

## Max Planck rivoluzionario riluttante

«La decisione di dedicarmi alla scienza fu conseguenza diretta di una scoperta, che non ha mai cessato di riempirmi di entusiasmo fin dalla prima giovinezza: le leggi del pensiero umano coincidono con le leggi che regolano le successioni delle impressioni che riceviamo dal mondo intorno a noi, sì che la logica pura può permetterci di penetrare nel meccanismo di quest'ultimo. A questo proposito è di fondamentale importanza che il mondo esterno sia qualcosa di indipendente dall'uomo, qualcosa di assoluto. La ricerca delle leggi che si applicano a questo assoluto mi parve lo scopo scientifico più alto della vita.»

Questo brano col quale inizia l'*Autobiografia scientifica* sintetizza il profilo scientifico e umano del grande fisico tedesco e riprende parole e temi ricorrenti nel suo pensiero.

In Planck il carattere determinato e la granitica forza delle convinzioni si intrecciano con un carattere entusiasta, anche se di un entusiasmo tutto interiore, schermato da un'apparente distaccata freddezza.

Il ricorso al termine «vocazione» per indicare la sua attività di scienziato non sembra per nulla esagerato o retorico: fin da giovane aveva ben chiaro lo scopo da perseguire e tale scopo era «alto», «disinteressato», degno di una dedizione totale; tale insomma da poter essere individuato come un «compito» che egli si sentiva assegnato e di fronte al quale era tenuto a rispondere con la massima serietà.

Un compito però che non cadeva pesantemente dall'esterno, come qualcosa di ineluttabilmente gravoso, ma che, al contrario, trovava una straordinaria corrispondenza con una fonte interna e viva che lo animava e sosteneva continuamente. Questa fonte, sorgente della sete di conoscenza e movente adeguato della ricerca, è descritta da Planck come «stupore». Rifacendosi all'esperienza elementare del bambino, tutto proteso alla scoperta della realtà, in uno dei suoi ultimi scritti parla dello stupore come «fonte inestinguibile della sete di conoscere», dell'elemento meraviglioso nella struttura dell'immagine del mondo come di qualcosa che «aumenta con la scoperta di ogni nuova legge» e arriva a dichiarare che «chi ha raggiunto lo stadio di non meravigliarsi più di nulla dimostra semplicemente di aver perduto l'arte del ragionare e del riflettere»; eliminando quindi, con questo riferimento alla ragione, ogni possibile riduzione puramente estetica ed emotiva del concetto di stupore. Per lui, la meraviglia è un'arte che tutti possono apprendere perché non è un impeto autonomo del soggetto ma una reazione all'imporsi di qualcosa di oggettivo nel quale il soggetto si imbatte, vale a dire «la natura incommensurabilmente ricca ed eternamente giovane».

(da: M. Gargantini, *Il pensiero di Max Planck*, in: *I quaderni dell'I.P.E.* n. 10, ottobre 1999)



«Ma perché tutta questa enorme fatica che richiede gli sforzi di innumerevoli militi della scienza durante tutta la loro vita? Il risultato ultimo [...] è così meritevole di uno sforzo rilevante? Queste domande sarebbero giustificate se il significato della scienza fosse limitato alla soddisfazione di un certo istintivo desiderio di conoscere dell'uomo. Ma il suo significato va assai più a fondo. Le radici della scienza esatta si alimentano nel suolo della vita umana. [...] E colui al quale la buona fortuna ha permesso di cooperare all'erezione dell'edificio della scienza esatta, troverà la sua soddisfazione e intima felicità, con il nostro grande poeta Goethe, nella coscienza di aver esplorato l'esplorabile e di aver venerato silenziosamente l'inesplorabile.»

(M. Planck, *Significato e limiti della scienza*)

# TEORIA QUANTISTICA DELLA MISURA

PARADOSSI, POSSIBILI SOLUZIONI E PROBLEMI APERTI

di Gian Carlo Ghirardi\*

*A cento anni dall'irruzione nella fisica del «quanto di azione» (Max Planck, 1900), rimane aperto il problema della compatibilità della Meccanica Quantistica con un principio di realtà. A livello di particelle elementari non pare esistere una realtà in sé, perché una particella assume uno stato definito e certo solo se osservata. Ma a livello macroscopico? Questo tema, già sviluppato dall'autore durante il XXXI Congresso Nazionale AIF, è qui proposto anche per i non «addetti ai lavori». Delineando lo sviluppo storico di un dibattito che a tutt'oggi non pare ancora completamente risolto.*

**D**urante una passeggiata col fisico Abraham Pais, Albert Einstein a un certo punto si fermò e chiese al collega: «Veramente è convinto che la Luna esiste solo se la si guarda?» La domanda di Einstein ripropone il problema cruciale della compatibilità della Meccanica Quantistica (MQ) con una concezione filosofica ed epistemologica di tipo realista a livello macroscopico. In altre parole, ci si chiede se sia possibile conciliare la visione realistica dei fenomeni che abbiamo elaborato sulla base della nostra esperienza a livello macroscopico con la descrizione propria della MQ, una questione che rende significativa la domanda se la Luna resti sempre al suo posto in cielo, anche quando nessuno la osserva. Quale possibilità abbiamo di capire la natura? La MQ ci ha spinto a porci interrogativi veramente fondamentali, addirittura a chiederci fino a che punto risulti legittimo parlare dell'Universo come qualcosa che esiste ed evolve, e quindi parlare della storia dell'Universo, indipendentemente da quella degli esseri coscienti. Mi rifarò alla storia della MQ e allo sviluppo dei suoi concetti fondamentali. Ritengo necessario premettere che io penso che la MQ rappresenti una delle maggiori conquiste intellettuali del pensiero umano. Essa si è rivelata fondamentale per comprendere i fenomeni naturali ai vari livelli, da quello subnucleare a quello atomico fino alla scala cosmica<sup>1</sup>, ma essa presenta difficoltà concettuali non ancora risolte dopo quasi settant'anni di indagini critiche. Ecco dunque qualche cenno di carattere storico.

\*Ordinario di istituzioni di Fisica Teorica presso l'Università di Trieste.

È socio fondatore e presidente della Società Italiana di Fondamenti della Fisica. Le sue ricerche sui fondamenti della Meccanica Quantistica, svolte con A. Rimini e T. Weber, hanno ottenuto vasti riconoscimenti in campo internazionale.

Nel 1997 ha pubblicato, nella collana *Theoria* de Il Saggiatore, *Un'occhiata alle carte di Dio*: gli interrogativi che la scienza moderna pone all'uomo.

<sup>1</sup>La tecnologia moderna, dai nostri orologi digitali, ai computer, si basa direttamente su tale schema teorico.

## Dal quanto di Planck al principio di indeterminazione

La MQ è nata soprattutto dai lavori di Max Planck nel 1900 e di Einstein nel 1905 che ci hanno posto dinanzi a un fatto inaspettato: esso concerne la natura fisica della luce la quale, oltre ai ben noti aspetti ondulatori, presenta anche un comportamento di tipo corpuscolare. In un primo momento ciò costituì naturalmente un motivo di confusione, la quale aumentò quando Niels Bohr, in quegli stessi anni, affrontò il problema della struttura atomica; per rendere conto infatti delle righe spettrali degli atomi egli utilizzò in parte la teoria elettromagnetica classica, ma in parte la contraddisse facendo uso di postulati di quantizzazione che si rifacevano direttamente alle rivoluzionarie idee di Planck ed Einstein.

Poco dopo Louis de Broglie rilevò che si poteva ottenere una maggiore comprensione dei fenomeni naturali aumentando questo stato di «confusione»: non solo le onde sono particelle, ma anche le particelle si comportano talvolta come onde.

Ci vollero molti anni per districarsi da queste difficoltà: ciò avvenne nel 1925 quando Erwin Schrödinger e Werner Heisenberg elaborarono indipendentemente una formulazione matematicamente precisa che costituisce la forma finale della MQ.

Per capire i punti essenziali di tale schema, cominciamo col discutere il cosiddetto principio di sovrapposizione e riferiamoci a un esperimento che è stato definito il più stupefacente dai tempi di Galileo Galilei.

Nella Figura 1 si è indicato con K un apparato (per esempio uno specchio semitrasparente) capace di trasmettere o riflettere un fotone o una particella (un elettrone) in arrivo.

Due rivelatori  $D_1$  e  $D_2$  registrano rispettivamente le particelle che percorrono il cammino L oppure R. Si deve tener presente che in K arriva una particella alla volta, distanziata dalle successive in modo tale che la seguente entri nell'apparecchio dopo che la precedente è stata registrata (da  $D_1$  o da  $D_2$ ).

Si constata che i rivelatori scattano a caso e che ciascuno di essi scatta nel 50% dei casi. Va rilevato che l'espressione «scattano a caso» indica che non si può prevedere quale dei due scatterà; non c'è modo di sapere in anticipo se, quando una particella arriva in K, seguirà il cammino L (facendo quindi scattare  $D_1$ ) oppure R (facendo quindi scattare  $D_2$ ). Questa è una delle manifestazioni dell'indeterminismo quantistico.

Se si pone prima di  $D_1$  un assorbitore A (Figura 2), il rivelatore  $D_1$  non registrerà nulla e  $D_2$  registra mediamente (ma completamente a caso) una particella ogni due. Analogamente se poniamo un assorbitore davanti a  $D_2$ .

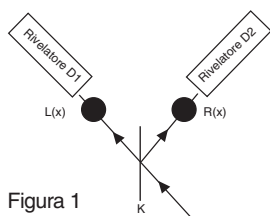


Figura 1

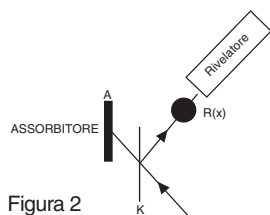


Figura 2

Per garantirci che le particelle non possano avere strani comportamenti possiamo mettere sia un assorbitore davanti a  $D_1$  che uno davanti a  $D_2$  (Figura 3). Si rileva allora che entrambi non scattano mai. Tutto ciò appare abbastanza ragionevole, nonostante l'imprevedibilità specifica del comportamento di ogni particella individuale che l'esperimento costringe ad accettare.

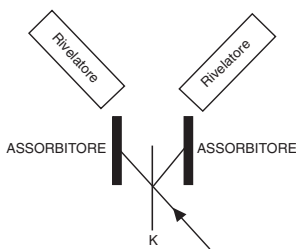


Figura 3

Eseguiamo adesso un altro esperimento ponendo a sinistra uno specchio S, a destra un assorbitore e una serie di rivelatori, come in Figura 4a.

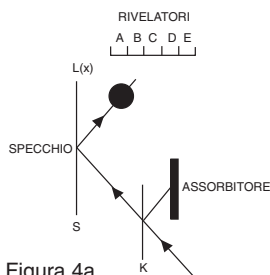


Figura 4a

La Figura 4b mostra le rivelazioni dei diversi contatori: il fatto che non scatti solo il rivelatore corrispondente alle regole geometriche della riflessione si giustifica col fatto che la «traiettoria» di una singola particella non è perfettamente definita. Si noti che il rivelatore centrale scatta



Figura 4b

un numero di volte maggiore di quelli laterali.

La Figura 5 indica i risultati del corrispondente esperimento se modifichiamo il ramo R anziché quello L: i risultati delle figure 4b e 5 sono ragionevolmente simili.



Figura 5

Combiniamo adesso i due precedenti esperimenti, vale a dire introduciamo due specchi e non frapponiamo assorbitori su nessuno dei due cammini (Figura 6a).

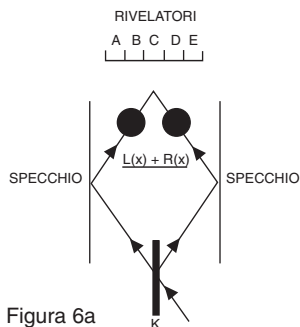


Figura 6a

Il risultato è quello di Figura 6b ed è profondamente diverso da quanto ci aspettiamo come somma delle figure 4b e 5. Si tratta di un risultato tanto più sbalorditivo se teniamo presente che le particelle arrivano «una alla volta», temporalmente distanziate in modo che nello strumento se ne trovi in ogni istante una sola: il risultato sembra mostrare che, comunque, ogni particella sappia che lo strumento è diverso da prima lungo il percorso alternativo.

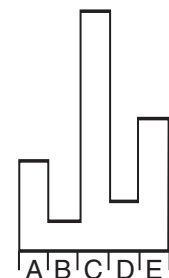


Figura 6b

Siamo in presenza di qualcosa che risulta incompatibile con tutti i nostri schemi usuali: la situazione ci costringe a riconoscere che può verificarsi una «sovrapposizione» rappresentata dal punto di vista formale con  $L + R$ , che risulta completamente diversa da ciò che normalmente intendiamo come una tra due possibili alternative, cioè «o» L «oppure» R.

Se ci chiediamo quale via hanno seguito le diverse particelle per raggiungere i rivelatori, ci accorgiamo di non saper rispondere. Non hanno seguito il percorso L o quello R perché, in tal caso, il risultato dell'esperimento sarebbe stato descritto dalla somma degli istogrammi 4b e 5.

Non hanno seguito entrambe le strade, perché gli esperimenti eseguiti precedentemente hanno dimostrato che una particella è sempre rilevata da un solo rivelatore, per cui non accade mai che mezza particella segua il percorso L e mezza quello R.

Dobbiamo escludere anche che non hanno seguito «né» il percorso L «né» quello R (e cioè che siano potute giungere ai rivelatori tramite qualche altro ipotetico cammino) perché quando abbiamo messo i due assorbitori sui cammini L e R i rivelatori non hanno dato alcun segnale.

Tutte le possibilità logiche che possiamo avanzare non riescono dunque a rendere conto del risultato di Figura 6b (relativo all'esperimento di Figura 6a), se vogliamo tener conto dei risultati degli esperimenti precedentemente condotti.

La conclusione che siamo costretti ad accettare è che gli oggetti microscopici hanno dei modi di comportarsi, anzi di «essere», che sono completamente al di fuori di quanto possiamo immaginare e concepire: la sovrapposizione  $L + R$  rappresenta uno stato il quale, con quel segno «+», è incompatibile logicamente con l'asserzione «qualche volta L e qualche volta R» oppure «alcune particelle in L e alcune in R»; ogni singola particella si trova nella «strana» situazione  $L + R$  («né» L «né» R).

Se si riprende la domanda iniziale di Einstein a Pais riguardante la Luna e la si trasporta al caso degli elettroni, se ne può cogliere ora il senso profondo: se non osservo la particella, essa, prima che arrivi al rivelatore, non è né in L né in R, ma in una strana situazione che indichiamo con  $L + R$ .

Si viene così a identificare la prima caratteristica della struttura della MQ, il principio di sovrapposizione, in base al quale gli stati si possono sommare.

Ricordiamo che le particelle sono descritte, in MQ, da espressioni matematiche dette funzioni d'onda, e la teoria descrive un elettrone che si propaga nello spazio per mezzo di una funzione il cui quadrato fornisce la probabilità che, se cerchiamo di rilevarne la posizione in un processo di misura, essa venga trovata qui oppure lì. Il quadrato di questa funzione può essere rappresentato graficamente come in Figura 7 e l'area tratteggiata dà la probabilità di trovare la particella attorno a  $x_1$  se eseguiamo una misura con un appropriato strumento<sup>2</sup>.

Va sottolineato che la MQ non sa rispondere alla domanda: «che probabilità c'è che l'elettrone sia oggettivamente lì» bensì ci dà solo la probabilità «di trovarlo lì se eseguiamo una misura».

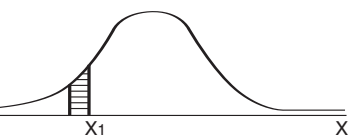


Figura 7

Ma c'è di più: se, facendo una misura trovo l'elettrone in  $x_1$ , allora la funzione d'onda cambia immediatamente e diventa quella di Figura 8, in cui l'area tratteggiata è pari all'unità, in accordo col fatto che sicuramente l'elettrone è in  $x_1$ .

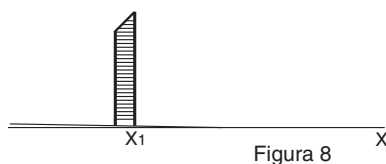


Figura 8

Val la pena di notare una cosa molto interessante: se la funzione d'onda ha la forma di Figura 9, la teoria asserisce che, se si esegue una misura, c'è una certa probabilità di trovare la particella in  $x_1$ , un'analoga probabilità di trovarla in  $x_2$  e probabilità nulla di trovarla fra questi due punti.

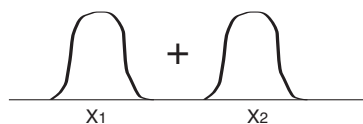


Figura 9

La teoria non ci fornisce solo informazioni sulla posizione, ma su tutte le possibili grandezze fisiche.

Naturalmente queste informazioni sono sempre di tipo probabilistico. La teoria ci dà, per esempio, la probabilità di trovare un certo valore per la velocità dell'elettrone. Risulta che, se la posizione è ben definita come in Figura 8, la velocità è molto indeterminata, vale a dire che si hanno probabilità apprezzabili di ottenere diversi valori. Questa è una formulazione più precisa del «principio di indeterminazione» e la MQ è strutturata in modo da rispettarlo sempre.

Si è così condotti a concludere che nel dominio delle particelle elementari emergono degli aspetti incompatibili con i nostri concetti usuali: se misuriamo con precisione la posizione, questa misura fa perdere ogni possibilità di determinare la velocità, e viceversa.

Un altro fatto da sottolineare è che l'evoluzione quantistica è, a livello di funzione d'onda, deterministica<sup>3</sup> e inoltre è lineare, cioè rispetta il principio di sovrapposizione.

## Una proprietà delle particelle elementari: lo spin

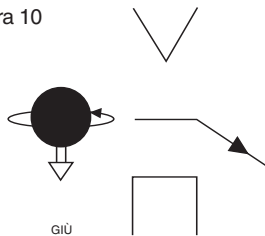
Possiamo allora a questo punto considerare un'interessante proprietà, senza analogo classico, delle particelle elementari: gli elettroni si comportano come delle piccole trottole, come oggetti che ruotano (spin) su loro stessi cui è associato, in quanto si tratta di cariche elettriche, un momento magnetico.

Da questo punto di vista l'elettrone è come un piccolo ago magnetico; se ruota per esempio nel senso indicato in Figura 10 (riportata nella pagina seguente), l'ago magnetico è rivolto, diciamo, verso il basso.

<sup>2</sup>L'area totale sottesa dalla curva è pari all'unità in quanto abbiamo la certezza di trovare l'elettrone in un qualche punto dello spazio.

<sup>3</sup>È solo nel passaggio dallo stato descritto dalla funzione d'onda agli esiti delle misure che emerge l'indeterminismo.

Figura 10



Se si invia l'elettrone in un campo magnetico disomogeneo (Figura 10) il polo nord e quello sud sono assoggettati a forze diverse, e la particella viene deviata, per esempio, in giù; viene deviata invece in su, se ruota in senso opposto.

Se abbiamo una particella che ruota nel modo indicato in Figura 11 e la inviamo nel campo magnetico disomogeneo, essa, per la linearità dell'evoluzione, va a finire non in su «o» in giù, ma in uno stato che è «su + giù», cioè quello che si è discusso prima (Figura 12).

Figura 11

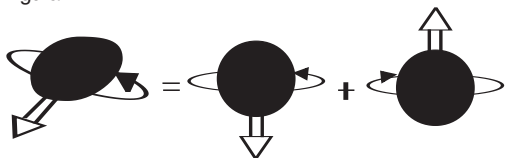
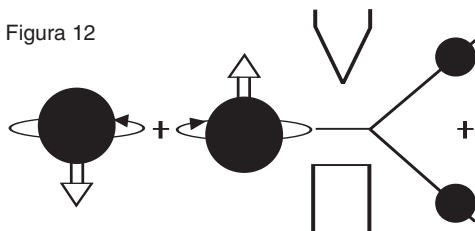


Figura 12



Questo esempio, che si riferisce agli spin, è importante perché è quello intorno a cui si svolge il dibattito successivo.

Poiché la teoria ci dice solo quale sia la probabilità di ottenere un risultato se, di fatto, si esegue una misura, nasce il problema cruciale su cui si è aperto un acceso dibattito fin dalla nascita della MQ: si può parlare di proprietà fisiche e assegnare un valore a queste proprietà in assenza di qualunque osservazione?

Il fatto che nasca un problema simile non deve stupirci perché si origina in connessione con fenomeni microscopici i quali vengono fortemente disturbati dal processo di misura, cosa che non avviene nell'ambito della fisica classica o avviene in misura trascurabile. L'analisi di Bohr e Heisenberg ha portato proprio a questo: il disturbo del processo osservativo sul processo microscopico non può essere cancellato del tutto.

Nasce da qui un dibattito che ha portato vari scienziati su posizioni diverse: per esempio, Bohr riteneva che non esistesse un mondo quantistico, ma solo una descrizione fisica quantistica.

È sbagliato pensare, secondo il fisico danese, che il compito della fisica sia quello di capire come è la natura: la fisica riguarda solo ciò che «possiamo dire» circa la natura. È una posizione di tipo positivista che ha portato ad affermazioni del tipo «i fisici si chiedono se un albero o qualsiasi altra cosa debba essere osservata prima che esista veramente» o «la dottrina che il mondo è fatto di oggetti la cui esistenza è indipendente dalla coscienza umana,

risulta essere in conflitto con la MQ e con fatti stabiliti dagli esperimenti». Pascual Jordan, uno dei padri dell'interpretazione ortodossa della scuola di Copenaghen, asserì: «L'osservazione non solo disturba quello che deve essere misurato, ma lo produce: noi stessi produciamo il risultato della misura».

Questa tesi può risultare spiacevole ma, al livello microscopico, può anche essere accettata. Infatti, se dobbiamo riconoscere che le cose che stiamo studiando sono così delicate, così instabili e sono perturbate in misura così rilevante da qualunque nostra azione diretta a identificare le loro proprietà, sembra abbastanza logico fare il salto e dire che può non risultare legittimo estrarre, come si fa con gli oggetti della nostra esperienza macroscopica, dai nostri risultati qualche caratteristica, o appunto «proprietà», che si possa associare alla particella di per sé. Tutto ciò che possiamo affermare è qualcosa che lega inestricabilmente la particella con la nostra interazione con essa.

## Il dibattito tra Albert Einstein e Niels Bohr

È noto che Einstein rifiutava le posizioni precedentemente menzionate, ma risulta utile distinguere due momenti completamente diversi del suo pensiero. In una prima fase egli cercò di confutare la validità del principio di indeterminazione; per anni, durante i Congressi Solvay, si presentava con la proposta di un'esperienza che avrebbe permesso di misurare con precisione assoluta la posizione e la velocità di un elettrone. Regolarmente Bohr gli dimostrava che il suo argomento era sbagliato.

In un secondo momento, Einstein si rese conto dell'impossibilità di realizzare un esperimento in grado di violare il principio di Heisenberg e accettò l'impossibilità di una misura simultanea e indefinitamente precisa di posizione e velocità. Tuttavia pretese che fosse lecito pensare che la particella elementare possedesse a ogni istante una posizione e una velocità ben precise.

Questo è un punto importante. Lo stesso Max Born, il padre dell'interpretazione probabilistica della MQ, non aveva compreso che ciò contro cui Einstein lottava non era solo l'indeterminismo, ma il fatto stesso che nella teoria non sembra esserci altro che una sorta di gioco a dadi: non essendoci né posizioni né velocità, ci sono solo i risultati delle nostre misure.

Nel 1935 Einstein mutò atteggiamento e si concentrò sul problema dell'attribuzione delle proprietà fisiche ai sistemi microscopici. La MQ, pur con la sua struttura fondamentalmente probabilistica, ammette che in certi casi la probabilità di un risultato sia pari a uno: in tal caso, secondo Einstein, si deve pretendere che stiamo parlando di qualcosa di reale e oggettivo.



Lungo questa linea, Einstein presentò un lavoro con Boris Podolsky e Nathan Rosen (EPR) in cui veniva evidenziato che la MQ implica qualcosa di più del semplice indeterminismo, e cioè che non si possa neppure pensare che l'elettrone possieda una posizione e una velocità, e quindi ci sia impedito di poter parlare degli oggetti microscopici in chiave realistica.

Nel medesimo anno, Erwin Schrödinger presentava il famoso lavoro contenente il cosiddetto «paradosso del gatto» (di cui riferiremo in seguito) col quale egli intendeva evidenziare il corrispondente problema a livello macroscopico, cioè che la MQ contiene una sfida al senso comune e addirittura al realismo filosofico a livello macroscopico.

Il lavoro di EPR si basa sul fatto che si possono produrre sovrapposizioni (quel famoso «+») anche di stati di oggetti che sono lontani e non più in interazione tra loro. Per comprendere l'argomento di EPR è opportuno procedere per gradi.

$$|1 \uparrow \rangle |2 \downarrow \rangle$$

Figura 13

Supponiamo di avere a che fare con un sistema costituito da due particelle e supponiamo, per quanto concerne i loro stati di spin, che lo spin della particella 1 punti, per esempio, in su e quello della particella 2 in giù (Figura 13).

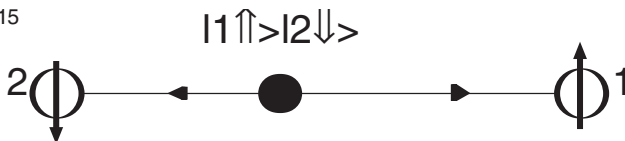
$$|1 \downarrow \rangle |2 \uparrow \rangle$$

Figura 14

Analogamente possiamo considerare il caso opposto (Figura 14), in cui lo spin della particella 1 punti in giù e quello della particella 2 punti in su.

Supponiamo ora di lasciare allontanare le particelle (Figura 15) e riferiamoci al caso di Figura 13.

Figura 15



Se si esegue una misura di spin sulla particella 2, lo troveremo certamente in giù (Figura 16); allo stesso modo, si troverebbe certamente in su (Figura 17) lo spin della particella 1, qualora la misura venisse effettivamente eseguita su di essa.

Figura 16

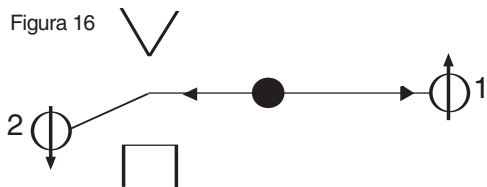
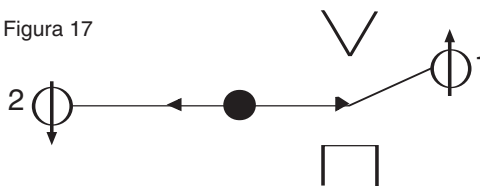


Figura 17



Ovviamente otterremmo i risultati inversi se considerassimo la situazione di Figura 14.

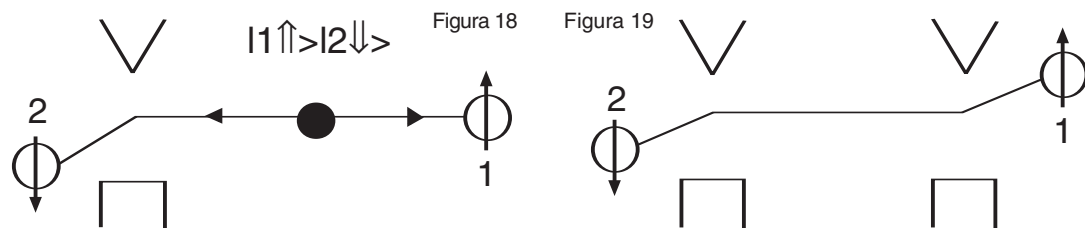
La MQ ci consente tuttavia di considerare anche sovrapposizioni dei precedenti stati.

Questi stati, secondo la teoria, presentano le seguenti caratteristiche: se si esegue, su una delle due particelle, una misura di spin in una qualsiasi direzione, si ottengono, con uguale probabilità, i risultati «in su» e «in giù». Dal punto di vista dello spin, dobbiamo riconoscere che non è legittimo pensare che gli spin puntino in alcuna direzione; secondo la teoria le particelle non hanno più alcuna proprietà individuale concernente il proprio spin.

Se, quando le particelle si sono allontanate, eseguiamo su una di esse, per esempio la 2, una misura di spin, essa finisce nella sovrapposizione degli stati «in su» e «in giù».

Se adesso cerchiamo di rivelare, per esempio tramite un contatore, se la particella 2 stia percorrendo il cammino volto in giù oppure quello volto in su, e se, per esempio, la troviamo in quello rivolto in giù (tenendo sempre presente che vi è la medesima probabilità per le due possibilità), lo stato totale diventa istantaneamente quello di questa particella con lo spin in giù e dell'altra con lo spin in su (Figura 18).

È allora possibile fare previsioni certe per la particella 1 e garantire che il suo spin è in su: facendo interagire tale particella con un campo magnetico, siamo sicuri del risultato (Figura 19).



In tal modo, dice Einstein, nel momento in cui eseguiamo la misura sulla particella 2, abbiamo la possibilità di conoscere con certezza il risultato di un'eventuale e successiva misura di spin sulla particella 1. Questo implica che quest'ultima doveva possedere tale proprietà anche «prima» di compiere la misura sulla particella 2, perché non è possibile pensare di aver creato una qualsiasi proprietà di una particella per il fatto di aver eseguito una misurazione su un'altra, distante quanto si vuole, e per di più di avergliela creata «istantaneamente». Si evidenzia così un'incompatibilità tra la richiesta di località e le previsioni quantistiche.

La conclusione di Einstein è quindi che, poiché la MQ non permette di pensare che la particella 1 abbia la proprietà in esame anche prima della misura sulla sua compagna (mentre la località lo richiederebbe), essa non descrive in modo completo la situazione fisica e pertanto è una teoria incompleta.

## La disuguaglianza di Bell

Dobbiamo ora illustrare il successivo e fondamentale passo in avanti nel dibattito sui fondamenti della teoria: la derivazione della cosiddetta «disuguaglianza di Bell».

Per chiarire di cosa si tratti, consideriamo il seguente aneddoto, inventato dal fisico inglese Euan Squires. Vi sono due individui, John e Mary, che sanno eseguire pubblicamente questo sbalorditivo esperimento. Un gruppo di persone di una sala prende un biglietto scelto fra tre biglietti numerati (con i numeri 1, 2 e 3) e lo porta a John; analogamente un altro gruppo fa lo stesso con Mary. John e Mary non possono assolutamente comunicare tra di loro e ognuno di essi può scrivere sul biglietto che ha ricevuto «sì» oppure «no», a sua scelta. L'esperimento viene ripetuto moltissime volte, e si constata che sempre, tutte le volte che i due protagonisti dell'esperimento ricevono biglietti che recano lo stesso numero, essi scrivono sempre la stessa cosa: cioè o entrambi scrivono «sì» o entrambi scrivono «no». John e Mary sostengono pertanto di essere telepatici, in quanto, pur non avendo alcuna possibilità fisica di comunicare tra loro, rispondono in modo concorde alle sollecitazioni cui sono sottoposti. Se si cerca di interpretare queste incredibili coincidenze si può osservare che esiste una spiegazione addirittura banale: i due sono dei truffatori, perché si sono accordati, prima dell'esperimento, di scrivere, per esempio, «sì» se riceveranno il biglietto col numero 1 e «no» negli altri due casi<sup>4</sup>.

È facile convincersi che quest'ultima spiegazione (cioè che John e Mary si siano accordati) è l'unica (a parte la telepatia) compatibile col fatto che le correlazioni si verificano al 100%, ed è naturalmente la posizione di Einstein: la MQ non è completa, proprio per il fatto che non riesce a dire in che modo gli elettroni si mettano d'accordo.

A questo punto subentra l'analisi di John Bell.

Egli osserva che, se si esaminano tutti i risultati degli esperimenti fatti e si contano le risposte concordi e quelle discordi in tutti i casi (cioè anche quando John e Mary hanno ricevuto biglietti con numeri diversi), si scopre che tante sono le une quante le altre: vi è cioè in metà dei casi una risposta concorde (C) e in metà dei casi discorde (D).

Se ne conclude che i due personaggi dell'aneddoto sono veramente telepatici, perché se si fossero accordati in anticipo tale risultato non si sarebbe potuto verificare.

Per dimostrare ciò, assumiamo che i due si siano accordati nei termini menzionati prima e osserviamo la Figura 20 (nella pagina seguente) che riporta tutte le risposte possibili.

11	12	13	21	22	23	31	32	33
SI SI	SI NO	SI NO	NO SI	NO NO	NO NO	NO SI	NO NO	NO NO
C	D	D	D	C	C	D	C	C

Figura 20

Si vede subito che in 5 casi esse coincidono e in 4 sono diverse: se John e Mary fossero dei truffatori, le loro risposte segnalerebbero una prevalenza di concordanza. Se il ruolo dei numeri 1, 2 e 3 è assunto dalle direzioni lungo le quali si misura lo spin, e le risposte «si» e «no» vengono identificate col fatto che lo spin risulti in su o in giù, nello stato di sovrapposizione che si è esaminato prima (argomento EPR) si presentano esattamente le correlazioni dell'esperimento di John e Mary. Questo è un modo di presentare la disuguaglianza di Bell. Si è trovato sperimentalmente (da Alain Aspect e collaboratori, nel 1982) che essa viene violata, in un esperimento che esclude qualsiasi possibilità di segnalazione fisica tra le particelle sulle quali si eseguono misure di spin. Non è vero dunque che gli elettroni prima della misura abbiano già lo spin in su o in giù, e vi è perciò una sorta di azione istantanea a distanza quando facciamo una misura su uno di loro: in questo senso Bell e Aspect hanno dimostrato che gli elettroni sono telepatici.

### Dal microscopico al macroscopico

Un altro problema per la teoria emerge se passiamo dal livello microscopico, al quale ci siamo finora riferiti, a quello macroscopico. Se vogliamo studiare come si comportano gli elettroni, dobbiamo misurarli con uno strumento macroscopico il cui indice, per esempio, passa dalla posizione zero alla posizione U o D a seconda che lo spin sia in su o in giù.

Supponiamo, come si vede in Figura 21a, che quando l'elettrone con lo spin in su (descritto dallo stato  $IU>$ ) interagisce con l'apparecchio, questo finisca con l'indice nella posizione U.

Analogamente, come nel caso di Figura 21b l'elettrone che ha lo spin in giù (stato  $ID>$ ) porta l'indice dell'apparecchio nella posizione D.

<sup>4</sup>Si osservi che le risposte di John e Mary corrispondono agli elementi di realtà fisica che Einstein voleva preesistero alla misura: se tutte le volte che troviamo un elettrone con lo spin in giù si può prevedere che l'altro lo avrà in su, dato che prima della misura l'altro poteva andare indifferentemente in giù o in su, deve esserci sotto qualcosa, una specie di istruzione nascosta, per cui i due elettroni devono essersi messi d'accordo in qualche modo.

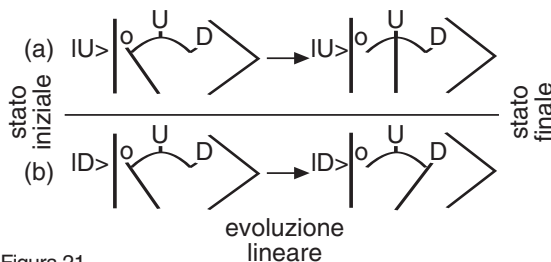


Figura 21

Inviando ora allo strumento un elettrone con lo spin in direzione  $U + D$ , cioè in uno dei famosi stati di sovrapposizione di cui abbiamo tanto discusso. Dato che le sovrapposizioni si conservano per evoluzione, se partiamo con la particella con lo spin in questo stato e lo inviamo nello stesso apparecchio, finiamo nello strano stato di Figura 22 in cui

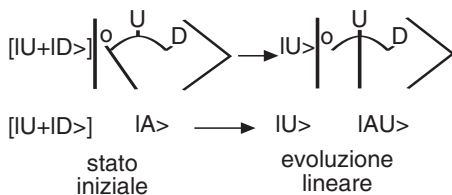


Figura 22

l'apparecchio segna  $U$  e segna  $D$  e in mezzo c'è un «+» che risulta inconciliabile con l'idea che l'apparecchio segna « $0$ »  $U$  « $0$ »  $D$ : quel «+» è una cosa completamente diversa dall'alternativa logica tra le due possibilità.

Ma allora, cos'è questo strano oggetto macroscopico, l'indice dell'apparecchio, che non ha una posizione definita? Il fatto che lo stesso accada per un elettrone ( $L + R$ ) può essere accettato (Figura 6a): l'elettrone è una cosa strana che sfugge alla nostra immaginazione e al quale non possiamo applicare le categorie che ci siamo formati dall'esperienza del nostro mondo macroscopico. Il fatto però che lo stato dell'indice dell'apparecchio di Figura 22 coinvolga il segno «+» è una cosa che turba notevolmente e che appare incomprensibile.

Schrödinger evidenziò questo stato di cose col seguente esempio.

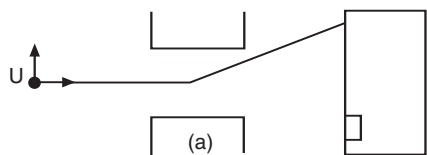
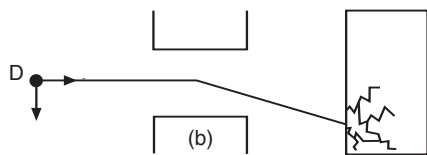


Figura 23



Nel caso dello stato  $U$  di Figura 23a, la particella viene deviata in su. Essa colpisce una scatola in alto e viene assorbita; nel caso dello stato  $D$  di Figura 23b, essa viene deviata in giù e rompe una vescicola posta nella scatola in basso.

Prendiamo ora un elettrone nello stato  $U + D$  e mettiamo dentro la scatola un gatto e nella vescicola del cianuro: la situazione finale diviene quella di Figura 24 in cui nello stato finale si verificano entrambi i casi, e cioè quello in cui il gatto è vivo e quello in cui il gatto è morto.

Lo stato finale cioè è quello di  $[gatto\ vivo + gatto\ morto]$  che, come sappiamo significa «né» vivo «né» morto, in quanto rappresenta una situazione che non è compatibile con l'asserzione classica che il gatto è o vivo o morto.

Cos'è questa strana situazione? Sembra inevitabile dire che la MQ non è in grado di spiegare come funzionano gli apparecchi e di descrivere i macrosistemi. Si può cercare di superare tale difficoltà ammettendo che anche la MQ, come tutte le teorie, possiede un certo ambito di applicabilità e non è valida, in particolare, per la descrizione

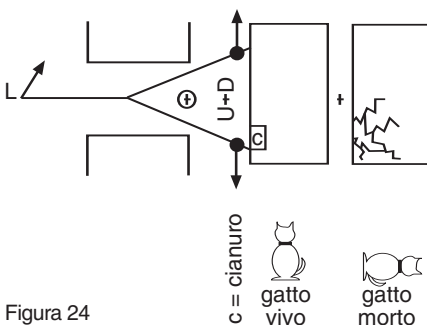


Figura 24



di sistemi macroscopici. Emerge tuttavia un nuovo problema, cioè quello che la teoria non consente di identificare in modo chiaro il proprio ambito di validità. La MQ non è in grado di rispondere a domande fondamentali quali: che cos'è una misura? Che cos'è un oggetto classico e uno quantistico? Che cos'è un sistema e cosa un apparato di misura? Nessuno lo sa. All'interno del formalismo non si capisce che cosa renda il gatto «non» quantistico: il gatto non è forse fatto di atomi e di elettroni, come tutti gli altri sistemi? E d'altra parte ci si può chiedere: cosa vuol dire [**gatto vivo**> + **gatto morto**>]?

Se si applicano le idee della MQ alla descrizione dell'Universo, si deve riconoscere, per esempio, che in esso può capitare che se una particella (la quale può andare a destra o a sinistra, come nell'esperimento di Figura 1, 2 e 3) va in L, può incontrare una nube cosmica, innescare un processo di collasso e formare una galassia; invece se va in R non porta alla formazione di alcuna galassia. D'altronde, se è vero che la MQ descrive l'intero Universo si può finire in una situazione in cui c'è una galassia e al tempo stesso non c'è (ancora una volta c'è sovrapposizione di stati). Siamo di fronte a qualcosa di strano: la teoria ci ha insegnato che per avere esiti precisi bisogna eseguire delle misure. Ma chi misura l'Universo?

Sono state avanzate diverse risposte. Per focalizzare il problema e illustrare alcune di tali proposte, Bell analizzò la situazione seguente. Si abbia un elettrone che, per gli aspetti ondulatori dei microsistemi, può andare a colpire una lastra fotografica (rivelatore) in punti diversi. Si consideri un osservatore che guarda la lastra e vede in che punto essa viene annerita. Se si pretende di descrivere sia il sistema che la lastra con la MQ, anche il suo annerirsi resta indefinito. Si può allora spostare il confine tra il vago mondo quantistico e il preciso mondo macroscopico tra la lastra e l'osservatore. Ma l'apparato percettivo dell'osservatore è esso stesso costituito da atomi ed elettroni e andrebbe incluso nella descrizione quantistica. Lo stesso vale per il cervello, giungendo così al confine mente/cervello. Non è un caso che il premio Nobel Eugene Wigner abbia suggerito di risolvere il problema della MQ con una scappatoia che potrebbe essere definita di tipo idealistico. Essa afferma che tutti i sistemi esistenti al mondo sono sistemi fisici per i quali vale il principio di sovrapposizione: quindi una supernova può trovarsi nello stato [**esplosa**> + **Inon esplosa**>]. L'unica cosa capace di eliminare il «+» è la mente, la coscienza; quando percepiamo togliamo il «+»: la stella è esplosa o non lo è. Per Wigner il mondo era completamente diverso prima che vi comparisse un essere cosciente; la coscienza è qualcosa di completamente diverso e peculiare da qualsiasi altro sistema: tutto obbedisce alla MQ tranne l'atto di presa di coscienza.

A questo proposito non ci si può tuttavia esimere dall'osservare, con Bell, che la definizione di essere cosciente è anch'essa fondamentalmente ambigua.

## L'ipotesi di GianCarlo Ghirardi, Alberto Rimini e Tullio Weber

Consideriamo una particella il cui stato sia rappresentato da una funzione d'onda tale per cui non sia possibile dire (a causa del segno «+») se la particella si trova attorno a  $x_1$  o attorno a  $x_2$ . Supponiamo ora che in natura si verifichi un fenomeno, per il momento non meglio definito, che corrisponde a una localizzazione come se «qualcuno» di tanto in tanto intervenisse a eliminare il segno «+». Dopo il processo, l'elettrone si troverà in realtà localizzato o in  $x_1$  o in  $x_2$  come succede quando si effettua un'osservazione. Assumiamo che questi processi avvengano a caso e molto raramente per tutti gli oggetti microscopici. Rompere il segno «+» equivale a eliminare uno dei due picchi della funzione d'onda e a localizzare effettivamente, realmente, l'elettrone in  $x_1$  o in  $x_2$ . In breve, si ipotizza che in natura esistano processi casuali, stocastici, che localizzano i microcostituenti dell'Universo.

La probabilità che una particella venga localizzata in una posizione piuttosto che in un'altra è legata alla probabilità che la MQ assegnerebbe all'esito di un processo di misura di posizione; in questo caso non vi è alcun osservatore che esegue la misura, per cui si tratta di un nuovo tipo di processo naturale. In altre parole, le localizzazioni avvengono dove esiste un'apprezzabile probabilità di trovare la particella. Per quanto riguarda la frequenza di questi processi, si assume che siano rarissimi, cioè che avvengano, per esempio, una volta ogni  $10^9$  anni. Così in pratica non si modifica per nulla tutto ciò che la MQ prevede per le particelle elementari e per le strutture più complesse come un atomo o anche una macro-molecola con moltissime migliaia di atomi.

Qualora si consideri invece un oggetto macroscopico, come l'indice di uno strumento, la frequenza delle localizzazioni viene di conseguenza amplificata proporzionalmente al numero dei costituenti elementari. Se uno dei suoi elettroni subisce un processo di localizzazione ogni  $10^9$  anni, essendoci nell'indice un numero di particelle dell'ordine di  $10^{23}$  (il numero di Avogadro), accadrà che il processo si verificherà per circa  $10^7$  dei suoi elettroni ogni secondo, e la funzione d'onda dell'indice risulterà ben localizzata (cioè senza alcuna ambiguità circa la posizione) in un tempo brevissimo (milionesimi di secondo). In definitiva, se si considera un macro-oggetto che si trova nella sovrapposizione, cioè la cui posizione è indeterminata, basta che un tale processo si verifichi per uno solo dei suoi elettroni per cancellare l'indeterminazione stessa.

Si tratta di una teoria puramente fenomenologica che applicata a un microsistema conferma la MQ, in quanto l'evento della localizzazione spontanea in pratica non si verifica per questo tipo di sistemi, mentre applicata all'interazione di un microsistema con un macrosistema, cioè a un processo di misura, conferma proprio ciò che la MQ non è capace di spiegare, ovvero che l'indice segna un valore ben preciso, che il gatto è «o» vivo «o» morto e quindi non può permanere in quegli strani stati in cui non è né l'uno né l'altro. Infine la teoria, applicata ai macro-oggetti, è in pieno accordo con la meccanica classica.

Il modello comporta un'unica visione dei fenomeni naturali e permette di rispondere alla famosa domanda di Einstein, se cioè la Luna sia là dov'è, quando nessuno la guarda: la risposta, nel nostro contesto, è affermativa.

Val la pena pertanto di rifarci a questa frase di Einstein e alle critiche che, ad esempio, gli rivolgeva Wolfgang Pauli. Questi asseriva che le domande che Einstein si poneva erano sempre tali da non ammettere una risposta e pertanto non risultavano più rilevanti dell'antica questione di quanti angeli si trovino sulla punta di uno spillo. David Mermin, in uno scritto in cui discute la disuguaglianza di Bell, prende posizione su tale dibattito: a suo avviso sia Einstein che Pauli avevano torto. Le domande con cui Einstein attaccava la teoria quantistica possiedono una risposta, ma esse non sono quelle che Einstein si aspettava. Con la disuguaglianza di Bell infatti, è stata dimostrata valida l'interpretazione di tipo «telepatico», ossia non risulta legittimo dire che quell'elettrone ha lo spin in su prima di averlo misurato; quindi non si può dire che la Luna è là quando nessuno la guarda. Val la pena di sottolineare che se si accetta il modello di localizzazione spontanea, mentre al livello delle particelle elementari un elettrone non è là se nessuno lo guarda, per un sistema come la Luna, si può asserire che essa è là anche quando nessuno la guarda.

Ci si può chiedere come si sarebbe espresso Einstein nei confronti del modello da noi proposto.

Egli nutriva certamente una seria sfiducia nei confronti della MQ. È tuttavia opportuno notare che, in occasione di una raccolta di scritti in suo onore, egli, nel saggio finale di replica ai vari autori, considerò una situazione del tipo di quella del gatto di Schrödinger; invece che al gatto, Einstein si riferì a un processo che può portare o non (col famoso «+») a tracciare una linea su un foglio di carta. Einstein sottolineò che la posizione di questa riga era un fatto appartenente interamente alla sfera dei fenomeni macroscopici. Egli riteneva che fosse piuttosto difficile trovare qualcuno seriamente propenso a pensare che l'esistenza della riga dipendesse dal fatto che qualcuno stesse lì a guardarla oppure no. A livello macroscopico si dà per scontato che si debba aderire al programma di una descrizione oggettivistica e realistica nello spazio e nel tempo. Nella sfera del mondo microscopico (come sottolineava Einstein) un individuo potrebbe essere più facilmente incline a rinunciare o almeno modificare tale programma. Einstein aggiungeva però a tali considerazioni la seguente osservazione: dato che il livello microscopico e quello macroscopico sono strettamente legati l'un l'altro, è impossibile ritenere che si possa abbandonare il programma realista solo a uno di tali livelli.

In questo senso, si potrebbe affermare che Einstein non avrebbe ritenuto plausibile un programma come quello delle localizzazioni spontanee; se tuttavia avesse considerato praticabile questa via, forse non avrebbe considerato questo modello privo di interesse. Di fatto il programma costringe ad accettare tutte le peculiarità connesse al significato del segno «+» per i sistemi microscopici, ma consente di assumere una posizione epistemologica di tipo macrooggettivista: la Luna è là anche se nessuno la guarda.