

La Realtà Quantistica

Danilo Babusci
danilo.babusci@Inf.infn.it

Incontri di Fisica 2016

Copenhagen

Principio di Complementarità (Bohr) \oplus Relazioni d'Incertezza (Heisenberg) \rightarrow interpretazione di Copenhagen

1. Heisenberg: impossibile conoscere posizione e impulso di una particella a causa del disturbo dell'apparato misura
2. Bohr: posizione e impulso di una particella sono proprietà complementari, i.e., non possono essere misurate dallo stesso apparato

\rightarrow proprietà dei sistemi quantistici non esistono indipendenti dall'apparato; piuttosto, i valori ottenuti in una misura sono creati dall'apparato con probabilità per i risultati possibili determinati dalla f. d' o. Ψ , che influenza e viene influenzata dall'apparato stesso (origine del salto quantico)

Copenhagen

1. probabilità di un evento in un esperimento ideale data dal quadrato della f.d'o. (numero complesso)

$$P \propto |\Psi|^2$$

2. evento che può avvenire secondo varie alternative → **principio di sovrapposizione**: f.d'o. = Σ f.d'o. delle varie alternative considerate separatamente → **interferenza**

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 \quad \rightarrow \quad P = |\Psi_1 + \Psi_2|^2$$

3. esperimento in grado di determinare se una o l'altra delle possibili alternative è realizzata: probabilità = somma di quelle delle alternative → **no interferenza**

$$P = P_1 + P_2$$

Copenhagen

Probabilità è ingrediente essenziale: limitazione di “principio”, su cosa possiamo conoscere di un sistema e non mera limitazione “pratica” come in Fisica Classica

2 fenditure: p.to d'arrivo elettroni intrinsecamente non predicibile; possibili solo affermazioni di natura statistica

Arrivo dell'elettrone sullo schermo → f.d'o., inizialmente diffusa in tutto lo spazio, collassa alla regione di spazio delimitata dal rivelatore, **in un modo che non sappiamo descrivere** (... uno dei tanti misteri) → **impossibile definire il concetto di traiettoria**: prima che arrivi al rivelatore non possiamo dire nulla di definito sulla posizione dell'elettrone

Paradosso della Misura

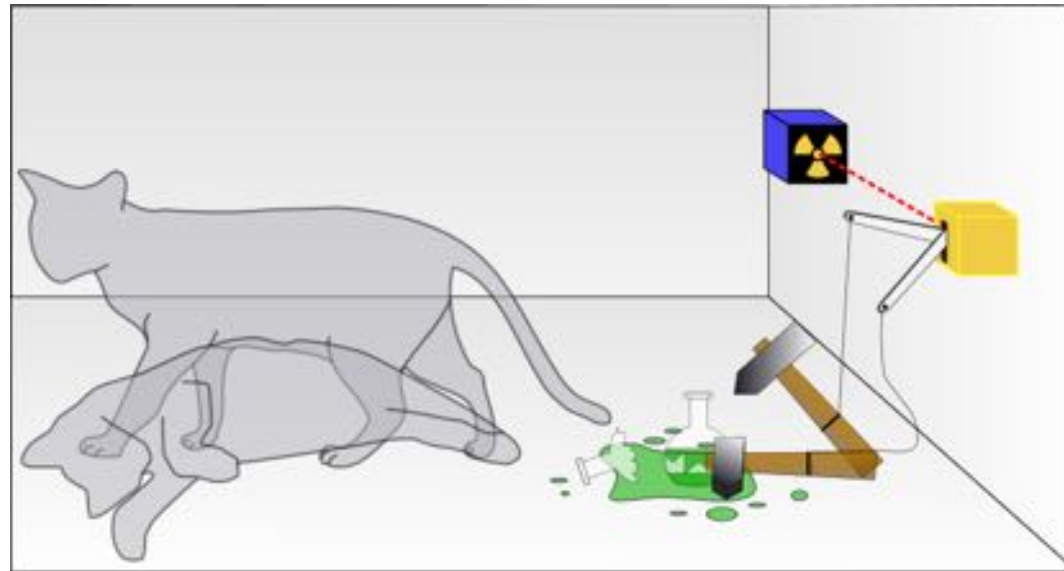
Sistema quantistico può esistere in una sovrapposizione di diversi stati quantistici → processo di misura fa collassare la sovrapposizione in uno **stato classico** (i.e. che può essere definito per mezzo dello stato di un rivelatore classico) → soltanto dopo la misura possiamo parlare di sistema quantistico con definite proprietà

apparentemente, è l'osservatore a decidere quali proprietà misurare e quando farlo

Schrödinger insoddisfatto da questa interpretazione: il problema è che ogni cosa è quantistica e quindi non si vede perché dividere il mondo in oggetti classici (rivelatori) e quantistici (atomi, ...)

Paradosso della Misura

Schrödinger: nulla che impedisce alla irrealtà microscopica di infettare il mondo macroscopico → paradosso del gatto



$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |\text{gatto vivo}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\text{gatto morto}\rangle$$

Mostra come separazione richiesta dalla teoria tra mondo classico e quantistico sia mal definita e insoddisfacente

Paradosso della Misura

Come fa l'osservazione a far collassare la f.d'o. in una delle 2 alternative? **von Neumann & Wigner**: coscienza osservatore gioca un ruolo importante

Cosa accade se qualcuno può guardare dentro la scatola tramite una finestra (**amico di Wigner**)? Possiamo chiedergli se il gatto è morto quando è decaduto il nucleo o quando abbiamo aperto la scatola? O è l'amico di Wigner che, guardando, ha fatto collassare la f.d'o.?

Unico aspetto non-quantistico è la coscienza? → perché differenti osservatori concordano sulla rappresentazione del mondo?

Molti Mondi

(Everett)

REVIEWS OF MODERN PHYSICS

VOLUME 29, NUMBER 3

JULY, 1957

“Relative State” Formulation of Quantum Mechanics*

HUGH EVERETT, III†

Palmer Physical Laboratory, Princeton University, Princeton, New Jersey

Bohr: apparato di misura classico seleziona **solo uno** degli stati della sovrapposizione quantistica

Everett: tutte le possibilità sono realizzate, ma ognuna in una **diversa copia dell'universo**, ciascuna delle quali è essa stessa costantemente soggetta a moltiplicazione in corrispondenza di ogni processo di misura → **no collasso della f.d'o.** → **“multiverso” di universi paralleli**

Molti Mondi

idea affascinante ma problematica:

- ✓ costretti a supporre che i vari universi non possono comunicare tra loro (e che in ognuna di essi è presente una nostra copia ...)
- ✓ diramazione della f.d'o. = struttura ad albero → no associazione del particolare presente con alcun particolare passato → la configurazione del mondo - noi compresi - cambia in modo discontinuo → perché, invece, abbiamo l'illusione che il mondo cambi in modo continuo?

Bell: è la memoria - un fenomeno del presente - a darci l'impressione di continuità → “... *qualora [questa teoria] fosse presa sul serio sarebbe difficile prendere sul serio qualsiasi altra cosa*”

Bohr vs Einstein

Il dibattito sull'interpretazione della **Meccanica Quantistica** imperversò fin dagli inizi degli anni '30.

Attori principali: **Bohr** e **Einstein**



Teatro: Conferenza Solvay a Bruxelles



17/29 hanno vinto il Nobel

Bohr vs Einstein

Bohr

campione della **interpretazione di Copenhagen**: prima di misurarla, la particella non possiede una posizione definita; tutto ciò che possiamo sperare di conoscere è la probabilità che essa si trovi in un certo punto.

La particella ha una posizione definita, nel senso consueto del termine, solo nel momento in cui la “osserviamo”, prima e dopo essa ha solo posizioni potenziali. Questo non significa che la particella ha una posizione che noi non riusciamo a conoscere se non dopo averla misurata: in realtà, prima che sia effettuata la misura, essa non possiede proprio una posizione definita → **atto di misura partecipa profondamente alla creazione della realtà osservata**

Bohr vs Einstein

Bohr

ogni speranza di ottenere una rappresentazione unificata della realtà oggettiva deve essere abbandonata; la teoria quantistica fornisce predizioni circa i risultati di una misura, ma – contrariamente alle precedenti teorie – non fornisce descrizione di “come la natura determina” il risultato stesso.

La stessa volontà di ricercare una tale descrizione è sbagliata e ingenua. Tutta la comprensione umana si esplica in termini di concetti classici modellati sull'esperienza diretta, ma il mondo quantistico è non-classico e non può essere compreso nei vecchi termini, nemmeno in linea di principio.

Bohr vs Einstein

Einstein

fin dall'inizio a disagio con i salti quantici: violano la località imposta dalla RS: un evento non può essere influenzato da eventi con cui non ha relazione una causale.

(vedi anche slides 24-25)

NB: Ψ di particella singola evolve nel tempo espandendosi su distanze arbitrariamente grandi; osservazione della particella in un punto \rightarrow variazione istantanea della f. d'o. in tutto lo spazio in modo da impedire che altri osservatori, arbitrariamente lontani, possano osservare la particella nelle loro posizioni (Copenhagen) \rightarrow misteriosa azione a distanza che svanisce se si rinuncia ad ammettere che Ψ fornisce una descrizione completa dello stato della particella e si ammette che essa possiede una posizione reale in tutti gli istanti di tempo

Bohr vs Einstein

Einstein

in realtà, ogni volta che cerchiamo di stabilire dove si trova la particella la troviamo sempre in una posizione definita → la f.d'o. è solo un surrogato temporaneo di una (ancora ignota) descrizione più precisa in grado di prevedere con esattezza la posizione della particella.

Cosa c'è di più naturale che attendersi che una particella fosse prima localizzata nel punto in cui viene trovata l'attimo dopo? Una conoscenza più approfondita della fisica dovrebbe fornirci questa informazione senza far uso della probabilità, che è l'elemento veramente più difficile da accettare (*“credete veramente che la Luna non si trovi lassù se nessuno la guarda?”*)

Bohr vs Einstein

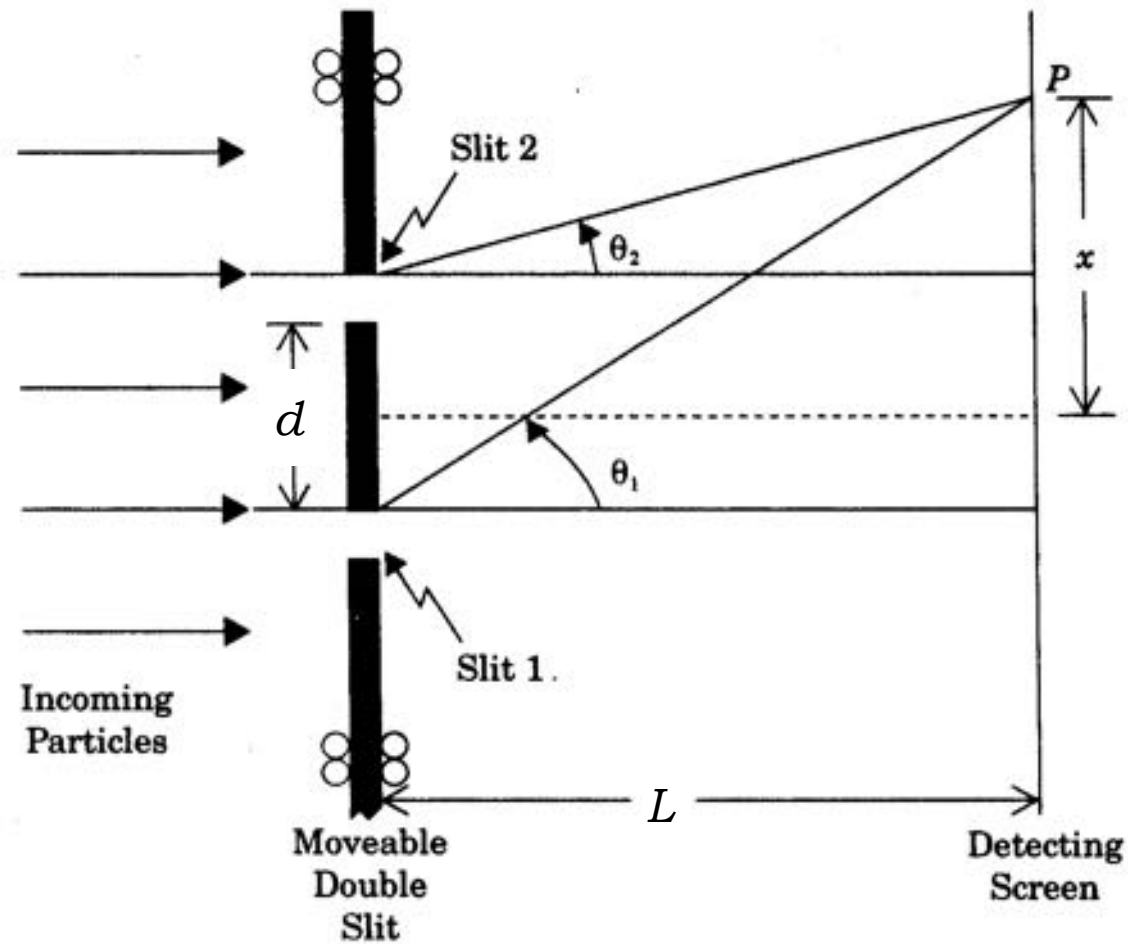
Einstein: MQ rinuncia a quello che è sempre stato lo scopo della scienza: la descrizione completa del mondo reale (supposto esistere indipendentemente da qualsiasi atto di osservazione). Questo ha comportato l'elaborazione di nuovi concetti per corrispondere con quella realtà, e così idee scientifiche quali forza, energia e impulso sono emerse nel corso di decenni di dibattito. Esse corrispondevano a importanti proprietà del mondo fisico e, per tale ragione, potevano essere utilizzate in modo produttivo per comprenderlo.

Secondo **Bohr** questa tradizione deve essere abbandonata.

punto di vista attuale (condiviso): l'universo quantistico implica revisione radicale della nostra concezione del mondo fisico, revisione finora non raggiunta.

Bohr vs Einstein

Einstein: ancora le 2 fenditure, ma mobili (1927)



Bohr vs Einstein

particella che arriva in P: nell'attraversare una delle fenditure riceve spinta verso l'alto → schermo rincula verso il basso, **più** o **meno** a seconda che la particella passi per il foro **1** o **2**

→ misura dell'entità del rinculo consente di stabilire per quale fenditura è passata la particella, mantenendo la figura d'interferenza

Bohr: impulso ricevuto dallo schermo

$$P(i) = P \sin \theta_i \simeq P \theta_i \quad (i = 1, 2)$$

→ per stabilire quale fenditura devo misurare il rinculo con un'accuratezza

$$\Delta P < P(1) - P(2) \simeq P(\theta_1 - \theta_2)$$

Bohr vs Einstein

P.d'l. → incertezza nella posizione della fenditura

$$\Delta x > \frac{h}{\Delta P} \simeq \frac{h}{P(\theta_1 - \theta_2)}$$

$$\frac{x + d/2}{L} = \tan \theta_1 \simeq \theta_1$$

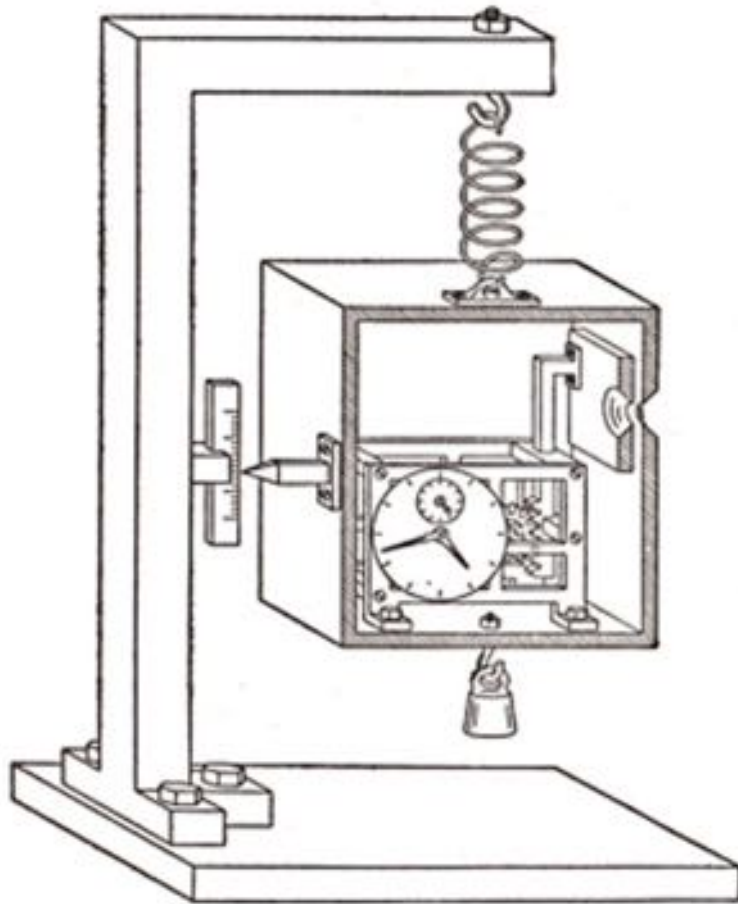
$$\frac{x - d/2}{L} = \tan \theta_2 \simeq \theta_2$$

$$\rightarrow \theta_1 - \theta_2 \simeq \frac{d}{L}$$

$$\text{i.e.} \quad \Delta x > \frac{h}{P} \frac{L}{d} = \frac{\lambda L}{d}$$

$\lambda L / d$ = distanza tra due massimi della figura d'interferenza
→ l'incertezza nella misura della posizione della fenditura è sufficiente a cancellare l'interferenza

Bohr vs Einstein



(disegno di Bohr)

Einstein: scatola di luce (1930)

scatola a pareti perfettamente riflettenti all'interno della quale è intrappolata una certa quantità di luce, che contribuisce al peso della scatola ($E = mc^2$); ad un dato istante, da un'apertura esce un solo fotone la cui energia è determinata misurando il peso della scatola → determinate con precisione arbitraria energia e istante d'emissione del fotone:

contraddizione con $\Delta E \Delta t > h$

come risponde Bohr? dimostra che Einstein nell'elaborazione dell'argomento ha dimenticato la Relatività Generale ...

EPR

... Einstein non demorde e nel 1935 ci riprova ...

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

nell'articolo viene proposto un *gedanken experiment* che dovrebbe dare sostegno all'idea che esiste una "realtà obiettiva", indipendente dalla misura.

EPR

EPR partono dalla definizione di **elemento della realtà fisica**:

“se, senza disturbare in alcun modo un sistema, possiamo predire con certezza ... il valore di una quantità fisica, allora esiste un elemento di realtà fisica corrispondente a tale quantità”

Esistono processi fisici che generano due particelle dotate di proprietà correlate (e.g., $\pi^0 \rightarrow e^+e^-$). Le particelle prodotte si allontanano in direzioni opposte con velocità, in modulo, uguali. Anche le posizioni delle particelle sono strettamente correlate.

EPR usano processi di questo tipo per dimostrare che ogni particella ha, in realtà, una posizione e una velocità definite in qualsiasi momento.

EPR

Supponiamo di misurare la posizione di una delle due particelle
→ conoscenza indiretta della posizione dell'altra particella.

Dato che non abbiamo minimamente interferito con la 2^a particella, la sua posizione doveva essere quella anche prima della misura: noi l'abbiamo determinata solo in modo indiretto.

Avremmo potuto, però, scegliere di misurare la velocità della 1^a particella: in tal caso avremmo stabilito indirettamente la velocità della seconda, senza alterarla. Ancora una volta, dato che non abbiamo fatto assolutamente nulla alla 2^a particella, possiamo concludere che la sua velocità era la stessa già prima.

EPR

Mettendo insieme le due misure - quella effettuata e quella che avremmo potuto effettuare - EPR concludono che la seconda particella ha posizione e velocità definite in qualsiasi momento.

NB - Nell'esperimento EPR, se misuriamo la posizione alteriamo la velocità e viceversa. Se non conosciamo entrambe le proprietà della 1^a particella, non conosciamo nemmeno quelle della 2^a → no conflitto con il Principio d'Indeterminazione. EPR ammettono di non poter misurare simultaneamente la posizione e la velocità di una particella. Ciò nonostante (e questo è un punto fondamentale), anche senza stabilire posizione e velocità di entrambe le particelle, il ragionamento di EPR dimostra che ognuna ha una posizione e velocità definite. Per loro è una questione di realtà: una teoria non può dirsi completa se non è in grado di descrivere tutti gli elementi di realtà. La realtà, secondo EPR, è qualcosa di più dei dati letti sui rivelatori, o della somma di tutte le osservazioni effettuate in un dato momento: quando nessuno “guarda la Luna”, questa è pur sempre un elemento della realtà.

EPR

L'argomentazione di EPR si basa su un presupposto importante: se in un determinato momento possiamo determinare una proprietà di un oggetto A conducendo una misura su un altro oggetto B spazialmente distante dal primo, allora A ha la proprietà in questione. Il fondamento logico di questo assunto è semplice: la misura viene effettuata **qui** mentre l'altro oggetto si trova **lì** → **Principio di Località**: possiamo influenzare in modo diretto solo le cose che ci sono vicine, i.e., **sono possibili solo azioni “locali”**

Questa idea trae origine dalla constatazione che se la misurazione di A è in grado d'influenzare B, ciò non può che avvenire con un ritardo almeno uguale al tempo impiegato dalla luce a coprire la distanza tra A e B.

EPR

NB – il Principio di Località è tacitamente assunto nella descrizione dell'esperimento delle due fenditure; se rinunciamo alla località e ammettiamo la possibilità che chiudendo una fenditura potremmo alterare i cammini degli elettroni che attraversano l'altra, non saremmo più costretti a concludere che gli elettroni possono essere in due posti distinti nello stesso istante.

Nell'esperimento **EPR**, le due particelle sono esaminate allo stesso istante, per cui ciò che apprendiamo su B quando osserviamo A deve essere posseduto da B in modo del tutto indipendente dal fatto che la misurazione venga effettuata. In altre parole, **EPR** sostengono che un oggetto A non risente in alcun modo di ciò che facciamo ad un oggetto B spazialmente separato da A.

EPR

L'alternativa - secondo EPR - sarebbe di rendere la realtà della seconda particella dipendente dal processo di misura eseguito sulla prima. Anche se non la escludono logicamente, EPR disdegnano questa non-località e suggeriscono, invece, l'incompletezza della MQ.

Paradosso scompare se la MQ viene integrata con delle variabili nascoste (VN). Nel caso dell'esperimento EPR, tali variabili aggiuntive corrisponderebbero alle posizioni e agli impulsi delle particelle → correlazioni tra le due particelle sarebbero come quelle esibite da molti sistemi classici (guanti, gemelli omozigoti, ...), in ultima analisi derivanti dalla comune origine dei due oggetti → esistenza di variabili il cui valore è predeterminato.

EPR

Qualora fosse possibile misurare il valore di queste variabili nascoste si riuscirebbe a predire il risultato di un certo esperimento con certezza.

Nella MQ tali variabili sono inaccessibili all'osservazione.

La conclusione dell'articolo EPR è all'insegna dell'ottimismo

quantities.

Returning now to the general case contemplated in Eqs. (7) and (8), we assume that ψ_k and φ_r are indeed eigenfunctions of some non-commuting operators P and Q , corresponding to the eigenvalues p_k and q_r , respectively. Thus, by measuring either A or B we are in a position to predict with certainty, and without in any way

the second system in any way. No reasonable definition of reality could be expected to permit this.

While we have thus shown that the wave function does not provide a complete description of the physical reality, we left open the question of whether or not such a description exists. We believe, however, that such a theory is possible.

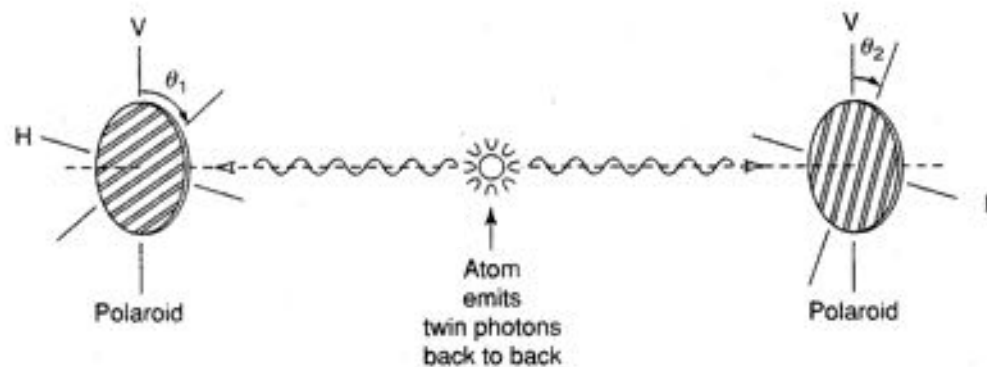
Bohr

La risposta di Bohr è di difficile lettura. Per gran parte del suo articolo, egli semplicemente ignora la configurazione sperimentale proposta da EPR e reitera la sua difesa vecchio stile della consistenza della MQ, in cui l'attacco di Einstein viene sventato invocando il disturbo sul sistema da parte dell'apparato di misura. Tali argomenti, però, sono adesso irrilevanti poiché l'apparato utilizzato per la prima particella non può in alcun modo disturbare fisicamente quello che misura la seconda.

Quando, alla fine, passa a considerare l'esperimento EPR, Bohr s'impegna a provare la consistenza della MQ, proprietà garantita dalla complementarità che impedisce l'esecuzione simultanea delle misure di posizione e impulso. Tutto ciò, però, è irrilevante in quanto EPR non pongono la questione della consistenza della MQ, ma della sua completezza.

EPR (Bohm)

versione di **Bohm** dell'esperimento **EPR**: sorgente che emette due fotoni in direzioni opposte



- i due polaroid in direzione **V** (**H**) \rightarrow entrambi i fotoni passano
- un polaroid nella direzione **H** e l'altro nella direzione **V** \rightarrow mai vediamo entrambi fotoni passare

i.e., osservo solo coppie **VV** e **HH**, mai **VH** e **HV** !!

EPR (Bohm)

→ la misura della polarizzazione di uno dei fotoni consente di misurare quella dell'altro. Dato che la misura di un fotone non influenza l'altro fotone, questo deve aver sempre avuto la polarizzazione appena rivelata. Tutto ciò che abbiamo fatto è stato misurarla, seppure indirettamente.

Inoltre dato che avremmo potuto di scegliere di effettuare la misura lungo qualsiasi asse, la stessa conclusione si applica sempre: il fotone che si muove verso sinistra presenta una polarizzazione definita lungo ogni asse, anche se noi siamo in grado di determinarla per un solo asse alla volta.

Naturalmente, i ruoli dei due fotoni possono essere scambiati, il che ci porta a concludere che **ciascun fotone ha una polarizzazione definita lungo qualsiasi asse.**

Entanglement

Anche se la MQ dimostra che le particelle acquisiscono in modo casuale una data proprietà quando eseguiamo una misura, sappiamo che tale casualità può avere delle correlazioni spaziali. Coppie di particelle adeguatamente preparate – i.e., entangled – non acquisiscono le proprietà in modo indipendente:

sono “dadi” che, lanciati in due luoghi diversi, segnano punteggi casuali ma identici.

Le particelle entangled, anche se spazialmente distanti, non si comportano autonomamente l'una dall'altra. L'atto di misurare la polarizzazione di uno dei due fotoni “obbliga” l'altro, eventualmente lontano anni-luce, ad abbandonare il limbo probabilistico e assumere la stessa polarizzazione.

EPR secondo la MQ

Nella versione di **Bohm** dell'esperimento ciascun fotone viene creato in una sovrapposizione di stati di **H** e **V**. Misura polarizzazione del fotone di destra: **H** \rightarrow collasso della sua f.d'o. nell'intero spazio: azzeramento, all'istante, dell'alternativa **V**. Dato che il collasso avviene ovunque, interessa anche il punto in cui si trova il fotone che si muove verso sinistra: si azzerava la componente **V** della sua f.d'o. \rightarrow malgrado la distanza tra i due fotoni, la f.d'o. del fotone che si muove verso sinistra risente istantaneamente di qualsiasi cambiamento nella f.d'o. di quello che si muove verso destra.

Secondo la **MQ**, dunque, questa variazione istantanea della f.d'o. causa un'influenza che si trasmette a velocità superiore a quella della luce.

Collasso quantistico

L'ipotesi del collasso si è rivelata molto utile per giustificare i risultati sperimentali, ma è **impossibile da dedurre dall'apparato matematico della MQ**: deve essere introdotto come ipotesi aggiuntiva.

Questa strategia solleva non pochi dubbi. Infatti, com'è possibile che quando eseguiamo una misura su un elettrone in DAFNE ne azzeriamo istantaneamente la f. d'o. sulla Luna? Certamente quando troviamo l'elettrone in DAFNE sappiamo che questo non può trovarsi sulla Luna, ma con quali meccanismi ciò avviene? In che modo la parte della f. d'o. che si trova sulla Luna “apprende” che deve azzerarsi all'istante.

È lecito chiedersi: com'è possibile che il collasso avvenga istantaneamente? Non è un'idea in conflitto con la **RS**?

Collasso quantistico

Se le f. d'o. fossero come le onde d'acqua, la risposta sarebbe indubbiamente positiva. Ma, obiettano da Copenhagen, le f. d'o. non sono come onde d'acqua.

Anche se descrive la materia, **la f.d'o. non è un'entità materiale** e, quindi, la barriera imposta dalla velocità della luce non agisce. Se la f.d'o. collassa in DAFNE, un osservatore sulla Luna non riuscirà, con probabilità 1, a rivelare l'elettrone. Niente sulla Luna indica la variazione improvvisa della f. d'o. associata con la rivelazione dell'elettrone in DAFNE.

Fintanto che l'elettrone non si sposterà con velocità maggiore di quella della luce, non si avrà alcun conflitto con la **RS**.

EPR vs RS

La **RS** vieta propagazione dell'informazione con $v > c$. Quando si misura la polarizzazione dei due fotoni, tra questi non viene scambiata alcuna informazione. Per ogni fotone che giunge al polaroid c'è un'uguale probabilità che esso lo passi o meno → ottengo due sequenze di 0/1. Non è assolutamente possibile prevedere l'esito di una misura; in queste due serie casuali di dati non è nascosta alcuna informazione di sorta, ma sono identiche e di ciò ce ne accorgiamo solo confrontandole; e il confronto deve essere necessariamente fatto con mezzi convenzionali (telefono, fax, e-mail, ...), i.e. più lenti della luce.

Quindi, sebbene sembra che la misura della polarizzazione di un fotone influenzi all'istante quella dell'altro, nessuna informazione viene scambiata tra i due: **la RS è salva**.

EPR vs RS

Si tratta di un argomento soddisfacente?

Per molti, sì. Altri, invece, hanno la sensazione che ci sia ben altro sotto.

Resta il fatto che due particelle distinte, soggette alla casualità della MQ, si mantengono in un certo qual modo in contatto, legate tra loro, tanto che qualsiasi cosa faccia la prima, la seconda la imita. Ciò sembra la prova lampante che qualcosa più veloce della luce è in grado di agire tra loro.

Chi ha ragione? Non esiste consenso sulla risposta.

Secondo alcuni fisici e filosofi occorre rivedere l'intero dibattito, finora basato – dicono – su presupposti sbagliati.

EPR vs RS

Secondo alcuni il vero cuore della questione non è tanto che la luce imponga un limite alla velocità, quanto il secondo postulato della **RS**, i.e., che la velocità della luce sia qualcosa su cui tutti gli osservatori, indipendentemente dal loro stato di moto, concordano. Essi sottolineano che, al momento, non c'è consenso unanime sul fatto che realmente disponiamo di una descrizione pienamente convincente del processo di misura che sia invariante per trasformazioni di Lorentz.

Secondo questa linea di pensiero, nel momento in cui si riuscisse a elaborare questa descrizione, sparirebbe qualunque conflitto con la **RS**.

Bell

Nel 1965 Bell studia le correlazioni originate da condizioni classiche predeterminate (come nel caso dei guanti e dei gemelli omozigoti) e stabilisce una disuguaglianza che è violata dalla MQ

Ancora esperimento EPR (nella versione di Bohm), ma con polaroid con asse principale inclinato rispetto alla verticale → risultato dipende dagli angoli θ_1 e θ_2 d'inclinazione degli assi dei due polaroid

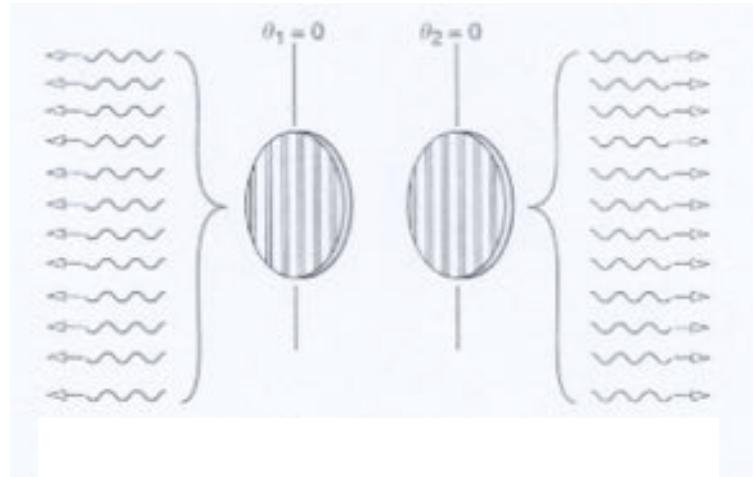
Variabile caratteristica dell'esperimento: numero di coppie di fotoni in disaccordo (un fotone passa e uno no) che studiamo il come funzione di θ_1 e θ_2

$$N(\theta_1, \theta_2)$$

Bell

✓ $\theta_1 = \theta_2 = 0$

→ $N(0,0) = 0$



- ✓ ruotiamo uno o entrambi i polaroid → ipotesi:
- eventi in un polaroid non influenzano eventi nell'altro;
 - esistenza correlazione classica: fotoni emessi dalla sorgente con polarizzazioni // (ipotesi delle VN di Einstein);
 - il fotone segue la MQ, i.e., passa o viene assorbito da un generico polaroid con una certa probabilità.

Bell

12 coppie di fotoni con polarizzazione VV ; $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 30$

- numero di fotoni che passano polaroid 2 (P_2):

$$(\cos 30)^2 \times 12 = \frac{3}{4} \times 12 = 9$$

- tutti i fotoni che giungono su polaroid 1 (P_1) lo passano

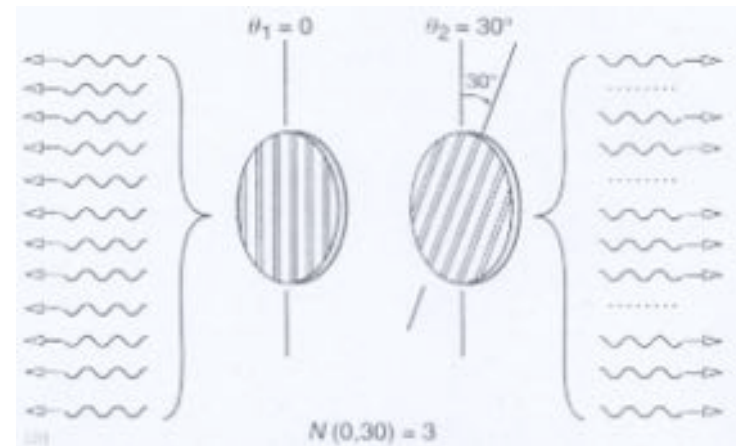
→ numero dei disaccordi = 3

i.e.

$$N(0, 30) = (\sin 30)^2 \times 12$$

NB – situazione identica se $\theta_1 = -30$ e $\theta_2 = 0$

→ $N(-30, 0) = 3$



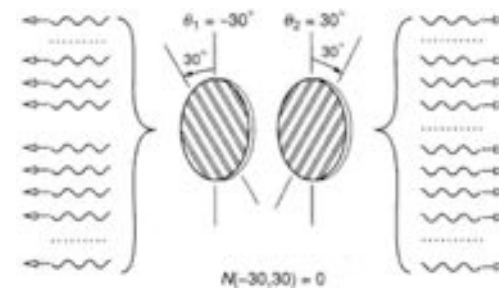
Bell

P_1 e P_2 ruotati: $\theta_1 = -30^\circ$ e $\theta_2 = 30^\circ \rightarrow$ P_2 ferma ancora 3 fotoni e lo stesso fa P_1 ; assorbimento statistico \rightarrow fotoni possono appartenere alla stessa coppia oppure a coppie diverse

- ✓ fotoni appartengono alla stessa coppia

\rightarrow

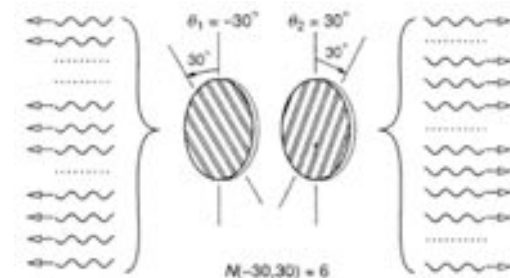
$$N = 0$$



- ✓ fotoni appartengono a coppia diversa

\rightarrow

$$N = 6$$



Bell

Esistenza di situazioni intermedie: alcuni fotoni assorbiti appartengono alla stessa coppia, altri no → **numero disaccordi** compreso tra gli estremi 0 e 6, i.e., risulta:

$$N(-30, 30) \leq N(-30, 0) + N(0, 30)$$

disuguaglianza di Bell

Domanda: Qual è la predizione della **MQ**?

Nel caso considerato, la **MQ** non predetermina la direzione di polarizzazione, per cui ciò che conta è l'angolo di un polaroid rispetto all'altro, i.e., $\theta = 60$ e, quindi:

$$N(-30, 30) = (\sin 60)^2 \times 12 = \frac{3}{4} \times 12 = 9$$

Bell

Con argomenti analoghi, abbiamo:

$$N(-30, 0) = N(0, 30) = (\sin 30)^2 \times 12 = \frac{1}{4} \times 12 = 3$$

i.e. $N(-30, 0) + N(0, 30) = 6$

→ $N(-30, 0) + N(0, 30) < N(-30, 30)$

MQ viola disuguaglianza di Bell

Osservazioni sperimentali - eseguite tra la fine degli anni '70 e l'inizio degli anni '80 dal gruppo di Aspect - in accordo con la MQ → conferma della violazione della disuguaglianza di Bell

Bell

Anche se questi esperimenti non riproducevano perfettamente tutte le condizioni dell'esperimento EPR – i polaroid hanno efficienza di rivelazione < 1 –, tutti concordano nel ritenere che la MQ abbia superato la prova dei fatti

nessuna teoria a “variabili nascoste” (senza esplicita o implicita “azione a distanza”) può riprodurre i risultati sperimentali

Einstein avrebbe certamente preferito una teoria a variabili nascoste per il mondo microscopico, ma si sarebbe certamente rifiutato di accettare l'esistenza di una “spettrale” azione a distanza

... la realtà è ben strana cosa

Conclusioni

Gli esperimenti di Aspect dimostrano che un'azione svolta in un certo luogo può, in certe condizioni, essere correlata a un evento che si svolge a distanza senza che ci sia contatto tra questi due luoghi. Sebbene sconcertante (Einstein lo definì sovrannaturale), il fenomeno è coerente con le leggi della MQ e, infatti, fu previsto teoricamente ben prima dell'avvento delle tecnologie necessarie per verificarlo sperimentalmente.

Teoria ed esperimento corroborano la conclusione che **l'universo ammette l'esistenza di interconnessioni non-locali**: qualcosa che accade qui può essere correlato con qualcosa che accade laggiù, anche se non c'è nulla che si sposti da qui a lì, anche se non c'è abbastanza tempo perché la luce si propaghi tra i due punti.

Conclusioni

→ **spazio non può più essere concepito come in passato:** qualunque sia la distanza interposta, essa non garantisce che i due corpi siano distinti, dato che per la MQ tra i due potrebbe esserci una sorta di legame. Secondo la MQ, la connessione può permanere anche se le due particelle si trovano agli estremi opposti dell'universo. Dal punto di vista della loro correlazione è come se fossero l'una accanto all'altra: **lo spazio tra loro non conta.**

Queste correlazioni sono di natura diversa da quelle classiche: le correlazioni quantistiche si riferiscono a “guanti quantistici”, i.e., guanti che scelgono casualmente se essere destro o sinistro e, nonostante ciò, lavorano in coppia: se uno sceglie di essere destro, l'altro è immancabilmente sinistro.

Bibliografia

molti mondi
approccio storico

1. A. Zeilinger, *Il velo di Einstein* (Einaudi, 2005)
2. R. Newton, *La Fisica dei Quanti sfida la Realtà* (Dedalo 2009)
3. M. Kumar, *Quantum* (Mondadori - 2011)
4. G. Ghirardi, *Un'occhiata alle carte di Dio* (Saggiatore, 1997)
5. D. Deutsch, *La trama della realtà* (Einaudi, 1997)
6. A. Aczel, *Entanglement* (Cortina Raffaello, 2004)
7. C. Bruce, *I conigli di Schrödinger* (Cortina Raffaello, 2006)

... e, dulcis in fundo

L. Susskind – *Meccanica Quantistica* (Cortina Raffaello, 2015)