

Gennaro Auletta
Istituto di Filosofia - Università di Urbino

Interpretazioni soggettivistiche della misurazione in meccanica quantistica

Abstract: The development of the subjective solutions to the problem of measurement in quantum mechanics is presented. It is shown that - already in 1932 - von Neumann faced a dilemma: either quantum mechanics represents the only true physical reality and then the reduction of the wave packet is illusory, or the mind is able to act on the physical world producing a transition that is not allowed by quantum-mechanical laws. We show that the first alternative was followed by the many-world or many-mind interpretation, the second by the school of London-Bauer and Wigner. The difficulties of these two interpretations are also pointed out. Finally a third possibility, proposed by Albert and Loewer, is presented: The evolution of mind is independent from that of the physical world and is subjected to its own laws.

1. Introduzione

L'oggetto del presente articolo è rappresentato da una certa soluzione del problema della misurazione in meccanica quantistica. Prima di entrare nello specifico di tale soluzione, bisognerà prima fare cenno al problema della misurazione in meccanica quantistica come tale, e, per comprendere tale problema, può essere utile un raffronto con la fisica classica.

Nel quadro della meccanica classica, infatti, non c'è veramente un problema della misurazione, in quanto ci si limita a registrare un dato ritenuto ontologicamente perfettamente determinato ed epistemicamente perfettamente conoscibile, per cui l'errore o l'incertezza può derivare soltanto dall'inadeguatezza contingente dell'uomo (dello sperimentatore) o dell'apparato. Perché contingente? Perché appunto si crede che in linea di principio si possa adeguare l'uomo e l'apparato fino al punto tale da ottenere risultati ottimali, ossia risultati che si discostano di una quantità trascurabile dai valori oggettivi delle variabili misurate.

Negli Anni Venti del XX secolo il discorso sulla misurazione è stato approfondito in due direzioni diverse e perfino opposte. Da una parte c'è stata una riflessione a partire dalla termodinamica, dall'altra nel contesto della meccanica quantistica. E' molto illuminante confrontare brevemente queste due impostazioni. Dopo aver visto i problemi specifici che pone la misurazione in meccanica quantistica, cercherò di sintetizzare le diverse posizioni note complessivamente come "interpretazioni soggettivistiche" ed indicherò alcuni

dei problemi fondamentali che le caratterizzano, nonché i tentativi che sono stati sviluppati per superarli o evitarli.

2. Il caso della termodinamica

Prima di analizzare il problema della misurazione in meccanica quantistica e in particolare le teorie soggettivistiche che sono state prodotte, è molto utile un confronto con quello che, tra l'altro, è stato un teorico della termodinamica, Szilard, che scriveva proprio negli anni della fondazione della fisica quantistica.

L'articolo di Szilard, del 1929, si interroga circa la possibilità di un *perpetuum mobile*, riprendendo la problematica del diavoleto di Maxwell. Com'è noto, tale diavoleto potrebbe portare un sistema (tipicamente alcune molecole in una scatola) a un maggiore ordine, quindi abbassando l'entropia - la misura del disordine. Questo sarebbe possibile dividendo la scatola in due parti, una delle quali inizialmente vuota, e facendo passare le molecole lente e bloccando quelle veloci (la velocità delle molecole è associata all'agitazione termica che produce calore).

Il punto di vista di Szilard è un'estremizzazione dell'impostazione classica. Infatti egli parte dall'idea che lo sperimentatore sia un

deus ex machina che sia continuamente ed esattamente informato dello stato attuale della natura e che sia in grado di cominciare o interrompere in ogni momento il corso macroscopico della natura senza spendere lavoro.

E' interessante notare due cose, messe in luce dallo stesso autore. La prima è che lo sperimentatore, all'epoca di Szilard, non ha potere diretto sul mondo microscopico, quindi non può catturare singole molecole, per cui le possibilità di una perfetta misurazione venivano ristrette ad oggetti del mondo macroscopico. Pertanto, per Szilard, il mondo macroscopico resta il quadro di riferimento di qualsiasi sperimentazione fisica (come vedremo si tratta di un'esigenza condivisa da Bohr). La seconda è che esseri viventi reali in genere producono entropia. Infatti l'entropia è una misura del degrado energetico che caratterizza i sistemi fisici, ossia della trasformazione di una parte dell'energia iniziale in calore o comunque in forme meno utilizzabili di energia. Per cui, in genere, soltanto una parte dell'iniziale quantitativo energetico a disposizione può essere utilizzata per il lavoro. E' chiaro che un essere vivente produce entropia con gli escrementi, la sudorazione, ecc.

Se prescindiamo dal degrado biologico dell'energia e dalle difficoltà dell'intervento su singole molecole, secondo Szilard un essere intelligente sarebbe in grado di risolvere il problema del diavoleto di Maxwell nel senso di produrre una conformazione più ordinata delle molecole da una più disordinata. Se le cose stanno così, tutto il problema consiste, secondo Szilard, nell'effettuare con mezzi meccanici e non biologici (per evitare il degrado energetico legato ai processi biologici) quanto un essere vivente intelligente sarebbe teoricamente in grado di fare. Szilard non parla qui di robot o di

macchine intelligenti, né io intendo entrare nella questione se un robot potrebbe effettuare una operazione alla Maxwell senza produrre entropia compensativa. Quello che mi interessa è sottolineare che Szilard intravede questa possibilità. Ma è bene anche sottolineare che Szilard effettua precisi calcoli in accordo con la termodinamica, mostrando quanta dovrebbe essere l'entropia compensativa per non violare il secondo principio. Per cui non è che Szilard si pronunci nettamente a favore o a sfavore dell'ipotesi di una diminuzione dell'entropia a causa di una manipolazione intelligente. Il suo obiettivo è piuttosto chiarire i termini generali del problema e definire, su un piano ipotetico, quali sarebbero i requisiti necessari ad assolvere il compito del diavoletto.

E' interessante considerare l'esempio ideale introdotto da Szilard. Prendiamo un cilindro finito alle due estremità e posto per comodità in posizione verticale. Supponiamo che nel cilindro ci sia una sola molecola in agitazione termica e che uno sperimentatore possa inserire una membrana impermeabile che funge da pistone separando in due scomparti il cilindro (vedi figura 1).

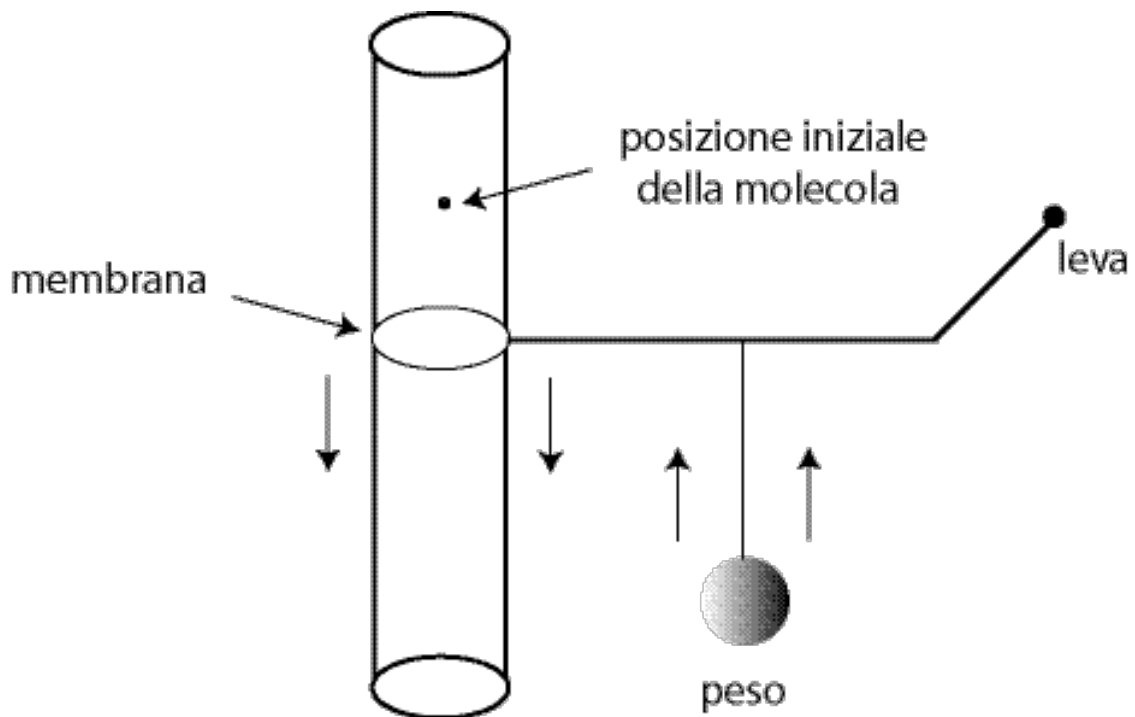


Figura 1

La figura mostra schematicamente l'apparato di Szilard. Si ipotizza che qui la molecola sia nella parte superiore del cilindro e quindi il pistone sia fatto scendere. Il successivo movimento della molecola fa salire il peso.

Supponiamo inoltre che lo sperimentatore appuri, tramite una qualche misurazione, se la molecola è rimasta intrappolata nella metà inferiore o superiore e che imprima al pistone (tramite una leva) un movimento verso il basso se la molecola è nella parte superiore e viceversa. Supponiamo ora che il pistone sia collegato a un peso, di modo che sia il movimento discendente, sia

quello ascendente provochino l'effetto di far elevare il peso (ossia di aumentare la sua energia potenziale). Ora la molecola rimbalzerà di continuo nello spazio in cui è confinata e, urtando molte volte il pistone, produrrà come effetto il progressivo allontanamento del pistone fino alla posizione di arresto alla base o alla sommità del cilindro. In tale caso, se non si è prodotta entropia compensativa nell'osservatore, si è riusciti a produrre energia atta per il lavoro (per sollevare il peso) a spese del calore (dell'agitazione termica della molecola).

Ciò che mi preme sottolineare, in conclusione, è che le posizioni sviluppate dai teorici quantistici vanno rispetto a due punti in direzione opposta relativamente a quelle di Szilard: 1) si rinuncia all'idea che l'osservatore sia un *deus ex machina* e questo sia perché è coinvolto nei processi di misurazione, sia perché non può mai accedere all'informazione totale contenuta nella funzione d'onda o nel vettore di stato. Infatti, per il principio di indeterminazione, lo sperimentatore è libero di misurare l'una o l'altra variabile di una coppia di osservabili coniugati, producendo di volta in volta effetti diversi. Inoltre, almeno all'apparenza, quando lo sperimentatore misura produce comunque una discontinuità nell'evoluzione dinamica del sistema fisico misurato. Per quanto riguarda poi l'informazione totale rappresentata dalla funzione d'onda, nessuno dei teorici della meccanica quantistica ha messo in discussione questo punto, anche se, come vedremo, si sono divisi circa l'interpretazione dell'eventuale referente ontologico di tale funzione d'onda. Tutti sono anche d'accordo a dire che il risultato di una misurazione rappresenta eventualmente una parte dell'informazione potenziale iniziale contenuta nello stato. 2) La transizione effettuata come risultato della misurazione al massimo aumenta e mai diminuisce l'entropia. Infatti il problema di Szilard è qui di natura squisitamente termodinamica, e in termodinamica la questione fondamentale con cui ci si confronta è l'agitazione (termica) di molte particelle - e quindi il fatto che l'entropia ha sempre un valore positivo e tendenzialmente crescente. Il problema dei teorici della meccanica quantistica è, viceversa, lo stato iniziale di un singolo sistema, il quale, almeno all'apparenza, presenta in molti casi un'entropia zero. Tale stato, se è soggetto all'ordinaria evoluzione dinamica dei sistemi quantistici, resta caratterizzato da entropia evanescente anche in futuro. Pertanto qui il problema non è l'aumento dell'entropia, come per Szilard, ma la conservazione di tale entropia evanescente, la quale conservazione, per motivi che chiarirò più avanti, almeno in alcune interpretazioni, non è in grado di spiegare come si arrivi ai risultati di una misurazione.

3. Bohr, von Neumann, e l'interpretazione standard

Prima di entrare nel merito delle questioni, è molto importante ricordare brevemente la posizione di Bohr (1929; 1935; 1948), uno dei padri della meccanica quantistica, sul nostro problema. Per Bohr non si può parlare di

questa o di quella proprietà di un sistema quantico senza in qualche modo ricondurre la fisica quantistica al terreno dell'esperienza ordinaria, macroscopica (una posizione che Bohr condivide con Szilard) e quindi a un determinato contesto sperimentale. Pertanto non ha senso attribuire proprietà a un sistema indipendentemente dalle condizioni sperimentali macroscopiche nel quadro delle quali si fa esperienza del sistema stesso.

E' stupefacente che bisogna attendere il 1932 per vedere un primo trattamento quanto-meccanico del problema della misurazione, quando la teoria era stata essenzialmente sviluppata tra il 1925 e il 1927. Ciò è forse dovuto al fatto che le posizioni di Bohr avevano precluso proprio un trattamento di questo tipo.

Il centro della teoria di von Neumann è che vi sono due tipi possibili di transizione: quella unitaria 'normale', che è reversibile, continua, causale, ed è retta dall'equazione di Schrödinger, e una brusca transizione (chiamata riduzione del pacchetto d'onda, ossia il passaggio da una sovrapposizione a una delle sue componenti) che è irreversibile, e quindi non-unitaria, istantanea, non causale. Infatti i sistemi quantistici sono molto spesso in uno stato (chiamato appunto di sovrapposizione), nel quale il sistema non è determinato rispetto a nessuno dei possibili valori dell'osservabile che si intende misurare, per cui il sistema si trova in uno stato che è una sorta di combinazione di tutti i valori possibili (tali valori hanno soltanto delle probabilità di essere ottenuti quando di fatto si va a misurare).

Si noti che mentre la transizione unitaria conserva l'entropia, la misurazione comporta un aumento di entropia, da uno stato puro (sul cui concetto tornerò tra un attimo), che è a entropia zero, a una miscela, che ha un'entropia positiva. Infatti uno stato puro (una sovrapposizione) proprio perché non è determinato rispetto a nessuno dei valori possibili ottenibili con una misurazione, è uno stato altamente ordinato. Tuttavia, proprio per questo motivo esso contiene non solamente le probabilità di ottenere dei valori determinati ma anche dei termini di interferenza tra le probabilità che non hanno alcun analogo classico. Supponiamo, per semplicità, che il sistema possa stare nella posizione 1 o nella posizione 2. La sovrapposizione si scriverebbe così (in tutto l'articolo considererò sempre il caso semplice di una sovrapposizione di due soli stati):

$$\psi = c_1 |1\rangle + c_2 |2\rangle$$

dove l'espressione $| \rangle$ indica uno stato fisico e c_1 e c_2 sono due coefficienti (proporzionali alle probabilità di ottenere il risultato 1 e il risultato 2).

Tale stato, oltre alle normali probabilità di ottenere 1 o 2, contiene anche delle "probabilità" di ottenere 1-2, che è una cosa classicamente impossibile e di fatto nemmeno osservata sperimentalmente. Per comprendere tale punto, riscrivano lo stato sotto forma di quella che si chiama matrice di densità:

$$\rho = |\psi\rangle\langle\psi| = (c_1 |1\rangle + c_2 |2\rangle)(\langle 1|c_1^* + \langle 2|c_2^*)$$

$$= |c_1|^2 |1\rangle\langle 1| + |c_2|^2 |2\rangle\langle 2| + c_1 c_2^* |1\rangle\langle 2| + c_1^* c_2 |2\rangle\langle 1| \quad (1)$$

Tale matrice di densità descrive per l'appunto quello che si chiama uno stato puro. Si noti che le probabilità classiche sono i moduli quadri dei due coefficienti (i primi due termini dell'ultimo rigo), mentre le interferenze sono rappresentate dai due ultimi termini dell'ultimo rigo.

Per cui, per potere ottenere un risultato determinato della misurazione, il sistema deve per così dire perdere questi termini di interferenza e farsi ricondurre al caso classico, nel quale la distribuzione di probabilità concerne soltanto i casi 1 e 2. Tale stato si chiama miscela, e si scrive così:

$$\tilde{\rho} = |c_1|^2 |1\rangle\langle 1| + |c_2|^2 |2\rangle\langle 2| \quad (2)$$

Come si vede, tale stato comprende soltanto le due probabilità classiche e può essere considerato una analogo delle distribuzioni di probabilità di una moneta ($|1\rangle$ potrebbe essere testa e $|2\rangle$ croce); se la moneta non è truccata, avremmo $|c_1|^2 = |c_2|^2 = 1/2$. Lo stato (2) è uno stato più disordinato dello stato puro (1) - perché, intuitivamente, si sono perse le relazioni tra i due possibili risultati della misura, che sono rappresentati nello stato puro (1) proprio dai termini di interferenza o termini incrociati - e non può conseguire da nessuno stato puro per semplice evoluzione unitaria (in altri termini, la transizione da uno stato puro a una miscela statistica apparentemente contraddice le leggi di evoluzione dinamica della meccanica quantistica).

Al fine di giustificare questa transizione (da uno stato puro a una miscela), von Neumann [1932: 223] introduceva la coscienza, e diceva:

il misurare oppure il processo, che vi è connesso, della appercezione soggettiva è una entità nuova rispetto al mondo fisico che non vi può essere ricondotta; questa entità ci porta fuori dall'ambiente fisico, o meglio, ci porta dentro la vita concettuale interiore dell'individuo, che è incontrollabile in quanto già presupposta a ogni tentativo di controllo. Tuttavia resta un'esigenza fondamentale della concezione del mondo scientifico-naturale: il cosiddetto principio del parallelismo psicofisico, che cioè deve essere possibile descrivere il processo dell'appercezione soggettiva, che resta in realtà esterno alla dimensione fisica, come se esso accadesse nel mondo fisico, ossia di far corrispondere alle sue parti processi fisici nel mondo oggettivo.

Quindi il mondo, secondo von Neumann, viene diviso in due parti, fisica e psichica, anche se i confini tra le due dimensioni possono slittare in un senso o nell'altro. La cosa strana è che von Neumann attribuisce il principio del parallelismo psicofisico a Bohr, laddove è invece evidente che nulla è più lontano dalla mentalità del fisico danese.

Come lo stesso von Neumann allude, il parallelismo psicofisico non è interamente compatibile con la sua spiegazione del problema della misurazione (le due transizioni). Infatti il parallelismo suppone che la mente non possa agire sul mondo fisico, laddove la mente viene introdotta nella

seconda transizione, tipica della misurazione, proprio per rendere ragione di ciò che sarebbe altrimenti inspiegabile restando su un piano puramente fisico. Ci sono tre modi di risolvere questo potenziale conflitto: 1) il mondo fisico è la realtà primaria, e allora la riduzione è un'illusione della mente, per cui non ha senso parlare di parallelismo psicofisico; 2) la mente agisce davvero sul mondo fisico e lo modifica, e anche qui non si può parlare di parallelismo; 3) la riduzione avviene nella mente ma non c'è relazione tra quanto accade nella mente e quanto accade nel mondo fisico, in tal caso avremmo un parallelismo non parallelo (su questi problemi vedi Tarozzi 1996). Lasciando da parte la terza soluzione che non è stata seguita pressoché da nessuno (con una sola significativa eccezione, su cui ritornerò), possiamo ritenere le prime due soluzioni come le due alternative di un dilemma che chiameremo 'dilemma di von Neumann' e vedremo che le posizioni principali nel campo delle teorie soggettive della misurazione si sono divise proprio su questo punto dando vita a due diversi orientamenti.

4. La mente come fattore agente sulla materia

In questo paragrafo partirò dalla seconda posizione delineata più sopra perché è quella storicamente più antica e perché, forse, è anche più intuitiva.

L'analisi di London-Bauer

Il centro del lavoro di London e Bauer (1939) è costituito non tanto dal problema del passaggio da un stato puro a una miscela, quanto dalla questione del passaggio da una miscela a un singolo autostato dell'osservabile misurato. Infatti, supponendo che io abbia ottenuto una normale (classica) distribuzione di probabilità (una miscela), ossia che abbia perso i termini di interferenza, ad esempio che abbia soltanto le probabilità per la posizione 1 e 2, quando andrò a misurare otterrò o 1 o 2, e questo si chiama autostato. Ad esempio, se ottengo 1, lo stato puro iniziale si riduce a

$$\rho \rightarrow |1\rangle\langle 1| \quad (3)$$

o, equivalentemente, a

$$|\psi\rangle \rightarrow |1\rangle \quad (4)$$

Si noti che, matematicamente parlando, anche un autostato è uno stato puro, e quindi se si passa (in un modo che deve essere ancora spiegato) da uno stato puro iniziale del tipo sovrapposizione a un autostato, l'entropia non è né aumentata, né diminuita: resta uguale. Questo perché London e Bauer, ma ancora più chiaramente Wigner, come vedremo, ritengono che sia impossibile, sulla base delle leggi della meccanica quantistica, ottenere l'aumento di entropia richiesto da von Neumann, perché, come ho già detto, l'entropia di un sistema quantico si conserva quando l'evoluzione è unitaria. Inoltre così non violeremmo nemmeno altre leggi fisiche - il secondo principio della termodinamica dice infatti che l'entropia, con lo scorrere del tempo, o aumenta o si conserva.

Gli autori distinguono essenzialmente due questioni che sono poi due tappe del processo di misurazione: l'*accoppiamento* (che viene anche chiamato *premisurazione*) tra l'apparato di misura A e il sistema oggetto S e l'*atto di osservazione*.

1) Quando due sistemi A e S, entrambi in uno stato puro, si accoppiano, il risultante stato del sistema globale, che comprende sia A, sia S, è anch'esso in uno stato puro. Infatti abbiamo, che se lo stato dell'apparato A è inizialmente in uno stato 'default' $|a_0\rangle$, accoppiandosi a S, produce un risultato di questo tipo

$$|\psi\rangle |a_0\rangle \rightarrow c_1 |1\rangle |a_1\rangle + c_2 |2\rangle |a_2\rangle. \quad (5)$$

E' come se la sovrapposizione, che inizialmente affetta soltanto il sistema quantico S, si sia trasferita anche all'apparato.

Tuttavia, se si considera ora l'uno o l'altro sistema indipendentemente dall'altro, il che si fa matematicamente con una traccia parziale sulla matrice di densità del sistema globale che comprende A e S, si ottiene come risultato una miscela, ossia abbiamo che, se lo stato puro è scritto come

$$\begin{aligned} \rho = |\Psi\rangle\langle\Psi| &= (c_1 |1\rangle |a_1\rangle + c_2 |2\rangle |a_2\rangle)(\langle 1| \langle a_1| c_1^* + \langle 2| \langle a_2| c_2^*) \\ &= |c_1|^2 |1\rangle\langle 1| |a_1\rangle\langle a_1| + |c_2|^2 |2\rangle\langle 2| |a_2\rangle\langle a_2| \\ &\quad + c_1 c_2^* |1\rangle\langle 2| |a_1\rangle\langle a_2| + c_1^* c_2 |2\rangle\langle 1| |a_2\rangle\langle a_1|, \end{aligned} \quad (6)$$

la miscela ottenuta per traccia parziale (escludendo in tale caso l'apparato A) si scriverà come

$$Tr_A(\rho) = \rho_S = |c_1|^2 |1\rangle\langle 1| + |c_2|^2 |2\rangle\langle 2|, \quad (7)$$

che è proprio lo stato che desideriamo ottenere.

Perché accade questo? Il sistema puro totale (6) comprende tutta l'informazione disponibile sul sistema stesso, anche se a noi non immediatamente accessibile (perché non possiamo mai fare esperienza dei termini di interferenza). Nel momento in cui consideriamo A o S separatamente, noi automaticamente trascuriamo una parte dell'informazione, ossia quella che comprende le correlazioni (l'*entanglement*) tra questi due sistemi (ossia il fatto che lo stato $|a_1\rangle$ è accoppiato allo stato $|1\rangle$) e veniamo a considerare soltanto una parte dell'informazione iniziale. Quindi una miscela rappresenta un'informazione che non è massimale.

Pertanto, London e Bauer concludono che, quando due sistemi si accoppiano, non si riesce ad ottenere un nuovo stato puro per uno dei due sistemi presi separatamente - ossia un autostato di A ($|a_1\rangle$) o di S ($|1\rangle$) - ma soltanto una miscela, e quindi la situazione prodotta dall'accoppiamento può essere teoricamente considerata come una correlazione tra due miscele, la miscela rappresentata da A e quella rappresentata da S.

2) Invece, quando entra in gioco l'osservatore, questi *sceglie* una delle componenti della miscela ($|1\rangle\langle 1|$ o $|2\rangle\langle 2|$) e pertanto assegna al sistema S uno stato puro, una nuova funzione d'onda. E' soltanto un atto di introspezione che rende possibile questa novità, ossia è la relazione speciale, di autocoscienza che l'osservatore intrattiene con se stesso, che gli permette di affermare - quando osserva il k-esimo autovalore (il valore 1, nel nostro esempio) dell'osservabile misurato - 'Io sono nello stato $|k\rangle$ ($|1\rangle$), oppure vedo $|k\rangle$ ($|1\rangle$) e quindi anche il sistema è nello stato $|k\rangle$ ($|1\rangle$)'.

Questa conclusione, secondo London e Bauer, non significa in alcun modo un solipsismo, dal momento che qualsiasi membro della comunità scientifica può guardare l'ago dell'apparato e verificare che effettivamente è nella posizione k (o 1).

Gli sviluppi in Wigner

La posizione di Wigner è una diretta ed esplicita prosecuzione dell'impostazione data da London e Bauer.

Innanzitutto per Wigner (1961) la differenza fondamentale tra la fisica classica e quella quantistica è che quest'ultima riconosce la centralità e ineliminabilità della coscienza. Le tesi materialistiche della vecchia fisica sono, secondo Wigner, il frutto del bisogno emotivo di dare importanza e centralità al proprio oggetto di studio, ossia al mondo fisico.

Il problema fondamentale di Wigner è quale statuto dare alla funzione d'onda (la nostra ψ , che descrive lo stato del sistema). Il suo statuto, secondo Wigner, sarebbe quello di una connessione probabilistica tra successive impressioni (ossia appercezioni, cioè registrazioni, nella coscienza, del risultato di una misurazione) - si tratterebbe quindi di una entità matematica e non rispondente ad alcun ente reale. Infatti abbiamo detto che la funzione d'onda contiene le probabilità dei possibili risultati di una misurazione. Tuttavia lo stesso Wigner riconosce che il termine 'esiste' significa: 1) che una cosa può essere misurata, 2) che la sua conoscenza è utile per comprendere fenomeni passati e nell'aiutarci a prevedere fenomeni futuri. Pertanto, in questo senso, anche la funzione d'onda esisterebbe. E qui, secondo me, si può profilare una contraddizione, perché o (1) la funzione d'onda si distingue da altre realtà fisiche e questo giustifica la particolarità del problema della misurazione quantistica, ma allora non si vede in che senso si possa dire che la funzione d'onda esiste, oppure (2) essa esiste come le altre realtà fisiche e allora non si vede la particolarità quantistica. Il dilemma si può sciogliere se si ritiene che la fisica quantistica è, almeno potenzialmente, applicabile a tutta la realtà fisica, e questa sembra essere la posizione di Wigner.

Ora il punto è che è proprio il subentrare di un'impressione nella coscienza ad alterare la funzione d'onda, perché verrebbe a modificare la nostra valutazione delle probabilità delle diverse impressioni che noi ci aspettiamo di ottenere in futuro. Tuttavia, secondo Wigner questo non comporta un solipsismo ma soltanto il fatto che è unicamente la coscienza a potere determinare tale risultato. Supponiamo infatti che io chieda a un amico cosa ha osservato quando misura un osservabile di un sistema quantico che può assumere soltanto due valori, 1, -1, legati a due autostati $|1\rangle$, $|2\rangle$. Supponiamo

inoltre che, prima di chiederglielo, io osservi il sistema composto dal sistema oggetto S + il mio amico F (da *friend*). In tale caso io so che, precedentemente alla mia osservazione, il sistema S + F si trova in genere in una situazione mostrata dall'equazione

$$|\psi_{S+F}\rangle = c_1 |1\rangle |f_1\rangle + c_2 |2\rangle |f_2\rangle, \quad (8)$$

dove f_1 e f_2 sono gli autostati dell'amico di Wigner.

E' chiaro che in tale caso non c'è una risposta univoca (grazie alla sovrapposizione e ai termini di interferenza della corrispondente matrice di densità), ma ottengo un risultato determinato soltanto nel momento in cui subentra la *mia* coscienza dell'evento (che è sempre coscienza o di $|1\rangle|f_1\rangle$ o di $|2\rangle|f_2\rangle$). Questo sembrerebbe supportare la tesi del solipsismo. Ma supponiamo che invece di osservare S + F io chieda semplicemente al mio amico: Cosa hai osservato? Qui subentra di nuovo quella che già London e Bauer chiamano facoltà di introspezione che è tipica della e soltanto della coscienza. Il mio amico risponderà con certezza o 1 o -1. Se dice 1, egli avrà osservato $|1\rangle$, e se dice -1 avrà osservato $|2\rangle$. Se invece al posto del mio amico ci fosse stato un atomo come apparato di misura (come nella situazione precedentemente considerata), è evidente che io avrei ottenuto soltanto un *entanglement* del tipo mostrato nell'equazione (8).

Tutto ciò, insieme ad altri argomenti che non posso analizzare in questa sede, porta Wigner alla sorprendente conclusione che la coscienza può agire sulla materia. Perciò il dilemma di von Neumann è risolto chiaramente in una precisa direzione, la seconda soluzione. Si noti pertanto che Wigner accetta entrambi i punti che distinguono una misurazione quantistica da una classica: l'osservatore è coinvolto nel processo di misurazione (e quindi interagisce con il sistema oggetto) e ha accesso soltanto a una parte dell'informazione iniziale contenuta nel vettore di stato.

Si ricordi che il punto decisivo per comprendere la posizione di Wigner è che non si può mai dare in natura un passaggio da uno stato puro a una miscela, proprio perché questo comporterebbe un cambiamento di entropia. Pertanto l'unica forma ammissibile di 'transizione', a parte la normale evoluzione unitaria, è il passaggio da uno stato puro a un autostato dell'osservabile misurato (da uno stato puro a uno stato puro), e questo avverrebbe nella coscienza dell'osservatore.

5. La riduzione come illusione della mente

L'articolo di Everett

Nelle posizioni di questa scuola, il dilemma di von Neumann si scoglie nella direzione opposta a quella assunta da Wigner.

Everett (1957) ritiene, infatti, che non avvenga nessuna riduzione della funzione d'onda e che quindi, anche come risultato di un processo di misurazione, non si ottenga mai uno specifico autostato. Uno stato in sovrapposizione resta in sovrapposizione. Una misurazione non è altro che un

accoppiamento biunivoco tra gli autostati del sistema oggetto e i relativi stati di un apparato di misura (è in realtà soltanto una premisurazione). Questa teoria si chiama dello *stato relativo*, perché legge la misurazione come una questione di relativa dipendenza dello stato dell'apparato rispetto a quello del sistema oggetto. Tuttavia non ne consegue alcuna determinazione in senso classico. Ciò che noi percepiamo come un risultato determinato di una misurazione non è altro che la dipendenza relativa che ha lo stato del nostro apparato rispetto a una delle componenti della sovrapposizione.

Tuttavia Everett si limita ad esporre tale dipendenza su un piano puramente formale e quindi non chiarisce in che senso debba essere interpretata fisicamente o ontologicamente. Questo è il compito dei suoi successori, che l'hanno interpretata sia nel senso che ad ogni componente della sovrapposizione corrisponde un diverso universo (è la posizione di DeWitt), sia nel senso che ogni componente è realizzata dal punto di vista di una mente particolare (è invece la posizione di Lockwood).

Tuttavia, prima di entrare in tali questioni, vorrei sottolineare che ci sono delle serie difficoltà nel concetto di stato relativo come tale (ossia prescindendo dal discorso della molteplicità dei mondi o delle menti), in particolare il problema delle basi. Infatti, come ha mostrato Zurek [1981; 1982], il concetto di stato relativo non elimina il seguente problema: poiché lo stato in sovrapposizione di due sistemi può essere scritto in diversi basi (ossia in funzione di diversi osservabili), ad esempio può essere scritto così

$$|\Psi\rangle = c_1 |o_1\rangle |a_1\rangle + c_2 |o_2\rangle |a_2\rangle \quad (9)$$

ove $|o_1\rangle$ e $|o_2\rangle$ rappresentano gli autostati di un certo osservabile O , oppure così

$$|\Psi\rangle = c'_1 |o'_1\rangle |a'_1\rangle + c'_2 |o'_2\rangle |a'_2\rangle \quad (10)$$

ove $|o'_1\rangle$ e $|o'_2\rangle$ rappresentano gli autostati di un altro osservabile O' , se la misurazione non mutasse mai tale stato $|\Psi\rangle$, come supposto da Everett, esso conterrebbe i risultati della misurazione di diversi osservabili, anche se molti di questi sono tra loro incompatibili (non commutabili) e tale conseguenza, secondo la meccanica quantistica è impossibile.

Il multiverso di DeWitt

DeWitt (1970) è colui il quale ha interpretato la posizione di Everett nel senso di una molteplicità dei mondi. A ogni componente della funzione d'onda corrisponde un osservatore che è una replica di me stesso in un altro mondo. Quindi, prendendo un atto di misurazione particolare, tutte le componenti sono contemporaneamente osservate da diverse controfigure di me e pertanto il nostro universo visibile è soltanto un ramo di un multiverso che comprende in sé tutte le possibilità di qualsiasi sistema quantistico.

Tuttavia, anche in questo quadro, resta il problema delle basi. O c'è una scelta di base, e allora la teoria crolla perché non è possibile mantenere comunque

lo stato iniziale che è indeterminato rispetto alla scelta di diversi osservabili. Oppure c'è un prototipo di osservatore per ogni base, tale che per ogni prototipo che ha scelto di misurare un determinato osservabile ci sono poi tutte le controfigure che osservano una componente particolare della sovrapposizione, ciascuna risolvendosi nell'osservazione di uno stato particolare dell'osservabile misurato tra i tanti in sovrapposizione. Ma chi sono questi prototipi, come sono collegati tra loro? E che senso ha dire che ogni prototipo sceglie una particolare base? A quale operazione fisica corrisponderebbe tale scelta? Se alla misurazione, ci si troverebbe a dover giustificare che la misurazione consiste di due atti separati (scelta della base e scelta della componente della sovrapposizione). Non si trova alcuna risposta a tali quesiti nei seguaci di tale scuola. Eppure questa sembra essere un insieme di questioni ineludibili.

Ma il problema principale della posizione di DeWitt in particolare, ma già di Everett, è come spiegare le probabilità quantistiche, ossia l'algoritmo statistico. Infatti, non tutte le probabilità dei possibili risultati di una misurazione (degli autostati possibili) sono identiche tra loro, ossia non sempre abbiamo equiprobabilità. Tuttavia, l'esistenza di molti universi porterebbe a credere che tutti i risultati dovrebbero essere ugualmente probabili, in quanto non c'è alcuna ragione (e proprio per motivazioni teoriche che sono intrinseche alla teoria di DeWitt ed Everett) di preferire un universo ad un altro. E' vero che si potrebbe tentare di dire che le statistiche possono essere relative ai diversi mondi (come ha provato a fare Graham [1973]). Tuttavia, anche se la cosa è fattibile su un piano formale e matematico, resta ancora il problema di individuare le ragioni fisiche di una tale disparità di statistiche da mondo a mondo.

La multimente di Lockwood

Le posizioni di Lockwood (1996) sono un chiaro raffinamento di quelle di Everett e rappresentano la formulazione più decisa della prima alternativa del dilemma di von Neumann. Il concetto fondamentale di Lockwood è una precisazione dello stato relativo di Everett, ciò che Lockwood chiama rami di Everett: ad ogni componente dello stato di sovrapposizione del sistema oggetto corrisponde una componente dell'apparato di misura e una componente della mente dell'osservatore (le $|m_1\rangle$ e $|m_2\rangle$ rappresentano qui stati della mente):

$$|\psi_{S+A+M}\rangle = c_1 |1\rangle |a_1\rangle |m_1\rangle + c_2 |2\rangle |a_2\rangle |m_2\rangle . \quad (11)$$

Come si vede, si tratta di un *entanglement*. Ora per l'osservatore vedere un certo risultato significa soltanto essere in corrispondenza con quell'autostato specifico dell'osservabile del sistema oggetto, ma tutti gli stati fisici e tutti gli stati mentali esistono contemporaneamente. Ma già qui c'è un problema. Si dice, nel linguaggio ordinario della meccanica quantistica, che un osservatore è in corrispondenza con un certo autostato dell'osservabile del sistema oggetto nel senso che, se effettuasse la misura, otterrebbe quel risultato e *soltanto* quel risultato. Più in generale, due sistemi in *entanglement* sono detti

essere in uno stato di singoletto se, misurando una delle due componenti e ottenendo spin down, l'altra è corrispondentemente in spin up.

Ma che senso ha dire che io sono in corrispondenza a prescindere da questa possibile misurazione avente un unico risultato? Cioè che senso ha dire che siamo in corrispondenza con un certo autostato se neghiamo precisamente che la misurazione abbia come esito un certo autostato? L'idea di Lockwood è che invece tutti gli stati mentali coesistono allo stesso titolo (insieme a tutti i risultati della misurazione). A tale scopo egli distingue tra la Mente intesa come una multimente e la mente intesa come l'entità empirica con cui facciamo i conti quotidianamente, che ha accesso soltanto a una componente (della Mente e dei sistemi fisici). Pertanto il tempo ha una realtà bidimensionale: Un asse va verso l'alto e rappresenta lo scorrere ordinario del tempo stesso, ma l'altro asse rappresenta la sovrapposizione di tutti i possibili stati mentali (vedi figura 2).

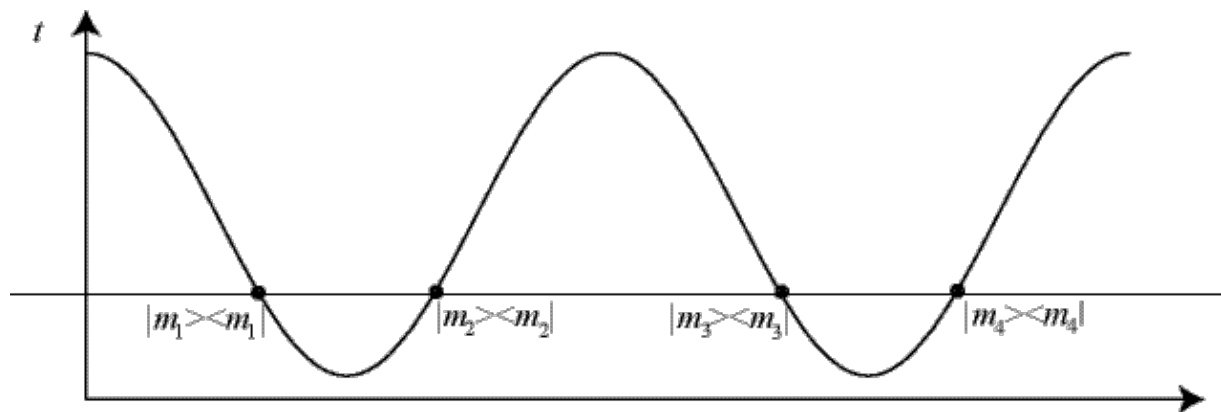


Figura 2

La linea orizzontale rappresenta una sezione che fa apparire le singole componenti della sovrapposizione (i punti di intersezione tra la curva e la linea orizzontale di sezione) senza i termini di interferenza che sono qui rappresentati dalla curva.

Secondo Lockwood, così come noi non abbiamo accesso agli stati futuri lungo uno degli assi, non abbiamo accesso nemmeno agli altri stati mentali contemporanei secondo l'altro asse. Pertanto si tratta soltanto di un'apparenza dovuta alla percezione della mente empirica quando io, soggetto empirico, percepisco un singolo risultato determinato (ecco quindi come si configura infine questa alternativa del dilemma di von Neumann). Si noti che una sezione temporale, cioè un singolo istante del tempo, farà apparire una miscela impropria dei diversi autostati possibili dell'osservabile misurato.

Si noti che Lockwood rifiuta chiaramente l'idea dei molti mondi per il seguente motivo. Quando parliamo di sovrapposizione di una particella, diciamo che si tratta di una sovrapposizione di una singola particella e non della coesistenza di diverse particelle. E lo stesso ovviamente vale per il mondo nel suo insieme.

Precedentemente abbiamo detto che sono due le cose che distinguono l'impostazione quantistica dalla classica: che l'osservatore è coinvolto nel processo interagendo con il sistema oggetto e che l'osservatore non accede

mai a tutta l'informazione. E' chiaro che Lockwood rigetta la prima e accetta la seconda cosa (ove per osservatore si intende la mente empirica).

Si noti, inoltre, che Lockwood non soltanto ammette che ci siano tutte le componenti di una sovrapposizione ma afferma chiaramente che c'è anche una democrazia delle basi venendo così a superare il problema della degenerazione delle basi che caratterizzava ancora la teoria di Everett. Tuttavia questo presenta una difficoltà ulteriore. Infatti, se ci sono diverse basi per il sistema oggetto, ci debbono anche essere diverse basi per la mente, ciascuna corrispondente all'osservabile 'misurato'. E, non a caso, Lockwood sostiene esplicitamente questa idea. Ma allora, ogni base della Mente corrisponde a un diverso osservabile della Mente. E qui sorgono immediatamente due questioni: 1) cosa rappresentano questi diversi osservabili della Mente, ossia qual è il loro significato? 2) Sono osservabili per chi? Per un'altra mente (o Mente)? Lockwood non sembra rendersi conto del problema e pertanto non è possibile trovare una risposta a tali quesiti nei suoi lavori.

6. Il problema delle probabilità e una terza possibilità

Una ulteriore difficoltà della posizione di Lockwood (che, come abbiamo visto, caratterizza già quella di Everett e soprattutto quella di DeWitt) è che non si spiegano in alcun modo le probabilità quantistiche e quindi l'algoritmo statistico. Infatti, se tutti gli stati fisici e della Mente esistono allo stesso titolo (e questo vale ancor più per mondi diversi), come posso spiegare che un evento ha una probabilità $2/3$ e un altro $1/3$? Soltanto situazioni equiprobabili dovrebbero essere possibili, contrariamente all'evidenza sperimentale e teorica.

Albert e Loewer (1988) avevano risolto il problema ingegnosamente in un modo che rappresenta, a mio avviso, l'unico caso significativo in cui si è seguita la terza posizione di von Neumann - ossia che mondo fisico e mente seguono due evoluzioni sì parallele ma in parte divergenti. Secondo loro, mentre lo stato del sistema oggetto e dell'apparato di misura segue le leggi deterministiche della sovrapposizione (ossia l'ordinaria evoluzione unitaria della meccanica quantistica), e quindi dell'equazione di Schrödinger, la mente evolve in modo stocastico approdando ai diversi risultati con le diverse probabilità. Ossia la mente non è una entità che risponde alle leggi deterministiche del mondo fisico ma approda a diversi risultati percettivi (ossia di volta in volta a una diversa percezione di una delle componenti dello stato iniziale) in un modo che è non soltanto imprevedibile ma che è anche caratterizzato da specifiche preferenze. In altri termini, le diverse probabilità con le quali la mente osserva lo stato $|1\rangle$ oppure lo stato $|2\rangle$ dipendono dalle caratteristiche specifiche della mente (dal suo stile o dal suo carattere, mi verrebbe da dire) e non dipendono in alcun modo dalla natura fisica del sistema come tale.

Questo significa anche che, secondo Albert e Loewer, la mente finisce per approdare a uno stato determinato (e pertanto qui, nella conclusione, essi

seguono London e Bauer) ma, coerentemente con la scuola di Everett, tale risultato determinato non ha mai conseguenze per lo stato fisico del sistema osservato, che resta inalterato.

Tuttavia, tale soluzione, senz'altro brillante, al problema delle statistiche dei risultati della misurazione ha come prezzo un nuovo dualismo tra mondo fisico e mondo mentale, nel senso che quello che accade nella mente non rispecchia quello che accade a un livello fisico (e, ovviamente, nemmeno viceversa): si tratta, come ho detto, di un parallelismo non parallelo.

Lockwood non intende seguire Albert e Loewer su questa strada perché vuole evitare di cadere in posizioni dualistiche. Pertanto, secondo lui, non si dà alcuna evoluzione statistica della Mente e addirittura alcuna storia, visto che la Mente è sempre in sovrapposizione - infatti, quando c'è sovrapposizione non si possono produrre traiettorie determinate e quindi nemmeno una storia. Pertanto le probabilità riguardano soltanto le distribuzioni statistiche sullo stato di miscela momento per momento. Tale soluzione presenta però due difetti: quello di eliminare completamente una qualsiasi continuità della mente (o della Mente) nel tempo e quello di accettare le distribuzioni statistiche come dato di fatto inesplicabile. Come conseguenza del secondo punto, Lockwood non sembra poter spiegare in alcun modo le probabilità condizionali.

7. Conclusioni

In conclusione, mi sembra di poter dire che, sebbene le interpretazioni soggettivistiche non riescano a risolvere completamente i problemi della misurazione in meccanica quantistica, forniscono però un ampio ventaglio di posizioni fisiche e filosofiche su cui conviene meditare e che, di fatto, da un punto di vista storico, hanno permesso un avanzamento del dibattito e della comprensione di uno dei problemi più difficili dell'indagine sul mondo naturale.

Bibliografia

- Albert, D./Loewer B. 1988 "Interpreting the Many Worlds Interpretation" *Synthese* **77**: 195—213
- Bohr, Niels 1928 "The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory", *Nature* **121**: 580—90
- 1935 "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?", *Physical Review* **48**: 696—702
- 1948 "On the Notions of Causality and Complementarity", *Dialectica* **1**: 312—19
- DeWitt, Bryce S. 1970 "Quantum Mechanics and Reality", *Physics Today* **23**; rist. in DeWitt, Bryce S./Graham, Neill, (eds.), *The Many World Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton, University Press, 1973, pp. 155-65
- Everett, Hugh III "Relative State' Formulation of Quantum Mechanics", *Review of Modern Physics* **29**: 454—62
- Graham, Neill 1973 "The Measurement of Relative Frequency", in DeWitt, Bryce S./Graham, Neill, (eds.), *The Many World Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton, University Press: 229-53
- Lockwood, Michael 1996 "Many Minds' Interpretations of Quantum Mechanics" *British Journal for Philosophy of Science* **47**: 159—88
- London, F./Bauer, E. 1939 *La théorie de l'observation en mécanique quantique*, Paris, Hermann, 1939
- Szilard, Leo 1929 "Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen", *Zeitschrift für Physik* **53**: 840—56
- Tarozzi, Gino 1996 "Quantum Measurements and Macroscopical Reality: Epistemological Implications of a Proposed Paradox", *Foundations of Physics* **26**: 907-917
- von Neumann, John 1932 *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlin, Springer, 1932, 1968, 1996
- Wigner, Eugene P. 1961 "Remarks on the Mind-Body Question", in I. J. GOOD (ed.), *The Scientist Speculates*, London, Heinemann: 284—302

Zurek, Wojciech H. 1981 "Pointer Basis of Quantum Apparatus: Into What Mixture Does the Wave Packet Collapse?", *Physical Review* **D24**: 1516-25
- 1982 "Environment-induced Superselection Rules", *Physical Review* **D26**: 1862-80