

Dal dibattito tra Einstein e Bohr al premio Nobel per la Fisica 2022

Idee e fatti che hanno portato alla “Seconda Rivoluzione Quantistica”

Carminè Granata

Istituto di Scienze Applicate e Sistemi Intelligenti del CNR

1. *Introduzione*

Il 4 ottobre 2022, l'accademia reale svedese delle scienze ha assegnato il premio Nobel per la Fisica ad Alain Aspect, John F. Clauser e Anton Zeilinger per i loro esperimenti su un fenomeno squisitamente quantistico conosciuto come *entanglement quantistico* e per avere posto le basi sperimentali dell'informazione e della computazione quantistica.

In questo articolo proveremo ad illustrare i concetti fondamentali di questo interessante e per certi aspetti misterioso argomento che ha avuto e avrà un grande impatto sulle attuali e sulle future tecnologie.

È opportuno premettere che il modo con cui si cerca di divulgare un argomento scientifico è di fondamentale importanza. Molte volte si tende ad essere molto tecnici allontanando quasi immediatamente l'interesse delle persone che non hanno quelle conoscenze tecniche, altre volte si va nell'estremo opposto rischiando di travisare e/o mistificare completamente i concetti. È evidente che non è facile e che dietro alla buona divulgazione sia televisiva sia su riviste c'è tantissimo lavoro e talento.

Nel caso particolare della fisica moderna (meccanica quantistica e teoria della relatività) ci sono ulteriori criticità legate all'impossibilità, con un pubblico non specialistico, di utilizzare il linguaggio matematico avanzato. A questo si aggiunge la necessità di esporre concetti completamente contro-intuitivi e fuori dal senso comune, tipici della fisica moderna, per cui in alcuni casi le metafore comunemente usate rischiano di essere fuorvianti. Lo stesso insegnamento di questi argomenti a livello universitario non ha un consolidato protocollo di insegnamento, come accade per la fisica classica. Nel caso particolare della meccanica quantistica, a volte viene preferito un approccio storico cronologico degli argomenti che però prevede un inizio particolarmente difficile (spettro di corpo nero), in altri casi si preferisce un'impostazione assiomatica molto simile

ad una pura teoria matematica. In questo articolo, dopo una introduzione in cui vengono esposti in maniera succinta e semplice le basi della meccanica quantistica con particolare attenzione allo sviluppo storico dei concetti, si discutono, nel terzo paragrafo, i fondamenti concettuali e i paradossi della meccanica quantistica che sono stati alla base delle celebri controversie tra Albert Einstein e Neil Bohr ma che al contempo hanno ispirato teorie ed esperimenti, portando allo sviluppo delle tecnologie quantistiche che molto probabilmente in un prossimo futuro entreranno in maniera capillare nella nostra vita.

2. La meccanica quantistica: il bizzarro mondo atomico e subatomico

La meccanica quantistica e la teoria della relatività di Albert Einstein hanno completamente cambiato il modo di guardare il mondo introducendo dei concetti contro-intuitivi e in netto contrasto con il senso comune (Al-Khalili, 2014; Lederman, Christopher, 2013; Pais, 2012). È per certi versi sorprendente pensare che nel 1900, uno dei più autorevoli fisici dell'epoca, William Thomson, meglio noto come Lord Kelvin, nel settembre del 1900, all'assemblea della British Association for the Advancement of Science, a Bradford (UK), abbia pronunciato la seguente frase: "Ormai in fisica non c'è più nulla di nuovo da scoprire. Tutto ciò che rimane da realizzare sono misure sempre più precise". Ed è proprio da alcune delle misure a cui faceva riferimento Lord Kelvin che nacquero le succitate teorie delle relatività e meccanica quantistica che, insieme al calcolo infinitesimale sviluppato da Isaac Newton e Gottfried Leibniz circa due secoli prima, possono essere considerate tra le vette più alte conquistate dalla scienza.

Se la teoria della relatività può essere considerata un capolavoro dell'intelletto umano essenzialmente ad opera di un solo uomo, la meccanica quantistica, ossia la teoria che descrive il mondo su scala atomica e subatomica, è una monumentale opera dovuta a diversi talenti della fisica del secolo scorso. Furono proprio i rinvii sperimentali di cui parlava Lord Kelvin a dar luogo a questa straordinaria teoria che ha introdotto nuovi paradigmi nella fisica e ha avuto un notevole impatto tecnologico. Una delle invenzioni più importanti del XIX secolo, fu la lampadina ad incandescenza ad opera di Thomas Edison nel 1878; con la crescente diffusione di questo nuovo tipo di illuminazione, la comunità scientifica rivolse molto interesse allo studio dell'interazione della radiazione elettromagnetica (di cui è fatta la luce) con la materia. In particolare, suscitava molto interesse la radiazione elettromagnetica emessa da un corpo

riscaldato, radiazione di corpo nero. Qualsiasi corpo a temperatura superiore allo zero assoluto ($-273,15$ gradi centigradi) emette radiazione elettromagnetica la cui energia e frequenza principale dipende dalla temperatura. Utilizzando le leggi della fisica classica (termodinamica ed elettromagnetismo) non si riusciva a spiegare l'andamento dell'energia elettromagnetica emessa da un corpo in funzione della frequenza a temperatura fissata. Nel 1900 il fisico tedesco Max Planck propose una soluzione molto stravagante per spiegare il fenomeno a cui non credeva fino in fondo nemmeno lui, anzi la considerava una sorta di forzatura matematica per spiegare gli andamenti sperimentali. Planck ipotizzò che all'equilibrio termico lo scambio di energia tra la radiazione elettromagnetica e le pareti del corpo nero potesse avvenire solo in maniera quantizzata, ossia per pacchetti di energia discreti e multipli della quantità $h\nu$ dove h è una costante che in seguito fu chiamata costante di Planck e ν è la frequenza della radiazione elettromagnetica. La strana ipotesi di Planck permise di spiegare alla perfezione i dati sperimentali e pose le basi di una nuova teoria destinata a cambiare il modo di vedere il mondo. Nel 1905, il giovane Einstein, sfruttando l'ipotesi di Planck, riuscì a spiegare un altro fenomeno molto interessante che non si riusciva a comprendere con le conoscenze di fisica classica. Si trattava dell'effetto fotoelettrico, che prevede l'emissione di elettroni da parte dei metalli quando vengono colpiti da una radiazione elettromagnetica con una frequenza maggiore di una certa soglia che dipende dal materiale. Einstein ipotizzò che la luce avesse una natura corpuscolare oltre a quella ondulatoria, ossia fosse fatta di particelle luminose (fotoni, quanti della radiazione elettromagnetica) la cui energia era appunto dato da $h\nu$. Un ulteriore e schiacciante prova della natura corpuscolare della luce fu fornita dall'effetto Compton (1922) in cui un fotone, in seguito ad un urto con un elettrone, perde energia e diminuisce la sua frequenza. La spiegazione di fenomeni sperimentali con le ipotesi dei quanti non finisce qui: nel 1913 un altro gigante della meccanica quantistica, il fisico danese Niels Bohr, riuscì a spiegare gli spettri di emissioni ed assorbimento degli atomi con un modello atomico quantizzato in cui l'elettrone girava intorno al nucleo potendo muoversi solo su determinate orbite definite da un preciso raggio. Se un atomo veniva investito da un fotone avente un'energia pari alla differenza di energia tra due orbite contigue, l'elettrone saltava in un'orbita con un raggio maggiore avente una maggiore energia ed assorbiva il fotone incidente, se invece saltava spontaneamente in un'orbita con un raggio più piccolo avente una minore energia, emetteva fotoni. Oramai c'erano troppi indizi per poter pensare che l'ipotesi di Planck fosse solo un artificio matematico per spiegare la radiazione di corpo

nero, e quindi lo stesso Planck, molto scettico, si dovette convincere dello strano comportamento della natura e con rammarico disse: “Ho cercato per molti anni di salvare la fisica da livelli energetici discontinui”. Ma l’ipotesi più strana e che sta alla base dello sviluppo della teoria quantistica è quella del conte francese di origine piemontese Louis De Broglie, il quale nel 1924 partendo dal dualismo onda-particella per i fotoni introdotto da Einstein, propose che anche la materia potesse avere una natura ondulatoria. Detto in altri termini, un corpo si può comportare come un’onda dando vita ai tipici fenomeni ondulatori come l’interferenza e la diffrazione. Ovviamente se l’ipotesi di De Broglie non avesse dato una forte indicazione per un semplice e diretto test sperimentale, sarebbe stata accantonata e liquidata come la folle idea di un giovane dottorando benestante. Nel 1927, i due fisici sperimentali Clinton Davisson e Lester Germer spararono un fascio di elettroni su un cristallo di nickel e osservarono uno spettro di diffrazione tipico di una onda, confermando la stravolgente ipotesi di De Broglie. “Un fenomeno che è impossibile spiegare classicamente e che contiene il cuore della meccanica quantistica”, come disse il grande fisico statunitense Richard Feynman. La natura ondulatoria della materia è stata successivamente confermata da ulteriori esperimenti, tra cui quello famoso della doppia fenditura realizzato per la prima volta nel 1974 da tre scienziati italiani (Merli *et al.*, 1976) in cui gli elettroni attraversavano uno alla volta una doppia fenditura dando luogo alla tipica figura di interferenza dei fenomeni ondulatori (figura 1). Secondo un sondaggio lanciato dalla rivista «Physics World» nel 2002 (Crease, 2002), l’esperimento della doppia fenditura, utilizzando singoli elettroni, risultò il più bell’esperimento di fisica realizzato nel corso della storia.

Infine, l’altra profonda rottura con i concetti di fisica classica venne dal famoso principio di indeterminazione introdotto nel 1927 da un altro padre fondatore della meccanica quantistica, il fisico tedesco Werner Heisenberg, secondo il quale non è possibile determinare con estrema precisione e, allo stesso tempo, la posizione e la velocità di una particella. Tale principio era in netto contrasto con la meccanica di Newton in quanto, non essendo possibile determinare con precisione assoluta la posizione e la velocità all’istante iniziale di una particella, non permetteva di determinare nel mondo atomico e sub-atomico la traiettoria di una particella (Heisenberg, 2016).

Oramai i tempi erano maturi per elaborare una teoria che in maniera coerente e senza utilizzare ipotesi *ad hoc* potesse spiegare i fenomeni quantistici osservati fino ad allora e prevederne altri. Tra il 1925 e 1926 furono elaborate due versioni equivalenti della teoria quantistica: la meccanica delle matrici e la meccanica

ondulatoria. In particolare, il fisico austriaco Erwin Schrodinger, basandosi sull'ipotesi di De Broglie, arrivò alla formulazione di un'equazione d'onda che porta il suo nome e che si può considerare l'equazione fondamentale della meccanica quantistica, analoga alla famosa formula di Newton per la meccanica classica. Nell'equazione di Schrodinger l'incognita era una funzione d'onda che inizialmente si pensava potesse rappresentare un'onda elettronica, ma alla quale il fisico tedesco Max Born nel 1927 diede un'interpretazione probabilistica: il modulo quadro della suddetta funzione rappresentava la probabilità di trovare la particella in un dato punto e in un istante fissato. La nuova meccanica, basata sull'equazione di Schrodinger e ragionevoli condizioni matematiche da imporre alla funzione d'onda, riusciva a predire con una notevole precisione e senza nessun ipotesi *ad hoc* il comportamento degli atomi, delle molecole, della materia condensata e, nella sua versione relativistica, anche il comportamento dei nuclei atomici, delle particelle elementari e delle interazioni fondamentali. Inoltre, essa ha determinato una rivoluzione tecnologica di enorme portata (prima rivoluzione quantistica), basti pensare all'invenzione dei transistor a semiconduttore, laser, microscopio elettronico, diagnostica per immagini e medicina nucleare. Tuttavia, i fondamenti concettuali della meccanica quantistica sono stati oggetto e per certi aspetti lo sono ancora oggi, di animate dispute e controversie dovute alle diverse interpretazioni (Fiscaletti, 2015).

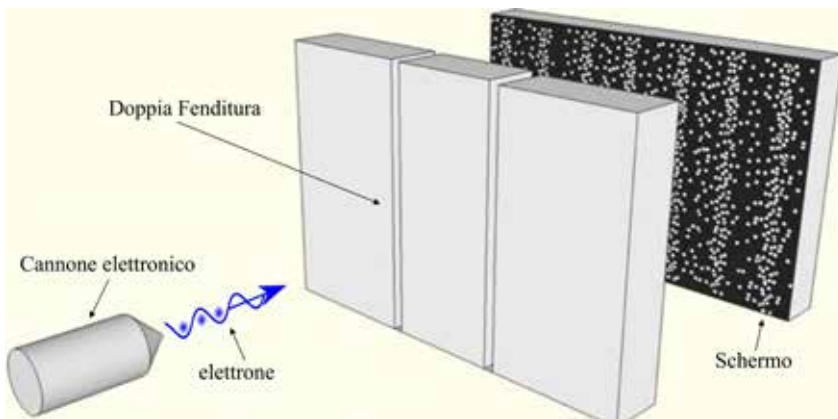


Figura 1
Rappresentazione schematica dell'esperimento della doppia fenditura

3. Gatto di Schrodinger, entanglement e la seconda rivoluzione quantistica

L'interpretazione più diffusa della meccanica quantistica è quella di Copenaghen o ortodossa sviluppata alla fine degli anni Venti del secolo scorso. Oltre al significato statistico-probabilistico della funzione d'onda, tale interpretazione ipotizza che, in generale, un sistema o stato quantistico può essere descritto da una funzione d'onda, soluzione dell'equazione di Schrodinger, e che tale funzione è data dalla sovrapposizione lineare di altre funzioni d'onda che rappresentavano altri stati quantistici, ognuno pesato con una certa probabilità. Nel momento della misura, la funzione d'onda collassa in uno degli stati di cui era composta; prima della misura non ha senso chiedersi in quale stato si trova il sistema, tutt'al più si può dire che sta contemporaneamente in tutti gli stati ma con probabilità diversa a seconda dello stato (sovrapposizione di stati coerenti). Inoltre, questa è una proprietà intrinseca ed irriducibile della natura non dovuta alla limitata conoscenza delle condizioni fisiche del sistema in considerazione. Nel caso particolare della posizione di una particella descritta da una funzione d'onda non ha senso chiedersi in quale punto dello spazio la particella sta prima della misura, ovvero si trova contemporaneamente in tutte le posizioni e il processo di misura fa collassare la funzione d'onda nel punto in cui si trova la particella a valle della misura (figura 2).

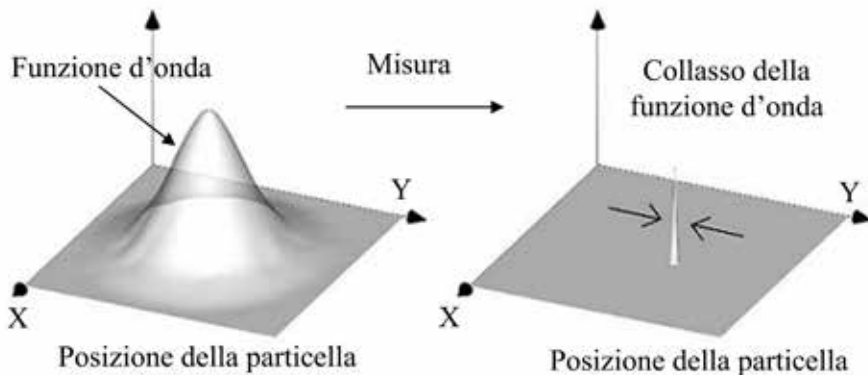


Figura 2

Collasso della funzione d'onda: prima della misura la funzione è delocalizzata in un'ampia regione dello spazio, dopo la misura essa diventa molto piccata e localizzata nel punto in cui viene rilevata la particella

Einstein era nettamente contrario a tale rappresentazione, in quanto sosteneva che esistevano delle variabili nascoste (teoria delle variabili nascoste) che non si riuscivano a determinare e che erano origine del comportamento statistico-probabilistico dei fenomeni quantistici; pertanto, secondo il genio tedesco, la meccanica quantistica era una teoria incompleta. La posizione di Einstein è ben descritta dalla famosa frase “Dio non gioca a dadi” oppure dall’ironica domanda che faceva a Bohr, accanito sostenitore dell’interpretazione di Copenaghen: “Veramente lei è convinto che la Luna esiste solo se la si guarda?”. Einstein era profondamente convinto che le leggi della natura dovessero essere di tipo *locale*, cioè ogni fenomeno, corpo o più in generale un sistema, deve essere condizionato solo da quello che accade nelle immediate vicinanze. In questo senso mal digeriva la teoria della gravitazione di Newton che prevedeva una forza a distanza. Per Einstein era assurdo immaginare che, se il sole scomparisse, immediatamente la terra uscirebbe fuori orbita, ma era plausibile immaginare che lo avrebbe fatto dopo non meno di 9 minuti, ossia il tempo che la luce impiega per raggiungere la terra dal sole. Ed è proprio questa radicata posizione di *realismo locale* che porterà Einstein ad assumere un atteggiamento molto scettico e critico sui fondamenti concettuali della meccanica quantistica.

Lo stesso Schrodinger non era molto convinto dell’interpretazione ortodossa, infatti nel 1935 ideò un esperimento mentale noto come paradosso del gatto di Schrodinger, in cui immaginava di chiudere un gatto in una scatola all’interno della quale era presente una fiala di cianuro che tramite un opportuno meccanismo si rompeva se uno degli atomi presenti in una sostanza radioattiva si disintegrava, emettendo una radiazione che innescava il meccanismo di rottura della fiala (figura 3a). Supposto che in determinato tempo la probabilità di disintegrazione di un atomo radioattivo fosse del 50%, Schrodinger sosteneva che secondo l’interpretazione ortodossa della meccanica quantistica, prima di aprire la scatola il gatto fosse in una sovrapposizione dei due stati, gatto vivo e gatto morto contemporaneamente e nel momento in cui si apriva la scatola, si faceva collassare la funzione d’onda che descrive il gatto in uno dei due possibili stati: vivo o morto (Schrodinger, 1935; Fiscaletti, 2015; Curceanu, 2022). È evidente che una tale sovrapposizione di stati vivo/morto non viene mai osservata, da qui l’aspetto paradossale dell’esperimento. Il paradosso metteva in luce due aspetti concettuali fondamentali. La meccanica quantistica vale a livello macroscopico o la possiamo usare solo per descrivere fenomeni microscopici? In caso affermativo, in che modo si spiegano i fenomeni in cui c’è interazione tra il mondo microscopico (atomo che si disintegra) e quello macroscopico (la fiala che si rompe)?

Molti esperimenti effettuati tra la fine del secolo scorso e inizio di questo secolo hanno mostrato in maniera inequivocabile che la meccanica quantistica vale anche a livello macroscopico, mettendo in chiara evidenza alcuni effetti quantistici macroscopici come la sovrapposizione quantistica di diversi stati macroscopici tramite la misura della coesistenza di una piccola corrente in un anello superconduttore in due distinti stati: corrente in senso orario e antiorario (Friedman, 2000). Allora come si risolve il paradosso nell'ottica dell'interpretazione di Copenaghen? Attualmente la soluzione che convince di più è fornita dalla teoria della *decoerenza quantistica*. Un sistema quantistico non può essere considerato un sistema isolato ma in continua interazione con l'ambiente circostante incluso l'apparato di misura, la luce che lo illumina o l'aria che lo circonda. Tale interazione è di solito molto complessa, soprattutto per i sistemi macroscopici, e produce una sorta di disturbo che tende a far scomparire la sovrapposizione coerente degli stati (da qui il termine decoerenza) e quindi le proprietà quantistiche. Come afferma Brian Greene nel suo libro *la trama del cosmo*: "La decoerenza permette alla stranezza della fisica quantistica di sparire dagli oggetti macroscopici poiché, bit per bit, la stranezza quantica è portata via dalle interazioni con innumerevoli particelle dell'ambiente" (Greene, 2014). Più in particolare, le singole particelle di un sistema macroscopico in seguito all'interazione con le particelle dell'ambiente circostante, modificano la loro funzione d'onda in maniera indipendente le une dalle altre e la delicata sovrapposizione degli stati sparisce rapidamente, perdendo la necessaria coerenza che è alla base del comportamento quantistico di un insieme di particelle. Maggiore è il numero di particelle che costituisce il sistema quantistico, più rapido è il processo di decoerenza, in sistemi quantistici relativamente semplici e accuratamente isolati dall'ambiente circostante si parla di tempi record dell'ordine di un millesimo di secondo o anche meno. Nel caso di un sistema macroscopico estremamente complesso come il gatto quantistico costituito da migliaia di miliardi di miliardi di atomi, il tempo di decoerenza sarebbe così piccolo da essere impossibile misurarlo. Inoltre, la stessa interazione tra le varie molecole che lo compongono produce decoerenza e annulla i fenomeni quantistici. La decoerenza è la ragione per cui quasi tutto il mondo macroscopico ci appare classico, e non quantistico, ovvero popolato da gatti di Schrodinger!

Ma arriviamo ad uno dei fenomeni più controversi e bizzarri della meccanica quantistica, l'entanglement quantistico (Aczel, 2004; Genovese, 2022), termine introdotto da Schrodinger, la cui traduzione in italiano è groviglio, intreccio. A tal proposito ricordiamo un altro famoso paradosso ideato da Einstein, Boris

Podolsky e Nathan Rosen sempre nel 1935 e noto come paradosso EPR dal nome delle iniziali dei tre autori (Einstein, 1935), basato su un esperimento ideale. Considereremo la versione semplificata formulata dal fisico e filosofo statunitense David Bohm, ma prima dobbiamo introdurre un'altra quantità fisica tipica del modo microscopico e, in particolare, delle particelle subatomiche (elettrone, protone, neutrone, ecc.), lo *spin*. Esso fu ipotizzato da Wolfgang Pauli nel 1925 sia per spiegare alcune proprietà degli elementi della tavola periodica sia alcuni esperimenti di Otto Stern e Walther Gerlach effettuati nel 1922 su atomi neutri. Si tratta di una sorta di momento angolare intrinseco che in fisica classica è legato alle rotazioni. Si potrebbero immaginare le particelle elementari come piccolissime trottole, che possono ruotare su sé stesse e, a seconda del verso con cui ruotano, parliamo di spin in alto o in basso. Ma in realtà non c'è una vera rotazione associata allo spin: infatti l'elettrone e il fotone sono puntiformi e non possono ruotare su sé stessi ma sono comunque dotati di spin. Una delle leggi fondamentali della fisica prevede che in un sistema isolato il momento angolare totale si conserva e ciò consente alla terra di ruotare indefinitamente su sé stessa, ai pianeti del sistema solare di percorrere un'orbita piana intorno al sole o ad una ballerina di eseguire le meravigliose piroette modulando la velocità con cui ruota in base alla posizione delle sue braccia. Se si immagina che da una sorgente in una scatola vengano emesse ad un certo istante due particelle aventi la stessa direzione ma versi opposti (figura 3b), per la summenzionata legge di conservazione, il momento angolare totale e quindi anche lo spin si deve conservare e nel caso in questione deve essere zero in quanto è zero prima dell'emissione delle particelle. Quindi, nel caso delle due particelle lo spin totale deve essere zero, ossia una particella deve avere spin verso l'alto e l'altra spin verso il basso. In base alla meccanica quantistica le due particelle (coppie EPR) potranno essere descritte da una funzione d'onda che è la sovrapposizione di due stati: uno in cui la particella che viaggia verso destra ha spin in alto e quella che viaggia verso sinistra ha spin in basso, l'altro stato è quello invertito ossia particella di destra con spin in basso e quella di sinistra con spin in alto. L'interpretazione di Copenaghen ci dice che non ha senso chiedersi in quale stato si trovano le due particelle prima della misura ed è l'atto della misura che fa collapsare la funzione d'onda in uno dei due stati. Ciò significa che, anche se le particelle si trovano a migliaia di chilometri di distanza, nel momento in cui si misura lo spin su una particella, istantaneamente l'altra particella assume spin opposto. Esiste quindi una sorta di legame telepatico tra due particelle entangled, quello che Einstein, in completo disaccordo con questa interpretazione, chiamava "spettroale azione a

distanza”. Inoltre, secondo Einstein, questo implicava una violazione dei principi della relatività ed in particolare l'impossibilità di viaggiare ad una velocità maggiore di quella della luce.

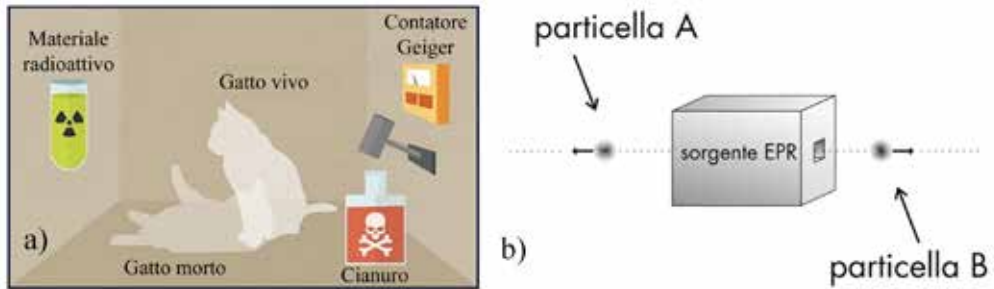


Figura 3

a) Rappresentazione del paradosso del gatto di Schrodinger

b) Schema del paradosso EPR:

le particelle vengono emesse nella stessa direzione ma con versi opposti.
La misura dello stato di spin di una particella determina istantaneamente lo stato dell'altra particella (entanglement)

Al famoso paradosso EPR, Bohr rispondeva che non c'è nessuna informazione che si propaga ad una velocità maggiore della luce, in quanto lo spin di una delle particelle è determinato solo quando si effettua la misura. In particolare, se la particella che viaggia verso destra viene misurata da un osservatore A dando come esito spin rivolto verso l'alto, fino a quando l'osservatore B non misura la particella che viaggia verso sinistra non saprà mai in quale stato di spin si trova la particella, quindi deve aspettare che arrivi la particella che viaggia con una velocità inferiore a quella della luce oppure aspettare che l'osservatore A gli invii un messaggio in cui gli dice che la particella di sinistra ha spin verso il basso, dal momento che la sua ha spin verso l'alto.

Questi peculiari e stravaganti aspetti della fisica quantistica hanno dato adito a molti dibattiti e molte interpretazioni anche di tipo filosofico e metafisico (interpretazione a molti mondi, a molti menti, a storie consistenti, teoria di Bohm, ecc.) che secondo l'ala più pragmatica della meccanica quantistica andavano circostanziati e non confusi con la sua straordinaria capacità predittiva. Nel mondo dei fisici quantistici si diffuse il monito, forse erroneamente attribuita a Feynman: "Zitto e calcola". Detto in altre parole, si lasci perdere l'aspetto filosofico e ci si concentri su quello pragmatico ereditatoci dal metodo

sperimentale galileiano. Tuttavia, una svolta è stata nel 1964 quando il fisico irlandese John Bell trovò un modo rigoroso per capire chi tra Einstein e Bohr avesse ragione (Bell, 1964, 2010). In particolare, in un famoso articolo formulò delle disuguaglianze matematiche note come *disuguaglianze di Bell* che, se violate, avrebbero indiscutibilmente dato ragione a Bohr e quindi alla visione della meccanica quantistica che prevede questa sorta di telepatia a distanza tra le particelle; se invece fossero state conservate, la ragione l'avrebbe avuta Einstein e quindi l'interpretazione delle variabili nascoste.

Nel 1981 e 1982, Alain Aspect (premio Nobel per la Fisica nel 2022) e il suo gruppo di ricerca effettuarono tre importanti esperimenti in cui verificarono la violazione delle disuguaglianze di Bell utilizzando, come coppia di particelle, due fotoni entangled (Aspect, 1981, 1982). Come detto sopra, i fotoni sono i quanti di luce e come tali obbediscono alle leggi della meccanica quantistica e, per questo motivo, è possibile costruire delle coppie di fotoni entangled utilizzando lo stato di polarizzazione, ossia la direzione in cui oscilla il campo elettrico. Negli esperimenti di Aspect, si utilizzava una sorgente di atomi di calcio il cui decadimento produceva una coppia di fotoni entangled che si muovevano lungo percorsi opposti e venivano rilevati ad una distanza di 13 m l'uno dall'altro. La polarizzazione dei fotoni era per entrambi verticale o orizzontale alla direzione di propagazione dei fotoni, pertanto in questo stato entangled la misura della polarizzazione di un fotone consentiva di dedurre e predire con esattezza la polarizzazione dell'altro: in altri termini, l'osservazione dello stato di un fotone consentiva di leggere istantaneamente lo stato del secondo fotone come previsto dall'interpretazione ortodossa della meccanica quantistica. A partire dai pionieristici esperimenti di Aspect, ci sono state numerose conferme sperimentali della violazione della disuguaglianza di Bell anche a distanze notevolmente maggiori. In particolare, nel 2017 utilizzando dei satelliti è stato dimostrato il fenomeno dell'entanglement su una coppia di fotoni ad una distanza di 1203 km (Yin, 2017) e nel 2022 il misterioso effetto è stato dimostrato su singoli atomi di rubidio ad una distanza di 33 Km (Van Leent, 2022). L'evidenza sperimentale sembra dar ragione a Bohr mettendo in chiara evidenza che la meccanica quantistica è una teoria *non-locale* in cui quello che accade su un sistema non è necessariamente causato dall'immediate vicinanze ma può essere dovuto anche ad eventi accaduti a migliaia di km di distanza. In altre parole, i numerosi esperimenti dimostrano che la spettrale azione a distanza di cui parlava Einstein è reale. Naturalmente anche in questo caso possiamo ripetere quanto detto a proposito del paradosso

del gatto di Schrodinger: il fenomeno della decoerenza non ci permette di osservare nella vita di tutti i giorni queste “spettrali azioni a distanza”!

La possibilità di poter manipolare in maniera attiva gli stati quantistici della materia e, in particolare, gli stati coerenti ed entangled ha dato vita a quella che va sotto il nome di *seconda rivoluzione quantistica* che sta permettendo lo sviluppo di tecnologie quantistiche destinate ad avere un notevole impatto sulla nostra società. Proprio negli anni in cui Aspect faceva i suoi famosi esperimenti, Feynman ipotizzò che il mondo fisico nella sua complessità poteva essere decifrato tramite dei calcolatori che utilizzassero fenomeni quantistici di questo tipo, ossia i computer quantistici. Per intuire il vantaggio della computazione quantistica rispetto a quella classica, ricordiamo che il computer classico si basa sui bit che possono assumere solo due stati, ad esempio alto o basso, vero o falso oppure semplicemente zero o uno (logica binaria) e che sono in pratica realizzati utilizzando dispositivi elettronici (transistor, diodi). Un bit di informazione può anche essere codificato in un sistema quantistico che prevede due stati come ad esempio fotoni con due polarizzazioni diverse, due particelle/atomi aventi due diversi stati di spin o un anello superconduttore con due correnti che circolano in un senso o in un altro. Come detto sopra, la meccanica quantistica ci dice che, oltre ai due stati logici di base 0 e 1, un bit quantistico (qubit) può essere preparato in una sovrapposizione coerente dei due stati, analoga ai due stati del gatto di Schrodinger. Questo significa che il qubit, si trova contemporaneamente nei due stati 0 e 1 e, come conseguenza, esso può codificare ad un dato istante sia lo stato 0 che lo stato logico 1 contemporaneamente (Corato, 2005) e, grazie al fenomeno dell'entanglement, è possibile immaginare due o più qubit correlati. Consideriamo quindi un registro di due qubit entangled: un registro classico così composto può rappresentare, ad ogni istante, un solo numero tra le 4 possibilità; vale a dire il registro può trovarsi in uno solo dei 4 possibili stati 00, 01, 10 e 11, mentre un registro quantistico di 2 bits può rappresentare ad ogni istante tutti gli stati possibili in una sovrapposizione coerente. Se noi aggiungiamo ulteriori qubit al registro aumentiamo la sua capacità di rappresentare simultaneamente stati in maniera esponenziale. Ed è proprio questa peculiare caratteristica di poter rappresentare simultaneamente tutti gli stati disponibili che conferisce al computer quantistico indiscutibili vantaggi rispetto ai computer classici. Si tratta quindi della possibilità di effettuare un perfetto calcolo in parallelo.

Negli anni '90 del secolo scorso, furono sviluppati i primi algoritmi quantistici: in particolare nel 1994 Peter Shor dimostrò che il problema di fattorizzazione di un numero intero poteva essere efficientemente risolto su un computer quanti-

stico e nel 1995 Lov Grover mostrò che il problema della ricerca in un database disordinato può essere velocizzato sfruttando la computazione quantistica. A questo punto mancava solo la realizzazione dei primi qubit, che avvenne dopo qualche anno utilizzando dispositivi superconduttivi raffreddati a temperature vicino allo zero assoluto. Negli ultimi venti anni sono stati fatti straordinari progressi che hanno portato alla realizzazione dei primi computer quantistici anche grazie all'interesse di grandi multinazionali come Google, IBM e Intel e alla nascita di innovative aziende start-up come le canadesi D-Wave, Xanadu e l'italo-anglo-americana SEEQC. In particolare, nel 2019 Google ha realizzato un computer quantistico a 53 qubit basati su dispositivi superconduttori e ha dimostrato la cosiddetta *supremazia quantistica*, ossia la capacità di risolvere in pochi secondi o minuti problemi che richiederebbero centinaia di anni con gli attuali supercalcolatori (Arute, 2019). A giugno 2022 la canadese Xanadu ha presentato un computer quantistico realizzato in collaborazione con il National Institute of Standards and Technology, USA, con 216 qubit fotonici capace di eseguire un calcolo complesso in soli 36 milionesimi di secondi e che avrebbe richiesto più di 9000 anni se effettuato con un supercalcolatore classico (Madse, 2022). A novembre 2022 l'IBM ha presentato un nuovo processore quantistico con 433 qubit superconduttori, promettendo entro il 2025 di realizzarne uno a 4000 qubit.

La computazione quantistica potrà essere impiegata per studiare i sistemi complessi con prospettive di importanti scoperte e ulteriori progressi tecnologici in molti campi quali: medicina, biologia, chimica, farmacologia, bioingegneria, fisica dell'atmosfera, intelligenza artificiale, trasporti ecc. Le tecnologie quantistiche riguarderanno anche altri campi strategici come la crittografia, le comunicazioni, internet e la sensoristica avanzata. Oltre alle grandi aziende, ci sono ingenti quantità di soldi investiti anche dalla ricerca pubblica di tutti i paesi industrializzati, soprattutto dalla Cina e dagli USA che recentemente hanno investito decine di miliardi di dollari in questo settore strategico. L'unione Europea ha dato via nel 2018 ad un progetto bandiera sulle tecnologie quantistiche con un finanziamento di circa 1 miliardo di euro. Nel 2022 l'Italia, nell'ambito del piano nazionale di ripresa e resilienza, ha finanziato un progetto di circa 320 milioni di euro per la realizzazione di una infrastruttura digitale nazionale di ultimissima generazione dedicata alla elaborazione di big data e alla computazione quantistica ed un progetto di circa 110 milioni di euro per la costituzione di un consorzio italiano che svolgerà attività di ricerca competitiva e innovativa nel

campo delle scienze e tecnologie quantistiche. Entrambi i progetti prevedono la partecipazione di Università, Enti pubblici di ricerca, aziende private.

In effetti Feynman aveva intuito bene; infatti a partire dal pionieristico esperimento di Aspect, iniziò la seconda rivoluzione quantistica che, partendo da fenomeni come l'entanglement e la coerenza quantistica, ha portato allo sviluppo delle tecnologie quantistiche e in particolare della computazione quantistica.



Figura 4

- a) Foto del computer quantistico di Google a 53 qubit
 b) Foto del processore quantistico (Sycamore) basato su circuiti superconduttivi operante all'interno del computer di Google (Arute *et al.*, 2019)

Bibliografia

- Aczel A.D. (2004), *Entanglement. Il più grande mistero della fisica*, Milano, Raffaello Cortina Editore.
- Al-Khalili J. (2014), *La fisica dei Perplessi. L'incredibile mondo dei quanti*, Torino, Bollati Boringhieri.
- Aspect A., Grangier P., Roger G. (1981), *Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem*, «Physical Review Letters», 47, p. 460.
- (1982), *Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities*, «Physical Review Letters», 49, p. 91.
- Arute F. *et al.* (2019), *Quantum supremacy using a programmable superconducting processor*, «Nature», 574, p. 506.
- Bell J. (1964), *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, «Physics», 1, p. 195.
- (2010), *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica*, Milano, Adelphi.

Dal dibattito tra Einstein e Bohr al premio Nobel per la Fisica 2022

- Corato V., Granata C., Ruggiero B., Silvestrini P. (2005), *Elementi di Fisica Moderna per l'informazione quantistica*, Roma, Aracne.
- Crease R.P. (2002), *The most beautiful experiment*, «Physics World», 15, p. 19.
- Curceanu C. (2022), *Sulle tracce felpate del gatto di Schrödinger*, «asimmetrie», 33, p. 22, <https://www.asimmetrie.it>.
- Einstein A., Podolsky B., Rosen N. (1935), *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, «Physical Review», 47, p. 777.
- Fiscaletti D. (2015), *I gatti di Schrodinger, Meccanica quantistica e visione del mondo*, Roma, Franco Muzzio Editore.
- Friedman L.R. et al. (2000), *Quantum superposition of distinct macroscopic states*, «Nature», 406, p. 43.
- Genovese M. (2022), *Entanglement*, «asimmetrie», 33, p. 14, <https://www.asimmetrie.it>.
- Greene B. (2014), *La trama del cosmo. Spazio, tempo, realtà*, Torino, Giulio Einaudi Editore.
- Heinseberger W. (2016), *I principi fisici della teoria dei quanti*, Torino, Bollati Boringhieri.
- Lederman L.M., Christopher H.T. (2013), *Fisica quantistica per poeti*, Torino, Bollati Boringhieri.
- Madse L.S. et al. (2022), *Quantum computational advantage with a programmable photonic processor*, «Nature», 606, p. 75.
- Merli P.G., Missiroli G., Pozzi G. (1976), *On the statistical aspect of electron interference phenomena*, «American Journal of Physics», 44, p. 306.
- Pais A. (2012), *Einstein. «Sottile è il Signore...»*. *La scienza e la vita di Albert Einstein*, Torino, Bollati Boringhieri.
- Schrödinger E. (1935). *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik (The present situation in quantum mechanics)*, «Naturwissenschaften», 23, p. 807.
- Van Leent T. et al. (2022), *Entangling single atoms over 33 km telecom fibre*, «Nature», 607, p. 69.
- Yin J. et al. (2017), *Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers*, «Science», 356, p. 1140.

