



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

La teoria della funzione d’onda universale di Everett

Relatore

Prof. Giulio Peruzzi

Laureando

Fabio Pozzi

Anno Accademico 2022/2023

Indice

Introduzione	1
1 Il problema della misura	3
2 La teoria di Everett	7
2.1 Il processo di misura	8
2.2 Confronto	10
3 Critiche	15
3.1 Groenewold	15
3.2 Petersen	16
3.3 DeWitt	17
4 Conclusioni	19
Bibliografia	21

Introduzione

La teoria di Everett, pubblicata per la prima volta nel 1957, si pone l'obiettivo di descrivere la funzione d'onda dell'intero universo.

L'assunzione di Everett è che sia possibile descrivere qualunque sistema fisico secondo le leggi della meccanica quantistica. L'idea è di poter descrivere tutti i sistemi fisici esistenti e tutte le loro interazioni in una sola funzione d'onda, ma le teorie quantistiche precedenti risultano insufficienti a questo scopo.

Il problema risulta evidente quando si considera il processo di misura. Per Everett la teoria quantistica deve essere in grado di descrivere anche questo fenomeno, dato che deve essere in grado di descrivere ogni fenomeno.

Questo è però in contrasto con altre interpretazioni dell'evoluzione dinamica della funzione d'onda, come ad esempio quella di Copenaghen: in questa interpretazione i sistemi microscopici seguono le leggi della meccanica quantistica, mentre gli strumenti di misura, macroscopici, sono descritti dalla meccanica classica. Secondo questa descrizione l'osservatore rappresenta un'entità con un comportamento diverso da tutte le altre. Non è possibile rimuovere la meccanica classica dalla teoria di Copenaghen, così come non è possibile descrivere al suo interno il processo di misura, che rappresenta un cambiamento casuale e discontinuo nella funzione d'onda che descrive il sistema. Come sarà chiarito meglio più avanti in questo testo, la parola osservatore non è riferita solo ad esseri senzienti, ma può indicare anche gli strumenti di misura. In queste interpretazioni l'osservatore è sempre esterno al sistema in esame e il processo di misura risulta essere un processo diverso da tutti gli altri.

Everett invece è convinto che anche gli osservatori possano essere descritti allo stesso modo di tutti gli altri sistemi quantistici. Nella sua tesi propone un esempio in cui l'osservatore è descritto come un qualunque sistema quantistico, e l'osservazione come una qualunque interazione, e giunge alla conclusione che questa descrizione non sia compatibile con il collasso della funzione d'onda.

In particolare Everett mostra come, anche ammettendo di poter descrivere gli osservatori tramite opportune funzioni d'onda, risulta impossibile descrivere un universo che contenga più di un osservatore per una teoria che preveda il collasso della funzione d'onda. La descrizione risulta consistente solo se si prevede un unico osservatore.

Questo però rappresenta un problema se si vuole descrivere l'intero universo: sarebbe difficile decidere a quale persona, animale, macchinario o altra entità assegnare il ruolo di osservatore.

Everett rifiuta l'idea che l'osservatore vada descritto in modo diverso dagli altri sistemi: se la meccanica quantistica è completa, deve essere possibile anche descrivere gli osservatori al pari di tutti gli altri sistemi. Nella descrizione di Everett quindi, gli osservatori non sono diversi da un qualunque altro sistema quantistico, rispettano le stesse leggi degli altri sistemi e sono descritti da una opportuna funzione di stato.

Non si considera più l'osservatore come un'entità esterna al sistema, ma si considera il sistema composto da osservatore+sistema osservato: si tratta di due sistemi quantistici che interagiscono tra loro. L'osservazione inoltre va descritta come una qualunque altra interazione: si tratta di una ordinaria interazione che avviene tra due sistemi. Dopo la misura l'osservatore apprende una qualche caratteristica del sistema misurato e la sua funzione d'onda riflette questo cambiamento: la nuova funzione d'onda dell'osservatore dipende dalla quantità misurata. Lo stato finale dell'osservatore dipende quindi dallo stato del sistema in esame e i due sistemi risultano correlati. Dato che l'osservatore e l'osservazione hanno perso il loro ruolo privilegiato e sono descritti come tutti gli altri sistemi, risulta utile chiedersi

cosa costituisca un osservatore e cosa costituisca una misura. Come distinguo un osservatore da un qualsiasi sistema quantistico? Come distinguo una misurazione da una qualsiasi altra interazione? Nella descrizione di Everett non c'è nessuna distinzione tra un processo di misura e tutti gli altri processi, così come non c'è distinzione tra un osservatore e tutti gli altri sistemi fisici. In questa descrizione possiamo parlare di misura ogni volta che, a seguito di una interazione tra due sistemi, lo stato di un sistema dipende in qualche modo da una quantità fisica dell'altro sistema.

Questa descrizione della misura come un processo "ordinario" porta a due importanti conseguenze. La prima consiste nella rimozione del collasso della funzione d'onda dalla teoria.

Dato che la misura è descritta da un opportuno operatore, come una qualunque altra interazione, la funzione d'onda complessiva evolverà sempre secondo l'equazione di Schrödinger. Si tratta di una grossa differenza rispetto alle teorie del collasso, dato che nella teoria di Everett l'evoluzione temporale della funzione d'onda è sempre un processo continuo, causale e reversibile¹, mentre il collasso della funzione d'onda è invece un processo discontinuo, casuale e irreversibile.

La teoria di Everett non presenta nessun elemento casuale ed è totalmente deterministica, e questo ci costringe a rivedere e riformulare il concetto di probabilità.

La seconda conseguenza è che la funzione d'onda risultante da questa teoria, descrive un universo "a molti mondi".

Nella teoria di Everett infatti tutti gli eventi possibili si realizzano sempre, ciascuno in una differente linea spazio-temporale. Questa è una caratteristica della teoria di Everett che può rendere complicata l'interpretazione della teoria stessa. Questa ramificazione dello spazio-tempo può creare anche delle difficoltà quando si vuole confrontare le previsioni della teoria con i dati sperimentali: dato che ciascuno di noi vive in un solo ramo dello spazio-tempo, non sarà possibile verificare se gli altri rami si siano effettivamente realizzati o meno. Per questi motivi questa teoria sarà pesantemente criticata da altri fisici che la ritengono non verificabile o non compatibile con la realtà in cui viviamo. La chiave di lettura di Everett è un'altra: per validare una teoria bisogna verificare se le previsioni fatte dalla teoria stessa siano in accordo con l'esperienza, ed egli considera la sua teoria valida in questi termini.

¹ [14] Capitolo V §3, [13]

Capitolo 1

Il problema della misura

Il problema centrale della teoria di Everett è come poter descrivere gli osservatori e il processo di misura in meccanica quantistica. Il problema della misura non è certo un problema nuovo ed è un problema centrale della meccanica quantistica, che era già stato affrontato da altri, come ad esempio von Neumann, Heisenberg, Schrödinger e Bohr.

La teoria quantistica permette di descrivere lo stato del sistema in esame con una opportuna funzione d'onda, che evolve tra una misura e l'altra secondo l'equazione di Schrödinger. Dalla funzione d'onda è possibile ricavare i possibili esiti di una misura e la probabilità che ciascuno di essi si realizzi. Durante la misura, il sistema misurato interagisce in qualche modo con il mondo esterno e solo uno dei possibili esiti si realizza effettivamente. La misura permette allo sperimentatore di determinare una proprietà del sistema in modo certo tramite uno strumento di misura. Tra una misura e l'altra si può solo parlare del sistema in termini probabilistici, mentre dopo la misura si può dire che il sistema ha una qualche proprietà ben definita.

Questo comportamento, è anche descritto come transizione dal “possibile” al “reale”. La difficoltà sta proprio nel descrivere come la misurazione porti il sistema da uno stato in cui una proprietà non è ben determinata, a uno stato in cui la stessa proprietà è ben determinata. Esistono differenti interpretazioni della meccanica quantistica, che portano differenti soluzioni a questo problema.

Una delle interpretazioni contro cui si schiera esplicitamente Everett è quella di Copenaghen. In questa interpretazione, sostenuta tra gli altri da Heisenberg e Bohr, la misurazione è considerata una interazione inspiegabile e questo è uno degli aspetti criticati da Everett. La descrizione qui adottata è dualistica: se il sistema fisico da misurare è ben descritto dalla meccanica quantistica, l'apparato sperimentale e gli esiti delle misure sono ben descritti dal linguaggio della meccanica classica. Anche l'evoluzione temporale della funzione d'onda rispetta questo dualismo: se tra una misura e l'altra la funzione evolve secondo l'equazione di Schrödinger, a seguito della misura avviene il collasso della funzione d'onda. Si tratta di due processi profondamente differenti: il primo è continuo, deterministico e reversibile, mentre il secondo è discontinuo, casuale e irreversibile. Questa descrizione è riassunta da Everett in due processi:

Processo 1: è il collasso della funzione d'onda che avviene quando si effettua una misura. In questo caso la funzione d'onda cambia in modo casuale, discontinuo e irreversibile

Processo 2: è l'evoluzione temporale prevista dall'equazione di Schrödinger $i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi = \hat{H}\psi$. Si tratta di un processo deterministico, continuo e reversibile.

Ci sono varie interpretazioni riguardo a come avvenga il collasso della funzione d'onda e quale sia precisamente la causa di questo fenomeno: secondo Wigner [21] è proprio la coscienza dello sperimentatore che causa il collasso quando esso viene a conoscenza del valore misurato. Heisenberg chiarisce alcuni aspetti dell'interpretazione di Copenaghen in [16]: il collasso è un cambiamento improvviso della funzione d'onda, che riflette proprio il fatto che la nostra conoscenza del sistema è cambiata in modo improvviso. Heisenberg si oppone all'idea di Wigner, specificando che non bisogna pensare che il collasso sia connesso all'atto di registrazione del risultato nella mente dell'osservatore, ma è comunque

un cambiamento improvviso che avviene non appena il sistema interagisce con lo strumento di misura, ovvero con il mondo esterno.

Per Heisenberg la funzione d'onda contiene degli elementi oggettivi, dato che permette di prevedere l'esistenza delle misure, ma contiene anche degli elementi soggettivi, dato che la conoscenza della funzione stessa è basata in ciascun esperimento su una misura con la relativa incertezza. La funzione d'onda descrive quindi anche una nostra conoscenza incompleta del mondo e Heisenberg riassume questo miscuglio di soggettività e oggettività dicendo che «ciò che osserviamo non è la natura in sé, ma la natura esposta ai nostri metodi di indagine». [16]

La misura è sempre condotta da un osservatore esterno al sistema, ma non è ben definito cosa si intenda per osservatore. L'osservatore potrebbe essere lo strumento di misura, o lo sperimentatore stesso. La distinzione tra sistema osservato e osservatore è quindi arbitraria ed è sempre possibile per esempio comprendere nel sistema osservato anche lo strumento di misura o una sua parte: è possibile mostrare come tutte le scelte portino comunque alle stesse previsioni per gli esiti degli esperimenti.

Per comprendere meglio questo aspetto vediamo ora un esempio di von Neumann in [19] e [20]. In questo esempio si va a misurare la temperatura di un sistema S tramite un termometro. Possiamo pensare di descrivere S tramite una opportuna funzione d'onda e che il termometro svolga il ruolo dell'osservatore, ma questa non è l'unica scelta possibile. Anche il funzionamento interno del termometro può essere descritto dalla meccanica quantistica. Possiamo allora descrivere quantisticamente il sistema composto S +termometro. Sarà allora lo sperimentatore che svolgerà il ruolo dell'osservatore, leggendo il valore della temperatura sul termometro stesso.

Si può anche considerare il corpo dello sperimentatore come parte del sistema quantistico: la meccanica quantistica può descrivere come la luce riflessa dal termometro raggiunge gli occhi dello sperimentatore e tutti i fenomeni biologici che permettono allo sperimentatore di elaborare il segnale luminoso e apprendere la temperatura. Il confine tra sistema osservato e osservatore può quindi essere scelto arbitrariamente, ma il principio del parallelismo psicofisico è rispettato solo se le diverse scelte sono equivalenti e restituiscono le stesse previsioni compatibili tra loro per le proprietà di S .

Von Neumann sottolinea inoltre che nonostante lo scopo della misurazione sia di conoscere delle caratteristiche oggettive di un sistema, si ha sempre a che fare con l'esperienza soggettiva dello sperimentatore: «l'esperienza fa solo affermazioni di questo tipo: un osservatore ha fatto una certa osservazione (soggettiva); e mai di questo tipo: una quantità fisica ha un certo valore» [19], [20].

Per Everett i problemi principali di questa descrizione sono due: la misura è un processo diverso da tutti gli altri e l'osservatore è sempre esterno al sistema studiato. Gli strumenti di misura, come per esempio i fotodiodi, sono fondamentalmente oggetti elettromeccanici, e possono sicuramente essere descritti mediante la meccanica quantistica. Non è chiaro perché invece dovrebbero essere descritti tramite il Processo 1 quando avviene una misura. Everett dirà riguardo al collasso della funzione d'onda «A me sembrava innaturale che ci dovesse essere un processo "magico" in cui avviene una cosa piuttosto drastica (il collasso della funzione d'onda), mentre in tutti gli altri casi si assume che i sistemi rispettino leggi perfettamente naturali e continue». [12]

Inoltre, se vogliamo costruire una funzione d'onda che descriva l'intero universo, non c'è spazio per un osservatore esterno, dato che non esiste nulla all'infuori dell'universo. L'idea di Everett è invece che la meccanica quantistica sia in grado di descrivere tutti i processi, incluso il processo di misura, e che quest'ultimo possa essere descritto allo stesso modo di qualunque altra interazione tra due sistemi.

Everett propone un esperimento mentale simile a quello dell'amico di Wigner [21], per mostrare come la descrizione di più osservatori non sia compatibile con il Processo 1. In questo esperimento si prendono in considerazione un sistema S e due sperimentatori A e B . A misura una certa quantità di S , e annota il risultato della misura su un taccuino. B entrerà nel laboratorio una settimana dopo, e solo allora leggerà il risultato della misura sul taccuino. Bisogna allora chiedersi come questo esperimento possa essere descritto con la meccanica quantistica.

Possiamo pensare che A conosca la funzione d'onda iniziale di S , e sia quindi in grado di calcolare la sua funzione d'onda al momento della misura secondo il Processo 2. Questo permette ad A di conoscere i possibili esiti della misura con le relative probabilità, e di calcolare la funzione d'onda di S successivamente alla misura secondo il Processo 1. D'altro canto B potrebbe conoscere la funzione

d'onda di tutto il laboratorio, includendo al suo interno A ed S . In questo modo B potrà prevedere cosa potrà trovare scritto nel taccuino, calcolando anche in questo caso la probabilità di ogni esito possibile.

Quando B entrerà nel laboratorio e leggerà il taccuino, la funzione d'onda del sistema laboratorio andrà a collassare secondo il Processo 1, dato che in quel momento la misura sarà stata completata da B stesso. I due punti di vista di A e B risultano incompatibili dato che il Processo 1 è avvenuto in due momenti differenti, e quindi risulta complicato capire quando effettivamente sia avvenuto il "passaggio dal possibile al reale". Inoltre è possibile pensare che la descrizione corretta non sia né quella di A né quella di B , ma quella di un terzo osservatore esterno a entrambi. Questo esempio mette in evidenza un altro problema relativo al collasso della funzione d'onda: non solo non è ben definito cosa sia un osservatore, ma non è neanche possibile descrivere un universo contenente più osservatori.

Everett cita allora varie spiegazioni alternative, che permetterebbero di mantenere una descrizione consistente. Si potrebbe per esempio pensare che esista un solo osservatore nell'intero universo, ma risulta allora problematico stabilire chi o cosa sia questo osservatore. Un'altra opzione è che la meccanica quantistica sia limitata e non sia in grado di descrivere il processo di misura. In questo caso possiamo sicuramente descrivere con le leggi della meccanica quantistica gli strumenti di misura, che sono, generalmente parlando, degli apparati elettro-meccanici, e rimarrebbero esclusi dalla descrizione gli esseri umani e gli altri animali. Questo però non è compatibile né con l'assunzione di Everett secondo cui la meccanica quantistica può descrivere ogni fenomeno, né con il principio del parallelismo psicofisico. Questo principio era stato citato anche da von Neumann ([19], [20]), secondo cui «è un requisito fondamentale del punto di vista scientifico - il cosiddetto principio del parallelismo psico-fisico - che deve essere possibile descrivere i processi extra-fisici della percezione soggettiva come se fossero in realtà nel mondo fisico». In altre parole dobbiamo ritenere che la meccanica quantistica sia in principio in grado di descrivere anche una persona con una opportuna funzione d'onda, e che in quest'ultima sia contenuta anche la descrizione dei pensieri e delle emozioni della persona stessa. Un'altra opzione è che la descrizione corretta sia data da una teoria delle variabili nascoste: la funzione d'onda di un sistema non sarebbe allora una descrizione completa del sistema, e le affermazioni di tipo probabilistico tipiche della meccanica quantistica, sarebbero un risultato della nostra ignoranza e dell'incompletezza della descrizione.

Everett rifiuta tutte queste opzioni, descrivendo l'interpretazione di Copenaghen come «disperatamente incompleta a causa della sua dipendenza dalla fisica classica» e la teoria di Bohm come «scomoda e artificiale» [11], e parte dall'assunzione che la meccanica quantistica sia in grado di descrivere ogni fenomeno: il Processo 2 deve allora essere in grado di descrivere anche il processo di misura. Il Processo 1 viene eliminato nella teoria di Everett e le leggi della meccanica ondulatoria sono considerate universali, includendo la descrizione degli osservatori e degli strumenti di misura. Il processo di misura è quindi descritto come qualunque altro processo, e gli osservatori sono descritti da una opportuna funzione d'onda, come tutti gli altri sistemi.

Le teorie del collasso sono però in grado di descrivere correttamente un gran numero di fenomeni. Queste teorie quindi non devono essere completamente rifiutate e la nuova teoria dovrà dare le stesse previsioni, là dove le teorie del collasso possono essere applicate. La teoria di Everett deve quindi estendere le teorie precedenti e permettere di studiare tutti i fenomeni dell'universo con la meccanica quantistica. Il Processo 1 riappare nella teoria di Everett a livello soggettivo: anche se non avviene effettivamente nessun processo di questo tipo, il mondo appare a ciascun osservatore come se il Processo 1 fosse effettivamente avvenuto. Anche nella teoria di Everett, così come nei già citati Heisenberg e von Neumann, risulta importante considerare non solo la realtà oggettiva, descritta dalla funzione d'onda, ma anche l'esperienza di ciascun singolo osservatore. Come vedremo nel prossimo capitolo ci sono delle profonde differenze tra la teoria di Everett e le teorie del collasso, ma il punto d'unione tra le due teorie va trovato proprio nell'esperienza che essi predicano per ciascun osservatore: è proprio l'esperienza prevista che deve risultare compatibile tra tutte queste teorie.

Capitolo 2

La teoria di Everett

Everett presenta la sua teoria come una formulazione più generale e completa della teoria quantistica. Lo scopo è di poter costruire una funzione d'onda universale: un'unica funzione d'onda in grado di descrivere l'intero universo. L'assunzione è proprio che la meccanica quantistica sia in grado di descrivere ogni singolo fenomeno.

Everett sviluppa la sua teoria a partire dall'abolizione del Processo 1: tutto è descritto dal solo Processo 2. Questa descrizione prende il nome di “meccanica puramente ondulatoria”, dato che il Processo 2 descrive proprio il comportamento ondulatorio e non sono previsti altri tipi di processi.

Everett considera la sua teoria concettualmente più semplice proprio perché c'è un solo processo da considerare: un solo principio valido per tutti i fenomeni. Il Processo 1 è visto come un “postulato aggiuntivo” che non è più necessario in questa nuova formulazione della meccanica quantistica: è sufficiente dare una corretta interpretazione della funzione d'onda dell'universo per descrivere qualunque fenomeno. In questa nuova formulazione il trattamento preferenziale del processo di osservazione è totalmente rimosso. Gli osservatori e le misurazioni sono trattati al pari di qualunque altro processo.

Il risultato è una teoria in cui anche l'osservatore è descritto da una opportuna funzione d'onda. Diventa possibile descrivere gli osservatori e gli strumenti di misura, così come è possibile descrivere il comportamento di più osservatori simultanei. Gli osservatori sono sistemi quantistici come tutti gli altri, così come la misurazione è una interazione come tutte le altre. A seguito di una misura lo stato dell'osservatore dipenderà dal valore misurato, e quindi anche dallo stato del sistema osservato, e i due sistemi risulteranno quindi correlati.

In questa teoria non esiste il collasso della funzione d'onda e questo ha una forte conseguenza: nell'universo descritto da Everett, tutti i possibili esiti di una misura sono sempre realizzati. Possiamo pensare a un universo composto da numerose linee spazio-temporali parallele. A seguito di una misurazione, ogni esito possibile della misura si realizza in una linea spazio-temporale differente, ma ogni linea temporale contiene una copia dell'osservatore indipendente dalle altre: non possono né interagire né comunicare.

Si assiste dunque allo “splitting” o “ramificazione” degli osservatori: ogni linea spazio-temporale contiene una copia dell'osservatore che ha ottenuto uno specifico e ben definito risultato della misura, che può essere differente dal risultato ottenuto dalle altre copie. Per questo motivo questa teoria prende anche il nome di “interpretazione a molti mondi” della meccanica quantistica. In questa descrizione, a seguito di una misura, non esiste un singolo stato che descrive l'osservatore, dato che esso è correlato con il sistema misurato. Si può però studiare il punto di vista di ogni copia dell'osservatore: ciascuno può vedere solo uno degli universi che compongono l'insieme di universi, che corrisponde alla linea spazio-temporale di cui può avere esperienza. Si può allora calcolare lo stato relativo per ciascuna copia dell'osservatore: questo stato non è una descrizione completa dell'universo, ma è una descrizione della singola linea spazio-temporale e corrisponde a ciò che ogni copia dell'osservatore può sperimentare in seguito alla misura.

Everett inoltre critica le teorie come quella di Copenaghen, che richiedono sempre una descrizione classica degli osservatori e delle quantità misurate. L'idea di Everett è che non sia necessario ap-

poggiarsi alla meccanica classica, ma che la descrizione quantistica sia sufficiente. In questa teoria i fenomeni classici possono però essere dedotti, come fenomeni emergenti. Non c'è nessuna necessità di introdurre postulati aggiuntivi, come il Processo 1: se la meccanica quantistica è capace di descrivere ogni sistema, anche tutte le proprietà dei sistemi classici sono ben descritte da una opportuna funzione d'onda. I sistemi classici, inclusi i sistemi macroscopici, sono considerati come una composizione di numerosi sistemi microscopici che interagiscono tra loro: possono allora essere descritti tramite le leggi della meccanica quantistica e ogni loro proprietà sarà descritta nella loro funzione d'onda.

Un'altra questione riguarda la probabilità: per Everett anche la regola di Born è un postulato aggiuntivo e non necessario. Tutte le affermazioni che riguardano la probabilità possono essere dedotte dalla funzione d'onda dei sistemi che andiamo a studiare. Il contenuto della funzione d'onda prevista dalla teoria di Everett risulta molto diverso da quello descritto dalle teorie del collasso, dato che tutti gli eventi possibili si realizzano. Sappiamo però che le teorie del collasso descrivono correttamente numerosi fenomeni e quindi le due teorie devono dare le medesime previsioni per questi fenomeni. Il punto d'unione tra le due teorie è proprio questo: se andiamo a studiare una sequenza di misurazioni fatta da un osservatore, le sequenze previste dalle due teorie risultano compatibili.

La teoria risultante è una teoria in cui tutto l'universo può essere descritto da una opportuna funzione d'onda che evolve in modo continuo e deterministico. La funzione d'onda è in questa teoria l'entità fondamentale e obbedisce sempre a un'equazione deterministica. La funzione d'onda rappresenta una descrizione completa dell'universo ed è in grado di descrivere i fenomeni per come appaiono agli osservatori. Per comprendere il contenuto di questa teoria bisogna studiare proprio quale sia l'esperienza soggettiva prevista per ciascun osservatore. Come vedremo nel prossimo paragrafo il risultato è una teoria che da una parte è sempre oggettiva e deterministica, e dall'altra risulta probabilistica a livello soggettivo.

2.1 Il processo di misura

Vediamo allora come si descrive un osservatore nella teoria di Everett. Per fare un esempio, possiamo immaginare di voler misurare la componente di spin lungo l'asse z di una particella. Vogliamo descrivere il comportamento dello strumento di misura O con una opportuna funzione d'onda.

Nel nostro caso possiamo considerare due sistemi: lo strumento di misura è descritto dalla funzione d'onda ψ^O e la particella, o più in generale il sistema S che viene misurato, dalla funzione d'onda ψ^S . Inizialmente i due sistemi sono indipendenti, ma come vedremo dopo la misurazione risulteranno correlati, e andranno a formare un unico sistema composto, descritto dalla funzione ψ^{S+O} .

Come ben sappiamo lo stato di una particella di spin $\frac{1}{2}$ è una combinazione dei due stati ϕ_{\uparrow} (spin up) e ϕ_{\downarrow} (spin down). Lo strumento di misura dovrà essere in grado di interagire con la particella e di rivelare il suo spin allo sperimentatore. Lo stato dello strumento può essere direttamente determinato dallo sperimentatore, e sarà descritto dagli stati ψ^O , ψ_{up}^O , ψ_{down}^O , che rappresentano rispettivamente lo strumento prima di aver effettuato la misura, lo strumento che ha misurato spin up e lo strumento che ha misurato spin down.

Se immaginiamo che la misura sia condotta senza errori e senza disturbare lo stato di S , sappiamo già come descrivere l'interazione nel caso in cui S si trovi in un autostato di spin. Infatti se per esempio lo stato di S fosse ϕ_{\uparrow} (o ϕ_{\downarrow}) ci aspettiamo che lo strumento misuri sempre spin up (o spin down) e che lo stato di S rimanga inalterato.

Lo stato prima e dopo la misura sarà allora:

$$\begin{aligned}\phi_{\uparrow}\psi^O &\longrightarrow \phi_{\uparrow}\psi_{up}^O \\ \phi_{\downarrow}\psi^O &\longrightarrow \phi_{\downarrow}\psi_{down}^O\end{aligned}$$

L'idea di Everett è che sia sempre possibile descrivere sia lo strumento di misura che il sistema S con delle opportune funzioni d'onda. Lo strumento di misura non è altro che un sistema composto da tanti sottosistemi microscopici che interagiscono tra loro e con S . Se la meccanica quantistica è una teoria completa, potrà descrivere tutti questi sottosistemi e le loro interazioni con opportune funzioni d'onda e opportuni operatori di interazione.

Nel nostro caso non siamo a conoscenza di una descrizione completa dello strumento di misura, ma possiamo dire che il sistema composto $S+O$ dovrà seguire una equazione del tipo $i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi^{S+O} = \hat{H} \psi^{S+O}$, dove \hat{H} è un opportuno operatore lineare. L'evoluzione temporale di ψ^{S+O} è quindi descritta da un operatore lineare, e possiamo sfruttare la linearità per capire cosa succede se la misura avviene quando S si trova in una sovrapposizione dei due stati.

Se lo stato iniziale di S è $\psi^S = \alpha\phi_{\uparrow} + \beta\phi_{\downarrow}$, si ricava:

$$(\alpha\phi_{\uparrow} + \beta\phi_{\downarrow})\psi^O \longrightarrow \alpha\phi_{\uparrow}\psi_{up}^O + \beta\phi_{\downarrow}\psi_{down}^O$$

Il risultato della misura è una sovrapposizione di due stati: lo stato $\phi_{\uparrow}\psi_{up}^O$ descrive un sistema S con spin up e uno strumento di misura che ha misurato spin up, mentre $\phi_{\downarrow}\psi_{down}^O$ descrive un sistema S con spin down e uno strumento di misura che ha misurato spin down. Questo risultato potrebbe apparire paradossale, perché chiunque potrebbe constatare che lo strumento di misura non può indicare spin up e spin down contemporaneamente. Come possono allora coesistere i due stati nella sovrapposizione? La funzione d'onda finale descrive in realtà due distinte copie dell'osservatore: una ha misurato spin up e l'altra ha misurato spin down. Ciascuna delle due copie ha ottenuto un risultato della misura ben definito.

I due osservatori risultano poi indipendenti: non possono interagire né comunicare, e i risultati di future interazioni e misure che coinvolgono un osservatore sono indipendenti dallo stato dell'altro osservatore.

Possiamo immaginare che esistano due linee spazio-temporali differenti: in una si è misurato spin up e nell'altra si è misurato spin down. Si può parlare di "splitting", "branching" o "diramazione": una misurazione porta lo stato del sistema osservatore a ramificarsi e descrive in rami diversi misure con risultati diversi. Bisogna sottolineare come non sia avvenuto alcun collasso della funzione d'onda: l'evoluzione temporale data dall'equazione di Schrödinger è sempre un processo continuo e deterministico.

Abbiamo considerato come esempio di osservatore uno strumento di misura, ma questa descrizione è valida anche per altri tipi di osservatori, come gli stessi esseri umani. Se assumiamo che la meccanica quantistica possa dare una descrizione dell'universo soddisfacente, dovrà essere anche possibile costruire una funzione d'onda che descriva una persona.

Dato che non siamo al momento interessati a ogni possibile caratteristica di un essere umano, ma solo a descrivere la misurazione, possiamo continuare a utilizzare una base di stati analoga a quella introdotta prima per O .

In questo caso possiamo descrivere uno sperimentatore umano U con la funzione d'onda ψ^U . Vogliamo descrivere lo sperimentatore e le sue interazioni con lo strumento di misura, che lo porteranno a convincersi che la particella si trovi in uno stato piuttosto che un altro. Lo stato ψ_{up}^U (ψ_{down}^U) sarà quindi la descrizione di un osservatore che ha determinato con assoluta certezza che lo strumento di misura indica che S ha spin up (spin down). Stiamo descrivendo una persona che è convinta di aver misurato spin up e quindi la funzione d'onda deve rendere conto non di un dato oggettivo esterno, ma di una percezione interna.

In accordo con il principio del parallelismo psico-fisico dobbiamo pensare però che i pensieri e le percezioni dello sperimentatore possano essere ben descritti da una opportuna funzione d'onda, come già detto in precedenza. Rifacendoci agli esempi precedenti, lo stato di ψ^U dipenderà dallo stato di ψ^O e si possono considerare i seguenti eventi, se assumiamo sempre che la misura sia condotta senza errori.

$$\begin{aligned} \phi_{\uparrow}\psi^O\psi^U &\longrightarrow \phi_{\uparrow}\psi_{up}^O\psi^U \longrightarrow \phi_{\uparrow}\psi_{up}^O\psi_{up}^U \\ \phi_{\downarrow}\psi^O\psi^U &\longrightarrow \phi_{\downarrow}\psi_{down}^O\psi^U \longrightarrow \phi_{\downarrow}\psi_{down}^O\psi_{down}^U \end{aligned}$$

La descrizione di un osservatore umano porta sicuramente delle complicazioni aggiuntive rispetto a uno strumento di misura elettromeccanico, ma risulta sicuramente di fondamentale importanza se vogliamo studiare quale sia l'esperienza individuale prevista dalla teoria. Se consideriamo di nuovo la possibilità che S si trovi inizialmente in una sovrapposizione di spin up e spin down, la misurazione porterà alle seguenti transizioni:

$$(\alpha\phi_{\uparrow} + \beta\phi_{\downarrow})\psi^O\psi^U \longrightarrow (\alpha\phi_{\uparrow}\psi_{up}^O + \beta\phi_{\downarrow}\psi_{down}^O)\psi^U \longrightarrow \alpha\phi_{\uparrow}\psi_{up}^O\psi_{up}^U + \beta\phi_{\downarrow}\psi_{down}^O\psi_{down}^U$$

La situazione è analoga a quella già descritta in precedenza, con la differenza che ora è lo sperimentatore ad essersi ramificato. Questa ramificazione può risultare problematica, dato che nessuno di noi percepisce uno splitting di sé stesso durante la propria vita, ma questo è perfettamente coerente con la teoria di Everett. La teoria prevede proprio che nessuno percepisca lo splitting, ma questo aspetto sarà chiarito meglio più avanti in questo testo.

La misura per Everett è un processo che mette in correlazione due sistemi. Un osservatore è un sistema che assume stati diversi a seconda della quantità misurata. Per Everett un osservatore deve anche essere in grado di registrare in qualche modo il valore misurato: deve cioè avere una qualche caratteristica abbastanza permanente che dipenda dal sistema misurato.¹

La descrizione fatta in questo capitolo non contiene nessun'altra caratteristica degli osservatori: si tratta di una descrizione astratta e minimale. Nel mondo reale un osservatore potrebbe essere un oggetto macroscopico come uno strumento di misura, che rivela in qualche modo le quantità fisiche misurate agli osservatori. In questo caso la funzione d'onda che descrive lo strumento di misura sarebbe quella di un sistema composto da un grandissimo numero di particelle, e a ogni misura possibile sarebbe associato un diverso stato macroscopico descritto da una diversa funzione d'onda.

La misurazione non è un processo diverso dagli altri, così come un osservatore non è un sistema diverso dagli altri: qualunque interazione che presenti le caratteristiche qui descritte può essere considerata una misurazione, così come qualunque sistema che presenti queste caratteristiche può essere considerato un osservatore.

Si può dire allora che il ruolo di osservatore è un ruolo relativo: ciascun sistema può in qualunque momento comportarsi come un osservatore o non farlo, a seconda delle interazioni a cui partecipa. Abbiamo trattato un esempio di misurazione molto semplice, dato che esistevano solo due esiti quantizzati per la misura, ma esistono anche situazioni più complicate. Si può infatti parlare di misure non ideali, in cui lo stato del sistema in esame viene alterato dalla misura, di misure approssimate e di misure con errore e di misure di quantità non quantizzate. Se per esempio si considera una misura di posizione, gli esiti possibili per la misura sono infiniti. Esiste in questo caso una quantità di esiti non numerabile per la misura, e a ciascuno di questi è associata una copia dell'osservazione: ci troviamo di fronte allo splitting di un osservatore in infiniti osservatori. Inoltre si può pensare che due sistemi che interagiscono si stiano continuamente misurando a vicenda, e anche questa eventualità può essere trattata nella teoria di Everett.

2.2 Confronto

Rimane ora da capire se la teoria di Everett possa essere considerata una teoria fisica valida. Come già detto le previsioni fatte da Everett devono essere compatibili con quelle delle teorie quantistiche ortodosse, dove queste sono applicabili, ma il vero confronto da fare è tra l'esperienza predetta dalla teoria e l'effettivo risultato degli esperimenti.

Per Everett ogni teoria fisica può essere divisa in due parti: la parte formale e la parte interpretativa. La parte formale consiste in una struttura puramente logico-matematica: non è altro che una collezione di simboli e di regole per la loro manipolazione. La parte interpretativa è un insieme di "associazioni": sono regole che mettono alcuni elementi della parte formale in corrispondenza con il mondo percepito. Il punto essenziale di una teoria è che deve esistere un isomorfismo tra l'esperienza predetta e l'esperienza vissuta nel mondo reale. Possono comunque esistere degli elementi del modello matematico che non corrispondono a nessun evento del mondo reale, purché l'esperienza predetta sia comunque compatibile con quella effettivamente vissuta.

Nella sua tesi Everett dice che «Una volta che abbiamo stabilito che qualunque teoria fisica è essenzialmente solo un modello del mondo dell'esperienza, dobbiamo rinunciare a qualunque speranza di trovare "la teoria corretta". Non c'è nulla che impedisce a una varietà di modelli distinti di essere in corrispondenza con l'esperienza (i.e. "corretti"), e inoltre non c'è nessun modo di verificare che un qualche modello sia completamente corretto, semplicemente perché non possiamo accedere

¹ [14] Capitolo 4 §1, [10] Capitolo 5

all'esperienza nella sua totalità».² Possono quindi esistere più teorie che sono compatibili con i dati sperimentali, e si può scegliere di volta in volta una teoria differente per descrivere i fenomeni da studiare, in base a quale teoria risulta più adatta a descrivere lo specifico fenomeno. Una teoria non deve però limitarsi a descrivere i fenomeni noti, ma può anche prevedere nuovi fenomeni mai osservati. Un altro criterio da tenere in considerazione è la semplicità: Everett considera la sua teoria concettualmente semplice, dato che tutti i fenomeni sono governati da una sola legge, anche se questo introduce delle complicazioni nei calcoli. Questo aspetto ha anche delle conseguenze che sono per Everett molto importanti: la sua teoria contiene la sua stessa interpretazione e non necessita di postulati aggiuntivi, né necessita di appoggiarsi alla meccanica classica. Tutti i fenomeni classici possono invece essere dedotti a partire da questa interpretazione della meccanica quantistica, facendo uso della sola meccanica ondulatoria. I criteri con cui si può accettare o rifiutare una teoria sono per Everett fondamentalmente due: deve essere consistente a livello logico e deve dare una rappresentazione fedele della nostra percezione del mondo. Tutti gli altri criteri che possono essere adottati come l'utilità e la semplicità sono totalmente arbitrari: tutto ciò che si può fare è rifiutare quelle teorie che non sono in accordo con l'esperienza.

Vediamo ora con un esempio se la teoria di Everett è compatibile con le teorie del collasso: se le previsioni date dalle due teorie sono compatibili, la teoria di Everett potrà essere considerata una fedele rappresentazione della realtà, dato che come già detto le teorie del collasso descrivono correttamente un grande numero di fenomeni. Consideriamo ora cosa avverrebbe se si misurasse due volte lo spin di S a partire dallo stato $\alpha\phi_{\uparrow} + \beta\phi_{\downarrow}$, supponendo che lo spin sia conservato tra una misura e l'altra. Secondo le teorie che prevedono il collasso della funzione d'onda, se nella prima misurazione si ottiene spin up, il sistema S farà la seguente transizione:

$$\alpha\phi_{\uparrow} + \beta\phi_{\downarrow} \longrightarrow \phi_{\uparrow}$$

e una seguente misura di spin darà sicuramente come risultato spin up. Nella teoria di Everett invece il risultato della prima misurazione è

$$(\alpha\phi_{\uparrow} + \beta\phi_{\downarrow})\psi^O \longrightarrow \alpha\phi_{\uparrow}\psi_{up}^O + \beta\phi_{\downarrow}\psi_{down}^O$$

Per considerare il risultato di una misurazione successiva, dobbiamo poter descrivere un osservatore che ha eseguito una sequenza di osservazioni. Possiamo per esempio indicare un osservatore che ha misurato due volte up con $\psi_{[up,up]}^O$, un osservatore che ha misurato prima up e poi down con $\psi_{[up,down]}^O$ e così via. Se consideriamo i due stati $\phi_{\uparrow}\psi_{up}^O$, $\phi_{\downarrow}\psi_{down}^O$, si può notare che il sistema S si trova in entrambi i casi in un autostato di spin, e quindi una ulteriore misura dello spin porta un solo valore possibile. Se la funzione d'onda di partenza fosse una di queste due, la misura porterebbe alle seguenti transizioni:

$$\begin{aligned} \phi_{\uparrow}\psi_{[up]}^O &\longrightarrow \phi_{\uparrow}\psi_{[up,up]}^O \\ \phi_{\downarrow}\psi_{[down]}^O &\longrightarrow \phi_{\downarrow}\psi_{[down,down]}^O \end{aligned}$$

Ricordando poi che l'operatore di evoluzione temporale è lineare, una seconda misura porterà alla seguente transizione:

$$\alpha\phi_{\uparrow}\psi_{[up]}^O + \beta\phi_{\downarrow}\psi_{[down]}^O \longrightarrow \alpha\phi_{\uparrow}\psi_{[up,up]}^O + \beta\phi_{\downarrow}\psi_{[down,down]}^O$$

La teoria prevede dunque due esiti possibili al termine delle due misurazioni: o si misura due volte up oppure si misura due volte down. Questo risultato è perfettamente compatibile con il risultato dato dalle teorie del collasso. Questo risultato può essere esteso anche a misure di altre grandezze e anche alla descrizione di multiple misurazioni successive: le sequenze di misurazioni che risultano possibili nella teoria di Everett sono sempre le stesse che si otterrebbero se si applicasse il Processo 1. Anche se non avviene nessun collasso della funzione d'onda, l'esperienza soggettiva prevista per ciascun osservatore è la stessa esperienza prevista dalle teorie del collasso.

² [14], Appendice 2

Dopo che i due sistemi hanno interagito, essi risultano correlati: non esiste più un unico stato per l'osservatore, ma esiste solo una sovrapposizione di stati correlati del sistema composto da osservatore e sistema misurato. Per Everett «Tutte le ramificazioni esistono simultaneamente dopo ogni sequenza di osservazioni data»³ ed «è improprio attribuire meno validità o “realtà” ad un elemento della sovrapposizione rispetto agli altri»⁴: non si può dire che un ramo sia “reale” mentre gli altri non lo sono. Questo si contrappone al punto di vista di Heisenberg, dato che nella teoria di Everett non c'è nessuna “transizione dal possibile all'attuale”. In una lettera [11] Everett scrive proprio «non c'è nessuna transizione di questo tipo, e non è necessaria una simile transizione affinché la teoria sia in accordo con la nostra esperienza».

La nostra esperienza ci insegna che non percepiamo nessuna diramazione e che un solo evento si realizza tra tutti quelli possibili, ma questo non è affatto in disaccordo con la teoria: la teoria prevede proprio che non ci sia nessuna percezione dello splitting e che, anche se tutti gli esiti possibili sono effettivamente realizzati, siamo in grado di percepire uno solo di questi.

Rimane ora da vedere se la descrizione di Everett sia compatibile con la regola di Born. La regola di Born dice che per uno stato del tipo $\alpha\phi_{\uparrow} + \beta\phi_{\downarrow}$, la probabilità di misurare spin up sarà pari a $|\alpha|^2$. Per verificare la validità di questo postulato è sufficiente misurare lo spin di N sistemi, tutti preparati nello stesso stato $\psi^S = \alpha\phi_{\uparrow} + \beta\phi_{\downarrow}$. Ci aspettiamo che per un valore di N sufficientemente grande, il rapporto $\frac{\#eventi\ favorevoli}{N}$ converga a $|\alpha|^2$.

Nella teoria di Everett non è possibile descrivere la probabilità in questi termini: dato che tutti gli esiti possibili sono sempre realizzati non ha senso parlare di un conteggio di eventi favorevoli. In particolare, a seguito di N osservazioni, si otterrà uno stato finale in cui sono presenti un gran numero di copie dell'osservatore: ci sarà una copia per ogni possibile sequenza di osservazioni. Per poter parlare di probabilità bisogna chiedersi cosa succede per N che tende a ∞ . In questo caso si può dimostrare che la frequenza con cui appare un qualche risultato è la stessa data dalla regola di Born per quasi tutti gli osservatori, eccetto che per un insieme di osservatori di misura 0. Ancora una volta l'esperienza soggettiva prevista dalla teoria di Everett risulta compatibile con l'esperienza prevista dalle teorie del collasso.

Tutti questi ragionamenti si possono estendere anche ad altri tipi di misurazioni e interazioni. La teoria di Everett risulta essere compatibile con le teorie del collasso, nel senso che, dove queste ultime sono applicabili, prevede la stessa esperienza. Le teorie del collasso non sono però in grado di descrivere gli osservatori e la misura, mentre la teoria di Everett può sempre essere applicata, e quest'ultima risulta in questo senso una estensione delle teorie del collasso. La teoria può poi descrivere correttamente anche più di un osservatore, e differenti osservatori possono misurare lo stesso sistema e confrontare i propri risultati senza incongruenze. In particolare⁵:

1. Se due osservatori misurano la stessa quantità per un sistema e successivamente confrontano i risultati ottenuti, troveranno che questi ultimi risultano compatibili.
2. Consideriamo due quantità A e B a cui sono associati due operatori che non commutano. Supponiamo un osservatore misuri una A per un sistema, successivamente un altro osservatore misuri B per lo stesso sistema e infine il primo osservatore misuri nuovamente A per il medesimo sistema. In generale la nuova misura per A potrà essere diversa da quella iniziale.
3. Consideriamo due sistemi correlati non interagenti, e consideriamo il caso in cui un osservatore misura una certa quantità sul primo sistema, successivamente un secondo osservatore misura una quantità sul secondo sistema e infine il primo osservatore ripete la stessa misura sul primo sistema. Allora il primo osservatore riotterrà lo stesso risultato in entrambe le misure, e la misura effettuata dal secondo osservatore non avrà nessun effetto su quella effettuata dal primo. Questo permette di trattare i paradossi che riguardano sistemi correlati non interagenti, come il paradosso EPR [9], che Everett definisce «paradossi fittizi».

³ [10] Capitolo 5

⁴ [14] Capitolo 5 §5

⁵ [10] capitolo 5

Si tratta quindi di una teoria che può descrivere in modo coerente qualunque processo mediante le leggi della meccanica quantistica. Questa teoria elimina il ruolo preferenziale dell'osservazione e ha il ruolo di una metateoria per la teoria classica: le teorie convenzionali possono essere dedotte a partire dalla teoria di Everett.

Capitolo 3

Critiche

Prima della pubblicazione della tesi John Wheeler, relatore di Everett, si occupò di far leggere il testo a numerosi altri fisici per chiedere il loro parere. Furono in molti a trovarsi in disaccordo con la tesi e in questo capitolo sono riportate alcune delle reazioni al testo. Per Wheeler risultava importante l'approvazione da parte di alcuni dei suoi colleghi e in particolare quella di Niels Bohr, ma questo risultava molto difficoltoso dato che le idee di Everett erano in forte contrasto con l'interpretazione di Copenaghen.

Per poter ricevere l'approvazione di Wheeler, Everett dovette rivedere la sua tesi cambiandone in parte il linguaggio eliminando numerose pagine, e il testo finale pubblicato risultò più breve del testo originale. Alcuni dei commenti riportati sono quindi riferiti a questa versione più breve della tesi di Everett, o alla sua tesi di dottorato che risulta ancora più breve.

Per una serie di motivi, tra cui proprio questi attriti con il resto della comunità scientifica, Everett decise di ritirarsi dal mondo accademico e prese parte alla ricerca in campo militare. Per questo motivo possiamo conoscere il pensiero di Everett riguardo a queste critiche leggendo i suoi commenti e le sue risposte alle lettere stesse, ma non ci sono ulteriori approfondimenti dati da nuove pubblicazioni su questo tema.

3.1 Groenewold

Groenewold [15] si mostra molto critico della teoria di Everett, tanto da aprire la sua lettera dicendo di trovarsi in profondo disaccordo riguardo agli aspetti fondamentali della fisica ed epistemologici. In [2] sono presenti numerosi commenti di Everett a questa lettera, scritti come note a margine sulla lettera stessa.

Groenewold nella sua lettera illustra come si possa prevedere il risultato di una misura in meccanica quantistica, a partire dalla funzione d'onda del sistema considerato: tutte le quantità osservabili devono essere espresse in relazione ad altre misure già effettuate. In altre parole: quando si ricava la previsione del risultato di una misura da una funzione d'onda, questa previsione deve essere messa statisticamente in relazione con altre misure già effettuate. La meccanica quantistica deve cioè occuparsi di mettere in relazione una misura passata con una previsione di una possibile misurazione futura, e si tratta quindi sempre di una probabilità condizionale. Secondo Groenewold questo aspetto è stato trascurato nei testi di Everett.

Il commento di Everett a questa critica è: «Al contrario, c'è una discussione completa nel mio testo». La tesi di Everett contiene infatti una trattazione estesa delle distribuzioni statistiche condizionali e congiunte, anche dal punto di vista della teoria dell'informazione. Si potrebbe dire che non solo Everett ha affrontato l'argomento, ma che questo è anche uno degli argomenti centrali della sua tesi.

Un'altra critica di Groenewold riguarda proprio il processo di misura, affermando che il carattere macrofisico degli strumenti di misura e di registrazione del risultato è decisivo per il processo di misura stesso. Secondo Groenewold il Processo 2 è solo un'approssimazione soddisfacente di come un sistema quantistico possa interagire con un sistema di misura esterno, macroscopico, descritto sempre

in termini classici. Aggiunge inoltre che è necessario tenere conto della distruzione della coerenza che avviene in seguito alla misurazione e che ci sono vari fenomeni che portano a questo, tra cui proprio il carattere macrofisico degli strumenti di registrazione.

Everett si dimostra molto contrario anche su questi punti, dato che ritiene che la sua descrizione sia una corretta estensione dell'interpretazione di Copenaghen. In particolare, come si evince dai suoi commenti a questa lettera, Everett ritiene che non sia necessario dare una descrizione classica degli strumenti di misura e che non sia necessario considerare la distruzione della coerenza a seguito di una misurazione, dato che tutti questi sistemi possono essere descritti dalla meccanica ondulatoria tanto quanto qualunque altro sistema microscopico.

Secondo Everett la sua teoria da sola è sufficiente ed è una descrizione che rende semplicemente superflua la trattazione della distruzione della coerenza. Secondo Groenewold gli osservabili sono sempre associati a uno strumento di registrazione macrofisico e vanno quindi descritti in un linguaggio macrofisico, per evitare ambiguità nelle descrizioni.

Everett non è d'accordo neanche con queste affermazioni, commenta che Groenewold non ha compreso la natura delle teorie fisiche e si chiede perché sia necessario basare il concetto di realtà sul linguaggio classico e macrofisico. Per una spiegazione più dettagliata di cosa sia una teoria fisica secondo Everett, si rimanda a pag 10 di questo testo. Dai commenti di Everett risulta comunque chiaro che egli ritiene che Groenewold non abbia compreso appieno la sua tesi e che il suo punto di vista sia vittima di preconcetti tipici dell'idea dualistica che sta dietro all'interpretazione di Copenaghen.

3.2 Petersen

Anche Petersen [17] si trova in disaccordo con Everett e, in particolare, apre la sua lettera dicendo che non ritiene che l'interpretazione a molti mondi possa rappresentare un nuovo chiarimento per i fondamenti della meccanica quantistica. La lettera di Petersen si concentra sulle differenze tra la descrizione della misurazione nell'interpretazione di Everett e nell'interpretazione di Copenaghen: in particolare si dimostra favorevole ad adottare quest'ultima, mentre rifiuta totalmente l'interpretazione a molti mondi.

Secondo Petersen il problema della misura non fa parte della meccanica quantistica dato che, come conseguenza del principio di corrispondenza, la stessa idea di osservazione riguarda la meccanica classica. Afferma inoltre che l'elevata massa degli strumenti di misura, in confronto a quella degli oggetti atomici, permette di ignorare gli effetti quantistici che li riguardano. Afferma inoltre che c'è una sostanziale differenza tra l'interazione di misura e le altre: anche se per esempio possiamo trattare con la meccanica quantistica l'interazione tra un fotone e una lastra fotografica, quando la lastra ricopre il ruolo di "osservatore", essa deve essere trattata in termini classici. Questa è una descrizione della misurazione che ben rispetta le idee dell'interpretazione di Copenaghen.

Everett [13] risponde a questa lettera dicendo che si trova in disaccordo con la teoria di von Neumann e ancora più in disaccordo con quella di Bohr. Il principale problema che incontra con quest'ultima sta proprio nella necessità di appoggiarsi alla fisica classica, dato che questo preclude la possibilità di dedurre i fenomeni classici a partire dalla meccanica quantistica e preclude la possibilità di studiare adeguatamente il processo di misura.

Critica inoltre il sistema dualistico presentato da Bohr, che assegna il concetto di «realtà» alla fisica macroscopica, ma nega lo stesso concetto per il microscopico. Spiega poi che ritiene che, se il principio di corrispondenza può essere stato utile per chiarire i concetti quantistici quando la teoria iniziava a svilupparsi, egli lo considera solo uno stadio provvisorio.

Everett suggerisce allora che sia arrivato il momento di trattare la meccanica quantistica come una teoria fondamentale, senza nessuna dipendenza dalla fisica classica, e di derivare da essa la fisica classica stessa.

Nell'ultima parte della lettera di Everett c'è poi una forte critica all'interpretazione di Copenhagen, di cui egli cita alcuni aspetti che definisce «irritanti». Innanzi tutto Everett critica l'idea che la massività dei macrosistemi permetta di ignorare gli effetti quantistici, dicendo che non c'è nessuna giustificazione per questo fatto, che può essere giustificato solo con un postulato aggiuntivo. Un'altra

critica riguarda l'idea che gli strumenti di misura non siano soggetti agli effetti quantistici: questa affermazione risulta inconsistente con il fatto che si applica a questi strumenti il principio di indeterminazione $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$, che è a tutti gli effetti un fenomeno quantistico.

L'ultimo punto citato da Everett riguarda l'irreversibilità del processo di misura. Secondo l'interpretazione di Copenaghen questa è una caratteristica fondamentale delle misurazioni e, come già spiegato in questo testo, è una delle caratteristiche che possiamo vedere descritte dal collasso della funzione d'onda. Secondo Everett anche questo fenomeno non è ben descritto nella teoria e può essere giustificato solo con un postulato aggiuntivo. Nella teoria di Everett invece questa irreversibilità non è presente: egli afferma infatti che la meccanica ondulatoria è sufficiente alla descrizione di qualunque fenomeno e in questa descrizione tutti i fenomeni risultano reversibili.

3.3 DeWitt

Anche DeWitt [5] lesse la tesi di Everett e, sebbene trovò alcuni aspetti interessanti, non si trovò d'accordo e la criticò principalmente per il fatto che conteneva troppe informazioni.

Nella sua lettera DeWitt paragona il lavoro di Everett a quello della relatività di Einstein, nel senso che in entrambi i casi si pone l'enfasi sul ruolo dell'osservatore e si tratta di due teorie che contengono al loro interno una propria teoria e interpretazione del processo di misura. La grande differenza che sottolinea invece tra le due teorie è che la relatività nasce da una necessità sperimentale e trova in questa stessa necessità un impatto immediato.

Tutto questo manca invece per la teoria di Everett e, secondo DeWitt, per questo motivo l'impatto di questa teoria risulterà limitato.

La più grande critica mossa da DeWitt riguarda invece la possibilità di mettere in corrispondenza la teoria di Everett con l'esperienza. Se da un lato DeWitt non vede nessun problema nel far corrispondere ciò che può essere percepito con ciò che è rappresentato nella teoria relativistica, egli ritiene che la teoria di Everett presenti un contenuto troppo ricco: è descritto un universo che contiene numerose linee spazio-temporali, ma nella nostra esperienza possiamo conoscerne una sola.

Scriverà quindi nella sua lettera che «Il mondo di Everett e il mondo fisico reale non sono isomorfi.» e «Per me, il mondo di Everett non è una rappresentazione fedele del mondo reale». DeWitt inoltre non accetta l'esistenza di una sovrapposizione di stati per gli osservatori così come non accetta la possibilità che un osservatore si «ramifichi». Non trovando una corrispondenza tra questa descrizione e la propria esperienza scriverà anche «Io semplicemente non mi ramifico».

DeWitt paragona poi la teoria di Everett con quella di Bohr e con la teoria a variabili nascoste di Bohm. In particolare sottolinea il fatto che sia nella teoria di Bohr che in quella di Bohm sia necessario fare ricorso a concetti classici.

Si dimostra però critico anche verso queste due teorie, dicendo che la descrizione di Bohr si appoggia a questi concetti classici come a una «stampella» e definendone «disturbante» il ricorso alla discontinuità, mentre descrive come «ripugnante» e «superflua» la struttura matematica della teoria di Bohm. Per DeWitt le descrizioni di Bohr e Bohm risultano autoconsistenti, così come quella di Everett, ma ritiene comunque che quest'ultima non sia in grado di dare una fedele rappresentazione del mondo reale.

Riterrà comunque interessante la teoria di Everett, soprattutto perché contiene una descrizione molto chiara dei problemi fondamentali della teoria quantistica riguardo al problema della misura.

Everett [11] risponde a questa lettera riproponendo la sua descrizione di cosa sia una teoria fisica, già riportata a pag 10 di questo testo. Egli ritiene che non sia necessario che a ogni elemento del mondo reale corrisponda un elemento della teoria fisica, ma che sia sufficiente che l'esperienza prevista dalla teoria sia compatibile con l'esperienza che viene effettivamente vissuta. Non serve quindi che ci sia un isomorfismo tra la teoria e l'esperienza, ma è sufficiente parlare di omomorfismo affinché la teoria possa essere considerata corretta o accurata.

Aggiunge inoltre che non è detto che esista una sola teoria valida e che non bisogna chiedersi quale teoria sia «vera» o «reale», ma che dobbiamo limitarci a rifiutare quelle teorie in cui l'esperienza

prevista non è isomorfa con l'esperienza effettivamente vissuta. Possono esistere più teorie valide e la scelta tra una o l'altra è solo un fatto di gusto personale.

Riguardo al problema riscontrato da DeWitt nella ramificazione degli osservatori, Everett scrive che non c'è alcuna contraddizione: la teoria prevede proprio che questa ramificazione non sia percepita. Per spiegare questo aspetto sottolinea che «per poter decidere se una teoria contraddice la nostra esperienza, è necessario vedere quale esperienza viene predetta dalla teoria stessa», e fa un paragone con la teoria copernicana.

Dice infatti che, quando Copernico scrisse una teoria che prevedeva il moto del pianeta, vennero poste delle obiezioni dicendo che nessuno percepisce questo moto. La teoria copernicana prevede però proprio che questo moto, pur esistendo, non debba essere percepito. Allo stesso modo la teoria di Everett prevede che nessun osservatore percepisca la propria ramificazione, e chiede quindi a DeWitt «Tu percepisci il moto della terra?». Secondo Everett non c'è nessun problema nel fatto che la sua teoria mostri numerose linee spazio-temporali dato che «Non è affatto necessario supporre che dopo un'osservazione in qualche modo un elemento della sovrapposizione finale sia selezionato per assegnargli una misteriosa qualità chiamata "realtà" e che gli altri siano condannati all'oblio». Egli dice quindi che «La teoria è isomorfa con l'esperienza quando ci si preoccupa di andare a vedere quale sia l'esperienza che la teoria predice.».

Nella sua lettera Everett parla anche della teoria di Bohm e di quella di Bohr. Descrive la teoria di Bohm come «scomoda e artificiale» e quella di Copenaghen come «disperatamente incompleta». Secondo Everett un problema dell'interpretazione di Copenaghen è la necessità di appoggiarsi alla fisica classica, rendendo impossibile tanto la deduzione dei fenomeni classici a partire dalla fisica quantistica quanto uno studio adeguato del processo di misura. Definisce inoltre una «mostrosità filosofica» il fatto che nella teoria di Copenaghen si possa parlare del concetto di realtà per il mondo macroscopico, e non per il mondo microscopico.

Successivamente DeWitt tornò sui suoi passi e scrisse più testi in favore dell'interpretazione a molti mondi, sia per divulgare le idee di Everett [8] che per rielaborare la teoria secondo il suo punto di vista [7], diventandone uno dei più grandi promotori.

In particolare nel 1970 pubblica un articolo [6] in cui espone brevemente la teoria di Everett e paragona il suo punto di vista con quelli di Wigner, Bohm, Bohr e Heisenberg. L'articolo si apre dicendo che «Nonostante questa proposta porti a visioni del mondo bizzarre, potrebbe essere la soluzione più soddisfacente mai avanzata». A differenza di quanto affermava nella lettera, DeWitt parla in favore della teoria di Everett, dicendo che ha il pregio di non appoggiarsi alla fisica classica e di contenere nel suo formalismo la sua stessa interpretazione.

Secondo DeWitt la più grande debolezza della teoria rimane comunque la mancanza di conferme sperimentali: le previsioni della teoria di Everett sono compatibili con quelle della teoria di Copenaghen e le due teorie sono quindi sperimentalmente non distinguibili, dato che nessun esperimento può rivelare l'esistenza di altre linee spazio-temporali. Il più grande pregio di questa teoria è invece per DeWitt quello di mettere in primo piano il problema della misura e di fornire una struttura adeguata per discutere di questo problema.

Capitolo 4

Conclusioni

In questa tesi si è analizzata la teoria della funzione d'onda universale di Everett. Come abbiamo visto la teoria parte dal problema della misura, che è un problema di fondamentale importanza per la meccanica quantistica. Abbiamo visto come Everett propone di poter affrontare questo problema, e una parte della discussione che è seguita alla sua proposta. Non c'è un consenso netto al riguardo: non tutti sono d'accordo nel dire che Everett sia riuscito a risolvere il problema e, anzi, sono in molti a schierarsi contro la sua teoria. Abbiamo visto anche come Everett rimanga convinto della validità della sua teoria, rispondendo alle critiche ricevute e argomentando le sue ragioni.

Come abbiamo visto una debolezza della teoria di Everett è quella di non essere motivata da necessità sperimentali. Potremmo dire al riguardo, citando Bell, che la meccanica quantistica "ordinaria" sia valida «per tutte le applicazioni pratiche» [3] [18]. Everett indaga infatti il problema della misura e la possibilità di costruire una funzione d'onda universale, ma questi problemi non riguardano a livello pratico nessun esperimento: è sempre possibile descrivere a livello pratico qualunque esperimento tramite l'interpretazione di Copenaghen, scegliendo in modo arbitrario dove porre il confine tra osservatore e sistema sotto osservazione, riottenendo le stesse previsioni della teoria di Everett.

La teoria di Everett serve quindi a estendere le teorie quantistiche precedenti, ma non a sostituirle. Le caratteristiche che egli ha ricercato in questa teoria sono la semplicità, la coerenza interna e la possibilità di ricavare le leggi della meccanica classica a partire dalla meccanica quantistica. Si tratta di una teoria quantistica che non ha nessun bisogno di appoggiarsi alla teoria classica o ad altre teorie, e che contiene al suo interno la sua stessa interpretazione.

Come dice Everett stesso la scelta tra una interpretazione della meccanica quantistica o un'altra è una mera questione di gusto personale, e ciascuno deve essere libero di scegliere la teoria che meglio si adatta al problema che sta studiando.

Possiamo concludere dicendo che, se da una parte questa teoria rende lo studio di un esperimento pratico molto più complicato dal punto di vista dei calcoli, dato che bisogna sempre tenere conto di più linee spazio-temporali, dall'altra parte fornisce una struttura che permette di comprendere meglio sia il problema della misura che le altre interpretazioni della meccanica quantistica. Lo scopo di Everett è infatti anche quello di fornire una metateoria: una teoria da cui sia possibile dedurre le formulazioni tradizionali [10].

Secondo DeWitt [6] questa "interpretazione della meccanica quantistica può portare importanti contributi per la filosofia della scienza. Mostrando che il formalismo da solo è sufficiente per generare l'interpretazione, ha infuso nuova vita nella vecchia idea di una corrispondenza diretta tra il formalismo e la realtà" e "in ogni caso [questa teoria] è la miglior pretendente come prodotto naturale del programma di interpretazione avviato da Heisenberg nel 1925".

Bibliografia

- [1] Jeffrey Barrett. Everettian Quantum Mechanics. In Edward N. Zalta and Uri Nodelman, editors, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University, Summer 2023 edition, 2023.
- [2] Jeffrey A Barrett and Peter Byrne. *The Everett interpretation of quantum mechanics: Collected works 1955-1980 with commentary*. Princeton University Press, 2012.
- [3] John Bell. Against ‘measurement’. *Physics World*, 3(8):33, 1990.
- [4] Susanna Cocco. Empirical faithfulness and typicality: a pragmatic reading of Everett’s pure wave mechanics. *Università degli Studi di Cagliari*.
- [5] Bryce DeWitt. Lettera di DeWitt a Wheeler del 7 maggio 1957. In [2], pag. 242.
- [6] Bryce S. DeWitt. Quantum mechanics and reality. *Physics Today*, 23(9):30–35, September 1970.
- [7] Bryce S. DeWitt. The many-universes interpretation of quantum mechanics. In [8], pag. 167. 1971.
- [8] Bryce S. DeWitt and Neill Graham. *The Many-Worlds Intepretation of Quantum Mechanics*. Princeton University Press, 1973.
- [9] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, 47(10):777–780, May 1935.
- [10] Hugh Everett. ”Relative State” Formulation of Quantum Mechanics. *Reviews of Modern Physics*, 29(3):454–462, July 1957. Publisher: American Physical Society.
- [11] Hugh III Everett. Lettera di Everett a DeWitt del 31 maggio 1957. In [2], pag. 252.
- [12] Hugh III Everett. Lettera di Everett a Jammer del 19 settembre 1973. In [2], pag. 294.
- [13] Hugh III Everett. Lettera di Everett a Petersen del 31 maggio 1957. In [2], pag. 238.
- [14] Hugh Everett III. The theory of the universal wave function. In [8], pag. 3. 1973.
- [15] Hilbrand J. Groenewold. Lettera di Groenewold a Everett e Wheeler del 11 aprile 1957. In [2], pag. 226.
- [16] Werner Heisenberg. *Physics and philosophy: The revolution in modern science*. Number 19 in World Perspectives. Harper & Brothers, 1958.
- [17] Aage Petersen. Lettera di Petersen a Everett del 24 aprile 1957. In [2], pag. 236.
- [18] Lev Vaidman. Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics. In Edward N. Zalta, editor, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University, Fall 2021 edition, 2021.
- [19] John von Neumann. *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Springer Verlag, 1932.
- [20] John von Neumann. *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton university press, 1955.

- [21] Eugene P. Wigner. Remarks on the Mind-Body Question. In I. J. Good, editor, *The Scientist Speculates*. Heineman, 1961.