

PREMIO NOBEL PER LA FISICA 2022

assegnato a

Alain Aspect, John Clauser, Anton Zeilinger

"per i loro esperimenti sui fotoni con entanglement"

di Massimo Gurioli *

L'Accademia reale svedese delle Scienze ha assegnato il premio Nobel per la fisica a tre scienziati, il fisico francese Alain Aspect, lo statunitense John Francis Clauser, l'austriaco Anton Zeilinger per i loro studi sperimentali sui fotoni entangled che hanno importanti ricadute applicative nell'ambito della scienza dell'informazione quantistica. L'autore descrive gli esperimenti premiati e al tempo stesso introduce il lettore alle ricadute teoriche sul problema, ancora irrisolto, «della natura e del significato della misura quantistica».



* Professore Ordinario di
Fisica della materia all'U-
niversità di Firenze



Il premio Nobel per la Fisica 2022 è stato attribuito a Alain Aspect (1947-...), John Francis Clauser (1942-...) e Anton Zeilinger (1945-...) per «i loro esperimenti sui fotoni con entanglement, stabilendo la violazione delle disuguaglianze di Bell e aprendo la strada alla scienza dell'informazione quantistica» [1]. Il fenomeno dell'*entanglement* (in francese è *intrication*, in spagnolo è *entrelazamiento*, in italiano si potrebbe tradurre con intreccio o groviglio ma si è preferito mantenere il termine inglese) descrive uno stato quantistico in cui le proprietà

di particelle distinte sono correlate in modo da non poter essere descritte separatamente, neanche quando queste si trovassero a grandi distanze fra loro. Tale fenomeno è assente in fisica classica ed è fortemente controintuitivo, al punto che nel 1935 Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen, proposero un esperimento ideale per cercare di dimostrare che l'esistenza di entanglement portasse a una azione a distanza incompatibile con il concetto di località e i principi della relatività ristretta, il cosiddetto paradosso EPR (dalle iniziali dei cognomi dei tre proponenti) [2]. Il paradosso EPR, pensato per mettere in crisi la meccanica quantistica (MQ), si è infine trasformato in una importante conferma della sua validità e completezza, proprio tramite una serie di esperimenti su coppie di fotoni con entanglement. Infatti, i tre scienziati premiati hanno dimostrato che la correlazione a distanza insita nello stato quantistico di entanglement è corretta e incompatibile con le teorie classiche, riconducendo il paradosso EPR a una errata analisi del trasporto dell'informazione. Allo stesso tempo questo risultato



Alain Aspect, John Clauser, Anton Zeilinger.
(Foto: The Royal Society, P. Lyons, J. Godany)

generale e con forti rilevanze epistemologiche ha dirette conseguenze per l'implementazione di applicazioni innovative nel campo delle tecnologie quantistiche.

Prima di affrontare il tema specifico del premio Nobel è utile rivedere le basi della meccanica quantistica al fine di approfondire i punti di misura quantistica e non località che sono centrali nella comprensione dell'entanglement.

Basi MQ

La formulazione più nota della MQ è il risultato del lavoro di Erwin Schrödinger (1887-1961) [3] che utilizzò i concetti e le approssimazioni che legano l'ottica ondulatoria all'ottica geometrica. Nel limite di lunghezze d'onda piccole rispetto alle scale spaziali in gioco, si può descrivere la propagazione di un'onda elettromagnetica con l'ottica geometrica in cui i raggi di luce si propagano seguendo percorsi che minimizzano il cammino ottico, descrizione che ricorda le traiettorie del moto delle particelle. Guidato da questa analogia, Schrödinger suppose che le leggi della meccanica classica fossero una approssimazione, valida per grandi scale spaziali, delle più generali leggi seguite dalle particelle su scala atomica. Ne seguì una formulazione ondulatoria che spiega il comportamento degli elettroni alle scale atomiche (ovvero del nm), la ben nota Equazione di Schrödinger:

$$i\hbar \frac{d\psi(\mathbf{r}, t)}{dt} = \hat{H}\psi(\mathbf{r}, t)$$

Qui $\hbar$ è la costante ridotta di Planck, $\hat{H}$ è la Hamiltoniana del sistema, t è il tempo e $\psi(\mathbf{r}, t)$ è la funzione d'onda che descrive la particella. Segue che gli elettroni, gli atomi della materia e anche i fotoni (ovvero i corpuscoli della luce) sono contemporaneamente descrivibili in termini di onde e di particelle.

L'interpretazione fisica di $\psi(\mathbf{r}, t)$, di tipo probabilistico e molto controintuitivo, è forzata da incontrovertibili dati sperimentali come la citata dualità onda - corpuscolo e la natura quantistica dei trasferimenti energetici fra radiazione e materia. Nella storica interpretazione di Copenaghen si postulò che il suo modulo quadro $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2$ fornisca la densità volumetrica di probabilità di trovare la particella nel punto di coordinata $\mathbf{r}$ dello spazio al tempo t .

Sempre in stretta analogia con l'ottica, lo stato di un sistema può essere una sovrapposizione coerente di stati differenti. In questo quadro, si definisce poi autostato di un'osservabile (ovvero di una grandezza fisica, come l'energia) lo stato nel quale il risultato di una misura della medesima grandezza è definito in maniera univoca. Per esempio, si può immaginare che un elettrone sia in una sovrapposizione coerente di N diversi autostati ($\psi_i(\mathbf{r}, t); i = 1 \dots N$) dell'osservabile $\hat{A}$ (per fissare le idee si può pensare sia l'energia dell'elettrone $\hat{A} = \hat{H}$). Questo si formalizza nella equazione:

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \sum_{i=1}^N c_i \psi_i(\mathbf{r}, t)$$

Dove $\psi_i(\mathbf{r}, t)$ è la funzione d'onda che descrive l'autostato con valore di $\hat{A}$ pari ad A_i e c_i è un numero complesso ($i = 1 \dots N$). La MQ postula che il risultato di una misura sullo stato $\psi(\mathbf{r}, t)$ dell'osservabile $\hat{A}$ sia uno e uno solo dei valori A_i corrispondenti a un autostato della sovrapposizione. Non potrà per esempio essere il valore medio fra questi. Allo stesso tempo, la specifica sovrapposizione coerente di stati in esame definisce in maniera univoca la probabilità $|c_i|^2$ che la misura fornisca il particolare valore A_i . Questo significa che, avendo a disposizione molti sistemi identici ed effettuando la misura di $\hat{A}$ su tutti i sistemi contemporaneamente, l'istogramma delle frequenze dei valori ottenibili A_i coincide con quello delle grandezze $|c_i|^2$ ($i = 1 \dots N$). Altro aspetto determinante e controintuitivo è che, quando venga effettuata una misura dell'osservabile $\hat{A}$ e si ottenga il valore A_i , l'evoluzione ondulatoria e deterministica del sistema (descritta dall'equazione di Schrödinger) viene interrotta e si determina il cosiddetto collasso della funzione d'onda dallo stato $\psi(\mathbf{r}, t)$ allo stato $\psi_i(\mathbf{r}, t)$. Il termine *collasso* sta a indicare un processo stocastico per il quale lo stato quantico del sistema si modifica irreversibilmente.

Misura quantistica e non località

Facciamo un esempio usando la polarizzazione della luce, che è anche introduttivo agli esperimenti premiati dal Nobel. Un generico stato di polarizzazione $|P\rangle$ della luce si può scomporre, sia per la fisica classica sia per la MQ, sulla base di stati di polarizzazione verticale e orizzontale $|V\rangle$ e $|H\rangle$, in formule:

$$|P\rangle = c_H|H\rangle + c_V|V\rangle$$

Sottolineiamo che l'espressione $|P\rangle$, mutuata dal simbolo ket del formalismo quantistico, qui vuole descrivere lo stato di polarizzazione sia in fisica classica sia in quella quantistica. Con riferimento alla Figura 1, consideriamo il passaggio di un fascio di luce di frequenza angolare ω e di intensità $I = I_H + I_V$ attraverso un polarizzatore che, senza alcuna perdita, trasmetta la polarizzazione $|H\rangle$ verso l'osservatore Alice e rifletta la polarizzazione $|V\rangle$ verso l'osservatore Bob. La teoria classica prevede che l'intensità luminosa I_A misurata dal rivelatore di Alice sarà data dalla relazione

$$I_A = I_H = I - I_V = I - I_B.$$

dove I_B è l'intensità luminosa misurata da Bob.

La visione quantistica dello stesso esperimento è che ogni fotone del fascio ha energia $\hbar\omega$ e si trova in una sovrapposizione coerente di autostati $|H\rangle$ e $|V\rangle$. Al passaggio attraverso il polarizzatore lo stato quantistico $|H\rangle$ continua a propagarsi verso Alice, mentre lo stato $|V\rangle$ modifica la sua direzione e si propaga nella direzione di Bob. In altri termini i due stati quantistici $|H\rangle$ e $|V\rangle$ in uscita del polarizzatore hanno come corrispettivo classico il fascio trasmesso e quello riflesso e, come questi, con il passare del tempo, si separano di distanze macroscopiche grandi a piacere. Si deve pertanto accettare che il singolo fotone si suddivida in due porzioni che si possono separare indefinitamente.

La suddivisione di luce da parte di un polarizzatore, che è un effetto quasi banale per un'onda classica, diviene controintuitivo per la particella fotone, definendo una non località intrinseca nel concetto di funzione d'onda. La separazione della funzione d'onda in due parti correlate e spazialmente separate è uno degli elementi del paradosso EPR.

Un altro elemento alla base del paradosso EPR consta nella misura quantistica: il rivelatore di Alice misurerà o un segnale nullo o tutta l'energia del fotone, con probabilità data rispettivamente da $|c_V|^2$ e $|c_H|^2$ (vale $|c_V|^2 + |c_H|^2 = 1$). Naturalmente la misura ripetuta su molti fotoni coincide con il risultato classico, ma se ragioniamo su un singolo fotone che attraversa il polarizzatore, la controintuitività della misura quantistica si palesa. Il collasso dello stato a seguito di una misura quantistica ci dice che, prima che il rivelatore di Alice misuri un fotone, esiste una probabilità $|c_V|^2$ che lo **stesso fotone** sia misurato da Bob. Viceversa, immediatamente dopo (cioè in tempi Δt molto piccoli) la misura di Alice, la probabilità che Bob riveli il fotone è identicamente zero. Questo resta vero anche se il fascio riflesso e il fascio trasmesso sono separati da una distanza Δx molto grande. Quindi il collasso dello stato sembra che possa implicare una azione a distanza che si manifesta con velocità $\Delta x/\Delta t$ grande a piacere e quindi anche maggiori della velocità della luce c . Torneremo su questi punti nella discussione finale.

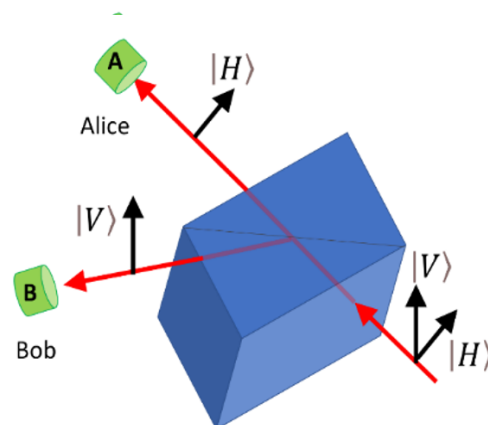


Figura 1. Schema di misura di un fotone nei due canali di polarizzazione con un polarizzatore che separa in fasci con diverse direzioni le proiezioni sulla base $|H\rangle$ e $|V\rangle$

Entanglement e paradosso EPR

Il paradosso EPR fu formulato nel 1935 per tentare di dimostrare che la MQ non fosse una teoria completa e si dovesse considerare di integrarla con alcune variabili (nascoste) per ripristinare i principi di causalità e di località [2]. Consideriamo una versione semplificata rispetto alla versione originale, che riprendiamo dal contributo di Alain Aspect alla conferenza tenuta in memoria di John Bell nel dicembre del 2000 a Vienna [5]. Seguendo questa trattazione e facendo riferimento alla Figura 2, si supponga di avere una sorgente che emette coppie di fotoni A e B propaganti in verso opposto, rispettivamente in direzione di due osservatori Alice e Bob [5]. Secondo la meccanica quantistica, possiamo sistemare la sorgente in modo che ciascuna coppia di fotoni emessi occupi uno stato quantistico con entanglement. Un esempio è il decadimento a cascata dell'atomo di calcio usato da Aspect [4,5], in cui lo stato di polarizzazione della coppia di fotoni è:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[|H\rangle_A|H\rangle_B + |V\rangle_A|V\rangle_B]$$

Sottolineiamo che il simbolo $|X\rangle_A|X\rangle_B$, descrive uno stato di due fotoni A e B aventi entrambi polarizzazione $|X\rangle$ (con $X = H, V$). Lo stato $|\psi\rangle$ è uno stato con entanglement massimale e definisce che i due fotoni hanno polarizzazioni correlate fra di loro. È importante capire che i fotoni non hanno uno stato di polarizzazione definito in modo autonomo: se il fotone A si manifesta con polarizzazione $|V\rangle$, necessariamente anche il fotone B avrà polarizzazione $|V\rangle$, ma il ragionamento vale in modo analogo per lo stato $|H\rangle$. Propagandosi in verso opposto, i due fotoni A e B possono separarsi di una distanza Δx , ma ciascun fotone è in uno stato correlato a quello dell'altro fotone. Questa correlazione quantistica si può estendere su distanze spaziali Δx grandi a piacere: sono stati fatti esperimenti a oltre 140 km di distanza [6]. Notiamo che nulla cambia se al posto della polarizzazione, la quantità con entanglement fosse l'energia o un'altra osservabile fisica; analogamente nulla cambia se al posto di fotoni si considerassero particelle con massa, per esempio elettroni con entanglement di spin.

Tornando all'esperimento di Aspect, sui fotoni con entanglement di polarizzazione (si veda la Figura 2), Alice e Bob mettono davanti ai loro rivelatori un filtro polarizzatore. Supponendo che la scelta sia tale da trasmettere $|H\rangle$ e riflettere $|V\rangle$, l'esperimento associa il risultato +1 o -1 se il fotone è misurato nel canale di polarizzazione $|H\rangle$ o $|V\rangle$. Ovviamente, entrambi gli osservatori hanno il 50% di probabilità di avere risultato +1 o -1, ma dopo un intervallo di tempo Δt piccolo a piacere rispetto a una misura in cui Alice avesse trovato +1 o -1 la misura di Bob darà al 100% lo stesso valore. Ovvero lo stato del fotone B collassa istantaneamente in un autostato dopo la misura di Alice.

L'argomentazione completa del paradosso EPR è ovviamente complessa, visto lo spessore dei proponenti. Ma semplificando, il punto fu che sulla base del principio che un processo fisico non può avere un effetto immediato sugli elementi fisici di realtà di un altro evento situato in un diverso punto dello spazio, l'entanglement quantistico veniva considerato non accettabile. Ovvero, stante che le informazioni non si possono trasmettere a una velocità $\Delta x/\Delta t$ maggiore di quella della luce, la MQ (che prevede gli stati con entanglement e quindi *apparente* azione a distanza superluminale) doveva essere inconsistente o incompleta.

Variabili nascoste

L'ipotesi che venne fatta per spiegare gli esperimenti di entanglement fu che esistano delle variabili nascoste [7], insite nel processo di emissione che definiscano in modo deterministico e senza entanglement lo stato della coppia di fotoni. Per comprendere la *ratio* delle variabili nascoste si può usare l'analogia con il lancio della moneta: tutto il problema è perfettamente classico e deterministico, tuttavia, ignorando lo stato *esatto* della moneta al momento del lancio non possiamo predire se sarà testa o croce.

Nella teoria delle variabili nascoste, si suppone che la MQ sia una teoria incompleta in cui il controintuitivo aspetto probabilistico nascerebbe, come nella meccanica statistica, da una non conoscenza di tutte le grandezze necessarie a dare una descrizione deterministica.

Su questa linea, possiamo ricondurre la spiegazione classica dell'esperimento di entanglement in presenza di variabili nascoste a un gioco di carte. Immaginiamo di avere due mazzi di N carte identiche, il primo con tutti 7 di cuori e il secondo con tutti 7 di quadri. Si estrae una carta da ciascuno dei due mazzi, in ordine casuale e automatizzato, e si invia a Alice la prima carta estratta e a Bob la seconda. Nessuno conosce il seme del 7 spedito a Alice, ma è certo che Bob riceverà un seme differente. Quindi, se Alice aprirà una busta e vedrà il 7 di cuori (quadri) saprà che Bob ha ricevuto il 7 di quadri (cuori). Ovviamente anche in questo caso classico, dopo aver visto la sua carta, Alice può predire con certezza la carta di Bob; ma non ci sarà alcuna azione a distanza sulla carta spedita a Bob.

Diseguaglianza di Bell

Un passo fondamentale per risolvere il paradosso EPR, lo compì John Bell nel 1964 [8] dimostrando delle relazioni di diseguaglianza che permettevano di discriminare quantitativamente fra le previsioni della meccanica quantistica e quelle della teoria delle variabili nascoste. Proponiamo una prima descrizione essenziale per far comprendere le nozioni principali. A seguire (in un box) riportiamo una parte più matematica e formale, seppur largamente semplificata, per chi fosse interessato ad approfondire e avere qualche informazione più quantitativa.

In entrambi i casi consideriamo un esperimento riportato schematicamente in Figura 2 dove i due polarizzatori sono orientati con angoli α e β , rispettivamente per Alice e Bob. Per esempio, con $\alpha = 0$ Alice seleziona la polarizzazione $|H\rangle$ e con $\alpha = \pi/2$ seleziona la polarizzazione $|V\rangle$; analogamente per l'angolo β e Bob. Come descritto prima, Alice (Bob) associa il risultato $+1$ o -1 se il fotone è misurato nel canale di polarizzazione parallelo o perpendicolare a α (β).

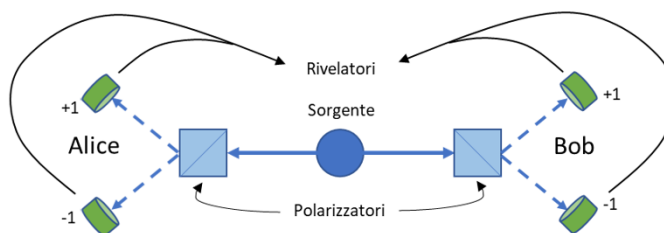


Figura 2. Schema per la misura di correlazione fra Alice e Bob di una coppia di fotoni con entanglement di polarizzazione. Liberamente riprodotto sulla base dello schema di Ref. [5].

Descrizione essenziale

La teoria delle variabili nascoste cerca di spiegare l'esperimento di Aspect su coppie di fotoni con entanglement pensando che, nel 50% di volte lo stato $|\psi\rangle$ emesso dall'atomo di Ca sia $|H\rangle_A |H\rangle_B$ e nel restante 50% sia $|V\rangle_A |V\rangle_B$, questo in dipendenza da alcune variabili non conosciute. In questo modo lo stato del fotone B, pur essendo correlato a quello del fotone A, è sempre autonomamente definito, come nell'esempio del gioco di carte, a differenza di quanto succede nel caso di stato con entanglement.

Facciamo due esempi. Se $\alpha = \beta = 0$ le possibili coppie di misure per Alice e Bob saranno solo due, con probabilità 50%: $(-1, -1)$ per lo stato $|V\rangle_A|V\rangle_B$ e $(+1, +1)$ per lo stato $|H\rangle_A|H\rangle_B$. Se $\alpha = \beta = 45^\circ$, sia Alice che Bob hanno, sia per lo stato $|H\rangle_A|H\rangle_B$ sia per quello $|V\rangle_A|V\rangle_B$, il 50% di probabilità di avere $+1$ o -1 . Quindi la probabilità che Alice e Bob ottengano una delle 4 possibili coppie di valori, ovvero $(+1, +1)$, $(+1, -1)$, $(-1, +1)$, $(-1, -1)$, è del 25%.

È ovvio che per mezzo della teoria combinatoria classica si possa calcolare le varie probabilità delle misure congiunte di Alice e Bob per ogni valore di α e β . In effetti, un primo punto del contributo di Bell fu proprio quello di calcolare per ogni valore di α e β , le varie probabilità congiunte. Come discusso in più dettaglio nella sezione successiva, partendo da queste, si può definire una funzione $S_{MC}(\theta)$ (con $\theta = \alpha - \beta$) tale che valga la *disuguaglianza di Bell*

$$|S_{MC}(\theta)| \leq 2$$

per ogni angolo θ e per ogni possibile teoria classica con variabili nascoste; qui il suffisso MC in S_{MC} vuole indicare che è la predizione della meccanica classica. Più correttamente questa è una delle possibili disuguaglianze di Bell, ciascuna delle quali stabilisce dei limiti numerici per varie correlazioni di probabilità congiunta basate su teorie con variabili nascoste.

Il secondo punto centrale del lavoro di Bell fu di dimostrare che, in alcune configurazioni sperimentali, le probabilità congiunte predette dall'entanglement quantistico eccedevano i limiti classici, ovvero violavano le disuguaglianze di Bell. Per esempio, se $\theta = \alpha - \beta = 22,5^\circ$ il valore quantistico risulta $S_{MQ}(\theta) = 2\sqrt{2}$ valore che supera di oltre il 40% il limite classico; qui il suffisso MQ in S_{MQ} vuole indicare che è la predizione della meccanica quantistica. Le disuguaglianze di Bell hanno segnato la strada per stabilire in modo incontrovertibile se la meccanica quantistica fosse incompleta o se, viceversa, l'entanglement quantistico fosse un fenomeno fisico reale.

I primi tentativi sperimentali per verificare le predizioni della MQ furono svolti nel 1972 dal gruppo di Clauser [9], ottenendo che il limite classico era in effetti superato. Furono però sollevate critiche su alcune scelte sperimentali e un decennio dopo il gruppo di Aspect effettuò degli esperimenti più accurati che nuovamente indicarono che la disuguaglianza di Bell era violata [4]. Tuttavia, alcuni punti delicati e complicati (i cosiddetti *loopholes*) per una dimostrazione inconfutabile furono superati solo una decina di anni fa con i lavori del gruppo di Zeilinger [10]. Di qui la scelta del comitato dei Nobel di premiare Clauser, Aspect e Zeilinger.

Descrizione articolata che può essere saltata senza perdere alcun passaggio logico

Qui seguiamo il ragionamento di Ref. [5] e, sempre in relazione alla descrizione precedente, consideriamo una serie di misure con un esperimento riportato schematicamente in Figura 2 dove i due polarizzatori sono orientati con angoli α e β , rispettivamente per Alice e Bob. Definiamo poi le 4 funzioni dell'angolo $\theta = \alpha - \beta$

$$P_{+,+}(\theta), P_{+,-}(\theta), P_{-,+}(\theta), P_{-,-}(\theta).$$

$P_{i,j}(\theta)$ è la probabilità congiunta che Alice misuri $+1$ ($i = +$) o -1 ($i = -$) in coincidenza con Bob che misuri $+1$ ($j = +$) o -1 ($j = -$) di Bob. Il passaggio successivo è costruire delle osservabili che forniscono valori distinti nell'ipotesi che valgano le predizioni classiche con variabile nascoste e nell'ipotesi che valgano le predizioni della MQ; per esempio la seguente funzione di correlazione [5]

$$E(\theta) = P_{+,+}(\theta) + P_{-,-}(\theta) - P_{-,+}(\theta) - P_{+,-}(\theta).$$

A partire da questa, si possono definire diverse forme di disuguaglianza di Bell. Una delle più note è una generalizzazione fatta dal gruppo di Clauser e riguarda la combinazione di 4 correlazioni $E(\theta)$ fra una coppia di angoli del polarizzatore usato da Alice (α_1, α_2) e analoga coppia usata da Bob (β_1, β_2) [5]

$$S(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) = E(\alpha_1 - \beta_1) - E(\alpha_1 - \beta_2) + E(\alpha_2 - \beta_1) + E(\alpha_2 - \beta_2).$$

In queste relazioni le varie probabilità congiunte possono essere calcolate sia in meccanica classica sia in meccanica quantistica. È stato dimostrato che per qualunque teoria classica deve valere la seguente disequazione.

$$-2 \leq S_{MC}(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) \leq 2$$

Qui il suffisso MC in S_{MC} vuole indicare che è la predizione classica. Al contrario in MQ è possibile eccedere tali valori in modo sufficientemente grande da poter essere misurato. Nel caso in cui

$(\alpha_1 - \beta_1) = (\beta_1 - \alpha_2) = (\alpha_2 - \beta_2) = \theta$ e naturalmente con $(\alpha_1 - \beta_2) = 3\theta$, riportiamo in Figura 3 la funzione $S_{MQ}(\theta)$ per il caso di entanglement quantistico [5]; qui il suffisso MQ in S_{MQ} vuole indicare che è la predizione

quantistica. Si vede che esistono molte configurazioni in cui il valore quantistico supera il limite classico e per $\theta = \pm 22,5^\circ$ e $\theta = \pm 67,5^\circ$ vale $|S_{MC}(\theta)| = 2\sqrt{2}$, valore che supera di oltre il 40% il limite classico, come precedentemente riportato.

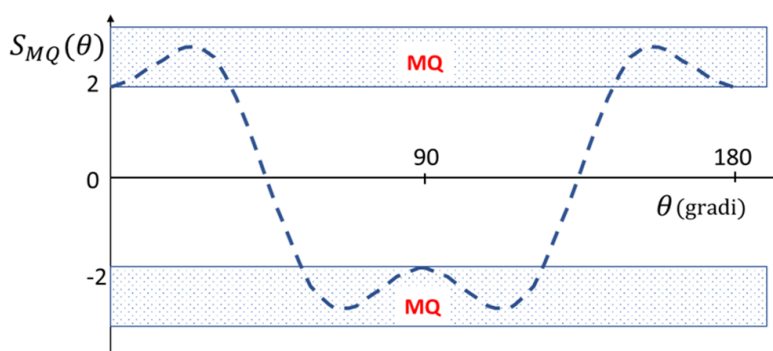


Figura 3. Andamento della funzione $S_{MQ}(\theta)$, le regioni $|S_{MQ}(\theta)| > 2$ sono accessibili solo dalle previsioni della MQ. Liberamente riprodotta sulla base dei dati riportati in Ref. [5].

Soluzione del paradosso e conclusioni

I risultati di Clauser, Aspect e Zeilinger dimostrano che l'entanglement quantistico è una realtà fisica. Tuttavia, resta da spiegare come si supera il paradosso EPR dell'azione a distanza che avviene a velocità superluminali.

Successivamente alla misura di Alice, Bob non conosce il risultato di questa e non ha alcuna informazione aggiuntiva sullo stato che andrà a misurare. In altri termini, per Bob non cambia nulla se il suo fotone è ancora in uno stato con entanglement (come prima della misura di Alice) o se è collassato in un autostato di polarizzazione (come dopo la misura di Alice). Quindi non vi è alcuno scambio di informazione a velocità superluminale nel collasso in un autostato del fotone di Bob. Ciò ovviamente escludendo che a Bob sia stato inviato, attraverso un qualche canale informativo, il risultato della misura di Alice, ma in accordo con i principi della relatività speciale, questo deve avvenire a velocità minore o uguale a quella della luce e la cosa non porta ad alcun paradosso. Il tutto rientra nel più generale teorema di non-comunicazione, che implica che gli osservatori Alice e Bob non possono utilizzare gli effetti dell'entanglement quantistico per comunicare fra di loro alcuna informazione [11].

Tuttavia, il collasso istantaneo dello stato del fotone nel sito di Bob, a causa di una misura nel sito di Alice, resta un effetto non locale ostico da comprendere e merita qualche commento finale. Il primo aspetto è che questo è in linea con il primo esempio che abbiamo fatto nella misura di polarizzazione di un singolo fotone. Quindi la non località non è una prerogativa degli stati con entanglement: essa è intrinseca alla complessità del dualismo onda - corpuscolo e all'intricato meccanismo di misura quantistica. Un'onda è un fenomeno spazialmente esteso mentre una particella presuppone una forte localizzazione spaziale, la loro coesistenza nella descrizione duale della MQ introduce una non località che si esplicita e si palesa al momento della misura.

La misura quantistica è il secondo aspetto che rende ostico accettare la MQ. Nella sua evoluzione temporale, descritta in modo deterministico dalle leggi della MQ, il fotone è una *onda*, viceversa nel processo di rivelazione è una *particella* che trasferisce energia a un rivelatore che può avere dimensioni inferiori a 1 nm (si pensi all'assorbimento da parte di un atomo). Possiamo quindi affermare che la misura determina un processo di collasso irreversibile dallo stato di un'onda estesa spazialmente allo stato di una particella di dimensioni nanometriche. Questo processo, seppur non locale e controintuitivo, è sperimentalmente ben verificato in un enorme moltitudine di fenomeni. Tuttavia, esso manca, a tutt'oggi e nonostante importanti e recenti progressi nella sua comprensione, di una teoria esaustiva (ovvero inclusiva della descrizione quantitativa del collasso) che sia condivisa e accettata dalla comunità scientifica.

L'aspetto irreversibile e probabilistico del processo di misura è stato e resta il punto più controintuitivo e indigesto della MQ rispetto alla nostra *normale* rappresentazione del mondo naturale. Al contrario della meccanica classica dove è possibile concepire la conoscenza di ogni dettaglio di un sistema, le leggi quantistiche stabiliscono che il processo di misura è un complicato (e non ancora ben compreso) meccanismo che riguarda l'osservatore e gli apparati sperimentali considerati assieme. Dimostrato inconsistente il paradosso EPR, resta comunque acceso uno dei più profondi e complessi dibattiti della storia della scienza, quello sulla natura e sul significato della misura quantistica.

Massimo Gurioli (Professore Ordinario di Fisica della materia all'Università di Firenze)

Indicazioni bibliografiche

- [1] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/press-release/>
- [2] Einstein, A.; Podolsky, B.; Rosen, N. (1935). *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?* Physical Review 47, 777.
- [3] Schrodinger, E. (1926). *Quantisierung als Eigenwertproblem*. Annalen der Physik 384, 273.
- [4] Aspect, A.; Grangier, Ph.; Roger, G. (1982). *Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities*. Physical Review Letters 49, 91.
- [5] Aspect, A.; *Quantum [Un]speakables. From Bell to Quantum information*, edited by R. A. Bertlmann and A. Zeilinger, Springer (2002) <https://arxiv.org/ftp/quant-ph/papers/0402/0402001.pdf>
- [6] Herbst, T.; Scheidl, T.; Fink, M.; Handsteiner, J.; Wittmann, B.; Ursin, R.; Zeilinger, A. (2015) *Teleportation of entanglement over 143 km*. PNAS 112, 14202.
- [7] Bohm, D.; (1957). *Causality and Chance in Modern Physics*. Routledge & Kegan Paul and D. Van Nostrand. p. 110.
- [8] Bell, John S. (1964). *On the Einstein Podolsky Rosen paradox*. Physics Physique (Физика) 1, 195.
- [9] Freedman, Stuart J.; Clauser, John F. (1972). *Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories*. Physical Review Letters 28, 938.
- [10] Giustina, M.; Mech, A.; Ramelow, S.; Wittmann, B.; Kofler, J.; Beyer, J.; Lita, A.; Calkins, B.; Gerrits, T.; Nam, S.W.; Ursin, R.; Zeilinger, A. (2013). *Bell violation using entangled photons without the fair-sampling assumption*. Nature 497 (7448), 230.
- [11] Peres, A.; Terno, D.; (2004). *Quantum Information and Relativity Theory*. Rev. Mod. Phys. 76: 93.