

Sull'entanglement

*Dai fondamenti della meccanica quantistica
alle applicazioni innovative*

Giuseppe De Riso*, Marco Lo Schiavo**,
Lidia Truda***, Canio Noce****

*Università degli Studi di Salerno; e_mail: g.deriso4@studenti.unisa.it

**Dipartimento di Fisica "E. R. Caianiello, Università degli Studi di
Salerno; e_mail: mloschiavo@unisa.it

***Università degli Studi di Salerno; e_mail: l.truda@studenti.unisa.it

****Dipartimento di Fisica "E. R. Caianiello, Università degli Studi di
Salerno; e_mail: cnoce@unisa.it



DOI: 10.53159 /PdM(IV).v4n4.100

Sunto: *L'entanglement è un concetto peculiare della fisica quantistica e che si sta affermando come elemento fondamentale delle innovative tecnologie quantistiche. In pratica, quando una coppia particelle diventa entangled, queste rimangono collegate anche se separate da grandi distanze e questa caratteristica viene ampiamente utilizzata nelle moderne applicazioni della meccanica quantistica. Inoltre, sono stati recentemente riportati diversi test sperimentali che suggeriscono una revisione critica del concetto di entanglement, sostenendo che questa quantità può essere annoverata a giusta ragione tra i concetti di base della meccanica quantistica.*

Parole Chiave: *Entanglement; crittografia quantistica; quantum computing.*

Abstract: *The entanglement is a peculiar concept of quantum physics, also emerging as a fundamental element of innovative quantum technologies. Specifically, when a particle pair becomes entangled, the single particles remain*

connected even when separated by large distances, and this feature is widely used in modern applications of quantum mechanics. Moreover, several experimental tests recently reported suggest a critical review of the concept of entanglement, arguing that this quantity can be listed among the basic concepts of quantum mechanics.

Keywords: *Entanglement; quantum cryptography; quantum computing.*

1 - Introduzione

L'Accademia Reale Svedese delle Scienze ha attribuito il Premio Nobel per la Fisica di quest'anno a Alain Aspect, John F. Clauser e Anton Zeilinger *"for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science"* [1].

Due dei vincitori, John Clauser e Alain Aspect, sono stati premiati per il lavoro che ha dato inizio a una nuova era, aprendo gli occhi della comunità fisica sull'importanza dell'entanglement e fornendo tecniche per la creazione, l'elaborazione e la misurazione di sistemi entangled in ambiti sempre più complessi e sbalorditivi [2]. Il lavoro sperimentale del terzo, Anton Zeilinger, si caratterizza per l'uso innovativo dell'entanglement, sia nella ricerca sugli aspetti concettuali della meccanica quantistica sia in contesti applicativi come la crittografia quantistica [3].

Nello specifico, Aspect, Clauser e Zeilinger hanno condotto esperimenti rivoluzionari utilizzando stati quantistici entangled, in cui due particelle si comportano come un'unica entità anche quando sono separate e collocate a grande distanza. I loro risultati hanno aperto la strada a una nuova tecnologia basata sull'informazione quantistica. In realtà, oggi

esiste un vasto campo di ricerca in ambito quantistico che comprende lo studio critico dei fondamenti della meccanica quantistica e, in un contesto applicativo, l'indagine su computer quantistici, reti quantistiche e comunicazioni sicure e criptate.

Un fattore chiave di questo sviluppo è il modo in cui la meccanica quantistica permette a due o più particelle di esistere in quello che viene chiamato stato entangled. In tale configurazione, ciò che accade a una delle particelle di una coppia entangled determina ciò che accade all'altra particella, anche se sono molto distanti tra loro.

Scopo della presente relazione è illustrare le attività di frontiera della meccanica quantistica, legate alle implementazioni e investigazioni dell'entanglement, visto come risorsa tecnologica. A tal fine, descriveremo cos'è l'entanglement utilizzando un semplice esempio che non richiede l'utilizzo di alcuna matematica superiore né la conoscenza di argomenti di fisica moderna particolarmente avanzati. Illustreremo, successivamente, i recenti risultati sui concetti base della meccanica quantistica nonché le applicazioni tecnologiche dell'entanglement che hanno favorito lo sviluppo di quella che viene ormai definita come la "seconda rivoluzione quantistica".

2 - L'entanglement: una semplice descrizione

Straordinario effetto, tipicamente quantistico, l'entanglement fu introdotto da Schrödinger in una recensione del famoso articolo sul paradosso EPR [4]. La traduzione

letterale di questo termine è “groviglio”, “intreccio” ed esprime in pieno l’essenza di questo fenomeno¹.

Infatti, con l’entanglement si intende un fenomeno fisico di correlazione a distanza tra sistemi, senza che ciò avvenga tramite scambio di particelle o generiche informazioni. In termini più formali si può affermare che, in determinate condizioni, due o più sistemi fisici rappresentano sottoinsiemi di un sistema più ampio il cui stato quantistico non è semplicemente descrivibile singolarmente, ma solo come un’unica entità, sovrapposizione di più stati.

Ciò implica che la misura di una generica grandezza fisica effettuata su uno dei sottosistemi determina simultaneamente e istantaneamente il valore della grandezza in esame anche per gli altri sottosistemi.

Per chiarire quanto detto può essere utile considerare il seguente esempio.

Consideriamo una grande sala da ballo in cui si esibiscono coppie di ballerini, distinguibili solo per il colore del loro abbigliamento, come riportato nella Figura 1.

Supponiamo, poi, che una coppia a caso esca dalla sala e i ballerini si dirigano in direzioni opposte, verso un posto di blocco (vedi Figura 2). Qui il controllo del ballerino a sinistra determina istantaneamente, con certezza, il sesso dell’altro ballerino della coppia. È evidente, infatti, che se al controllo si appura che il ballerino è un uomo, l’altro elemento della coppia è una donna e viceversa.

¹ Dal Cambridge Dictionary: *Entanglement, the condition of being wrapped and twisted together in a mass* (trad. la condizione di essere avvolti e attorcigliati insieme in una massa).



Fig.1- Coppie di ballerini.

Supponiamo, poi, che una coppia a caso esca dalla sala e i ballerini si dirigano in direzioni opposte, verso un posto di blocco (vedi Figura 2). Qui il controllo del ballerino a sinistra determina istantaneamente, con certezza, il sesso dell'altro ballerino della coppia. È evidente, infatti, che se al controllo si appura che il ballerino è un uomo, l'altro elemento della coppia è una donna e viceversa.

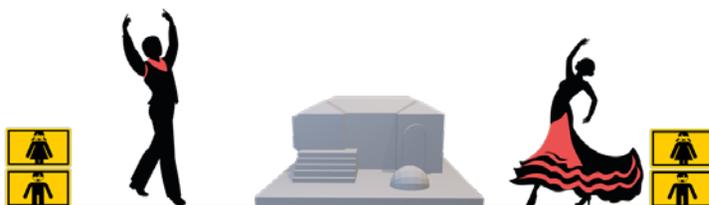


Fig. 2 - Checkpoint per “misurare” il genere della coppia.

In pratica, la proprietà di essere “coppia” fa sì che stabilire il sesso di uno dei due ballerini, inequivocabilmente, consente, senza effettuare misura, di stabilire il sesso dell’altro partner.

A questo punto, per completezza, occorre precisare che se si assume che la descrizione della meccanica quantistica sia completa, allora il risultato del controllo al posto di blocco porta alla conclusione che il genere dei due ballerini, nell’accezione di Einstein, può avere realtà simultanea. In altre parole, il genere del ballerino che non si trova al posto di controllo può essere stabilito con certezza, anche senza una misura.

Per Einstein questa conclusione è inaccettabile perché la meccanica quantistica attribuisce ai possibili risultati di una misura di una grandezza fisica una probabilità, nel caso non si effettui la misura. Nel nostro esempio concettuale, il genere del partner del ballerino “misurato” non è determinato tramite misura, ma non può che essere l’opposto di quello al posto di controllo. Quindi, siamo costretti a concludere, secondo Einstein, che la descrizione quantomeccanica della realtà fisica non è completa ed è necessario modificare, sostanzialmente, sia la base concettuale che quella matematica della meccanica quantistica.

Una possibile alternativa alla meccanica quantistica “ortodossa” esige, quindi, l’introduzione nella teoria variabili nascoste, non considerate, e che indicano quale risultato si deve ottenere in un esperimento. Negli anni ‘60, John Stewart Bell sviluppò una disuguaglianza che, in presenza di variabili nascoste, stabilisce la correlazione ed il limite superiore tra i risultati di un gran numero di misurazioni. Tuttavia, per tutti gli esperimenti realizzati fino ad oggi, la meccanica quantistica

“ortodossa” prevede una sistematica violazione della disuguaglianza di Bell, cosa sistematicamente verificata. Pertanto, la meccanica quantistica, così come oggi la conosciamo ed utilizziamo, risulta corretta.

3 - L'entanglement e il quantum computing

Per computazione quantistica o quantum computing si intende un tipo di computazione le cui operazioni riescono a sfruttare ed includere fenomeni intrinsecamente quantistici come la sovrapposizione, l'interferenza o l'entanglement. Le macchine che possono effettuare questo tipo di computazione sono i computer quantistici. Questi dispositivi risultano, spesso, essere estremamente efficaci per la risoluzione di problemi numerici la cui difficoltà computazionale aumenta esponenzialmente con il numero delle variabili in gioco e, dunque, nei casi in cui la risoluzione numerica risulti impraticabile a causa del tempo di computazione necessario per completare la simulazione. Si potrebbe dire che un computer quantistico, se opportunamente usato, può velocizzare incredibilmente la risoluzione numerica di un problema. Ad esempio, nel 2019 il quantum computer di Google completò in soli 200 secondi un calcolo così complesso che il più potente computer al mondo avrebbe risolto in circa 10.000 anni [5]!

3.1 -Come funziona la computazione quantistica e come è legato al concetto di entanglement

Per capire come quantum computer ed entanglement sono correlati dobbiamo considerare il più piccolo elemento di informazione nella computazione classica: il bit. Il bit può assumere, classicamente, due distinti valori: 1 (“acceso”), 0 (“spento”), quindi se abbiamo due bit di memoria avremo 4 possibili distinti metodi per occupare tale memoria (00,11,10,01). Per n bit di memoria avremo allora $\sqrt{2^n}$ possibilità.

Nella computazione quantistica il bit, detto qubit, ossia *quantum bit*, non è più un numero ma un vettore rappresentabile come segue:

$$|0\rangle := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad |1\rangle := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Questa fondamentale modifica alla base della computazione ha un effetto incredibile su tutto il resto. Prima di tutto, mentre nel caso classico una cella di memoria può essere occupata da un singolo e definito bit, una memoria quantistica potrà essere realizzata in infiniti modi, come sovrapposizione dei due qubit fondamentali:

$$|\psi\rangle := \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}; \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1.$$

Si ha quindi che non solo è possibile avere lo stato “acceso” e “spento” ma anche uno stato indeterminato in cui si hanno entrambe le possibilità. Inoltre, due soli qubit possono dare luogo non a 4 configurazioni come nel caso classico ma a 16 possibili configurazioni differenti. Infatti, se abbiamo un

sistema con due qubit lo spazio geometrico in cui si opererà sarà il prodotto tensoriale dei due vettori. Ciò darà luogo alle 16 possibilità di seguito riportate:

$$\overline{\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}$$

Fig. 3 - Possibili configurazioni ottenibili con due qubit.

$$\overline{\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow (1000), \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow (0100), \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow (1100);$$

Fig. 4 - Corrispondenza tra qubit e sequenza di bit

Quindi n qubit daranno luogo a $\sqrt{2^{2n}}$ configurazioni possibili. È, dunque, evidente che la potenza di computazione del computer quantistico a parità di numero di bit è sostanzialmente maggiore: un problema con 16 possibili risultati è descritto al minimo con 4 bit o con 2 qubit.

In aggiunta, dal principio di sovrapposizione, ossia la somma di due stati è ancora un possibile stato come visto sopra per Ψ , e per la natura quantistica dei qubit il computer quantistico può lavorare su queste 16 combinazioni in contemporanea, mentre l'analogo classico deve lavorare con una possibilità alla volta.

3.2 - Entanglement e computazione quantistica

Consideriamo il terzo vettore della Figura 4. È evidente che non è esprimibile come semplice prodotto tra i due qubit iniziali, ma è uguale a:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle|0\rangle + |1\rangle|1\rangle).$$

In altri termini, i due qubit sono intrinsecamente accoppiati, ovvero sono entangled! Questa circostanza è vera per molti vettori della Figura 3 e ciò significa che molta dell'informazione aggiuntiva che si ha con la formazione quantistica è dovuta proprio agli stati entangled tra qubit.

Dal punto di vista pratico in un computer quantistico cambiare lo stato di un qubit entangled cambierà immediatamente lo stato del qubit accoppiato, come illustrato precedentemente, per cui l'entanglement migliora la velocità di elaborazione dei computer quantistici. Quindi, raddoppiare i qubit non raddoppierà necessariamente il numero di processi poiché l'intervento su un qubit fornirà informazioni anche su tutti i qubit ad esso accoppiati. Inoltre, studi di teoria della computazione dimostrano che l'entanglement consente ad un algoritmo quantistico uno speed-up esponenziale rispetto all'equivalente classico [6].

È interessante notare che tramite l'entanglement è possibile correlare uno scambio di informazione tra due utenti senza che un terzo possa copiarla o osservarla; infatti, una qualsiasi azione sul dato, perturba lo stato quantistico che lo descrive rendendo palese l'intrusione.

Infine, utilizzando l'entanglement è possibile scambiare con un opportuno circuito quantistico informazioni quantistiche

veicolate da fotoni, atomi, elettroni tra due utenti. Tale proprietà utilizzata per ridurre il consumo di energia dei computer quantistici che lavorano in parallelo consente anche di "teletrasportare" informazione [7].

4 - L'entanglement e la crittografia

La crittografia studia come inviare messaggi in modo tale che il contenuto possa essere letto solo dalle persone coinvolte nello scambio. Essa si divide principalmente in due categorie: la crittografia simmetrica o a chiave segreta e la crittografia asimmetrica o a chiave pubblica [8].

La crittografia simmetrica permette lo scambio di un messaggio criptato attraverso l'uso di una chiave segreta condivisa. Nonostante questa procedura porti ad algoritmi crittografici perfettamente sicuri da attacchi resta il problema di come distribuire la chiave tra le parti coinvolte prima dell'inizio del protocollo.

La crittografia asimmetrica risolve questo problema utilizzando una chiave pubblica per la criptazione del messaggio e una chiave privata per la decriptazione, eliminando il problema della distribuzione delle chiavi. La sicurezza si basa sulla difficoltà computazionale legata ad alcuni problemi matematici quali la fattorizzazione di numeri interi. Per questo motivo la crittografia asimmetrica è passibile di attacchi da parte di computer con sufficiente potenza di calcolo.

Come precedentemente detto, gli sviluppi della meccanica quantistica hanno permesso di ideare dispositivi innovativi, quali i computer quantistici. Questi oggetti, se efficientemente

implementati, promettono di risolvere problemi intrattabili tramite macchine classiche e rappresentano una seria minaccia per i protocolli crittografici asimmetrici attualmente in utilizzo. Incidentalmente, la meccanica quantistica è in grado di fornire anche una soluzione a questo problema consentendo di attuare protocolli intrinsecamente sicuri da attacchi. In particolare, è possibile ideare schemi noti come protocolli di Distribuzione Quantistica delle Chiavi (Quantum Key Distribution o QKD) che risolvono il problema classico della distribuzione delle chiavi.

La QKD è una procedura crittografica che permette di creare una chiave segreta casuale condivisa tra due persone, Alice e Bob, che inizialmente non condividono alcuna informazione. La chiave generata può essere successivamente utilizzata per criptare un messaggio tramite un cifrario One Time Pad.

I fenomeni quantistici alla base del funzionamento della QKD sono l'entanglement, il collasso della funzione d'onda e l'impossibilità di clonare uno stato senza perturbarlo [9]. Importante proprietà della QKD è che essa consente di individuare la presenza di origliatori che cercano di acquisire informazioni sulla chiave: ciò è conseguenza dalla natura quantistica del protocollo in quanto per ottenere informazioni sulla chiave è necessario eseguire delle misure che vanno a modificare lo stato iniziale del sistema, perturbandolo irrimediabilmente.

Tra i più promettenti protocolli di QKD vi sono quelli basati sul fenomeno dell'entanglement. Artur Eckert nel 1991 propose uno schema crittografico, denominato E91, che fa uso di stati entangled per la creazione di una chiave condivisa

[10]. Il protocollo E91 è implementato tramite l'utilizzo di coppie di fotoni polarizzati, equivalenti alle coppie di ballerini della sezione 2, e l'informazione è codificata negli stati di polarizzazione di quest'ultimi. La sicurezza del protocollo si basa sulla perfetta correlazione esistente tra gli esiti delle misure effettuate su coppie di particelle entangled. Infatti, un qualunque tentativo da parte di un origliatore di ottenere informazioni sulla chiave si traduce in una misura che distrugge la correlazione tra particelle introducendo incongruenze nei risultati.

Sono necessari due differenti canali di comunicazione per eseguire il protocollo, come rappresentato in Figura 5:

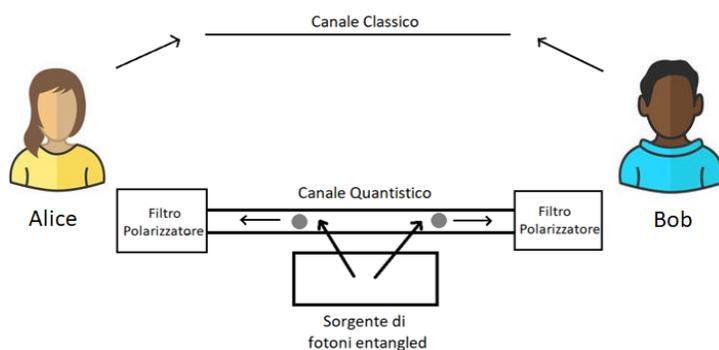
- un canale quantistico, passibile di intercettazione, per l'invio dei fotoni che trasportano l'informazione;
- un canale classico autenticato, passibile di intercettazione ma non di modifica del messaggio, per la comunicazione diretta tra Alice e Bob.

La prima fase del protocollo avviene tramite il canale quantistico attraverso i seguenti step:

- Alice e Bob scelgono tre basi tra loro non ortogonali per la descrizione dell'informazione. Le basi rappresentano le direzioni per la misura della polarizzazione² dei fotoni che trasportano l'informazione;
- Alice, Bob o una terza persona di fiducia creano uno stato entangled la cui struttura resta invariata per tutta la durata del protocollo;
- un fotone della coppia viene inviato ad Alice, l'altro a Bob.

² La polarizzazione dei fotoni equivale al genere dei ballerini.

In modo indipendente l'uno dall'altro essi effettuano una misura della polarizzazione del fotone utilizzando casualmente una delle tre basi concordate. Il primo ad effettuare la misura ottiene informazione sullo stato del fotone, che verrà poi interpretato come bit classico. Il processo di misura farà collassare il sistema entangled nello stato corrispondente.



Fi. 5 - Schema del protocollo E91.

A questo punto vi sono due possibilità:

- se la seconda persona ad effettuare la misura utilizza la stessa base usata per la prima, allora gli esiti saranno perfettamente correlati;
- se le due basi utilizzate sono differenti l'esito della seconda misura sarà casuale.

La seconda fase del protocollo avviene tramite il canale classico attraverso i seguenti step:

- Alice e Bob comunicano la sequenza di basi utilizzate per le misure, ma non i risultati ottenuti;

- quando le basi utilizzate sono uguali il risultato della misura può essere utilizzato come bit di informazione per generare una chiave, altrimenti il bit viene scartato.

Oltre alla creazione della chiave è possibile verificare praticamente la presenza di origliatori. Alice e Bob possono utilizzare il sottoinsieme delle coppie di fotoni misurate in basi differenti, e quindi scartate, per testarne la correlazione. Ciò può essere fatto utilizzando la disuguaglianza di Bell che risulta essere violata nel caso in cui le particelle sono entangled e rispettata altrimenti [11]. In quest'ultimo caso è possibile concludere che vi è stato un tentativo di intercettazione.

5 - L'entanglement e le basi concettuali della meccanica quantistica

Una descrizione concisa della meccanica quantistica può essere limitata all'introduzione dei concetti che sono alla base di questa teoria: la dualità onda-corpuscolo e il principio di complementarità di Bohr.

La dualità onda-corpuscolo, avvalorata dall'esperimento della doppia fenditura condotto dapprima su elettroni poi su altre particelle, prevede che tutte le particelle siano caratterizzate da una natura ondulatoria e corpuscolare.

L'esperimento fu realizzato sulla falsariga del ben noto esperimento di Young con la luce: una sorgente di elettroni, una barriera dotata di due fenditure e uno schermo su cui visualizzare l'immagine finale. In quanto particelle puntiformi, ci si aspettava di trovare una sorta di ombreggiatura sullo schermo in corrispondenza delle due

fenditure, una traccia lasciata dagli elettroni che oltrepassano la barriera, invece, si osservarono delle frange di interferenza, le stesse ottenute nel caso della luce.

Allo scopo di capire con l'utilizzo di rilevatori posti tra le due fenditure, quale fosse il percorso seguito da ogni singola particella, con grande sorpresa, le figure di interferenza scomparivano lasciando il posto ad una distribuzione di tracce localizzata nell'area delle due fenditure. Il motivo per cui non si apprezzano figure d'interferenza è dovuto al fatto che con questo tipo di esperimento si analizza l'aspetto corpuscolare delle particelle, per cui il comportamento ondulatorio scompare del tutto. Come conseguenza del principio di indeterminazione, non è possibile ottenere nello stesso momento l'informazione sul cammino percorso dall'elettrone e una figura di interferenza perché aspetti complementari riconducibili al dualismo onda-corpuscolo. Quanto detto è noto sotto il nome di principio di complementarità di Bohr, enunciato nel 1927 a Como durante un Congresso internazionale di fisica. Il principio, nella sostanza, afferma che il comportamento ondulatorio e corpuscolare sono due aspetti mutuamente esclusivi e complementari di ogni sistema quantistico.

Grazie a Wotters e Zurek, sul finire degli anni 70, è stato possibile dare una chiave di lettura diversa al concetto di dualità [12]. Nel loro approccio, ipotizzarono che il comportamento ondulatorio e quello corpuscolare non sono mutuamente esclusivi bensì quantità complementari in grado di descrivere a pieno le informazioni legate ad un quantone³.

³ Il quantone è una entità quantistica che mostra sia proprietà ondulatorie che proprietà corpuscolari.

Associando alla natura ondulatoria e alla natura corpuscolare due parametri quali V , ossia l'interferenza visibile, e D , il cammino percettibile, introdussero una relazione che stabilisce un limite superiore entro cui è possibile ottenere la simultaneità delle due quantità:

$$\sqrt{|V|^2 + |D|^2} \leq 1$$

In questo modo appare evidente che per un fenomeno puramente ondulatorio $\sqrt{V} = 1$ e $\sqrt{D} = 0$; viceversa per un fenomeno puramente corpuscolare. In questa descrizione, rimane plausibile la possibilità di contemplare entrambi i fenomeni contemporaneamente.

In realtà questa disuguaglianza permetterebbe il caso

$$\sqrt{V = D = 0}$$

che corrisponde al caso paradossale in cui il quantone non è né una particella né un'onda. Inoltre, il caso dell'uguaglianza ad 1, si verifica solo sotto particolari restrizioni, cioè quando si ha a che fare principalmente con stati puri (stati in cui si ha una completa informazione del sistema quantistico).

Negli stati entangled, però, la relazione non è più valida, segno evidente di omissione di una quantità, individuata nella concurrence, individuata dal parametro C e che in qualche modo misura l'entanglement. In questo modo è possibile trasformare la relazione precedente in una "trinità", relazione complementare tra la dualità e l'entanglement quantistico:

$$\sqrt{V^2 + D^2 + C^2} = 1$$

La bellezza di questa relazione risiede nel fatto che coinvolge i due concetti più controintuitivi della fisica

quantistica, appunto l'entanglement e la dualità onda-corpuscolo.

Nel gennaio 2020 sulla rivista *Physical Review Research* compare un articolo dall'accattivante titolo "*Turning off quantum duality*" [13]. In questa pubblicazione viene fornita, la prima conferma sperimentale di una "three-way quantum coherence identity", quindi una tripartita che possa descrivere sia stati puri che stati entangled. Come si evince da questa breve descrizione la relazione che coinvolgeva i parametri V e D cede il posto ad una relazione che, con l'aggiunta del terzo parametro C , correlato all'entanglement, trasforma la disuguaglianza in una identità che è in grado di descrivere a pieno anche la dualità quantistica. È interessante notare come una teoria che risale ai tempi di de Broglie, la dualità appunto, possa essere analizzata e messa in discussione quasi un secolo dopo la sua formulazione. Ai fini dell'esperimento sono stati realizzati sette stati puri di singoli fotoni lasciati interferire tra loro per generare stati entangled utilizzando un opportuno interferometro. Per ciascun stato sono stati raccolti i valori dell'interferenza visibile, del cammino percettibile e della concurrence, mettendo a confronto la vecchia relazione incentrata sulla dualità con la nuova relazione basata sulla tripartita. Per stati puri, quindi, quando l'entanglement non è coinvolto, la vecchia relazione si implementa in modo ottimale, mentre per stati entangled si ottengono valori anomali che potrebbero indicare una sorta di dualità attenuata o addirittura assente, come se fosse "spenta", come riportato nel titolo dell'articolo a cui si sta facendo riferimento. Come è stato già giustificato precedentemente, se la relazione non è verificata è perché è stato ignorato il contributo di un altro

parametro. L'intuizione è stata di individuare questa omissione nella concurrence e quindi di coinvolgere l'entanglement in una misura della dualità. Rianalizzando i dati utilizzando la nuova relazione tra V , D e C si è infatti in grado di trasformare i casi problematici di dualità attenuata-spenta in valori prossimi ad 1, confermando l'identità. Va da sé che la nuova relazione continua a funzionare anche nel caso di stati puri, per i quali si porrà $\sqrt{C} = 0$.

Quanto discusso dimostra come la meccanica quantistica sia una teoria in continua evoluzione, soggetta a modifiche e a continui approfondimenti: nulla di quanto noto è escluso da una possibile rivisitazione. Questa pubblicazione ha messo in discussione uno dei capisaldi della meccanica quantistica, un principio quasi centenario che però solo in tempi recenti è diventato oggetto di verifiche sperimentali. Se prima si considerava sufficiente descrivere la dualità quantistica tramite V e D , lo studio qui descritto dimostra che una relazione costituita solo da questi parametri risulta, invece, incompleta. La concurrence, e quindi l'entanglement, diventa il tassello mancante per una formulazione completa, estendendo il principio di de Broglie e il principio di complementarità a stati entangled.

6 - Conclusioni

Abbiamo visto che quando due particelle si trovano in stati quantistici entangled, la misura di una proprietà di una particella determina immediatamente il risultato di una

misura analoga sull'altra particella, senza bisogno di effettuare effettivamente la misura.

Questa conclusione, a prima vista, non è poi così strana. Infatti, se ci riferiamo alle coppie di ballerini invece che a delle particelle, possiamo immaginare un esperimento in cui un ballerino della coppia si muove in una direzione e l'altro partner nella direzione opposta. Un osservatore che valuta il genere di uno dei ballerini e vede che è, per esempio il maschio, può immediatamente dire che il partner che ha viaggiato nell'altra direzione è sicuramente la donna.

Ciò che rende la meccanica quantistica così speciale è che gli equivalenti dei ballerini non hanno stati determinati finché non vengono misurati. È come se entrambi i ballerini fossero indefiniti, fino a quando qualcuno non ne effettua una misura. A quel punto, stabilito il genere di uno dei due ballerini, l'altro "diventa" immediatamente del sesso opposto.

Questo bizzarro risultato è stato verificato per stati quantistici entangled tra fotoni inviati attraverso decine di chilometri di fibra ottica e tra un satellite e una stazione a terra.

Questi e altri esperimenti simili hanno gettato, poi, le basi per l'intensa ricerca nella scienza dell'informazione quantistica, del quantum computing e della crittografia. La prima rivoluzione quantistica ha consentito la progettazione e realizzazione di transistor e laser; ora stiamo entrando in una nuova era, la seconda rivoluzione quantistica, grazie ai moderni strumenti di manipolazione dei sistemi di particelle entangled.

Pertanto, considerando sia queste potenziali innovative applicazioni che la ridefinizione dei vincoli legati alla dualità,

l'entanglement, concetto non noto a Bohr, si erge, a giusto titolo, come un ulteriore *basic concept* della meccanica quantistica.

Bibliografia

[1]

<https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/advanced-physicsprize2022.pdf>

[2] J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony and R.A. Holt, Phys. Rev. Lett. **23**, 880 (1969); S. J. Freedman and J. F. Clauser, Phys. Rev. Lett. **28**, 938 (1972); A. Aspect, P. Grangier and G. Roger, Phys. Rev. Lett. **47**, 460 (1981); A. Aspect, P. Grangier and G. Roger, Phys. Rev. Lett. **49**, 91 (1982); A. Aspect, J. Dalibard and G. Roger, Phys. Rev. Lett. **49**, 1804 (1982); A. Aspect, Phys. Rev. D **14**, 1944 (1976).

[3] J.-W. Pan, D. Bouwmeester, H. Weinfurter and A. Zeilinger, Phys. Rev. Lett. **80**, 3891 (1998).

[4] E. Schrödinger, Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society **31**, 555 (1935).

[5] F. Arute, K. Arya, R. Babbush et al. Nature **574**, 505(2019).

[6] R. Jozsa and N. Linden, Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **459**, 2011 (2003).

[7] https://en.wikipedia.org/wiki/Superdense_coding

[8] Haitjema, M. (2007). <http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse571-07/ftp/quantum>.

[9] G. De Riso and M. Noce, in corso di stampa *Journal of Discrete Mathematical Sciences & Cryptography* (2022).

[10] Eckert, Artur K., *Phys. Rev. Lett.* **67**, 661 (1991).

[11] N. Ilic, *Journal of Phys.* **334**, 1 (2007).

[12] L. Truda, A. Trotta and C. Noce, *Science & Philosophy* **10**, 57 (2022).

[13] X. F. Qian, K. Konthasinghe, S. K. Manikandan, D. Spiecker, A. N. Vamivakas & J. H. Eberly, *Physical Review Research* **2**, 012016 (2020).