pur senza doverla per forza misurare. Adesso è solo nel momento in cui si compie una misurazione che uno dei possibili risultati previsti dal formalismo diventa attuale.<sup>40</sup> E' chiaro che il concetto di probabilità legato ad un solo evento non ha significato: quello che si intende è che se si hanno a disposizione molte particelle, tutte preparate

---

<sup>39</sup> Questo numero sarà sempre compreso tra zero ed uno, a seguito della richiesta fondamentale che la funzione d'onda venga sempre “normalizzata”, ovvero sia che l'integrale del suo modulo quadro esteso a tutto lo spazio (se si è nella configurazione spaziale) sia posto uguale ad uno.

<sup>40</sup> Questo è proprio il punto che caratterizza l'interpretazione di Copenhagen. Heisenberg ha scritto: “Il passaggio dal “possibile” al “reale” ha luogo durante l'atto di misurazione. Se desideriamo descrivere ciò che accade in un evento atomico, dobbiamo aver ben presente che la parola “accade” può essere applicata soltanto all'osservazione e non a ciò che accade tra due osservazioni. Essa si applica all'atto fisico e non a quello psichico dell'osservazione, e noi possiamo dire che il passaggio dal “possibile” al “reale” si verifica non appena l'interazione dell'oggetto e del dispositivo di misurazione, e quindi del resto del mondo, è entrata in gioco; ciò non è connesso con l'atto di registrazione del risultato ad opera della mente dell'osservatore.” Heisenberg W., *Fisica e Filosofia*, op. cit., p. 70.

nello stesso stato iniziale e sottoposte alla stessa evoluzione fisica, allora, mettendo in pratica una misurazione di posizione, si troverà nell'intorno di  $x$  una frazione del numero delle particelle equivalente al modulo quadro della  $\Psi(x,t)$ .

Andiamo avanti, riservandoci per dopo alcune riflessioni di natura "filosofica" sulla teoria quantistica.

Naturalmente, quando si studia un sistema quantistico, non si è interessati solamente alla sua posizione. Il discorso fatto fino ad ora prende in esame il vettore di stato nella sua configurazione spaziale, ma il problema, se esteso a tutti gli altri tipi di osservabili, diventa più ricco e complesso.<sup>41</sup>

Come abbiamo visto, ad ogni osservabile fisica viene associato un operatore nello spazio di Hilbert.<sup>42</sup> Consideriamo, ad esempio, l'operatore  $H$  che descrive l'energia del sistema, chiamato anche "hamiltoniana del sistema". Un'equazione del tipo  $H\phi_i = \lambda_i\phi_i$ , dove  $\lambda_i$  sono dei numeri, viene chiamata "equazione agli autovalori" di  $H$ .<sup>43</sup> E' un tipo di equazione di fondamentale importanza in meccanica quantistica, perché il valori  $\lambda_i$  sono proprio i valori dell'energia che il sistema può avere in seguito ad una misurazione dell'energia. Dunque, tutte le volte che si ha a che fare con un'osservabile e si

---

<sup>41</sup> Ricordiamo che la funzione d'onda può essere espressa anche in funzione del momento  $p$  invece che della posizione  $x$ . Si dice in questo caso che si è "cambiata rappresentazione". Per analogia, il significato del modulo quadro di una funzione d'onda espressa in funzione di  $p$  sarà la probabilità di trovare la particella con il momento in un intorno di  $p$  nel momento in cui si compie una misurazione del momento. Le due rappresentazioni sono equivalenti. Vedremo che questo problema avrà anche un legame con il discorso dell'inversione temporale, dato che a diverse rappresentazioni corrispondono differenti tipi di operatori, che hanno dipendenze da parametri differenti. Inoltre, per curiosità, si segnala come la formulazione standard della meccanica quantistica risenta in un certo modo della "importanza" della variabile spaziale, esattamente come succedeva in meccanica classica. Così come là lo spazio era una grandezza fondamentale, così anche adesso la funzione d'onda viene solitamente vista come "entità spaziale". Non accadeva così nella meccanica matriciale di Heisenberg.

<sup>42</sup> Gli operatori che descrivono delle osservabili in meccanica quantistica sono operatori autoaggiunti. Si può dimostrare che un operatore autoaggiunto (ma anche semplicemente hermitiano) possiede sempre un insieme (finito o infinito a seconda della dimensione dello spazio in questione) di autovettori completo. Questo significa che ogni elemento dello spazio di Hilbert può essere espresso tramite combinazione lineare di quelle autofunzioni. Per una precisa esposizione di questi argomenti si veda Pata V., *Analisi Reale e Funzionale*, [http://web.mate.polimi.it/viste/pagina\\_personale/pagina\\_personale.php?id=121](http://web.mate.polimi.it/viste/pagina_personale/pagina_personale.php?id=121).

<sup>43</sup> Ricordiamo che lo spettro di un operatore può essere discreto o continuo. Per semplicità di esposizione si parlerà di spettro discreto.

vuole sapere che valori di quell'osservabile può assumere il sistema, bisogna essere in grado di risolvere la sua equazione agli autovalori.

In questi casi generali, a che livello entra la probabilità nel discorso? Così come era “intrinsecamente probabilistico” il fatto di trovare la particella in un dato punto dello spazio, dovrà essere altrettanto probabilistico il fatto di trovare la particella con un determinato valore dell'energia, o del momento, o del momento angolare, e così via.

Proprietà fondamentale di uno spazio di Hilbert è che ogni suo elemento può essere espresso come sovrapposizione di altri elementi.<sup>44</sup> La questione può essere “visualizzata” in questo modo: in un piano cartesiano, qualunque vettore, qualunque “segmento”, può essere espresso dalla composizione di due segmenti “base” che giacciono sugli assi coordinati. In uno spazio di Hilbert può accadere la stessa cosa, e gli elementi “base” tramite cui “espandere” l'elemento iniziale possono essere in numero finito o infinito, a seconda della dimensione dello spazio.

Dato che gli operatori che rappresentano le osservabili sono autoaggiunti, un altro teorema garantisce che il *set* delle loro autofunzioni (gli autovettori  $\varphi_i$  che compaiono nell'equazione agli autovalori) costituisce proprio un insieme completo di vettori “base” con cui poter descrivere un qualunque altro elemento dello spazio.<sup>45</sup>

Dunque, un volta risolta l'equazione agli autovalori relativa all'energia (per ritornare all'esempio pratico di prima), siamo in possesso delle autofunzioni dell'operatore energia. Possiamo prendere il vettore di stato (che, in termini funzionali, è la funzione d'onda  $\Psi(x,t)$ ) che descrive la nostra particella e “espanderlo” utilizzando come “basi di espansione” proprio le autofunzioni dell'energia. Si otterrà un'espressione del genere:  $\Psi(x,t) = \sum_i c_i \varphi_i$ .

---

<sup>44</sup> Sostanzialmente uno spazio di Hilbert è uno spazio prehilbertiano completo. Cfr. Hirsch F., Lacombe G., *Elements of Functional Analysis*, Springer 1999; Pata V., *Analisi Reale e Funzionale*, op. cit., pp. 78 e seguenti.

<sup>45</sup> Cfr. nota 41.

*La probabilità che, mettendo in atto una misurazione dell'energia della particella, questa abbia il valore  $\lambda_i$ , è il modulo quadro del coefficiente di espansione  $c_i$  relativo all'autofunzione  $\varphi_i$ .*<sup>46</sup>

Anche in questo caso, quindi, il risultato di una misurazione è intrinsecamente probabilistico: relativamente ad un'osservabile, si ha uno spettro di possibili valori  $\lambda_i$  che essa può assumere, a cui può essere associata solo una probabilità.<sup>47</sup>

Immediatamente dopo il processo di misurazione di un'osservabile, la funzione d'onda che descriveva il sistema cambia. Supponiamo che il valore misurato sia  $\lambda_i$ , il sistema sarà adesso descritto dalla funzione  $\varphi_i$ .

Questo processo è denominato “collasso della funzione d'onda”, ed è uno dei punti più controversi di tutta la teoria quantistica. Più avanti si analizzeranno i problemi che il collasso fa nascere e i tentativi che sono stati fatti per risolverlo. Anticipiamo che sarà proprio l'ontologia della funzione d'onda uno degli aspetti che più sarà messo in discussione.

Alla luce di quanto detto fino adesso, siamo in grado di vedere come l'evoluzione quantistica sia caratterizzata da due processi matematicamente e fisicamente distinti: da un lato l'evoluzione “libera” in assenza di misurazioni della funzione d'onda, regolata dall'equazione di Schroedinger, continua e deterministica; dall'altro il processo discontinuo e probabilistico del collasso della funzione d'onda in seguito ad una misurazione, incompatibile con l'equazione di Schroedinger.<sup>48</sup> Questi due differenti processi giocheranno un ruolo fondamentale nel discorso sulla reversibilità temporale che verrà fatto più avanti.

---

<sup>46</sup> Per una esposizione più precisa del postulato due (è presente anche il formalismo dello spettro continuo) si veda Caldirola P., Prosperi G., Cirelli R., op. cit., p. 485. Per l'interpretazione probabilistica è fondamentale il fatto che sia  $\sum |c_i|^2 = 1$ .

<sup>47</sup> Solo nel momento in cui la funzione d'onda iniziale è un'autofunzione dell'operatore relativo all'osservabile che si va a misurare, il risultato della misura sarà con certezza il corrispondente autovalore.

<sup>48</sup> Il problema della misurazione in meccanica quantistica e del passaggio dal mondo quantistico a quello classico ha riempito centinaia e centinaia di libri. Una bella raccolta di scritti sull'argomento è il libro a cura di Wheeler J. A., Zurek J., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton Series in Physics, 1983.

Fino ad adesso ci siamo occupati della meccanica quantistica di base, ma non si deve dimenticare il fatto che, come in meccanica classica, la preparazione di stati iniziali difficilmente potrà avvenire con precisione assoluta, e dunque, insieme all'ignoranza "epistemica", "intrinseca" che il principio di indeterminazione e le sovrapposizioni di stati portano inevitabilmente con sé, è necessario pensare anche all'ignoranza "pratica" di gestione delle informazioni per un sistema complesso: dobbiamo insomma introdurre il concetto di "meccanica quantistica statistica". Questo concetto è abbastanza importante per quanto riguarda la trattazione della decoerenza, in cui gli stati quantistici vengono preferibilmente trattati in termini di matrici densità. Lo vedremo meglio nel secondo e nel terzo capitolo.

La cosa importante da notare è proprio l'unione di due "nature probabilistiche" differenti: in meccanica quantistica non solo si "media" sugli stati del sistema, ma si deve anche "mediare" con dei pesi che sono le probabilità legate alla preparazione del sistema.<sup>49</sup>

## 1.4 – Sovrapposizione ed *entanglement*

Per concludere questa brevissima rassegna delle idee e del formalismo che caratterizzano la meccanica quantistica, non si può tacere uno degli aspetti più sconvolgenti della teoria, che si è potuto notare già nel momento in cui si è parlato dello sviluppo di una funzione d'onda in una sovrapposizione di autostati di un operatore. Questo aspetto è proprio denominato

---

<sup>49</sup> Se si indica l'operatore densità (che, ripetiamo, indica uno stato nello spazio di Hilbert) con la lettera  $\rho$ , allora  $\rho = \sum p_i \rho_i$ . Il valore di aspettazione per un'osservabile rappresentata da un operatore autoaggiunto  $A$  è dato dalla formula  $Tr(\rho A)$  dove  $Tr$  indica la traccia della matrice associata. Dato che  $\rho_i = |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$  si ha che  $Tr(\rho A) = \sum p_i Tr(\rho_i A) = \sum p_i \langle\psi_i|A|\psi_i\rangle$ . Si nota, dunque, che è presente non solo il termine di "mediazione" sugli stati,  $\langle\psi_i|A|\psi_i\rangle$ , ovverosia quello che individua la natura probabilistica intrinseca della meccanica quantistica, ma questo è mediato dai "pesi"  $p_i$ , che riflettono la pura ignoranza dell'osservatore.

“sovrapposizione” degli stati quantistici, e rappresenta un’anomalia rispetto a ciò che accadeva in fisica classica.

Il fatto cruciale è che la meccanica quantistica è governata da un’equazione differenziale lineare, e dunque, se due funzioni d’onda  $\psi$  e  $\varphi$  sono soluzioni dell’equazione di Schroedinger, anche una loro sovrapposizione (combinazione lineare) lo è. Questo fatto è “incredibile” nel senso che parlare, ad esempio, di un elettrone in uno stato di spin “su e giù” (oppure “né su né giù”, oppure contemporaneamente con lo spin “su” e con lo spin “giù”. In questo caso è veramente difficile riuscire ad esprimere a parole quello che la matematica indica) è possibile, uno stato del genere è contemplato dal formalismo della teoria.

Questo fatto ha portato al noto paradosso del “gatto di Schroedinger”, in cui un gatto è descritto da una funzione d’onda sovrapposizione delle due funzioni “gatto vivo” e “gatto morto”.<sup>50</sup>

Come abbiamo visto, la sovrapposizione “scompare”, facendo sopravvivere solo una componente, nel momento in cui si sottopone il sistema ad una misurazione: il “collasso” della funzione d’onda non permette di “vedere” la sovrapposizione iniziale.

E’ difficile riuscire a dare un’interpretazione a siffatte funzioni di stato. Si può pensare che la sovrapposizione sia un semplice “strumento” matematico, che serve esclusivamente per calcolare le probabilità relative ad ogni singolo autostato, eppure sovrapposizioni macroscopiche sono state osservate in esperimenti molto sofisticati:<sup>51</sup> esse non sono impossibili da vedere (e, dunque, per alcuni, non possono essere considerate inesistenti). Se le sovrapposizioni

---

<sup>50</sup> Schroedinger E., *Die gegenwartige Situation in der Quantenmechanik*, Naturwissenschaften 23, 1935, pp. 807-812; 823-828; 844-849. Trad. ingl. *The present situation in quantum mechanics*, su Wheeler J. A., Zurek J., a cura di, *Quantum Theory and Measurement*, op. cit., pp. 323 e seguenti. In lingua italiana si può scaricare all’indirizzo internet <http://matsci.unipv.it/persons/antoci/tq.html>.

<sup>51</sup> Sono stati visti, ad esempio, fenomeni di interferenza macroscopici negli apparati sperimentali denominati SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*), utilizzati per misurare piccoli campi magnetici. Cfr. Chudnovsky E. M., Kuklov A. B., *Decoherence of a Superposition of Macroscopic Current States in a SQUID*, 2002, <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0211246>.

sono realmente esistenti, come mai è così difficile vederle? Come mai nel “mondo reale” noi non osserviamo gatti “morti e vivi” allo stesso tempo, se così si può dire?

Una risposta (per quanto parziale e non accettata da tutti) a questo quesito l’ha fornita la teoria della decoerenza, che discuteremo in dettaglio nel prossimo capitolo. Per quello che interessa in questa sede, vedremo che la continua “eliminazione” delle sovrapposizioni di stati potrebbe fornire una “direzione temporale”.

Un altro aspetto filosoficamente interessante e peculiare della meccanica quantistica è il fenomeno chiamato “*entanglement*”.<sup>52</sup> Per quanto questa parola si possa tradurre in italiano con i termini “intreccio” o “ingarbugliamento”, è bene continuare ad usare l’espressione inglese, per certi versi più chiara. In sostanza, l’*entanglement* quantistico prevede che gli stati di due o più oggetti debbano essere descritti in relazione uno all’altro, anche se sono separati da una notevole distanza spaziale. Molto famoso riguardo è il paradosso di Einstein, Podolsky e Rosen, che utilizza formalmente proprio questa caratteristica dei sistemi quantistici per tentare di dimostrare che la teoria non è completa.<sup>53</sup> Il teorema di Bell ha poi messo i bastoni tra le ruote a questo progetto.<sup>54</sup>

---

<sup>52</sup> Una buona e veloce analisi del fenomeno si trova in Ghirardi G. C., *Un’occhiata alle carte di Dio*, Edizioni Net, Milano, 2003, pp. 153 e seguenti (prima edizione Il Saggiatore, Milano, 1997).

<sup>53</sup> In contrasto con l’interpretazione di Copenhagen, che rivestiva la meccanica quantistica di un carattere sostanzialmente predittivo, alcuni scienziati si misero in un’ottica più propriamente descrittiva. Secondo la loro idea, l’indeterminismo sarebbe dovuto al fatto che la teoria non tiene conto di gradi di libertà addizionali, le cosiddette variabili nascoste, noti i quali la descrizione sarebbe completamente deterministica. E’ proprio in questo contesto che si inserisce il lavoro di Einstein, Podolsky e Rosen del 1935 (conosciuto come “paradosso EPR”. Si veda Einstein A., Podolsky B., Rosen N., *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, Physical Review 47, 1935, pp. 777-780). Questi scienziati dimostrarono che la meccanica quantistica porta ad una contraddizione, nel momento in cui si assumano come veri il principio di realtà e di località. Il dibattito che è sorto negli anni a seguire ha messo fortemente in dubbio la “naturalità” di questi due assunti. Per un approfondimento del tema si rimanda a Nicosini O., *Paradosso EPR e teorema di Bell*, Università degli Studi di Pavia, Quaderni di Fisica Teorica, 1991.

<sup>54</sup> Nel 1964, Bell ha pubblicato un lavoro in cui dimostra che se esiste una teoria più fondamentale della meccanica quantistica che sia realistica e deterministica e soddisfi ad un requisito di località molto debole, allora devono esistere dei limiti alle correlazioni tra sistemi

Anche in questo caso non si vuole entrare nei dettagli. Si vuole solo sottolineare come l'*entanglement* quantistico possa dare adito a visioni "olistiche" della Natura, nel senso che, se si assume che tutto ha avuto inizio in un "unico punto" (una singolarità spazio-temporale, il Big Bang), allora si può dedurre che ogni singolo elemento dell'universo sia in correlazione con un altro, creando così un'unità di fatto di tutti i sistemi.

Compiere una misurazione su un oggetto avrebbe dunque ripercussioni su altri, magari lontani anni-luce. Un visione estrema di questa posizione è quella secondo cui un esperimento su un sistema qui e ora ha ripercussioni su tutti i sistemi di tutto l'universo.

Una conseguenza di questo fatto, a livello di analisi del "fluire temporale", è che il collasso della funzione d'onda dovuto ad una misurazione che, come abbiamo visto velocemente prima e come vedremo meglio più avanti, può fornirci una irreversibilità conseguente ad una "direzione temporale", sarebbe automaticamente accompagnato da innumerevoli altri collassi, a causa dell'*entanglement* totale. Questo porterebbe ad una "direzione temporale universale" e alla naturale scomparsa delle sovrapposizioni di stato.

Così come accadeva nell'esperimento EPR, in cui, misurando lo spin di una particella automaticamente si determinava lo spin dell'altra (le due particelle erano descritte da un unico stato quantistico), così si può pensare che, nel mondo macroscopico, basti una singola misurazione (che significa un'interazione con un altro sistema, fosse questo anche solo un fotone) per "definire" tutti gli altri sistemi che ci circondano.

Questi, esposti in maniera estremamente veloce e superficiale, sono i fondamenti della meccanica quantistica non relativistica "standard". Per quanto contenente aspetti di continuità con la meccanica classica, evidenti anche nella "sconfitta" della meccanica matriciale di Heisenberg, è innegabile

---

microscopici separati spazialmente. La meccanica quantistica viola tali limiti (nelle condizioni prescritte dal teorema di Bell). Sostanzialmente questo dimostra che meccanica quantistica e teorie a variabili nascoste locali sono incompatibili e antitetiche. Si veda sempre Nicosini O., *Paradosso EPR e teorema di Bell*, op. cit., pp. 47 e seguenti.



il fatto che abbia rappresentato una frattura rispetto al passato e che possa essere definita a ragione una rivoluzione a livello scientifico.

Per la prima volta, la Natura si è manifestata come “aleatoria”, studiabile attraverso delle probabilità e non più attraverso delle certezze “deterministiche”. Certo questa visione rimane comunque discutibile, a giudicare dalla presenza di molte altre “interpretazioni” della teoria, alcune delle quali propongono un radicale cambiamento di “statuto epistemologico”, volendo ripristinare un casualismo e un determinismo forte. Il tutto si gioca al livello dell’equazione di Schroedinger e dell’interpretazione che si dà alla funzione d’onda.

L’equazione di Schroedinger, che in sé non ha nulla di particolare, essendo una normale equazione d’onda così come se ne trovano nella branca dell’acustica o delle onde elettromagnetiche, può essere comunque modificata o perlomeno “affiancata” ad altre espressioni in modo tale da ripristinare il concetto di traiettoria.

Ma l’aspetto più interessante riguarda l’interpretazione della  $\Psi(x,t)$ . E’ abbastanza difficile sostenere che essa non abbia un “fondamento nella realtà”, che sia solamente uno “strumento” matematico, dal momento in cui il suo modulo quadro mi fornisce delle probabilità fisiche. Eppure questo è ciò che alcuni sostengono. Altri, al contrario, propongono una visione molto “realista” a riguardo: la funzione d’onda esiste, è un’entità “fisica”, anzi, è l’entità fondamentale dell’universo, descrivibile tutto per mezzo di un’unica funzione d’onda.

Questi aspetti, che saranno discussi a lungo nel capitolo 3, lungi dall’essere delle mere speculazioni senza utilità, sono molto importanti per quel che riguarda il problema che ci accingiamo ad analizzare: il fatto che la meccanica quantistica sia o meno reversibile a livello temporale non è una questione esclusivamente matematica, ma dipende fortemente anche dall’interpretazione che si dà agli oggetti che compongono la teoria.

## CAPITOLO 2

### IRREVERSIBILITA' E MECCANICA QUANTISTICA

#### 2.1 – Il “problema del tempo” all’interno della fisica

L’importanza dell’approfondimento del concetto di “tempo” nelle scienze fisiche appare evidente nel momento in cui si dà un’occhiata alle equazioni di base delle teorie fondamentali: molte di esse (dall’equazione della dinamica di Newton, alle equazioni dell’elettromagnetismo di Maxwell, dall’equazione di Schrodinger della meccanica quantistica, alle equazioni di campo della relatività generale) sono equazioni in cui compare il parametro  $t$ , ovvero sono equazioni che descrivono delle variazioni temporali.<sup>1</sup>

Queste equazioni sono la traduzione matematica della volontà di poter “predire il futuro” a partire da determinate condizioni iniziali.

I grandi successi della fisica classica dei primi tempi, si pensi a Galileo, a Newton, e più avanti a Lagrange, Hamilton e Jacobi<sup>2</sup>, sono successi che sono

---

<sup>1</sup> Generalmente, molte leggi della fisica sono espresse in termini di equazioni differenziali rispetto alla variabile temporale, e dunque la loro soluzione consiste in funzioni i cui valori variano con il tempo.

<sup>2</sup> Cfr. Dugas R., *A History of Mechanics*, op. cit., specialmente i capitoli XI (parte III) e VI (parte IV).

stati ottenuti proprio nel momento in cui si è potuto dire che in un istante successivo a piacere il sistema si sarebbe trovato in un particolare stato, e ciò avveniva davvero, chiaramente entro i limiti sperimentali.

Eppure, mai come nel caso del concetto di “tempo” si è assistito ad un acceso dibattito riguardante non soltanto la sua natura, ma addirittura la sua stessa esistenza.<sup>3</sup>

La teoria della relatività ristretta di Einstein ha rivoluzionato il significato fisico del concetto di “durata temporale”.<sup>4</sup> Quegli intervalli temporali senza i quali diventava difficile immaginare la teoria scientifica e la prova sperimentale, vengono ad un tratto definiti come “relativi al sistema di riferimento in cui vengono misurati”. Essi si “dilatano” o si “restringono” a piacere, dipendendo dalla condizione di moto relativo dei sistemi di riferimento in questione (con la relatività generale entrerà in gioco anche la gravità). Da qui a sostenere che il tempo sia un’illusione, il passo è breve.<sup>5</sup> Nella ricerca di leggi “vere”, “eterne” e “simmetriche”, i fisici hanno iniziato a credere che il tempo fosse solo un “accidente psicologico”, la sua “durata” fosse una questione riconducibile alla nostra coscienza, e che dunque fosse possibile estrometterlo dal discorso fisico. Il mondo reale è a-temporale, e il modello

---

<sup>3</sup> Al problema del tempo (in generale da qualunque angolatura) si sono dedicati moltissimi fisici e filosofi della scienza. Dai fisici protagonisti delle rivoluzioni della relatività e della meccanica quantistica, si arriva fino ai giorni nostri, con Stephen Hawking, Roger Penrose, Julian Barbour, Paul Davies, passando ovviamente per Ilya Prigogine, giusto per citarne alcuni. Cfr. la bibliografia di questo lavoro.

<sup>4</sup> Cfr. Einstein A., *Relatività: esposizione divulgativa*, Bollati Boringhieri, Torino, 1999. Per una trattazione più approfondita Rindler W., *Relativity*, Oxford University Press, 2001.

<sup>5</sup> In una lettera a Michele Besso, Einstein sosteneva che “per noi fisici credenti la distinzione tra passato, presente e futuro ha solo il significato di un’illusione, per quanto tenace”. Herman Weyl sosteneva che “il mondo relativistico è semplicemente, non *accade*. Soltanto allo sguardo della mia coscienza, in movimento lungo la linea d’universo che rappresenta la vita del mio corpo, una sezione di questo universo può offrirsi come un’immagine che fluttua nello spazio e che cambia continuamente nel tempo.” Weyl H., *Filosofia della matematica e delle scienze naturali*, ed. Boringhieri, Torino, 1967, p. 140. Alla conclusione della non esistenza del tempo e del suo fluire arriva anche Julian Barbour, nel suo libro *La fine del tempo*, Einaudi, Torino, 2003 (*The End of Time. The Next Revolution in Physics*, Oxford University Press, Oxford, 1999).

più adatto e più elegante per descrivere il nostro intero universo è quello del *block universe*.<sup>6</sup>

Dopotutto, non è neanche necessario andare a scomodare la teoria della relatività. Le leggi fisiche “senza tempo”, nel senso di “simmetriche per inversione temporale”, e dunque incapaci di riconoscere il passato dal futuro, sono evidenti nella formulazione della meccanica classica.<sup>7</sup> La seconda legge di Newton, quella che descrive l’equivalenza tra la forza che agisce su un corpo e l’accelerazione che viene impressa al corpo stesso (con la massa come coefficiente di proporzionalità), presenta al proprio interno una derivata del secondo ordine rispetto al tempo. La legge non riconosce la differenza tra il parametro temporale  $t$  e il parametro invertito  $-t$ . Le soluzioni sono le stesse, dunque la legge viene definita come “simmetrica per inversione temporale”.<sup>8</sup>

In un’ottica riduzionista e meccanicistica, com’è stata quella che ha dominato il XVIII secolo, secondo la quale qualunque fenomeno fisico doveva potersi ricondurre alle leggi fondamentali della meccanica classica, questo fatto significava che si poteva concludere che la natura stessa fosse simmetrica per inversione temporale.

Neppure la termodinamica della seconda metà del XIX secolo riuscì a cambiare questo modo di vedere le cose. Il tentativo messo in atto da Boltzmann per riuscire a trovare un “ponte” tra le leggi della dinamica classica e la crescita dell’entropia descritta dal secondo principio della termodinamica finì nel riconoscimento che l’irreversibilità macroscopica era un “fatto probabilistico”. La reversibilità delle leggi fondamentali della fisica classica

---

<sup>6</sup> Belle descrizioni del cosiddetto “*block universe*” si trovano in Price H., *Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*, Oxford University Press, 1997; e in Barbour J., *La fine del tempo*, op. cit.

<sup>7</sup> Le equazioni della meccanica di Hamilton sono  $dq_i/dt = \partial H / \partial p_i$  e  $dp_i/dt = -\partial H / \partial q_i$ . Queste rimangono invariate nel momento in cui si passa da  $t$  a  $-t$ , dato che in seguito a questa trasformazione l’unica quantità che cambia sono i momenti generalizzati dipendenti dal tempo:  $p_i = m_i dq_i/dt \rightarrow m_i dq_i/d(-t) \rightarrow -p_i$ , e dunque si ha che  $dq_i/d(-t) = -\partial H / \partial p_i$  e  $d(-p_i)/d(-t) = -\partial H / \partial q_i$  e quindi  $dq_i/dt = \partial H / \partial p_i$  e  $dp_i/dt = -\partial H / \partial q_i$ , cioè si è tornati alle equazioni iniziali. Il cambiamento da  $t$  a  $-t$  non produce alcun effetto sulle equazioni.

<sup>8</sup> Cfr. Prigogine I., *La fine delle certezze*, Bollati Boringhieri, Torino, 2003, p. 104 (*La fin des certitudes. Temps, chaos et les lois de la nature*, Edition Odile Jacob, Paris, 1996).

venne di fatto considerata la vera e propria essenza della natura, a discapito dell'asimmetria termodinamica.<sup>9</sup>

Il problema di questo risultato fu che diventava sempre più largo il divario tra le teorie fisiche e l'evidenza dei fenomeni naturali. Da un lato la fisica descriveva, con le sue leggi, un mondo reversibile, in cui passato e futuro non esistevano, in cui la "freccia del tempo"<sup>10</sup> era un'illusione psicologica degli esseri coscienti, dall'altro lato si aveva evidenza immediata di fenomeni irreversibili, di decadimenti, di sviluppi, di cambiamenti.

Lo *shift* concettuale che progressivamente si manifestò all'interno della comunità scientifica non è di poco conto. Lo studio dei fenomeni naturali, formalizzato in termini matematici da Galileo, aveva come fine quello di trovare quelle descrizioni che potessero essere lo "specchio della realtà", di descrivere la realtà stessa. Era necessario tradurre in termini formali gli esperimenti che venivano fatti. Le leggi matematiche che venivano formulate erano quelle che descrivevano, ad esempio, il "moto parabolico" di un grave lanciato in aria, e queste leggi si "sovrapponevano" al moto del grave, erano il moto stesso del grave.

In verità, tutte queste leggi venivano dedotte dagli esperimenti, non dalla "realtà", dunque, più che una formalizzazione di quest'ultima, erano una formalizzazione dell'esperimento.<sup>11</sup> Il "fatto sperimentale" introdotto da Galileo era inevitabilmente una "deformazione" della realtà, una sua "semplificazione".<sup>12</sup> Questo era necessario, perché solo attraverso la

---

<sup>9</sup> Cfr. Prigogine I., Stengers I., *Tra il tempo e l'eternità*, Bollati Boringhieri, Torino, 2003, pp. 30, 31 e 32 (*Entre le temps et l'éternité*, Librairie Arthème Fayard, Paris, 1988).

<sup>10</sup> Come è noto, questa espressione venne coniata da Arthur Eddington nel suo libro *The Nature of Physical World*, Macmillan, New York, 1929.

<sup>11</sup> Un'idea simile la si trova in Cappelletti V., *Dall'ordine alle cose*, Jaca Book, Milano, p. 26. In un passo si legge: "Al fisico, tuttavia, bisogna rivolgere idealmente due osservazioni: in primo luogo dobbiamo dire che quelle "cose" (le "cose" trovate attraverso l'analisi sperimentale, n.d.a.) non ci sono, ma sono prodotte dal suo aver sfrangiato delle esperienze; secondariamente è indispensabile rilevare che quelle equazioni (le equazioni che "risuonano nelle "cose", n.d.a.) risuonano perché hanno governato, in forma di ipotesi, il suo sfrangiare".

<sup>12</sup> "I differenti aspetti della natura che ho esaminato nei capitoli precedenti e le varie scienze che sono state elaborate grazie al loro contributo comprendono ciò che si potrebbe appropriatamente definire lo studio astratto dei fenomeni e degli oggetti naturali. Sebbene tutti

semplificazione si potevano trovare quelle regolarità da formalizzare poi in termini matematici.

Il fatto è che, negli anni, questa semplificazione non venne più riconosciuta, e la legge matematica diventava la legge regolativa “reale”, “vera”, non inquinata dai disturbi che circondavano il fenomeno.

Questa è una presa di posizione guidata da una ben precisa ipotesi metafisica: esiste un “mondo” che è “più regolare” e, dunque, elegantemente formalizzabile, rispetto al mondo di cui i nostri sensi sono continuamente testimoni. Ad esempio, il moto di un corpo “nel vuoto”, per quanto mai effettivamente osservato, gode di uno statuto superiore rispetto al moto in un gas, o in liquido. In un gas, il corpo viene costantemente “disturbato” dagli urti con le molecole circostanti, e le equazioni “vere” necessiteranno di correzioni *ad hoc*, mentre nel vuoto la sua traiettoria sarà quella “ideale”, descritta effettivamente dalle equazioni pure della teoria.

Allora il problema consiste nel capire cosa effettivamente descrive la ricerca fisica, e cosa vuole descrivere il fisico con le sue analisi. Nel momento in cui uno scienziato formula una legge generale, cosa fa veramente? Ad una teoria fisica ci si può arrivare in svariati modi, ed è veramente difficile, se non velleitario, cercare di trovare un metodo. Il punto, però, sta nel capire se il risultato a cui si arriva possa legittimamente considerarsi come una “descrizione della natura” oppure no.

---

i metodi di ragionamento con cui ci siamo sin qui confrontati abbiano avuto origine anzitutto dall'osservazione e dalla riflessione sulle cose della natura, hanno questo in comune: a scopo di analisi, rimuovono gli oggetti dalla posizione e dal contesto che la natura ha loro assegnato. Li astraggono. Tale processo di astrazione è letteralmente un processo di rimozione da un luogo all'altro, dal grande laboratorio e magazzino della natura stessa al piccolo laboratorio, quello dello sperimentatore; oppure, dove tale rimozione è impossibile, tale processo si sviluppa soltanto nel regno della contemplazione; si descrivono una o due proprietà speciali, mentre la massa di dati collaterali al momento viene trascurata.” Citazione da Merz J. T., *A History of European thought in the Nineteenth century*, Dover, New York, 1965, pp. 200 e seguenti. Riportato in Feyerabend P. K., *La concezione scientifica del mondo ha uno statuto speciale?*, in *Conquista dell'abbondanza, Storia dello scontro tra l'astrazione e la ricchezza dell'Essere*, Raffaello Cortina Editore, Milano, 2002 (*Conquest of Abundance: A Tale of Abstraction versus the Richness of Being*, 1999), pubblicato in Hilgevoord J., a cura di, *Physics and Our View of the World*, Cambridge University Press, 1994, pp. 135-148.

Prendiamo il caso di un grave in un campo gravitazionale uniforme. L'unica forza presente è quella di gravità. Le formule della dinamica classica ci descrivono un moto uniformemente accelerato, con accelerazione costante uguale all'accelerazione di gravità. Bisogna però specificare che la formula matematica relativa al moto accelerato si riferisce ad una situazione "ideale": assenza totale di attriti, campo gravitazionale totalmente uniforme ed effettiva e completa assenza di forze esterne diverse da quella di gravità. La legge fisica si riferisce a queste condizioni, e nel momento in cui ci si discosta da esse, più o meno leggermente, allora bisognerà intervenire correggendo le equazioni iniziali, introducendo nuovi termini che descriveranno la nuova situazione in questione.

Come si è giunti alle equazioni ideali? Attraverso degli esperimenti altrettanto "ideali", sfrondati da ogni disturbo? Attraverso un puro ragionamento teorico-matematico, da sottoporre poi alla verifica sperimentale? Come detto, ogni teoria è nata a suo modo, e non è questa la sede per investigare dei metodi di ricerca scientifica. Quello che importa è che, in ogni caso, si è arrivati ad una struttura teorica che privilegiava alcuni aspetti della natura rispetto ad altri: in generale, privilegiava la simmetria, l'eleganza del formalismo matematico nell'ambito di un'analisi puramente teorica, oppure privilegiava una natura "semplificata" se si partiva invece da un ambito sperimentale. Insomma, è difficile sostenere che le teorie fisiche descrivono la realtà *tout court*, intendendo con questo una realtà che sta "là fuori", oggettiva e indipendente dal ruolo dello scienziato che la studia. La fisica, in verità, analizza gli esperimenti, e procede attraverso la riflessione matematica che è, essa stessa, una costruzione dell'uomo, esattamente come gli esperimenti.

Cosa si intende, dunque, con le affermazioni secondo cui la natura non conosce né passato, né futuro, o, al contrario, la natura è irreversibile a livello temporale?

In generale si intende dire che le equazioni fondamentali della teoria sono o non sono simmetriche per inversione temporale.<sup>13</sup> Ma questo, alla luce di quanto appena detto, non implica necessariamente che “la natura” sia o meno simmetrica, quanto piuttosto che *quel formalismo e quell’esperimento* che, nei limiti, me lo conferma, sono o meno simmetrici. La fisica parla del proprio formalismo, della propria matematica, e delle situazioni sperimentali create dallo scienziato.<sup>14</sup> Che tutto quello che si ottiene da ciò sia poi generalizzato all’intero universo è senz’altro legittimo, ma non per forza naturale.

La fisica, in un certo modo, costruisce quell’”universo di senso” che le permette di vivere: essa stessa costruisce quella realtà che poi descrive. Questa è dunque la “realtà” di cui siamo legittimati a parlare quando entriamo nell’ambito delle scienze fisiche: è la realtà “fisica”, appunto, cioè quella “costruita dalla fisica”. Ci sono tante altre “realtà”, se ci pensiamo bene, proprio perché ci sono tanti altri modi di indagare i fenomeni che ci interessano. Si pensi alla “realtà spirituale”. Esiste? Non esiste? Essa è senz’altro sondabile, e si può legittimamente affermare che esiste, ma non nei termini della fisica sperimentale: un fisico non si occupa di essa perché esula dal suo campo di indagine, non appartiene al mondo creato e studiato con strumenti fisici e matematici. Ma negare che una cosa esista a livello “fisico” non equivale a negare che esista ad altri livelli: è proprio questa la pluridimensionalità della realtà.

---

<sup>13</sup> L’idea che la forma stessa delle leggi matematiche determini se la teoria è simmetrica per inversione temporale o no è ciò che a noi interessa in questa sede, ed è il modo più diffuso di affrontare il problema. Si noti, però, che la questione della “freccia del tempo” è più articolata, e coinvolge anche il concetto di divenire come “una speciale transizione ontologica” e come la creazione o l’attualizzazione di eventi. In generale “simmetria per inversione temporale” e “irreversibilità” sono concetti coincidenti, ma in alcuni casi possono sorgere problemi interpretativi. Si veda Edens B., *Semigroups and Symmetry*, 2001, <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000436/> e Uffink J., *Bluff your way in the Second Law of Thermodynamics*, 2001, <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000313/>.

<sup>14</sup> Paul Feyerabend sostiene che gli scienziati siano “scultori della realtà”. Si veda Feyerabend P. K., *Realism and the Historicity of Knowledge*, *Journal of Philosophy*, Vol. 86, No. 8, 1989, pp. 393-406. Trad. it. *Il realismo e la storicità della conoscenza*, pubblicato nell’antologia *Conquista dell’abbondanza. Storie dello scontro tra astrazione e ricchezza dell’Essere*, op. cit., p. 171.



E' importante non fraintendere questo discorso: non si sta sostenendo che la "realtà fisica" non esiste, non ci si sta chiudendo in un soggettivismo (o addirittura un solipsismo) estremo. Tutto quello che è stato fin qui detto può essere visto come un ragionamento "neutrale" rispetto alle varie visioni filosofiche della realtà, per quanto, innegabilmente, possa essere letto come una forte difesa del soggetto conoscente. In verità si sta semplicemente sostenendo che l'oggetto della nostra conoscenza, nel senso più generale che questa espressione può avere, "appare" a seconda dello strumento conoscitivo che si sta usando. Che poi "appaia" esclusivamente all'interno della nostra coscienza, e dunque sia privo di una qualsiasi caratterizzazione ontologica, oppure "appaia" perché effettivamente è là, esiste indipendentemente da noi, ma fino a quel momento non era stato "esplorato" con i mezzi adeguati, questa è una questione che lasciamo ai gusti del lettore.

Dunque, per tornare ai problemi della fisica, una prima spiegazione della discrasia tra descrizione teorica dei fenomeni naturali, reversibile e a-temporale, formalizzata nella mirabile struttura della meccanica classica, e "apparenza" degli stessi, irreversibili e termodinamicamente legati al secondo principio della crescita dell'entropia, può essere ricondotta al mancato riconoscimento del "limite" di applicazione del ragionamento scientifico. Una fisica simmetrica per inversione temporale ha visto la luce proprio perché le condizioni entro le quali si sviluppava la disciplina erano condizioni "artificialmente" simmetriche. Poincaré sosteneva che "spiegare l'irreversibile col reversibile è un errore che la sola logica basta a condannare".<sup>15</sup> Si potrebbe aggiungere che aspettarsi caratteristiche di irreversibilità temporale da una dinamica classica nata nel modo in cui è nata è un errore altrettanto condannabile. Meccanica classica e termodinamica sono due "fisiche" differenti, perché nate in periodi storici differenti e, soprattutto, perché indagano campi differenti. Esse si rivolgono a "realtà" diverse e, come detto

---

<sup>15</sup> Poincaré H., in "Comptes Rendus de l'Académie de sciences", CVIII, 1889, p. 550. Cfr. Prigogine I., Stengers I., *Tra il tempo e l'eternità*, op. cit., p. 27.

prima, “creano” diversi campi sperimentali. Non si vuole sostenere che la ricerca di spiegare una attraverso l’altra sia necessariamente sbagliata, ma bisogna essere consapevoli che questo tentativo di “unificazione” è la conseguenza di un’ipotesi di lavoro, di una “ideologia”, se vogliamo, secondo la quale tutte le spiegazioni di tutti i fenomeni fisici devono essere derivate da una teoria fondamentale. Che questa teoria fondamentale poi sia la meccanica classica, l’elettromagnetismo o la meccanica quantistica, è una scelta che dipende soprattutto dai periodi storici e dalle preferenze dei singoli scienziati. Dunque, se, da un lato, la generalizzazione delle conclusioni ottenute da esperimenti di laboratorio semplificati ha portato necessariamente ad una concezione del tempo del tutto inadeguata rispetto a ciò che “risulta evidente” ai nostri sensi, un’altra posizione fortemente condivisa nella comunità scientifica dei secoli “classici” (ma, a dire il vero, anche dei giorni nostri) ha contribuito a perpetuare l’idea di “mondo senza tempo”: il riduzionismo di tutte le leggi della fisica a quelle fondamentali di una determinata teoria. Per molto tempo, questa teoria è stata la meccanica classica, oggi si potrebbe parlare di meccanica quantistica.<sup>16</sup>

L’idea di ridurre tutto alla meccanica classica è stata la conseguenza di una visione meccanicistica della natura, secondo la quale tutte le parti dell’esistente avrebbero dovuto essere soggette alle stesse leggi deterministiche, descrittive di moti di particelle nello spazio, venendo così a configurare una “grande macchina”, perfettamente predicibile. In un certo senso, si può pensare che anche questa idea possa essere scaturita proprio dal sempre più frequente utilizzo dell’apparato sperimentale: modellare la natura per renderla suscettibile di esperimenti ha reso più forte l’idea di una possibile, vincente e continua manipolazione della stessa. Se la natura si può “dominare” e se gli esperimenti sono sotto il nostro controllo, dandoci risultati conformi alle nostre

---

<sup>16</sup> Gell-Mann M., *Il quark e il giaguaro. Avventure nel semplice e nel complesso*, Bollati Boringhieri, Torino, 1996, p. 24 (*The Quark and the Jaguar*, Freeman, New York, 1994).

predizioni, ecco che l'idea di una predittività deterministica dei comportamenti della macchina che ho davanti diventa una naturale conseguenza.<sup>17</sup>

Lo sviluppo della dinamica classica dei punti materiali con le sue precise leggi matematiche ha fatto sì che venisse corroborata una certa idea di “atomismo”, secondo la quale i moti dei corpi grandi sono la somma dei moti delle parti che li compongono, in modo tale che il vero “ente” fondamentale da studiare sia la particella con la sua traiettoria. Agli occhi di molti scienziati, come abbiamo detto, il moto di una particella è perfettamente reversibile per inversione temporale, proprio perché le leggi che lo descrivono sono reversibili, e dunque la “fisica fondamentale” o, meglio, secondo la generalizzazione che prima abbiamo criticato, il “mondo fondamentale”, è simmetrico per inversione temporale.

Insomma, tutto il problema della compatibilità tra dinamica classica e termodinamica da un punto di vista “temporale”, quello, per intenderci, che ha occupato per lungo tempo la mente di Boltzmann, si pone nel momento in cui si dà per scontata una visione “riduzionista” delle leggi della natura. E' nel momento in cui si cerca di spiegare il secondo principio della termodinamica ricorrendo alle leggi della dinamica che risulta manifesta la volontà di considerare una teoria più fondamentale di un'altra.<sup>18</sup>

Questo, è noto, è un modo di procedere molto diffuso all'interno della comunità scientifica, addirittura sembra quasi che sia una condizione che rientra in maniera obbligata nella definizione di “ricerca fisica”: la ricerca di una teoria fondamentale, di base, a cui tutto si possa ricondurre e da cui si possano derivare tutte le diverse branche del sapere fisico, è la meta del fisico teorico che ricerca l'unità, la coerenza, la bellezza e la semplicità (una semplicità non necessariamente “formale”, ma di “compattezza” della

---

<sup>17</sup> Cfr. Giannetto E., *La “Meccanica Classica” e la Concezione Meccanicistica della Natura*, in *Saggi di Storie del Pensiero Scientifico*, op. cit., p. 249.

<sup>18</sup> A questo proposito, si veda in particolare Edens B., *Semigroups and Symmetry*, 2001, <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/000436/>.

struttura). Un esempio lampante della ricerca odierna è la cosiddetta “teoria delle stringhe”.

Ad ogni modo, la decisione di “ridurre” una teoria ad un’altra può avere diverse giustificazioni, che non è il caso di analizzare qui. L’importante è capire che, a volte, queste giustificazioni non sono dettate da ragioni di carattere puramente “fisico”, ma piuttosto “ideologico” o “metafisico”.<sup>19</sup> Questo è del tutto normale, ma farlo presente ci permette perlomeno di vedere con uno sguardo diverso quello a cui siamo ormai abituati: ci risulta naturale, ad esempio, che il concetto di calore sia ricondotto al moto dinamico delle particelle che compongono il corpo in esame, ma ci sembrerebbe del tutto “innaturale” provare a spiegare la dinamica del punto materiale in termini fondamentalmente termodinamici (o addirittura eliminare del tutto quell’astrazione chiamata “punto materiale”).

In conclusione, in questo paragrafo si è visto come “il problema del tempo” in fisica sia sorto perché questa disciplina ha, in passato, studiato non “la natura”, ma “un certo tipo di natura”, semplificata e resa artificialmente simmetrica per inversione temporale. Vedremo più avanti che nella fisica contemporanea sono stati fatti probabilmente dei passi in avanti nella direzione di una più “completa” comprensione di un mondo fisico meno sfrondata dai disturbi, anche se, comunque, è sempre bene rimanere consapevoli del fatto che l’oggetto di studio della fisica rimane una “manipolazione” di ciò che ci sta davanti.

In secondo luogo, il “problema del tempo” è diventato tale anche perché si è guardato lo sviluppo delle ricerche e delle teorie con un occhio riduzionista: per diversi motivi, si è voluto ricondurre tutto alla dinamica classica, cioè ad una teoria vista come reversibile. E’ chiaro che questo ha portato a delle frizioni con altre teorie, nate in un altro modo, che esaminavano altri fenomeni, e che dunque caratterizzavano il tempo in maniera differente. Si vedrà che la

---

<sup>19</sup> Cfr. Feyerabend P. K., *Addio alla Ragione*, Armando Editore, Roma, 2004, pp. 113 e seguenti (*Farewell to Reason*, Verso Edition, London, 1987).

tentazione riduzionista è sempre presente nella comunità scientifica, e oggi si può parlare di una diffusa volontà di ricondurre tutto alla meccanica quantistica (ancora una volta, si pensa che il “macroscopico” sia la somma delle parti microscopiche che lo compongono. Dunque la meccanica quantistica, descrivendo il comportamento dei sistemi microscopici, gode di uno statuto privilegiato rispetto ad altre teorie). Anche in questo caso saremmo in presenza di una “forzatura”, giustificabile forse a livello ideologico. Ma vedremo anche che il modo in cui la fisica quantistica “vede” il tempo è, probabilmente, diverso da quello della meccanica classica.

## **2.2 - Il “problema del tempo” e il rapporto tra fisica e matematica**

Un altro aspetto da analizzare, per meglio comprendere la natura del problema “tempo” all’interno delle discipline fisiche, è il rapporto tra fisica e matematica.

E’ noto che, con Galileo, inizia quella che può essere definita la “matematizzazione” dello studio dei fenomeni naturali. Nel passaggio *dall’esperienza all’esperimento*,<sup>20</sup> Galileo riesce a costruire situazioni particolari che possono essere descritte da rapporti numerici e formule matematiche.

Tutto lo sviluppo della fisica successiva, in particolar modo con la meccanica razionale, ha visto un costante allargamento dell’utilizzo della matematica fino ad arrivare ad una sostanziale identificazione tra le due discipline. Nella ricerca contemporanea, si pensi, ad esempio, a tutte quelle teorie che rientrano nel gruppo delle TOE,<sup>21</sup> in particolare alla teoria delle stringhe, si è quasi del

---

<sup>20</sup> Cfr. Cappelletti V., *Dall’ordine alle cose*, op. cit., pp. 18 e seguenti. Si veda anche Frova A., Marenzana M., *Parola di Galileo*, Edizione Saggi SuperBur, Milano, 1998, pp. 53 e seguenti.

<sup>21</sup> Acronimo di “*Theory Of Everything*”.

tutto perso il “collegamento” con la realtà, diventando così la teoria una pura ricerca di carattere matematico.<sup>22</sup> A prova di questo fatto, molti di coloro che hanno contribuito allo sviluppo della teoria delle stringhe sono dei matematici puri, non dei fisici.<sup>23</sup>

In un certo senso questo è un processo inevitabile, nel momento in cui non si ha più a che fare con sfere che rotolano su piani inclinati, dunque con esperienze facilmente analizzabili, ma con “enti” microscopici, che nascono e muoiono in tempi brevissimi, con spazi-tempi a molte dimensioni. Tutto questo è molto difficile da “osservare” sperimentalmente, anche se si stanno preparando tecniche che in un futuro più o meno lontano potrebbero fornire delle conferme (o delle smentite) sperimentali.

Il problema è che, però, nel corso del tempo la speculazione matematica si è frequentemente imposta sulle evidenze del mondo fisico. Troppo spesso, “fare fisica” è diventato sinonimo di “fare matematica”. E, in un qualche modo, la matematica può essere utilizzata per fare passare la propria concezione del mondo, dunque per “dare un’idea” del mondo. La matematica è una disciplina “oggettiva”, nel senso che si basa su delle regole condivise cui si deve per forza sottostare, pena l’errore. Ma nello stesso tempo, il suo utilizzo, o, meglio, la decisione di utilizzare una certa matematica rispetto ad un’altra, è una scelta chiaramente “soggettiva”, a discrezione del fisico (sempre tenendo presente alcuni vincoli imposti dall’esperimento, è evidente).

Spieghiamoci meglio, prendendo come caso paradigmatico la differenza tra la meccanica quantistica di Heisenberg e quella di Schroedinger.<sup>24</sup> Mentre il primo si occupò esclusivamente di costruire un formalismo matematico che

---

<sup>22</sup> Si veda Smolin L., *The Trouble with Physics: the Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next*, Houghton Mifflin, 2006 e Woit P., *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*, Basic Books, 2006.

<sup>23</sup> Cfr. Green B., *L’universo elegante. Superstringhe, dimensioni nascoste e la ricerca della teoria ultima*, Einaudi, Torino, 2000 (*The Elegant Universe. Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, 1999).

<sup>24</sup> Cfr. per una trattazione approfondita, Giannetto E., *La rivoluzione della meccanica delle matrici di Heisenberg, Born e Jordan e Werner Heisenberg: dalla meccanica delle matrici alle relazioni di indeterminazione*, in *Saggi di Storie del Pensiero Scientifico*, op. cit., pp. 351 e 363.

rendesse conto solamente delle grandezze effettivamente osservabili di un sistema microscopico, in particolare la frequenza della radiazione e l'intensità dell'energia, il secondo utilizzò un formalismo matematico differente, che includeva la descrizione di grandezze non direttamente osservabili, come la traiettoria di una particella, ma che comunque rendeva conto, più o meno, dei risultati sperimentali.

Non si vuole, in questa sede, discutere di quale dei due modi di affrontare il problema fosse "il più giusto", e dunque prendere parte per Heisenberg oppure per Schroedinger. Alla fine, la storia ha utilizzato maggiormente il formalismo di Schroedinger, per quanto in un'ottica interpretativa differente da quella iniziale, dato che è stata aggiunta la fondamentale caratterizzazione probabilistica del modulo quadro della funzione d'onda da parte di Max Born. Quello che a noi interessa notare è che di fronte agli stessi fenomeni sperimentali, cioè di fronte alla stessa fisica, si possano utilizzare diverse forme di descrizione matematica. E la matematica non è neutrale, ma porta con sé le idee e i pregiudizi che lo scienziato, inconsapevolmente o meno, ha sul mondo. Ad esempio, nel caso di Heisenberg, il formalismo ci fa capire come l'idea principale che guidava la sua ricerca fosse quella per cui la descrizione e la comprensione di un avvenimento fisico non possano che avvenire solamente attraverso l'utilizzazione dei dati che vengono sperimentati, cioè, in un certo senso, "visti". Si può parlare solo di ciò che si misura, e la matematica che si dovrà utilizzare dovrà contenere esclusivamente le variabili "misurate".<sup>25</sup> Questo alla fine porta alla formulazione di una teoria "matriciale", come nel caso della meccanica quantistica di Heisenberg? Se è così, la si accetta. Ci si "inchina" di fronte all'esperimento.

Nel caso di Schroedinger, la questione è differente. Fermo restando il fatto che le previsioni della teoria matematica dovranno essere confermate dall'esperimento, la matematica può essere "manipolata" in modo tale che mi

---

<sup>25</sup> Heisenberg W., *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*, op. cit., p. 879.

fornisca i giusti risultati ma all'interno di un'ottica diversa: quell'ottica che si può definire "continuista", in un certo modo "determinista" e "differenziale".<sup>26</sup> Dunque se davvero la Natura è scritta in caratteri matematici,<sup>27</sup> sono presenti perlomeno diverse traduzioni e in generale si può scegliere quella che corrisponde meglio alle proprie preferenze.

Il punto è che ad ogni rappresentazione matematica corrisponde un'immagine del "mondo fisico". Una matematica, ad esempio, "discreta", appunto algebrica, matriciale, mi disegna un mondo discreto, discontinuo, a differenza della matematica figlia dell'analisi differenziale, dove gli infinitesimi la fanno da padroni. La matematica utilizzata principalmente nelle teorie fisiche è proprio la matematica differenziale creata e sviluppata da Leibniz e Newton.<sup>28</sup>

Spingendosi ancora oltre, è noto che in questa matematica i numeri trattati sono i numeri reali, numeri cioè costituiti da infinite cifre. Che la matematica si occupi di numeri reali e di infinitesimi va benissimo, ma possono nascere delle difficoltà nel momento in cui si sostenga che quella matematica e quei numeri siano lo "specchio" della realtà.

Come abbiamo detto, la realtà la si conosce attraverso l'esperimento, il fisico *conosce l'esperimento*, cioè i risultati di misurazioni. Questi risultati sono scritti in termini numerici, ma evidentemente con un numero finito di cifre, all'interno dell'incertezza sperimentale, sempre presente. Allora è chiaro che la descrizione matematica del fenomeno non può prescindere dal fatto che i dati sperimentali *non* sono numeri reali.

Per arrivare al nodo della questione, il concetto di traiettoria, così come trattato nella dinamica classica, è un concetto matematico, non fisico. Questo è un fatto assolutamente fondamentale e bisogna sempre tenerlo presente.<sup>29</sup>

---

<sup>26</sup> Schroedinger E., *Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen*, op. cit., p. 734.

<sup>27</sup> Galileo Galilei, *Il Saggiatore*, Ed. Naz. VI, p. 232.

<sup>28</sup> Cfr. Boyer C., *Storia della Matematica*, ISEDI, 1976, pp. 450 e seguenti (*A History of Mathematics*, John Wiley & Sons, 1968).

<sup>29</sup> Questo è uno degli aspetti fondamentali della riflessione di Prigogine. Cfr. Prigogine I., Stengers I., *Tra il tempo e l'eternità*, op. cit. e Prigogine I., Stengers I., *La Nuova Alleanza*,



La traiettoria altro non è che una soluzione di un'equazione differenziale: è una funzione di una variabile (in questa sede non ci preoccupiamo delle funzioni a più variabili). Disegnando questa funzione su un piano cartesiano, compare una "linea" la cui forma dipende chiaramente dalla natura della funzione.

In fisica le equazioni che descrivono il moto di un punto materiale (sottoposto o meno a determinate forze) sono equazioni differenziali, le cui soluzioni sono funzioni indicanti lo spazio in funzione del tempo (è chiaro che si sta un po' semplificando la questione, ma a livello concettuale questo può essere sufficiente. Come abbiamo già ricordato, in meccanica classica non necessariamente si lavora con la variabile spaziale  $x$ , ma in generale ci si mette in un più generico "spazio delle fasi" costituito da variabili generali  $q_i$  e da momenti generalizzati  $p_i$ ).<sup>30</sup> La trasposizione in fisica del concetto di traiettoria è una cosa del tutto naturale, dato che, nel momento in cui osserviamo il moto di un qualsiasi oggetto che ci sta intorno, possiamo immaginare che stia percorrendo proprio quella linea che dovrebbe essere la soluzione delle equazioni del moto. Però bisogna anche tener presente che, per risolvere un'equazione differenziale è necessario conoscere le cosiddette "condizioni iniziali", ovvero sia il valore della funzione per un determinato valore della variabile (per la legge di Newton, ad esempio, questo vorrà dire che sarà necessario conoscere la posizione della particella in un determinato istante. Se poi l'equazione è del secondo ordine bisognerà conoscere anche un valore della derivata prima, e così via, ma adesso questo non è importante).

In matematica, conoscere il valore della funzione in esame in un dato valore della variabile, significa possedere un numero reale. In fisica significa conoscere la posizione del sistema, cioè un numero che ha un numero finito di cifre, con un'inevitabile approssimazione. Questo fa cambiare le cose, e di parecchio.

---

Einaudi, Torino, 1999 (*La Nouvelle Alliance. Métamorphose de la Science*, Gallimard, Paris, 1979).

<sup>30</sup> L'importante è comunque la teoria delle equazioni differenziali. Si veda Fusco N., Marcellini P., Sbordone C., *Analisi matematica due*, op. cit., e Tenenbaum M., *Ordinary Differential Equations*, op. cit.

E' su una riflessione simile che si innesta il concetto di "instabilità" così preponderante nella riflessione di Prigogine.<sup>31</sup> Egli era convinto che le traiettorie non potessero più essere un "ente" fondamentale della fisica proprio perché i cosiddetti sistemi caotici, cioè quelli fortemente sensibili alle condizioni iniziali, precludono la possibilità di prevedere la posizione esatta del sistema per un tempo lungo (in teoria infinito), e dunque non si può più sapere la soluzione dell'equazione del moto se non per un intervallo di tempo breve. Non si può più parlare di traiettoria, così come, a livello teorico, si parlava in matematica. Nella fisica del caos questo è diventato impossibile.<sup>32</sup>

C'è però un appunto da fare. Prigogine punta molto, a ragione, sui sistemi caotici, perché hanno fornito la possibilità di compiere un salto concettuale di notevole spessore, permettendo di riconoscere che esistono sistemi il cui stato diventa imprevedibile dopo un certo lasso di tempo. Eppure, per il discorso sulle equazioni differenziali appena fatto, la caratteristica dell'imprevedibilità dovrebbe essere estesa anche ai sistemi non caotici. Dovrebbe riguardare *tutti* i sistemi fisici.<sup>33</sup>

I sistemi caotici sono caratterizzati dal fatto che due soluzioni riguardanti condizioni iniziali molto vicine tra di loro divergono esponenzialmente nel tempo, dunque l'effetto dell'imprevedibilità diventa molto visibile. Quindi, nel momento in cui si dia per assodato che lo sperimentatore non può conoscere le condizioni iniziali di un sistema con una precisione assoluta (questo può essere visto a livello pratico, ma è, come visto, una questione più sostanziale: per conoscere precisamente un numero, bisognerebbe riuscire a scrivere infinite cifre dopo la virgola), sarà evidente lo scostamento del sistema da una previsione teorica.

---

<sup>31</sup> Cfr. Prigogine I., *La fine delle certezze*, op. cit., pp. 71 e seguenti.

<sup>32</sup> Cfr. Vulpiani A., *Determinismo e Caos*, Edizioni Carocci, Roma, 1994; Gleick J., *Caos. La nascita di una nuova scienza*. Edizioni SuperBur Scienza, Milano, 1997 (*Chaos*, Viking Penguin Inc., New York, 1987); per una trattazione più tecnica dell'argomento si rimanda a AA.VV., *Classical and Quantum Chaos*, sul sito [www.chaosbook.org](http://www.chaosbook.org). 2004.

<sup>33</sup> Ad esempio, si veda il saggio di Giannetto E., *Max Born, il Caos ed il Mito del Determinismo Meccanicista*, in *Saggi di Storie del Pensiero Scientifico*, op.cit., p. 377.

Però l'impossibilità di conoscere con precisione assoluta le condizioni iniziali è presente anche nell'analisi di sistemi non caotici, questo è evidente. La differenza rispetto ai primi sarà che il limite temporale oltre il quale lo stato del sistema non sarà più predicibile sarà spostato più avanti nel futuro, ma comunque ci sarà. La traiettoria del moto del sistema coinciderà con la traiettoria pura matematica per un lungo periodo di tempo, ma non *per sempre*. Questo punto è di estrema importanza. Perdendo significato il concetto di traiettoria, risulta molto più difficile poter parlare di simmetria per inversione temporale del sistema. Mentre per una traiettoria perfettamente determinata, invertire il segno della variabile (invertire il tempo, nel caso fisico) significava ripercorrerla "all'indietro", e questo processo poteva avere un senso, adesso che la traiettoria non esiste più, perlomeno oltre un certo orizzonte temporale, la reversibilità del moto perde la sua "fisicità".

Prigogine tentò di modificare la dinamica classica proprio alla luce di queste riflessioni, partendo dai concetti di sistema caotico, sensibilità alle condizioni iniziali e instabilità di un sistema. Ne scaturì una dinamica "probabilistica", in cui il concetto di traiettoria perdeva il suo abituale significato, dunque una dinamica irreversibile, che teneva conto delle biforcazioni e dell'azione del tempo sul sistema.

Questa modifica, però, partiva da un presupposto: la dinamica classica era inadeguata a descrivere il mondo fisico perché era una dinamica reversibile e a-temporale.<sup>34</sup>

Abbiamo visto che così, effettivamente, *non è*. E' la matematica pura che è reversibile (e anche qui ci sarebbero lunghi discorsi da fare),<sup>35</sup> non la fisica. Il

---

<sup>34</sup> Cfr. Prigogine I., Stengers I., *Tra il tempo e l'eternità*, op. cit., capitoli 1, 2, 3.

<sup>35</sup> In questa sede, ci limitiamo ad analizzare l'impossibilità di conoscere con precisione infinita il valore di un dato sperimentale. In realtà, come accennato, questo problema è presente anche per un numero "puro", e dunque non può essere ignorato all'interno della matematica pura. A livello teorico, anche un'equazione differenziale puramente matematica non può presentare un'unica soluzione perché le condizioni iniziali che si devono sapere sono appunto dei numeri reali che non possono essere conosciuti con precisione assoluta. Questo discorso ci porterebbe un po' troppo lontano, ma è interessante sottolineare come anche i più accesi sostenitori della fisica del caos si limitino esclusivamente ad evidenziare i problemi a livello sperimentale e non anche a livello di matematica pura. Qualche studioso si è comunque posto il problema. Il

problema, dunque, è proprio quello da cui siamo partiti: è il rapporto tra matematica e fisica che ha inquinato il problema della reversibilità temporale. Il fatto di aver sovrapposto lo strumento per l'analisi di un problema al problema stesso, di avere identificato le equazioni descriventi un fenomeno fisico come il fenomeno stesso, ha portato a “riversare” le caratteristiche della matematica in un campo che avrebbe dovuto utilizzarle con occhio critico.

Sembra che i fisici si siano via via dimenticati che il mezzo necessario che utilizzavano per descrivere quello che studiavano era appunto un mezzo, e non doveva essere sovrapposto al fine, o, almeno, non si doveva permettere che il mezzo “inquinasse” e “distorcesse” il fine.

Come abbiamo detto, la dinamica classica appare reversibile per inversione temporale anche perché nacque in un modo che la “obbligò” ad essere tale. Adesso possiamo aggiungere che tutti i sistemi fisici che sono stati studiati nel periodo di sviluppo della dinamica classica erano sistemi che non prevedevano comportamenti caotici, e dunque aiutavano la convinzione del fisico di essere di fronte a fatti perfettamente predicibili. Si può dunque affermare che furono le condizioni storiche in cui nacque la fisica classica che decretarono la vittoria di una visione deterministica e a-temporale. Lo studio del moto di rivoluzione della Terra attorno al Sole è troppo regolare perché possa fare nascere dubbi su un eventuale discostamento dalle previsioni teoriche.<sup>36</sup> Studiare il moto di una sfera su un piano perfettamente levigato porta a dei risultati prevedibili, senza che l'incertezza comunque presente nella definizione delle condizioni iniziali possa influenzare alcunché.

E' stato proprio nel momento in cui ci si è resi conto che esistono sistemi dinamici instabili e caotici che la riflessione sulla predicibilità del futuro di un

---

risultato è stato la formulazione di quella che viene chiamata “matematica costruttiva”, in cui vengono definiti solo quei numeri che possono essere “costruiti” (sostanzialmente i numeri naturali e razionali). I numeri reali non esisterebbero, e la matematica si avvicinerebbe di più ad una tecnica sperimentale e “in costruzione”. Per approfondire l'argomento, si veda Mines R., Richman F., Ruitenburg W., *A Course in Constructive Algebra*, Springer Edition, 1987; Edwards H., *Essays in Constructive Mathematics*, Springer Edition, 2004.

<sup>36</sup> Cfr. Prigogine I., Stengers I., *Tra il tempo e l'eternità*, op. cit., p. 23. Si ricordi, comunque, che Newton introdusse un continuo intervento di Dio per mantenere stabile il sistema solare.

sistema è stata messa in dubbio<sup>37</sup> (la questione è stata posta anche dalla meccanica quantistica, ma in termini sostanzialmente diversi).

Ecco perché la riflessione di Prigogine è di fondamentale importanza, ma, in un certo modo, sposta il problema, di nuovo, dalla fisica alla matematica. Il suo desiderio di trovare equazioni intrinsecamente irreversibili tradisce la convinzione che quelle equazioni debbano essere la realtà, che si manifesta irreversibile. Ma così non è. Quelle equazioni sono uno strumento creato dall'uomo per descrivere ciò che vede e, possibilmente, riuscire a prevedere fenomeni nel futuro: il fatto poi che si stia facendo fisica, e non matematica, deve portare alla consapevolezza che quelle equazioni avranno un "limite di validità", dovuto proprio al carattere finito e "fisico" delle misurazioni sul mondo.

Non si fraintenda: questo discorso non vuole essere una difesa delle equazioni della dinamica classica contro le modifiche di Prigogine. Una "nuova dinamica" *à la* Prigogine va benissimo, e può senz'altro costituire un importante passo avanti nella ricerca scientifica. Può essere in grado di descrivere meglio alcuni fenomeni, o può aiutare la comprensione di altri. Il fatto poi che la matematica utilizzata presenti una irreversibilità di fondo aiuta ad avvicinarsi di più a quell'irreversibilità che tutti noi sperimentiamo ogni giorno. Ma tutto questo non dovrebbe alimentare la convinzione che la dinamica classica non fosse irreversibile.<sup>38</sup> Le sue equazioni matematiche potevano essere considerate reversibili se analizzate con gli occhi di un matematico, ma non lo erano nel momento in cui si entrava nel campo della fisica, che è quello che a noi interessa. Mettiamola così: le equazioni della dinamica classica sono il risultato di una ricerca in campo fisico fatta in un determinato periodo storico con delle determinate conoscenze: riflettevano

---

<sup>37</sup> Ad esempio, si pensi alla riflessione di Henri Poincaré sui sistemi a tre corpi non integrabili. Quello fu il primo esempio di studio sistematico di un sistema caotico.

<sup>38</sup> Si veda, ad esempio, Hutchison K., *Temporal asymmetry in classical mechanics*, British Journal for the Philosophy of Science 46, 1995, pp. 219-234. Hutchison K., *Differing criteria for temporal reversibility*, British Journal for the Philosophy of Science 46, 1995, pp. 341-347. Hutchison K., *Is classical mechanics really time-reversible and deterministic?*, British Journal for the Philosophy of Science 43, 1993, pp. 307-323.

certe condizioni particolari, e alla fine risultarono “matematicamente reversibili”. Le equazioni di Prigogine sono figlie di altre condizioni, più complesse, più mature, con un carico di esperienza maggiore, e risultano “matematicamente irreversibili”. L’applicazione di entrambe le classi di equazioni al mondo fisico, dunque a dei risultati di misure, le rende comunque “fisicamente irreversibili”.

### **2.3 - Il “problema del tempo” e la posizione di Prigogine**

L’idea fondamentale di Prigogine era quella di riuscire a rendere intrinsecamente irreversibili le equazioni della dinamica classica, della meccanica quantistica e della relatività.<sup>39</sup> Prendendo come legge fondamentale e “auto-evidente” il secondo principio della termodinamica sulla crescita dell’entropia in un sistema chiuso, il premio Nobel trovava contraddittorio il fatto che le leggi delle teorie fisiche fondamentali fossero simmetriche per inversione temporale, cioè non “conoscessero” la differenza tra passato e futuro, e che i fenomeni che ci circondano fossero soprattutto fenomeni irreversibili, che vivono una “freccia del tempo”.

La “riscoperta del tempo” da parte di Prigogine parte dalla constatazione che il mondo non sta finendo verso una degradazione totale, verso la morte termica, come avevano preventivato gli studiosi di termodinamica, ma che, insieme alla degradazione, si notano fenomeni ordinati, che si auto-organizzano. Si possono notare cioè regioni in cui l’entropia decresce. Questo può senz’altro avvenire, anche perché il secondo principio parla di crescita dell’entropia in sistemi chiusi, non necessariamente per quelli che scambiano calore e informazioni con l’esterno. Il fatto importante è che Prigogine notò che strutture ordinate potevano nascere anche in sistemi in cui veniva aumentata

---

<sup>39</sup> Prigogine I., *La fine delle certezze*, op. cit., p. 14.

l'entropia.<sup>40</sup> Entropia come portatrice di ordine, dunque, non solo di caos senza vita.

I suoi studi sui sistemi termodinamici lontani dall'equilibrio tentarono di dimostrare che, a differenza dello stato di equilibrio termico, in cui non possono avvenire “fatti nuovi” e la “creatività” della natura scompare, in regioni di non-equilibrio si ritrova un'attività feconda, degli “eventi” che sono portatori di senso, cioè di “novità creativa”. E' proprio in queste regioni che trova il suo vero significato lo scorrere del tempo: esso non è più un'illusione, ma un fatto necessario per la continuazione della vita stessa.

Prima di addentrarci nel pensiero “fisico” di Prigogine, è interessante ricordare come le motivazioni che spinsero lo scienziato a recuperare il significato del tempo all'interno delle teorie fisiche fossero anche motivazioni di carattere filosofico o, meglio ancora, “umano”.

Una fisica senza tempo è una fisica, secondo Prigogine, che si trova in totale opposizione rispetto al suo stesso ideatore, l'uomo. Sulla scia di Popper,<sup>41</sup> Prigogine pensava che un mondo descritto dalle leggi deterministiche e reversibili della meccanica classica è un mondo che disconosce la libertà stessa che dovrebbe caratterizzare ogni scelta di un essere umano.

Bergson, forse il più importante tra gli ispiratori di Prigogine, sosteneva che il tempo vissuto traduce la nostra solidarietà con il reale.<sup>42</sup> Dunque era diventato ormai insostenibile pensare al tempo semplicemente come un “fatto di

---

<sup>40</sup> Famosi sono, ad esempio, i “vortici di Benard”, o le razioni di Zhabotinsky descritti ampiamente in Prigogine I., Stengers I., *Tra il tempo e l'eternità*, op. cit., pp. 52 e seguenti. E' interessante notare come l'interpretazione che Prigogine diede a questi fenomeni è stata criticata da altri scienziati e filosofi della scienza. Bricmont, ad esempio, sostiene che l'idea di “ordine dal caos” (“*order out of chaos*”) è un errore interpretativo da parte di Prigogine per quanto riguarda ad esempio le reazioni di Zhabotinsky. Bricmont sostiene che la confusione è evidente nel momento in cui si pensa che “una struttura viene sottoposta ad una fonte di calore, che solitamente è una fonte di disordine. Però quello che serve, evidentemente, è una differenza di temperatura tra i due piatti. Dunque, se uno viene riscaldato da sotto, l'altro deve essere raffreddato da sopra, e dunque si ha un'azione simile a quella di un refrigeratore, richiedendo una sorgente di energia ‘ordinata’” (trad. it. mia). Si veda Bricmont J., *Science in Chaos or Chaos in Science?*, Physicalia Magazine 17, 1995, p. 192.

<sup>41</sup> Popper K., *The Open Universe: An Argument for Indeterminism*, Hutchinson, Londra, 1982 (trad. it. *Postilla alla logica della scoperta scientifica II. L'universo aperto*, Il Saggiatore, Milano, 1984).

<sup>42</sup> Cfr. Prigogine I., Stengers I., *Tra il tempo e l'eternità*, op. cit., p. 21.

coscienza” interno all’uomo, contrapposto alla visione di un mondo “oggettivo” e “reale” del tutto a-temporale.

Prigogine, da scienziato qual era, non seguì Bergson sul piano di un ritorno al “sentimento della nostra evoluzione e dell’evoluzione di tutte le cose nella durata pura”,<sup>43</sup> ma tradusse la sua sfida sul piano prettamente scientifico. La fisica è un’opera umana, costruita nella storia dagli uomini. E per gli uomini lo scorrere del tempo è un’evidenza non solo interiore, ma anche esteriore, siamo circondati da un tempo in movimento.

Il compito del fisico, dunque, sarebbe diventato quello di integrare lo scorrere del tempo nelle leggi fondamentali della fisica, e questa “rivoluzione” non si sarebbe dovuta leggere come un taglio netto con un passato da rinnegare, ma come la normale evoluzione di un pensiero scientifico che, nella storia, si modifica, si rinnova, prende coscienza di nuovi fatti che prima non erano stati presi in considerazione.

E’ proprio la creatività della ricerca scientifica, che si sviluppa nel tempo, che *ha bisogno di tempo*, nel senso che richiede interazioni, scontri e fusioni di idee, il fattore che ha ritrovato la necessità di descrivere questo tempo: la condizione necessaria per lo sviluppo della fisica deve rientrare nel quadro teorico della fisica stessa.

Ecco perché Prigogine sosteneva che la fisica classica (per la meccanica quantistica il discorso è leggermente diverso, sarà analizzato più avanti) era, in fin dei conti, un’opera “disumanizzante”: perché aveva del tutto escluso l’artefice della sua nascita.

Un mondo deterministico e senza tempo non può veder nascere al proprio interno alcuna forma di vita, non può rendere conto delle nuove strutture che si creano e che si mantengono, non può che essere in antitesi con la consapevolezza, presente in altri campi ed altre discipline, dell’importanza dell’evoluzione e dell’azione del tempo.

---

<sup>43</sup> Bergson H., *L’evoluzione creatrice*, Sansoni, Firenze, 1951, p. 103.



La “potenza creatrice del tempo”<sup>44</sup> è evidente in tutti i tratti della cultura umana, dalle lingue, alle istituzioni della storia, dalle religioni ai giudizi etici ed estetici. Tutte queste cose sono il prodotto di una evoluzione storica, di una migliore (ma possibilmente anche peggiore) comprensione del mondo che ci circonda. Anche la fisica, per Prigogine, doveva fare la sua parte. Come scienza, essa stessa non poteva essere vista che come il prodotto di una storia. Come scienza che presume di descrivere la natura, essa doveva inglobare al proprio interno una descrizione oggettiva del “fluire del tempo”.

E’ sempre stato interessante e centrale il tema che mette in relazione la fisica deterministica con la libertà di coscienza dell’uomo. Come fa l’uomo ad essere libero di fare le proprie scelte nel momento in cui la fisica fondamentale parla di “immutabile eternità”, di un tutto che è già stato deciso?

A questa domanda Prigogine risponde che appunto l’uomo non può essere visto come un essere libero di agire se la fisica sottostante parla il linguaggio deterministico delle traiettorie.<sup>45</sup> Questo è un punto di vista comprensibile, ma anche criticabile.

Ed è criticabile in quanto sembrerebbe fare ricorso ad un’ottica ancora una volta riduzionista: il comportamento dell’uomo viene ricondotto esclusivamente ad una dimensione e descrizione fisica. Sostenere che se la fisica fosse deterministica e a-temporale, allora l’uomo non potrebbe essere quello che effettivamente sembra essere, cioè non potrebbe compiere i propri atti in piena libertà, significa pensare che la fisica sia alla base di qualunque spiegazione per ogni “evento” nel mondo, compreso il comportamento umano nella sua infinita complessità. E’ una posizione senz’altro legittima, ma in un certo senso si accoda alle visioni fortemente scientiste di un certo filone positivista.

Il peso dato da Prigogine alla questione temporale è senz’altro condivisibile e necessario. E tutte le sue riflessioni che toccano questo aspetto anche dal punto

---

<sup>44</sup> Cfr. Prigogine I., Stengers I., *Tra il tempo e l’eternità*, op. cit., p. 25.

<sup>45</sup> Cfr. Prigogine I., Stengers I., *Tra il tempo e l’eternità*, op. cit., pp. 42 e seguenti.

di vista di una difesa della condizione umana nella sua pienezza e creatività sono importanti. Il problema è l'interpretazione finale che si dà alla fisica modificata alla luce di queste riflessioni. Se la fisica rimodellata, in cui viene inserito un elemento di irreversibilità temporale intrinseco, in cui il determinismo viene abbandonato per fare posto ad una descrizione probabilistica, viene letta come un giusto progresso della nostra conoscenza scientifica *in quel campo specifico* e dunque come un normale miglioramento dei formalismi e della comprensione di alcuni avvenimenti, allora il giudizio non può che essere positivo. Ma se, dietro alla volontà di ricondurre la fisica entro i binari di un riconoscimento del fluire temporale si nascondesse, più o meno esplicitamente, la volontà di giustificare e spiegare determinati settori della vita sulla base di un riduzionismo fisico, ci sarebbe perlomeno da discutere.

Il grande contributo che Prigogine ha dato alla riflessione sul tempo in fisica in relazione alla libertà d'azione umana, cioè la riflessione filosofica sull'intreccio tra fisica e scienze umane, tra fisica ed etica descritta ne "La Nuova Alleanza",<sup>46</sup> non è stato quello di aver introdotto finalmente una dimensione temporale nelle equazioni della fisica portando queste ultime più "vicine" al sentire umano. E' stato, in un certo senso, l'esatto contrario di ciò che si era preposto. Con le acute osservazioni di Prigogine e il suo innegabile apporto all'evoluzione delle scienze si è finalmente potuto capire ancora meglio che la realtà è molto più complessa delle equazioni che parzialmente descrivono il suo "funzionamento".

La libertà dell'uomo non va ricercata nelle equazioni matematiche delle teorie fisiche: non è lì che si può trovare o giustificare. La libertà dell'uomo è manifesta in ogni singolo atto di misura: non potrà mai esserci alcuna teoria, intrinsecamente reversibile o irreversibile, che potrà negare l'evidenza, e cioè che solo nell'"atto fisico" è presente lo scorrere del tempo e l'indecidibilità, è

---

<sup>46</sup> Prigogine I., Stengers I., *La Nouvelle Alliance. Métamorphose de la Science*, Gallimard, Paris, 1979.

nell'“atto fisico” che si manifesta la libera scelta dell'uomo. Non certo nelle equazioni matematiche, che propongano una rottura della simmetria temporale oppure no.<sup>47</sup>

### 2.3.1 - Prigogine e la meccanica quantistica

Passiamo adesso ad analizzare in dettaglio ciò che Prigogine pensava della meccanica quantistica. Di certo egli era convinto che, dal punto di vista della concezione del tempo, la meccanica quantistica fosse del tutto equivalente alla meccanica classica, e che dunque, come questa, dovesse essere modificata.<sup>48</sup>

La meccanica quantistica presenta una descrizione individuale, in termini di funzione d'onda, esattamente come in fisica classica si aveva una descrizione individuale del punto materiale. In realtà, come abbiamo visto, Prigogine era del tutto consapevole del fatto che la realtà è ben più complessa delle semplificazioni attuate in laboratorio o nella mente dei fisici teorici, e che è fondamentale considerare tutte le interazioni che una particella “sperimenta” durante la sua vita. Lo studio di questi sistemi complessi portò ad una formulazione probabilistica e non più individuale dei possibili percorsi del sistema elementare, dunque ad un indeterminismo e ad una irreversibilità di fondo.

Allo stesso modo, Prigogine era convinto che si dovesse procedere ad una rivalutazione del carattere intrinsecamente a-temporale della meccanica quantistica.

La posizione del premio Nobel può sembrare sorprendente. Un aspetto della fisica quantistica standard, della cui rivoluzionarietà Prigogine comunque non

---

<sup>47</sup> Si torna ancora al discorso fatto nel primo e nel secondo paragrafo del presente capitolo, la relazione tra ciò che effettivamente vuole descrivere la fisica e le equazioni matematiche che costituiscono lo strumento della descrizione.

<sup>48</sup> Cfr. Prigogine I., Stengers I., *Tra il tempo e l'eternità*, op. cit., pp. 119 e seguenti; Prigogine I., *La fine delle certezze*, op. cit., pp. 123 e seguenti.

dubitava, è il collasso della funzione d'onda. Ogni volta che si compie una misurazione su un sistema, l'evoluzione deterministica della funzione d'onda che lo descrive viene improvvisamente interrotta e la funzione "salta" in un autostato relativo all'osservabile misurata. Questo aspetto del processo di misurazione quantistico sembrerebbe descrivere una irreversibilità sostanziale.

Dunque anche sostenendo che l'equazione di Schroedinger sia reversibile per inversione temporale (ed era ciò che Prigogine pensava),<sup>49</sup> l'atto di misurazione dovrebbe portare a rompere la reversibilità del sistema.

Questo, in un certo modo, era riconosciuto anche dallo scienziato russo, anche se non in modo tale da affermare una irreversibilità intrinseca del sistema.

In altri termini, Prigogine non condivideva l'idea secondo la quale è l'atto di osservazione di un essere cosciente il motivo dell'irreversibilità della teoria. Accusava questa idea di "soggettivismo". Per un "realista" come lui,<sup>50</sup> convinto dell'esistenza di una realtà anche in assenza di un essere che sostenga delle misurazioni, l'irreversibilità della natura doveva trovarsi nelle equazioni più fondamentali che ne descrivevano l'evoluzione, ed essere completamente slegata dal cosiddetto "atto di misurazione".

Dunque la meccanica quantistica aveva recuperato e reso fondamentale in fisica il ruolo dell'osservatore, ma forse "un po' troppo": la freccia del tempo deve essere inscritta nella realtà "oggettiva".

Ci sono due considerazioni da fare. La prima riguarda proprio questo approccio realista al problema. E' un modo di vedere la questione più che legittimo, condiviso da tanti altri scienziati, ma che sembra in un qualche modo stridere con la preoccupazione di creare un legame tra "chi fa la fisica" e "ciò che descrive la fisica", che è poi la preoccupazione di Prigogine nella sua riflessione sulla fisica senza tempo della dinamica classica.

---

<sup>49</sup> Si veda, ad esempio, Prigogine I., *La fine delle certezze*, op. cit., pp. 19 e 130.

<sup>50</sup> Prigogine vuole risolvere il "paradosso del tempo" per risolvere il "paradosso quantistico" che "fa di noi i responsabili della rottura della simmetria temporale che si osserva in natura". Questo avrebbe portato ad una "formulazione realista della teoria". Cit. da Prigogine I., *La fine delle certezze*, op. cit., p. 14.

In secondo luogo, nei discorsi di Prigogine mancano riferimenti ad altri sviluppi della meccanica quantistica, nelle sue poliedriche interpretazioni. In effetti, sembra che la sua attenzione sia, giustamente, incentrata sulla meccanica quantistica “standard” nella formulazione di von Neumann e Dirac, quella in cui, appunto, al processo 2 di evoluzione deterministica della funzione d’onda segue il processo 1 del collasso della stessa immediatamente dopo un atto di misurazione.

Questo è il modo di vedere le cose più diffuso, ma non è l’unica interpretazione della meccanica quantistica. All’interno delle *collapse theories*, ve ne sono alcune che cercano di spiegare in maniera dinamica il processo di riduzione della funzione d’onda, cioè quello che Prigogine si propose di fare, ma in una maniera differente.<sup>51</sup>

Vedremo più avanti come queste teorie siano delle buone candidate per descrivere un mondo quantistico, indeterministico ed irreversibile. Certo, sono altre formulazioni della meccanica quantistica, con alcune correzioni importanti e l’introduzione di nuove costanti della natura, ma del tutto legittime (esattamente come legittima è la meccanica quantistica di Prigogine).

Inoltre, sembra che Prigogine non avesse posto troppa attenzione al fenomeno della decoerenza nella teoria quantistica, cioè a quel processo che permette di ottenere un mondo macroscopico determinato a partire dal continuo “monitoraggio” del sistema da parte dell’ambiente circostante.<sup>52</sup> Il collasso

---

<sup>51</sup> Ad esempio la teoria GRW. Si veda il capitolo 3 del presente lavoro.

<sup>52</sup> Ne “*La fine delle certezze*” Prigogine scrive: “Qualcuno ha proposto anche di definire l’apparato [di misurazione] come un sistema quantico aperto, interagente col mondo. Perturbazioni contingenti, fluttuazioni provenienti dall’ambiente distruggerebbero le proprietà quantiche del sistema, e sarebbero allora responsabili della misurazione. Ma che cosa significa “ambiente”? Chi stabilisce la distinzione tra un oggetto e il suo ambiente?” (p. 49). Prigogine pone le domande che ricorrono spesso nell’analisi del problema della decoerenza. Sembra, però, che non voglia affrontarle, e che liquidi il problema un po’ troppo velocemente, sostenendo che si tratti di una “versione camuffata della posizione di von Neumann” (op. cit. p. 49). Cfr. Joos E., Zeh H. D., Giulini D., Kiefer C., Kupsch J., Stamatescu O., *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*, Springer, II Edition, 2003; si rimanda anche al sito [www.arXiv.org](http://www.arXiv.org) dove si possono trovare, tra gli altri, i seguenti articoli: Zeh H. D., *Decoherence: Basic Concepts and their Interpretation*, 2003, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/950602>; Kiefer C., Joos E., *Decoherence: Concepts and Examples*, 2002, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9803052>; Zurek W., H., *Decoherence*,

della funzione d'onda, che segue ad ogni processo di misurazione, non deve per forza essere il risultato della presenza di un osservatore cosciente, così come suggeriva von Neumann e come riprende, in maniera critica, Prigogine.

La teoria della decoerenza evidenzia come ogni singola interazione tra sistemi microscopici e non porti al collasso naturale e continuo delle funzioni d'onda in questione (questo chiaramente in un'ottica appartenente alle teorie “*collapse*”, cioè quelle che prevedono il collasso della funzione d'onda. La teoria della decoerenza, però, può essere applicata anche alle teorie “*no-collapse*”, e in questo caso l'interpretazione della definizione dei risultati di misurazioni sarà differente), e che dunque non necessariamente il collasso debba essere associato ad una visione soggettivistica. Certo, anche la teoria della decoerenza ha sostenitori e detrattori, è naturale, e può essere sottoposta alle stesse critiche che si sono mosse al progetto di Prigogine: è anch'essa un tentativo “riduzionista”, nel senso che prova a descrivere l'“emergenza” della stabilità del mondo macroscopico, in contrasto con le interferenze e le sovrapposizioni di stati tipiche della fisica microscopica, in termini di meccanica quantistica, ovvero sia sostenendo uno *status* fondamentale di quest'ultima.

Nel tentativo di Prigogine di spiegare l'irreversibilità termodinamica attraverso una modifica delle equazioni della dinamica si può intravedere la stessa volontà di trovare un punto più fondamentale di un altro, ma questo è un aspetto per certi versi costitutivo della stessa ricerca scientifica. Dunque, senza voler entrare nel merito della “scelta riduzionista” in sé, adesso si vuole semplicemente mostrare che la meccanica quantistica ha già al proprio interno i possibili elementi, interpretazioni e sviluppi per descrivere un mondo maggiormente “oggettivo” rispetto a quello descritto da von Neumann, e che

---

*Einselection and the Quantum Origins of the Classical*, 2003, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0105127>. Inoltre segnalo l'articolo di Bacciagaluppi G., *The Role of Decoherence in Quantum Theory*, all'indirizzo internet <http://plato.stanford.edu/entries/qm-decoherence/#1>. Al tema della decoerenza è stato dedicato il sito internet <http://www.decoherence.de/>.

dunque non è del tutto vera l'affermazione che l'irreversibilità della fisica quantistica è semplicemente legata alla presenza di un osservatore.

Tornando al modo in cui Prigogine tentò di modificare la meccanica quantistica, sono dunque da tenere presenti le due idee portanti che guidarono il progetto: da un lato bisognava risolvere il problema legato alla doppia struttura della teoria quantistica, e cioè il fatto che sia presente all'interno della teoria un "secondo tipo" di processo dinamico, quello della riduzione della funzione d'onda, irriducibile all'equazione deterministica di Schroedinger. Dall'altro lato era necessario risolvere il conflitto della meccanica quantistica con la termodinamica, che non permette, ad esempio, di descrivere i processi irreversibili.

Per quanto riguarda la prima idea guida, il modo per risolvere la questione era, secondo Prigogine, quello di riuscire ad interpretare in termini dinamici la riduzione della funzione d'onda e Prigogine propose di estendere l'utilizzo dei GSP (Grandi Sistemi di Poincaré) anche alla meccanica quantistica.<sup>53</sup>

Prigogine era convinto che, all'interno della dinamica newtoniana, i sistemi "reali" da studiare sono quelli coinvolti in miriadi di interazioni con le particelle e l'ambiente che li circonda. Questi sistemi sono sistemi "non integrabili", perché presentano delle "risonanze". Così come l'utilizzo dei GSP permetteva di modificare la dinamica classica portando ad una descrizione non più individuale in termini di traiettorie, ma statistica, così adesso si sarebbe potuta dare una nuova formulazione statistica della meccanica quantistica. Per poter fare tutto ciò, Prigogine aveva bisogno di "uscire" dallo spazio di Hilbert. In collaborazione con il gruppo di Austin, il cui esponente di spicco è il fisico Arno Bohm, il gruppo di Bruxelles ha provato ad "allargare" lo spazio di Hilbert per poter permettere una formulazione tempo-asimmetrica della meccanica quantistica.<sup>54</sup>

---

<sup>53</sup> Prigogine I., Petrosky T., *An Alternative to Quantum Theory*, Physica 147 A, pp. 461-486, 1988. Anche Prigogine I., *La fine delle certezze*, op. cit., p. 124.

<sup>54</sup> E' stato possibile fare questo introducendo il "*Rigged Hilbert Space*" (o "tripletta di Gelfand"). Per informazioni dettagliate su questo argomento si indica Bishop R., *The Arrow of*

Partendo dal presupposto che l'evoluzione temporale è unitaria e reversibile e, come è noto, è data dall'operatore di evoluzione  $U = \exp(-iHt)$ , con il parametro  $t$  che corre da meno infinito a più infinito, Bohm conclude che il decadimento delle particelle o la teoria quantistica dell'universo non possono essere descritte in maniera coerente all'interno della cornice quantistica, dato che una serie di teoremi<sup>55</sup> preclude la possibilità di avere probabilità maggiori di zero (eventi cioè possibili) dopo un tempo  $t$  prima del quale la probabilità è uguale a zero. Questo significa, ad esempio, che il Big Bang non potrebbe essere descritto all'interno dello spazio di Hilbert.<sup>56</sup> Senza entrare nei dettagli tecnici del problema, molto difficili, Prigogine notò come, se si rimane nello spazio di Hilbert, si verificano degli scostamenti sostanziali dalla legge esponenziale di decadimento, concludendo dunque che allargare lo spazio matematico di formulazione della teoria quantistica fosse necessario anche da un punto di vista sperimentale.<sup>57</sup> Il problema di questi lavori, a prescindere dal fatto che possono fornire strumenti più raffinati e precisi per descrivere alcune situazioni quantistiche (non dimentichiamo che comunque gli stessi *ket* introdotti da Dirac<sup>58</sup> non sono elementi dello spazio di Hilbert, ma autovettori generalizzati che richiedono una estensione dello spazio di Hilbert, dunque già nella formulazione “standard” non si utilizza esclusivamente lo spazio di Hilbert puro), è il fatto che il punto di partenza è sempre quello di sostenere che la

---

*Time in Rigged Hilbert Space Quantum Mechanics*, 2002, <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000814/>. Oppure Bohm A., Kaldass H., Patuleanu P., *Hilbert space or Gelfand triplets*, 1997, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9712038>.

<sup>55</sup> Sono i teoremi di Gleason, di Stone–von Neumann e di Hegerfeldt. Si rimanda a Bohm A., *Time Asymmetric Quantum Physics*, 1999, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9902085>, pp. 35 e seguenti.

<sup>56</sup> Per approfondimenti del tema si rimanda a Bohm A., *Time Asymmetric Quantum Physics*, op. cit., Bohm A., Kaldass H., Patuleanu P., *Hilbert Space or Gelfand Triplet – Time Symmetric or Time Asymmetric Quantum Mechanics*, op. cit., Bohm A., Kaldass H., *Rigged Hilbert Space Resonances and Time Asymmetric Quantum Mechanics*, 1999, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9909081>, Bohm A., Harshman N. L., *Quantum Theory in the Rigged Hilbert Space – Irreversibility from Causality*, 1998, <http://www.arxiv.org/abs/quant-ph?papernum=9805063>.

<sup>57</sup> Prigogine I., *La fine delle certezze*, op. cit., p. 132.

<sup>58</sup> Dirac P.A.M., *The Principles of Quantum Mechanics*, Clarendon Press, Oxford, 1930.



meccanica quantistica è in sé temporalmente simmetrica. Arno Bohm scrive perentoriamente, all'inizio di un suo articolo:<sup>59</sup>

Standard quantum mechanics in Hilbert space  $H$  is a time symmetric theory with a time symmetric dynamical (differential) equation and time symmetric boundary conditions. This is in contrast to many time asymmetric phenomena observed in classical and also in quantum physics.

E' proprio questa certezza iniziale che si vuole adesso mettere in discussione, tentando di mostrare come la meccanica quantistica non sia simmetrica per inversione temporale, neanche nella sua parte "deterministica", ovvero sia l'equazione di Schroedinger.

### 2.3.2 – Wigner e l'operatore di inversione temporale

La posizione di Prigogine a riguardo della simmetria temporale della parte deterministica della meccanica quantistica trova le proprie radici nella tesi esposta in un articolo del 1932 dal fisico Eugene Wigner.<sup>60</sup>

Questo articolo è stato probabilmente il primo che ha trattato in maniera sistematica la questione della simmetria all'interno della teoria quantistica, con particolare enfasi sull'aspetto della simmetria temporale. L'idea di Wigner è stata poi considerata quella "ortodossa".<sup>61</sup>

In realtà, con l'articolo di Wigner, siamo in presenza dell'introduzione, nel dibattito scientifico, di un nuovo operatore di inversione temporale, di una

---

<sup>59</sup> Bohm A., *Time Asymmetric Quantum Physics*, op. cit., p. 2.

<sup>60</sup> Wigner E., *Über die Operation der Zeitumkehr in der Quantenmechanik*, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen – Mathematisch Physikalische Klasse, 1932.

<sup>61</sup> Ad esempio, è quella che si incontra in Messiah A., *Quantum Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, 1958 (ristampa Dover Edition 1999), un testo classico di meccanica quantistica utilizzato nei corsi di fisica teorica delle università.

nuova idea, totalmente differente dalla definizione utilizzata in fisica fino a quel momento.

In questo breve paragrafo verranno espone le idee di Wigner sul tema dell'inversione temporale e si proporrà una visione alternativa, che consenta di parlare di inversione temporale nei termini usuali, e cioè utilizzando il cambiamento di segno del parametro  $t$ . L'analisi vera e propria della asimmetria dell'equazione di Schroedinger e del corpo di equazioni della meccanica quantistica verrà affrontata nel prossimo paragrafo.

Nell'articolo del 1932, Wigner sostiene che il giusto operatore che può rappresentare l'inversione temporale, cioè un operatore  $\theta$  che, agendo su  $\Psi$ , porti ad una funzione  $\theta\Psi$  che è la funzione iniziale temporalmente invertita, debba essere l'operatore di coniugazione complessa.

Nel capitolo dedicato all'inversione temporale presente nel libro del 1959,<sup>62</sup> Wigner riprende il tema, proponendo un approccio "classico", ovvero sostenendo che la trasformazione  $t \rightarrow -t$  "trasforma uno stato  $\Psi$  nello stato  $\theta\Psi$  in cui tutte le velocità (incluso lo spin dell'elettrone) hanno direzioni opposte rispetto a quelle in  $\Psi$ . (Da qui, "inversione della direzione del moto" è forse un'espressione più felice, sebbene più lunga, di "inversione temporale")."<sup>63</sup>

Dunque l'inversione temporale deve invertire le velocità, esattamente come avviene per la meccanica classica: i ragionamenti di Wigner partono proprio da questo presupposto, da una analogia con le teorie classiche precedenti. Vedremo nel prossimo paragrafo che l'espressione del momento della meccanica quantistica standard fa sorgere alcuni problemi a riguardo.

Cercando l'operatore  $\theta$  in questione, Wigner deve vedere prima di tutto se sarà lineare o antilineare. Questa alternativa nasce da una serie di riflessioni sulle proprietà degli operatori simmetrici, che non è il caso di riportare qui.<sup>64</sup> E' bene però notare che Wigner, per questo, utilizza un'altra ipotesi, e cioè proprio quella della simmetria dell'operatore di inversione temporale, fatto che,

---

<sup>62</sup> Wigner E., *Group Theory*, Academic Press, New York, 1959, pp. 325 e seguenti.

<sup>63</sup> Wigner E., *Group Theory*, op. cit., p. 325 (trad. it. mia).

<sup>64</sup> Si veda l'appendice al capitolo 20 del libro *Group Theory*, op. cit.

inoltre, permette che le probabilità di transizione tra due stati rimangano invariate prima e dopo l'applicazione dell'operatore di inversione temporale.

Per arrivare alla conclusione che l'operatore cercato è antilineare, Wigner propone la seguente argomentazione. Se si fa evolvere uno stato quantistico per un tempo  $t$ , si opera poi il "time reversal", si fa di nuovo evolvere il sistema per un tempo  $t$ , e poi si inverte nuovamente il tempo, allora il sistema deve ritrovarsi nello stesso stato iniziale. In pratica, questo significa che l'insieme delle quattro operazioni appena elencate, prese nel giusto ordine, costituisce un operatore identità.

Ipotizzando che l'operatore  $\theta$  sia lineare, Wigner nota che questo procedimento porta ad una contraddizione.<sup>65</sup>

In seguito, tramite un altro ragionamento che coinvolge una riflessione sulla dipendenza temporale di alcune quantità fisiche - e che lo porta a concludere che le tipologie di operatori che prenderà in considerazione saranno due: quelle su cui l'operazione di inversione temporale non avrà effetto (nessuna esplicita dipendenza temporale o presenza di  $t$  ma elevato ad una potenza pari), come le coordinate di posizione o l'energia cinetica, e quelle che hanno una dipendenza lineare dal tempo, e dunque se il loro valore è  $\lambda$  in un certo momento, diventa  $-\lambda$  se si inverte il tempo<sup>66</sup> - riuscirà a dimostrare che l'operatore antilineare che stava cercando è proprio quello di coniugazione complessa.<sup>67</sup>

---

<sup>65</sup> I passaggi proposti da Wigner appena visti sono equivalenti a chiedere che operare un'evoluzione temporale per un tempo  $t$  e poi attuare un'inversione temporale sia equivalente a operare un'evoluzione temporale per un tempo  $-t$  e poi attuare un'inversione temporale. Allora supponendo  $\theta$  lineare ed applicandolo ad uno stato  $\Phi_o = \sum a_s \Psi_s$  espresso come una sovrapposizione di stati, si ha:  $\theta\Phi_o = \sum a_s \theta\Psi_s$  e facendo evolvere questo stato per un tempo  $t$  (ovverosia applicando l'operatore di evoluzione temporale) si ottiene  $\theta\Phi_t = \sum a_s e^{-iE_s t/\hbar} \theta\Psi_s$  (chiamiamo questo stato A). Se adesso si opera un'inversione temporale e si scrive lo stato  $\Phi_{-t} = \sum a_s e^{iE_s t/\hbar} \Psi_s$  e poi si applica l'operatore  $\theta$ , si ottiene  $\theta\Phi_{-t} = \sum a_s e^{iE_s t/\hbar} \theta\Psi_s$  (chiamiamo questo stato B). Dato che A è diverso da B,  $\theta$  deve essere antilineare e funzionare nel seguente modo:  $\theta\Phi_o = \theta\sum a_s \Psi_s = \sum a_s^* \theta\Psi_s$ .

<sup>66</sup> Wigner E., *Group Theory*, op. cit., pp. 330-331. Da notare che Wigner è consapevole del fatto che esistano anche operatori che non appartengono a nessuna delle due classi, ma nella trattazione non vengono prese in considerazione.

<sup>67</sup> Un'altra cosa molto importante da notare è che Wigner, dopo aver concluso che l'operatore  $\theta$  che stava cercando è quello di coniugazione complessa, afferma che questo risultato è valido solo nel momento in cui ci si mette nella rappresentazione  $x$  dell'operatore di posizione, e dunque  $(\hbar/i)\partial/\partial x$  è la forma dell'operatore momento. Nel caso in cui ci si mettesse nelle

E' questo uno dei ragionamenti che ha significato il "successo" della visione di Wigner anche per gli anni a seguire, anche se forse non il più importante. Probabilmente più incisive sono le riflessioni sul comportamento del momento, che saranno trattate poco più avanti. Adesso si vuole criticare l'argomentazione appena esposta, arrivando alla conclusione che non c'è bisogno di introdurre un operatore antilineare.

In effetti, se applicate ad una funzione d'onda generica, le quattro operazioni precedentemente esposte portano davvero il sistema nel suo stato iniziale. Il problema, però, consiste nell'interpretazione delle due operazioni di "time reversal" che sono presenti.

Invertire il tempo in un "momento" ben preciso, in un istante puntuale, non ha senso. L'inversione del tempo acquista un significato ed è passibile di interpretazioni e riflessioni nel momento in cui viene "vissuta" da un'evoluzione temporale. Fermare l'evoluzione del sistema e poi, in quell'istante, fare un *time reversal* è un'operazione "lasciata in sospeso".

Come si è già accennato precedentemente, l'evoluzione di uno stato quantistico è descritta dall'operatore unitario di evoluzione temporale  $U(t)=exp(-iHt)$ .  $U(t)$ , applicato alla funzione di stato  $\Psi$ , porta all'evoluzione per un tempo  $t$  dello stato stesso, finendo nello stato  $U\Psi$ . E' su questo operatore che bisogna lavorare se si vuole parlare di inversione temporale. E non solo definendo  $U(-t)$ , cioè l'evoluzione temporale per un tempo invertito  $-t$ , ma soprattutto applicando questo operatore alla funzione d'onda, dunque esaminando l'evoluzione invertita.

Quindi si può pensare che le quattro operazioni descritte da Wigner possano essere sostituite dalle seguenti: si parte da uno stato iniziale  $\Psi$ , lo si fa evolvere per un tempo  $t$ . A questo stato  $\Psi(t)$  si applica ora l'operatore di evoluzione temporale temporalmente invertito, cioè  $U(-t)$ , e si fa dunque evolvere il

---

"coordinate momento", cioè  $p$  per il momento e  $(i\hbar)\partial/\partial p$  per la posizione, l'operatore di inversione temporale non sarebbe più la semplice coniugazione complessa, ma ci vorrebbe anche il cambiamento da  $p$  a  $-p$ . Cfr. Wigner E., *Group Theory*, op. cit., p. 331.

sistema per  $-t$ . E' adesso che il sistema si ritrova nello stato iniziale, senza bisogno di invertire nuovamente il tempo in un istante.

L'operatore di inversione temporale può essere dunque visto come quell'operatore che semplicemente porta  $U(t)$  in  $U(-t)$ , dunque il solito cambiamento da  $t$  a  $-t$ , da sempre usato in fisica per riflettere sulle questioni temporali. Sarebbe dunque un operatore lineare.

Non c'è dunque bisogno di scomodare la coniugazione complessa, anche se, è evidente, applicare questa operazione all'operatore di evoluzione temporale è equivalente ad applicare il cambiamento da  $t$  a  $-t$ . Concettualmente, però, non è giustificata.

Le giustificazioni che hanno accompagnato questa nuova definizione di inversione temporale sono state accettate e ancora oggi vengono considerate come logicamente corrette, a discapito della vecchia definizione di inversione temporale che, per la meccanica quantistica, risulta inadeguata.

E' probabile che l'operazione di definire un nuovo operatore di inversione temporale sia stata *ad hoc*, ovverosia un modo per *far risultare* la meccanica quantistica simmetrica, e che non abbia alcuna giustificazione logica.

Nel prossimo paragrafo verrà proposta una "critica" relativa a questo modo di vedere l'inversione temporale applicato all'equazione di Schroedinger. Si partirà proprio da ciò che è stato appena esposto a riguardo dell'operatore di inversione temporale, dunque tenendo ben presente il discorso sulla posizione di Wigner fatto poco sopra. La "critica" si svilupperà su due piani distinti. Proprio in conseguenza del fatto che nella meccanica quantistica "standard" attualmente in auge i processi fondamentali sono due (il processo di evoluzione deterministica della funzione d'onda regolato dall'equazione di Schroedinger e il processo del collasso della funzione d'onda in seguito ad una misurazione), da una parte si proverà a mettere in dubbio l'assunzione che l'equazione di Schroedinger sia simmetrica per inversione temporale, tentando di mostrare come la logica che sta dietro le motivazioni dei sostenitori di questa posizione sia perlomeno discutibile. Verrà inoltre discussa la posizione di coloro che,

invece, credono nella irreversibilità dell'equazione di Schroedinger, mostrando come anche nelle loro argomentazioni è di fatto presente un errore concettuale che porta all'apertura di problematiche relative alla rappresentazione dell'operatore momento.

Dall'altra parte ci si chiederà se davvero il collasso della funzione d'onda sia dovuto esclusivamente alla presenza di un osservatore che compie una misurazione o se non sia una caratteristica irreversibile fondamentale della natura che avviene anche in assenza di osservatori coscienti, grazie ad una continua ed inevitabile interazione dei sistemi con l'ambiente circostante. In altre parole svilupperemo una riflessione sul concetto di "decoerenza".

## **2.4 - "Il problema del tempo" e la asimmetria temporale della meccanica quantistica<sup>68</sup>**

Un'idea condivisa da molti fisici e filosofi della fisica, tra cui, come abbiamo visto nel paragrafo precedente, anche Prigogine, è che l'equazione di Schroedinger sia simmetrica per inversione temporale.<sup>69</sup> In questa sede, ci occuperemo esclusivamente di sistemi quantistici senza interazioni (nel caso più semplice, una particella libera), dunque la nostra equazione fondamentale non presenterà un termine descrittivo di un potenziale. Questo semplifica la notazione e non cambia le conclusioni nel caso in cui il potenziale eventualmente presente fosse indipendente dal tempo. Nel caso invece in cui il potenziale avesse una dipendenza temporale, l'analisi dovrebbe essere specifica del singolo caso, a seconda dell'effettiva forma delle interazioni.

---

<sup>68</sup> Una trattazione più completa a livello matematico di ciò che è discusso in questo paragrafo è presente nell'Appendice a pagina 160.

<sup>69</sup> Come abbiamo visto, questo è l'assunto di partenza di molti lavori sulla questione temporale in meccanica quantistica. Tra i tanti, si segnala, per il loro interesse: Bohm A., *Time Asymmetric Quantum Physics*, op. cit., Bacciagaluppi G., *Probability, Arrow of Time and Decoherence*, 2006, <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00003157>, in corso di pubblicazione su *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*.

Per iniziare la nostra analisi, è importante introdurre la distinzione tra i due diversi tipi di trasformazioni temporali che verranno utilizzati: l'operatore  $T$ , che descrive il passaggio da  $t$  a  $-t$  (e che può essere visto come quel cambiamento che porta dall'operatore di evoluzione temporale  $U(t)$  all'operatore "inverso"  $U(-t)$ ), e l'operatore  $T^*$ , che, oltre a fare cambiare di segno il parametro  $t$ , attua anche la coniugazione complessa, e che, in alcuni casi, viene chiamato "operatore di Wigner"<sup>70</sup>, proprio per sottolineare il fatto che il suo utilizzo (in un certo senso, la sua "creazione") è stato introdotto dal fisico tedesco. Come detto prima, è criticabile il modo in cui Wigner ha argomentato l'introduzione di questo operatore, soprattutto perché egli ha interpretato in una maniera discutibile il processo di inversione temporale. In realtà, il sostegno a questo tipo di operatore è andato aumentando nel tempo per altri motivi, altrettanto criticabili, che hanno portato alla "logica" conclusione che la meccanica quantistica dovesse essere per forza "temporalmente simmetrica".

Infatti, viene solitamente dimostrato che l'equazione di Schroedinger rimane invariata in conseguenza della trasformazione  $T^*$ . Questo è vero.

Si consideri l'equazione di Schroedinger per una particella libera in una dimensione:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{i\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \quad (1)$$

Operando l'inversione temporale, si ottiene:

$$-\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{i\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \quad (2)$$

---

<sup>70</sup> Così viene chiamato, ad esempio, dal filosofo Craig Callender nell'articolo *Is Time Handed in a Quantum World?*, 2000, <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000612>.

E' evidente che applicando, a questo punto, l'operazione di coniugazione complessa, si ritorna all'espressione (1).

Il problema è capire se è concettualmente corretto utilizzare la trasformazione  $T^*$  al posto della trasformazione  $T$ , che solitamente, al di fuori della fisica quantistica, viene considerata la vera e propria trasformazione di inversione temporale.

Nella letteratura scientifica relativa a questi problemi, l'obiezione più comunemente avanzata all'uso di  $T$  è quella secondo la quale in meccanica quantistica questa trasformazione non porterebbe al valore corretto dell'energia e del momento, mentre  $T^*$  lo farebbe.

Si pensi, come prima, ad una particella libera con momento  $p$ . Questa possiede un'energia cinetica data dall'espressione  $p^2/2m$ . Si sostiene, solitamente, che invertendo temporalmente il sistema in questione, l'energia dello stesso deve rimanere invariata<sup>71</sup>, mentre il momento deve cambiare di segno.<sup>72</sup> Si comprende, dunque, che per affrontare il problema sarà senz'altro necessario analizzare il comportamento non solo dell'equazione di Schroedinger, ma anche delle leggi riguardanti l'energia e il momento.

Come abbiamo visto, l'equazione di Schroedinger rimane invariata in seguito all'applicazione di  $T^*$ , ma cambia nella sua forma antisimmetrica (compare un segno meno) nel momento in cui si opera solamente con  $T$  o solamente con l'operazione di coniugazione complessa.

Si noti inoltre che la classe delle funzioni d'onda della meccanica quantistica (cioè quelle che soddisfano l'equazione di Schroedinger, e che d'ora in poi, per brevità, chiameremo classe  $MQ$ ) è equivalente alla classe di funzioni della meccanica quantistica invertita temporalmente e coniugata (classe  $T^*(MQ)$ ).<sup>73</sup>

In maniera equivalente la classe delle funzioni della meccanica quantistica

---

<sup>71</sup> Ripetiamo che siamo in un caso che non prevede un potenziale. Nel momento in cui fosse presente un potenziale dipendente dal tempo il discorso dovrebbe tener conto della particolare dipendenza temporale.

<sup>72</sup> Messiah A., *Quantum Mechanics*, op. cit., p. 667.

<sup>73</sup> Queste abbreviazioni per denotare le classi di funzioni sono quelle usate da Andrew Holster nel suo articolo *The Quantum Mechanical Time Reversal Operator*, 2003, <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00001449/>, testo di partenza per la nostra analisi e critica.



invertita temporalmente (classe  $T(MQ)$ ) coincide con la classe di funzioni della meccanica quantistica coniugata (classe  $MQ^*$ ).

La differenza tra  $\Psi$  e  $T\Psi$  (o tra  $T\Psi^*$  e  $\Psi^*$ ) è semplicemente una differenza di “direzione di rotazione” della fase immaginaria dell’onda. Quest’ultima non si può misurare, essendo misurabili solo le direzioni relative delle rotazioni complesse di particelle o sistemi separati, dunque l’importante è non mischiare funzioni appartenenti alle due diverse classi, pena il calcolo di effetti di interferenza sbagliati. Decidere, però, di utilizzare sempre la meccanica quantistica temporalmente invertita invece di quella “ordinaria” può essere vista come una scelta del tutto convenzionale.<sup>74</sup>

Entriamo dunque nello specifico del problema e proviamo a vedere come cambiano le leggi deterministiche della meccanica quantistica nel momento in cui applichiamo la trasformazione  $T$ . Come abbiamo detto, è importante considerare, oltre all’equazione di Schroedinger, anche le altre leggi che caratterizzano la meccanica quantistica, *in primis* l’equazione dell’energia e l’equazione del momento. Questa richiesta è giustificata anche dal fatto che queste equazioni danno un “contenuto empirico” alla meccanica quantistica, non sono cioè delle “verità logiche”,<sup>75</sup> definizioni puramente matematiche di operatori, che dunque dovrebbero essere valide per qualunque funzione d’onda, ma fanno parte del contenuto più prettamente fisico della teoria: sono leggi “empiriche”, che devono accompagnarsi all’equazione di Schroedinger. Dunque una corretta analisi della questione temporale non potrà che tener conto di tutte le equazioni in gioco, e non solo di quella “fondamentale” di Schroedinger.

---

<sup>74</sup> “If Schroedinger had chosen to use  $^*(QM)$  instead of  $QM$ , then we would simply have to “reverse” all the usual deterministic laws, by taking the appropriate images under  $*$  of the equations for energy, momentum, etc. In this sense, at least,  $^*(QM)$  can be used to represent a perfectly sensible theory, isomorphic to  $QM$ .” Cit. da Holster A., *The Quantum Mechanical Time Reversal Operator*, op. cit., p.5.

<sup>75</sup> Per approfondire il discorso sulla differenza tra verità logiche e “equazioni empiriche” si veda sempre Holster A., *The Quantum Mechanical Time Reversal Operator*, op. cit., pp. 12 e seguenti.

Si ricordi che in meccanica quantistica l'equazione dell'energia ha la seguente forma:

$$H\Psi = i\hbar \frac{\partial\Psi}{\partial t} \quad (3)$$

In cui  $H$  rappresenta l'operatore hamiltoniano, lo stesso che compare nell'equazione di Schroedinger.

Il momento è espresso dalla seguente equazione operatoriale:

$$P\Psi = -i\hbar \frac{\partial\Psi}{\partial x} \quad (4)$$

E' chiaro che, insieme con la relazione energia-momento data da  $H\Psi = \frac{P^2}{2m}\Psi$ ,

l'equazione (3) porta all'espressione  $H = -\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$  che sostituita nella (3)

porta all'equazione di Schroedinger.

Applicando alla (3) e alla (4) l'operatore di inversione temporale  $T$ , otteniamo le equazioni temporalmente invertite:

$$\tilde{H}\Psi = -i\hbar \frac{\partial\Psi}{\partial t} \quad (5)$$

$$\tilde{P}\Psi = -i\hbar \frac{\partial\Psi}{\partial x} \quad (6)$$

E' fondamentale notare che in queste espressioni sono presenti operatori differenti da quelli delle prime equazioni (per questo sono stati contrassegnati dal simbolo tilde).

Abbiamo adesso in mano tutti gli elementi formali per capire se le posizioni dei sostenitori della scelta di  $T^*$  come inversione temporale possano essere criticate.

Come abbiamo accennato, una delle argomentazioni più frequenti a sostegno di  $T^*$  è quella secondo la quale lo spettro dell'energia di un sistema quantistico deve rimanere lo stesso dopo aver compiuto un'inversione temporale. Continuiamo a considerare una particella libera, per semplificare il formalismo (il discorso che si sta facendo può essere esteso a sistemi più complessi).

La particella libera è descritta da una funzione d'onda  $\Psi = Ae^{i(px-Et)}$  che,<sup>76</sup> dopo l'inversione temporale, si può identificare con  $T\Psi = Ae^{i(px+Et)}$ . Sostenendo che l'energia della particella "temporalmente invertita" debba essere la stessa della particella iniziale, non si dovrebbe accettare  $T$  come operatore di inversione temporale dal momento che si avrebbe:

$$H\Psi = i\hbar \frac{\partial(\Psi)}{\partial t} = E\Psi; \quad H(T\Psi) = i\hbar \frac{\partial(T\Psi)}{\partial t} = -E(T\Psi) \quad (7)$$

e dunque lo spettro dell'energia cambierebbe di segno rispetto a quello originario.

In effetti è solo nel momento in cui si operasse anche la coniugazione complessa che si potrebbe ristabilire l'accordo tra i segni e quindi avere i giusti valori dell'energia.

Questa giustificazione della scelta dell'utilizzo di  $T^*$  al posto di  $T$  sembra convincente, ma in realtà si appoggia su un terreno abbastanza franoso.

In primo luogo, è da notare il fatto, essenziale, che, non appena si applica l'operatore  $T$  di inversione temporale si "esce" dalla meccanica quantistica ordinaria, e si "entra" in quella temporalmente invertita, caratterizzata dal fatto

---

<sup>76</sup> Questa è l'espressione di un'onda piana: De Broglie propose che ad una particella materiale di momento lineare  $p$  e energia  $E$  venisse associata proprio un'onda di questo tipo (in questo caso, per semplificare di un po' la notazione, si è scelto di porre  $\hbar = 1$ ). Generalmente si considerano "pacchetti di onde piane" piuttosto che onde piane singole, ma per ciò che stiamo trattando questo non ha molta importanza.

che la nuova equazione dell'energia è la (5), non più la (3). La nuova funzione d'onda,  $T\Psi$ , non è una funzione d'onda che appartiene alla meccanica quantistica ordinaria, perché non soddisfa l'equazione di Schroedinger, dunque non ci si può aspettare che possa “funzionare” nell'espressione ordinaria (3) dell'energia.

E' dunque corretto sostenere che il ragionamento adottato dai sostenitori di  $T^*$  è viziato da una circolarità che nasconde l'errore di fondo: esso vale assumendo a priori che la meccanica quantistica sia reversibile, cioè che una qualunque  $T\Psi$  sia anch'essa una funzione della meccanica quantistica.

Ci sono, però, delle riflessioni in più da fare, essendo presenti, anche all'interno delle discussioni dei sostenitori dell'irreversibilità della meccanica quantistica, degli errori concettuali.

In primo luogo, si può subito segnalare che, andando ancora più a monte nell'analisi delle ipotesi che reggono i ragionamenti appena analizzati, ci si potrebbe chiedere se è così naturale pensare che, invertendo il tempo, l'energia di una particella libera debba per forza rimanere la stessa. Questa è un'ipotesi di lavoro legittima, ma in un certo modo sembra presupporre che esista una simmetria temporale di fondo nella Natura, proprio ciò che si vuole provare a dimostrare.

Un problema più complesso e forse più interessante riguarda invece la questione della rappresentazione dell'operatore momento e della sua interpretazione. In questo caso ci troviamo davanti ad alcune argomentazioni che sembrano fare confusione tra i diversi modi di operare un'inversione temporale.

Il fatto interessante, come detto, è che queste argomentazioni sono portate avanti non solo dai sostenitori della simmetria temporale della meccanica quantistica, ma anche dai loro oppositori.<sup>77</sup>

---

<sup>77</sup> Infatti compaiono proprio nell'articolo di Holster, *The Quantum Mechanical Time Reversal Operator*, op. cit., pp. 7 e seguenti.

Come al solito si parte da un'ipotesi che, come quella relativa alla questione dell'energia, può essere vista come *ad hoc*, ma che intuitivamente è ragionevole ed è una buona base di partenza per iniziare a ragionare: dopo l'inversione temporale il momento di una particella deve invertire il proprio segno. Questo significa sostanzialmente che la particella deve percorrere "all'indietro" il percorso che ha compiuto fino a quel punto.

Questa ipotesi nasce non solo dall'intuizione, ma dalla stessa applicazione dell'inversione temporale alle traiettorie della fisica classica. Questo "allargamento" alla meccanica quantistica può risultare problematico, dato il carattere "effimero" della traiettoria quantistica, ma su questo torneremo più avanti.

Nelle equazioni della dinamica classica, invertire la direzione temporale significava agire direttamente sull'espressione della velocità, data dalla derivata prima dello spazio rispetto al tempo, e questo portava alla comparsa di un segno meno davanti all'espressione del momento.

Si faccia bene attenzione, però, a come è espresso il momento nella meccanica quantistica standard: esso è un operatore di derivazione *spaziale*. Allora risulta chiaro il motivo dei sostenitori di  $T^*$ : è solo applicando la coniugazione complessa che il momento "temporalmente invertito" può cambiare di segno (data la presenza dell'unità immaginaria). Il puro operatore  $T$  non opera alcun cambiamento sul momento.

E infatti questa è un'altra delle obiezioni mosse a  $T$  nell'ambiente scientifico.

Non sembra, però, che questo problema venga risolto da coloro che credono nell'irreversibilità della meccanica quantistica, anzi, sembra che ci siano alcuni errori concettuali. Andrew Holster, uno dei grandi critici della visione ortodossa della reversibilità temporale della meccanica quantistica, riconosce che applicando l'operatore  $T$  all'espressione del momento, questa non cambia di segno. Questo lo induce però a sostenere che "dunque, per ottenere il risultato corretto, dobbiamo definire l'operatore momento  $P^*$  (cioè  $i\hbar\partial\Psi/\partial x$ ,

n.d.a.), per la teoria temporalmente invertita, invece di mantenere  $P$ ".<sup>78</sup> La giustificazione di questa affermazione non è soltanto quella di "ottenere il risultato corretto", ma anche quella secondo cui la funzione d'onda descritta da  $\Psi^*$  ha lo stesso momento di quella descritta da  $\Psi$  nella meccanica quantistica, e inserendo  $\Psi^*$  nell'equazione del momento si ottiene il risultato "corretto".

Questo è poco convincente. Sembrerebbe che Holster utilizzi, per l'espressione del momento, lo stesso modo di procedere che molti usano per l'espressione dell'energia e che lui critica fortemente. Anche in quel caso, come abbiamo visto, chi vuole mostrare che la meccanica quantistica è reversibile si "costruisce" un operatore di inversione temporale *ad hoc*, al fine di ottenere il risultato "corretto", cioè un risultato che mostri la reversibilità della teoria. Holster critica questo, ma subito dopo utilizza semplicemente l'operatore  $*$  di coniugazione complessa per ottenere l'inversione del momento, risultato che ci si aspetta dopo un'inversione temporale.

Alla luce di tutto ciò, si aprono nuovi scenari. Abbiamo visto come l'equazione di Schroedinger e l'espressione dell'energia siano asimmetriche per inversione temporale, e come i ragionamenti di coloro che invece ritengono che si debba arrivare alla simmetria siano sostanzialmente scorretti. Eppure adesso siamo davanti ad un ostacolo, perché l'espressione del momento si comporta in maniera piuttosto anomala.

In realtà si può pensare che l'ipotesi secondo cui il momento deve cambiare di segno dopo l'inversione temporale sia non giustificabile. Essa, come detto, trova il proprio punto d'appoggio nella fisica classica, con le sue idee di traiettoria. Ma in meccanica quantistica il concetto di traiettoria perde di significato, a causa delle relazioni di indeterminazione di Heisenberg. Non esiste una "traiettoria quantistica". Risulta quindi difficile pensare ad un punto che ripercorre all'indietro una linea la cui esistenza non è ammessa dalla stessa teoria. Ricordiamo ancora una volta che stiamo parlando della fisica quantistica standard, che è l'interpretazione più in voga della meccanica

---

<sup>78</sup> Holster A., *The Quantum Mechanical Time Reversal Operator*, op. cit. p. 7 (trad. it. mia).

quantistica. In effetti esistono parecchie altre interpretazioni alcune delle quali tendono ad essere maggiormente “realiste”, conferendo all’esistenza di una particella fisica che “si muove” uno status ontologico maggiore, anche a prescindere dai processi di misurazione.<sup>79</sup>

Comunque si può sostenere che, nel momento in cui le relazioni di indeterminazione vietano di pensare alla particella in un punto ben preciso dello spazio con una velocità ben definita, sostenere acriticamente che il momento debba cambiare di segno a seguito dell’inversione temporale appare un’operazione che può presentare dei problemi.

Questa conclusione può avere dei risvolti interessanti. Il motivo principale per il quale il grande fisico Ludwig Boltzmann concluse che la questione della crescita dell’entropia fosse esclusivamente di carattere probabilistico era legato a quello che nella letteratura scientifica viene chiamato “paradosso di Loschmidt”.<sup>80</sup> Secondo questo fisico, amico di Boltzmann, sarebbe stato impossibile descrivere processi irreversibili utilizzando equazioni della dinamica simmetriche per inversione temporale, e, dunque, conseguenza di ciò era che il teorema H doveva essere sbagliato.<sup>81</sup> Egli sostenne che, nel momento in cui si fosse riusciti a invertire tutte le velocità delle molecole di un gas, la situazione finale sarebbe stata caratterizzata da un’entropia più bassa di quella iniziale. Eppure, a giudicare dal teorema H, nel momento in cui si fosse passati da  $t$  a  $-t$ , il rapporto  $dH/dt$  sarebbe stato ancora minore di zero.

Il fatto che l’entropia di un sistema isolato cresca sarebbe dunque un fatto probabilistico, non descriverebbe nulla di “intrinseco” alla natura stessa delle cose: in una frase, non si può descrivere un comportamento macroscopico irreversibile utilizzando leggi microscopiche reversibili.

---

<sup>79</sup> Si veda il capitolo seguente sulle interpretazioni della meccanica quantistica.

<sup>80</sup> Loschmidt J., *Über den Zustand des Wärmegleichgewichtes eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft, 1. Teil*. Sitzungsber. Kais. Akad. Wiss. Wien, Math. Naturwiss. Classe 73, 1876, pp. 128–142.

<sup>81</sup> Secondo il teorema H, in un gas descritto da una funzione di distribuzione delle velocità  $f(v, t)$ , l’espressione  $H = \iiint d^3v f(v, t) \ln f(v, t)$  è decrescente nel tempo, cioè  $dH/dt \leq 0$ .

Il paradosso di Loschmidt utilizza alcune ipotesi che sono particolarmente interessanti per il problema che si sta trattando e che è bene vedere in dettaglio. Le considerazioni di Loschmidt partono dall'analisi del teorema H di Boltzmann. Questi aveva trovato un'espressione dipendente dalla funzione di distribuzione delle velocità delle particelle di un insieme statistico la cui derivata era sempre minore o, al più, uguale a zero. Identificando con  $-H$  l'espressione dell'entropia, si poteva ritenere di aver trovato un'espressione che mostrasse un'entropia sempre crescente, ciò che affermava il secondo principio della termodinamica.<sup>82</sup>

Loschmidt notò che invertendo la direzione temporale si otteneva ancora la stessa decrescita di H, in contraddizione con l'idea che "ritornando sui propri passi" il sistema sarebbe dovuto arrivare ad una situazione di maggior ordine, dunque di minore entropia.

E' fondamentale osservare come, per Loschmidt, l'inversione temporale, cioè il passaggio da  $t$  a  $-t$ , non portasse all'inversione delle velocità: infatti non solo  $t$  diventa  $-t$ , ma anche  $dx$  diventa  $-dx$  e dunque il calcolo della derivata non cambia.<sup>83</sup> Questo fatto è di estremo interesse, perché in contraddizione con gli assunti usuali secondo cui l'inversione temporale porta necessariamente all'inversione delle velocità.<sup>84</sup> Se si applicasse questo assunto al ragionamento di Loschmidt il "paradosso" scomparirebbe, portando ad una decrescita dell'entropia.

L'idea che, insieme al cambiamento di segno di  $t$  si debba operare il cambiamento di segno di  $dx$ , cioè del vettore spostamento, è discutibile.

In realtà, come detto, in gran parte della letteratura riguardante argomenti di inversione temporale, si crede che l'inversione del tempo porti ad un'inversione della velocità. Pensare che si debba aggiungere automaticamente l'inversione del vettore spostamento spaziale equivale a

---

<sup>82</sup> Si veda la nota 81.

<sup>83</sup> Si veda Chaliasos E., *The Loschmidt paradox on Boltzmann's H theorem: a resolution*, 2005, <http://arxiv.org/abs/physics/0511090>.

<sup>84</sup> Wigner E., *Group Theory*, op. cit., p. 225.



produrre da sé un effetto dell'inversione temporale che non è scontato. Vuol dire non solo assumere che l'inversione temporale invertirà la direzione del moto del sistema, ma soprattutto operare in maniera non giustificata la stessa inversione, senza "aspettare" di vedere come il cambiamento da  $t$  a  $-t$  agirà sulle equazioni in esame.

L'inversione temporale è descritta dal passaggio da  $t$  a  $-t$ . E' bene applicare esclusivamente questo cambiamento. Dopo averlo applicato, si può andare a vedere cosa rimane invariato e cosa cambia. E' naturale concludere che la velocità vettoriale rimane la stessa nel momento in cui inverte la direzione temporale e *contemporaneamente* inverte anche la direzione spaziale: facendo così, mi metto in un mondo che è del tutto equivalente al mondo "reale", in cui nulla cambia proprio perché ho cambiato i segni delle quantità in questione. Non si dovrebbe controllare cosa comporta il passaggio da  $t$  a  $-t$  in un mondo in cui si inverte a priori anche la direzione dello spostamento spaziale, ma si dovrebbe vedere cosa comporta *nel nostro mondo*.

E nel nostro mondo l'inversione delle velocità proposta dal paradosso di Loschmidt equivale *de facto* ad una inversione temporale, la velocità essendo la derivata prima della posizione rispetto al tempo.

Senza volere entrare di nuovo nella questione della conoscenza esatta delle condizioni iniziali di un sistema, pure estremamente importante, questione che potrebbe inficiare la validità di un ragionamento *à la* Loschmidt all'interno della stessa meccanica classica, ci si può chiedere se tale ragionamento potrebbe funzionare all'interno della meccanica quantistica, alla luce di quanto detto finora. Non solo ci sono delle limitazioni poste dal principio di indeterminazione, a causa delle quali il concetto di traiettoria viene a cadere, ma vi è soprattutto un'espressione del momento che fa esplodere diverse contraddizioni.

Se si vuole invertire la direzione temporale per fare "diminuire l'entropia", non necessariamente, in meccanica quantistica, per come è formulata attualmente, si invertirebbero le velocità. Questo è un dato estremamente importante e

stupefacente: l'argomentazione secondo la quale l'entropia decresce invertendo le velocità delle particelle (e dunque secondo la quale la direzione temporale della seconda legge della termodinamica è un fatto probabilistico), potrebbe non essere più valida in un contesto quantistico: se si inverte la direzione temporale i momenti resterebbero tali e quali (ricordiamoci che questo avviene nel momento in cui si utilizza la rappresentazione delle posizioni).

Questo è del tutto contro-intuitivo, eppure il formalismo attuale della meccanica quantistica descrive proprio un tale comportamento.

Di fronte a ciò si può dunque pensare la situazione in due maniere differenti. O il ragionamento di Loschmidt (e con lui tutti i tipi di ragionamenti simili) non vale per la meccanica quantistica, e dunque è impossibile sostenere che si potrebbe altrettanto legittimamente “tornare indietro” ad una situazione di bassa entropia. Questo vorrebbe dire che una sorta di irreversibilità intrinseca della natura potrebbe davvero esserci. Oppure si potrebbe sostenere che l'espressione stessa del momento nella fisica quantistica non sia corretta. Dopotutto è abbastanza strano che una velocità (il momento, alla fine, questo è) sia espressa in termini puramente spaziali, senza alcuna presenza temporale.

Proviamo però a pensare alla prima ipotesi. In questo caso, non avendo l'operatore di inversione temporale alcun effetto sul momento, dopo la sua applicazione non si “tornerebbe indietro” ad una situazione ordinata, ma l'entropia continuerebbe a crescere. Saremmo dunque tornati al paradosso di Loschmidt, in una sua formulazione quantistica.

Spingiamoci oltre, e supponiamo che il “paradosso” sia considerato tale esclusivamente perché si è convinti di un “ritorno” alle stesse condizioni di partenza. Eppure questa non è un'ipotesi automatica, soprattutto nell'ambito quantistico. E' solo nel momento in cui conosco perfettamente le condizioni iniziali di un sistema che posso parlare di una inversione “perfetta” a livello temporale che mi faccia ripercorrere la traiettoria precedente. Ma, come abbiamo visto, in meccanica quantistica le relazioni di indeterminazione non lasciano scampo: momento e posizione non possono essere conosciuti

contemporaneamente con precisione assoluta. Dunque un'incertezza sarà sempre presente, *e non eliminabile*, in ogni momento del processo evolutivo. Invertire il moto del sistema non lo farebbe tornare allo stato precedente, più ordinato, ma lo porterebbe comunque ad una situazione di maggiore entropia.<sup>85</sup> Lungi dall'essere un elemento di simmetria temporale, questo risultato è la manifestazione del fatto che l'entropia *cresce comunque*, e non si può abbassarla attraverso un'inversione temporale. Un'inversione temporale fisica, un "tornare nel passato" descritto da una diminuzione dell'entropia, *non è possibile*, nel momento in cui si assuma che le leggi dinamiche che descrivono i moti del sistema siano intrinsecamente indeterministiche. Invertendo l'evoluzione temporale del sistema non si avrebbe più la certezza di ritornare agli stati precedenti, e dunque si introdurrebbe nella dinamica un "elemento di disturbo" (rispetto all'evoluzione iniziale) che produrrebbe di nuovo un aumento di entropia.<sup>86</sup>

C'è un parallelismo, quindi, tra indeterminismo della meccanica quantistica (espresso soprattutto dalle teorie "*collapse*") e espressione spaziale del momento: entrambe le cose non permettono un'inversione "perfetta" degli stati fisici del sistema, non permettono di "ritornare sui propri passi".

---

<sup>85</sup> Una riflessione estremamente interessante su questo tema è stata avanzata in Elitzur A., Dolev S., Hemmo M., *Does Indeterminism Give Rise to an Intrinsic Time Arrow?*, 2001, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101088>. La posizione di questi tre fisici verrà esaminata nel prossimo capitolo a riguardo della irreversibilità temporale delle interpretazioni *collapse* della meccanica quantistica, però, in un certo senso, si può trovare un collegamento al ragionamento appena esposto nel testo. Nell'articolo in questione vengono analizzate delle situazioni di inversione temporale attraverso un calcolatore e si mostra come, nel momento in cui non si possono conoscere in maniera assolutamente esatta le condizioni iniziali di un sistema fisico, l'entropia crescerà sempre, sia nella situazione "normale", sia in quella "temporalmente invertita". "Non conoscere esattamente le condizioni iniziali" non significa solamente pensare al principio di indeterminazione quantistico, ma pensare ad un "indeterminismo intrinseco" delle leggi della dinamica, quello, ad esempio, proposto dalle teorie che prevedono il collasso della funzione d'onda. In questo modo si vuole dimostrare una certa "indipendenza" della crescita dell'entropia dalle condizioni iniziali, ovvero una crescita "intrinseca" al sistema stesso.

<sup>86</sup> Si veda la trattazione della teoria GRW nel capitolo 3 del presente lavoro.

## 2.5 - Decoerenza e asimmetria temporale

La “decoerenza” in meccanica quantistica non è un nuovo strumento “tecnico” e concettuale che si è sviluppato in seguito alla formulazione di base della teoria, ma è la conseguenza dell’applicazione rigorosa proprio dei principi primi della fisica quantistica, nel momento in cui si prenda in considerazione l’esistenza di un “ambiente circostante” ai sistemi fisici in esame.

La distruzione della coerenza, con annessa la “creazione” di proprietà classiche, era già stata studiata dai pionieri della meccanica quantistica,<sup>87</sup> e questo dimostra come gli strumenti in possesso a quell’epoca potessero essere sufficienti per impostare tale discorso. E’ naturale che poi, con il raffinamento della teoria e il miglioramento delle tecniche sperimentali, il discorso della coerenza abbia preso piede soprattutto negli ultimi trent’anni,<sup>88</sup> arrivando a delle “conferme” sperimentali non più di dieci anni fa.<sup>89</sup>

In realtà, dunque, la decoerenza non aggiunge nulla di nuovo alle basi concettuali della meccanica quantistica, ma rappresenta la sua naturale “evoluzione” verso uno studio più “completo” dei fenomeni fisici.

E’ estremamente interessante notare come la fisica abbia, nel suo sviluppo storico, allargato il proprio “luogo di studio” dei fenomeni. “Luogo” inteso proprio in senso, diciamo così, “geografico”. Nella fisica classica newtoniana, l’attenzione dello scienziato era rivolta esclusivamente al sistema sottoposto all’esperimento in questione. La modellizzazione e semplificazione delle situazioni sperimentali includevano l’isolamento del sistema, e dunque la totale

---

<sup>87</sup> Landau L., *Das Dämpfungsproblem in der Wellenmechanik*, Zeitschrift für Physikalische 45, 1927, pp. 430-441. Mott N. F., *The wave mechanics of  $\alpha$ -ray tracks*, Proceedings Royal Society 126, Londra, 1929, pp. 79-83.

<sup>88</sup> Kübler C., Zeh H. D., *Dynamics of Quantum Correlations*, Annals of Physics 76, New York, 1973, pp. 405-418. Zurek W. H., *Pointer basis of quantum apparatus: into what mixture does the wave packet collapse?*, Physical Review Letters D 24, 1981, pp. 1516-1525. Joos E., Zeh H. D., *The emergence of classical properties through interaction with the environment*, Zeitschrift für Physikalische B 59, 1985, pp. 223-243.

<sup>89</sup> Brune M., Hagley E., Dreyer J., Maitre X., Maali A., Wunderlich C., Raimond J. M., Haroche S., *Observing the Progressive Decoherence of the “Meter” in a Quantum Measurement*, Physical Review Letters 77, 1996, pp. 4887-4890.

“esclusione” di tutto ciò che “stava intorno” al sistema, osservatore incluso. Con la meccanica quantistica, la questione dell’osservatore e del suo ruolo attivo è entrata prepotentemente in scena, creando una sorta di “relazione a due”, tra sistema e osservatore stesso, inscindibile. In entrambi i casi (fisica classica e fisica quantistica) a volte venivano presi in considerazione alcuni fenomeni esterni al sistema studiato, ma venivano interpretati esclusivamente come “disturbi”.

Lo studio della decoerenza ha aggiunto ancora qualcosa: essa ha portato alla ribalta gli effetti dell’ambiente circostante, non più “trascurabili”, ma essenziali per comprendere, o per tentare di comprendere, il mondo che ci si presenta di fronte agli occhi.

E’ un cammino che verte verso una sempre maggiore *complessità relazionale*: i sistemi fisici non possono essere isolati da tutto e da tutti, pena la possibilità di errori interpretativi ed eccessive semplificazioni. Ripetiamo, perché fondamentale, che la decoerenza non è una “nuova teoria”, ma semplicemente un’applicazione “allargata” dei principi della meccanica quantistica.<sup>90</sup>

In cosa consiste dunque il fenomeno della decoerenza? Sostanzialmente esso è legato alla veloce soppressione dei termini non diagonali della matrice densità che descrive il sistema fisico in esame, in conseguenza della sua interazione con ciò che lo circonda (in generale fotoni, molecole e particelle di qualunque genere). Questa interazione del sistema con l’ambiente “seleziona” una “base preferita” (*preferred basis*), cioè un particolare insieme di stati “quasi-classici” che commutano con l’hamiltoniana che governa e descrive l’interazione sistema-ambiente. In generale, l’hamiltoniana di interazione è una funzione di quantità classiche, dunque gli stati preferiti corrisponderanno all’insieme delle proprietà classiche. E’ adesso che il fenomeno della decoerenza “cancellerà”

---

<sup>90</sup> Questo è fondamentale perché gli strumenti per arrivare ad includere l’azione dell’ambiente circostante *erano già presenti* all’interno di una teoria che era nata come molte altre teorie fisiche, e cioè trascurando l’ambiente stesso. Questo sottolinea una particolare “completezza” della meccanica quantistica, una certa “universalità”.

velocemente le sovrapposizioni tra gli stati preferiti, nel momento in cui si consideri *solamente* il sistema.<sup>91</sup>

Facciamo un brevissimo esempio, per capire ciò che accade nel formalismo della decoerenza quantistica. Come abbiamo accennato nel capitolo dedicato alla spiegazione delle caratteristiche principali della meccanica quantistica, Schroedinger aveva posto una questione concettualmente essenziale circa il carattere lineare della teoria, facendo il famoso esempio del “gatto vivo” e “gatto morto”.<sup>92</sup> Infatti, come è noto, la meccanica quantistica, da teoria “lineare” quale essa è, permette l’esistenza di stati fisici che in meccanica classica non sarebbero possibili: ad esempio, non è proibita l’esistenza di stati che sono la sovrapposizione di stati classicamente “incompatibili”.

Questo fatto porta ad uno dei più grandi problemi concettuali che la meccanica quantistica si è trovata a fronteggiare: dove sono queste sovrapposizioni di stati? Perché nel mondo ordinario, quello di tutti i giorni, non ne siamo testimoni?

Dunque uno stato fisico  $\alpha|gattovivo\rangle + \beta|gattomorto\rangle$  è uno stato contemplato dalla teoria. La regola della probabilità ci dice che ci sarà  $|\alpha|^2$  probabilità di vedere un gatto vivo e  $|\beta|^2$  probabilità di vedere un gatto morto.<sup>93</sup>

Se adesso consideriamo anche l’interazione con l’ambiente, che può anche essere semplicemente uno *scattering* di fotoni o di molecole dell’aria, o anche l’azione della gravità,<sup>94</sup> siamo in presenza di uno stato *entangled* del tipo

---

<sup>91</sup> Joos E., Zeh H. D., Giulini D., Kiefer C., Kupsch J., Stamatescu O., *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*, Springer, II Edition, 2003. Si vedano anche i seguenti articoli: Zeh H. D., *Decoherence: Basic Concepts and their Interpretation*, 2002, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9506020v3> ; Kiefer C., Joos E., *Decoherence: Concepts and Examples*, 1998, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9803052>; Zurek W., H., *Decoherence, Einselection and the Quantum Origins of the Classical*, 2001, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0105127>.

<sup>92</sup> Cfr. Schroedinger E., *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*, *Naturwissenschaften* 23, 1935, op. cit., pp. 807-812; 823-828; 844-849.

<sup>93</sup> Come al solito  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ .

<sup>94</sup> Il ruolo che la gravità gioca nella teoria della decoerenza è stato indagato in Joos E., Zeh H. D., Giulini D., Kiefer C., Kupsch J., Stamatescu O., *Decoherence and the Appearance of a*

$\alpha|gattovivo\rangle\otimes|ambiente_1\rangle+\beta|gattomorto\rangle\otimes|ambiente_2\rangle$  dove il simbolo  $\otimes$  indica il prodotto tensoriale tra due spazi di Hilbert differenti. Se proviamo a costruire la matrice densità per il gatto<sup>95</sup> si ottiene il seguente risultato:

$$\rho = \begin{pmatrix} |\alpha|^2 & \varepsilon \\ \varepsilon & |\beta|^2 \end{pmatrix}$$

con il valore di  $\varepsilon$  prossimo allo zero,<sup>96</sup> ecco perché questa matrice è sperimentalmente indistinguibile dalla matrice delle probabilità che si ottiene considerando il collasso semplice nell'interpretazione statistica di Born.

Dunque questo è il modo in cui solitamente si spiega il fatto che a noi osservatori appaia sempre un mondo “classico”, con proprietà determinate e “oggettive”.

Il postulato del collasso della funzione d'onda presente nella versione standard della teoria fornisce una risposta, dato che l'atto di misurazione produce esso stesso la cancellazione di tutti i termini della sovrapposizione tranne uno, corrispondente proprio allo stato che alla fine registriamo. Per molti questa risposta è, a livello filosofico, insoddisfacente. Sembrerebbe infatti che il mondo ci appare così com'è, cioè “stabile” nei suoi stati ordinari, solo perché siamo noi osservatori che, ogni volta che “guardiamo” ciò che ci sta attorno, permettiamo la sua “definizione classica”.

Questo porta a dei seri problemi di intersoggettività, che si è tentato di superare (o semplicemente evitare) grazie a nuove interpretazioni della meccanica quantistica.

*Classical World in Quantum Theory*, op. cit. e in Joos E., *Why do we observe a classical spacetime?*, Physical Review Letters A 116, 1986, pp. 6-8.

<sup>95</sup> Cfr. nota 49, capitolo 1. Nel presente caso la matrice densità si costruisce nel seguente modo:  $\rho = (\alpha|gvivo\rangle\otimes|amb_1\rangle + \beta|gmorto\rangle\otimes|amb_2\rangle)(\alpha\langle gvivo|\otimes\langle amb_1| + \beta\langle gmorto|\otimes\langle amb_2|)$ .

<sup>96</sup> Il valore di  $\varepsilon$  scaturisce dal fatto che si richiede solitamente che gli “stati dell'ambiente” siano *approssimativamente* ortogonali (se fossero precisamente ortogonali  $\varepsilon$  sarebbe uguale a 0), ovvero si richiede che il processo di misurazione (che non necessita necessariamente di un apparato di misurazione tipo laboratorio) permetta di discriminare gli stati del sistema (del gatto) uno dall'altro.

La meccanica quantistica standard, però, non riesce, con il semplice postulato del collasso della funzione d'onda, a spiegare chiaramente perché esso avvenga e perché le sovrapposizioni di stati improvvisamente scompaiano.

Prigogine, come già osservato, era molto critico nei confronti di tale approccio, perché troppo soggettivo: non si può pensare che il collasso della funzione d'onda sia associato sempre alla presenza di un osservatore, e che dunque l'irreversibilità del processo stesso sia da attribuire ad un semplice atto di misurazione e non sia intrinseca ad esso.

E' molto significativo il fatto che una risposta a tale problema sia arrivata dall'interno della teoria quantistica, senza l'introduzione di elementi originali esterni. Il fenomeno della decoerenza ha fornito un tentativo di spiegazione dell'emergenza del mondo classico da un mondo più fondamentale di tipo quantistico, lasciando peraltro aperta la questione del problema della misurazione,<sup>97</sup> permettendo di uscire (perlomeno parzialmente) dalla circolarità osservatore-sistema-osservatore che attanagliava la visione standard.

La decoerenza può essere utilizzata sostanzialmente in tutte le interpretazioni della meccanica quantistica, sia in quelle che utilizzano il concetto di collasso della funzione d'onda, sia in quelle che non lo usano.<sup>98</sup>

C'è però da dire che il “modello” di decoerenza appena descritto presenta dei problemi, e non tutti sono disposti ad accettarlo, dunque sarebbe sbagliato considerarlo “la risposta definitiva”. E il problema principale è quello che riguarda la “base preferita” cui si è accennato poco sopra. Non sono ancora chiari i meccanismi per i quali viene scelto un particolare insieme di stati preferiti e non un altro. Come evitare che questa scelta sia, in un certo senso, *ad hoc*, “postulata” dal teorico, esclusivamente per far tornare i conti? Le spiegazioni a riguardo di ciò sono tutte interessanti, ma spesso in conflitto tra di loro, a prova del fatto che si è ben lontani da un accordo.

---

<sup>97</sup> Ad esempio, per quanto riguarda il problema della misurazione, si vedano i seguenti articoli: Adler S., L., *Why Decoherence has not Solved the Measurement Problem. A Response to P.W. Anderson*, 2002, <http://www.arxiv.org/abs/quant-ph?papernum=0112095> e Dass T., *Measurements and Decoherence*, 2005, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0505070>.

<sup>98</sup> Si veda il capitolo 3 del presente lavoro.



Inoltre bisogna sottolineare il fatto che, mentre le sovrapposizioni degli stati scompaiono nel momento in cui si considera il sistema in esame, in realtà non sono scomparse *a livello più ampio*: la “coerenza” è mantenuta nello stato totale sistema-ambiente. Come si deve interpretare, allora, la soppressione esclusivamente locale dell’interferenza, nel momento in cui, su scala più grande, si mantiene la totale coerenza?

Queste sono le principali questioni ancora aperte, che non saranno approfondite in questa sede. Ciò che interessa adesso è la loro possibile relazione con la questione “temporale”.

Come abbiamo già detto, una caratteristica estremamente positiva della decoerenza è la possibilità di spiegare il “verificarsi” del mondo classico, cioè di risultati stabili di un processo di misurazione, non facendo partecipare l’osservatore, dunque permettendo di uscire da quella “soggettività” criticata da Prigogine. Sembrerebbe che il tentativo sia quello di proporre una fisica più “realista”, proprio quello che cercava di fare Prigogine.

L’irreversibilità intrinseca del collasso della funzione d’onda sarebbe dunque da ascrivere alla naturale ed inevitabile interazione di un qualunque sistema con ciò che lo circonda (questo, chiaramente, per quanto riguarda le teorie “*collapse*”. Per adesso parleremo di collasso per poter fare dei paragoni con ciò che poteva pensare Prigogine, anche se sarebbe più completo parlare anche delle teorie “*no collapse*” in cui la decoerenza svolge il ruolo di definire delle “evoluzioni” privilegiate di sovrapposizioni di stati).<sup>99</sup> In un mondo in cui nulla è realmente “isolato”, anche solo il “contatto” di un fotone permette il collasso, la “definizione” classica, di un sistema fisico precedentemente descritto da una sovrapposizione di stati.

Tutto questo è estremamente interessante. Siamo di fronte ad un modello che descrive un mondo in evoluzione deterministica governata dall’equazione di Schrodinger (senza mai dimenticare, però, che la possibilità di una definizione

---

<sup>99</sup> A riguardo, si veda Bacciagaluppi G., *The Role of Decoherence in Quantum Theory*, 2004, <http://plato.stanford.edu/entries/qm-decoherence/>.

assolutamente precisa dello stato iniziale è in forte discussione, permettendo dunque un'indeterminazione anche nell'evoluzione di Schroedinger), e che diventa “mondo classico”, diventa ciò che noi quotidianamente esperiamo, grazie all'interazione reciproca di tutto con tutto.

Ecco perché la decoerenza, tutto sommato, non è nulla di nuovo: già agli albori della meccanica quantistica si poteva leggere l'affermazione secondo la quale il solo fatto di guardare una cosa la “faceva esistere”.<sup>100</sup> In un certo modo questo può essere interpretato come il processo per il quale, per vedere una cosa, bisogna investirla con dei fotoni, e dunque, via decoerenza, la si “determina oggettivamente”.

Una delle caratteristiche della decoerenza è che i suoi effetti vengono studiati all'interno della meccanica quantistica, dunque a livello microscopico, poiché è proprio qui che produce effetti interessanti, sebbene le interazioni siano presenti anche, è evidente, in un contesto macroscopico.

Le collisioni molecolari sono state studiate anche in fisica classica e si è visto che esse producono quelle “correlazioni statistiche” che nascono dal continuo trasferimento di momento tra le molecole e che sono uno degli aspetti più importanti da tenere in considerazione per descrivere i fenomeni irreversibili classici. Dopotutto queste continue correlazioni porteranno alla fine ad una configurazione descritta dalla distribuzione di Maxwell, che è appunto la distribuzione di maggiore entropia: questa evoluzione è una chiara manifestazione della “freccia termodinamica”, per quanto, come già detto, questa “freccia” possa essere intesa esclusivamente in termini probabilistici.

Le interazioni molecolari con corpi macroscopici sono state a lungo snobbate dagli scienziati, essendo il loro effetto sull'oggetto di studio trascurabile. Non a caso le leggi della fisica classica sono considerate valide in maniera esatta “nel vuoto”, ma rimangono molto precise nella loro descrizione anche in un gas (almeno fino a che la densità non aumenti oltre un certo limite). Ci si

---

<sup>100</sup> Famosa è la frase che Einstein (in contrapposizione alla meccanica quantistica) rivolse al fisico Abraham Pais: “Veramente lei è convinto che la Luna esista solo se la si guarda?”. Cit. Lindley D., *La luna di Einstein*, Longanesi, Milano, 1996.

ricollega, a questo punto, al discorso sviluppato nei paragrafi precedenti, e cioè che la fisica ha “costruito” le sue leggi in base agli oggetti e alle possibilità sperimentali che si trovava di fronte: è, in un certo senso, una banalità, ma troppo spesso dimenticata nelle varie affermazioni di leggi “indipendenti” dal contesto in cui sono nate.

Se però si cambia descrizione, se si cambia il *mezzo* con cui si guarda la situazione, ovverosia se si utilizza la meccanica quantistica, l’interazione tra un corpo macroscopico e le molecole o i fotoni circostanti non può essere trascurata. Ci si è spostati ad un livello in cui è necessaria una nuova attenzione nei confronti di dinamiche che, ad altri livelli, scompaiono.

L’interazione quantistica può essere vista come una successione di “misurazioni” della posizione dell’oggetto in questione da parte dei fotoni circostanti: una vera e propria “misurazione nel senso di von Neumann”.<sup>101</sup>

Come abbiamo visto, le “misurazioni” in meccanica quantistica sono dei processi sostanzialmente irreversibili, anche se ci sono delle puntualizzazioni da fare.

Ancora una volta, bisogna capire che tipo di fenomeni vogliamo descrivere. Dato che la decoerenza è il risultato di un’interazione con l’ambiente che sta intorno che produce uno specifico stato *entangled* tra ambiente e oggetto e che porta alla “dislocazione” della sovrapposizione di stati in cui si trovava l’oggetto nel momento iniziale, deve essere chiaro che il processo inverso in realtà può avvenire. Infatti è possibile creare delle “*reversible dislocalization of superposition*”.<sup>102</sup>

Siamo in presenza, a livello quantistico, della stessa “discrepanza tra esperimento e realtà” di cui si è parlato a proposito della fisica classica.

Anche nel dominio classico è possibile creare delle situazioni sperimentali che permettano un’inversione dei moti descritta dalle stesse leggi temporalmente

---

<sup>101</sup> Zurek W. H., Paz J. P., *Decoherence, Chaos, and the Second Law*, Physical Review Letters 72, 1994, pp. 2508-2511; Zurek W. H., *Decoherence, Einselection, and the Quantum Origins of the Classical*, Reviews of Modern Physics 75, 2003, pp. 715-775.

<sup>102</sup> Zeh H. D., *The Physical Basis of the Direction of Time*, op. cit., p. 102.

non invertite. L'esempio del moto di biglie su piani perfettamente levigati riguarda proprio un esperimento che risulta, con ottima approssimazione, "simmetrico per inversione temporale".

In meccanica quantistica il processo di misurazione può essere "invertito": esistono casi particolarissimi in cui, con estrema attenzione, si può ritornare alla situazione di sovrapposizione iniziale, si può "tornare alla coerenza".

Il problema allora è capire se è legittimo concludere, sulla base di questi casi particolari, una possibile simmetria anche nell'ambito della teoria della decoerenza. La risposta è no.

L'interazione di von Neumann<sup>103</sup> è il risultato di una misurazione controllabile (nel senso che il processo è conoscibile da parte dello sperimentatore) per mezzo di un dispositivo di misura. Questo dispositivo è caratterizzato dai cosiddetti "*pointer states*", che possono essere immaginati come gli stati relativi alle varie posizioni di una "lancetta" che indica il risultato delle misurazioni. La asimmetria evidente del processo (ovverosia il passaggio da uno stato fattorizzato ad uno stato *entangled*) può essere, come appena detto, invertita, ma solo nel momento in cui *entrambi i sistemi in questione fossero microscopici* (e anche in questo caso sarebbe un processo faticoso da preparare). Il fatto è che, per fare fisica, cioè per tentare di conoscere le regolarità del mondo che ci circonda, lo scienziato non può che avere a disposizione apparati di misurazione *macroscopici*.

Dunque i "*pointer states*" vengono di volta in volta "definiti" (resi "quasi-classici") dall'interazione *incontrollabile* con l'ambiente circostante, e dunque, in questi casi, la recoerenza (*recoherence*) non può essere praticata.

Le misurazioni che portano a definiti valori dei "*pointer states*", cioè le misurazioni che normalmente si fanno nei laboratori di fisica, non possono essere "portate indietro" e annullate.

---

<sup>103</sup> Quella descritta dall'*entanglement* della sovrapposizione di stati dell'oggetto e dei *pointer states*.

Se si immagina che questo tipo di misurazione macroscopica avviene ovunque, di continuo attorno a noi (non è necessario andare in un laboratorio di fisica), l'aspetto della decoerenza descrive un mondo fisico davvero totalmente *entangled* e irreversibile.

## CAPITOLO 3

### LE INTERPRETAZIONI DELLA MECCANICA QUANTISTICA E IL LORO RAPPORTO CON IL “TEMPO”

E' sicuramente più appropriato parlare di molte meccaniche quantistiche piuttosto che di una sola.<sup>1</sup> Sebbene sia possibile trovare un terreno comune e un filo rosso che lega le varie interpretazioni della teoria, è indiscutibile il fatto che ognuna di esse rappresenta una teoria a parte, autonoma. E si potrebbe sostenere che è addirittura scorretto parlare di interpretazioni, nel momento in cui non si sottolineasse con forza che la parola “interpretazione” è utilizzata nella sua accezione “forte”, intendendo con ciò un’idea di una effettivamente nuova teoria.

Troppo spesso ci si è fermati a considerare le varie interpretazioni della meccanica quantistica come semplici “variazioni sul tema”, che mettevano in

---

<sup>1</sup> In proposito si veda *La rivoluzione della meccanica delle matrici di Heisenberg, Born e Jordan e il problema dell'equivalenza con la meccanica di Schroedinger e Werner Heisenberg: dalla meccanica delle matrici alle relazioni di indeterminazione*, in Giannetto E. A., *Saggi di Storie del Pensiero Scientifico*, op. cit., pp. 351 e 363; Omnès R., *The Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1994; Holland P. R., *The Quantum Theory of Motion: An Account of the de Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, 1995.

mostra delle differenze di vedute di carattere più che altro metaempirico e che costituivano delle visioni diverse, sicuramente legittime, ma pur sempre legate alla teoria “ortodossa”. Le ragioni di questo fatto sono molteplici, la più forte di esse è forse quella di carattere storico.<sup>2</sup>

Nel momento in cui storicamente si è abbracciato un certo tipo di interpretazione, quella cosiddetta di Copenhagen, e in cui questa interpretazione è diventata dominante, tanto da essere canonicamente insegnata nei corsi istituzionali di fisica teorica delle università, qualunque altra interpretazione è stata vista come un “discostamento metafisico”, senza importanza fisica. Dopotutto la meccanica quantistica, dal punto di vista puramente formale e tecnico, è stata protagonista di una serie numerosissima di successi predittivi e sperimentali. E allora, se una teoria è così vincente, si cade nella tentazione di considerarla compiuta, definitiva, e tutto il resto, cioè interpretazioni alternative, viene visto come un interessante, ma sterile, gioco filosofico.

La meccanica quantistica è nata in un periodo storico in cui le idee positivistiche stavano raggiungendo un livello di diffusione all’interno della comunità scientifica tale da indirizzare in maniera naturale l’orientamento interpretativo del formalismo. Quando Bohr inizierà a riflettere sul significato del formalismo della teoria, darà molta importanza all’analisi linguistica e logica dei problemi, in chiara affinità con gli esponenti del positivismo logico, e inoltre arriverà ad affermare che “non esiste un mondo quantistico. C’è solo una descrizione fisica astratta. E’ sbagliato pensare che sia compito della fisica scoprire come è fatta la natura. La fisica riguarda quello che si può dire della natura”.<sup>3</sup> Heisenberg si contrappose a Bohr nel momento in cui questi provò a cercare una sorta di “visualizzabilità” dei fenomeni atomici. Egli era convinto

---

<sup>2</sup> Un’indagine molto interessante sul perché l’interpretazione di Copenhagen continui ad avere maggior successo di altre, in particolare della meccanica di Bohm, sebbene quest’ultima sia “equivalente” da un punto di vista predittivo, è contenuta nel libro di Cushing J. T., *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*, University of Chicago Press, Chicago, 1994.

<sup>3</sup> Bohr N., *Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*, stampato nel volume *The Philosophical Writings of Niels Bohr*, Vol. III, Ox Bow Press, Woodbridge.

che solo il processo di misurazione potesse avere un che di “reale”, e la sua realtà consisteva effettivamente negli esiti di misura.<sup>4</sup>

Dunque veniva a cadere il tentativo di una spiegazione “ontologica” del formalismo: la teoria non poteva dire nulla su ciò che il mondo è, non era più legittimata a parlare di realtà sottostante e precedente gli esperimenti, ma poteva esclusivamente parlare degli esiti di questi ultimi.<sup>5</sup> “Su ciò di cui non si può parlare, si deve tacere”, scrisse Wittgenstein,<sup>6</sup> e i primi teorici quantistici seguirono il suo consiglio, in cui quel “ciò di cui non si può parlare” è proprio ciò che c’è (se qualcosa c’è) prima dell’esperimento.

Allora una visione strettamente positivista (è evidente che in gioco erano presenti anche posizioni differenti: si pensi a De Broglie,<sup>7</sup> a Schroedinger,<sup>8</sup> allo stesso Einstein.<sup>9</sup> Questi pensatori, però, furono quelli che, in un certo modo, uscirono “sconfitti” dal confronto con i sostenitori della posizione ortodossa) è inevitabilmente critica nei confronti di “interpretazioni speculative” sulla natura della funzione d’onda, sulla sua effettiva realtà, sulla esistenza o meno della realtà prima dell’osservazione e così via. O, meglio, più che essere critica, essa è indifferente. Il positivismo forte cade inevitabilmente nello

---

<sup>4</sup> Si veda Heisenberg W., *Fisica e Filosofia*, op. cit., pp. 69 e seguenti.

<sup>5</sup> A tale proposito si rimanda ad un articolo scritto da Alai M., *Ontologia, spiegazione e interpretazione di Copenhagen della meccanica quantistica*, Rivista Isonomia, Università di Urbino. Scaricabile al sito <http://www.uniurb.it/Filosofia/isonomia/epistemologica1.htm>

<sup>6</sup> Wittgenstein L., *Trattato logico-filosofico*, trad. it. di Conte A.G., Einaudi, Torino, 1968, pagina 3.

<sup>7</sup> De Broglie non accettò l’interpretazione che aveva accompagnato la teoria che egli stesso aveva contribuito a far nascere. Egli sostenne che non bisognava abbandonare l’idea di traiettoria per le particelle materiali, che comunque rimanevano reali ed oggettive. Più avanti in questo capitolo ci occuperemo della teoria de Broglie-Bohm, la cosiddetta “teoria a variabili nascoste”, che riprende questi punti importanti.

<sup>8</sup> Si veda Schroedinger E., *Die gegenwartige Situation in der Quantenmechanik*, *Naturwissenschaften* 23, op. cit., pp. 807-812; 823-828; 844-849. Anche Schroedinger, padre della meccanica ondulatoria, non accettò la visione di Copenhagen della nuova teoria. In particolare non accettò di pensare ad una discontinuità presente nell’atto di misurazione. Non era l’indeterminismo della teoria a scoraggiarlo, anzi. Era la presunta discontinuità della natura.

<sup>9</sup> La posizione di Einstein è molto complessa e sfaccettata. Basti ricordare in questa sede che egli non accettò l’indeterminismo intrinseco della meccanica quantistica, ritenendo quest’ultima incompleta a livello fondamentale ed arrivando a formulare, nel 1935, un esperimento mentale insieme ai colleghi Podolsky e Rosen per dimostrare l’incompletezza della teoria sotto l’assunzione di località. Si vedano le note 53 e 54, capitolo 1.



strumentalismo: se un formalismo funziona e fa previsioni corrette, questo basta. Una teoria “interpretata” in una maniera differente, ma che riesce a fare le stesse previsioni dell’originale, le è equivalente.

L’analisi delle diverse interpretazioni della meccanica quantistica, delle diverse meccaniche quantistiche, è invece fondamentale, e non è semplicemente lo sfogo di una curiosità accademica. Nei dipartimenti in cui si studia la filosofia della fisica, ancora rari in Italia, ma in continua espansione all’estero, lo studio delle meccaniche quantistiche riveste un ruolo di sempre maggior rilievo e la cosa importante da notare è che ciò avviene in simbiosi con i dipartimenti di fisica, segno questo che si è capito che la “speculazione” sulle differenti visioni del mondo quantistico può portare a progressi in ambito prettamente scientifico.

E così è diventato ormai frequente sentir parlare di visione di Everett, di interpretazione GRW, di teorie a variabili nascoste. Queste idee ancora non vengono insegnate nei dipartimenti di fisica, e gli studenti universitari acquisiscono, per ora, solo un bagaglio di competenze tecniche, peraltro fondamentali, relative ad una meccanica quantistica che si rifà al formalismo di Schroedinger con l’interpretazione statistica di Born, formalizzata poi nel modello di von Neumann e Dirac<sup>10</sup>, chiaramente sottoposto a tutte le modifiche di questi decenni.

In questo capitolo analizzeremo in maniera approfondita le meccaniche quantistiche più importanti, e cercheremo di capire quale può essere la loro relazione con il problema “tempo”. Vedremo che forse è sbagliato parlare del problema dell’irreversibilità o meno della meccanica quantistica “in generale”, e che sarebbe meglio specificare ogni volta a quale tipo di meccanica quantistica ci si sta rivolgendo.

---

<sup>10</sup> La formalizzazione matematica della meccanica quantistica operata da von Neumann venne pubblicata nel famoso volume *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer Verlag, Berlino, 1932, tradotto in inglese in *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton, 1955.

### 3.1 - Interpretazioni “collapse” e “no collapse”

Nella visione standard della meccanica quantistica, l'evoluzione temporale della funzione d'onda governata dall'equazione di Schroedinger viene “interrotta”, “spezzata”, ad ogni misurazione dal collasso del vettore di stato nell'autostato corrispondente all'autovalore effettivamente misurato.

Questa “doppia struttura dinamica”, deterministica e continua da un lato, stocastica e discontinua dall'altro è una delle caratteristiche più controverse della teoria.

Le diverse interpretazioni della meccanica quantistica (le diverse “meccaniche quantistiche”) si possono suddividere in due gruppi: quelle che prevedono il collasso della funzione d'onda come processo dinamico fondamentale ed “esistente”, e quelle che considerano l'equazione di Schroedinger come la sola “struttura” fondamentale della teoria, e vedono il collasso come un “risultato fenomenico” spiegabile in diversi modi a seconda della visione abbracciata.

Mentre la formulazione GRW e, più in generale, le teorie scaturite dal programma DRP (*Dynamical Reduction Process*), appartengono al primo gruppo, la teoria di Everett (con le versioni dei *Many Worlds* e delle *Many Minds*), quella di Bohm dell'onda pilota e quella delle “*consistent histories*” appartengono al secondo.

Per quanto riguarda l'interpretazione di Copenhagen, la sua “catalogazione” è più discutibile. Se da un lato essa prevede il collasso della funzione d'onda come conseguenza peculiare della misurazione, dall'altro non ne dà una vera e propria spiegazione “dinamica”, ma ne “postula” in qualche modo l'esistenza. A differenza della teoria GRW, in cui il collasso avviene “nella realtà”, “dinamicamente”, ed è esso stesso un processo fisico ben definito, nella visione di Copenhagen il collasso è necessario semplicemente per eliminare le componenti della sovrapposizione del vettore di stato iniziale che non vengono “scelte” dal processo di misurazione.

Si può sostenere che l'interpretazione di Copenhagen, e, in generale, l'interpretazione standard che ne discende sia la “base” da cui sono scaturite le diverse interpretazioni, proprio a causa della sua “vaghezza” sul significato del collasso a seguito di una misurazione.

### 3.2 - L'interpretazione di Copenhagen

Alla cosiddetta “interpretazione di Copenhagen” vengono inevitabilmente associati i nomi del fisico danese Niels Bohr e di quello tedesco Werner Heisenberg, i quali nel 1927 si preoccuparono di riflettere sul significato concettuale del formalismo delle meccaniche quantistiche nate nei due anni precedenti per opera dello stesso Heisenberg, Born e Jordan, di Erwin Schroedinger,<sup>11</sup> e di Dirac<sup>12</sup>

In realtà, nessuno dei due pensatori usò mai la locuzione “interpretazione di Copenhagen” per descrivere le proprie idee e, anzi, si può sostenere che tra Bohr e Heisenberg ci furono diversi punti di disaccordo,<sup>13</sup> anche se alla fine sarà proprio Heisenberg ad accettare la visione della meccanica quantistica di Bohr, il quale diventerà il vero e proprio rappresentante e custode della posizione definita “ortodossa”.

A dire il vero, non è facile racchiudere “l'interpretazione di Copenhagen” in una cornice definita e precisa, non solo perché da alcuni definita addirittura “invenzione storiografica”<sup>14</sup> e dunque difficilmente contestualizzabile nel

---

<sup>11</sup> Per i riferimenti bibliografici relativi alle meccaniche quantistiche di Heisenberg, Born, Jordan e Schroedinger, si vedano le note 24, 25, 26, 29 e 30, capitolo 1.

<sup>12</sup> Dirac P. A. M., *The Fundamental Equations of Quantum Mechanics*, in Proc. Roy. Soc. A 109, 1926, pp. 642-653.

<sup>13</sup> Ad esempio, Bohr prese le distanze dalla visione di Heisenberg, definita più “soggettivista”. Si veda Bohr N., *Essays 1932-1957 on Atomic Physics and Human Knowledge*, stampato nel volume *The Philosophical Writings of Niels Bohr*, Vol. II, Oxford Bow Press, Woodbridge.

<sup>14</sup> Si veda il saggio di Giannetto E., *Werner Heisenberg: dalla meccanica delle matrici alle relazioni di indeterminazione*, in *Saggi di Storie del Pensiero Scientifico*, op. cit., p. 373.

periodo in esame, ma anche perché lo stesso pensiero di Bohr risulta in alcuni punti oscuro, ad esempio per quanto riguarda il principio di complementarità.

Non si vuole, in questo lavoro, fare un'analisi dell'evoluzione storica di quella che è stata poi definita interpretazione di Copenhagen e soprattutto non è il caso di presentare le varie "concezioni filosofiche" che caratterizzavano le diverse meccaniche quantistiche di quegli anni.<sup>15</sup>

Ciò che a noi interessa è il modo in cui viene caratterizzata l'interpretazione di Copenhagen oggi, per quanto ci possano essere delle forti differenze con le visioni degli anni immediatamente successivi alla formulazione della meccanica quantistica. In generale si può sostenere che l'interpretazione di Copenhagen sia stata a posteriori caratterizzata dall'indeterminismo, dal principio di corrispondenza di Bohr, dall'interpretazione statistica della funzione d'onda, dal collasso della funzione d'onda e dal principio di complementarità di Bohr.

La riflessione sulla relazione che la teoria ha con la simmetria temporale, ciò che a noi interessa in questa sede, presenta forse ancora più difficoltà di quanto non accada per le altre interpretazioni della meccanica quantistica. Questo perché, a differenza delle altre visioni che ci accingiamo ad analizzare, l'interpretazione di Copenhagen, così come viene vista attualmente, manca di una propria "ontologia".<sup>16</sup> Essa non prova a mettere in risalto una propria idea del "mondo", ma sottolinea il fatto che non possiamo dire nulla sulla natura

---

<sup>15</sup> Questo lavoro richiederebbe troppo spazio e ci porterebbe lontano dal tema che dobbiamo trattare. Non si sottovaluti, però, l'importanza dell'analisi storica delle differenze delle diverse meccaniche quantistiche, perché questa può portare a delle importanti conclusioni anche per ciò che riguarda la concezione del tempo. Ad esempio, la visione di "ripristino" del determinismo soggiacente alla teoria di Schroedinger ha senz'altro un impatto diverso sulla questione temporale di una visione matriciale discreta di Heisenberg. La formalizzazione "continuista" del primo, in termini di equazioni differenziali, riporta la meccanica quantistica ad un livello molto più vicino alla meccanica classica di quanto non fosse la teoria "discontinua" del secondo. Oppure si pensi alla riflessione sui *q-numbers* presente nello scritto di Dirac del 1926 che porta all'inevitabile conclusione che anche il tempo non possa più essere considerato un semplice parametro, esattamente come non è considerato un parametro lo spazio.

<sup>16</sup> Ancora, si segnala il saggio di Alai M., *Ontologia, spiegazione e interpretazione di Copenhagen della meccanica quantistica*, <http://www.uniurb.it/Filosofia/isonomia/epistemologica1.htm>.

fintantoché non la misuriamo. Provare a sostenere che la natura presenta degli aspetti, diciamo, irreversibili, è un'affermazione che può provocare dei fraintendimenti o addirittura può essere ritenuta priva di senso, nell'ambito di questa interpretazione.

Infatti, se è possibile semplicemente parlare di ciò che ci dicono le misurazioni e se, oltre a ciò, ci si spinge ad affermare che quello che “esiste” (se qualcosa esiste) tra due osservazioni non è oggetto di analisi da parte della meccanica quantistica, il problema della simmetria temporale può essere legittimamente considerato solo al livello del formalismo matematico e delle misurazioni.

Dunque per noi risulta di fondamentale importanza riuscire a capire qual è il significato che si dà alla funzione d'onda del sistema e, inoltre, cosa rappresenta il collasso della stessa.

In effetti all'interno della interpretazione di Copenhagen, cosa effettivamente rappresenti la funzione d'onda non è del tutto chiaro. Di certo essa non è quell'“onda materiale” che era nelle idee iniziali di de Broglie, o quell'onda “di carica” che Schroedinger aveva proposto.<sup>17</sup>

Avendo abbracciato l'interpretazione statistica di Born, la scuola di Copenhagen aveva, più o meno esplicitamente, adottato una visione di carattere “informativa”: la  $\Psi$  del sistema non era una “vera” onda, ma una ampiezza di probabilità che dunque non aveva un significato realmente “fisico” all'interno della trattazione.

Questa visione, però, presenta un problema: è possibile immaginare che la funzione d'onda sia semplicemente uno “strumento” senza significato effettivo fisico se poi è essa stessa che “attualizza” un certa probabilità con pieno significato fisico?<sup>18</sup>

---

<sup>17</sup> Si veda il capitolo *Wave Mechanics in the sense of Louis de Broglie and Schroedinger*, in Dugas R., *A History of Mechanics*, op. cit., pp. 554 e seguenti.

<sup>18</sup> Si veda Zeh H.D., *The Physical Basis of the Direction of Time*, op. cit. A questo riguardo l'autore scrive: “Per la teoria della decoerenza gli oggetti fisici possono apparire in termini di valori di osservabili, mentre “agiscono” dinamicamente come funzioni d'onda. In questo senso la funzione d'onda è “attuale”, mentre le variabili quasi classiche emergono da essa attraverso la decoerenza. *Qualunque interpretazione della teoria quantistica che non assume che la funzione d'onda sia “reale” deve spiegare la sua “attualità”*. Nella visione di Heisenberg uno

Quando si sottolinea il carattere “informativo” della  $\Psi$ , non bisogna dimenticare che le “informazioni” hanno un loro significato fisico.

La funzione d’onda del sistema può essere concepita, così come credeva Heisenberg, come la conoscenza potenziale che noi abbiamo di quel determinato sistema fisico.<sup>19</sup> Questa conoscenza subisce un radicale cambiamento nel momento in cui sottoponiamo il sistema ad una misurazione: la discontinuità tra la dinamica deterministica dell’equazione di Schrodinger e la stocasticità del collasso può essere interpretata proprio come un’inevitabile cambiamento della nostra conoscenza.<sup>20</sup> Adesso abbiamo “nuove informazioni”, sappiamo cioè che tra tutti gli stati in cui poteva “finire” il sistema, con le loro probabilità relative, esso adesso è proprio in un determinato autostato. Questa informazione, però, come abbiamo visto, è data proprio dalla funzione d’onda: si può negare ad essa una “fisicità”, intesa in senso di “fisicità informativa”?

Se si accetta questo modo di vedere la situazione, allora è senz’altro vero che la misurazione “produce” un certo tipo di risposta “reale” del sistema (il collasso in un determinato autostato), ed è altrettanto vero che prima di questa misurazione non si può dire quale precisa proprietà fisica ha il sistema in esame; però si può sostenere che vi è, dietro tutto, un’evoluzione “informativa”. Il nostro problema consiste allora nel capire se questa evoluzione sia simmetrica per inversione temporale oppure no.

---

dovrebbe spiegare coerenza e non-località, non decoerenza e localizzazione. Molti dei fenomeni quantistici “sorprendenti” risultano paradossi solo quando descritti con concetti classici e locali. Le funzioni d’onda sono solitamente rifiutate come rappresentanti la realtà perché non sono definite sullo spazio tridimensionale. Comunque questa non-località è stata confermata sperimentalmente in molti modi. Questo può aver sorpreso solo i credenti nelle particelle e nelle variabili nascoste.” (trad. it. e corsivo miei).

<sup>19</sup> “La funzione di probabilità combina insieme elementi oggettivi e elementi soggettive. Essa contiene delle affermazioni sulle possibilità o meglio sulle tendenze (“*potentia*” nella filosofia aristotelica), e queste affermazioni sono completamente oggettive, non dipendono da alcun osservatore; e contiene affermazioni sulla nostra conoscenza del sistema, che sono naturalmente soggettive in quanto possono essere diverse per osservatori diversi.” citato da Heisenberg W., *Fisica e Filosofia*, op. cit., p. 68.

<sup>20</sup> Heisenberg W., *Fisica e Filosofia*, op. cit., p. 69.

Come abbiamo visto dall'analisi svolta sull'equazione di Schroedinger, può essere considerata errata la posizione di coloro i quali sostengono che essa sia simmetrica per inversione temporale. Dunque se l'equazione fondamentale non è reversibile, l'evoluzione dell'informazione stessa non sarebbe reversibile, ed esisterebbe una “direzione temporale privilegiata”, o perlomeno differente dalla sua opposta.

Se invece si continuasse a considerare simmetrica l'equazione di Schroedinger, l'attenzione dovrebbe essere spostata proprio sulla discontinuità presente al momento della misurazione. Nel momento in cui si rompe la dinamica deterministica e si finisce in un autostato dell'osservabile misurata, non si può più “tornare indietro” alla sovrapposizione di stati iniziale.<sup>21</sup> E' come se, nel momento in cui l'osservatore aumenta la propria conoscenza dopo la misurazione, egli stesso non potesse più ritornare alla sua parziale “ignoranza” iniziale invertendo la direzione dell'asse temporale. Una nuova “creazione” di ignoranza può avvenire solo in conseguenza di un'azione fisica ben precisa, come ad esempio la scelta di misurare, sullo stato conseguente alla prima misurazione (l'autostato della prima osservabile), un'altra osservabile: la mia conoscenza sul sistema, mentre era certa per quanto riguardava la prima osservabile, diventa di nuovo “probabilistica” per quanto riguarda la seconda. Solo una misurazione sul sistema potrà creare un nuovo aumento di informazione.

Dunque si può sostenere che il collasso della funzione d'onda è un evento fisico che davvero porta con sé una pesante caratteristica di irreversibilità: è l'acquisizione di nuova informazione che diventa irreversibile.

La meccanica quantistica così come vista dall'attuale interpretazione di Copenhagen, pur non potendo (forse non volendo) spiegare la “realtà oggettiva” dietro il formalismo, spiega in maniera radicale una vera e propria

---

<sup>21</sup> Si pensi, ad esempio, a degli elettroni preparati nello stato di spin  $x+$  che vengono fatti passare in un apparato di Stern-Gerlach che discrimini per il verso  $z$ . Dunque al di là dell'apparato gli elettroni si troveranno negli stati  $z+$  e  $z-$  con eguale probabilità. Nel momento in cui “invertiamo il tempo”, partendo dagli stati  $z+$  o  $z-$  gli elettroni arriveranno al di là del magnete negli stati  $z+$  o  $z-$ , cioè stati diversi dallo stato iniziale  $x+$ .

asimmetria temporale. E' un'asimmetria che è fortemente legata all'informazione che l'osservatore ha sul sistema, dunque è fortemente legata all'osservatore stesso. Non può, però, considerarsi un'illusione: argomentazioni del tipo “siamo noi che percepiamo l'irreversibilità, ma in realtà la natura non vede distinzioni tra passato e futuro” sono obiezioni che escono dal recinto dell'interpretazione di Copenhagen. Essa non fa supposizioni su una natura che è “là”, indipendentemente dalle nostre misurazioni. Dunque, l'irreversibilità di cui possiamo parlare è esclusivamente quella del formalismo e delle misurazioni: è lì che la meccanica quantistica di Copenhagen si rivela irreversibile.

### **3.3 - La formulazione degli stati relativi di Everett**

Analizzeremo adesso una “interpretazione” della meccanica quantistica che, a causa del suo cambio di paradigma rispetto alla concezione ortodossa, ha fatto nascere parecchie discussioni, soprattutto nell'ambito della filosofia della fisica, e ha dato il via ad una serie di “interpretazioni parallele”, molto diverse tra di loro ma la cui base di partenza era la stessa.

L'interpretazione degli stati relativi venne formulata da Hugh Everett III nel 1957. Presentò questa sua nuova visione nella dissertazione di dottorato quando era studente a Princeton.<sup>22</sup>

La proposta di Everett che compare nell'articolo del 1957 (sostanzialmente riportante le idee della tesi di dottorato con qualche piccola modifica)<sup>23</sup> presenta alcuni punti oscuri, ed è probabilmente proprio su questi che sono stati poi costruiti raffinamenti e teorie alternative che via via venivano considerate

---

<sup>22</sup> Everett H., *On the Foundations of Quantum Mechanics*, tesi di dottorato presentata all'università di Princeton, marzo 1957.

<sup>23</sup> Everett H., “*Relative State*” *Formulation of Quantum Mechanics*, *Reviews of Modern Physics* 29, 1957, pp. 454-462. Per l'analisi della formulazione di Everett seguiremo questo articolo.



“variazioni al tema” dell’idea originale di Everett. Proveremo a tratteggiare i punti essenziali, quelli che caratterizzano maggiormente questa interpretazione. Everett aveva intravisto dei grossi problemi all’interno della meccanica quantistica “standard” di von Neumann e Dirac. In particolare, la questione che non convinceva il fisico americano era quella riguardante la divisione tra oggetto osservato e osservatore. Il proposito di Everett era quello di inglobare il soggetto conoscente nella teoria e di trattarlo come un sistema fisico descritto dalla stessa.<sup>24</sup> In effetti, fin dalla nascita della meccanica quantistica, e soprattutto, come abbiamo visto, con l’interpretazione di Copenhagen, era stato sottolineato il nuovo ruolo che l’osservatore giocava nei confronti del sistema osservato. Una netta divisione non era più possibile, mentre alcuni sostenevano addirittura che la misura effettivamente “produce” ciò che è misurato.<sup>25</sup> L’approccio di Everett è stato probabilmente il primo a provare a trattare l’osservatore all’interno della teoria, fornendo così la possibilità di parlare di “funzione d’onda dell’universo”.<sup>26</sup>

In sostanza, il problema che Everett evidenziò all’interno della formulazione standard della meccanica quantistica era fortemente legato alla questione della misurazione. Nella formulazione standard, il sistema evolve secondo leggi

---

<sup>24</sup> “...può l’evoluzione temporale del sistema osservatore + oggetto essere interamente descritto dal processo 2 (quello che von Neumann aveva descritto come l’evoluzione deterministica guidata dall’equazione di Schroedinger, n.d.r.)? Se sì, allora nessun processo discontinuo probabilistico può avvenire. Se no, siamo costretti ad asserire che sistemi che contengono osservatori non sono soggetti allo stesso tipo di descrizione quantistica di tutti gli altri sistemi”, Everett H., *On the Foundations of Quantum Mechanics*, tesi di dottorato presentata all’università di Princeton, marzo 1957, cit. in Barrett J. A., *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*, Oxford University Press, Oxford, p. 47 (trad. it. mia).

<sup>25</sup> Questa era la posizione, ad esempio, del fisico tedesco Pascual Jordan: “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.” Cit. in Ghirardi G. C., *Un’occhiata alle carte di Dio*, op. cit., p. 118.

<sup>26</sup> Il concetto di “funzione d’onda dell’universo” venne introdotto negli anni Sessanta dal fisico John Archibald Wheeler e portò alla famosa equazione Wheeler-DeWitt. Cfr. Wheeler J. A., in *Relativity, Groups and Topology*, eds. DeWitt C., DeWitt B. S., Gordon and Breach, New York, 1964, p. 315 e Wheeler J. A., in *Batelles Rencontres*, eds. DeWitt C., Wheeler J. A., Benjamin, New York, 1968, p. 242.

deterministiche fintantoché non è sottoposto a misurazioni; nel momento in cui l'osservatore misura una variabile, avviene una discontinuità a livello fondamentale, non descritta dall'equazione di Schroedinger, che fa collassare la funzione d'onda, facendola finire nell'autostato relativo all'autovalore osservato. Questa discontinuità appare in quello che von Neumann chiamava processo 1 (in contrapposizione al processo 2, riguardante l'evoluzione deterministica).<sup>27</sup> L'interpretazione di questo processo di misura è difficoltosa e ha occupato, e continua ad occupare, la mente di molti fisici e filosofi. Comunque, Everett riteneva che, secondo la prospettiva di von Neumann, tale processo potesse avvenire solo nel momento in cui tutti gli osservatori fossero stati fuori dal sistema in osservazione, e ciò gli pareva una richiesta troppo limitativa. Una meccanica quantistica che si occupasse esclusivamente di sistemi "isolati" dall'osservatore e che non riuscisse a descrivere l'osservatore nel sistema stesso era inaccettabile. Ecco perché propose una meccanica quantistica che fosse in grado di descrivere, in maniera coerente all'interno della teoria, letteralmente tutto.

L'approccio di Everett consistette nell'eliminazione del processo 1 dalla teoria quantistica e dunque nella proposta di non parlare più di collasso della funzione d'onda e di discontinuità. In conseguenza di ciò sostenne che il resto della teoria fosse sufficiente a descrivere qualunque tipo di sistema fisico. Per poter ricavare i risultati statistici della teoria (cioè quelli che nella formulazione standard erano legati proprio al processo 1), egli provò a considerarli come "esperienze soggettive" di osservatori che sono considerati essi stessi come sistemi fisici ordinari.<sup>28</sup>

---

<sup>27</sup> La descrizione dei due processi, presentata da von Neumann nel suo libro *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, scritto nel 1932, viene anche riportata nell'articolo di Everett del 1957, op. cit., p. 315.

<sup>28</sup> Everett scrisse: "Nella teoria degli stati relativi dobbiamo potere introdurre sistemi che rappresentino osservatori. Tali sistemi possono essere concepiti come macchine automatiche funzionanti che possiedono dei sistemi di memoria e che sono capaci di rispondere all'ambiente circostante. Il comportamento di queste macchine dovrà essere sempre descritto all'interno della meccanica ondulatoria. In più, si dedurranno le asserzioni probabilistiche del processo 1 come misure soggettive di tali osservatori, ponendo così la teoria in corrispondenza con l'esperienza." (trad. it. mia). Cit. da Everett H., *The Theory of Universal Wave Function*,

La nuova teoria di Everett, dunque, pone l'accento sulle esperienze soggettive degli osservatori, permettendo al formalismo di essere completamente deterministico e causale.<sup>29</sup>

Il problema sostanziale che Everett dovette affrontare una volta definiti i termini della nuova interpretazione fu quello riguardante il significato della funzione di stato "post-misurazione". La soluzione che propose diede poi il nome alla sua teoria: la sovrapposizione di stati che resta anche dopo la misurazione descrive una correlazione tra stati dell'osservatore e stati del sistema misurato tale che ad ogni autostato dell'osservabile misurata sia associato un autostato dell'osservatore stesso.<sup>30</sup> In sostanza, come detto prima, non essendoci più il collasso della sovrapposizione in un autostato definito, bisogna adesso interpretare ogni elemento della sovrapposizione come un osservatore che ha percepito un risultato definito (corrispondente agli autostati effettivi), e a cui appare che lo stato del sistema sia stato trasformato nel corrispondente autostato.

In effetti, non è chiaro come Everett pensasse di trovare la correlazione tra i risultati statistici che scaturiscono dalla interpretazione standard della teoria e il suo approccio.<sup>31</sup> Egli scrisse che si poteva spiegare perché, nella sua teoria, gli osservatori ottengono precisamente gli stessi risultati di quelli predetti dal

---

pubblicato in *The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, eds. DeWitt B. S. e Graham N., Princeton University Press, Princeton, 1973, p. 9.

<sup>29</sup> "Arriviamo così alla situazione in cui la teoria formale è oggettivamente continua e causale, mentre soggettivamente discontinua e probabilistica. Mentre questo punto di vista giustificherà alla fine il nostro utilizzo delle asserzioni statistiche della visione ortodossa, ci permette di fare questo in maniera logicamente consistente, permettendo l'esistenza di altri osservatori." *Ibidem*.

<sup>30</sup> Nell'articolo di Everett del 1957 si legge: "Notiamo che non c'è più nessuno stato indipendente del sistema o stato dell'osservatore, sebbene i due siano diventati correlati uno ad uno. Comunque in ogni elemento della sovrapposizione il sistema oggetto è un particolare autostato dell'osservatore e in più lo stato osservatore-sistema descrive l'osservatore come uno che percepisce quel particolare stato del sistema. E' questa correlazione che permette a uno di mantenere l'interpretazione che una misura è stata fatta." Everett H., "Relative State" *Formulation of Quantum Mechanics*, op. cit., p. 320 (trad. it. e corsivo miei).

<sup>31</sup> Sebbene egli alla fine dell'articolo sostenga che "le asserzioni statistiche di questa interpretazione non hanno lo status di ipotesi indipendenti ma sono deducibili dalla meccanica ondulatoria pura che parte completamente libera da postulati statistici." Everett H., "Relative State" *Formulation of Quantum Mechanics*, op. cit., p. 323.

formalismo di von Neumann-Dirac, eppure alla fine non è chiaro quale tipo di “registrazione” del risultato ottiene l’osservatore.

Forse, questa carenza di chiarezza negli articoli del 1957 è stata la fortuna dell’idea di Everett. Proprio per riuscire a risolvere la questione della corrispondenza osservatore-sistema osservato, altri fisici hanno negli anni proposto dei “complementi” della teoria di Everett, diversificandosi spesso nella sostanza, pur continuando a rimanere appoggiati alla base everettiana. Questo ha fatto sì che nascessero nuove idee, alcune delle quali estremamente originali, che hanno fornito dei validi contributi alla riflessione sui fondamenti della meccanica quantistica.

### 3.3.1 - *Many Worlds*

Nel 1971, il fisico teorico Bryce Seligman DeWitt propose una “lettura” dell’interpretazione di Everett che diventò velocemente la più conosciuta e controversa. Venne chiamata “teoria dei molti mondi” (“*Many Worlds Theory*”)<sup>32</sup> perché prevedeva l’esistenza di un mondo per ogni termine della sovrapposizione di stati post-misurazione. Dunque, un osservatore che misura un sistema che è in una sovrapposizione di stati provocherà una “moltiplicazione” del mondo iniziale in tanti mondi quanti sono gli autovettori che costituiscono la sovrapposizione iniziale. Inevitabilmente, prendendo sul serio questa ipotesi, si deve concludere che lo stesso osservatore si “moltiplica” e finisce in mondi diversi.

Questa idea, va da sé, fa nascere alcune considerazioni critiche.

In primo luogo, emerge un problema a riguardo della definizione ontologica dell’“io”. Nel momento in cui si suppone che un osservatore si “divida” in

---

<sup>32</sup> In realtà, questo è il nome con cui è stata chiamata dopo. Nella prima pubblicazione di DeWitt si parlava di “*many universes*”. DeWitt B. S., *The Many-Universes Interpretation of Quantum Mechanics*, pubblicata in *Foundations of Quantum Mechanics*, 1971, ripubblicata in *The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, op. cit., pp. 167-218.

tanti osservatori ciascuno nel mondo relativo ad un autostato dell'osservabile, nasce inevitabilmente la domanda "chi sono io?".

In realtà, come giustamente fa notare il fisico israeliano Lev Vaidman,<sup>33</sup> dire che esistano molti "Lev" (o addirittura infiniti) è diverso dal sostenere che esistano molti "io", nel senso che è del tutto privo di significato dire che esiste un altro "io". Ogni "Lev" è un "io" all'interno del proprio mondo, dunque ognuno di noi, nel mondo che attualmente sta sperimentando, mantiene la propria identità ontologica. Nel momento in cui un osservatore compie una misurazione, a lui sembra di ottenere un determinato risultato (ripetiamo: l'autovalore dell'autostato associato). Ma, nell'ottica dell'interpretazione dei molti mondi, non è possibile identificare quell'osservatore come l'unico osservatore dopo l'esperimento. In realtà ci sono tanti altri osservatori quanti sono i possibili risultati dell'esperimento (quanti sono cioè gli autostati linearmente indipendenti che mi permettono di sviluppare lo stato iniziale del sistema), e ogni osservatore, nel suo mondo relativo, si identifica con il proprio "io".

In secondo luogo, ci sono delle difficoltà circa il concetto di probabilità. Come abbiamo visto, nel caso della teoria standard di von Neumann-Dirac, la probabilità era legata al modulo quadro dei coefficienti degli autovettori nella combinazione lineare del vettore iniziale e diventava attuale nel momento del collasso della funzione d'onda. La teoria dei "molti mondi", così come ogni visione everettiana, è puramente deterministica, perché prevede esclusivamente l'evoluzione della funzione d'onda secondo l'equazione di Schroedinger. Dunque all'interno di questa teoria non si potrà introdurre una probabilità "non epistemica" ma solamente un tipo di probabilità legata ad una sorta di "ignoranza" dell'osservatore, esattamente come veniva fatto nella meccanica statistica classica. Il problema è stato dibattuto per tanto tempo ed è ancora aperto. Molti fisici hanno provato a ricavare i risultati della teoria

---

<sup>33</sup> Vaidman L., *On Schizophrenic Experiences of the Neutron or Why We Should Believe in the Many-Worlds Interpretation of Quantum Theory*, International Studies in the Philosophy of Sciences 12, 1998, pp. 245-261.

intrinsecamente stocastica del collasso da una deterministica come quelle derivanti da Everett. Un tentativo di soluzione è stato quello proposto dallo stesso Vaidman, il quale ha pensato che sarebbe stato più sensato chiedere all'osservatore che finisce, diciamo, nel mondo W, quale probabilità egli avesse previsto di finire lì, e non chiedere a noi quale probabilità ha l'osservatore nel mondo W di osservare W. Perché è evidente che quest'ultima probabilità è uguale a uno, sempre. Dunque si può chiedere all'osservatore quale è la probabilità di essere nel mondo W, dato che questo mondo verrà creato nel momento della misurazione e l'osservatore sarà ignorante (a livello epistemico) circa l'esito.<sup>34</sup>

Senza voler entrare nello specifico del problema, è comunque interessante notare come il concetto di probabilità alla Vaidman, per quanto legato all'ignoranza dell'osservatore, sia comunque fondamentalmente diverso dal concetto di probabilità che si poteva trovare in meccanica classica. Infatti, nel contesto della teoria dei molti mondi, bisogna sempre tener presente che tutti i

---

<sup>34</sup> A questo riguardo, Vaidman propone un esperimento mentale diventato famoso all'interno della comunità di studiosi dei fondamenti e della filosofia della meccanica quantistica (chiaramente soprattutto tra coloro che lavorano sulla visione di Everett), noto come l'esperimento della "sleeping pill". Si suppone che allo sperimentatore venga data un pastiglia di sonnifero prima di eseguire il suo esperimento. Mentre dorme, a seconda dei risultati dell'esperimento, egli finirà o nella stanza A o nella stanza B (la cosiddetta "moltiplicazione dei mondi"). Quando lo sperimentatore si sveglia, ma prima che egli apra gli occhi, gli viene chiesto in che stanza si trova. In quel preciso momento egli non sa in che stanza si trova, sebbene la sua sia una ignoranza di tipo "classico": egli può venire a conoscenza della situazione semplicemente aprendo gli occhi. L'esperimento della "sleeping pill" è proposto in Vaidman L., *On Schizophrenic Experiences of the Neutron or Why We Should Believe in the Many-Worlds Interpretation of Quantum Theory*, op. cit., p. 254, anche se riferendosi ad un neutrone che assume un sonnifero in un esperimento di "beam splitter". La versione relativa all'osservatore (del tutto equivalente a livello concettuale) è riportata in Vaidman L., *Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, scaricabile al sito <http://plato.stanford.edu/entries/qm-manyworlds>.

Facendo questo esempio, Vaidman è portato a postulare il valore della probabilità nella sua interpretazione legata all'ignoranza: la probabilità di un risultato di un esperimento quantistico è proporzionale alla misura di esistenza totale di tutti i mondi con quel risultato. "Se un mondo con una misura  $\mu$  si divide in molti mondi allora la probabilità per un osservatore di trovarsi in un mondo con misura  $\mu_i$  è uguale a  $\mu_i/\mu$ .", cit. Vaidman L., *On Schizophrenic Experiences of the Neutron or Why We Should Believe in the Many-Worlds Interpretation of Quantum Theory*, op. cit., p. 254 (trad. it. mia).

Per una riflessione sul concetto di probabilità nella teoria dei molti mondi si veda anche Tappenden P., *Identity and Probability in Everett's Multiverse*, *British Journal for the Philosophy of Science* 51, 2000, pp. 99-114.

possibili risultati di un esperimento vengono attualizzati. Si parla dunque di una probabilità che non è “esclusiva” come quella riguardante il lancio di una moneta classica. Il fatto che per quest’ultima venga “testa” esclude il risultato “croce”. In una moneta quantistica, letta con gli occhi di chi crede nei *many worlds*, la probabilità  $\frac{1}{2}$  riguarda il fatto che comunque risulta sia testa, sia croce, e comunque l’osservatore finisce, dopo il lancio, sia nel mondo relativo al risultato “testa”, sia nel mondo relativo al risultato “croce”.

Un altro problema di estremo interesse sollevato dalla teoria dei molti mondi è quello relativo alla “base preferita”. Come è noto, ogni elemento dello spazio di Hilbert può essere espresso come una combinazione lineare di elementi dello stesso spazio linearmente indipendenti, ed è proprio questo quello che si fa nel momento in cui si scrive la funzione d’onda dello stato iniziale in una sovrapposizione di autovettori relativi all’osservabile (che proprio per questo motivo deve essere espressa da un operatore autoaggiunto). Il fatto è che, evidentemente, questa scomposizione non è unica. Si possono trovare altri insiemi di vettori linearmente indipendenti ed esprimere lo stato iniziale mediante un’altra combinazione.

Nella teoria dei molti mondi questo fatto riveste un’importanza notevole. Infatti, dato che ad ogni autovettore corrisponde il “mondo” in cui l’osservatore va a finire, se si scegliesse un’altra scomposizione cosa accadrebbe? Insomma, perché si sceglie proprio quella scomposizione e non un’altra? Lo stato totale dell’Universo, decomposto in infinite diverse maniere, fornisce infinite diverse “rappresentazioni” dello stesso.

Anche qui le risposte sono state variegata e non sempre convincenti. Alcuni si sono rifatti alla celebre espressione di Bell, e cioè che la fisica dovrebbe essere buona FAPP, ovvero sia “*for all practical purposes*”.<sup>35</sup> Per Vaidman, dato che la scelta di una base univoca non emerge dal formalismo della teoria, allora la

---

<sup>35</sup> “Ordinary quantum mechanics (as far as I know) is just fine for all practical purposes. (...) It is convenient to have an abbreviation for the last phrase: FOR ALL PRACTICAL PURPOSES = FAPP”. Cfr. Bell J. S., *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987, p. 214.

giusta decomposizione dell'universo in "mondi" seguirà dal fatto che il comune concetto di mondo consiste in oggetti in definite posizioni e stati. La base "giusta" discende dunque dalla specifica natura dell'osservatore e dal suo modo di descrivere il mondo: siamo dunque noi e i concetti riguardo al nostro mondo gli elementi che automaticamente porteranno alla scelta della base giusta.<sup>36</sup>

Questa è una spiegazione un po' di comodo: punto centrale di tutto diventa l'osservatore con il suo modo di "vedere" il mondo. La base "giusta" scaturisce da una scelta soggettiva che potrebbe cambiare da osservatore ad osservatore, e il fine stesso della teoria dei molti mondi, cioè quello di inglobare gli osservatori all'interno della teoria stessa cancellando la distinzione che la visione standard rimarcava, viene un po' a vacillare: l'osservatore, in un certo modo, si "stacca" dalla teoria e "modula" il mondo a seconda delle sue categorie. La distinzione tra oggetti osservati e osservatore viene nascosta da un lato ma ritorna dall'altro, quello della decomposizione dell'Universo nei vari mondi.

Comunque ci sono anche altre risposte al problema delle basi preferite, alcune delle quali abbastanza forti e particolarmente discusse. Esse si ricollegano parzialmente a questioni riguardanti la decoerenza e la stabilità del mondo macroscopico.<sup>37</sup>

---

<sup>36</sup> Questa è una delle spiegazioni date da Vaidman e da altri sostenitori della teoria dei molti mondi.

<sup>37</sup> Ad esempio, in Zurek W. H., *Decoherence, Einselection and the Existential Interpretation (the Rough Guide)*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A 356, 1998, pp. 1793-1821, si può trovare una spiegazione molto interessante sul perché gli osservatori (che noi siamo) siano di un particolare tipo e perché essi abbiano quei concetti e categorie per descrivere il mondo nel modo in cui lo fanno solitamente; tutto questo sulla base di analisi a livello fisico sulla struttura delle Hamiltoniane e il valore della costante di Planck. In sostanza si spiega che la località delle interazioni ha come risultato la stabilità dei mondi in cui gli oggetti sono ben localizzati. Il valore estremamente piccolo della costante di Planck permette agli oggetti macroscopici di essere ben localizzati per un periodo di tempo sufficientemente lungo. Dunque questi mondi mantengono la propria struttura stabile per il tempo necessario per essere percepiti e descritti dagli osservatori. Un mondo macroscopico che fosse in una sovrapposizione di stati evolverebbe e cambierebbe in un tempo troppo piccolo per essere percepito, dunque non avrebbe una stabilità necessaria alla sua descrizione. Tutto questo discorso è fortemente legato alla questione della decoerenza in meccanica quantistica.



Per tornare alle obiezioni più generali alla teoria dei molti mondi, una delle più comuni è quella che chiama in causa il famoso “rasoio di Occam”. In effetti, non serve essere un fisico o un esperto filosofo per vedere come, all’interno di questa teoria, le “entità” vengano moltiplicate a dismisura (i mondi in cui si divide l’universo tendono all’infinito, visto che ogni singolo avvenimento può essere considerato un esperimento quantistico).

A difesa della teoria, si può dire che in effetti, dal punto di vista del puro formalismo, è presente la sola equazione di Schroedinger, e dunque è una delle versioni più sobrie della meccanica quantistica. Gli oppositori del collasso della funzione d’onda sosterranno che è proprio la versione standard che introduce elementi *ad hoc*, i quali peraltro fanno nascere dei forti problemi con altre teorie fisiche, come la relatività.<sup>38</sup>

La semplicità del formalismo che viene utilizzato nella teoria dei molti mondi è proprio uno dei motivi che vengono adottati per sostenere questo approccio. In un certo senso, nei discorsi di molti fisici e filosofi aderenti a questa visione è possibile sentire un’inclinazione più o meno velata verso un’idea che vuole vedere la teoria come “utile” e “il più semplice possibile”. E’ un po’ come se, per riuscire nello scopo di sfrondare la meccanica quantistica standard delle sue strutture introdotte *ad hoc* per trattare il problema della misurazione (*in primis*, il collasso della funzione d’onda), sia necessario inevitabilmente appesantirla dalla parte della sua “metafisica”. La moltiplicazione dei mondi è il risultato inevitabile di una semplificazione della struttura formale.

Si ricordi inoltre il fatto che la teoria *many-worlds* ha iniziato ad ottenere un discreto successo anche nel campo della cosmologia, grazie al fatto che

---

<sup>38</sup> Una bella discussione sul tema della località nella teoria *many-worlds* si trova in Vaidman L., *On the paradoxical aspects of new quantum experiments*, Philosophy of Science Association, 1994, pp. 211-217. Inoltre si veda anche Bacciagaluppi G., *Remarks on Space-time and Locality in Everett's Interpretation*, 2001, in T. Placek e J. Butterfield ed., *Non-Locality and Modality*, Kluwer Academic, Dordrecht, 2002, pp. 105-122. <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000504>.

permette in maniera naturale di parlare dello “stato quantistico dell’Universo”, concetto fondamentale della cosmologia quantistica.<sup>39</sup>

C’è anche da dire che, a livello più prettamente filosofico, il motivo che ha portato prima Everett e poi i suoi “seguaci” a formulare teorie che eliminassero il collasso della funzione d’onda, è la volontà di ripristinare una fisica quantistica del tutto causale e deterministica.<sup>40</sup> Non dimentichiamo che è proprio l’aspetto del collasso un punto cruciale che introduce l’elemento statistico nella teoria. Considerare esclusivamente l’equazione di Schroedinger, dunque la parte deterministica della teoria, equivale ad eliminare quell’elemento.

E’ necessario riflettere su questo punto. La teoria dei molti mondi è sempre stata considerata, nell’ampia letteratura scientifica e filosofica dedicata ad essa, un po’ “strampalata”, nel senso di teoria che esce dai canoni della fisica tradizionalmente conosciuta. Sia i sostenitori, sia i detrattori, hanno spesso sottolineato questo aspetto, questa “rivoluzionarietà”. Si badi bene, “rivoluzionarietà” intesa proprio come “allontanamento” dalle teorie “normali”. Questo proprio a causa dell’introduzione di “diversi mondi”, difficilmente “sperimentabili”<sup>41</sup> e più adatti forse ad un racconto di fantascienza che ad una teoria scientifica.

Da questo punto di vista, parlare di “rivoluzione” può anche essere sensato e condivisibile. Parlare però di “rivoluzione” in un senso più ampio, che coinvolge anche il formalismo ed i motivi che hanno indotto a far nascere questa teoria non solo è eccessivo, ma anche profondamente sbagliato.

---

<sup>39</sup> Come abbiamo già sottolineato precedentemente, lo stesso DeWitt ha collaborato con il fisico John Archibald Wheeler e insieme a lui ha formulato l’equazione Wheeler-DeWitt per la funzione d’onda dell’universo.

<sup>40</sup> Lev Vaidman, ad esempio, sostiene con decisione l’affermazione di Einstein: “Dio non gioca a dadi”. Si veda la sua riflessione sul determinismo e la causalità in Vaidman L., *On Schizophrenic Experiences of the Neutron or Why We Should Believe in the Many-Worlds Interpretation of Quantum Theory*, op. cit., p. 249.

<sup>41</sup> Ci sono alcune interessanti proposte su un’eventuale sperimentabilità della teoria “many worlds”. Si veda, ad esempio, l’articolo di Plaga R., *Proposal for an experimental test of the many-worlds interpretation of quantum mechanics*, 1995, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9510007>.

La teoria dei molti mondi, e più in generale la sua “madre ideologica”, la teoria degli stati relativi di Everett, sono teorie profondamente “conservatrici” se confrontate con la meccanica quantistica “tradizionale”, quella standard.

Ciò che emerge da una visione “everettiana” è la forte volontà di riportare la fisica alla situazione precedente alla meccanica quantistica: il formalismo è certo quello quantistico, nel senso che si utilizza l’equazione di Schroedinger e gli spazi di Hilbert, ma l’interpretazione sottostante è tipicamente “newtoniana”. Vengono in un sol colpo cancellati i rivoluzionari concetti di “stocasticità intrinseca”, di “indeterminismo” che le meccaniche quantistiche di Heisenberg, di Bohr e di Schroedinger, pur nelle loro enormi differenze interpretative, avevano introdotto.

Da un formalismo matematico che porta inevitabilmente a sovrapposizioni di stato (l’equazione di Schroedinger è lineare), si finisce per negare completamente la problematicità interpretativa delle stesse, e non si accetta neanche di considerare fondamentale quel carattere probabilistico del tutto evidente negli esiti di esperimenti di fisica microscopica. Questi problemi vengono volutamente “negati”. Si vuole continuare a vedere l’Universo come un’enorme macchina deterministica, fedele alla propria inevitabile evoluzione secondo l’equazione di Schroedinger. La stocasticità che ci appare sotto gli occhi non è in realtà tale: essa è un’illusione. L’Universo è deterministico, il fatto è che all’interno i mondi continuano a dividersi ad ogni esperimento.

In questa visione “classica” della meccanica quantistica, è inevitabile che anche la relazione con il tempo assuma una connotazione “classica”. I principali promotori della visione “everettiana” sostengono che la teoria sia simmetrica per inversione temporale, proprio perché guidata dalla sola equazione di Schroedinger. Dato che è proprio il collasso della funzione d’onda il fenomeno che maggiormente introduce elementi che possono essere considerati irreversibili, sbarazzarsi di esso porta finalmente ad una completa simmetria.

Questa è chiaramente la visione di chi considera l'equazione di Schroedinger simmetrica per inversione temporale. Come abbiamo già visto, questa idea è perlomeno discutibile.

E' evidente che se si accetta la asimmetria temporale dell'equazione di Schroedinger, la teoria dei molti mondi diventa automaticamente asimmetrica.

Ci si può chiedere però se sarebbe vera l'affermazione secondo la quale la teoria è simmetrica per inversione temporale nel caso in cui si sostenesse che l'equazione fondamentale che la regola è simmetrica.

In questo caso avremmo un Universo che, governato dall'equazione di Schroedinger, presenta una caratteristica di reversibilità temporale. Però avremmo anche al suo interno molti "mondi", ognuno dei quali continua a dividersi in tantissimi altri mondi. Sarebbe possibile "invertire" lo *splitting* dei mondi conseguente ad ogni misurazione quantistica?

Dato che ad ogni esperimento si ha una divisione, il problema coinvolge la reversibilità degli esperimenti. Supponiamo di misurare la componente  $z$  dello spin di una particella a spin  $\frac{1}{2}$ . I possibili risultati saranno chiaramente solo due, diciamo "su" o "giù". Nella teoria dei molti mondi, entrambi gli esiti della misura si attualizzano, il primo in un mondo che potremmo chiamare "mondo su" e il secondo in un mondo "mondo giù". Anche l'osservatore iniziale finisce nei due mondi: l'"osservatore su" vedrà la particella con lo spin su e l'"osservatore giù" vedrà la particella con lo spin giù.

Secondo il discorso fatto poco fa circa il significato delle probabilità in questo approccio alla meccanica quantistica, l'"osservatore su" sa che prima dell'esperimento la probabilità di finire nel "mondo su" era  $\frac{1}{2}$ . Adesso che ci è finito, sa che esiste un altro mondo in cui è presente un "doppione" di sé in cui si può vedere una particella con spin giù. La divisione del mondo ormai attualizzata non può più essere portata indietro, cioè non si può più "ricomporre" il mondo iniziale a partire dai due mondi in cui compaiono gli esiti della misurazione, perché questo vorrebbe dire fare in modo che da una

particella che si trova nell'autostato “spin su” si possa ritornare ad una particella in una sovrapposizione di stati “spin su” e “spin giù”.

Se anche supponessimo che questo fosse possibile, cioè se si riuscisse a creare un esperimento che invertisse la direzione di una misurazione riportandoci ad una sovrapposizione di stati iniziale, nella teoria dei molti mondi questo non vorrebbe dire che si tornerebbe al mondo iniziale (in questo caso si avrebbe anche una “ricomposizione” dei due osservatori), ma si creerebbe un altro nuovo mondo, a partire sia dal “mondo su”, sia dal “mondo giù”.

Quale sarebbe dunque il risultato? Si partirebbe da un unico mondo, se ne creerebbero due a seguito della misurazione dello spin, e da questi due, nel tentativo di ritornare al mondo iniziale, compiendo inevitabilmente altre misurazioni, per quanto invertite, nascerebbero altri due mondi. Alla fine ci si ritroverebbe con quattro mondi.

Dunque, la moltiplicazione dei mondi, inevitabile ogni qual volta si compie una misurazione, può essere vista come un “ostacolo” per un'ipotesi di reversibilità temporale della teoria.<sup>42</sup>

### 3.3.2 - *Many minds*

Nel 1988 David Albert e Barry Loewer proposero un'interpretazione diversa della formulazione degli stati relativi di Everett, quella denominata “*many minds*”.<sup>43</sup> La tratteremo molto brevemente, più per curiosità nei confronti di queste “speculazioni teoriche” che per un interesse effettivo per ciò che

---

<sup>42</sup> Si veda un interessante articolo che tratta di “*branched model*” per quanto riguarda lo spazio-tempo quadridimensionale. Per quanto non venga applicato alla teoria *many-worlds* ma ai processi generali di misurazioni quantistiche, si possono trovare analogie con il ragionamento appena fatto. Storrs McCall, *Time flow, non-locality, and measurement in quantum mechanics*, pubblicato in *Time's Arrows Today, Recent Physical and Philosophical Work on The Direction of Time*, F. Savitt ed., Cambridge University Press, 1995, p. 155.

<sup>43</sup> Albert D., Loewer B., *Interpreting the Many Worlds Interpretation*, Synthese, 77, 1988, pp. 195-213.

riguarda la (a)simmetria della teoria. Le riflessioni sul tempo che abbiamo fatto nel paragrafo dedicato alla visione dei “molti mondi” si possono applicare anche a quella delle “molte menti”, senza cambiamenti sostanziali.

Ciò che caratterizza la teoria delle “*many minds*” è la distinzione tra lo stato fisico dell’osservatore, descritto da un’evoluzione deterministica e causale, quella dell’equazione di Schroedinger, e gli stati mentali dello stesso, a cui invece si applica un’evoluzione del tutto indeterministica.

La dicotomia presente nella descrizione quantistica tra equazione dinamica deterministica e risultati di misurazioni probabilistici viene dunque trasferita ad un livello, diciamo così, di “corpo-mente”. Per fare ciò, gli autori hanno associato ad ogni osservatore un numero infinito di menti, e mentre lo stato fisico dell’osservatore, come abbiamo detto, evolve in maniera deterministica, le “menti” evolvono in maniera prevedibile solo a livello probabilistico.

Per capire come “funziona” questo tipo di interpretazione, è utile notare che, a differenza dell’interpretazione dei “*many worlds*”, in cui nel formalismo che descrive il processo di misurazione è presente lo stato del sistema che si vuole misurare e lo stato dell’apparato di misurazione (indicante i “*pointer states*”), nella visione “*many minds*” viene aggiunto un elemento, e cioè lo stato dell’osservatore che descrive determinate “menti coscienti”.

E’ chiaro che questa “aggiunta” aggrava ulteriormente la situazione al livello dell’interpretazione che si deve dare al processo di misurazione: come si ricorderà, se non si assume il collasso della funzione d’onda, dopo una misurazione si è in presenza di stati *entangled* con sovrapposizioni che non si vedono nel mondo macroscopico. Ma mentre nella teoria dei “molti mondi” l’*entanglement* era tra stati del sistema e apparati di misurazione, adesso si ha un *entanglement* tra stati del sistema, stati dell’apparato e stati del cervello.<sup>44</sup>

La situazione si complica.

---

<sup>44</sup> Se ci si fermasse qui, e si sostenesse che la teoria è completa in questo modo, saremmo in presenza di quella che Albert chiama “*bare theory*”, discussa in Albert D., *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press, 1992.

Per ovviare a questo problema, Albert e Loewer propongono due ulteriori assunzioni riguardo alla relazione tra gli stati del cervello e gli “stati mentali” dell’osservatore.<sup>45</sup>

- 1) Gli stati del cervello che corrispondono agli stati mentali dell’osservatore sono associati con un’infinità continua di entità non fisiche chiamate menti;
- 2) Le menti non sono regolate dall’evoluzione di Schroedinger (ad esempio, non seguono il principio di sovrapposizione), ma evolvono nel tempo in modo puramente probabilistico. In una misurazione che coinvolge un osservatore cosciente, è presente una certa probabilità (che è data dalla regola di Born) che ogni mente evolva dallo stato iniziale del cervello  $\Phi_i$  (quello che si ha prima della misurazione) ad uno stato finale  $\Phi_f$ .

Dunque, l’insieme di menti associate allo stato del cervello dell’osservatore evolverà stocasticamente nei vari stati associati alla misurazione: la regola di Born del modulo quadro dei coefficienti darà la probabilità che un set finisca in uno stato o in altri.

L’interpretazione “*many minds*” porta con sé molti problemi interpretativi, esattamente come la teoria “*many worlds*”. Questo è inevitabile, nel momento in cui si postulano entità “non fisiche” come le “menti”, associate ad ogni stato del cervello, che evolvono in maniera *random*. Tutto nasce dal tentativo di dare una spiegazione al formalismo che si ha in seguito ad una misura senza postulare un collasso, o comunque un’eliminazione, dei termini di cui non siamo fisicamente testimoni.

Certo, anche a questa teoria si può applicare il concetto di decoerenza, che in un certo modo può provare a spiegare il problema della “base preferita” (in questo senso le “*many minds*” portano alcuni vantaggi rispetto ai “*many*

---

<sup>45</sup> Albert D., Loewer B., *Interpreting the Many Worlds Interpretation*, op. cit., p. 201.

*worlds*”).<sup>46</sup> Resta il fatto che l’interpretazione fisica delle menti rimane un grosso problema.

Un altro problema, di carattere più filosofico, è il forte dualismo mente-corpo presente nella teoria, che non viene accettato da tutti.<sup>47</sup>

Bisogna anche sottolineare che la teoria è compatibile con la relatività ristretta,<sup>48</sup> cosa che invece non si può dire per alcune interpretazione di collassi istantanei della funzione d’onda (vedi interpretazione di Copenhagen).

Per quanto riguarda il suo “rapporto” con il tempo, esso non è poi così differente da quello tenuto dalla teoria dei “*many worlds*”. La dinamica di Schrodinger viene vista comunque come fondamentale, non si assume alcun collasso della funzione d’onda. Dunque non c’è modo di parlare di simmetria o asimmetria del sistema se non guardando all’equazione stessa di base e, come abbiamo visto, l’equazione di Schrodinger non è simmetrica per inversione temporale. Inoltre, la continua creazione di stati *entangled* tra il sistema, l’apparato di misura e lo stato fisico del cervello rende difficile (se non impossibile) un ritorno ad uno stato fattorizzato iniziale.

### **3.4 - Consistent Histories**

Arriviamo adesso ad una “interpretazione” della meccanica quantistica di estremo interesse, sviluppata abbastanza recentemente. L’idea delle

---

<sup>46</sup> Barrett J., *The Nature of Measurement Records in Relativistic Quantum Field Theory*, in M. Kuhlman, H. Lyre e A. Wayne eds., *Ontological Aspects of Quantum Field Theory*, World Scientific, Singapore, 2002.

<sup>47</sup> Barrett J., *The Many Worlds and Many Minds Formulations of Quantum Mechanics*, 2004, [www.lps.uci.edu/home/fac-staff/faculty/barrett/ManyMindsManyWorlds.pdf](http://www.lps.uci.edu/home/fac-staff/faculty/barrett/ManyMindsManyWorlds.pdf)

<sup>48</sup> Hemmo M., Pitowsky I., *Probability and Non-Locality in Many Minds Interpretations of Quantum Mechanics*, *The British Journal for the Philosophy of Science* 54, 2003, pp. 225-243, si può trovare all’indirizzo <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0112077>; Bacciagaluppi G., *Remarks on Space-Time and Locality in Everett’s Interpretation*, op. cit., Donald J. M., *On Many Minds Interpretation of Quantum Theory*, 1997, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9703008>.



“consistent histories” venne al fisico Robert Griffiths nel 1984<sup>49</sup>, seguito poi da Roland Omnès<sup>50</sup> e ancora più avanti da Murray Gell-Mann e James Hartle nel 1990.<sup>51</sup>

E’ stato detto che questo tipo di “lettura” della meccanica quantistica è una sorta di “interpretazione di Copenhagen corretta”, nel senso che seguendo alcune linee della visione standard introduce comunque dei nuovi aspetti che dovrebbero risolvere alcune questioni aperte.

Questa interpretazione è molto importante per ciò che riguarda il tema trattato in questa sede, dato che gli oggetti fondamentali che compaiono sono degli “insiemi di storie” (*consistent sets of histories*), ovverosia entrano in scena delle, diciamo così, “evoluzioni temporali”.

Il motivo per cui nacque questa nuova interpretazione fu soprattutto quello di dare una risposta ai problemi aperti dall’interpretazione standard per quanto riguarda il significato delle probabilità legate alla misurazione, e inoltre per l’impossibilità, all’interno della visione di Copenhagen, di dare vita ad una cosmologia quantistica.

Come abbiamo visto quando abbiamo trattato l’interpretazione di Copenhagen, la teoria quantistica poteva essere “capita” solo nel momento in cui ci si rifaceva ad un mondo macroscopico esterno di tipo “classico”: essa descriveva sì l’universo atomico, ma, in un certo senso, era necessario impostare un discorso “dualistico” per poter parlare propriamente degli esperimenti in gioco. Eppure, con il passare degli anni, la meccanica quantistica è penetrata sempre di più nel dominio macroscopico, fino ad arrivare al tentativo di descrizione di una cosmologia, attraverso una “funzione d’onda dell’universo”. Come al

---

<sup>49</sup> Griffiths R. B., *Consistent Histories and the Interpretation of Quantum Mechanics*, Journal of Statistical Physics 36, 1984, pp. 219-272.

<sup>50</sup> Omnès R., *Logical Reformulation of Quantum Mechanics*, Journal of Statistical Physics 53, 1988, pp. 893-932.

<sup>51</sup> Gell-Mann M., and Hartle J. B., *Alternative Decohering Histories in Quantum Mechanics*, Proceedings of the 25th International Conference on High Energy Physics, Singapore, August 1990 Phua K. K., Yamaguchi Y. eds., South East Asia Theoretical Physics Association and Physical Society of Japan, World Scientific, Singapore, 1990; Gell-Mann M., Hartle J. B., *Quantum Mechanics in the Light of Quantum Cosmology*, in Zurek W. ed., Complexity, Entropy, and the Physics of Information, Addison-Wesley, 1990, pp. 425-458.

solito, il problema risiede proprio nel passaggio dal “piccolo” al “grande”, nel capire dove sta quel limite (se esiste) che demarca il mondo classico da quello quantistico. L’interpretazione di Copenhagen, e con lei la versione standard, non danno risposte soddisfacenti a tale riguardo.

L’idea delle “*consistent histories*” (così chiamate inizialmente da Griffiths, ma comunemente conosciute come “*decoherent histories*”) è dunque quella di superare alcuni problemi della visione ortodossa, *in primis* quella di tentare di descrivere sistemi quantistici *chiusi*, cioè senza la presenza di osservatori esterni (questo, l’abbiamo intravisto nei paragrafi dedicati alla visione di Everett, è necessario se si vuole fare una trattazione quantistica della cosmologia).<sup>52</sup>

Quindi, in primo luogo, si è provato a capire l’emergenza del mondo classico, con tutte le sue proprietà, da un mondo quantistico più fondamentale, e questo senza ricorrere all’azione di esseri coscienti che osservano (cfr. von Neumann), apparecchi di misurazione o collassi della funzione d’onda. Addirittura, come vedremo tra poco, la funzione d’onda non è più nemmeno considerata un ente fondamentale della teoria, che contiene tutte le informazioni disponibili: molto più importanti sono le “storie di osservabili” (“*histories of observables*”).

I singoli passaggi che bisogna seguire per studiare e conoscere un sistema quantistico chiuso devono adesso essere tutti “completamente quantistici”: non è più ammissibile pensare ad un mondo quantistico (ad esempio la particella la cui energia deve essere misurata) che si comporta seguendo le regole della meccanica quantistica e che, ad un tratto, per sottostare ad una misurazione, deve interagire con un dispositivo classico, che si comporta secondo le regole della meccanica hamiltoniana.

L’idea fondamentale è dunque quella di poter introdurre all’interno della meccanica quantistica il concetto di probabilità a livello di legge fondamentale, ovvero sia assegnare probabilità alle storie di un sistema chiuso, e non come

---

<sup>52</sup> Hartle J. B., *The Quantum Mechanics of Cosmology*, in Coleman S., Hartle J., Piran T., Weinberg S., ed., *Quantum Cosmology and Baby Universes*, World Scientific, Singapore, 1991.

qualcosa di necessariamente legato ad una misurazione compiuta da un osservatore. Si torna, dunque, al vecchio e non risolto problema della misurazione: mentre all'interno dell'interpretazione di Copenhagen si parlava di probabilità legate ai possibili risultati di un esperimento, quindi legando indissolubilmente osservatore ad evento, adesso si tenterà di parlare di una probabilità che esiste e che si può definire a prescindere dalla presenza di un osservatore.

Da notare che uno dei punti messi in rilievo dai fautori di questa nuova visione è stato quello della differenza tra “misurazione ideale”, descritta dal processo di von Neumann e “misurazioni reali”, quelle effettivamente praticate in laboratorio.<sup>53</sup> Mentre le prime prevedono il collasso della funzione d'onda nell'autostato relativo al valore effettivamente misurato dall'apparato macroscopico, le seconde hanno caratteristiche diverse. In generale, le proprietà del sistema misurato vengono modificate profondamente o addirittura distrutte nell'atto di misurazione, eppure il fisico interpreta i risultati che ottiene come valori di alcune proprietà che il sistema aveva *prima* di essere misurato. La conclusione è che la meccanica quantistica standard non fornisce gli strumenti adeguati per maneggiare gli esperimenti reali.<sup>54</sup>

Resta il fatto che la teoria delle “*consistent histories*” si basa su alcuni assiomi che semplificano (e, nello stesso tempo, generalizzano) la visione ortodossa della meccanica quantistica. Come in quest'ultima, anche nella nuova visione i sistemi fisici “vivono” nello spazio di Hilbert, anche se, a livello di rappresentazione, viene utilizzata preferibilmente quella di Heisenberg, in cui sono le osservabili (gli operatori) ad essere governati da un'equazione dinamica. Anche nella teoria delle “*consistent histories*” è presente una formula che permette di calcolare le probabilità delle storie (così come nella visione ortodossa c'era l'interpretazione del modulo quadro dei coefficienti

---

<sup>53</sup> Griffiths R. B., *Consistent Histories and the Interpretation of Quantum Mechanics*, op. cit., Omnès R., *Consistent Interpretations of Quantum Mechanics*, *Reviews of Modern Physics* 64, 1992, p. 339.

<sup>54</sup> Griffiths R. B., *Quantum Mechanics without Measurements*, 2006, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0612065>, pp. 4-5.

dell'espansione della funzione d'onda negli autostati dell'osservabile misurata). Quello che cambia è che non si fa più alcuna differenza tra microscopico e macroscopico, non esiste più una divisione tra sistema da misurare e “ambiente” circostante (divisione fondamentale nella teoria della decoerenza, e che può essere comunque applicata anche in un'interpretazione delle “storie” di osservabili).<sup>55</sup>

Il fatto veramente importante da sottolineare ancora una volta è che non si fa alcun uso della “misurazione”, né del collasso della funzione d'onda. Tenere bene a mente questo è fondamentale, dato che le nostre riflessioni sull'irreversibilità temporale della teoria quantistica trovavano terreno fertile proprio nella natura asimmetrica e sostanzialmente irreversibile del collasso a seguito di una misurazione (o a seguito dell'interazione con altri gradi di libertà del sistema, come abbiamo visto nell'analisi del fenomeno della decoerenza).

In questo caso, ciò che sostituisce il concetto di misurazione è la nozione di “consistenza” (da qui il nome “*consistent histories*”. La locuzione “*decoherent histories*” viene vista solitamente come equivalente, anche se la decoerenza è una richiesta un po' più forte della consistenza), che assegna diverse probabilità alle diverse storie.

Entriamo un po' più nel dettaglio, tentando di mettere in luce gli aspetti più importanti per quel che riguarda la questione dell'(a)simmetria temporale.

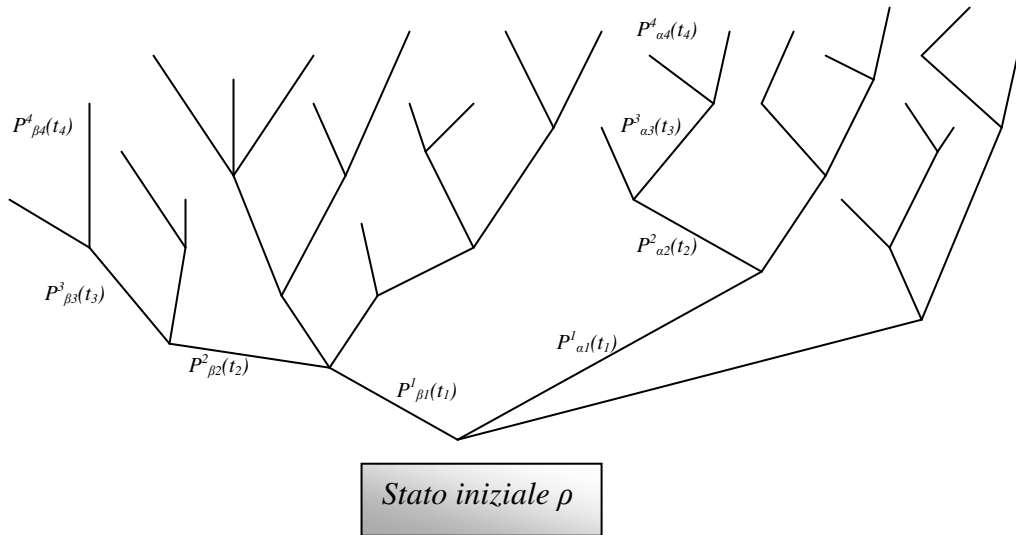
Le “storie” di cui si parla in questa nuova visione della meccanica quantistica sono semplicemente delle “sequenze di possibili alternative” data una successione temporale. Dato che in meccanica quantistica “proposizioni circa le proprietà di un sistema ad un fissato momento  $t$  sono rappresentate da insiemi di operatori di proiezione”,<sup>56</sup> una “storia quanto-meccanica” altro non è che una stringa di operatori di proiezione dipendenti dal tempo, insieme chiaramente ad uno stato iniziale.

---

<sup>55</sup> Bacciagaluppi G., *Probability, Arrow of Time and Decoherence*, 2006, <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00003157>. In corso di pubblicazione su *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*.

<sup>56</sup> Halliwell J. J., *A Review of the Decoherent Histories Approach to Quantum Mechanics*, 1994, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9407040> (trad. it. mia).

A grandi linee, si può raffigurare la situazione tramite il seguente schema (evidentemente questo è il caso che interessa, cioè proprio quello delle “consistent histories”, ovverosia non compaiono interferenze tra le diverse storie):



La probabilità che “accada” una qualunque di queste “storie” è data dalla formula:

$$p(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \text{Tr} \left( P_{\alpha_n}^n(t_n) \dots P_{\alpha_1}^1(t_1) \rho P_{\alpha_1}^1(t_1) \dots P_{\alpha_n}^n(t_n) \right), \quad (1)$$

che è la formula che si conosce dalla meccanica quantistica ortodossa.<sup>57</sup> Ciò che cambia, adesso, è l’interpretazione che si dà a questa formula. Mentre nell’interpretazione standard ad ogni proiettore viene associata una misurazione (e viceversa, nel senso che ogni qual volta si misura qualcosa, il vettore di stato iniziale viene “proiettato” nell’autospazio relativo all’autovalore misurato), e dunque si ha ancora la divisione tra sistema e

<sup>57</sup> La condizione di “consistenza”, il fatto, cioè, che si possa parlare di “consistent histories”, è la richiesta che la parte reale della traccia sia uguale a zero:  $\text{ReTr} \left( P_{\alpha_n}^n(t_n) \dots P_{\alpha_1}^1(t_1) \rho P_{\alpha_1}^1(t_1) \dots P_{\alpha_n}^n(t_n) \right) = 0$  per ogni  $\alpha_i \neq \alpha'_i$ .

osservatore che misura, in questo caso stiamo considerando le probabilità per una sequenza di alternative in un sistema chiuso. Sono le alternative che sono associate ai proiettori, e non subentra nessun tipo di intervento esterno.

La questione della consistenza delle varie sequenze di storie è legata al fatto che la formula della probabilità non soddisfa tutti gli assiomi della teoria della probabilità, in primo luogo non soddisfa il requisito di additività. Questo fatto è legato all'interferenza inevitabilmente presente tra vari insiemi di storie.<sup>58</sup>

Tra alcuni tipi di storie, però, l'interferenza è trascurabile: è in questo caso che si dice che le storie sono consistenti (“*consistent*”).

Senza entrare in particolari tecnicismi, è bene sottolineare l'importanza del ruolo che giocano i *set* di storie consistenti. Ad essi può essere applicata la logica Booleana, dunque in un *set* di storie consistenti, ogni storia corrisponde ad una proposizione sulle proprietà di un sistema fisico che può essere manipolata usando le regole della normale logica classica senza incappare in contraddizioni.

Quindi la teoria delle “*consistent histories*” assegna delle probabilità solamente a quelle “storie” che soddisfano una certa “condizione di decoerenza”, ed è abbastanza naturale capire che una famiglia di storie che descrivono i risultati di una sequenza di misure sarà in generale decoerente, sia che si osservino o che non si osservino gli apparati di misurazione.<sup>59</sup>

Prima di tutto, vediamo come mai il fatto di poter utilizzare la logica classica sia di interesse primario per l'argomento che stiamo trattando in questa tesi.

---

<sup>58</sup> Di solito questa affermazione viene accompagnata dal famoso esempio dell'esperimento della doppia fenditura (“*double slit experiment*”). In questo caso le storie consistono in due proiezioni che avvengono in due tempi diversi: la prima riguarda quale fenditura è stata attraversata dalla particella, la seconda riguarda il punto in cui la particella va a colpire lo schermo posto dietro le fenditure. Si sa bene che la distribuzione di probabilità per le frange di interferenza che compaiono sullo schermo non può essere scritta come la semplice somma delle due distribuzioni di probabilità riguardanti il passaggio della particella per una singola fenditura.

<sup>59</sup> Si veda, a tal riguardo, la trattazione in Gell-Mann M., Hartle J., *Time Symmetry and Asymmetry in Quantum Mechanics and Quantum Cosmology*, in *The Physical Origins of Time Asymmetry*, Halliwell J., Pérez-Mercader J., Zurek W., Cambridge University Press, Cambridge, 1994. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9304023>.

Un esempio interessante a riguardo è quello che tratta della “retrodizione” (“*retrodiction*”) del passato a partire da dati sul presente:

$$p(\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1} | \alpha_n) \equiv \frac{p(\alpha_1, \dots, \alpha_n)}{p(\alpha_n)} = 1 \quad (2)$$

Dunque un’alternativa in un certo istante di tempo implica automaticamente altre alternative nel passato. Si può allora, in meccanica quantistica, parlare di “storia dell’Universo” a partire da ciò che possiamo conoscere adesso, cioè dalle informazioni del presente, usando la logica e la consistenza delle storie. Si può parlare delle proprietà passate dell’Universo anche se non c’era nessun apparato di misurazione che le misurava.

Questo è molto interessante. Attraverso una descrizione che implica insiemi di storie differenti e che utilizza al proprio interno gli strumenti della decoerenza (per quanto con dei distinguo tra decoerenza forte e debole), si è sostanzialmente in grado di parlare di “sequenze temporali” che possono essere anche “retrodette” senza con questo parlare di osservazioni o strumenti di misura. Siamo quindi in presenza di “storie nel tempo”, universalmente valide, non “soggettive”, che descrivono un divenire descritto da delle probabilità. Questo divenire è profondamente legato con l’interazione dei sistemi con l’ambiente che li circonda, esattamente come descritto dalla teoria della decoerenza.

Dunque una descrizione fortemente “temporale”. E’ però una descrizione reversibile? Le due direzioni del tempo, una verso il passato, una verso il futuro, sono equivalenti?

Si può sostenere che non lo sono. Quando abbiamo analizzato la teoria della decoerenza, abbiamo notato che l’interazione con l’ambiente circostante produceva l’eliminazione dei termini di interferenza, e le sovrapposizioni degli stati venivano eliminate portando al collasso in stati ben definiti. In un certo

senso, l'interazione con ciò che sta attorno è una sorta di "misurazione naturale".

Anche nel caso delle "*consistent histories*" si parla di decoerenza, ma non si può più parlare di collasso della funzione d'onda. In questo caso siamo in presenza di una vera e propria teoria "*no collapse*". Adesso la decoerenza ha semplicemente la funzione di "scegliere" quelle sequenze di storie a cui assegnare una certa probabilità. Dunque non abbiamo più la possibilità di utilizzare quel "fenomeno" (quella descrizione) intrinsecamente irreversibile che è il collasso della funzione d'onda.

Si può notare, però, che se si prova a invertire temporalmente la sequenza di storie e si scrive la formula della probabilità (1), l'espressione che ne risulta generalmente non subirà un processo di decoerenza.<sup>60</sup> Dunque la decoerenza si ha solo nel momento in cui si considera un determinato ordine temporale, e non il suo inverso.

In questo senso si può sostenere che sia presente un'asimmetria temporale all'interno della formulazione delle "*consistent histories*", pur senza parlare di collasso della funzione d'onda. Per la precisione si noti comunque che la formula che porta alle probabilità è quella comunque conosciuta dalla meccanica quantistica standard basata sul postulato del collasso. E' vero, quindi, che questa interpretazione della meccanica quantistica è *no collapse*, ma il formalismo matematico per trovare le probabilità è lo stesso di quello previsto dal collasso: la asimmetria è probabilmente dovuta a questa analogia, per quanto l'interpretazione sia poi differente.

Dopotutto abbiamo già avuto modo di sottolineare come la teoria delle "*consistent histories*" sia un "raffinamento" dell'interpretazione standard (in particolare si potrebbe dire dell'interpretazione di Copenhagen). Per quanto si basi su meno assunzioni di base, per quanto tenti di non parlare di "domini

---

<sup>60</sup> Questo vuol dire che la parte reale della traccia non si annulla. Cfr. la nota 57 in questo capitolo.



classici”, di misurazioni e di collassi di funzioni d’onda, l’asimmetria riscontrata nell’interpretazione di Copenhagen qua rimane.

Il vantaggio di questa visione è quello di riuscire, in un certo senso, a “far scaturire” il mondo classico da quello quantistico, continuando a rimanere coerente con i dettami della logica classica, che portavano grossi problemi nell’interpretazione standard. Inoltre, come detto, è un’interpretazione più adatta a parlare di cosmologia quantistica.

Certo è una teoria “riduzionista”. Il suo scopo dichiarato è quello di ridurre il tutto alla meccanica quantistica, vista come teoria di base (con alcuni *caveat* sulla relatività generale, come al solito). Il mondo quantistico viene visto come il “vero” mondo che soggiace e che governa la dinamica della Natura. Questo è un po’ il *leit motiv* di tutte le interpretazioni della meccanica quantistica. La volontà di ricondurre il “mondo classico” a quello quantistico lo si nota nella visione GRW, in quella di Everett, per non parlare della teoria della decoerenza, il cui punto centrale è quello di descrivere l’emergenza del “macroscopico” dal “microscopico”.

Come avevamo notato all’inizio di questo lavoro, la meccanica quantistica ha sostituito quella classica come potenziale teoria di base. Questa è un’ipotesi di lavoro, confortata da alcuni dati sperimentali, ma non necessariamente corretta, come il passato ci insegna.

### **3.5 - Teoria di Bohm dell’onda pilota**

Nel 1952, David Bohm “riscopri” un’intuizione avuta da Louis de Broglie nel 1927, la completò e presentò quella che oggi viene conosciuta come la teoria “de Broglie-Bohm”, o teoria dell’onda pilota.<sup>61</sup> Questa è sicuramente l’esempio più noto di “meccanica quantistica a variabili nascoste”.

---

<sup>61</sup> Bohm D., *A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of ‘Hidden’ Variables, I and II*, Physical Review 85, 1952, pp. 166-193.

Il punto principale della formulazione di Bohm è quello di “completare” in maniera deterministica la meccanica quantistica standard.<sup>62</sup>

La storia riguardo alla possibilità di tale completamento è lunga, complessa e controversa, e non è il caso di proporla in questa sede. Si sappia che per lungo tempo la comunità di fisici ha ritenuto che un “aggiustamento” deterministico della meccanica quantistica fosse impossibile, basandosi su un famoso teorema di John von Neumann.<sup>63</sup>

Ancora oggi, sebbene la teoria di Bohm costituisca un interessante controesempio, molti ritengono che un completamento sia impossibile. In gioco, inoltre, entra la questione della non-località: la teoria di Bohm è inevitabilmente non locale.<sup>64</sup>

Per comprendere il quadro concettuale della teoria, è necessario sottolineare che, a differenza delle altre principali formulazioni della meccanica quantistica (ad esempio quella di Everett, quella di GRW e l’interpretazione stessa di Copenhagen), in questo caso la funzione d’onda  $\Psi$  del sistema non rappresenta la massima conoscenza del sistema stesso. Adesso  $\Psi$  dà delle informazioni, ma non tutte, cioè non permette una descrizione completa del sistema quantistico. Essa, insieme all’equazione di Schroedinger, descrive il moto delle variabili fondamentali, che in questo caso sono le posizioni delle particelle.<sup>65</sup>

---

<sup>62</sup> Questa era anche l’idea di Einstein.

<sup>63</sup> Per approfondire questo punto si veda von Neumann J., *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1955, p. 325. (traduzione inglese del libro del 1932 *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*). Si può leggere :“Non è perciò, come spesso si è assunto, una questione riguardante una re-interpretazione della meccanica quantistica. Il presente sistema della meccanica quantistica dovrebbe essere oggettivamente falso, perché una descrizione dei processi elementari diversa da quella statistica sia possibile.” (trad. it. mia).

<sup>64</sup> Il problema della non-località nella meccanica di Bohm è complesso ed è stato trattato parecchio nella letteratura scientifica. In questa sede non verrà sviluppato. Si consiglia però di dare un’occhiata all’articolo di Berndl K., Durr D., Goldstein S., Zanghì N., *Non locality, Lorentz Invariance, and Bohmian Quantum Theory*, Physical Review a 53, 1996, pp. 2062-2073. Questo articolo si può trovare all’indirizzo internet [www.arxiv.org/ps/quant-ph/9510027](http://www.arxiv.org/ps/quant-ph/9510027).

<sup>65</sup> Il fisico Bell sostenne che “in fisica le sole osservazioni che dobbiamo considerare sono osservazioni di posizione, anche solo se pensiamo ai puntatori degli strumenti di misurazione. E’ un grande merito della teoria de Broglie-Bohm il fatto di forzarci a considerare questo aspetto. Se si producono assiomi, piuttosto che definizioni e teoremi, circa le “misurazioni” o

Anche all'interno di questa teoria, così come vedremo più avanti nella teoria GRW, le variabili di posizione giocano un ruolo fondamentale. Esse sono, in un certo senso, "privilegiate".

Per completare in senso deterministico la meccanica ondulatoria, all'equazione di Schroedinger viene affiancata l'"equazione guida", un'equazione differenziale di evoluzione del primo ordine, al cui interno compare la funzione d'onda e la sua complessa coniugata. Senza entrare nei dettagli tecnici del formalismo, quello che interessa sapere è che la caratteristica "filosofica" interessante della teoria è la sua decisa richiesta che

- 1) tutte le osservabili di un sistema fisico assumano valori precisi, nel momento in cui si fissi lo stato del sistema stesso;
- 2) le variabili "nascoste" siano effettivamente le posizioni delle particelle nello stato iniziale appena preparato. Esse chiaramente devono distribuirsi inizialmente secondo la statistica della meccanica quantistica standard;
- 3) le particelle effettivamente "esistano" e seguano delle traiettorie perfettamente deterministiche.

Il punto 3) è una richiesta che effettivamente rende la meccanica di Bohm molto più "meccanica" nel senso "classico" del termine rispetto alle altre meccaniche quantistiche.

Le obiezioni che sono state mosse a questo tipo di teoria sono molte, e ancora oggi i suoi detrattori sono numerosi.<sup>66</sup>

Come spesso accade, nel momento in cui si introducono in una teoria nuove "entità" (come in questo caso, l'equazione guida o il potenziale quanto-

---

quant'altro, allora si rischia di essere ridondanti e inconsistenti." Cit. da Bell J. S., *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, op. cit., p. 166 (trad. it. mia).

<sup>66</sup> Gli stessi Pauli, Einstein e Heisenberg pubblicarono degli articoli in cui rifiutavano la teoria di Bohm. Una buona analisi di queste critiche si trova in Myrvold W. C., *On some early objections to Bohm's theory*, *International Studies in the Philosophy of Science*, 17, n.1, 2003, pp. 7-24.

meccanico), la prima impressione che si ha è di essere di fronte a modifiche *ad hoc* introdotte semplicemente per “far tornare i conti” e per dar credito ad un certo tipo di metafisica degli autori<sup>67</sup> (vedremo che la stessa critica, sebbene in un contesto teorico opposto, è stata mossa alla teoria GRW).

Dunque la teoria di Bohm risulterebbe più “pesante” della meccanica quantistica standard, presentando delle strutture in più che la renderebbero oltretutto meno elegante. Bisogna però sottolineare un aspetto che spesso non viene riconosciuto abbastanza: è vero che la meccanica di Bohm è più “ricca” nella struttura e nel formalismo della meccanica quantistica standard, ma solo nel momento in cui si è convinti che quest’ultima sia caratterizzata dalla sola equazione di Schroedinger e nient’altro. Questo non è vero. Come abbiamo visto, all’equazione di Schroedinger bisogna aggiungere il postulato del collasso e questa è esattamente una “struttura” in più.

Inoltre i casi che possono presentarsi sono tre: o la meccanica di Bohm prevede deviazioni sperimentali misurabili rispetto agli esiti previsti dalla meccanica quantistica standard, e allora si potrebbe dare una conferma “empirica” maggiormente fondata, o prevede gli stessi identici risultati della teoria ortodossa, e allora non c’è modo di verificare la sua “verità”, o, infine, il suo “campo di applicabilità” è più ristretto e la teoria prevede meno “cose” della meccanica quantistica, e allora potrebbe essere addirittura scartata.

Su questi punti c’è ancora molto dibattito all’interno della comunità scientifica. Alcuni sostengono che i risultati e le previsioni della meccanica di Bohm siano esattamente gli stessi della teoria standard, altri che essa fallisca in alcuni campi.<sup>68</sup>

I sostenitori della teoria pensano inoltre che questa sarebbe riuscita a risolvere il problema della misurazione. In particolare sostengono che, dato che nella

---

<sup>67</sup> E’ innegabile, ad esempio, che la meccanica di Bohm vuole ritornare ad una concezione “classica” della fisica, superando le “stranezze” della meccanica quantistica standard. I sostenitori di questa teoria sono coloro che hanno intenzione di ritornare ad una descrizione del mondo che sia causale e che riporti al centro dell’analisi quelle traiettorie che erano scomparse nella visione di Copenhagen.

<sup>68</sup> Si veda, ad esempio, le questioni affrontate in Cushing J. T., Fine A., Goldstein S., eds., *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: an Appraisal*, Springer, 1<sup>st</sup> Edition, 1996.

meccanica di Bohm le particelle hanno sempre una posizione ben definita, i puntatori degli apparati di misurazione devono per forza avere una posizione ben definita. Dunque, si ritornerebbe ad un situazione “classica”, in cui in effetti il problema della misurazione non si pone.<sup>69</sup>

Insomma, un’analisi adeguata di tutti i problemi connessi all’interpretazione di Bohm ci porterebbe lontano dal problema principale che desideriamo trattare: la simmetria temporale della teoria fisica.

In primo luogo, siamo in presenza di una teoria appartenente al gruppo delle “*no collapse theories*”, dunque il collasso della funzione d’onda, un elemento essenziale per quanto riguarda l’irreversibilità di un processo fisico, non è presente.

Il problema, in questo caso, è rappresentato dal fatto che non si è in presenza della sola equazione di Schroedinger, ma anche della “*guiding equation*”. Per quanto si pensi ancora che l’equazione di Schroedinger sia simmetrica per inversione temporale, adesso si ha a che fare con un’altra equazione che determina l’evoluzione di tutte le posizioni delle particelle. Questa equazione è compatibile con la covarianza galileiana e di inversione temporale dell’equazione di Schroedinger.<sup>70</sup> Il problema, dunque, è ancora lì: l’equazione di guida è un’equazione differenziale del primo ordine rispetto alla variabile temporale, dunque non dovrebbe essere vista come simmetrica per inversione temporale, per lo stesso ragionamento che abbiamo fatto a proposito dell’equazione di Schroedinger. Si ricorderà che uno dei motivi addotti dai sostenitori della simmetria per inversione temporale dell’equazione di Schroedinger era il fatto che la  $\Psi$  del sistema rappresentava un’ampiezza di probabilità e ciò che interessava era il suo modulo quadro. Dunque il passaggio dalla  $\Psi$  alla sua complessa coniugata non veniva visto come un

---

<sup>69</sup> Per un approfondimento del tema della misurazione in meccanica quantistica e, in particolare, nella meccanica di Bohm si rimanda a Wigner E. P., *Review of Quantum Mechanical Measurement Problem*, in Meystre, P., and Scully, M. O., eds., *Quantum Optics, Experimental Gravity and Measurement Theory*, Plenum Press, New York, 1983.

<sup>70</sup> Si veda, a tal proposito, l’articolo di Dürr D., Goldstein S., Zanghì N., *Quantum Equilibrium and the Origin of Absolute Uncertainty*, *Journal of Statistical Physics* 67, 1992, pp. 843-907, sito internet <http://math.rutgers.edu/goldstein/papers/qe.ps.gz>.

problema. Eppure la discussione sulla “realtà fisica” della funzione d’onda è aperta.

All’interno della meccanica di Bohm, la funzione d’onda non viene vista come un elemento della realtà fisica, ma la sua esistenza è “nomologica piuttosto che materiale”.<sup>71</sup> Dunque, la  $\Psi$  del sistema “è una componente della legge fisica, piuttosto che della realtà descritta dalla legge fisica”.<sup>72</sup>

Il ruolo della funzione d’onda è quello di generare il campo vettoriale che definisce il moto effettivo delle particelle, descritto dalla equazione guida.<sup>73</sup> Questo fatto può condurci a pensare come fondamentale, all’interno della teoria, non più la  $\Psi$  del sistema, che, appunto, non riesce più a darci “tutte le informazioni possibili”, ma proprio le posizioni delle particelle descritte dall’equazione guida. Dunque, nell’ambito della teoria di Bohm si ha un’importante *shift* concettuale: si ritorna, in un certo senso, a dare importanza fisica ed infine ontologica a quegli elementi di realtà che erano fondamentali nella fisica classica.<sup>74</sup> Abbiamo la centralità di un’equazione differenziale del primo ordine rispetto al tempo che descrive le posizioni delle particelle: una asimmetria temporale che vede la differenza tra il parametro  $t$  e  $-t$  è presente nel cuore stesso della teoria.

---

<sup>71</sup> Riportiamo l’interpretazione che propongono alcuni tra i maggiori sostenitori e studiosi della meccanica di Bohm: Dürr D., Goldstein S., Zanghì N., *Bohmian Mechanics and the Meaning of the Wave Function*, in Cohen, R. S., Horne, M., and Stachel, J., eds., *Experimental Metaphysics — Quantum Mechanical Studies for Abner Shimony, Volume One; Boston Studies in the Philosophy of Science* 193, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997. Sito internet <http://xxx.lanl.gov/ps/quant-ph/9512031>.

<sup>72</sup> *Ibidem*, p. 10.

<sup>73</sup> *Ibidem*, p. 8.

<sup>74</sup> Questo è il grosso cambiamento che viene spesso sottolineato dagli studiosi della teoria di Bohm. Dalla visione ortodossa della meccanica quantistica che vedeva nella  $\Psi$  del sistema una sostanziale parte della realtà, si è passati alla visione ortodossa di Bohm che metteva sullo stesso piano la  $\Psi$  e la configurazione  $Q$  delle particelle, fino ad arrivare a quella che viene chiamata *Universal Bohmian Theory*, in cui solo la configurazione  $Q$  delle particelle ha piena rilevanza ontologica e risulta così l’elemento realmente fondamentale della teoria. *Ibidem*, pp. 14-15.

### 3.6 - La teoria GRW

In questa parte del capitolo riguardante le varie interpretazioni della meccanica quantistica, ci occuperemo di quelle teorie che prevedono, all'interno del proprio formalismo, il "collasso" della funzione d'onda.

Come abbiamo già ampiamente ricordato, uno dei problemi principali che le teorie quantistiche hanno dovuto affrontare (sin dalla nascita della prima meccanica quantistica) è quello riguardante il "processo di misurazione". Cosa succede nel momento in cui si attua la misurazione, in quel momento in cui, un istante dopo, si possiede un dato sperimentale ben definito? Come abbiamo visto nel paragrafo riguardante la teoria dei molti mondi, in quello specifico caso si è tentato di risolvere il problema dicendo: "avviene esattamente una moltiplicazione di mondi, dunque ogni termine della combinazione lineare iniziale continua ad esistere."

Esistono altri modi di affrontare il problema. Uno di questi è lo sviluppo di quelle che vengono chiamate "*collapse theories*", all'interno del programma DRP (*Dynamical Reduction Process*). C'è una sostanziale differenza tra il modo di concepire il collasso della funzione d'onda all'interno di queste teorie e il modo in cui esso è visto dalla cosiddetta interpretazione di Copenhagen. Come ci si ricorderà, anche all'interno di questa visione della meccanica quantistica (poi in un certo senso "confluita" nell'approccio standard di von Neumann-Dirac) è presente il fenomeno del collasso. Mentre però in questo caso il collasso viene "postulato", cioè, senza una precisa spiegazione fisica, si suppone la riduzione del pacchetto d'onda (si parla infatti di "*postulate of wave packet reduction*"<sup>75</sup>), all'interno delle teorie appartenenti al DRP si cerca di costruire una vera e propria modifica dell'equazione dinamica della teoria standard, aggiungendo dei termini stocastici e non lineari.

---

<sup>75</sup> Dirac P. A. M., *Quantum Mechanics*, Clarendon Press, Oxford, 1948. In generale, ci si riferisce al *wave packet reduction* con l'acronimo "WPR".

Non si parla più, dunque, di “equazione di Schroedinger + riduzione *ad hoc* del pacchetto d’onda” come nella visione standard, e non si parla più nemmeno di “equazione di Schroedinger e basta” come nelle teorie everettiane.

Adesso si parlerà di “nuove equazioni” la cui base sarà chiaramente la solita equazione di Schroedinger, ma da cui “emergerà” in maniera “naturale” e non più postulata senza giustificazioni la natura stocastica degli esperimenti fisici.

Il grande problema che emerge dalla teoria standard è che non solo essa non riesce a spiegare il modo in cui gli apparati di misurazione si comportano per arrivare alla riduzione del pacchetto d’onda, ma soprattutto non riesce ad identificare il limite di applicabilità della meccanica quantistica: dove si trova il confine tra “micro” e “macro” nel caso in cui si supponga che gli “oggetti macroscopici” non si comportino più secondo regole quantistiche? Dov’è il confine tra “lineare” e “non lineare”? E, per quanto ci interessa principalmente in questa sede, dov’è il confine tra “reversibile” ed “irreversibile”? Tutto questo non viene spiegato dalla teoria standard.

Nel momento in cui si suppone che tutti i processi naturali obbediscano a leggi lineari, nella grande maggioranza delle volte dopo una misurazione si finisce in una sovrapposizione di stati macroscopici, cosa evidentemente non in accordo con ciò che vediamo tutti i giorni. Lo scopo delle *collapse theories* all’interno del DRP allora è proprio quello di provare a rompere la linearità della teoria.<sup>76</sup>

La principale *collapse theory*, dalla quale poi sono derivate altre formulazioni con alcune differenze, è la teoria GRW, dalle iniziali dei fisici che l’hanno formulata: Ghirardi, Rimini e Weber. Essa venne presentata nel 1985.<sup>77</sup>

---

<sup>76</sup> Sottolineiamo ancora una volta che la “rottura” della linearità della teoria in questo caso deve avvenire nel formalismo stesso delle equazioni dinamiche, e non in conseguenza di un postulato che si aggiunge in maniera innaturale dopo l’evoluzione lineare dell’equazione di Schroedinger. Dunque, la teoria GRW si può effettivamente considerare un’altra meccanica quantistica, e non semplicemente una “interpretazione” differente, perché le stesse equazioni vengono modificate.

<sup>77</sup> In realtà il primo a pensare al processo di riduzione del pacchetto d’onda in termini di un’equazione differenziale stocastica fu Philip Pearle. Si veda, ad esempio, Pearle P., *Reduction of statevector by a nonlinear Schroedinger equation*, Physical Review, D13, 1976, p. 876, e Pearle P., *Toward explaining why events occur*, International Journal of Theoretical Physics, 18, 1979, p. 489. In questi casi, però, non venne presentata una teoria consistente, e



Come detto, il fine che mosse i tre scienziati era quello di poter arrivare, in una maniera meno *ad hoc*, agli stessi risultati cui si perveniva applicando il WPR durante l'interazione tra il "micro" e il "macro", cioè durante una misurazione sperimentale.

Dato che nella formulazione standard si è in presenza di due "campi semantici" del tutto differenti, il determinismo e la linearità da una parte, dominati dall'equazione di Schroedinger, e la non linearità e la stocasticità dall'altra, spiegati attraverso il postulato della riduzione del pacchetto d'onda, gli autori della teoria pensarono ad una modifica stocastica e non lineare dell'equazione di Schroedinger, proprio per riuscire ad inglobare in essa la stocasticità del collasso.

Il primo problema che GRW si sono posti è stato quello della localizzazione spaziale degli oggetti macroscopici. In effetti, la meccanica quantistica non nega la possibilità di sovrapposizioni lineari di stati "spaziali", ma è evidente che, a livello macroscopico, queste sovrapposizioni non sono rilevate.<sup>78</sup>

La soluzione fu di pensare che ogni singola particella (ogni costituente di un sistema fisico) fosse soggetta, in tempi del tutto casuali, a processi di localizzazioni spaziali spontanei e casuali. Dunque si pensò di dotare la natura di meccanismi che permettessero di definire entro una certa precisione la posizione di una particella in maniera, però, probabilistica.<sup>79</sup> La ben definita

---

gli stati a cui l'equazione dinamica doveva condurre erano stati che dipendevano fortemente dal processo di misurazione in considerazione. Dunque il meccanismo effettivo che avrebbe dovuto spiegare la cosiddetta "macro-oggettivazione" non era ancora chiaro.

La prima formulazione completa e coerente di una teoria del collasso dinamico venne presentata nel 1985. Si veda Ghirardi G. C., Rimini A., Weber T., *A Model for a Unified Quantum Description of Macroscopic and Microscopic Systems*, in *Quantum Probability and Applications II*, Accardi L. Ed., Springer, Berlino, 1985, pp. 223-232. L'articolo a cui si farà riferimento del testo è quello solitamente analizzato nei problemi connessi con la teoria GRW: Ghirardi G. C., Rimini A., Weber T., *Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic System*, *Physical Review*, D 34, 1986, pp. 470-491.

<sup>78</sup> In realtà, come già detto nella nota 51 del capitolo 1, sovrapposizioni di stati macroscopici sono state osservate in laboratorio in esperimenti che utilizzavano gli SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*). Si sono notate correnti che fluivano in versi opposti nello stesso tempo. Per curiosità, si segnala l'articolo *New Life for Schroedinger Cats*, 2000, sito internet <http://physicsweb.org/articles/world/13/8/3>.

<sup>79</sup> "L'idea è che lo spazio-tempo nel quale si svolgono i processi fisici esibisca alcuni aspetti fondamentalmente stocastici, casuali, che si traducono appunto in localizzazioni spontanee dei

localizzazione spaziale degli oggetti di cui tutti noi siamo testimoni avverrebbe dunque in maniera naturale e stocastica, e non sarebbe dovuta alla interazione con altri sistemi fisici, ma sarebbe semplicemente un fondamentale processo naturale.

Per poter descrivere questo fatto, a livello del formalismo, GRW proposero l'introduzione di una funzione gaussiana che, in maniera del tutto stocastica a tempi *random*, andasse a moltiplicare la funzione d'onda della particella. In questa funzione gaussiana è presente un parametro che determina l'accuratezza con la quale viene definita la posizione.<sup>80</sup>

L'integrale del modulo quadro della funzione d'onda moltiplicata per la gaussiana, che deve essere opportunamente normalizzata, indicherà adesso la densità di probabilità spaziale riguardante dove può avvenire il processo di localizzazione. Questo è un punto estremamente interessante: la localizzazione avverrà con maggiore probabilità in quei punti dove, secondo la meccanica quantistica standard, c'è maggiore probabilità di trovare la particella.

Inoltre è importante notare che, all'interno della teoria, oltre al parametro presente nella funzione gaussiana che rappresenta l'accuratezza di definizione della localizzazione, è presente un altro numero che diventa una nuova costante della natura: è la frequenza  $f$  con cui avvengono le localizzazioni. Queste, abbiamo detto, avvengono in tempi *random*, descritti da una distribuzione di Poisson con frequenza media  $f$ .<sup>81</sup>

Una delle critiche che sono state mosse alla teoria GRW riguarda il suo carattere fortemente "fenomenologico". Con le parole del suo stesso creatore, Carlo Ghirardi, si potrebbe sostenere che la teoria "richiede la considerazione di processi che possono sembrare arbitrari, inventati al solo scopo di ottenere

---

microscopici costituenti dell'universo." Cit. da Ghirardi G. C., *Un'occhiata alle carte di Dio*, op. cit., p. 364.

<sup>80</sup> In un sistema di particelle, se la localizzazione tocca alla  $i$ -esima particella, allora la sua funzione d'onda sarà istantaneamente moltiplicata per una funzione gaussiana normalizzata del tipo  $G(q_i, x) = K \exp[-1/2 d^2 (q_i - x)^2]$ . Il parametro  $d$  è proprio quello che determina l'accuratezza con cui viene definita la posizione. Esso per la teoria vale  $10^{-5}$  cm, e assume così il ruolo di nuova costante della natura.

<sup>81</sup> La frequenza media  $f$  vale  $10^{-16}$  s<sup>-1</sup>.

quello che si desidera”.<sup>82</sup> Non è una critica priva di fondamento. Il carattere “fenomenologico” si riscontra anche nell’introduzione delle due nuove costanti che, nel caso in cui si scegliesse la teoria come fondamentale, dovrebbero diventare costanti universali della natura, al pari, ad esempio, della costante di attrazione universale.

Inserire delle nuove costanti universali in una teoria è sempre un processo che viene visto con particolare sospetto dalla comunità scientifica, dato che c’è sempre il rischio che l’introduzione sia dovuta proprio alla volontà di “far tornare i conti”.

Sono state mosse anche altre obiezioni tra cui la più interessante riguarda le cosiddette “code” della funzione d’onda nella rappresentazione delle coordinate. Non si vuole qui analizzare il problema, rimandando ad articoli che affrontano precisamente la questione.<sup>83</sup>

Un altro aspetto che ha sollevato alcune obiezioni riguarda il fatto di aver considerato le variabili spaziali come “fondamentali”. GRW hanno cioè considerato in primo luogo le localizzazioni spaziali, giustificando questa scelta con l’evidente presenza di oggetti spazialmente determinati attorno a noi. Questo non porta alla cancellazione dei fenomeni di interferenza a livello microscopico che sono una caratteristica peculiare della natura quantistica, ma porta a quella che viene definita “macro-oggettivazione”, cioè ad una oggettivazione macroscopica di proprietà quali la stabilità delle variabili di posizione, nel momento in cui i costituenti microscopici di un oggetto sono in numero consistente.<sup>84</sup> In questo caso è dunque vero che la scelta di pensare alla posizione come variabile privilegiata può essere considerata una scelta *ad*

---

<sup>82</sup> Ghirardi G. C., *Un’occhiata alle carte di Dio*, op. cit., p. 375.

<sup>83</sup> Cordero A., *Are GRW Tails as Bad as They Say?*, Philosophy of Science, Proceedings of the 1998 Biennial Meetings of the Philosophy of Science Association. Part I: Contributed Papers. Vol. 66, 1999, pp. 59-71. Albert D. Z., Vaidman L., *On a Proposed Postulate of State Reduction*, Physics Letters, A139, 1989, pp. 1-4.

<sup>84</sup> Per una trattazione della “stabilità” delle variabili di posizione per gli oggetti macroscopici spiegata attraverso il programma di riduzione dinamica, si veda Ghirardi G. C., Grassi R., Benfatti F., *Describing the Macroscopic World – Closing the Circe within the Dynamical Reduction Program*, Foundations of Physics, 25, 1995, p. 5.

*hoc*, ma nello stesso tempo è una scelta che, nell'economia della teoria, porta a dei risultati notevoli nel difficile campo della giustificazione del passaggio da un mondo microscopico "indeterminato" ad un mondo macroscopico "determinato" ed "oggettivo".

La teoria è indeterministica a livello fondamentale e questo fatto è molto rilevante per la questione del tempo che stiamo analizzando in questo lavoro.

Per poter provare a capire se la teoria GRW possa essere vista come una descrizione di un mondo reversibile o irreversibile, si può partire proprio dalla questione del suo indeterminismo fondamentale.

Il fatto che la teoria GRW sia intrinsecamente indeterministica (come la teoria "standard" di von Neumann, anche se caratterizzata da un indeterminismo formalmente e concettualmente diverso) è rilevante per il suo rapporto con la questione della simmetria temporale.

Possono essere individuati due tipi di indeterminismo, descrivibili mediante due "topologie" differenti. Entrambi sono chiaramente caratterizzati dall'impossibilità di predire con certezza lo stato futuro di un sistema nel momento in cui si conoscono le condizioni iniziali. Ma mentre il primo è reversibile, dato che per uno stato iniziale che ha di fronte un *range* di futuri differenti si può sempre tornare indietro con certezza proprio allo stato iniziale a partire da uno qualunque dei futuri, il secondo è temporalmente irreversibile, perché descritto da diverse condizioni iniziali che danno diversi stati finali. Leggere lo svolgersi dell'evento fisico in una direzione mette in mostra un indeterminismo altrettanto marcato di quello relativo alla direzione inversa.

E' da notare, come hanno già evidenziato alcuni studiosi, che l'indeterminismo in fisica si manifesta esclusivamente nella seconda forma "topologica" descritta sopra.<sup>85</sup>

Dunque, in una teoria genuinamente indeterministica come quella GRW, si è nella situazione di avere dei risultati statistici di un esperimento che sono

---

<sup>85</sup> Per un trattazione approfondita, si veda Dolev S., Elitzur A. C., Hemmo M., *Does Indeterminism Give Rise to an Intrinsic Time Arrow?*, 2001, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101088>.

insufficienti per costruire la funzione d'onda iniziale. Siamo cioè nel caso in cui, “tornando indietro”, si avrebbe la possibilità di incontrare diversi “stati iniziali”.

Come giustamente è stato fatto notare, anche nelle teorie *no collapse* i risultati finali, comunque di carattere statistico, non permetterebbero di risalire univocamente alla condizione iniziale, ma si dà il caso che, senza la presenza di un collasso, la funzione d'onda è comunque costantemente regolata dall'equazione di Schroedinger. Si noti che, come al solito, stiamo considerando come valida l'idea secondo la quale l'equazione di Schroedinger sia simmetrica per inversione temporale. Come mostrato, questa idea presenta molti “lati oscuri”.

Dunque le teorie indeterministiche diventano le migliori candidate per un'eventuale irreversibilità intrinseca delle equazioni dinamiche. Alcuni sostengono che l'indeterminismo sia una condizione necessaria per una fisica “temporale”, in cui una direzione del tempo privilegiata scaturisca dalla dinamica stessa.<sup>86</sup>

Si deve sottolineare, però, che l'irreversibilità a cui si rifanno i sostenitori di tale idea è quella termodinamica. Essi sono riusciti a trovare il modo di connettere la teoria GRW alla teoria termodinamica, arrivando poi alla formulazione della seconda legge della termodinamica.<sup>87</sup>

Questa è una visione molto valida che connette l'irreversibilità all'entropia, in modo tale che non si parli di condizioni iniziali o finali di un determinato sistema. E' una visione che però, ancora una volta, può essere ritenuta “parziale”, dato che in letteratura ormai sono presenti diverse “frecce del tempo” oltre a quella termodinamica. In questa sede noi ci vogliamo limitare alla irreversibilità formale di una teoria, e alla possibilità che questa

---

<sup>86</sup> Elitzur A. C., Dolev S., *Is There More to T?*, 2002, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0207029>; Dolev S., Elitzur A. C., *Indeterminism and Time Symmetry are Incompatible: Reply to Rebilas*, Physics Letters A, Volume 266, pp. 268-270; ; Dolev S., Elitzur A. C., *Black Hole Evaporation Entails an Objective Passage of Time*, Foundations of Physics Letters, Volume 12, n° 4, August 1999, pp. 309-323.

<sup>87</sup> Albert D., *The Foundations of Quantum Mechanics and the Approach to Thermodynamic Equilibrium*, British Journal for the Philosophy of Science, 45, 1994, pp. 669-677.

irreversibilità formale rispecchi poi una irreversibilità *de facto*, non necessariamente correlata a frecce del tempo termodinamiche o cosmologiche. In questo senso la teoria GRW è un ottimo esempio di teoria fondamentalmente stocastica che presenta una irreversibilità che nasce dalla dinamica stessa.

## CAPITOLO 4

### MECCANICA QUANTISTICA E COMPLESSITÀ

All'interno del dibattito sulla *sfida della complessità*,<sup>1</sup> nell'analisi delle nuove caratteristiche e dei cambiamenti che, negli ultimi decenni, hanno portato a parlare di scienze complesse, il tema dell'irreversibilità gioca un ruolo centrale. Uno dei punti focali che caratterizza la riflessione sulla complessità è il ritorno di una consapevolezza storica, è l'importanza di riprendere in considerazione la temporalità dei processi in esame, siano essi fisici, biologici o sociali.<sup>2</sup>

A lungo questa temporalità è stata negata, o perlomeno ignorata, a favore di visioni statiche, in cui il fluire del tempo, il sentire un prima e un dopo, fosse concepito come un semplice dispiegamento di una necessità a-temporale.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Cfr. Ceruti M., *Il vincolo e la possibilità*, Feltrinelli, 1986, p. 43; Ceruti M., Bocchi G., a cura di, *La sfida della complessità*, Feltrinelli, Milano, 1985 (ristampa Mondadori 2007).

<sup>2</sup> Si vedano i saggi di Prigogine I., Morin E., Ceruti M., Gould S. J., all'interno del volume *La sfida della complessità*, op. cit. Si veda inoltre Stengers I., *In nome della freccia del tempo: la sfida di Prigogine*, in *Cosmopolitiche*, Luca Sassella Editore, 2005.

Un'analisi di estrema importanza di questa visione complessa si trova in Morin E., *La Methode I. La Nature della Nature*, Le Seuil, Paris, 1977; tr. it. parz. *Il Metodo. Ordine, disordine, organizzazione*, Feltrinelli, Milano, 1983.

<sup>3</sup> Ceruti M., *Il vincolo e la possibilità*, op. cit., pp. 37 e seguenti.

Questo fatto è probabilmente il risultato dell'idea di poter trovare delle "leggi" che potessero descrivere determinati fenomeni. Nel campo della fisica questo è particolarmente evidente. Le leggi della fisica classica sono state interpretate come "a-temporali" non per una semplice questione di carattere matematico, ma soprattutto per l'ideale che *a priori* ha portato alla nascita di queste stesse leggi: un ideale che rispecchiava la volontà di trovare delle descrizioni svuotate da qualsiasi legame con l'osservatore che le stava formulando, vicine il più possibile al punto di vista infinito di Dio.<sup>4</sup>

Forse è proprio la cesura operata tra osservatore e sistema osservato il risultato (e la causa) della rimozione dell'idea di direzione temporale dalle scienze naturali. L'idea che lo scorrere del tempo fosse un'apparenza soggettiva e, dunque, un "disturbo", ha portato a creare delle situazioni sperimentali che allontanassero il più possibile le eventuali influenze dell'osservatore, ponendo dunque in essere dei processi che potevano essere descritti per mezzo di equazioni simmetriche per inversione temporale.

Questo fatto ci fa comprendere come le "convinzioni metafisiche" che guidano la ricerca hanno un impatto fondamentale sui risultati della ricerca stessa. Quelle leggi che i fisici classici definivano "oggettive" erano in realtà il risultato di manipolazioni dell'esperimento (dunque di una "natura artificiale") che seguivano da riflessioni e convinzioni sul carattere delle leggi naturali.

Se accettiamo questa posizione, dobbiamo avere l'onestà di affermare che anche il programma di ricerca che si propone di riscoprire l'irreversibilità muove da delle sicurezze che nascono *prima* di un qualunque esperimento fisico. L'idea di Prigogine, quella cioè di riformulare le leggi della dinamica classica e quantistica incorporando in esse elementi di irreversibilità, dunque rendendole asimmetriche per inversione temporale, è un'idea che muove sì dall'evidenza di fenomeni irreversibili nel mondo reale, ma che soprattutto

---

<sup>4</sup> Stengers I., *Perché non può esserci un paradigma della complessità*, pubblicato in Ceruti M., Bocchi G., a cura di, *La sfida della complessità*, op. cit., pp. 37-59.



nasce dalla volontà del premio Nobel di vedere formalizzate alcune sue convinzioni.

Il fatto che l'irreversibilità macroscopica possa essere letta come un fatto probabilistico, che scaturisce da una fisica microscopica reversibile, non è per nulla in contrasto con le leggi attuali che descrivono i fenomeni naturali. E, in realtà, è anche un'idea difficilmente provabile sperimentalmente: se la probabilità che mescolando del caffè e del latte si dividano chiaramente la regione in cui c'è il latte da quella in cui c'è del caffè è una probabilità bassissima, come faccio a sapere se il mio costrutto teorico è "vero" (nel senso che lo posso sperimentare) oppure no? Quando si afferma che l'eventualità che il calore si propaghi spontaneamente da un corpo freddo ad un corpo caldo non è impossibile, semplicemente esiste una probabilità infinitesima, come si fa a sapere che quello che si sta dicendo è vero? In genere ci si basa sulla struttura delle leggi microscopiche che soggiacciono ai suddetti processi. Eppure queste sono quelle stesse leggi che sono nate da una generalizzazione di un'analisi di esperimenti creati e modellizzati rispondendo ad una necessità di simmetria. E' un gatto che si morde la coda: se si ha in mente di descrivere la natura in termini simmetrici per inversione temporale, tutti i passaggi per arrivare all'enunciazione delle leggi saranno regolati da tale programma, e in ogni caso si riuscirà a trovare una spiegazione per quei fenomeni che si "staccano" da una tale descrizione (in questo caso i fenomeni macroscopici termodinamici).

Non solo. Pensare che l'irreversibilità macroscopica sia regolata da leggi microscopiche più fondamentali comporta un'assunzione riduzionista secondo la quale esiste una gerarchia di "livelli della realtà", primo dei quali è "il più piccolo".

Tutto questo è stato messo in discussione dalle riflessioni sulla complessità. Per quanto riguarda le leggi fisiche, si è sostenuto che una divisione netta tra osservatore e sistema non poteva essere operata, e che ad una fisica a-temporale andava sostituita una fisica che integrasse al proprio interno la forza di una descrizione storica. La storicità delle leggi della fisica segue

naturalmente dalla richiesta di non trascurare l'osservatore: la fisica è fatta nella storia, attraverso processi temporali, essa dunque non può prescindere da essi, li deve per forza *descrivere*.

Per ciò che interessa invece la gerarchia dei "livelli di realtà", il "pensiero complesso" ha messo subito in discussione e criticato il pensiero riduzionista presente fra le discipline e all'interno delle discipline stesse.<sup>5</sup> Abbracciando la tesi di una "compenetrazione" tra i diversi programmi di ricerca e di una attività dialogica tra punti di vista differenti,<sup>6</sup> i sostenitori dello studio complesso hanno sempre rigettato la possibilità che diversi aspetti della realtà potessero essere descritti da un unico punto di vista, più fondamentale di altri, a cui tutto doveva essere "ridotto". Così come è stato fortemente criticato il tentativo di basare le descrizioni delle scienze sociali su paradigmi tipici delle scienze naturali (tentando di rendere "più dure" quelle discipline), così può essere criticato il modo di tentare di ridurre una branca della fisica ad un'altra, pensando che una necessariamente sia più fondamentale di un'altra.

Come abbiamo visto nei primi paragrafi del capitolo due, la fisica possiede parecchie branche proprio perché ha utilizzato, nel corso del suo sviluppo, diversi modi di interrogare la natura in diversi domini. Se esiste la meccanica classica è perché si è deciso di studiare un insieme di determinati tipi di moti, di una certa grandezza, in certi ambienti specifici. La termodinamica è scaturita da analisi su sistemi differenti, che sono stati guardati con occhi, e dunque strumenti, differenti. Le equazioni e le quantità in gioco sono diverse: pensare che una disciplina debba per forza essere spiegata nei termini dell'altra non è per forza naturale. E' la conseguenza di una volontà di unificazione che è un legittimo presupposto metafisico di molti scienziati. Legittimo ma criticabile.

---

<sup>5</sup> Cfr. Ceruti M., *La hybris dell'onniscienza e la sfida della complessità*, pubblicato in Ceruti M., Bocchi G., a cura di, *La sfida della complessità*, op. cit., pp. 1-24.

<sup>6</sup> Morin E., *Le vie della complessità*, in Ceruti M., Bocchi G., a cura di, *La sfida della complessità*, op. cit. p. 27-36.

Per dirla tutta, però, è un legittimo presupposto metafisico anche la volontà di evitare accuratamente ogni forma di gerarchizzazione e di riduzionismo. La stessa idea di complessità è un presupposto metafisico, è un'esigenza che scaturisce dall'evidenza che determinate discipline, chiudendosi nei loro compartimenti, hanno finito per dare una descrizione della natura che viene considerata settaria, astratta, poco "reale".

Per tornare al discorso sull'irreversibilità, c'è, è vero, una certa "evidenza" rispetto al tempo che scorre, ma questa evidenza può essere spiegata come un'illusione, come infatti è stato fatto.<sup>7</sup> Dire che questo è sbagliato, che invece il tempo va descritto all'interno delle stesse equazioni, è un nobile programma di ricerca, ma, in un certo senso, equivalente al programma di ricerca che si era posta la fisica degli inizi. In quei tempi, ci si era posti l'obiettivo di trovare leggi eterne, immutabili, a-temporali. Adesso ci si è posti l'obiettivo di trovare leggi con uno statuto epistemologico differente. Leggi "storiche". Addirittura non più leggi, ma "vincoli", che garantiscono l'emergenza di proprietà del sistema che a loro volta determinano altri vincoli.<sup>8</sup> E' un programma affascinante, ricco di spunti e di sorprese, ma non necessariamente "sostituente" il programma della fisica classica.

In un'ottica complessa, i due programmi dovrebbero essere visti come "antagonisti e complementari". Ci si pone di fronte alla Natura con occhi differenti rispetto a quelli classici, ma non "migliori". Sono occhi che riusciranno a vedere alcune cose che prima non si riuscivano a vedere, ma è probabile che ci saranno zone in cui saranno molto più miopi rispetto agli occhi classici.

Quello che si vuole sostenere è che si commetterebbe un grosso errore se si pensasse che con le idee di Prigogine (per rimanere nell'ambito di questa tesi, quello fisico. Chiaramente il discorso può essere allargato a molti altri autori

---

<sup>7</sup> Si ricordi sempre Einstein, cfr. la nota 5 del capitolo 2.

<sup>8</sup> Un'interessante analisi della legge come vincolo si trova in Ceruti M., *Il vincolo e la possibilità*, op. cit., pp. 127 e seguenti; si veda anche Prigogine I., Stengers I., *La Nuova Alleanza*, op. cit.

della complessità) si costruisce un sistema che elimina quelli del passato, che li sostituisce. O, addirittura, si creano strumenti che “contengono” quelli precedenti e ai quali questi si devono ridurre. Si cadrebbe nello stesso errore che gli esponenti della complessità denunciano: si porterebbe avanti una idea di struttura gerarchica dei saperi, un’idea progressiva della conoscenza, per la quale ci staremmo avvicinando ad un punto “privilegiato” (il punto della verità oggettiva?).

Con la rivoluzione prigoginiana (rivoluzione peraltro poco accettata negli ambienti accademici, ma pur sempre di rivoluzione si tratta, dal momento che ha costretto ad affrontare di petto alcune questioni inevase) non si deve intendere che i residui delle meccaniche classica e quantistica sono stati spazzati via, sostituiti dalla riformulazione “temporale” della fisica. Questo non è accaduto, e non deve accadere. La fisica di Prigogine può affiancare la fisica tradizionale, può prendere spunto da essa e a sua volta essere di esempio. Può raggiungere questioni prima inaccessibili e può dare spiegazioni di fenomeni nuovi. Ritenere, però, che la fisica classica fosse “sbagliata” rispetto a quella di Prigogine può sconfinare in un atto di arroganza, che tradisce lo spirito stesso del pensiero complesso.

La fisica di Prigogine è una fisica che è stata costruita con occhi diversi, tutto qui. Come sostenuto prima, è difficile dimostrare, a livello scientifico, che il tempo effettivamente esiste e scorre da un passato ad un futuro. Possiamo appellarci alle nostre sensazioni, al fatto che si invecchia e che non si diventa spontaneamente più giovani, al fatto che il disordine, in un sistema chiuso, cresce spontaneamente. Sono sensazioni fondamentali, che hanno un’importanza estrema. Ma che possono anche essere sconfitte da riflessioni sulla matematica e sull’interpretazione delle teorie fisiche. Chi ha ragione, Boltzmann con la sua visione probabilistica della crescita dell’entropia, o Prigogine con la sua freccia del tempo reale e “creatrice”? Per ora (in futuro non si sa) è difficile dirlo. Ma il problema non sta nel dire chi ha ragione, chi è nel giusto e chi sta sbagliando tutto. Il problema è essere capaci di trovare

descrizioni significative di ciò che ci sta attorno nelle teorie che formuliamo. E' essere consapevoli che ogni teoria è stata fatta da persone che partivano da convinzioni proprie, più o meno giuste, più o meno criticabili, che hanno condotto a descrivere *un aspetto* della natura, non certo tutti.

Dunque, quello che si può fare (e che si è provato a fare nello sviluppo di questa tesi), è di rileggere la teoria quantistica con occhi diversi. C'è da dire, però, che coloro che vogliono leggere la meccanica quantistica con occhi "irreversibili" partono con un leggero vantaggio. E il vantaggio consiste proprio nella forma dell'equazione di Schroedinger. Lavorando su di essa abbiamo notato come un'irreversibilità di fondo sia presente già a livello dei fondamenti della meccanica quantistica. In questa tesi abbiamo visto come, *matematicamente*, l'equazione di Schroedinger sia non simmetrica per inversione temporale, *nel momento in cui si utilizzi la trasformazione di inversione temporale che si è sempre usata, e cioè il cambiamento da  $t$  a  $-t$* . Questo fatto non è suscettibile di interpretazioni, per quanto ancora oggi venga poco riconosciuto. Come abbiamo visto, i sostenitori della simmetria temporale dell'equazione di Schroedinger non applicano semplicemente la trasformazione di inversione temporale, ma devono per forza aggiungere un altro cambiamento, la coniugazione complessa della funzione d'onda.

A questo punto entrano in campo aspetti di carattere interpretativo sul significato della funzione d'onda, *ma solo a questo punto*. Dunque le interpretazioni sono fondamentali, e il discorso della simmetria temporale di una teoria poggia sostanzialmente su argomentazioni interpretative, ma l'irreversibilità matematica dell'equazione fondamentale della teoria quantistica è un dato di fatto.

Avendo messo bene in chiaro questi punti, provare a "riscoprire" l'importanza del tempo all'interno delle scienze fisiche significa superare un certo tipo di riduzionismo e di meccanicismo fisico. Significa soprattutto cercare di fornire una visione alternativa della Natura. Provare a dimostrare che la meccanica quantistica non è simmetrica per inversione temporale non porta

necessariamente ad un tempo inteso come luogo di creazione e di costruzione in senso proprio, come cercava di mostrare Prigogine con le sue riflessioni sulla termodinamica del non equilibrio e sulle strutture dissipative.

In realtà, la non simmetria della meccanica quantistica è importante per iniziare a vedere questa branca della fisica come “potenzialmente complessa” per quanto riguarda il suo rapporto con il tempo. Se vogliamo avere delle descrizioni fisiche del mondo che contemplino una differenza tra passato e futuro, una differenza sostanziale tra una direzione del tempo e la sua opposta, la meccanica quantistica può essere una buona candidata, senza andare a cercare modifiche fondamentali al formalismo della teoria.

L’irreversibilità della meccanica quantistica si manifesta nell’equazione di Schroedinger e nella natura probabilistica delle sue previsioni. Il *vincolo come possibilità*, idea fondamentale del pensiero complesso, è presente in maniera sbalorditiva nella teoria quantistica, ed è strano che questa sia stata “oscurata” dalla teoria del caos quale teoria paradigmatica delle scienze complesse. Senza voler togliere nulla all’importanza concettuale della teoria del caos, la meccanica quantistica presenta delle caratteristiche molto meno “ortodosse” (nel senso della fisica classica).

Mentre la teoria del caos descrive comunque un determinismo di fondo, che però non porta a previsioni certe dopo un lasso di tempo più o meno lungo a causa della forte sensibilità alle condizioni iniziali, la meccanica quantistica rompe con il determinismo in una maniera molto più radicale e più fondamentale.

Come abbiamo visto, la meccanica quantistica è intrinsecamente probabilistica, anche nelle interpretazioni in cui si è cercato di ripristinare il determinismo: per quanto si cerchi di nascondere l’indeterminismo utilizzando espedienti come i “molti mondi”, anche nella teoria di Everett (per prendere la teoria quantistica “deterministica” per eccellenza) è necessario considerare lo *split* dei mondi in senso probabilistico.

Il determinismo non è semplicemente legato ad una equazione differenziale: è vero che l'equazione di base della teoria quantistica è quella di Schroedinger, e questa descrive l'evoluzione deterministica della funzione d'onda. Ma non basta. Si può pensare che l'equazione di Schroedinger sia proprio il "vincolo" a cui deve sottostare il sistema nella sua evoluzione temporale, ma che questo vincolo apra a delle possibilità intrinseche alla funzione d'onda che si manifestano nella sua struttura matematica e che si realizzano a seguito di una misurazione.

In generale, si possono conoscere solo i possibili risultati che una misurazione può dare: è come se l'informazione inscritta nella  $\Psi$  del sistema dovesse viaggiare sui binari descritti dall'equazione regolativa, pur questa costrizione non implicando un determinismo di stampo classico, ma una preparazione all'"esplosione" delle diverse possibilità nel momento in cui si mette in atto la misurazione.

Rimanendo nell'ambito della meccanica quantistica standard, è fondamentale sottolineare il fatto che è la misurazione, cioè l'*atto fisico*, che apre il sistema alle possibilità potenziali che trasporta.

La meccanica quantistica è una teoria incredibilmente innovativa da questo punto di vista. L'indeterminismo che descrive non è un fatto esclusivamente matematico. La possibilità di conoscere le probabilità dei vari esiti di misurazioni attraverso la conoscenza dei moduli quadri dei coefficienti dello sviluppo della funzione d'onda negli autostati dell'osservabile in questione, non è una questione legata solamente al formalismo. Queste probabilità diventano attuali dopo un processo di misurazione. La teoria ci dice che ogni funzione d'onda è espandibile nei termini di un set completo di autovettori dello spazio di Hilbert in cui si lavora. Quando decidiamo di compiere una misurazione, quando decidiamo quale osservabile misurare, è in quel momento che dobbiamo scegliere come espandere la  $\Psi$  del sistema. Ed è solo dopo l'esperimento che, tra le varie possibilità, se ne manifesterà soltanto una.

Dunque, in questo caso, è centrale la questione della misurazione, ovverosia della decisione *personale* di misurare una determinata variabile e della messa in atto effettiva di questa misurazione. In fisica classica questo non avveniva, e non poteva nemmeno avvenire. Il sistema assumeva tutti i valori descritti dalle equazioni del moto in tempi ben definiti, parlare di misurazione era del tutto superfluo: la misurazione era necessaria per venire a conoscenza, fisicamente, di quel valore che già era stato previsto dalle equazioni. Adesso nella teoria quantistica *non si può parlare di risultato di una misurazione se non si associa la misurazione stessa*: non può esserci una conoscenza del sistema se non c'è l'atto che, fisicamente, mi fa interagire con esso. Il massimo che possiamo avere sono le varie possibilità di una certa misura, niente di più.

E' anche per questo motivo che la meccanica quantistica è una visione della natura "complessa", che si stacca dai paradigmi della fisica classica. Non è una teoria "inumana",<sup>9</sup> tutt'altro: essa necessita dell'uomo per poter avere informazioni su qualunque sistema. E' una teoria molto *reale* (non necessariamente realistica), nel senso che nel proprio DNA ha inscritta la necessità della presenza dell'osservatore per definire i valori che un'osservabile del sistema può assumere.

E' proprio in questo contesto che si inserisce la riflessione sul tempo oggetto di questa tesi. Mentre per la fisica classica, sostanzialmente meccanicistica (ricordiamo ancora: a livello interpretativo. La fisica classica è meccanicistica perché è stata creata con delle mani meccanicistiche e perché viene letta in termini meccanicistici), il tempo non doveva avere importanza, proprio perché si voleva costruire una fisica che rispecchiasse una Natura meccanica, e dunque "senza tempo", per la meccanica quantistica risulta più difficile nascondere l'importanza della direzione temporale.

C'è il rischio di cadere in una visione troppo soggettivista, come denunciava Prigogine? Se lo scorrere temporale quantistico è legato alle scelte e agli atti fisici che compie l'osservatore, non si potrebbe concludere che il tempo è

---

<sup>9</sup> Come sosteneva Prigogine, cfr. *La fine delle certezze*, op. cit., p. 17 e seguenti.



semplicemente un “accidente psicologico”, un’illusione, come sosteneva Einstein?

Io credo che, in questo caso specifico, soggettivismo e realismo non debbano essere per forza visti come visioni antagoniste. Dopotutto sono solo delle classificazioni filosofiche, spesso un po’ troppo semplificatrici. Sostenere che esiste un tempo che scorre là fuori, indipendentemente dalla presenza di un osservatore, è una posizione filosofica, non scientifica, nel senso che non può essere “provata” sperimentalmente. Cercare un modo per “vedere” il tempo che scorre implica inevitabilmente la presenza dell’osservatore, per quanto possibilmente a diversi livelli dell’esperimento. Tutto quello che sappiamo sulla Natura, lo sappiamo perché lo “analizziamo” tramite esperimenti, perché “veniamo a contatto” con essa. Questo fatto non può permetterci in maniera certa di concludere che il tempo esiste solo come accidente psicologico, e non può permetterci di concludere con sicurezza che il tempo esiste indipendente dall’osservatore. Ciò che possiamo dire è che il tempo *si manifesta in ogni nostro atto libero*, come detto, in ogni nostra *osservazione*, intesa nel senso più generale possibile.

Il tempo, se letto con gli occhi della teoria quantistica, diventa inscindibilmente legato al nostro agire e, a sua volta, il nostro agire si sviluppa nel tempo, in una continua scelta non deterministica tra diverse possibilità.

L’irreversibilità dell’equazione di Schroedinger aiuta e rende più plausibile questa visione delle cose, dato che mostra una differenza tra una direzione temporale e l’altra: l’equazione di Schroedinger è fatta dall’uomo, e riflette al proprio interno quel dispiegarsi temporale in una certa direzione.

La famosa frase di S. Agostino rimane più vera che mai:<sup>10</sup> il tempo lo si *sperimenta*, non lo si definisce a priori: ecco perché tempo e uomo non

---

<sup>10</sup> “Quid est ergo tempus? Si nemo ex me quaerat, scio; si quaerenti explicare velim, nescio.” Cfr. Sant’Agostino, *Le confessioni*, XI, 14. Sant’Agostino, poco dopo, scrive: “In te, anime meus, tempora metior” (XI, 36) e, in un certo senso, si avvicina a quello che si sta sostenendo nel testo: il tempo si misura a partire da sé, dal proprio spirito. Se non c’è l’osservatore, e dunque non c’è misurazione, diventa ancora più problematico parlare di tempo.

possono essere divisi, ecco perché non c'è tempo senza uomo e non c'è uomo senza tempo.

La stessa dimensione temporale biblica, il tempo che scorre verso una fine, verso una completezza, verso appunto una “fine dei tempi”, ovverosia dei tempi vissuti da ogni uomo, è una dimensione fatta per l'uomo. Esiste un dispiegamento temporale che ogni uomo vive o, meglio, proprio perché vive, l'uomo produce un dispiegamento temporale che lo porta verso una meta.

La meccanica quantistica, nelle sue diverse interpretazioni, è riuscita a raffigurare questa idea molto meglio della meccanica classica, proprio grazie al suo indeterminismo strettamente legato all'atto di misurazione.

All'interno della fisica e della scienza in generale esistono senz'altro tempi diversi. Come abbiamo visto, esistono riflessioni su frecce del tempo di tipo cosmologico, di tipo termodinamico, di tipo gravitazionale, di tipo biologico. La teoria dell'evoluzione si basa su storie che vivono in un tempo, o in tempi differenti.

In questo lavoro non ci siamo occupati di questi altri tipi di direzioni temporali. E' importante notare, però, che ognuna di esse si basa su dei principi differenti, e difficilmente se ne può trovare una più fondamentale di altre. Nel capitolo tre abbiamo visto come si possano trovare dei legami, per quanto incompleti, tra la freccia del tempo quantistica e quella termodinamica, soprattutto nell'ambito delle teorie *collapse* come la GRW. Abbiamo visto come, in un certo senso, si possa associare l'indeterminismo intrinseco della teoria GRW con la crescita dell'entropia di un sistema.

Questo è importante, ma non deve condurci su una strada sbagliata. Come detto all'inizio di questo capitolo, non è per forza necessario cadere in un'ottica riduzionista, in cui una forma di pensiero debba essere più fondamentale di altre. Anche in questo caso, non è detto che si possa ridurre le varie frecce del tempo ad una più fondamentale di altre. Possono esistere *altri tempi*, oltre a quello “quantistico”.

Il tempo ritenuto da molti “più fondamentale” è quello termodinamico.<sup>11</sup> La crescita dell’entropia di un sistema chiuso sembra indicare una direzione temporale privilegiata, sembra disegnare un confine tra passato e futuro. Anche Prigogine era convinto che da qui bisognasse partire, e che proprio attraverso la termodinamica (nel momento in cui si studiavano sistemi lontani dall’equilibrio) si potesse spiegare la potenza creatrice del tempo, lo sviluppo di strutture ordinate, di quell’organizzazione necessaria alla vita.

La differenza tra la termodinamica e la meccanica quantistica risiede, oltre che, naturalmente, nel dominio di applicazione e i vari formalismi, soprattutto nel ruolo che viene dato all’osservatore. Da ruolo attivo, quale quello dell’osservatore quantistico, si passa ad un ruolo maggiormente classico, cioè non fondamentale, dell’osservatore termodinamico.

Il “realismo” con cui Prigogine voleva infarcire le sue teorie fisiche (compresa, come abbiamo visto, la meccanica quantistica), puntava proprio alla richiesta che la freccia del tempo esistesse a prescindere dall’esistenza di un uomo che la potesse sperimentare. L’universo si è evoluto in questo modo e sulla Terra è potuta nascere la vita proprio grazie al tempo e alla sua azione creatrice.

Ecco allora un esempio di quello che si è scritto poco più sopra: l’esistenza di tempi diversi, *qualitativamente* diversi. Non c’è dubbio che l’irreversibilità dell’equazione di Schroedinger possa portare a pensare che, se si vuole la meccanica quantistica come teoria fondamentale, allora una direzione

---

<sup>11</sup> Eddington era convinto dell’importanza suprema della seconda legge della termodinamica, quella che riguarda l’aumento dell’entropia di un sistema chiuso. “The law that entropy always increases (..) holds, I think, the supreme position among the laws of Nature (..) If your theory is to be found to be against the second law of thermodynamics I can give you non hope; there is nothing to it, than to collapse in deepest humiliation”. Cfr. Eddington Sir A. S., *The Nature of the Physical World*, Cambridge University Press, 1931, p. 74 (Macmillan, New York, 1929). La seconda legge della termodinamica era inevitabilmente collegata alla freccia del tempo, come si capisce da quello che Eddington scrisse poche pagine prima: “I shall use the phrase “time’s arrow” to express this one-way property of time which has no analogue in space. It is a singularly interesting property from a philosophical standpoint. We must note that (i) It is vividly recognised by consciousness (ii) It is equally insisted on by our reasoning faculty which tells us that a reversal of the arrow would render the external world nonsensical (iii) It makes no appearance in physical science except in the study of organization of a number of individuals. Here the arrow indicates the direction of progressive increase of the random element.” (p. 69). Il “*random element*” di cui parla Eddington è proprio ciò di cui parla la seconda legge della termodinamica.

temporale deve essere inscritta nell'universo fin dalla sua nascita. Però abbiamo anche visto che ciò che ha *significato* per noi avviene a seguito di una misurazione. La differenza qualitativa tra i due tempi (quello di Prigogine e quello della meccanica quantistica standard) è manifesta probabilmente proprio nel campo di significato che entrambi hanno per l'uomo. Il tempo di Prigogine può aiutare a trovare una spiegazione per un'irreversibilità esistente anche prima della nascita dell'uomo, di un'irreversibilità che ha contribuito a far nascere l'uomo, ma è anche un tempo, a mio avviso, maggiormente "filosofico", sostanzialmente distante dallo spazio e dal tempo *di oggi*. Il suo significato per l'uomo, cioè per colui che fa fisica, è diverso e di gran lunga meno importante del significato che riveste il tempo fisico della meccanica quantistica. "Sperimentare" il tempo di Prigogine vuol dire andare a misurare determinati fenomeni, vuol dire andare ad analizzare le biforcazioni che avvengono nei sistemi lontani dall'equilibrio. Per misurare l'irreversibilità, dunque, ho bisogno di intervenire sul sistema, ho bisogno di misurare, ho bisogno di agire su di esso. E allora perché non si può pensare che queste biforcazioni non siano il risultato di un'applicazione dei principi quantistici ai fenomeni in esame? Il tempo umano, quello che si riveste di un senso per noi, non è quello che esperiamo direttamente?

Se da un lato Prigogine voleva un'irreversibilità indipendente dall'osservatore, dall'altro voleva formulare una fisica più "umana", nel senso che il tempo, la storia, potessero essere iscritte, e non cancellate, nelle descrizioni fisiche fornite dalle teorie.<sup>12</sup> Eppure queste due mete che si era proposto sono, in un certo senso, in contrasto tra di loro. Come si fa ad allontanare l'osservatore dalla teoria per renderla più umana? Non può essere questo il modo, a mio avviso, di tornare a dare valore alla libera scelta dell'essere umano. Se la libera scelta, ovvero la suprema libertà dell'uomo, si esplica nel tempo, allora la meccanica quantistica diventa una buona candidata per diventare, diciamo così, una "teoria della libera scelta".

---

<sup>12</sup> Prigogine I., *La fine delle certezze*, op. cit., pp. 19 e seguenti.

Si avverte un certo stridore tra gli appelli dei teorici della complessità a riguardo dell'inevitabile coinvolgimento dell'osservatore nelle teorie scientifiche (coinvolgimento che porta con sé un'inevitabile contingenza storica, dunque una limitazione della presunta universalità dei risultati di leggi deterministiche), e il pensiero guida di Prigogine circa una fisica che si slegi da un certo "soggettivismo".

Qua la questione non può essere ridotta alla contrapposizione tra soggettivismo e realismo. Qua dobbiamo essere consapevoli del fatto che tutte le volte che otteniamo informazioni su ciò che ci circonda (non solo tramite esperimenti fisici, ma includendo qualunque interazione) ci siamo di mezzo noi, noi e il nostro fare, pensare, agire. Questo non è necessariamente bieco "soggettivismo": la fisica la facciamo noi, i dati degli esperimenti li leggiamo noi. Anche se un telescopio spaziale raccoglie informazioni su fatti che avvengono a miliardi di anni luce di distanza, affinché queste informazioni abbiano un senso devono essere lette da noi (addirittura si pensi che siamo noi che abbiamo costruito il telescopio, e non è un'osservazione di poco conto).

Si può senz'altro sostenere, senza sperimentare nulla, che in una stella lontana avvengono quei processi irreversibili che permettono di definire una freccia del tempo, ma siamo ancora nell'ambito di una scienza che ha fatto delle sperimentazioni il suo punto di forza? Oppure non siamo, per caso, nell'ambito di speculazioni filosofiche, generalizzazioni plausibili e utili, ma con uno statuto scientifico differente?

Quando Einstein chiedeva, a proposito della teoria quantistica, se davvero si poteva credere che la Luna esistesse solo nel momento in cui la si guardava, poneva una domanda interessantissima, ma che forse andrebbe riformulata in una maniera differente. Non è importante chiedersi se la Luna esiste oppure no quando non la guardo (e forse non ha neanche molto senso chiederselo), ma chiedersi quando e come quella Luna acquista un senso fisico per me, essere umano pensante ed osservante.

E in effetti la Luna acquista un senso fisico proprio nel momento in cui la guardo (in senso lato, come al solito). E non è per forza necessario “vederla”: notare una perturbazione orbitale di un corpo celeste dovuto alla eventuale presenza della Luna dà comunque un senso fisico alla Luna, proprio perché io interpreto quei dati in quella determinata maniera.

Insomma, la nostra interazione con la realtà non può essere più trascurata, e la meccanica quantistica lo dice benissimo. Non lo dice solo a riguardo dell’inevitabile perturbazione dei sistemi da parte dell’osservatore, ma anche, più fondamentalmente, a riguardo della nostra decisione personale di decidere che osservabile misurare, e dunque come espandere la funzione d’onda. Ecco che allora, così come l’osservatore deve essere preso in considerazione per i risultati di esperimenti, così deve essere preso in considerazione, e non cacciato, per ciò che riguarda il fluire del tempo.

## CONCLUSIONI

La meccanica quantistica è stata una delle più profonde rivoluzioni nella storia delle scienze naturali e fisiche. Sono stati versati fiumi di inchiostro, giustamente, per descrivere e sottolineare l'impatto sconvolgente che ha avuto su tutte le teorie classiche preesistenti. Espressioni come "indeterminismo intrinseco", "funzione d'onda", "relazioni di incertezza", sono diventate oggetto di analisi tecniche e filosofiche e sono finalmente entrate, più o meno, nel linguaggio comune della scienza.

Un aspetto di grande interesse e importanza, studiato non solo da Prigogine ma anche da altri fisici e filosofi della fisica, è quello riguardante il ruolo che il tempo gioca all'interno della teoria. Purtroppo questo tema ha portato con sé anche parecchia confusione, e troppo spesso è stato affermato che il tempo in meccanica quantistica non è poi così "differente" dal tempo in meccanica classica.

In questo lavoro si è provato a dimostrare che, a differenza di quello che molti pensano nella comunità scientifica, il tempo, in meccanica quantistica, assume uno *status* diverso da quello che aveva in fisica classica.

Ilya Prigogine analizzò accuratamente il problema del tempo in ogni aspetto della fisica, apportando anche notevoli contributi a livello filosofico. I suoi lavori più conosciuti riguardano la termodinamica dei processi lontani

dall'equilibrio, e lo studio dei fenomeni caotici in fisica classica. Le conclusioni a cui giunse sono di estrema importanza per meglio comprendere il problema dell'irreversibilità in fisica e, come abbiamo visto, toccano diverse questioni: dalla inevitabile indeterminazione delle condizioni iniziali, al crollo del concetto di traiettoria; dal passaggio ad una descrizione statistica di problemi solitamente formalizzati in termini di "individualità deterministiche", allo studio degli "attrattori" nei fenomeni caotici.

Forse sono leggermente meno note le riflessioni di Prigogine sulla meccanica quantistica, per quanto queste abbiano poi tracciato la strada a filoni di ricerca tuttora in espansione. Nel capitolo due di questo lavoro abbiamo tentato di chiarire ciò che il premio Nobel pensava della meccanica quantistica e della sua simmetria a livello temporale. Abbiamo visto come egli fosse intenzionato a modificare la meccanica quantistica standard, perché convinto di una sua simmetria temporale fondamentale e, dunque, di un suo rapporto con il tempo del tutto analogo a quello della fisica classica.

Non siamo entrati nei dettagli tecnici delle modifiche apportate dal gruppo di Bruxelles e da quello di Austin, non essendo questo il tema specifico di questo lavoro, ma è stata data comunque un'idea: l'intenzione era quella di uscire dallo spazio di Hilbert e utilizzare il *Rigged Hilbert Space* (o tripletta di Gelfand).

Queste modifiche così profonde della meccanica quantistica sono giustificate? E' stata questa la domanda che ci ha accompagnato nello sviluppo di questa tesi. Davvero era necessario provare a cambiare la struttura della teoria quantistica a causa di un "comportamento temporale" in contrasto con l'irreversibilità "evidente" in natura?

Ciò che Prigogine criticava era il legame indissolubile tra la probabile irreversibilità dell'atto di misurazione (il collasso della funzione d'onda) e la presenza di un osservatore. Egli voleva una meccanica quantistica *fondamentalmente* irreversibile: cioè che fosse tale anche in assenza di osservatori. Queste riflessioni, come abbiamo visto, scaturivano dalla



convinzione che l'equazione di Schroedinger fosse reversibile per inversione temporale, e che dunque il problema dell'irreversibilità fosse al più riconducibile al "dualismo" evoluzione temporale della funzione d'onda / processo di misurazione.

Pure nella inevitabile incompletezza e limitatezza di questa tesi (ad esempio, non è stato analizzato il tema degli operatori di tipo tempo che alcuni fisici hanno provato ad introdurre nella teoria, eliminando così la caratteristica parametrica del tempo tradizionale), abbiamo visto che la meccanica quantistica non è così facilmente invertibile a livello temporale così come lo sono le equazioni della fisica classica.

Abbiamo visto come sia l'equazione fondamentale della teoria, l'equazione di Schroedinger, sia la dinamica stessa legata all'atto di misurazione, permettano di concludere che non si può parlare di una possibile "simmetria temporale".

Non solo l'impossibilità di invertire il tempo, lasciando la dinamica immutata, è dovuta alla importantissima questione della indeterminazione delle condizioni iniziali (argomento che può essere usato con successo anche nell'analisi della simmetria temporale della fisica classica). Non solo, come abbiamo provato a dimostrare nel secondo capitolo di questo lavoro, l'equazione fondamentale della teoria, l'equazione di Schroedinger, non è simmetrica per inversione temporale, e dunque siamo in presenza di un "fatto matematico" che nega una reversibilità formale, a differenza delle equazioni della dinamica classica. Ma, forse più profondamente, l'impossibilità di invertire il tempo è legata al nuovo significato fisico ed epistemologico del processo di misurazione. L'atto fisico che permette di misurare una quantità "quantistica" è sostanzialmente diverso dalla misurazione classica. Nella meccanica quantistica standard, la misurazione permette l'attuazione di una fra le tante potenzialità racchiuse nella funzione d'onda, e la permette in modo probabilistico. Essa non è più una banale "prova" di ciò che era stato formalizzato nelle equazioni: l'evento non è "già lì" così come era "già lì"

nella fisica classica. L'evento quantistico ancora non c'è, finché non si decide cosa e come misurare.

Questo ha un'enorme importanza per quanto riguarda la questione temporale. Come abbiamo visto, il tempo è legato al ruolo attivo e consapevole dell'osservatore, è legato alla sua decisione di interagire con ciò che lo circonda (in qualunque senso).

La meccanica quantistica permette di guardare all'uomo e alla sua azione attiva con occhi completamente diversi rispetto a quelli del passato. Anche riguardo agli aspetti della decoerenza, per quanto si provi a sottolineare come l'emergenza del mondo classico da quello quantistico sia dovuta alle interazioni del sistema con l'ambiente circostante, e dunque, in un'ottica "collapse", il collasso della funzione d'onda avvenga anche in assenza di un qualunque osservatore, il vero e proprio *risultato fisico* lo si ottiene nel momento in cui si registra un dato, cioè nel momento in cui una misura, da parte dell'uomo, viene attuata.

Siamo davvero in presenza di una "frattura epistemologica": la meccanica quantistica standard permette di riconsiderare la *storia*, la presenza dell'osservatore nel suo ruolo attivo di *misuratore*, abbandonando l'idea "classica" di una realtà esterna separata ed indipendente dall'uomo. L'idea prigoginiana di rendere fondamentalmente irreversibile la teoria ha riportato, consapevolmente o meno, ad una siffatta divisione, per quanto all'interno di una concezione diversa della simmetria temporale. Nel voler risolvere il "problema del tempo", Prigogine ha, in un certo senso, eliminato parzialmente l'aspetto davvero rivoluzionario della teoria quantistica: il ruolo dinamico dell'uomo, che definisce in prima persona ciò che misura, che porta con la sua attività tutto il carico di irreversibilità temporale e che, secondo le visioni più estreme, crea egli stesso la "realtà" che si manifesta.

Il "paradosso della misurazione" in meccanica quantistica è tale solo nel momento in cui lo si legge con gli occhi di chi vuole pensare comunque ad una realtà indipendente dall'osservatore. La dinamica della misurazione

quantistica è “paradossale” perché rompe in maniera “classicamente poco accettabile” l’evoluzione temporale dell’equazione di Schroedinger. Tutti i tentativi atti a “risolvere” questo fatto così fastidioso sono stati portati avanti proprio da chi riteneva improbabile che il collasso della funzione d’onda, e dunque la definizione di un risultato definito a seguito di una misurazione, fosse così inscindibilmente legato alla presenza dell’osservatore. Ma questo vuol dire, appunto, leggere la meccanica quantistica con occhi classici, così come, in un certo modo, fece Prigogine.

Se si prova, invece, ad abbandonare l’idea di un risultato di una misurazione indipendente da chi lo “prepara” e lo “legge”, ecco che la meccanica quantistica ci regala un formalismo davvero “profondo”: è nella teoria stessa, nella sua struttura fondamentale, che è inserito il ruolo attivo dell’osservatore. Nella dinamica quantistica è inscritta l’azione ormai non più trascurabile dell’uomo. E, dunque, all’uomo diventa inestricabilmente legato anche lo scorrere del tempo e la sua irreversibilità.

Insomma, non esiste più un mondo che *è* e che viene racchiuso in equazioni atemporali. Esiste piuttosto un mondo che *si svela* agli occhi dell’uomo nel momento in cui l’uomo interagisce con esso, e, soprattutto, si svela in modo indeterministico, dipendente anche da ciò che l’uomo stesso decide di “voler vedere”.

La rivoluzionarietà della meccanica quantistica sta soprattutto qui, la sua irreversibilità intrinseca è evidente nelle equazioni e nella presenza del ruolo attivo dell’uomo all’interno del formalismo stesso della teoria. E questo aspetto la dovrebbe fare entrare di diritto nell’alveo delle scienze complesse, di quelle scienze che si distaccano dal paradigma classico, che riscoprono il valore del tempo, della contingenza e della libera scelta dell’uomo.

## APPENDICE

Si consideri l'equazione di Schroedinger per una particella materiale di momento  $p$  e massa  $m$  in assenza di potenziali esterni (ci mettiamo nel caso unidimensionale, semplificando così la notazione. In seguito  $\hbar=1$ ):

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{i}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \quad (1)$$

Soluzione di questa equazione è la seguente onda piana:

$$\Psi(x,t) = A e^{i(px-Et)} \quad (2)$$

Concentreremo le nostre riflessioni sulla semplice onda piana, per quanto, in generale, data la "localizzazione" del punto materiale, ad esso si associ piuttosto un pacchetto d'onde della forma

$$\Psi(x,t) = \int dp \cdot c(p) e^{i(px-Et)}$$

Per quanto riguarda la nostra analisi, comunque, questa differenza non è influente.

Vediamo come cambia la forma dell'equazione di Schroedinger nel momento in cui si opera un'inversione temporale. Se si utilizza il semplice cambiamento di segno del parametro  $t$ , otteniamo:

$$-\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \frac{i}{2m} \frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} \quad (3)$$

La soluzione  $T\Psi$  dell'equazione di Schroedinger temporalmente invertita è:

$$T\Psi = Ae^{i(px+Et)} \quad (4)$$

Dunque è una soluzione differente rispetto a quella che si ottiene con l'equazione "normale". Questa è una prima differenza che balza agli occhi rispetto al comportamento dell'equazione fondamentale di Newton. In quel caso, applicando la trasformazione di  $t$  con  $-t$  la forma dell'equazione non cambia, e dunque le soluzioni dell'equazione "normale" e di quella temporalmente invertita sono esattamente uguali.

Esaminiamo adesso la questione della coniugazione complessa.

E' del tutto evidente che operando anche la coniugazione complessa oltre al cambiamento di segno del parametro  $t$ , la forma dell'equazione di Schroedinger non cambia:

$$\begin{aligned} \frac{\partial\Psi}{\partial t} = \frac{i}{2m} \frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} \xrightarrow{t \rightarrow -t} -\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \frac{i}{2m} \frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} \xrightarrow{i \rightarrow -i} -\frac{\partial\Psi}{\partial t} = -\frac{i}{2m} \frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} \\ \Rightarrow \frac{\partial\Psi}{\partial t} = \frac{i}{2m} \frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} \end{aligned}$$

Dunque, la soluzione dell'equazione di Schroedinger temporalmente invertita e coniugata è esattamente la (1). Ecco perché i sostenitori dell'operatore  $T^*$  (cioè l'operatore  $T$  insieme all'operatore di coniugazione complessa) quale operatore di inversione temporale concludono che la teoria è simmetrica.

Spostiamoci adesso sul versante delle funzioni d'onda e degli operatori energia e momento.

Se ad una particella libera con momento  $p$  viene associata l'onda piana (1), alla particella temporalmente invertita dovrebbe essere associata la seguente onda piana

$$T\Psi(x, t) = \Psi(x, -t) = Ae^{i(-px+Et)} \quad (5)$$

avendo supposto che, invertendo il segno del tempo, anche il segno del momento debba cambiare di segno (cosa che avviene in meccanica classica).

Nell'articolo del 1932 Wigner propone quale operatore di inversione temporale la coniugazione complessa. In effetti, se applicata alla funzione d'onda (1), la coniugazione complessa porta ad una nuova funzione analoga alla (5).

Questo fatto, lungi dall'essere una conferma dell'ipotesi di Wigner, è piuttosto una conferma della bontà di utilizzare ancora, anche per la meccanica quantistica, l'operatore  $T$  (cioè il semplice cambiamento di segno del parametro temporale) come operatore di inversione temporale.

Tutto torna, a patto che si supponga che, in seguito all'evoluzione temporale, *anche il momento della particella cambi di segno.*

Ma, allora, perché viene ancora utilizzato l'operatore di coniugazione complessa? Uno dei motivi, analizzati nel capitolo due di questo lavoro, è la questione dell'energia. Si sostiene che l'energia di una particella temporalmente invertita non debba cambiare di segno (ancora una volta, è evidente la riflessione in analogia con la meccanica classica: l'energia di una

particella libera è  $p^2/2m$ , dunque il cambiamento del segno del momento dovuto all'inversione temporale non influenza il valore dell'energia).

Eppure, è presente un errore concettuale nell'applicazione degli operatori energia e momento alla funzione d'onda dopo l'inversione temporale.

Come è noto, l'operatore energia ha la seguente forma:

$$H = i \frac{\partial}{\partial t} \quad (6)$$

mentre l'operatore momento è

$$P = -i \frac{\partial}{\partial x} \quad (7)$$

Se si applica l'operatore energia alla funzione d'onda temporalmente invertita  $T\Psi$  (5), si ottiene la seguente equazione agli autovalori:

$$H(T\Psi) = -E(T\Psi) \quad (8)$$

ovverosia il nuovo valore dell'energia della particella è adesso  $-E$ , proprio quello che non si voleva.

Per risolvere questo problema, ancora una volta i sostenitori della simmetria temporale ottenuta mediante cambiamento di segno del parametro  $t$  e coniugazione complessa, propongono di utilizzare come funzione d'onda temporalmente invertita la seguente:

$$T^* \Psi(x, t) = \Psi^*(x, -t) = A e^{i(px - Et)} \quad (9)$$

Infatti, in questo caso, si ottiene:

$$H(T * \Psi) = E(T * \Psi) \quad (10)$$

L'errore, però, sta nel fatto di aver applicato, nella (8), alla funzione  $T\Psi$ , l'operatore  $H$ , cioè l'operatore energia *non invertito temporalmente*.

Se vogliamo vedere cosa accade nella meccanica quantistica temporalmente invertita, non possiamo invertire solamente la funzione d'onda, ma anche gli operatori fondamentali.

L'operatore energia invertito è

$$TH = -i \frac{\partial}{\partial t} \quad (11)$$

L'operatore momento temporalmente invertito è:

$$TP = -i \frac{\partial}{\partial x} \quad (12)$$

Quest'ultimo, come è evidente, non cambia forma, non dipendendo dalla variabile temporale  $t$ .

Adesso è facile verificare che:

$$TH(T\Psi) = E(T\Psi) \quad (13)$$

$$TP(T\Psi) = -p(T\Psi) \quad (14)$$



Cioè nella teoria temporalmente invertita il valore dell'energia della particella non cambia mentre il segno del momento sì, cioè si ottengono proprio quei risultati che ci aspettiamo dall'analogia con la meccanica classica.

Non è dunque necessario andare a scomodare la coniugazione complessa: l'importante è essere consapevoli che non possiamo invertire temporalmente solo alcuni oggetti e lasciare inalterati altri. Se modifichiamo anche gli operatori, e se applichiamo gli operatori temporalmente invertiti alle nuove funzioni temporalmente invertite, i risultati tornano.

Altra questione, più filosofica, è quella della forma dell'operatore momento, che non dipende dalla variabile  $t$ . Alcune interessanti ricadute di questo fatto sono state analizzate nel capitolo due del presente lavoro.

## **BIBLIOGRAFIA**

AA. VV., *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: an Appraisal*, Cushing J. T., Fine A., Goldstein S., (eds.), Springer, 1<sup>st</sup> Edition, 1996.

AA. VV., *Complessità e biologia*, a cura di Pier Mario Biava, Bruno Mondadori, Milano, 2002.

AA. VV., *Filosofia della fisica*, a cura di Boniolo G., Bruno Mondadori, Milano, 1997.

AA. VV., *La sfida della complessità*, a cura di Bocchi G., Ceruti M., Feltrinelli, Milano, 1985 (nuova edizione Bruno Mondadori, Milano, 2007).

AA. VV., *Physical Origins of Time Asymmetry*, Halliwell J. J., Pérez-Mercader J., Zurek W. H., (eds.), Cambridge University Press, 1996.

AA. VV., *Quantum Theory and Measurement*, Ed. Wheeler J. A., Zurek W. H., Princeton Series in Physics, 1983.

AA. VV., *The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, eds. DeWitt B. S. e Graham N., Princeton University Press, Princeton, 1973.

AA. VV., *Time's Arrows Today, Recent Physical and Philosophical Work on the Direction of Time*, Savitt S. F. ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1995.

Albert D., *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press, 1992.

Barbour J., *The End of Time. The Next Revolution in Physics*, Oxford University Press, Oxford, 1999. (trad. it. *La fine del tempo*, Einaudi, Torino, 2003).

Barrett J. B., *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*, Oxford University Press, 1999.

Bell J. S., *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.

Bergson H., *L'evoluzione creatrice*, Sansoni, Firenze, 1951.

Biémont E., *Rythmes du temps. Astronomie et calendriers*, De Boeck & Larcier, Paris, 2000. (trad. it. *I Ritmi del Tempo*, Zanichelli, Bologna, 2002).

Boffi S., *Il Principio di Indeterminazione*, Quaderni di Fisica Teorica, Università degli Studi di Pavia, 1990.

Boffi S., *La Meccanica delle Onde*, Quaderni di Fisica Teorica, Università degli Studi di Pavia, 1991.

Boffi S., *Le Onde di De Broglie*, Quaderni di Fisica Teorica, Università degli Studi di Pavia, 1989.

Boffi S., *Onde di Materia e Onde di Probabilità*, Quaderni di Fisica Teorica, Università degli Studi di Pavia, 1989.

Bohr N., *I quanti e la vita*, Bollati Boringhieri, Torino, 1965.

Boslough J., *Masters of Time*, Addison-Wesley, 1992. (trad. it. *I signori del tempo*, Garzanti, Milano, 1995).

Boyer C. B., *A History of Mathematics*, John Wiley & Sons, 1968. (trad. it. *Storia della Matematica*, ISEDI, Milano, 1976).

Bridgman P. W., *The Logic of Modern Physics*, Macmillan, New York, 1927. (trad. it. *La Logica della Fisica Moderna*, Bollati Boringhieri, Torino, 1965).

Caldirola P., Girelli R., Prosperi G. M., *Introduzione alla Fisica Teorica*, UTET, Torino, 1982.

Cantelli G., a cura di, *La disputa Leibniz-Newton sull'analisi*, Bollati Boringhieri, Torino, 1958 (nuova edizione 2006).

Cappelletti V., *Dall'ordine alle cose. Saggio su Werner Heisenberg*, Jaca Book, Milano, 2001.

Capra F., *The Tao of Physics: An Exploration of the Parallels Between Modern Physics and Eastern Mysticism*, Shambhala Publications, Berkeley, California, 1975. (trad. it. *Il Tao della fisica*, Adelphi, Milano, 1989).

Carnot S., *Réflexions sur la puissance motrice du feu*. (trad. it. *La potenza del fuoco*, Bollati Boringhieri, Torino, 1992).

Ceruti M., *Il vincolo e la possibilità*, Feltrinelli, Milano, 1989.

Chandler D., *Introduction to Modern Statistical Mechanics*, Oxford University Press, 1987.

Cushing J. T., *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*, University of Chicago Press, Chicago, 1994.

Davies P., *About Time: Einstein's Unfinished Revolution*, Penguin Books, 1995. (trad. it. *I Misteri del Tempo*, Mondadori, Milano, 1996).

Davies P., *The mind of God*, 1992. (trad. it. *La Mente di Dio*, Mondadori, Milano, 1993).

De Angelis V., *La logica della complessità*, Bruno Mondadori, Milano, 1996.

Dirac P. A. M., *The Principles of Quantum Mechanics*, Clarendon Press, Oxford, 4° edizione, 1958. (trad. it. *I Principi della Meccanica Quantistica*, Bollati Boringhieri, Torino, 1976).

Dugas R., *Histoire de la mécanique*, Editions du Griffon, Neuchatel, 1955. (nuova pubblicazione trad. ing. *A History of Mechanics*, edizioni Dover, 1988).

Eddington A. S., *The Nature of the Physical World*, Macmillan, New York, 1929.

Eddington S. A., *Space, Time and Gravitation. An Outline of the General Relativity Theory*, Cambridge University Press, 1920. (trad. it. *Spazio, Tempo e Gravitazione. La teoria della relatività generale*, Bollati Boringhieri, Torino, 1971).

Edwards H., *Essays in Constructive Mathematics*, Springer Edition, 2004.

Einstein A., Infeld L., *The Evolution of Physics. The Growth of Ideas from Early Concepts to Relativity and Quanta*, Simon & Schuster, New York, 1938. (trad. it. *L'evoluzione della fisica*, Bollati Boringhieri, Torino, 1965).

Farouki N., *La Relativité*, 1993. (trad. it. *La Relatività*, Il Saggiatore, Milano, 1997).

Fermi E., *Thermodynamics*, 1936. (trad. it. *Termodinamica*, Boringhieri, Torino, 1958).

Feyerabend P. K., *Against Method. Outline of an Anarchist Theory of Knowledge*, NBL Edition, London, 1975. (trad. it. *Contro il metodo. Abbozzo di una teoria anarchica della conoscenza*, Feltrinelli, Milano, 1979).

Feyerabend P. K., *Ambiguità e armonia*, Laterza, Roma-Bari, 1996.

Feyerabend P. K., *Conquest of Abundance: A Tale of Abstraction versus the Richness of Being*, 1999. (trad. it. *Conquista dell'abbondanza, Storia dello scontro tra l'astrazione e la ricchezza dell'Essere*, Raffaello Cortina Editore, Milano, 2002).

Feyerabend P. K., *Dialogo sul metodo*, Laterza, Roma-Bari, 1989.

Feyerabend P. K., *Farewell to Reason*, Verso Edition, London, 1987. (trad. it. *Addio alla Ragione*, Armando Editore, Roma, 2004).

Feyerabend P. K., *Killing Time: The Autobiography of Paul Feyerabend*, 1995. (traduzione italiana, *Ammazzando il tempo. Un'autobiografia*, Laterza, Roma-Bari, 1999).

Feyerabend P. K., *Three Dialogues on Knowledge*, 1991. (trad. it. *Dialoghi sulla conoscenza*, Laterza, Roma-Bari, 1991).

Frova A., Marenzana M., *Parola di Galileo*, Universale Rizzoli, Milano, 1998.

Fusco M., Marcellini P., Sbordone C., *Analisi Matematica due*, Liguori Editore, Napoli, 1996.

Galison P., *Einstein's Clocks, Poincaré's Maps. Empires of time*, 2003. (trad. it. *Gli orologi di Einstein, le mappe di Poincaré. Imperi del tempo*. Raffaello Cortina Editore, Milano, 2004).

Gell-Mann M., *The Quark and the Jaguar*, Freeman, New York, 1994 (trad. it. *Il quark e il giaguaro. Avventure nel semplice e nel complesso*, Bollati Boringhieri, Torino, 1996).

Ghiozzi M., *Storia della Fisica*, Bollati Boringhieri, Torino, 2005.

Ghirardi G. C., *Un'occhiata alle carte di Dio*, Il Saggiatore, Milano, 1997.

Giannetto E., *Saggi di Storie del Pensiero Scientifico*, Bergamo University Press, Edizioni Sestante, Bergamo, 2005.

Gleick J., *Chaos*, Viking Penguin Inc., New York, 1987. (trad. it. *Caos*, Rizzoli, Milano, 1989).

Goldstein H., *Classical Mechanics*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1950. (trad. it. *Meccanica Classica*, Zanichelli, Bologna, 1971).

Graffi S., *Le Radici della Quantizzazione*, Quaderni di Fisica Teorica, Università degli Studi di Pavia, 1993.

Green B., *The Elegant Universe. Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, 1999. (trad. it. *L'universo elegante. Superstringhe, dimensioni nascoste e la ricerca della teoria ultima*, Einaudi, Torino, 2000).

Gribbin J., *In Search of the Edge of Time*, Bantam Press, Transworld Publishers Ltd, London, 1996. (trad. it. *Costruire la macchina del tempo. Viaggio attraverso i buchi neri e i cunicoli spazio-temporali*, Aporie Edizioni, Roma, 1996).

Hawking S., *A Brief History of Time*, 1987. (tra. it. *Dal Big Bang ai Buchi Neri*, Rizzoli, Milano, 1988).

Hawking S., *Is the End in Sight for Theoretical Physics?*, Cambridge University Press, 1980. (trad. it. *Inizio del Tempo e Fine della Fisica*, Mondadori, Milano, 1992).

Hawking S., Penrose R., *The Nature of Space and Time*, Princeton University Press, Princeton, 1996.



Heisenberg W., *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*, Harper and Row, New York, 1958. (trad. it. *Fisica e Filosofia*, Il Saggiatore, Milano, 1961).

Hirsch F., Lacombe G., *Elements of Functional Analysis*, Springer 1999.

Holland P. R., *The Quantum Theory of Motion: An Account of the de Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, 1995.

Huang K., *Statistical Mechanics*, John Wiley & Sons, 1990.

Jammer M., *Concepts of Space. The History of Theories of Space in Physics*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1954. (nuova pubblicazione edizioni Dover, New York, 1993).

Jammer M., *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, New York, 1966.

Jammer M., *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley & Sons, New York, 1974.

Jauch J. M., *Are Quanta real? A Galileian Dialogue*, Indiana University Press, 1973. (trad. it. *Sulla realtà dei quanti. Un dialogo galileiano*, Adelphi Edizioni, Milano, 1996).

Joos E., Zeh H. D., Giulini D., Kiefer C., Kupsch J., Stamatescu O., *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*, Springer, II Edition, 2003.

Koyré A., *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, Einaudi, 1979.

Lagrange J. L., *Mécanique Analytique*, La Veuve Desaint, Paris, 1788. (trad. it. *Analytical Mechanics*, Springer Edition, 2001).

Landau L. D., Lifshits E. M., *Kvantovaja mehanika*, 1947. (trad. it. *Meccanica Quantistica*, Editori Riuniti, Roma, 1976).

Lindley D., *Where Does the Weirdness Go?*, BasicBooks, 1996. (trad. it. *La Luna di Einstein*, Longanesi, Milano, 1997).

Messiah A., *Mécanique Quantique*, 1958, in trad. ing. *Quantum Mechanics*, John Wiley Sons, 1958. (nuova pubblicazione edizioni Dover, New York, 1999).

Mines R., Richman F., Ruitenburg W., *A Course in Constructive Algebra*, Springer Edition, 1987.

Misner C. W., Thorne K. S., Wheeler J. A., *Gravitation*, Freeman and Company, 1971.

Morin E., *Introduzione al pensiero complesso*, Sperling e Kupfer, Milano, 1993.

Morin E., *La Methode I. La Nature della Nature*, Le Seuil, Paris, 1977. (trad. it. parz. *Il Metodo. Ordine, disordine, organizzazione*, Feltrinelli, Milano, 1983).

Morin E., *La Methode III. La Connaissance de la Connaissance*, Le Seuil, Paris, 1986. (trad. it. parz. *La conoscenza della conoscenza*, Feltrinelli, Milano, 1989).

Nicosini O., *Paradosso EPR e Teorema di Bell*, Quaderni di Fisica Teorica, Università degli Studi di Pavia, 1991.

Oldroyd D., *The Arch of Knowledge. An Introductory Study of the History of the Philosophy and Methodology of Science*, Methuen, New York and London, 1986. (trad. it. *Storia della filosofia della scienza*, Il Saggiatore, Milano, 1989).

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

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

Popper K., *The Open Universe: An Argument for Indeterminism*, Hutchinson, Londra, 1982 (trad. it. *Postilla alla logica della scoperta scientifica II. L'universo aperto*, Il Saggiatore, Milano, 1984).

Price H., *Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*, Oxford University Press, New York, 1996.

Prigogine I., *From Being to Becoming*, Freeman, San Francisco, 1980. (trad. it. *Dall'essere al divenire*, Einaudi, Torino, 1986).

Prigogine I., *La fin des certitudes. Temps, chaos et les lois de la nature*, Edition Odile Jacob, Paris, 1996. (trad. it. *La fine delle certezze*, Bollati Boringhieri, Torino, 1997).

Prigogine I., Stengers I., *La Nouvelle Alliance. Métamorphose de la Science*, Gallimard, Paris, 1979. (trad. it. *La Nuova Alleanza. Metamorfosi della scienza*, Einaudi, Torino, 1981).

Prigogine I., Stengers I., *Entre le temps et l'éternité*, Librairie Arthème Fayard, Paris, 1988. (trad. it. *Tra il tempo e l'eternità*, Bollati Boringhieri, Torino, 1989).

Radice L. L., *L'infinito*, Editori Riuniti, Roma, 1981.

Reeves H., *Patience dans l'azur. L'évolution cosmique*. Edition du Seuil, Paris, 1981. (trad. it. *L'Evoluzione Cosmica*, Rizzoli, Milano, 1992).

Regge T., *Infinito*, Mondadori, Milano, 1995.

Reichenbach H., *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics*, University of California Press, Berkeley, 1944. (nuova pubblicazione edizioni Dover, 1998).

Reichenbach H., *The direction of time*, University of California Press, Berkeley, 1956. (nuova pubblicazione edizioni Dover, 1999).

Resnick R., *Introduction to Special Relativity*, John Wiley & Sons, New York, 1968. (trad. it. *Introduzione alla Relatività Ristretta*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 1979).

Rindler W., *Relativity. Special, General and Cosmological*, Oxford University Press, New York, 2001.

Rossetti C., *Istituzioni di Fisica Teorica*, Levrotto & Bella, Torino, 1990.

Salmistraro F., *La Fase di Berry*, Quaderni di Fisica Teorica, Università degli Studi di Pavia, 1994.

Schroeder G. L., *Genesis and the Big Bang*, Bantam Books, 1990. (trad. it. *Genesi e Big Bang*, Marco Tropea Editore, Milano, 1999).

Scully, M. O., eds., *Quantum Optics, Experimental Gravity and Measurement Theory*, Plenum Press, New York, 1983.

Sklar L., *Physics and Chance: Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993.

Smolin L., *The Trouble with Physics: the Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next*, Houghton Mifflin, 2006.

Stampacchia G., Cecconi J. P., *Analisi Matematica. Funzioni di una variabile*, Liguori Editore, Napoli, 1974.

Stengers I., *Cosmopolitiques*, La Découverte, Paris, 2003. (trad. it. *Cosmopolitiche*, Luca Sossella Editore, Roma, 2005).

Stengers I., Schlanger J., *Les concepts scientifiques*, Gallimard, Paris, 1991.

Tenenbaum M., *Ordinary Differential Equations*, Dover Publications, 1985.

Teppati G., *Lezioni di Analisi Matematica 3*, Editrice Levrotto & Bella, Torino, 1995.

Von Neumann J., *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer Verlag, Berlino, 1932. (trad. ing. *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton, 1955).

Vulpiani A., *Determinismo e Caos*, Carocci Editore, Roma, 1994.

Weyl H., *Philosophy of mathematics and natural science*, Princeton University Press, Princeton, 1949. (trad. it. *Filosofia della matematica e delle scienze naturali*, Boringhieri, Torino, 1967).

Wheeler J. A., *A Journey into Gravity and Spacetime*, Scientific American Library, New York, 1990. (trad. it. *Gravità e Spazio-Tempo*, Zanichelli, Bologna, 1993).

Wigner E., *Group Theory*, Academic Press, New York, 1959.

Wittgenstein L., *Trattato logico-filosofico*, trad. it. di Conte A.G., Einaudi, Torino, 1968.

Woit P., *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*, Basic Books, 2006.

Zeh D. *The Physical Basis of the Direction of Time*, 5<sup>th</sup> Edition, Springer, 2007.

## **BIBLIOGRAFIA ARTICOLI**

Alai M., *Ontologia, spiegazione e interpretazione di Copenhagen della meccanica quantistica*, 2006, <http://www.uniurb.it/Filosofia/isonomia/epistemologica1.htm>.

Albert D., *The Foundations of Quantum Mechanics and the Approach to Thermodynamic Equilibrium*, *British Journal for the Philosophy of Science*, 45, 1994.

Albert D., Loewer B., *Interpreting the Many Worlds Interpretation*, *Synthese*, 77, 1988, pp. 195-213.

Albert D. Z., Vaidman L., *On a Proposed Postulate of State Reduction*, *Physics Letters*, A139, 1989.

Bacciagaluppi G., *Probability, Arrow of Time and Decoherence*, 2006, <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00003157>. In corso di pubblicazione su *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*.

Bacciagaluppi G., *Remarks on Space-time and Locality in Everett's Interpretation*, in T. Placek e J. Butterfield ed., *Non-Locality and Modality*,

Kluwer Academic, Dordrecht, 2002, pp. 105-122. <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000504>.

Barrett J., *The Many Worlds and Many Minds Formulations of Quantum Mechanics*, 2004, [www.lps.uci.edu/home/fac-staff/faculty/barrett/ManyMindsManyWorlds.pdf](http://www.lps.uci.edu/home/fac-staff/faculty/barrett/ManyMindsManyWorlds.pdf).

Barrett J., *The Nature of Measurement Records in Relativistic Quantum Field Theory*, in M. Kuhlman, H. Lyre e A. Wayne eds., *Ontological Aspects of Quantum Field Theory*, World Scientific, Singapore, 2002.

Berndl K., Durr D., Goldstein S., Peruzzi G., Zanghi N., *Existence of Trajectories for Bohmian Mechanics*, *International Journal of Theoretical Physics*, 32, 1993, pp. 2245-2251.

Berndl K., Durr D., Goldstein S., Zanghi N., *Non locality, Lorentz Invariance, and Bohmian Quantum Theory*, *Physical Review a* 53, 1996, pp. 2062-2073. [www.arxiv.org/ps/quant-ph/9510027](http://www.arxiv.org/ps/quant-ph/9510027).

Berndl K., Durr D., Goldstein S., Peruzzi G., Zanghi N., *On the Global Existence of Bohmian Mechanics*, *Communications in Mathematical Physics*, 173, 1995, pp. 647-673.

Bishop R., *The Arrow of Time in Rigged Hilbert Space Quantum Mechanics*, *International Journal of Theoretical Physics*, Volume 43, n. 7-8, Agosto 2004 , pp. 1675-1687. <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000814>.

Bohm A., Bishop R. C., Gadella M., *Irreversibility in Quantum Mechanics*, *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2004, no. 1, pp. 75-83, 2004.



Bohm A., Harshman N. L., *Quantum theory in the Rigged Hilbert Space – Irreversibility from causality*, pubblicato in una raccolta di articoli intitolata *Irreversibility and Causality, Semigroups and Rigged Hilbert Spaces*. Presentata al 21st International Colloquium on Group Theoretical Methods in Physics (ICGTMP) a Goslar, Germania, 16-21 luglio, 1996. Ed. da Arno Bohm, Heinz-Dietrich Doebner, and Piotr Kileanowski. Lecture Notes in Physics, Vol. 504. Berlin: Springer-Verlag, 1998., p.181. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9805063>.

Bohm A., Kaldass H., Patuleanu P., *Hilbert Space or Gelfand Triplet – Time symmetric or time asymmetric quantum mechanics*, International Journal of Theoretical Physics, 38, pp. 115-130, 1999. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9712038>.

Bohm A., Kaldass H., *Rigged Hilbert Space Resonances and Time Asymmetric Quantum Mechanics*, 1999, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9909081>.

Bohm A., Scurek R., *The phenomenological preparation-registration arrow of time and its semigroup representation in the RHS quantum theory*, Trends in Quantum Mechanics, H.D. Doebner, S.T. Ali, M. Keyl and R.F. Werner (eds.), World Scientific, Singapore, 2000, pp. 167-175. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0001070>.

Bohm A., *Time Asymmetric Quantum Physics*, Physical Review A (Atomic, Molecular, and Optical Physics), Volume 60, Issue 2, August 1999, pp.861-876 <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9902085>.

Bohr N., *On the Constitution of Atoms and Molecules, 1 / 3*, Philosophical Magazine 26, pp. 1-25, 1913. <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Bohr/Bohr-1913a.html>.

Bohr N., *On the Constitution of Atoms and Molecules. Systems containing only a single nucleus, 2 / 3*, Philosophical Magazine 26, pp. 476-502, 1913. <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Bohr/Bohr-1913a.html>.

Bohr N., *On the Constitution of Atoms and Molecules, 3 / 3*, Philosophical Magazine 26, pp. 857-875, 1913. <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Bohr/Bohr-1913a.html>.

Bricmont J., *Science in Chaos or Chaos in Science?*, Physica Magazine 17, 1995.

Brown H. R., *Aspects of Objectivity in Quantum Mechanics, From Physics to Philosophy*, J. Butterfield and C. Pagonis (eds.), Cambridge University Press, 1999, pp. 45-70, <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000223>.

Brune M., Hagley E., Dreyer J., Maitre X., Maali A., Wunderlich C., Raimond J. M., Haroche S., *Observing the Progressive Decoherence of the "Meter" in a Quantum Measurement*, Physical Review Letters 77, 1996, pp. 4887-4890.

Buccheri R., Jaroszkiewicz G., Saniga M., *Endophysics, the Fabric of Time and the Self-Evolving Universe*, Frontier Perspectives, 11, 2003, pp. 609-623.

Buccheri R., Saniga M., *Endo-Physical paradigm and mathematics of subjective time*, Frontier Perspectives, 12, 2003, pp. 36-40.

Buccheri R., Saniga M., *The Psycopathological Fabric of Time (and Space) and its underpinning Pencil-Borne Geometries*, 2003, <http://arxiv.org/abs/physics/0310165> (in pubblicazione su The Journal of Mind and Behaviour).

Callender C., *Is Time Handed in a Quantum World?*, Proceedings of the Aristotelian Society, Volume 100, n. 3, Settembre 2000 , pp. 75-91. <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000612>.

Callender C., *The Metaphysics of Time Reversal: Hutchison on Classical Mechanics*, The British Journal for the Philosophy of Science, Vol. 46, n. 3, Settembre 1995, pp. 331-340.

Callender C., *What is “the problem with the direction of time”?*, Philosophy of Science, Vol. 64, Proceedings of the 1996 Biennial Meetings of the Philosophy of Science Association. Part II: Symposia Papers, Dicembre 1997, pp. 223-234.

Castagnino M., Lara L., Lombardi O., *The direction of time: from the global arrow to the local arrow*, International Journal of Theoretical Physics, Volume 42, n. 10, Ottobre 2003 , pp. 2487-2504. [arxiv.org/pdf/quant-ph/0301002](http://arxiv.org/pdf/quant-ph/0301002).

Chaliasos Evangelos, *The Loschmidt paradox on Boltzmann’s H-Theorem: a Resolution*, 2005, <http://arxiv.org/abs/physics/0511090>.

Chudnovsky E. M., Kuklov A. B., *Decoherence of a Superposition of Macroscopic Current States in a SQUID*, 2002, <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0211246>.

Clifton R., Monton B., *Losing your marbles in wavefunction collapse theories*, British Journal for the Philosophy of Science 50, 1999, pp. 697-717.

De Muynck W. M., *Towards a Neo-Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics*, Foundations of Physics, Volume 34, n. 5, Maggio 2004 , pp. 717-770. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0307235>.

Delgado V., Muga J.G., *Arrival Time in Quantum Mechanics*, Physical Review A (Atomic, Molecular, and Optical Physics), Volume 56, Issue 5, Novembre 1997, pp.3425-3435. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9704010>.

Dirac P. A. M., *The Fundamental Equations of Quantum Mechanics*, in Proceedings Royal Society A 109, 1926, pp. 642-653.

Dolev S., Elitzur A. C., Hemmo M., *Does Indeterminism Give Rise to an Intrinsic Time Arrow?*, 2001, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101088>.

Dürr D., Goldstein S., Zanghì N., *Quantum Equilibrium and the Origin of Absolute Uncertainty*, Journal of Statistical Physics 67, 1992.

Dürr D., Goldstein S., Zanghì N., *Bohmian Mechanics and the Meaning of the Wave Function*, in Cohen, R. S., Horne, M., and Stachel, J., eds., *Experimental Metaphysics — Quantum Mechanical Studies for Abner Shimony, Volume One; Boston Studies in the Philosophy of Science 193*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.

Edens B., *Semigroups and Symmetry*, 2001, <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000436/>

Einstein A., *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, Annalen der Physik 49, 1916, pp. 769-822. (trad. it. *I fondamenti della teoria della relatività generale*, <http://matsci.unipv.it/persons/antoci/re/Einstein16a.pdf>).

Einstein A., *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik 17, 1905, pp. 891-921. (trad. it. *L'elettrodinamica dei corpi in movimento*, <http://matsci.unipv.it/persons/antoci/re/Einstein05.pdf>).

Einstein A., Podolsky B., Rosen N., *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, Physical Review 47, 1935, pp. 777-780.

Elitzur A. C., Dolev S., *Black-Hole Uncertainty Entails an Intrinsic Time Arrow: a Note on the Hawking-Penrose controversy*, Physics Letters A, 251, 1999, pp. 89-94. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0012060>.

Elitzur A. C., Dolev S., *Is There More to T?*, Pubblicato nel volume “The Nature of Time: Geometry, Physics and Perception” (NATO ARW), Proceedings della conferenza tenuta nei giorni 21-24 Maggio, 2002 a Tatranska Lomnica, Slovacchia. Ed. da Rosolino Buccheri, Metod Saniga, e William Mark Stuckey. NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry-Volume 95. Dordrecht/ Boston/ London: Kluwer Academic Publishers, 2003., p.297. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0207029>.

Elitzur A. C., Dolev S., *Indeterminism and Time Symmetry are Incompatibile: Reply to Rebilas*, Phys.Lett. A266, pp. 268-270, 2000, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0012061>.

Esfeld M., *Popper on Irreversibility and the Arrow of Time*, in Karl Popper: A Centenary Assessment Vol. 3 : Science Logic Mathematics Physics Biology Social Science, 2006. <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00002521/>.

Everett H., *“Relative State” Formulation of Quantum Mechanics*, Reviews of Modern Physics 29, 1957, pp. 454-462.

Feyerabend P. K., *La concezione scientifica del mondo ha uno statuto speciale?*, pubblicato in Hilgevoord J., a cura di, *Physics and Our View of the World*, Cambridge University Press, 1994, pp.135-148.

Feyerabend P., *How to Defend Society Against Science*, Radical Philosophy, 1975, pp. 3-8; rist. in I. Hacking (ed.), *Scientific Revolutions*, cit., pp. 156-167; tr. it. a cura di L. Sosio, *Come difendere la società contro la scienza*, in I. Hacking (ed.), *Rivoluzioni scientifiche*, pp. 209-228.

Feyerabend P., *Realism and the Historicity of Knowledge*, The Journal of Philosophy, Vol. 86, No. 8, Agosto 1989, pp. 393-406.

Foschini L., *On the logic of quantum physics and the concept of the time*, 1998, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9804040>.

Gell-Mann M., and Hartle J. B., *Alternative Decohering Histories in Quantum Mechanics*, Proceedings of the 25th International Conference on High Energy Physics, Singapore, August 1990 Phua K. K., Yamaguchi Y. (ed.), South East Asia Theoretical Physics Association and Physical Society of Japan, World Scientific, Singapore, 1990.

Gell-Mann M., Hartle J. B., *Quantum Mechanics in the Light of Quantum Cosmology*, in Zurek W. ed., *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*, Addison-Wesley, 1990.

Gell-Mann M., Hartle J., *Time Symmetry and Asymmetry in Quantum Mechanics and Quantum Cosmology*, in “The Physical Origins of Time Asymmetry”, Halliwell J., Pérez-Mercader J., Zurek W., Cambridge University Press, Cambridge, 1994. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9304023>.

Gembillo G., *Croce e l'epistemologia della complessità*, in AA.VV., *Croce dopo Croce*, Fondazione Cortese, Napoli, 2003.

Ghirardi G. C., Grassi R., Benfatti F., *Describing the Macroscopic World – Closing the Circe within the Dynamical Reduction Program*, *Foundations of Physics*, 25, 1995, p. 5.

Ghirardi G. C., Rimini A., Weber T., *A Model for a Unified Quantum Description of Macroscopic and Microscopic Systems*, in *Quantum Probability and Applications II*, Accardi L. Ed., Springer, Berlino, 1985, pp. 223-232.

Ghirardi G. C., Rimini A., Weber T., *Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems*, *Physical Review* 34D, 1986, pp. 470-491.

Giannitrapani R., *Positive-Operator-Valued Time Observable in Quantum Mechanics*, *International Journal of Theoretical Physics*, 36, n. 7, Luglio 1997, pp. 1575-1584. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9611015>.

Griffiths R. B., *Consistent Histories and the Interpretation of Quantum Mechanics*, *Journal of Statistical Physics* 36, 1984.

Griffiths R. B., *Quantum Mechanics without Measurements*, 2006, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0612065>.

Halliwel J. J., *A Review of the Decoherent Histories Approach to Quantum Mechanics*, 1994, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9407040>.

Hartle J. B., *The Quantum Mechanics of Cosmology*, in Coleman S., Hartle J., Piran T., Weinberg S., ed., *Quantum Cosmology and Baby Universes*, World Scientific, Singapore, 1991.

Heisenberg W., *Über quantentheoretische Umdeutung Kinematischer und mechanischer Beziehungen*, Zeitschrift für Physikalische, 33, 1925, p. 879 (trad. it. *L'interpretazione secondo la teoria dei quanti delle relazioni cinematiche e meccaniche*, <http://matsci.unipv.it/persons/antoci/tq.html>).

Hemmo M., Pitowsky I., *Probability and Non-Locality in Many Minds Interpretations of Quantum Mechanics*, The British Journal for the Philosophy of Science 54, 2003.

Hilgevoord J., *Time in quantum mechanics*, Institute for History and Foundations of Science, Utrecht University, [www.phys.uu.nl/igg/publications/time.doc](http://www.phys.uu.nl/igg/publications/time.doc)

Hitchcock S., *Feynman clocks, Causal Networks, and the origin of Hierarchical "Arrows of Time" in Complex Systems. Part I. "Conjectures"*, 2000, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0005074>.

Hitchcock S., *Quantum Clocks and the origin of time in complex system*, 1999, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9902046>.

Holster A., *The criterion for time symmetry of probabilistic theories and the reversibility of quantum mechanics*, New Journal of Physics, 5, pp. 130-158, 2003. <http://www.iop.org/EJ/abstract/1367-2630/5/1/130>.

Holster A., *The Quantum Mechanical Time Reversal Operator*, 2003, <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00001449>.

Holster A., *Time Flow Physics. Introduction to a unified theory based on time flow*, 2004, <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00001641>.



Hutchison K., *Differing criteria for temporal reversibility*, British Journal for the Philosophy of Science 46, 1995, pp. 341-347.

Hutchison K., *Is classical mechanics really time-reversible and deterministic?*, British Journal for the Philosophy of Science 43, 1993, pp. 307-323.

Hutchison K., *Temporal asymmetry in classical mechanics*, British Journal for the Philosophy of Science 46, 1995, pp. 219-234.

Jacobs T., Maes C., *Reversibility and Irreversibility within the Quantum Formalism*, 2005, Physicalia Magazine 27, pp. 119-130. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0508041>.

Jaroszkiwicz G., *Discrete Spacetime: classical causality, prediction, retrodiction and the mathematical arrow of time*, 1999, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0004026>.

Jaroszkiwicz G., Eakins J., *The Quantum Universe*, 2002, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0203020>.

Jaroszkiwicz G., *The running of the universe and the quantum structure of time*, 2001, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0105013>.

Joos E., Zeh H. D., *The emergence of classical properties through interaction with the environment*, Zeitschrift für Physik B 59, 1985, pp. 223-243.

Joos E., *Why do we observe a classical spacetime?*, Physical Review Letters A 116, 1986, pp. 6-8.

Kiefer C., Joos E., *Decoherence: Concepts and Examples*, in Quantum Future: From Volta and Como to the Present and Beyond, Proceedings del decimo Max Born Symposium tenuto a Przesieka, Poland, 24-27 September, 1997. Blanchard P., Jadczyk A. (ed.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1999, p.105 <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9803052>.

Kobelev L. Ya., *Why we can not walk to and fro in time as do it in space? (Why the arrow of time exists?)*, 2000, <http://arxiv.org/abs/physics/0011036>.

Kübler C., Zeh H. D., *Dynamics of Quantum Correlations*, Annals of Physics 76, New York, 1973, pp. 405-418.

Landau L., *Das Dämpfungsproblem in der Wellenmechanik*, Zeitschrift für Physikalische 45, 1927, pp. 430-441.

Lewis P. J., *Interpreting spontaneous collapse theories*, Studies in History and Philosophy of Modern Physics 36, 2005, pp. 165-180.

Loschmidt J., *Über den Zustand des Wärmegleichgewichtes eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft, 1. Teil*. Sitzungsber. Kais. Akad. Wiss. Wien, Math. Naturwiss. Classe 73, 1876, pp. 128–142.

Monton B., *The modern of ontology for spontaneous collapse theories*, Studies in History and Philosophy of Modern Physics 35, 2004, pp. 407-421.

Mott N. F., *The wave mechanics of  $\alpha$ -ray tracks*, Proceedings Royal Society 126, Londra, 1929, pp. 79-83.

Muga J. G., Sala R., Palao J. P., *The time arrival concept in quantum mechanics*, Superlattices and Microstructures, Vol. 24, No. 4, 1998, pp. 833-850. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9801043>.

Myrvold W. C., *On some early objections to Bohm's theory*, International Studies in the Philosophy of Science, 17, n.1, 2003, pp. 7-24.

Omnès R., *Consistent Interpretations of Quantum Mechanics*, Reviews of Modern Physics 64, 1992.

Omnès R., *Logical Reformulation of Quantum Mechanics*, Journal of Statistical Physics 53, 1988.

Pearle P., *Combining stochastic dynamical state-vector reduction with spontaneous localization*, Physical Review 39A, 1989, pp. 2277-2289.

Pearle P., Rimini A., *Markov processes in Hilbert space and spontaneous localization of systems of identical particles*, Physical Review 42A, 1990, pp. 78-89.

Plaga R., *Proposal for an experimental test of the many-worlds interpretation of quantum mechanics*, 1995, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9510007>.

Price H., *A point on the arrow of time*, Nature, 20 July 1989, pp. 181-182.

Price H., *Boltzmann's time bomb*, British Journal for the Philosophy of Science, 53, 2002, pp. 83-119.

Price H., *Chaos theory and the difference between past and future*, in Fraser J. T., Soulsby M. P. and Argyros A. J. (eds.), *Time, Order, Chaos: The Study of*

*Time*, Vol. IX. Madison, CT, International Universities Press, 1998, pp. 155-162.

Price H., *The philosophy and physics of affecting the past*, Synthese, 16, 1984, pp. 299-323.

Prigogine I., Petrosky T., *An Alternative to Quantum Theory*, Physica 147 A, pp. 461-486, 1988.

Primas H., *Hidden Determinism, Probability, and Time's Arrow*, 2002. <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000948>.

Saniga M., *Geometry of psychological time*, nella raccolta degli interventi del Simposio internazionale "The Direction of Time: the Role of Reversibility/Irreversibility in the Study of Nature", Albeverio S., Blanchard P. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, 2003. <http://arxiv.org/abs/physics/0302075>.

Saunders S., *Time, Quantum Mechanics, and Decoherence*, Synthese 102, 1995, pp. 235-266. <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000463>.

Schlosshauer M., *Decoherence, the measurement problem, and the interpretations of quantum mechanics*, Reviews of Modern Physics, 76, Ottobre 2004, pp. 1268-1303. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0312059>.

Schroedinger E., *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*, *Naturwissenschaften* 23, 1935, pp. 807-812; 823-828; 844-849. (trad. ing. *The present situation in quantum mechanics*, Quantum Theory and Measurement, Wheeler J. A. e Zurek W. eds., Princeton Series in Physics, 1983).

Schroedinger E., *Quantisierung als Eigenwertproblem*, I, II, III, IV, Annalen der Physik 79, 1926, pp. 361-376; 79, 1926, pp. 489-527; 80, 1926, pp. 437-490; 81, 1926, pp. 109-139. <http://matsci.unipv.it/persons/antoci/>.

Schroedinger E., *Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen*, Annalen der Physik 79, 1926, p. 734. <http://matsci.unipv.it/persons/antoci/tq.html>.

Snyder D. M., *Irreversibility and Measurement in Quantum Mechanics*, 2000, <http://arxiv.org/abs/physics/0002048>.

Tappenden P., *Identity and Probability in Everett's Multiverse*, British Journal for the Philosophy of Science 51, 2000, pp. 99-114.

Tulsi D., *Measurements and Decoherence*, 2005. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0505070>.

Uffink J., *Bluff your way in the second law of thermodynamics*, Studies in History and Philosophy of Science: Studies in History and Philosophy of Modern Physics, Volume 32, n. 3, Settembre 2001, pp. 305-394. <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000313>.

Vaidman L., *On Schizophrenic Experiences of the Neutron or Why We Should Believe in the Many-Worlds Interpretation of Quantum Theory*, International Studies in the Philosophy of Sciences 12, 1998.

Vaidman L., *On the paradoxical aspects of new quantum experiments*, Philosophy of Science Association, 1994, pp. 211-217.

Wigner E., *Über die Operation der Zeitumkehr in der Quantenmechanik*, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen – Mathematisch Physikalische Klasse, 1932.

Zeh H. D., *Decoherence: Basic Concepts and their Interpretation*, Capitolo due della seconda edizione di "*Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*" (D. Giulini et al., Springer 2003). <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9506020>.

Zurek W. H., *Decoherence, Einselection and the Existential Interpretation (the Rough Guide)*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A 356, 1998, pp. 1793-1821. [http://xxx.lanl.gov/PS\\_cache/quant-ph/pdf/9805/9805065.pdf](http://xxx.lanl.gov/PS_cache/quant-ph/pdf/9805/9805065.pdf).

Zurek W. H., *Decoherence, Einselection, and the Quantum Origins of the Classical*, Reviews of Modern Physics 75, 2003, pp. 715-775.

Zurek W. H., *Decoherence and the Transition from Quantum to Classical – Revisited*, 2003. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0306072>.

Zurek W. H., *Environment-induced decoherence and the transition from quantum to classical*, Vistas in Astronomy, vol. 37, Issue 1, pp.185-196.

Zurek W. H., *Pointer basis of quantum apparatus: into what mixture does the wave packet collapse?*, Physical Review Letters D 24, 1981, pp. 1516-1525.

Zurek W. H., Paz J. P., *Decoherence, Chaos, and the Second Law*, Physical Review Letters 72, 1994, pp. 2508-2511.

## **RINGRAZIAMENTI**

Innanzitutto vorrei ringraziare i professori Mauro Ceruti, Gianluca Bocchi e Enrico Giannetto per avermi dato la possibilità di essere parte del CE.R.CO., e per tutte le occasioni di arricchimento culturale che mi hanno regalato.

In particolare ringrazio Enrico per le stimolanti discussioni che mi hanno fatto aprire gli occhi su mondi prima sconosciuti.

Un grazie va anche a Guido Bacciagaluppi, che durante il mio soggiorno a Parigi mi ha chiarito molti aspetti delle varie interpretazioni della meccanica quantistica e del concetto di decoerenza.

Ringrazio Roberto e tutti i ricercatori del CE.R.CO., tutti i dottorandi che ho conosciuto in questi tre anni, in particolare quelli del XX ciclo, Leonardo e Clementina, ma anche Luisa, Martino, Marco, Giulia e Riccardo, piacevolissimi compagni di avventura.

Infine non posso non ringraziare mia madre, mio fratello e tutti gli amici con cui condivido gran parte del tempo della mia vita. Se c'è una cosa che mi dispiace a proposito dell'irreversibilità temporale, è che questi splendidi anni sono davvero passati, e non torneranno.