



## ANTON ZEILINGER E LA SECONDA RIVOLUZIONE QUANTISTICA

di Paolo Villoresi\*

Il titolo sollecita qualche informazione su ciò che ha preceduto la seconda rivoluzione quantistica, ossia la prima, che ha introdotto la Meccanica Quantistica (MQ). I principali iniziatori di questa prima rivoluzione sono stati Einstein e Bohr, che hanno introdotto gli elementi chiave dei quanti di energia sul modello dell'atomo. Molti scienziati hanno poi contribuito a formare una teoria assai completa di grande bellezza e rigore matematico, oltre che di enorme portata: è stato infatti spiegato il microcosmo descrivendo gli atomi e i loro molti spettri colorati, la struttura delle molecole e dello stato solido, dei cristalli con le loro proprietà termiche ed elettriche o la radioattività. Ne è seguita la straordinaria scoperta del mondo subatomico e delle teorie di campo quantistico, con i formidabili successi della scoperta dei mattoni ultimi della materia, grazie a teorie eccezionalmente raffinate che hanno indicato nuove particelle elementari, tra le quali i quark e il bosone di Higgs, poi trovate nei grandi esperimenti.

La MQ ha aperto la strada anche a importanti invenzioni, come il transistor e il laser, e ha spiegato fenomeni impressionanti, come la superconduttività basata sulla simmetria delle funzioni d'onda o la super fluidità, l'effetto Josephson, componente essenziale di alcuni tipi di computer quantistico, in particolare il *transmon*, che è uno dei tipi di qubit<sup>1</sup> superconduttori più utilizzati.

<sup>1</sup> Contrazione di *quantum bit*, termine coniato da



*Anton Zeilinger nel 2004, in occasione dell'esperimento presso l'Osservatorio ASI-MLRO a Matera.*

La seconda rivoluzione quantistica è venuta quando si è iniziato a ragionare sul significato delle proprietà degli stati quantici e delle loro correlazioni in termini di informazioni. La sua origine è divisa in due fasi: la prima, dei dubbi e delle discussioni filosofiche, va dal 1935 fino al 1964; la seconda, della verifica e dell'implementazione dei principi generali e la messa a punto delle tecniche di base, arriva fino al primo decennio di questo secolo. Successivamente, segue la nuova fase della tecnologia, che è iniziata da circa un lustro e che è tuttora in crescita, spinta da forti investimenti in Italia, in Europa e nel mondo.

Benjamin Schumacher per indicare l'unità di informazione quantistica (bit quantistico).

Anton Zeilinger, che assieme ad Alain Aspect e John Clauser ha vinto il premio Nobel nel 2022 proprio per aver contribuito alla verifica delle basi teoriche della MQ, è lo scienziato che ha forse più di altri contribuito altresì a comprendere il legame tra i fondamenti e i protocolli che permettono poi di applicarla, rendendola una disciplina molto sfaccettata e interessante. Inoltre, è un piacere scrivere di Anton Zeilinger perché parte di questo suo brillante cammino passa per Padova e per Matera, dove noi operiamo da 20 anni presso il Centro di Geodesia Spaziale dell'Agenzia Spaziale Italiana.

Come per l'avvento della teoria quantistica oltre un secolo fa, e così come quando evidenze sperimentali sono risultate in disaccordo con le teorie dominanti, quale fu il caso del moto degli astri e il modello tolemaico, l'avvio della seconda rivoluzione quantistica è dovuto alla difficoltà di comprendere la descrizione del microcosmo e le relative implicazioni. Infatti, un'importante caratteristica nella descrizione di un sistema che i fisici di oggi chiamano classico, forse ispirati dalla musica, sta nel modo in cui per una particella o un oggetto solido esteso si possano determinare univocamente tutte le sue proprietà. In altre parole, si possano descrivere con precisione la sua posizione, la sua velocità lineare e di rotazione, e la sua energia.

Questo approccio è alla base non solo della meccanica newtoniana in tutti i suoi risvolti, dalla statica e dinamica all'astronomia, estendendosi alla relatività generale, ma è anche alla base della termodinamica e della meccanica dei fluidi.

Nella teoria quantistica queste informazioni non sono invece disponibili direttamente,

ma vengono ricavate dallo stato quantistico, che esprimiamo con la funzione d'onda quantistica, la quale rappresenta la nostra conoscenza nel sistema. Per dirla con le parole di Erwin Schrödinger, che l'ha introdotta nel 1926, questa è il «catalogo della nostra conoscenza, che lista i possibili risultati di esperimenti che si possono effettuare». Si intende che questo approccio limita ciò che possiamo affermare sullo stato generale di un sistema e, ancora di più, su quello che è effettivamente lo stato dei componenti del sistema, ovvero come sono disposti e come si comportano i singoli mattoni.

Un aspetto cruciale inoltre è che non è lecito attribuire alla particella determinati valori fintanto che non si sia effettivamente compiuta una misura, fino a quel punto non si poteva parlare dei valori delle singole grandezze.

Riguardo poi a che grandezza misurare e in che momento scegliere di farlo, Niels Bohr, durante i suoi celebri scambi con Albert Einstein, sostenne che si può scegliere ed eventualmente cambiare anche all'ultimo momento il tipo di misura, ad esempio di posizione o di velocità o di energia o di che cammino la particella ha compiuto.

Per cercare di chiarire il concetto, John Wheeler usava l'illustrazione riportata nella figura seguente, che ha chiamato *great smoky dragon*, per descrivere l'evoluzione di uno stato quantistico. Infatti si nota che, quando inizia la dinamica allo studio, si intende che vi sia un'origine della funzione d'onda a sinistra e che questa poi si propaga, interagisce e infine viene misurata a destra. Nel disegno vengono rappresentati diversi apparati di misura, che danno risposte differenti. Il drago sceglie uno tra



*Great smoky dragon, rappresentazione grafica.*

i possibili rivelatori nel momento della misura, basandosi sulle probabilità. Si nota che questa scelta non è a priori predicibile e neppure, se replicata, in generale darà lo stesso risultato.

Dobbiamo osservare che nella descrizione quantistica del microcosmo e anche dei sistemi più grandi, laddove questo è possibile, l'interesse prevalente è sull'energia degli stati, sulle transizioni tra questi e sulle proprietà fisiche degli orbitali. Gli esempi più diretti sono nel caso degli atomi, dove la conoscenza dei particolari livelli energetici permette ad esempio di identificare i costituenti chimici di stelle lontane guardando al loro spettro. Infatti, ciascun elemento ha la sua caratteristica tonalità di emissione, come nel caso delle lampade al sodio in autostrada. Tuttavia, questi studi hanno trascurato le misure fatte su parti della funzione d'onda in punti o istanti differenti e l'analisi delle correlazioni che si stabiliscono tra queste.

Einstein ancora una volta si è distinto e, dopo aver dato alla luce la relatività speciale prima e generale poi, nel 1917 si esprime dicendo che «per il resto della mia vita voglio riflettere su ciò che è la luce». Si riferiva per questo in particolare a stati che comprendevano più particelle, per esempio due fotoni che venivano

generati assieme con le loro sovrapposizioni, e che poi possono viaggiare in direzioni diverse. L'aspetto nuovo qui è che questa coppia viene descritta da un'unica funzione d'onda. Inoltre, questa rimane la sola descrizione del sistema anche quando i due fotoni, che sono detti *entangled*, si separano a grande distanza.

Un altro aspetto fondamentale della teoria classica della relatività di Einstein è che ciò che succede in una certa regione, per esempio la commutazione di un laser da acceso a spento, non può dipendere da eventi che sono lontani e per i quali non è possibile che ciò che succede possa essere comunicato utilizzando il corriere più veloce possibile, cioè la luce, in tempo perché questo accada. Einstein chiamava questa proprietà la 'località': non posso dipendere quindi da qualcosa al di fuori del 'cono di luce' del mio evento, oppure che sta nel futuro del mio evento.

Nel 1935 questa era ritenuta una discussione filosofica, benché pubblicata sulla celebre rivista «Physical Review», e fu proprio il dialogo tra Einstein e Bohr che permise di chiarire i termini del problema di comprensione e interpretazione alla base della seconda rivoluzione quantistica. Einstein si convinse che la meccanica quantistica non era una teoria completa della realtà. Infatti, basare la nostra descrizione di una particella del microcosmo sullo stato quantistico, con le probabilità che ne governano i risultati delle misure come sopra descritto per il dragone, non poteva essere soddisfacente. Egli era convinto che per una teoria completa fosse richiesta la capacità di predire con esattezza i risultati, senza «giocare a dadi». Inoltre, le caratteristiche degli stati *entangled*, quando vengono misurati dopo

che la coppia si è separata, sono tali da mostrare le correlazioni tra le misure anche se le osservazioni sono compiute senza che sia possibile condividere gli esiti mediante segnalazione alla velocità della luce, la massima ammessa per l'informazione. Questa condizione delle stazioni di misura è nota come di luoghi esterni al cono di luce, in diretto contrasto con la relatività di Einstein. Per colmare l'incompletezza, Einstein propose l'esistenza di 'variabili nascoste', il cui valore indicava la scelta di risultati della misura, e poteva essere calcolato in anticipo per ciascuna delle grandezze fisiche, introducendo un elemento di realtà. La posizione di Einstein venne quindi detta la visione 'realista e locale'.

Questi ragionamenti filosofici vennero utilizzati come base per il teorema di John Bell, un fisico teorico irlandese che ha fatto ricerca anche alla divisione teorica del CERN, prematuramente scomparso nel 1990. Bell espresse il limite delle correlazioni che si possono osservare tra le misure di due particelle che vengono misurate a distanza e che rispondono ai requisiti indicati da Einstein. Nel suo teorema, apparso il 4 novembre 1964, John Bell ha espresso la forza di queste correlazioni nel caso di una teoria locale e basata sulle variabili nascoste di Einstein. Ha anche indicato che quando invece si considerano le due particelle *entangled*, secondo la teoria quantistica la correlazione può assumere un valore maggiore in modo significativo, in particolare per alcune direzioni di misura. Il suo approccio si può riassumere dicendo che nessuna teoria basata su variabili nascoste locali potrà riprodurre tutte le previsioni della meccanica quantistica.

Con il teorema di Bell si è dunque passati dalla discussione sulla completezza o meno

della teoria fisica a un teorema con una disuguaglianza, i cui valori si potevano misurare in laboratorio. Ciò ha fatto partire una vera e propria corsa, anche se limitata a pochi gruppi, allo scopo di dimostrare se la disuguaglianza di Bell poteva essere violata o meno.

John Clauser porta avanti questo tipo di ricerche negli Stati Uniti e a lui si deve anche l'aver guidato un gruppo che descrisse in modo molto intuitivo la disuguaglianza di Bell, tramite l'espressione CHSH. Tuttavia fu Alain Aspect, nel 1982, a raggiungere il primo risultato accettato dalla comunità internazionale dimostrando che le misure sperimentali violano la disuguaglianza di Bell. Le conclusioni del loro lavoro sono state che la natura si manifesta con delle correlazioni che sono più forti di quelle che si possono dedurre da una teoria locale e realista.

Su queste basi è sorta l'informazione quantistica. Questa consiste in una serie di protocolli che hanno l'obiettivo di affrontare i problemi della teoria dell'informazione utilizzando come fattori gli stati quantistici. Le proprietà di correlazione vengono sfruttate per calcolare, misurare, comunicare in modo sicuro.

La teoria dell'informazione va intesa qui in senso matematico, secondo quanto sviluppato da Harry Nyquist e Ralph Hartley negli anni '20 e Claude Shannon negli anni '40 del secolo scorso. L'informazione è sostanzialmente ciò che si rivela con una misura: meno elementi ho per predire il risultato, maggiore sarà l'informazione fornita dalla misura. Il lancio di una moneta onesta, non truccata, ci darà più informazione di una truccata. In questo caso, essendo l'esito testa o croce, equivalente a 0 o 1, verrà prodotto un bit.



La moneta truccata ne fornirà una frazione. Se invece l'esito è imposto, ad esempio sempre croce, secondo la teoria dell'informazione, non verrà prodotto nulla con il lancio. Se invece lancio un dado, che ha 6 possibili uscite, verranno prodotti quasi 3 bit.

Anton Zeilinger, in quel periodo al MIT di Boston, stava compiendo ricerche nel settore iniziato dal suo supervisore di tesi Helmut Rausch a Vienna, ovvero la diffrazione dei neutroni da cristalli e in particolare come si potesse osservare l'interferenza di singoli neutroni che hanno più percorsi possibili. Questo filone sta evolvendosi tuttora, ed è passato dai neutroni agli atomi e alle molecole, aumentando quindi la taglia per sondare l'interferenza quantistica di oggetti sempre più grandi.

Dopo la violazione del teorema di Bell compiuta dal team di Aspect, vennero proposti dei protocolli che sfruttavano la disuguaglianza per dei fini concreti e senza precedenti. Emblematica è la proposta di Artur Ekert del 1991, allora dottorando a Oxford, per dare soluzione al problema cruciale nelle comunicazioni crittografate: per rendere un messaggio da scambiare incomprensibile a terzi e leggibile dal destinatario, si combina il testo con una stringa numerica casuale, detta chiave crittografica. Così il testo, detto 'in nero', non ha significato per altri che per chi è in possesso di una copia della chiave e che, applicando l'algoritmo al contrario, può recuperare l'originale.

Ekert propose un metodo per scambiare le chiavi basato proprio sul teorema di Bell e sul fatto che, in un sistema quantistico, prima della misura non è presente un valore per le diverse grandezze che caratterizzano

le particelle in gioco. In altre parole, è l'assenza degli elementi di realtà, che Einstein avrebbe desiderato per una teoria fisica completa, che fa sì che non vi siano informazioni che possono essere 'origliate' nel canale durante la comunicazione, e che queste manifestano la loro correlazione solo nel momento in cui vengono misurate.

Questa tecnica rappresenta un metodo sicuro per scambiare chiavi, che non ha un equivalente classico e la cui forza sta nel dipendere direttamente dai principi della fisica e non da un algoritmo. Questa tecnica, essendo basata sugli stati *entangled* che si producono con relativa lentezza, risulta più lenta dei sistemi proposti da altri ricercatori, come Bennet e Brassard fecero nel 1984 con il protocollo BB84. Nello sviluppo delle comunicazioni sicure basate sulla tecnologia quantistica, al momento quest'ultimo protocollo è maggiormente utilizzato, mentre i sistemi basati sul protocollo di Ekert sono pensati per una fase successiva. Anton Zeilinger trovò il modo di implementare il protocollo di Ekert e ne fece la prima dimostrazione, pubblicata nel 2000.

Tuttavia, il filone che ha permesso di scavare ancora di più nei fondamentali della Meccanica Quantistica riguarda un altro protocollo: il teletrasporto quantistico. Questo è stato proposto da un gruppo di teorici nel 1993 e si pone lo scopo di riprodurre uno stato quantistico preso a piacere, in genere un qubit, in una località distante e nella quale lo stato ingresso non è mai arrivato. Questo salto, il teletrasporto stesso, è permesso da una coppia di fotoni *entangled*. In pratica, uno di questi fotoni e lo stato in ingresso vengono utilizzati per una misura di Bell, che ha l'effetto di proiettare il secondo

fotone della coppia in uno stato identico a quello in ingresso, o ottenuto mediante una semplice trasformazione. Alla fine degli anni '90 ciò era un problema nuovo e che però Anton Zeilinger riuscì a superare, in parallelo a un gruppo di ricerca romano guidato da Francesco de Martini.

Le due pubblicazioni uscirono entrambe nel 1997 e dimostrarono qualcosa che, di nuovo, non è un analogo classico. Anziché trasportare un singolo qubit in ingresso, il passo successivo, stimolato da Asher Peres, fu quello di teletrasportare l'*entanglement* stesso, utilizzando come ingresso uno dei fotoni di una seconda coppia *entangled*.

A seguito della prima dimostrazione e seguendo un'idea di Peres, Zeilinger con due diversi esperimenti riuscì a combinare il teletrasporto dell'*entanglement* con la scelta ritardata di Wheeler. Nella sua versione più completa, pubblicata nel 2012, la situazione è questa: il sistema è composto da due coppie di fotoni *entangled*, quattro fotoni in totale. Un fotone di ciascuna coppia viene misurato in due stazioni distanti, chiamate convenzionalmente Alice e Bob. I rimanenti due fotoni vengono misurati da Victor (nome convenzionalmente attribuito all'utente di verifica) in una terza stazione e in un tempo successivo, ossia dopo la registrazione delle misure precedenti. Il tipo di misura di Victor viene a sua volta scelto dopo che le misure sono state registrate. Con questo schema quindi, sulla base di una scelta ritardata rispetto alle registrazioni dei risultati di Alice e Bob, può avvenire o meno il teletrasporto di *entanglement*. Il significato stesso delle correlazioni tra le misure di Alice e Bob nei due casi risulta diverso, a seconda di cosa ha misurato Victor.

L'interpretazione di queste misure è assai delicata: se si considerasse lo stato quantistico come un oggetto fisico reale si arriverebbe alla situazione paradossale in cui un'azione futura sembra aver avuto un'influenza su eventi passati e registrati irrevocabilmente. Ma come abbiamo già detto, lo stato quantistico è solo il catalogo delle nostre conoscenze, ovvero la lista di tutti i risultati delle possibili misure. In questo caso, l'ordine temporale relativo ai tre osservatori è irrilevante, e non è quindi necessario invocare questa azione che dal futuro influenza misure passate.

In questo esperimento Zeilinger concluse che si poteva estendere l'affermazione di Bohr «nessun fenomeno elementare è un fenomeno finché non viene registrato» con «alcuni fenomeni registrati non hanno senso finché non sono messi in relazione con altri fenomeni registrati», che si allontana ancora di più dal concetto classico di realtà. La situazione, infatti, è distante da quella che ci suggerisce la logica causale: le correlazioni quantistiche che mostrano l'*entanglement* si osservano indipendentemente dall'ordine temporale. Il legame che caratterizza gli stati quantistici appare quindi più profondo dello spazio-tempo nel quale sono immersi e indipendente dal laboratorio nel quale vengono misurati.

Cos'è quindi più fondamentale? Lo spazio-tempo nel quale si svolgono gli eventi oppure il network di correlazioni legate allo stato quantistico che descrive le particelle che vengono osservate? Queste domande si rivolgono a comprendere la natura più profonda della realtà fisica e sono state riprese anche da altri ricercatori: Seth Lloyd sostiene che l'universo è un calcolatore quantistico e continuamente elabora il suo futuro.

Giacomo Mauro D'Ariano dell'Università di Pavia si è espresso a riguardo dicendo che non sono gli eventi ad avvenire nello spazio-tempo ma è quest'ultimo che emerge dal network degli eventi elementari. Federico Faggin, socio di questo Istituto, ha studiato a lungo la relazione tra l'informazione, come quella prodotta dalle misure quantistiche, e la consapevolezza che ne viene prodotta in un osservatore. Quest'ultima non può avere un substrato analogo ai sistemi fisici utilizzati nell'esperimento, ma ne condivide proprietà come il poter essere in stati puri. Faggin e D'Ariano hanno proposto per questo la teoria *Quantum Information-based Panpsychism*.

La storia di Anton Zeilinger con l'Italia e con Padova in particolare inizia nel 2003 quando, grazie a un finanziamento ottenuto dall'Università di Padova, l'Autore andò a proporli la collaborazione per studiare i fenomeni della comunicazione quantistica nel più vasto ambito possibile, lo spazio. La risposta fu positiva e dopo cinque anni di collaborazioni scientifiche, con visite sia a Padova che all'Osservatorio MLRO dell'Agenzia Spaziale Italiana ubicato a Matera, pubblicammo il lavoro che ne dimostrò la fattibilità.

Zeilinger ha continuato con l'estensione della verifica delle scelte casuali delle misure di Bell in diversi contesti, anche considerando molti interlocutori o lo sfruttamento dei segnali di quasar primordiali.

A Padova portiamo avanti queste ricerche sviluppando le tecniche per osservare

alcuni principi fondamentali, come la sovrapposizione degli stati e la possibilità di effettuare comunicazioni quantistiche, e anche il dualismo onda particella in linea tra lo spazio e la terra. Dal 2021 è attivo il centro Padua Quantum Technologies Research Center, che ha lo scopo di affrontare tematiche nell'ambito quantistico mettendo assieme le competenze di fisici, matematici, ingegneri e chimici.

Per concludere, questi sviluppi nei fondamenti della Fisica e nell'Informazione quantistica si sono mostrati anche fertili di applicazioni nella computazione, misura, simulazioni e comunicazioni quantistiche. È in corso un grande progetto di sviluppo tecnologico decennale, avviato in Europa nel 2018 proprio a Vienna, che con il nome di European Flagship Program in Quantum Technologies si articola in tanti settori, dalla ricerca fondamentale ai progetti di sviluppo di calcolo e comunicazioni quantistiche in tutto il continente. Analoghi progetti sono attivi negli USA, in Cina e in altri Paesi.

Oltre alle tecnologie, ci sono molti aspetti fondamentali che i lavori di Anton Zeilinger e della comunità scientifica hanno portato alla luce, e che rappresentano le sfide della ricerca nei prossimi anni. Al contempo, le parole di Anton Zeilinger ci danno anche un indirizzo su come affrontarle: sulla base delle conclusioni dei suoi studi, il confine tra realtà e informazione è probabilmente artificiale, ed egli ci invita a pensare che forse dovremmo unificarli in una visione sintetica.

\*Paolo Villoresi è professore ordinario di Fisica e direttore del Padua Quantum Technologies Research Center nell'Università di Padova, e socio corrispondente dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti