



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Prolusione
Simone Montangero

**“Einstein, la Gioconda e
le rivoluzioni quantistiche”**

Inaugurazione 802° anno accademico
Venerdì 9 febbraio 2024, Aula Magna “Galileo Galilei”

Magnifica Rettrice,
signor Ministro,
care colleghe e colleghi,
studentesse e studenti,
personale tecnico e amministrativo,
rettrici e rettori ospiti,
autorità civili, militari e religiose,
e tutti i convenuti a questa inaugurazione dell'anno accademico dell'Università degli Studi di Padova,

Innanzitutto ringrazio la nostra carissima Magnifica Rettrice per l'onore riservatomi. Onore che pochi anni fa, quando mi sono unito a questo Ateneo rientrando dall'estero, non mi sarei mai aspettato. Grazie.

La Fisica, si sa, è materia ostica. Meno antipatica di quanto si dica in giro, però. La disciplina che amo e che studio da tutta la vita è considerata di una complessità tale che genera diffidenza se non rifiuto: troppo complicata, troppo tecnica. La cosa sorprendente è che invece molte delle rivoluzioni della Fisica e degli sviluppi della nostra comprensione dell'universo - che poi è lo scopo della Fisica - non sono

nati da calcoli lunghi e incomprensibili, che possono essere seguiti solamente da chi ha anni di esperienza e di studi, ma dal ripensare concetti semplici.

Fatemi fare un elogio al pensiero complesso come pensiero profondo (ulteriore) su concetti semplici, talmente semplici che tutti noi li diamo per scontati: cosa è il tempo, cosa è lo spazio o quali sono le proprietà di un oggetto, cosa significa misurare e cosa significa informazione.

Per esempio, la celeberrima teoria della relatività sviluppata da Albert Einstein nasce da considerazioni profonde su cosa sia un orologio, come si misuri il tempo, sul cosa voglia dire che due eventi accadono simultaneamente. Nel suo lavoro del 1905 Einstein si preoccupa di specificare che, e qui cito, “*Quando [...] dico: “Quel treno arriva qui alle ore 7,” ciò significa: “Il porsi della lancetta piccola del mio orologio sulle 7 e l’arrivo del treno sono eventi simultanei.”*”. Ogni studentessa o studente di fisica impara nei primi anni di studi che da alcune ovvie considerazioni di questo tipo e con delle operazioni matematiche da scuola media può derivare la conseguenza sorprendente che il tempo è relativo, che scorre in maniera diversa se stiamo fermi o se ci muoviamo, e che il tempo e lo spazio non sono così diversi tra loro. Dopo più di un secolo, la teoria della relatività ci appare sempre sorprendente e genera ancora discussioni scientifico-filosofiche, ma l’evidenza sperimentale ci ha costretti ad accettare concetti contro intuitivi: se vogliamo che il nostro navigatore satellitare GPS funzioni, le correzioni relativistiche, che compensano il fatto che lo scorrere del tempo non è assoluto, vanno prese in considerazione. Una delle ultime conferme sperimentali di questa previsione teorica sfrutta la tecnologia degli “atomi intrappolati”, sviluppata nell’ambito della seconda rivoluzione quantistica di cui parleremo, e che nel 2022 ha permesso di confermare per esempio che sulla terra, in punti tra loro distanti alcuni millimetri, il tempo scorre in modo differente!

Analogamente, lo sviluppo della meccanica quantistica (la prima rivoluzione che fa nascere la Fisica moderna), ovvero lo sviluppo della scienza che spiega come si comporta il mondo atomico e subatomico, ha cambiato il nostro modo di pensare

fino a farci mettere in discussione che cosa sia una misura, concetto che diamo per scontato dalla prima volta che usiamo un righello. Sappiamo che le leggi fondamentali della meccanica quantistica, formulate circa un secolo fa, sono corrette perché ci hanno permesso di capire fenomeni altrimenti inspiegabili come quelli di cui vi parlerò fra poco, fare previsioni che si sono rivelate esatte a distanza di decenni e di costruire tecnologia funzionante come i compact disc o i puntatori laser che usiamo ogni giorno.

Queste leggi dicono che le misure sono “eventi intrinsecamente probabilistici”. Cosa vuol dire? Semplicemente, che quando osserviamo un oggetto o un sistema, che abbia come minimo due possibili stati diversi, avremo la possibilità di misurarne o osservarne uno.

Attenzione perché adesso, come promesso nel titolo, entra in scena la Gioconda con il suo sguardo enigmatico. Com'è noto la Monna Lisa può parere, a seconda di come la guardiamo, felice o triste. Se il nostro cervello la percepisce felice per cambiare abbiamo bisogno di distogliere lo sguardo e, riprovando, possiamo vederla triste. In realtà è entrambe le cose. Ecco, senza scomodare il genio di Leonardo, nel mondo quantistico è molto comune che questo accada.

Un esempio ancor più elementare: il lancio della moneta prima di una partita di calcio. Prima che la moneta cada a terra sappiamo che metà delle volte avremo testa e metà avremo croce. Ecco, una moneta quantistica può essere testa e croce nello stesso momento. Questo vale per le monete, per gli atomi, per gli elettroni e via così. I postulati della meccanica quantistica ci dicono che si può vedere solo uno dei due stati possibili e bisogna ripartire da capo per percepire lo stato differente. Insomma, è possibile preparare un sistema quantistico in uno stato che sia allo stesso momento due cose diverse: testa-croce, felice-triste, bianco-nero, zero-uno.

Mi rendo conto che è difficile da digerire e tendete a non fidarvi. Vi consoli il fatto che siete in ottima compagnia, infatti questa proprietà sconvolgente, lontanissima dalla nostra esperienza comune, così controintuitiva ha faticato ad essere accettata

anche dalla comunità scientifica, portando lo stesso Einstein, incredulo, a pronunciare la celeberrima frase *“Dio non gioca a dadi”*.

Sbagliava. Questa nuova proprietà, infatti, ormai è confermata da migliaia di esperimenti e, a partire dagli anni Ottanta del novecento, ha ispirato un nuovo tipo di tecnologia per elaborare l'informazione.

E qui è bene fare due passi, uno indietro e uno di lato, e osservare. Perché guardare le cose di lato spesso ci aiuta a capirle meglio.

A ben vedere, la nuova comprensione dell'elettromagnetismo avvenuta nell'800, ha portato allo sviluppo delle tecnologie dell'informazione odierne: telefoni cellulari, computer, sensori.

Allo stesso modo la capacità dei sistemi quantistici di poter essere allo stesso momento in due stati diversi eccetera eccetera, sta creando nuova tecnologia, e ancora ne creerà in futuro, questo è quello che i fisici chiamano la seconda rivoluzione quantistica.

Ma prima di descrivere le nuove possibilità di questa rivoluzione, dobbiamo parlare ancora del fulcro di tutto ciò, ovvero *l'entanglement*, l'intreccio quantistico, forse la proprietà quantistica più sconvolgente che, d'ora in avanti, come scrivono i notai negli atti, chiameremo *L'intreccio*.

L'intreccio è una conseguenza di questa capacità di un sistema quantistico di essere contemporaneamente in due stati diversi. Infatti, se una moneta può essere in una sovrapposizione coerente di testa e croce, cosa può succedere con due monete?

Vi assicuro che *L'intreccio* qui diventa davvero aggrovigliato ed entra in scena, negli anni Trenta del Novecento, il paradosso EPR (dalle iniziali dei suoi inventori: Einstein, Podolsky e Rosen) che ci spiega che le due monete sono indissolubilmente legate per cui, anche separate a migliaia di chilometri di distanza e guardate da due osservatori differenti, conserveranno sempre il loro stato, testa o croce, uguale tra loro.

Il paradosso era talmente paradossale (contrastava i fondamenti della fisica compresa l'insuperabilità della velocità della luce) che gli stessi scopritori rimasero dubbiosi e appesi.

Fu John Bell, trent'anni dopo, nel 1964, a proporre il primo esperimento realistico per testare questo paradosso, mentre la meccanica quantistica veniva utilizzata comunque con successo per sviluppare la teoria delle particelle elementari, i laser, e per costruire la bomba atomica come abbiamo visto nel recente film su Oppenheimer.

Altri vent'anni sono stati necessari per avere la prima dimostrazione in laboratorio dell'esperimento di Bell e, nel 1982 si sancì che *L'intreccio* è dimostrabile tanto che, finalmente, nel 2022 Alain Aspect, John Clauser e Anton Zeilinger sono stati insigniti del Premio Nobel in Fisica proprio per i loro esperimenti sulla proposta di Bell.

E qui dobbiamo fermarci di nuovo a riflettere: questa lunga serie di esperimenti che hanno portato al premio dell'Accademia Svedese, che trattano argomenti puramente teorici e senza immediata rilevanza pratica o tecnologica, sono stati eseguiti a Parigi e Innsbruck. E proprio questi esperimenti hanno portato la Francia e l'Austria a essere riconosciute oggi leader mondiali nello sviluppo delle tecnologie quantistiche.

Le leadership nello sviluppo tecnologico e scientifico si costruiscono nel tempo e per questo, quando si definiscono le politiche di sviluppo scientifico e tecnologico, occorre finanziare tutti i tipi di ricerca: di base, applicata e tecnologica.

Parallelamente agli esperimenti sull'*intreccio*, dagli anni Ottanta si iniziavano a strutturare varie proposte che miravano a usare la conoscenza accumulata e a sfruttarla per sviluppare nuova tecnologia: erano gli albori della seconda rivoluzione quantistica. Col mattone d'informazione classico e fisso che è il BIT e col mattone nuovo e versatile che è il QUBIT si è arrivati in alcuni decenni a costruire un pano-

rama di nuove tecnologie che possono rivoluzionare le produzioni industriali e le nostre vite, come l'elettronica e la fotonica che hanno cambiato il corso del '900.

Per dare un'idea di come vanno queste cose vorrei ricordare che la leggendaria CEP, il primo calcolatore costruito in Italia su indicazione di Enrico Fermi inaugurato a Pisa nel 1961, era costituito da una serie di armadi che riempivano varie stanze. Bene, se usassimo ancora quella tecnologia la memoria di uno smartphone odierno dovrebbe essere contenuta in una fila di armadi lunga più di mille chilometri, da Padova a Parigi.

Qui vedete una figura tratta dal Quantum Manifesto, un documento sottoscritto nel 2015 da più di tremila scienziate e scienziati europei che mostrava una previsione sul possibile sviluppo di queste tecnologie e chiedeva all'UE di finanziarle. Come si vede, le tecnologie interessate vanno dai sensori alle comunicazioni, dagli orologi ai computer. Ognuna di queste tecnologie è ad oggi a un diverso grado di sviluppo e ognuna promette delle efficienze maggiori o nuove capacità rispetto alla corrispettiva classica. Per esempio, esistono già in commercio delle schede che permettono di comunicare tramite codici cifrati sicuri sfruttando proprio la sovrapposizione quantistica. Negli ultimi minuti del mio tempo, mi soffermerò sul calcolo e i calcolatori quantistici, in quanto la loro ideazione, costruzione e utilizzo rappresentano probabilmente la sfida più affascinante.

Già negli anni Ottanta si sviluppavano i primi algoritmi quantistici che possono risolvere classi di problemi estremamente difficili anche per i più potenti supercalcolatori al mondo.

A distanza di quarant'anni, gli algoritmi quantistici promettono ampie ricadute scientifiche e industriali. Tra i più noti, l'algoritmo di Grover mostra come un calcolatore quantistico possa cercare un elemento in un database non strutturato molto più efficientemente dei calcolatori classici: ovvero ci spiega come poter cercare un ago in un pagliaio. L'unico algoritmo classico di ricerca per trovare l'ago è guardare una ad una le pagliuzze e controllare che lì in mezzo non ci sia l'ago. Se il pagliaio contiene un milione di pagliuzze, dobbiamo fare un milione di con-

trolli. Grover può trovarlo facendo solo mille controlli! E il guadagno in tempo cresce con il numero delle pagliuzze nel pagliaio. Se pensate ora che il pagliaio sia internet e l'ago quel che cercate, il risparmio di tempo diventa immenso. Ancora più rilevante sarebbe il risparmio di energia consumata e quindi il risparmio economico.

A oggi sono stati sviluppati algoritmi quantistici che sono più vantaggiosi in termini di tempo o energia risparmiati dei corrispettivi classici per risolvere moltissimi problemi in ingegneria, fisica, chimica, scienza dei materiali, informatica, logistica e ottimizzazione industriale.

Sappiamo come fare in teoria, ma l'impatto di queste tecnologie non è ancora entrato nell'industria e nella nostra vita di tutti i giorni e ci vorrà ancora del tempo perché questo avvenga. Il motivo è che per eseguire un algoritmo quantistico un calcolatore deve essere in grado di creare, mantenere e manipolare le sovrapposizioni quantistiche e *L'intreccio*, non fra due monete-atomi-qubit ma fra decine, centinaia di esse. E questa è una sfida tecnologica impressionante, perché richiede di essere in grado di manipolare singoli atomi con una precisione estrema, di isolarli dal mondo esterno per non introdurre errori ma allo stesso tempo manovrarli e misurarli dall'esterno. Somiglia all'antico rompicapo di salvare la capra e i cavoli.

La prima dimostrazione sperimentale della possibilità di costruire un computer quantistico è stata ottenuta nel 2003 a Innsbruck dal gruppo guidato da Rainer Blatt e Peter Zoller.

Da allora, molti laboratori di ricerca e multinazionali hanno sviluppato diverse tecnologie con alterni risultati ma con un costante avanzamento. Recentemente, una nuova tecnologia ha permesso di fare un balzo in avanti nella nostra capacità di controllo di singoli atomi: il gruppo guidato da Antoine Broways a Parigi ne ha dimostrato le potenzialità con splendide immagini. Quello che vedete è la Torre Eiffel composta da singoli atomi, pixel per pixel. Il gruppo concorrente, guidato da Misha Lukin ad Harvard, si è spinto anche oltre. Siamo molto lontani dai giochi elettronici quantistici ma possiamo già riprodurre la grafica degli anni 80.

Entrambi i gruppi, oltre a creare queste sorprendenti immagini, usano questa tecnologia per costruire computer quantistici e le rispettive startup sono leader mondiali. Un paio di mesi fa, a fine 2023, il team di Harvard ha fatto un balzo in avanti anticipando le più rosee previsioni di almeno 5 anni: hanno dimostrato sperimentalmente l'esecuzione di algoritmi quantistici con circa 300 atomi e di avere le capacità tecniche per aumentarne il numero in un futuro prossimo, compresi metodi automatici di correzione degli errori. Uno dei pionieri del campo, John Preskill del California Institute of Technology, ha commentato questo risultato asserendo che siamo entrati in una nuova era.

Questi e molti altri risultati recenti mostrano che la seconda rivoluzione quantistica è in continuo sviluppo promettendo nel medio termine molti cambiamenti e possibilità, sia in ambito scientifico che industriale.

C'è una frase, formidabile, illuminante, pronunciata dall'imprenditore australiano Graeme Wood che dice: *“Il cambiamento non è mai stato così veloce e non sarà mai più così lento”*.

L'onda è alta e in movimento, bisogna esserci. E noi ci siamo. Anche grazie al costante supporto che l'Ateneo patavino ha mostrato verso le attività di ricerca sulle scienze e tecnologie quantistiche, supporto che sta permettendo e permetterà alle colleghe e colleghi della nostra Università di partecipare alla seconda rivoluzione quantistica. In prima linea.

Grazie.

