[quanti]

anno 17 numero **33** / 10.22

asimmetrie
rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare

asimmetrie

Care lettrici e cari lettori,

Può sembrare sorprendente che una teoria, la meccanica quantistica, che ha oltre cento anni e innumerevoli conferme sperimentali a livello atomico e subatomico, possa essere un argomento di attualità. Per noi che ci occupiamo di fisica fondamentale gli effetti quantistici sono il pane quotidiano: i termini di interferenza nelle sezioni d'urto misurate agli acceleratori di particelle sono figli del principio di sovrapposizione; le particelle virtuali sono legate al principio di indeterminazione; le coppie mesone-antimesone prodotte a particolari energie negli urti elettrone-positrone sono entangled e questa caratteristica svolge un ruolo chiave nella loro misura; l'equazione di Schrödinger governa l'evoluzione temporale dei nucleoni, e così via.
Tuttavia, il premio Nobel per la fisica 2022 ci ricorda che la meccanica quantistica non è più solo la teoria dell'infinitamente piccolo: proprietà tipicamente quantistiche come l'entanglement sono state verificate su scale macroscopiche negli ultimi decenni, aprendo la strada a tecnologie che potrebbero avere effetti rivoluzionari su alcuni aspetti della nostra vita quotidiana. Anche se la meccanica quantistica ha già inciso profondamente sulle nostre vite (transistor e laser funzionano sulla base delle proprietà quantistiche dei semiconduttori e della radiazione elettromagnetica), queste nuove tecnologie di seconda generazione, che trovano applicazioni da computer quantistici e crittografia fino a sensoristica e *imaging*, promettono di avere un impatto altrettanto rilevante e per questo stanno attraendo grandi investimenti pubblici e privati. Come INFN non restiamo indietro: siamo coinvolti in varie attività nelle quali le nostre competenze di fisica e tecnologia possono essere messe a frutto. Siamo partner del progetto DOE-SQMS al Fermilab per lo sviluppo di sensoristica e computer quantistici, siamo attivi nel programma QUANTERA dell'Unione Europea, nell'ambito del PNRR siamo i proponenti del centro nazionale ICSC per supercalcolo, *big data* e *quantum computing* e partecipiamo al partenariato esteso NQSTI su calcolo e tecnologie quantistiche.
Al di là delle implicazioni tecnologiche, alcuni aspetti della meccanica quantistica, come ad esempio la transizione dal regime quantistico a quello classico, restano un mistero anche per i fisici. Immergetevi nella lettura e prendete confidenza senza timore con le idee e i principi alla base della meccanica quantistica. E se vi sembra di non capire, non vi preoccupate: lo stesso Richard Feynman ha detto: "Credo di poter tranquillamente affermare che nessuno capisce la meccanica quantistica", e lui ne ha scritta una formulazione tutta sua!

Buona lettura.

Antonio Zoccoli
presidente INFN

asimmetrie
Rivista dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare

Registrazione del Tribunale di Roma
numero 435/2005 del 8 novembre 2005.
Rivista pubblicata da INFN.

Semestrale, anno 17,
numero 33, ottobre 2022

direttore editoriale
Antonio Zoccoli, *presidente Infn*

direttore responsabile
Catia Peduto

direttore comitato scientifico
Vincenzo Barone

comitato scientifico
Nicolao Fornengo
Giuliana Galati
Sandra Leone
Paolo Pani
Paolo Valente

redazione
Matteo Massicci

hanno collaborato
Francesco Basso Basset, Catalina Curceanu, Milena D'Angelo, Marco Genovese, Anna Greco, Federico Laudisa, Lorenzo Maccone, Massimo Palma, Saverio Pascazio, Michele Rota, Rinaldo Trotta, Paola Verrucchi

contatti redazione
INFN Ufficio Comunicazione
Piazza dei Caprettari 70
I-00186 Roma
T +39 06 6868162
comunicazione@presid.infn.it
www.infn.it

impaginazione
Hylab

stampa
Tmb Stampa srl

su carta 100% riciclata
certificata FSC recycled
Recytal
240 - 130 g/m2
(per difficoltà di approvvigionamento
dovute alla pandemia)

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'INFN, proprietario della pubblicazione.

Finita di stampare nel mese di ottobre 2022.
Tiratura 17.000 copie.

come abbonarsi
L'abbonamento è gratuito.

Per abbonarsi compilare l'apposito form sul sito www.asimmetrie.it

In caso di problemi contattare la redazione all'indirizzo comunicazione@presid.infn.it

sito internet
Asimmetrie 33 e tutti i numeri precedenti della rivista sono disponibili anche online su www.asimmetrie.it

e-magazine
Asimmetrie è anche disponibile in versione digitale, ricca di ulteriori contenuti multimediali, come app di iOS e Android sull'Apple Store e nel Google Play Store.

crediti iconografici
Foto copertina © Supoj Buranaprapapong / Dreamstime // foto p. 4 © Sergey Gerashchenko / 123RF; fig. b p. 5 ©AIP Emilio Segrè Visual Archives; figg. c,d,e pp. 7-9 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; fig. p. 10 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; fig. f p. 11 ©Petra Klawikowski // fig. pp. 12,13 © Hylab/ Asimmetrie-INFN// foto a p. 14 © @AIP Emilio Segrè Visual Archives; fig. b p. 15 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto c p. 16 ©CERN; fig. p. 17© Hylab/ Asimmetrie-INFN // fig. a p. 18 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto c p. 20 © AIP Emilio Segrè Visual Archives; foto d p. 21 © Fronteiras_do_Pensamento_Wikimedia // fig. a p. 22 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto b p. 23 ©C. Curceanu-LNF-INFN; foto c p. 24 © Aspelmeyer Group / University of Vienna / Kahan Dare / Lorenzo Magrini / Manuel Reisenbauer // foto a p. 25 © E. Lopopolo; foto b, c p. 26 © CERN; foto d p. 27 © R. Osellame, A. Crespi-Istituto di Fotonica e Nanotecnologie - CNR; foto p. 28 // fig. a p. 29 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto b p. 30 © Lulie Tanett; foto c p.30 © The Royal Society; fig. c p. 31 © IBM // figg. A, b, c p. 32-34 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto d p. 35 © Jaqueline Godany-Wikimedia // foto a p. 36 Niels Bohr Archive, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives; foto c p. 38 © GJo-Wikipedia // fig. a p. 40 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto b p. 41 © INFN // foto b p. 43 ©INFN // foto a p. 44 ©THEPALMER-iStock Photo; fig. b p. 45 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // fig. b p. 47 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // fig. p. 48 ©A. Nagar/ Asimmetrie-INFN.

Ci scusiamo se, per cause del tutto indipendenti dalla nostra volontà, avessimo omesso o citato erroneamente alcune fonti.

as

33 / 10.22
[quanti]

Un secolo di meraviglia 4
di Paola Verrucchi

[as] Glossario quantico 12

Entanglement 14
di Marco Genovese

Una storia di amicizia? 18
di Lorenzo Maccone

Sulle tracce felpate del gatto di Schrödinger 22
di Catalina Curceanu

Quanti in pratica 25
di Saverio Pascazio

Vantaggio o supremazia? 29
di Massimo Palma

Comunicare nell'era dei quanti 33
di Michele Rota, Francesco Basso Basset e Rinaldo Trotta

[as] radici 36
Contraria sunt complementa
di Federico Laudisa

[as] lampi 39

[as] intersezioni 40
Imaging quantistico
di Milena D'Angelo

[as] riflessi 42
Rivelatori quantistici a caccia della materia oscura
di Matteo Massicci

[as] traiettorie 44
Lo stregatto nel paese dei quanti
di Giuliana Galati

[as] illuminazioni 46
Tris quantistico
di Anna Greco

[as] segni 48

Un secolo di meraviglia

Dalla prima alla seconda rivoluzione quantistica

di Paola Verrucchi

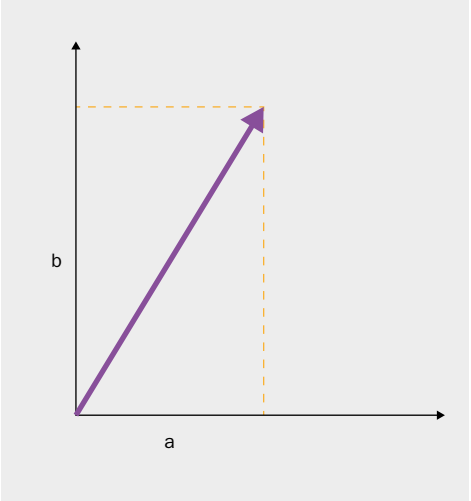
La meccanica quantistica è una splendida creazione dell'intelletto umano, battezzata purtroppo con un brutto binomio. Il sostantivo "meccanica" è riduttivo; l'aggettivo "quantistica" restringe l'ambito di riferimento. Complessivamente il termine sembra indicare uno strumento dall'uso specifico e limitato. Niente di più lontano da ciò di cui stiamo parlando, ovvero una teoria scientifica che permette di descrivere la stragrande maggioranza dei fenomeni oggi sperimentalmente osservati, da quelli che riguardano le particelle elementari a quelli relativi ai buchi neri nell'universo. Sebbene la storia della scienza suggerisca che una descrizione ancora più generale emergerà in futuro, la meraviglia che si prova di fronte a uno strumento tanto elegante e potente è innegabile. Nei primi decenni del secolo scorso deve essersi trattato di uno spaventato stupore, più che di meraviglia. Stupore per l'estraneità della realtà che la meccanica quantistica descrive rispetto all'esperienza quotidiana, spavento per il potenziale distruttivo nei confronti della fisica classica (forza trainante per illuminismo e rivoluzione industriale e intoccabile in quanto tale).
Il binomio di cui sopra è stato probabilmente funzionale a ridurre tale spavento, nella misura in cui l'aggettivo relega ciò che la teoria descrive a un ambito di cui non facciamo parte, allontanando e rendendo meno spaventose le sue conseguenze.
Gli scritti degli scienziati di quel periodo (Max Planck, Albert Einstein, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Niels Bohr e tanti altri), e le testimonianze circa le loro appassionate discussioni, mostrano con quanta riluttanza alcuni, o con quanto entusiasmo altri, si ponessero di fronte allo stranissimo mondo che la nuova teoria andava delineando. Ne emerge una conflittualità tipica delle rivoluzioni, ivi incluse quelle scientifiche.

a.
Werner Heisenberg e Niels Bohr, due degli artefici della prima rivoluzione quantistica.

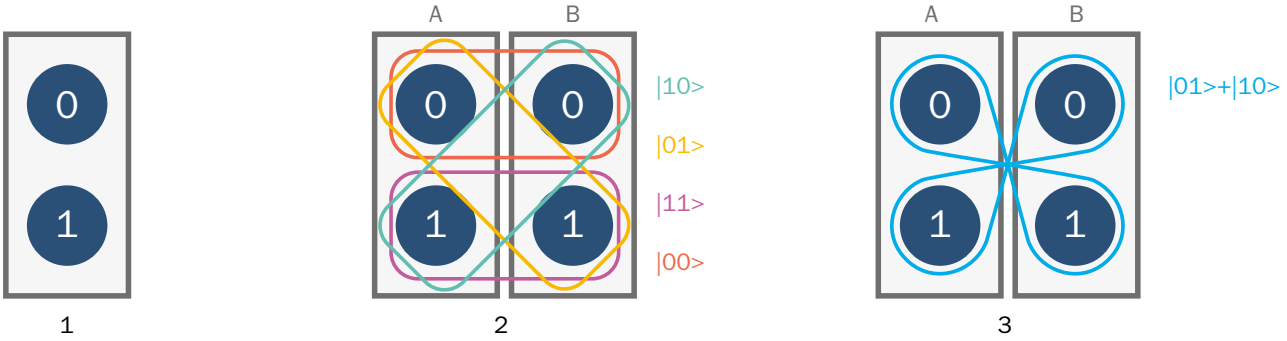
b.
Con i suoi esperimenti sulla disuguaglianza di Bell, il fisico francese Alain Aspect (nella foto) ha contribuito ad avviare la seconda rivoluzione quantistica. Nell'ottobre 2022 è stato insignito del premio Nobel per questi suoi studi.

Il confronto con lo sconquasso causato dalla teoria eliocentrica di Copernico, con il sostegno della verifica sperimentale ad essa fornito da Galileo, è pertinente. Doveva certo sembrare assurdo, a una persona che per tutta la vita aveva visto una palla luminosa girare intorno al suo capo, immaginare che quel moto fosse dovuto alla rotazione della terra intorno a se stessa. Nei secoli la cultura occidentale ha accettato questa assurdità, come atto di fede nel metodo scientifico galileiano, ma è stato solo quando siamo andati nello spazio che abbiamo davvero capito cosa significhi essere una minuscola pallina che ruota su se stessa e intorno al suo sole in un immenso universo.
Torniamo dunque alla meccanica quantistica: i suoi primi cinquant'anni, nei quali collochiamo la cosiddetta "prima rivoluzione quantistica", sono caratterizzati da una serie ininterrotta di conferme sperimentali tanto straordinarie da far passare in secondo piano la perplessità concettuale che si palesava in alcuni famosi paradossi, come quello del gatto di Schrödinger, e nella formulazione delle prime cosiddette "interpretazioni" della teoria. È il periodo del motto "zitto e calcola", l'invito a non perdersi nel labirinto delle possibilità offerte dalla meccanica quantistica, limitandosi a usarla come strumento predittivo di grande precisione. Funzionale a questo atteggiamento è la scelta della rassicurante interpretazione "di Copenaghen", che restringe l'ambito di applicazione della teoria all'infinitamente piccolo, escludendo la possibilità di osservare nella vita di tutti i giorni fenomeni tanto assurdi da mettere in discussione l'oggettività della percezione umana e minare alle fondamenta il castello della fisica classica. Occorre arrivare agli anni '60 per registrare i primi cedimenti di questa posizione, segnalati in primis dal lavoro del 1964 di John Bell: con tale lavoro il fisico nord-irlandese sfida la comunità scientifica a riportare nei laboratori la discussione sui fondamenti della meccanica quantistica, nel frattempo quasi completamente migrata in ambito filosofico. La sfida viene raccolta da alcuni fisici visionari come Daniel Freedman, John Clauser e Alain Aspect (gli ultimi due insigniti del premio Nobel della fisica del 2022, assieme ad Anton Zeilinger), solo per citarne alcuni, la cui indagine sperimentale mostrerà che non esistono mondi retti dalle leggi della meccanica quantistica distinti da quelli in cui vige la disciplina della fisica classica: l'universo è quantistico e noi ne siamo parte, anche se la nostra esperienza quotidiana sembra dire il contrario. È la "seconda rivoluzione quantistica", quella in cui la meccanica quantistica diviene strumento per leggere la realtà che ci circonda e progettare dispositivi da usare e controllare secondo le nostre necessità. E così, a partire dai primi anni '90 del secolo scorso,

diverse tecnologie quantistiche si sviluppano intorno a esigenze di comunicazione, crittografia, computazione e metrologia, mentre la teoria viene ripulita, diventa elegante e si stabilizza su un numero sempre minore di elementi portanti, i cosiddetti "postulati".
E siccome siamo arrivati ai giorni nostri, è opportuno dedicare quel che resta di questo articolo proprio a loro, ai postulati della meccanica quantistica, sorprendenti per la novità della visione e l'eleganza della formulazione.
Seguendo un percorso tipico di molte teorie scientifiche, la meccanica quantistica inizia con il dirci come descrivere lo "stato" di un sistema. Stato è un concetto generico, come testimonia l'uso che facciamo del termine quando affermiamo di essere in un pessimo stato o ci chiediamo quale sia lo stato del nostro giardino. Il concetto diventa scientificamente utile quando a esso si associa uno strumento formale in grado di veicolare informazioni sulle proprietà del sistema che in quello stato si trova. In fisica classica tale strumento è il punto in un opportuno spazio: per esempio, in meccanica, un punto nello spazio delle fasi, le cui coordinate rappresentano la posizione e la quantità di moto della particella.
Il primo postulato della meccanica quantistica stabilisce invece che lo stato sia formalmente rappresentato da un vettore, detto appunto "vettore di stato". Dal punto al vettore sembra un passaggio innocuo: i vettori, come i punti, sono oggetti semplici, segmenti orientati introdotti ben prima dell'avvento della meccanica quantistica, abbondantemente usati in fisica classica per descrivere forze, velocità o momenti angolari, o in generale proprietà dei sistemi, e per questo familiari a molti di noi.
Quello che rende il passaggio rivoluzionario, e per certi versi sconcertante, è l'uso del vettore per descrivere lo stato del sistema e non una sua proprietà. Perché sconcertante? Perché una delle caratteristiche principali dei vettori è che possono essere sommati. Molti ricorderanno la regola del parallelogramma. Altri sapranno comunque individuare le componenti orizzontale e verticale di un vettore obliquo, riconoscendo istintivamente che tali componenti si sommano per dare come risultante il vettore stesso. Allo stesso modo una componente di vernice blu si sovrappone a una componente gialla, per formare una vernice verde. L'esempio dei colori ci aiuta a capire che il primo postulato della meccanica quantistica, in breve "lo stato di un sistema è descritto da un vettore", ci consegna lo sconvolgente "principio di sovrapposizione", secondo il quale stati diversi di un sistema possono essere sovrapposti, cioè, formalmente, i rispettivi vettori di stato possono essere sommati. Diventa così possibile che un sistema sia contemporaneamente orizzontale e verticale, giallo e blu, 0 e 1 e infine, per assurdo, vivo e morto, come il famoso gatto di Schrödinger.
Uno degli aspetti più affascinanti della meccanica quantistica è il modo in cui struttura matematica e descrizione della realtà si corrispondono: il segno "+", che compare nell'operazione di somma fra vettori, corrisponde precisamente alla congiunzione logica "e" nella descrizione di un mondo in cui i sistemi si possono trovare contemporaneamente in stati diversi. Non si tratta di essere orizzontali o verticali, forse gialli o forse blu, 0 o più probabilmente 1, come si ostinava a sostenere Einstein, il quale non ha mai accettato la sovrapposizione di stati come fenomeno reale (ritenendo fosse un modo sbagliato di giustificare una mancanza di informazione analoga a quella che costringe a un'analisi statistica): la teoria ci dice che un sistema può essere contemporaneamente in più stati diversi. E se questo è già di per sé strano, quando mettiamo insieme due sistemi, le cose si fanno ancora più sorprendenti.
Supponiamo che i due sistemi, che indicheremo con A e B, abbiano ognuno a disposizione due stati, chiamiamoli |0> e |1> per semplicità, usando il simbolo |·> (ket), introdotto da Paul Dirac: evidentemente la coppia A-B avrà a disposizione quattro



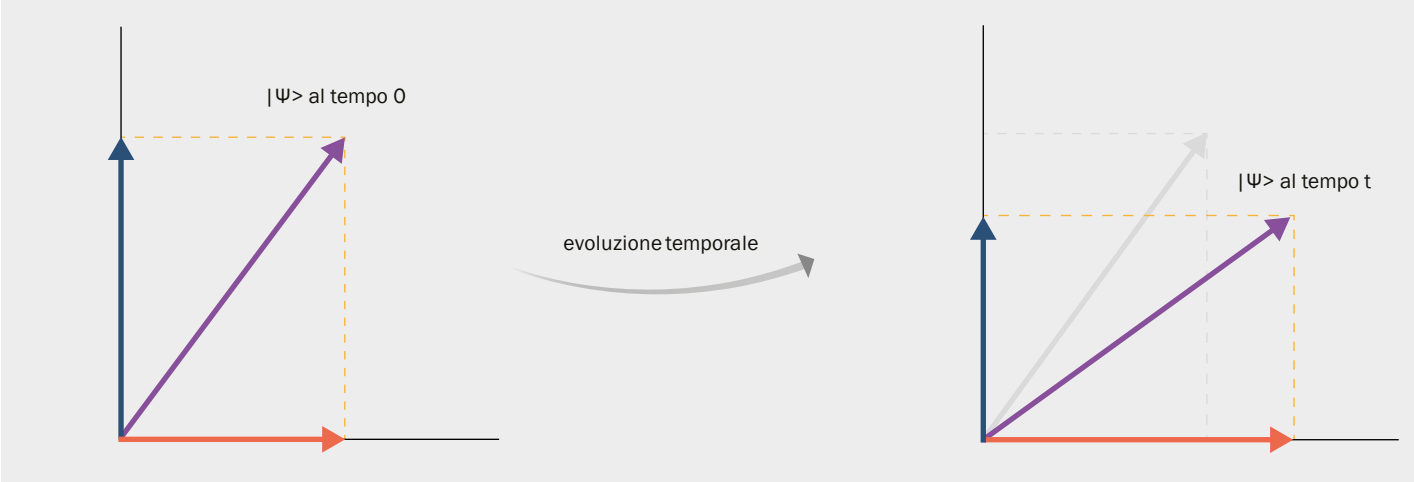
c.
Lo stato di un sistema è descritto da un vettore in un particolare spazio vettoriale, lo "spazio degli stati". Essendo rappresentati da vettori, gli stati di un sistema possono essere sommati tra loro ("principio di sovrapposizione"): si ottengono in questo modo infiniti altri stati possibili del sistema.

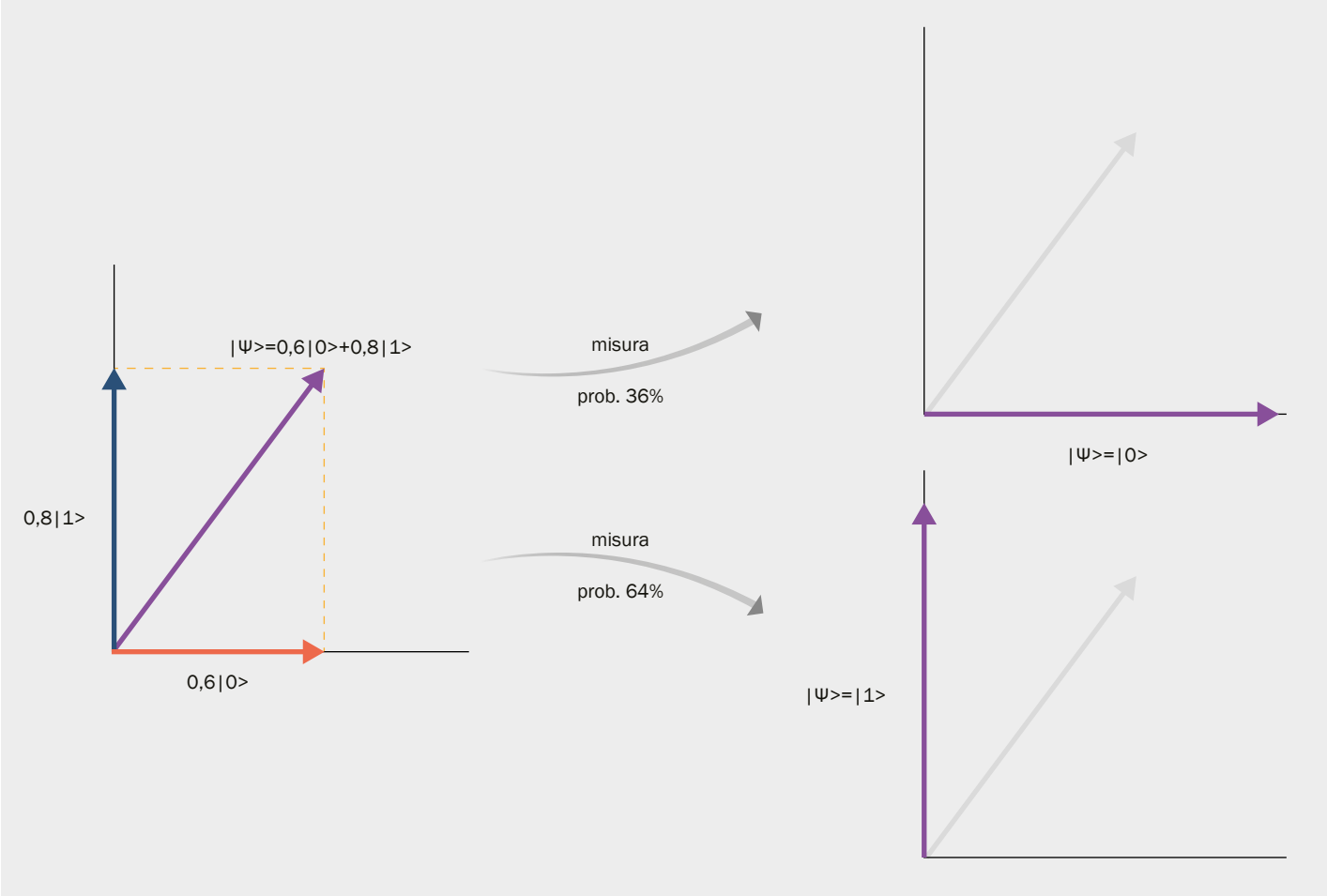


stati (|00>, |01>, |10>, |11>), nonché le loro possibili somme, dato il principio di sovrapposizione. A e B potranno essere entrambi 0 e contemporaneamente entrambi 1, cioè nello stato descritto dal vettore |00> + |11>; oppure potranno trovarsi in uno stato in cui, quando A è 0, B è 1, e quando A è 1, B è 0, cioè nello stato descritto dal vettore |01>+|10>. È importante notare che nel ragionamento non c'è riferimento al fatto che A e B siano vicini o lontani, che possano comunicare fra loro oppure no. Il loro è uno stato intrinsecamente di coppia: non è possibile dire in che stato sia A senza considerare lo stato di B. In gergo diciamo che lo stato dei due sistemi è "entangled" (un termine inglese che vuol dire "intrecciato"), o anche che A e B sono quantisticamente correlati, con l'avverbio a indicare un legame che resiste, in linea di principio, alla separazione fisica e al passar del tempo.
Non si può metabolizzare il principio di sovrapposizione, e l'entanglement che da esso deriva, senza chiedersi cosa succede effettuando una misura su un sistema quantistico, o parte di esso.
In altri termini, cosa potrà rispondere un vettore obliquo alla domanda "sei orizzontale o verticale"? O anche: come risponderanno A e B nello stato |00>+|11> alla domanda "siete entrambi zero o entrambi uno"?
Seguendo una logica ferrea, la meccanica quantistica ci insegna che tutte le alternative di risposta che mettiamo a disposizione definendo la nostra domanda sono possibili, e la capacità predittiva della teoria consiste nel fornirci la probabilità con cui otterremo l'una o l'altra risposta. Inoltre, la selezione della specifica risposta avviene contestualmente a un reale cambiamento di stato del sistema: il vettore obliquo, rispondendo "orizzontale", si sdraierà; A e B, rispondendoci "siamo entrambi 0", si porteranno nello stato |00>.
L'inevitabile interazione fra noi che domandiamo e il sistema che deve darci una risposta non è trascurabile, come si assume implicitamente in fisica classica, e provoca un cambiamento dello stato del sistema sottoposto a interrogatorio, cioè indagato sperimentalmente.
La descrizione del processo di misura secondo la meccanica quantistica, sintetizzata nel cosiddetto postulato di misura, ci consegna la formula (detta "regola di Born") per determinare la probabilità di ottenere uno dei possibili risultati (la risposta) facendo una specifica misura (la domanda) a un sistema che si trova in un certo stato, nonché la regola che stabilisce come tale stato cambi in base al risultato ottenuto.
A volte si racconta questo postulato ammantandolo di stranezza, proponendo come stupefacente il fatto che la misurazione possa modificare lo stato del sistema sperimentalmente osservato. Invece non c'è molto di strano: il trasferimento di informazione implicito nello schema domanda-risposta richiede un'interazione, e questa può sicuramente generare cambiamento negli attori dello scambio.
Certo ci sono ancora molte questioni aperte riguardo a come questo avvenga e perché possa essere ignorato, o quasi, nelle attività di tutti i giorni. Ma questo non dovrebbe inquietare, piuttosto affascinare ed entusiasmare. Affascinare per l'eleganza con cui il linguaggio

d.

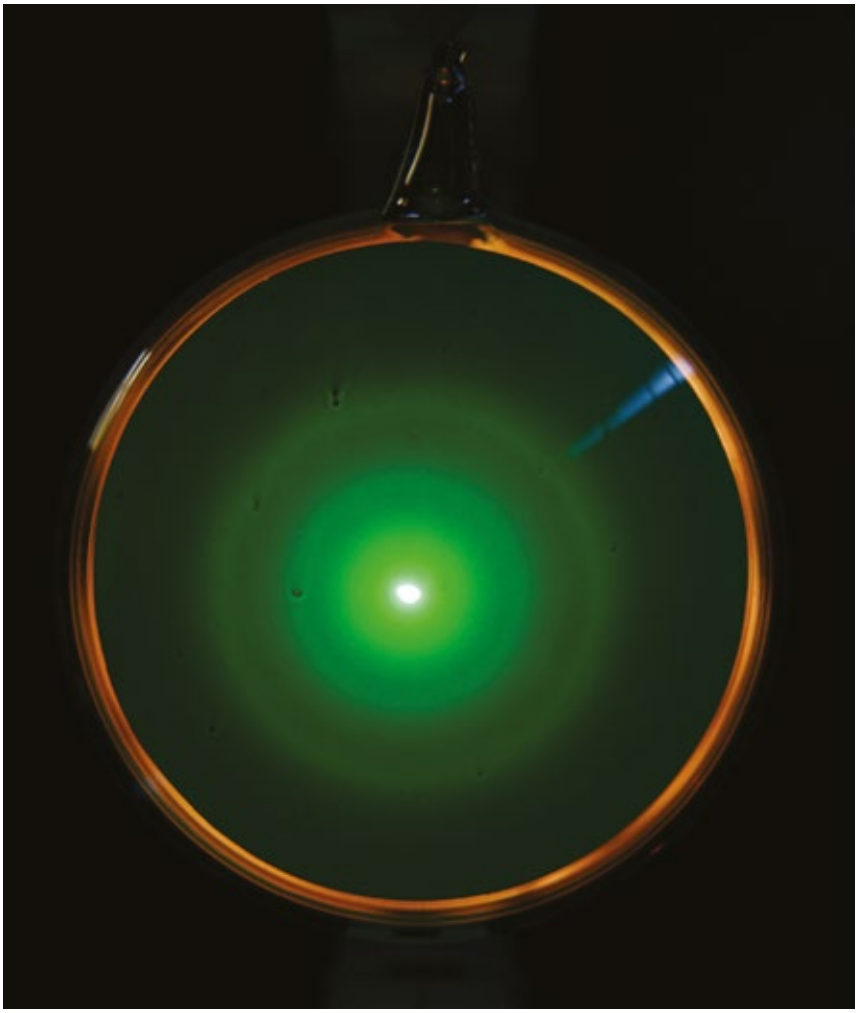
1. Un sistema a due stati ("qubit") può trovarsi nello stato |0>, nello stato |1> o in una qualunque sovrapposizione di |0> e |1>.
2. Gli stati fattorizzabili di due sistemi A e B a due stati: per esempio, |10> vuol dire che A si trova in |1> e B in |0>.
3. Uno stato "entangled" di due sistemi A e B.





e.
In alto: L'evoluzione temporale di uno stato |ψ>, governata dall'equazione di Schrödinger, è deterministica: dato lo stato iniziale al tempo 0, lo stato del sistema in un qualunque istante successivo è esattamente determinato. In basso: La dinamica della misura non è deterministica. Supponendo che lo stato iniziale del sistema sia una sovrapposizione del tipo |ψ>=0,6|0>+0,8|1>, all'atto della misura il sistema "collassa" istantaneamente, con probabilità $(0,6)^2$=0,36, nello stato |0> e, con probabilità $(0,8)^2$=0,64, nello stato |1> ("regola di Born"). Lo stato in cui si troverà il sistema dopo la misura può essere predetto solo probabilisticamente.

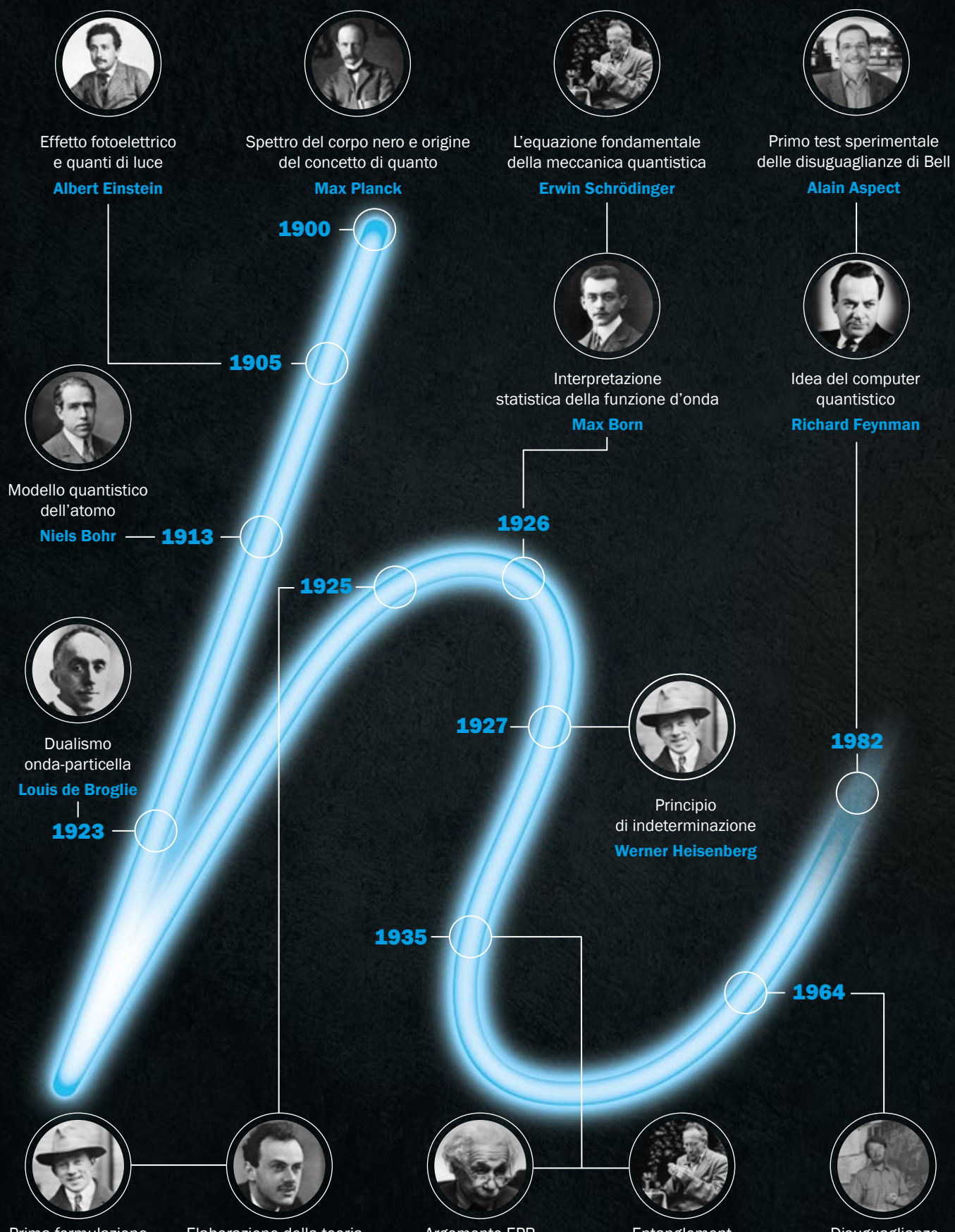
formale della meccanica quantistica prevede fenomeni assolutamente inattesi eppure reali (cioè sperimentalmente verificati in modo assolutamente indiscutibile). Entusiasmare per le infinite possibilità che tali fenomeni offrono, in applicazioni e nuove tecnologie (come illustrato dagli articoli successivi).
Dedichiamo infine qualche riga a due considerazioni di carattere generale. Allontanandoci temporalmente dal positivismo illuminista, abbiamo imparato che la scienza ha un margine di libera interpretazione. La fisica non fa eccezione, come ci mostra la meccanica quantistica con le sue svariate interpretazioni, tutte accettabili purché compatibili con la rigorosa formulazione e la precisissima capacità predittiva della teoria stessa.
A volte la possibilità di essere diversamente interpretata è vista come una debolezza, un presagio di fallimento. Può invece essere considerata una preziosa libertà, della quale riconoscere i ben definiti confini per poi godersela nell'esplorazione del mondo intorno a noi. Peraltro, questa libertà interpretativa deriva da un'altra delle caratteristiche peculiari della meccanica quantistica, ovvero il suo essere costruzione intellettuale profondamente collettiva. Noi parliamo di sistema copernicano, relatività galileiana, meccanica di Newton, elettromagnetismo di Maxwell, gravità di Einstein... ma i padri della meccanica quantistica sono troppi. Anche considerando solo quelli il cui nome compare in una locuzione frequente (costante di Planck, atomo di Bohr, ipotesi di de Broglie, equazione di Schrödinger, regola di Born, principio di indeterminazione di Heisenberg, principio di indistinguibilità di Pauli, equazione di Dirac...), l'elenco è lunghissimo, a testimonianza del fatto che c'è voluto il contributo di molti grandi scienziati per costruire, a partire dagli inattesi e incomprensibili risultati degli esperimenti, una teoria completa e coerente.
Ecco, questo è uno dei più importanti insegnamenti che la storia della meccanica quantistica ci consegna: la ricerca scientifica è azione collettiva, condivisione, confronto, discussione e sinergia, forse proprio perché l'universo stesso, che la scienza studia e vuole comprendere, altro non è che uno straordinario esempio di convivenza.



f.
Una figura di diffrazione di elettroni, caratterizzata da una successione di zone più chiare e zone più scure, corrispondenti a un maggiore o minore addensamento di elettroni sullo schermo. Il fatto che gli elettroni producano delle figure di diffrazione è una conseguenza dell'ipotesi quantistica di de Broglie, secondo cui ogni particella si comporta come un'onda.

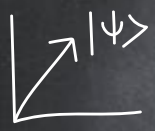
Biografia
Paola Verrucchi è ricercatrice in fisica presso l'Istituto dei Sistemi Complessi del CNR, associata alla sezione di Firenze dell'INFN. La sua attività di ricerca riguarda la fisica teorica dei sistemi quantistici.

10.23801/asimmetrie.2022.33.1


Effetto fotoelettrico e quanti di luce
Albert Einstein
Spettro del corpo nero e origine del concetto di quanto
Max Planck
L'equazione fondamentale della meccanica quantistica
Erwin Schrödinger
Primo test sperimentale delle disuguaglianze di Bell
Alain Aspect
1900
1905
Interpretazione statistica della funzione d'onda
Max Born
Idea del computer quantistico
Richard Feynman
Modello quantistico dell'atomo
Niels Bohr
1913
1926
1925
Dualismo onda-particella
Louis de Broglie
1927
1982
Principio di indeterminazione
Werner Heisenberg
1923
1935
1964
Prima formulazione della meccanica quantistica
Werner Heisenberg
Elaborazione della teoria
Max Born, Werner Heisenberg, Pascual Jordan, Paul Dirac
Argomento EPR sull'incompletezza della meccanica quantistica
Albert Einstein, Boris Podolsky, Nathan Rosen
Entanglement e paradosso del gatto
Erwin Schrödinger
Disuguaglianze di Bell
John S. Bell

[as] GLOSSARIO QUANTICO

STATO



Lo stato di un sistema quantistico è descritto da un vettore appartenente a uno spazio vettoriale detto "spazio degli stati".

PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE

Il principio di sovrapposizione stabilisce che, se si combinano linearmente due stati di un sistema, si ottiene un altro stato ammissibile del sistema.
È conseguenza del fatto che i vettori di stato possono essere sommati tra loro.

$$|\psi\rangle = |\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle$$

EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER

L'equazione di Schrödinger è l'equazione dinamica fondamentale della meccanica quantistica. Governa l'evoluzione nel tempo del vettore di stato. Questa evoluzione è deterministica: noto il vettore di stato di un sistema in un certo istante di tempo, l'equazione di Schrödinger permette di determinare esattamente il vettore di stato in un qualunque istante successivo.

$$H\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

FUNZIONE D'ONDA

È il vettore di stato che descrive il moto di una particella. Indicata usualmente con la lettera greca ψ (psi), è una funzione delle coordinate della particella.
Il suo modulo quadro, secondo l'interpretazione statistica di Max Born, rappresenta la probabilità che la particella si trovi in un certo punto dello spazio.

$$\psi(x) = \langle x|\psi\rangle$$

COSTANTE DI PLANCK h

È la costante universale che interviene in tutti i processi quantistici. Fu introdotta da Max Planck nel 1900 per spiegare lo spettro della radiazione di corpo nero (un corpo perfettamente assorbente riscaldato a una certa temperatura). Planck ipotizzò che l'energia della radiazione venisse emessa e assorbita per pacchetti discreti, i quanti, il cui valore è dato dal prodotto della costante h per la frequenza della radiazione.

$$E = h\nu \qquad \lambda = h/p$$

SISTEMA A DUE STATI (QUBIT)

È un sistema che può esistere in due stati di definito valore di una certa grandezza fisica, indicati abitualmente con $|0\rangle$ e $|1\rangle$. Nel contesto della computazione quantistica, viene chiamato qubit, perché è il corrispondente quantistico dei bit classici. A differenza di un bit, però, un qubit, in virtù del principio di sovrapposizione, può trovarsi anche in uno qualunque degli infiniti stati del tipo $a|0\rangle+b|1\rangle$ che si ottengono combinando linearmente $|0\rangle$ e $|1\rangle$.

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$$

MISURA (COLLASSO DELLO STATO)

Se un sistema si trova in uno stato del tipo $a|0\rangle+b|1\rangle$, dove $|0\rangle$ e $|1\rangle$ sono stati fisici corrispondenti ai valori A_0 e A_1 di una certa grandezza fisica, dopo la misura di questa grandezza il sistema passerà nello stato $|0\rangle$, se il risultato della misura è A_0, nello stato $|1\rangle$ se il risultato è A_1. Questa transizione («collasso» dello stato) è indeterministica: non è possibile prevedere in anticipo ed esattamente in quale stato si troverà il sistema dopo la misura.

MISURA (REGOLA DI BORN)

Se un sistema si trova in uno stato del tipo $a|0\rangle+b|1\rangle$, dove $|0\rangle$ e $|1\rangle$ sono stati fisici corrispondenti ai valori A_0 e A_1 di una certa grandezza fisica, una misura di questa grandezza darà il risultato A_0 con probabilità a^2 o il risultato A_1 con probabilità b^2.

PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE

Enunciato da Werner Heisenberg nel 1927, riguarda particolari coppie di grandezze fisiche (per esempio, la posizione e la quantità di moto di una particella, o la polarizzazione di un fotone lungo direzioni diverse).
Il principio afferma che non è possibile determinare con precisione assoluta entrambe queste grandezze: se si riduce l'indeterminazione su una delle grandezze, aumenta l'indeterminazione sull'altra.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

PRINCIPIO DI COMPLEMENTARITÀ

È il principio di natura filosofica, enunciato da Niels Bohr nel 1927, secondo cui una descrizione completa della realtà deve necessariamente includere proprietà e concetti tra loro incompatibili.

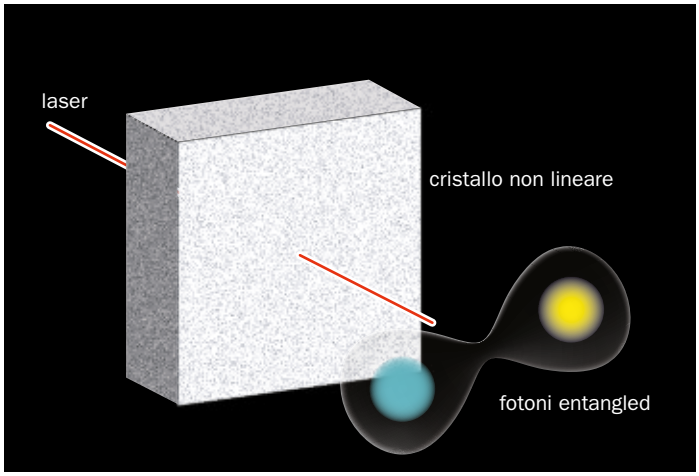
Entanglement

Al centro del mondo quantistico

di Marco Genovese

a.
Erwin Schrödinger (1887-1961): uno dei padri della meccanica quantistica, è l'autore dell'equazione che descrive l'evoluzione dei sistemi quantistici. Nel 1935 introdusse il concetto di entanglement.

Assieme alla relatività einsteiniana, la meccanica quantistica – la teoria creata per descrivere la fisica "microscopica" (atomi, particelle, ecc.) – è uno dei due pilastri della fisica moderna. Per la maggioranza dei fisici, essa rappresenta la descrizione fondamentale delle leggi della fisica all'interno della quale debbono inquadrarsi tutte le altre descrizioni (ad esempio, la meccanica classica ne sarebbe un limite per i corpi macroscopici).
I sistemi quantistici (cioè le particelle elementari, gli atomi, le molecole, ...) sono descritti in termini di poche proprietà osservabili (posizione, energia, quantità di moto, spin, polarizzazione, ...) che ne definiscono lo "stato". Tali sistemi possono essere composti da più sottosistemi, ad esempio gli elettroni e il nucleo in un atomo, o due fotoni emessi assieme.
L'entanglement (termine inglese che potremmo tradurre con "intreccio", ma che è ormai entrato anche nel linguaggio scientifico italiano) è una proprietà peculiare dei sistemi

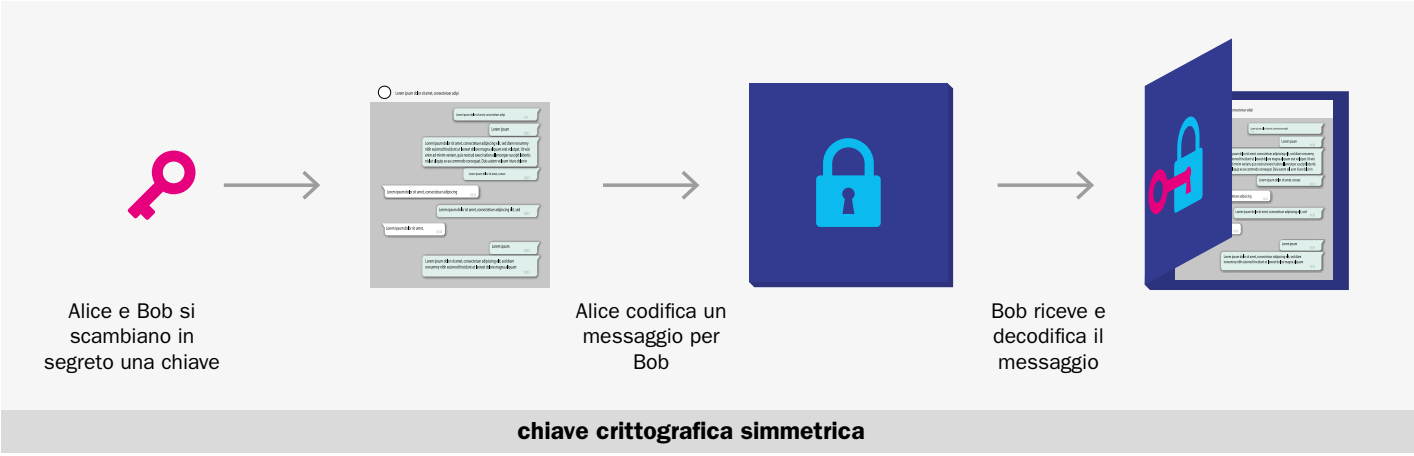


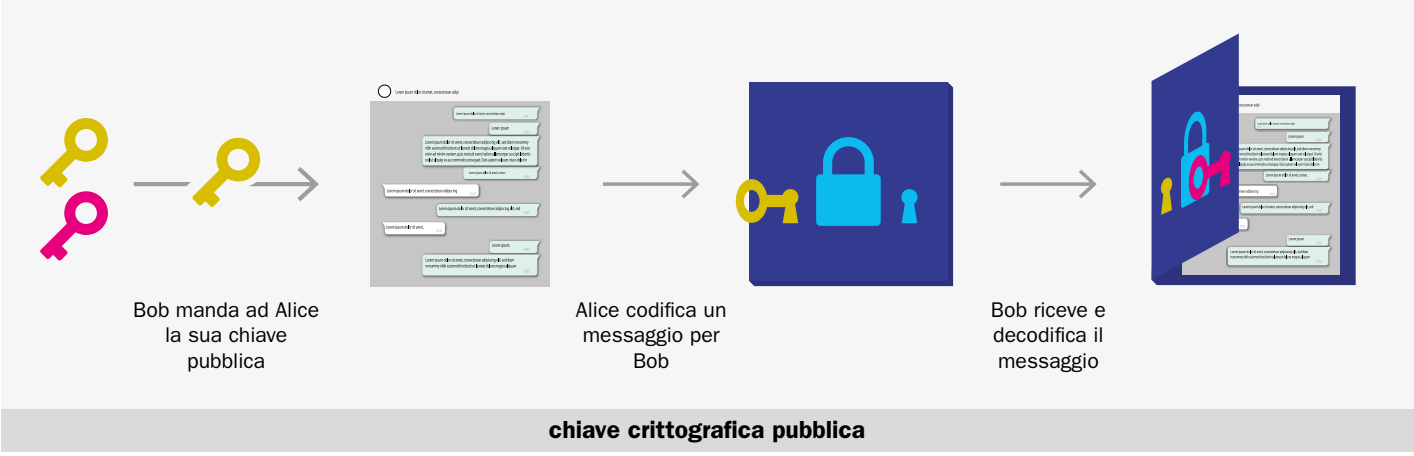
b.
I fotoni entangled possono essere generati inviando della luce laser su particolari cristalli, in cui i fotoni del laser si convertono in coppie di fotoni di frequenza minore ("fluorescenza parametrica").

quantistici (definita da Schrödinger il "tratto" peculiare della meccanica quantistica), che lega indissolubilmente parti diverse di uno stato quantistico inducendo correlazioni tra i risultati delle misure effettuate su sottosistemi. Queste correlazioni non possono essere descritte come proprietà preesistenti, ma emergono solo al momento della misura e sono indipendenti dalla distanza tra i sottosistemi.
Il fenomeno dell'entanglement, dal 1935, quando venne introdotto, è fonte di un acceso dibattito sul suo significato e sul suo impatto sui fondamenti della meccanica quantistica.
Cerchiamo dunque di capire un po' più in dettaglio in che cosa consiste. Immaginiamo di avere una sorgente che emette due fotoni (le "particelle" quantistiche fondamentali di cui la luce è costituita). I fotoni sono caratterizzati dalla loro energia e, essendo quanti di luce, cioè pacchetti di onde elettromagnetiche, dal piano di vibrazione del campo elettrico, la cosiddetta "polarizzazione" (quella che viene selezionata dagli occhiali 3D dei cinema, permettendoci di vedere figure leggermente diverse dai due occhi e quindi un'immagine tridimensionale).
In alcuni fenomeni si producono due fotoni con polarizzazione non definita, ma comunque opposta. Ovvero, se un fotone ha polarizzazione orizzontale (H, dall'inglese *horizontal*), l'altro deve averla verticale (V) o viceversa (vd. fig. b).
Per tale stato la polarizzazione del singolo fotone non è determinata prima della misura. Supponiamo ora che i due fotoni siano inviati uno a un osservatore sulla Terra (Alice), l'altro a uno, ad esempio, su Marte (Bob). Appena Alice misura la polarizzazione del suo fotone, immediatamente fissa quella del fotone di Bob: se Alice trova H (nel 50% dei casi), Bob ha V e viceversa. (Si noti che la meccanica quantistica non può predire il risultato della misura, ma solo la probabilità del risultato). Tale risultato è indipendente da come si orientano i polarizzatori. Ad esempio, se Alice e Bob li orientano a 45 gradi rispetto agli assi orizzontale/verticale, ottengono sempre polarizzazioni opposte.
Quindi, in questo fenomeno (detto "EPR" dalle iniziali di Einstein, Podolsky e Rosen che lo introdussero in un loro celebre lavoro del 1935), una misura compiuta da Alice determina in maniera immediata anche il valore che otterrà Bob sul suo fotone, relativamente a una osservabile (in questo caso la polarizzazione), il cui valore in meccanica quantistica non è fissato prima della misura.
La domanda che ci si può porre (e che Einstein si pose!) è se in realtà questi risultati non siano predeterminati da qualche variabile nascosta, ovvero se la meccanica quantistica non sia una teoria incompleta. In tal caso il fatto che la meccanica quantistica non possa predire i risultati, ma solo le probabilità di ottenerli, deriverebbe dal fatto che ignoriamo queste variabili aggiuntive.
Sarebbe come avere due palline, una blu e una rossa, e due scatole. Qualcuno, a nostra insaputa, mette la pallina rossa in una scatola, la blu nell'altra. Poiché noi ignoriamo dove le abbia messe, possiamo solo supporre che al 50% la pallina blu sarà nella scatola 1 e la rossa nella 2 o viceversa. Però le palline sono sin dall'inizio in una scatola o nell'altra (la variabile nascosta). L'attribuire una probabilità alla misura dipende dal fatto che ignoriamo questa variabile.
Potrebbe essere lo stesso per i due fotoni (e più in generale per tutti gli stati entangled)?
Sorprendentemente la risposta è no! Nel 1964 John Bell dimostrò che nessuna teoria a variabili nascoste in cui non si possa trasmettere un segnale immediatamente a distanza arbitraria (cioè una teoria "locale") può riprodurre tutte le correlazioni che si possono osservare tra stati entangled.
Questa scoperta aprì la strada a un confronto sperimentale tra la meccanica, nella sua versione standard, e sue possibili "estensioni" basate su variabili nascoste locali.
Una serie di esperimenti sempre più perfezionati, ultimati nel 2015, ha dimostrato inequivocabilmente che le correlazioni osservate tra due fotoni entangled sono quelle previste dalla meccanica quantistica.
Questo risultato è davvero eccezionale. Non si esclude solamente una possibile alternativa alla meccanica quantistica, ma un'intera classe di teorie: ovvero qualsiasi teoria in cui le correlazioni dovute all'entanglement siano prodotte da variabili nascoste in maniera locale.

c.
John Bell (1928-1990): nel 1964 dimostrò che nessuna teoria, in cui i valori delle osservabili siano descritti da variabili nascoste locali, può riprodurre tutti i risultati della meccanica quantistica. In particolare, non può riprodurre le correlazioni previste per gli stati entangled ("disuguaglianze di Bell").

La natura è dunque probabilistica. Non si può predire a priori il risultato della misura di Alice, ma solo calcolarne la probabilità. Tuttavia, non appena Alice effettua la sua misura, fissa istantaneamente anche il valore del fotone di Bob, indipendentemente da quanto questo sia lontano: la cosiddetta "non-località quantistica".
Questo fenomeno può essere usato per trasmettere informazione? Se così fosse la meccanica quantistica sarebbe in contrasto con la relatività einsteiniana, che vieta la possibilità di trasmettere segnali a velocità maggiori della velocità della luce nel vuoto.
Ma così non è. Infatti, vediamo cosa ottiene Bob misurando una serie di fotoni di stati entangled con Alice. Se Alice non effettua alcuna misura, Bob troverà una sequenza casuale di H e V (ad esempio HHVHHVVVHVVV...), determinando anche i valori che otterrà Alice. Ma cosa succede se Alice effettua una serie di misure trovando VVHVVHHHVHHH? La sua misura determina i valori dei fotoni di Bob, ma lui osserva esattamente una sequenza casuale come la precedente. Solo confrontandola con quella ottenuta da Alice vedrà che sono perfettamente correlate. Tuttavia questo confronto può essere realizzato solo con mezzi di comunicazione tradizionali (sub-luminali quindi). Dalla sua sola sequenza Bob non è in grado di sapere cosa Alice stia facendo e quindi Alice non può trasmettergli informazione.
Tuttavia, se non è possibile trasmettere informazione superluminale, il fatto di condividere delle sequenze casuali correlate è la base per realizzare metodi crittografici. In sostanza Alice (o Bob) utilizza la sequenza casuale trasformata in bit (001001110111...) per combinarla con il messaggio e la trasmette a Bob (o Alice) che grazie alla sua chiave la decodifica. Un teorema matematico garantisce che, se la sequenza casuale è usata una sola volta, un eventuale intercettatore non può decodificare il messaggio. L'entanglement permette quindi di trasmettere questa chiave senza possibilità che sia intercettata (ogni tentativo d'intercettazione distruggerebbe l'entanglement). Questo è un primo esempio di come queste strane correlazioni quantistiche siano ora diventate una risorsa per creare nuove tecnologie, le tecnologie quantistiche.
Numerose altre idee di utilizzo sono emerse creando nuove discipline. Una è l'informazione quantistica, in cui si studia la codifica, l'elaborazione e la trasmissione di dati utilizzando sistemi quantistici, ad esempio realizzando computer esponenzialmente più veloci di quelli attuali per certi





algoritmi. Un computer quantistico, ad esempio, potrebbe risolvere in pochi minuti la fattorizzazione in numeri primi di un numero con centinaia di cifre, problema che il miglior computer attuale non risolverebbe neppure in miliardi di anni.
Altri esempi di tecnologie quantistiche sono l'*imaging* quantistico (ove, ad esempio, si è riusciti a osservare oggetti altrimenti persi in un fondo preponderante) o la metrologia quantistica (volta a misurare fenomeni estremamente deboli).
L'entanglement rappresenta quindi un esempio emblematico di come un fenomeno fisico, studiato inizialmente come curiosità, sia poi diventato fonte di progresso tecnologico con un enorme impatto economico (e investimenti ormai di molti miliardi di euro).

d.
Due metodi di comunicazione crittografica. Il primo si basa sulla condivisione di una sequenza casuale di bit: la chiave. Se questa è perfettamente casuale, lunga quanto il messaggio (in bit) e usata una sola volta, per un teorema matematico il messaggio criptato non può essere decodificato in alcun modo. Il secondo metodo si basa sulla difficoltà computazionale di invertire alcune funzioni. Il metodo è più semplice in quanto non richiede di condividere chiavi arbitrariamente lunghe. La sua sicurezza però non è garantita: un computer quantistico potrebbe comprometterne la sicurezza (vd. anche in Asimmetrie n. 12 p. 10, ndr).

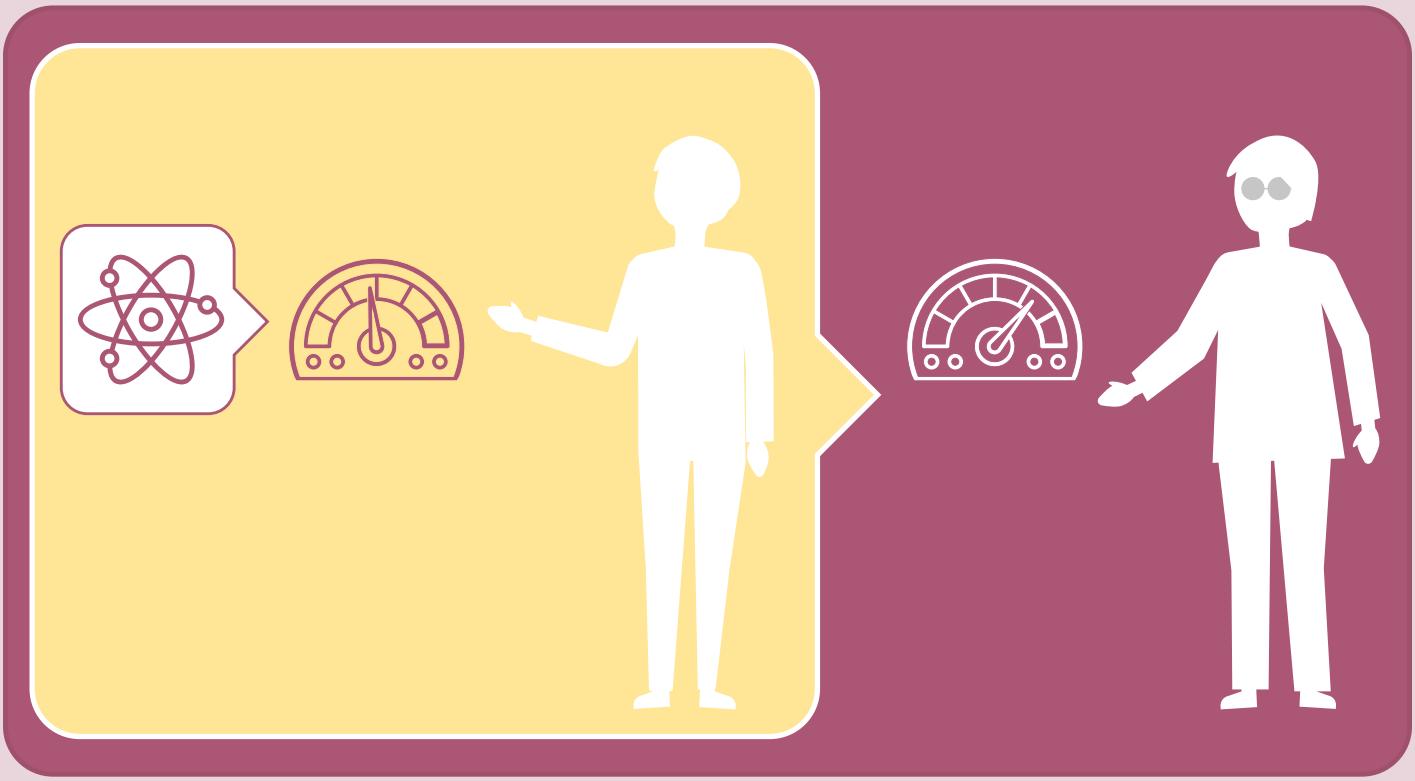
Biografia
Marco Genovese è direttore di ricerca in INRIM, ove coordina il settore Ottica Quantistica. Da 25 anni si occupa di fondamenti della meccanica quantistica e dello sviluppo di tecnologie quantistiche, avendo contribuito alla nascita di alcune di queste (quali il *quantum imaging*).

10.23801/asimmetrie.2022.33.2

Una storia di amicizia?

Il problema della misura in meccanica quantistica

di Lorenzo Maccone

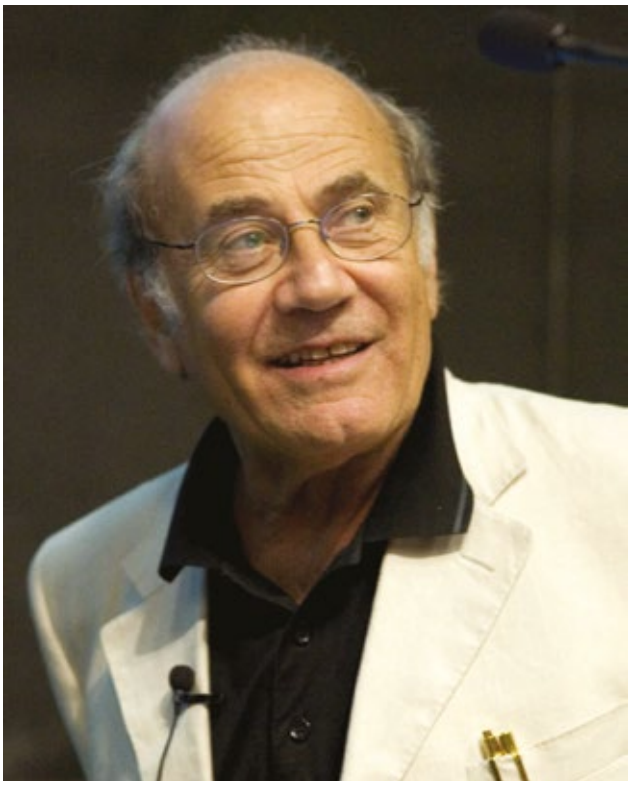


La meccanica quantistica ha un problema. Come tutte le teorie fisiche, è basata su postulati che a loro volta si basano su esperimenti. Il problema è che due dei postulati sembrano contraddirsi. Il postulato di evoluzione (l'equazione di Schrödinger) dice che l'evoluzione di sistemi isolati è deterministica: posso prevedere esattamente quello che accadrà. Invece, il postulato di misura (regola di Born) dice che i risultati delle misure sono probabilistici: in generale non posso prevedere quale risultato otterrò. A prima vista non sembra esserci contraddizione perché le misure non avvengono in sistemi isolati. Però possiamo pensare di prendere un laboratorio dove si compie una misura e isolarlo completamente dall'esterno. Ora siamo nei guai: il postulato di Schrödinger ci dice che possiamo prevedere esattamente quello che accadrà nel laboratorio, il postulato di Born ci dice il contrario! Questo paradosso è conosciuto con il nome di "amico di Wigner", perchè fu da lui proposto: Wigner suggerì di chiudere un suo amico nel laboratorio isolato a compiere misure, mentre lui (fuori dal laboratorio) avrebbe fatto esperimenti sull'amico che misura. Siccome il laboratorio è un sistema isolato dove si fanno misure, i postulati ci dicono che l'evoluzione dell'amico è sia deterministica che probabilistica:

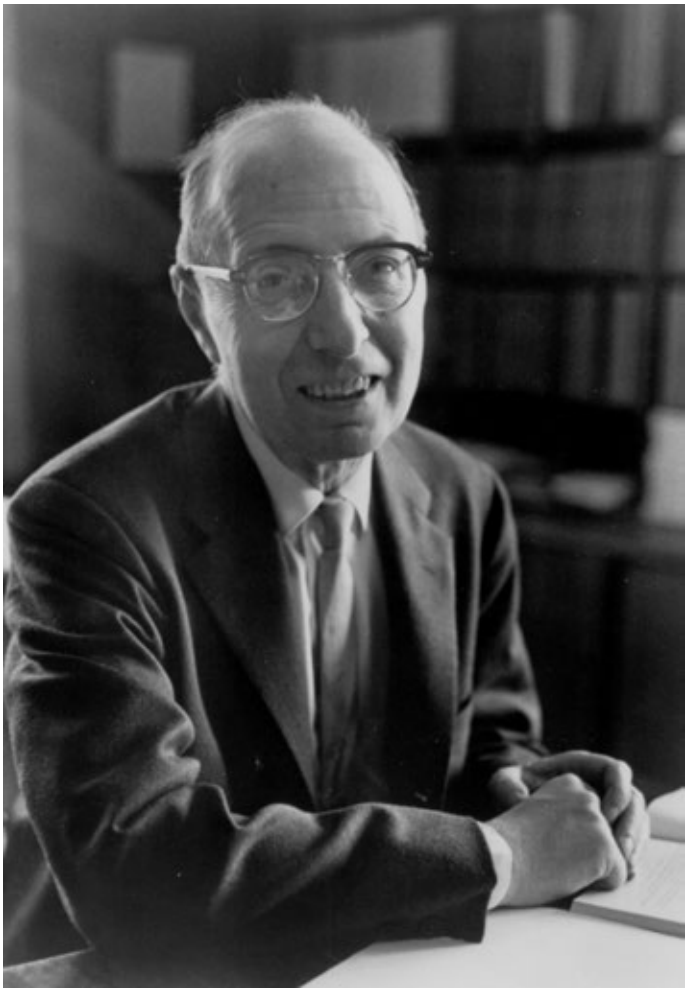
a.
Rappresentazione grafica del paradosso dell' "amico di Wigner" (da Eugene Wigner che ne diede la prima formulazione). Immaginiamo che un amico di Wigner effettui delle misure su un sistema fisico dentro un laboratorio isolato, mentre Wigner, fuori dal laboratorio, svolge esperimenti sull'amico che misura. La contraddizione consiste nel fatto che il laboratorio è un sistema isolato, dove si fanno misure, e i postulati quantistici ci dicono quindi che l'evoluzione (dell'amico) è sia deterministica che probabilistica.

una contraddizione! (Per la verità, andrebbe chiamato “argomento dell’ex amico”: la loro amicizia non sopravvivrebbe agli esperimenti (torture?) di Wigner.)
Questa è una delle varie versioni del “problema della misura”, anche se in verità il vero problema è che i fisici non riescono a mettersi d’accordo su quale sia il “problema della misura”. Alcuni, anzi, affermano che non c’è proprio nessun problema.
La prima possibile soluzione del paradosso dell’amico è quella più ovvia: supponiamo che l’amico e il laboratorio non siano sistemi quantistici e quindi non siano vincolati dai postulati della meccanica quantistica. Questa soluzione dice che la meccanica quantistica non è una teoria universale, ma si applica solamente ai sistemi microscopici. Il problema in tal caso è duplice. Da una parte non abbiamo alcuna evidenza di una frontiera tra il mondo classico e quello quantistico, nonostante i molti esperimenti per scoprirla. Dall’altra, non è banale trovare una teoria che metta d’accordo la meccanica quantistica per sistemi micro e la meccanica classica su sistemi macro. La più importante teoria che riesce in questo difficile compito è la teoria di Ghirardi-Rimini-Weber, dal nome dei tre italiani che l’hanno proposta. Ma, nelle parole dello stesso Ghirardi, tale teoria è stata ormai quasi falsificata, nel senso che è stata dimostrata l’esistenza di fenomeni quantistici in oggetti talmente macroscopici dal rendere la teoria stessa inutile nel dividere il mondo classico dal mondo quantistico (vd. p. 22 sugli esperimenti ai LNGS, ndr).
Se teorie di questo genere dovessero essere falsificate, vuol dire che non possiamo risolvere il paradosso dell’amico appellandoci al fatto che l’amico è un sistema classico. Cioè dobbiamo trattare l’amico (e noi stessi!) come sistemi quantistici, per quanto strano possa sembrare.
Quindi dobbiamo cercare una spiegazione diversa del paradosso dell’amico. Uno potrebbe semplicemente ignorare il problema. Questo è l’atteggiamento della maggior parte dei fisici, i quali si accontentano dell’interpretazione da libro di testo (“interpretazione di Copenhagen”) della meccanica quantistica che, sostanzialmente, fa finta di niente. Naturalmente ciò è insoddisfacente dal punto di vista concettuale, ma all’atto pratico il paradosso dell’amico non ha nessuna conseguenza: la nostra tecnologia è ancora lontanissima dal poter fare esperimenti su sperimentatori che fanno esperimenti (gli amici dei fisici possono stare tranquilli!).
Per cercare di risolvere il paradosso dell’amico, bisogna fare un passo indietro per capire cosa vuol dire che i risultati delle misure sono probabilistici (non determinati). Siamo abituati a usare le probabilità per descrivere la nostra ignoranza: non conosciamo la traiettoria esatta della moneta lanciata per aria e assegniamo probabilità 1/2 che venga testa o croce; non conosciamo la sequenza delle carte da gioco e assegniamo una probabilità 1/52 di estrarre l’asso di picche dal mazzo e così via. Possiamo dire la stessa cosa della probabilità dei risultati delle misure quantistiche? Cioè, possiamo dire che l’impossibilità di prevedere il risultato è dovuto a qualcosa (una variabile nascosta) che non conosciamo? Questa era la speranza di Einstein, che riteneva che la meccanica quantistica fosse incompleta. Tale speranza si infrange catastroficamente contro il teorema di Bell che, sostanzialmente, dice: “ogni completamento della meccanica quantistica con variabili nascoste è necessariamente non locale”. Cioè una persona

b.
GianCarlo Ghirardi che, insieme ai colleghi Alberto Rimini e Tullio Weber, ha elaborato una teoria (nota come “GRW” dalle iniziali dei loro cognomi), che si pone lo scopo di rendere compatibili il mondo classico e il mondo quantistico.



che conoscesse le variabili nascoste potrebbe comunicare istantaneamente a distanze arbitrarie. La cosa sembra abbastanza innocua, ma la teoria della relatività dice che, se potessimo comunicare a velocità superiori a quelle della luce, potremmo invertire l'ordine temporale di alcuni eventi. E se i due eventi sono uno la causa dell'altro, potremmo invertire la causa e l'effetto! In altre parole, le variabili nascoste non locali sono in contraddizione con la causalità, per via della relatività di Einstein. Proprio lo stesso Einstein che suggeriva l'esistenza di variabili nascoste: ironico, no?
Quindi, Bell ci dice sostanzialmente che, se vogliamo descrivere le probabilità quantistiche con variabili nascoste, dobbiamo abbandonare la causalità oppure la relatività. (Qui stiamo semplificando: il dibattito scientifico sul teorema di Bell è ancora molto vivo, ma la sostanza è questa). Esistono quindi due possibili risposte al teorema di Bell: la "meccanica bohmiana" (da David Bohm), che accetta l'esistenza delle variabili nascoste abbandonando la causalità relativistica, oppure tutte le altre interpretazioni della meccanica quantistica, che rinunciano alle variabili nascoste per salvare la causalità relativistica. Entrambe le opzioni sono insoddisfacenti, ma il teorema di Bell non ci lascia scelta. La meccanica bohmiana risolve il problema della misura, perché la probabilità del postulato di Born si può giustificare con l'ignoranza delle variabili nascoste (ricordate, la probabilità è sempre legata all'ignoranza di qualcosa). Ma il prezzo pagato è decisamente inaccettabile per molti: la causalità relativistica è una conseguenza diretta della struttura geometrica dello spaziotempo (per non parlare del fatto che senza causalità non potremmo neanche sopravvivere: non potremmo neanche attraversare la strada o evitare di morire di fame).
Quindi bisogna abbandonare le variabili nascoste. In tal caso, bisogna inventarsi un nuovo tipo di probabilità, che non viene dall'ignoranza di qualcosa, ma dal fatto che quel qualcosa (il valore di una proprietà) non esiste proprio prima di compiere una misura. Il problema è che la probabilità quantistica è del tutto indistinguibile in ogni forma e modo dalla vecchia probabilità classica, dovuta all'ignoranza di qualcosa di pre-esistente. Se vogliamo conservare la causalità relativistica, siamo forzati dal teorema di Bell a introdurre un nuovo tipo di probabilità per poi trovare che questa è la solita probabilità, ma non può emergere dall'ignoranza. Questo è il vero problema della misura.
Oggi ci sono vari tentativi, per esempio da parte di Wojciech H. Zurek e David Deutsch, di unire i due concetti di probabilità, ma gli argomenti addotti non sembrano conclusivi. O forse si riuscirà a sistemare la questione usando il fatto che gli apparati di misura contengono una miriade di gradi di libertà che non possono tutti essere conosciuti: magari la probabilità viene dall'ignoranza di questi? È possibile, ma per ora la teoria è ancora incompleta.
Torniamo al povero amico, rimasto bloccato nel laboratorio isolato. Ricapitolando: Ghirardi, Rimini e Weber risolvono il paradosso cambiando la teoria; molti fisici fanno finta di niente; la meccanica bohmiana lo risolve uccidendo la causalità e assegnando variabili nascoste diverse all'amico e a Wigner (quindi quello che a Wigner sembra deterministico, è probabilistico per l'amico). Altre soluzioni? L'interpretazione



c.
Eugene Wigner, fisico e matematico di origini ungheresi, premio Nobel nel 1963 per i suoi studi sull'applicazione delle simmetrie al mondo atomico e subatomico. Suo è il famoso paradosso dell'amico che mette in luce le contraddizioni tra l'evoluzione deterministica e probabilistica di un sistema.

d.
Carlo Rovelli ha proposto un'interpretazione della meccanica quantistica in cui solo le proprietà relazionali dei sistemi quantistici sono reali.

dello stato relativo di Hugh Everett III risolve il paradosso dicendo che i punti di vista di Wigner e dell'amico sono consistenti, perché se l'amico rompe l'isolamento e comunica a Wigner il risultato della misura, allora anche per Wigner l'evoluzione diventa probabilistica (perché non è più un sistema isolato), mentre se Wigner vuole verificare che l'evoluzione dell'amico è deterministica, deve fare una misura che non può rivelare il risultato dell'amico, anzi rivela contemporaneamente tutti i possibili risultati che l'amico potrebbe vedere: una soluzione rocambolesca del problema! Un'altra soluzione suggestiva, di Carlo Rovelli, suppone che i valori delle proprietà degli oggetti hanno solamente significato relazionale e non assoluto: il valore di un oggetto ha significato rispetto ad un altro e questo, nuovamente, salverebbe la causalità.
Esistono altre interpretazioni della meccanica quantistica? Ne esistono a bizzeffe, tant'è che se uno chiede a 10 fisici teorici otterrà almeno 15 interpretazioni diverse, perché alcuni ne hanno più di una! Esiste persino la "*homeless interpretation of quantum mechanics*" (da non prendere troppo sul serio!), proposta da Chongo Chuck, che è in realtà un clochard che si arrangia scroccando i sacchi a pelo nelle tende degli scalatori del parco di Yosemite in California.
In conclusione, se siete amici di un fisico, non cascate nel tranello di entrare in un laboratorio isolato.

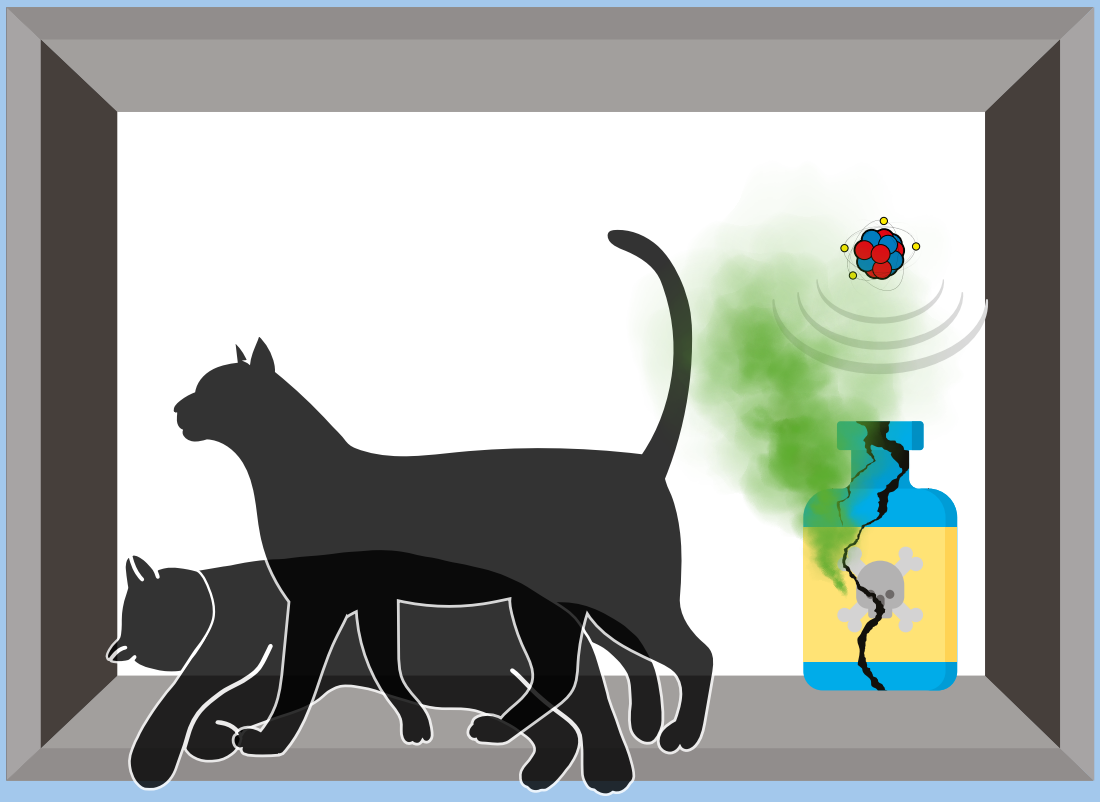
Biografia
Lorenzo Maccone è professore presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Pavia e associato all'INFN di Pavia. La sua attività di ricerca riguarda i fondamenti della meccanica quantistica, la teoria dell'informazione, computazione e misurazione quantistica.

10.23801/asimmetrie.2022.33.3

Sulle tracce felpate del gatto di Schrödinger

Alla ricerca di eventuali limiti della teoria quantistica

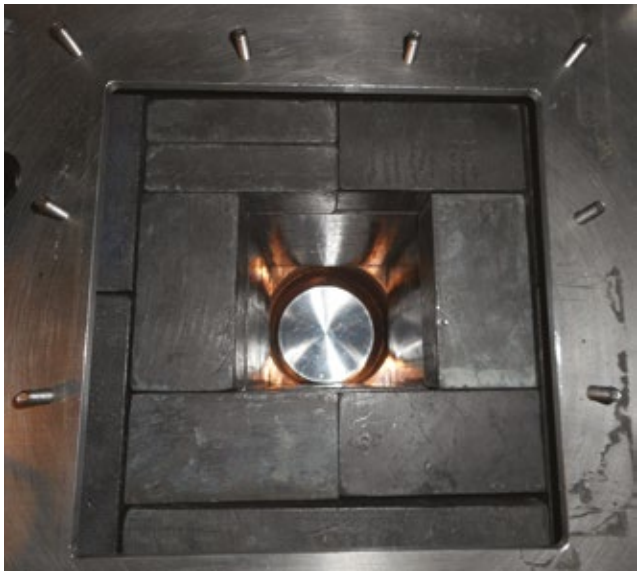
di Catalina Curceanu



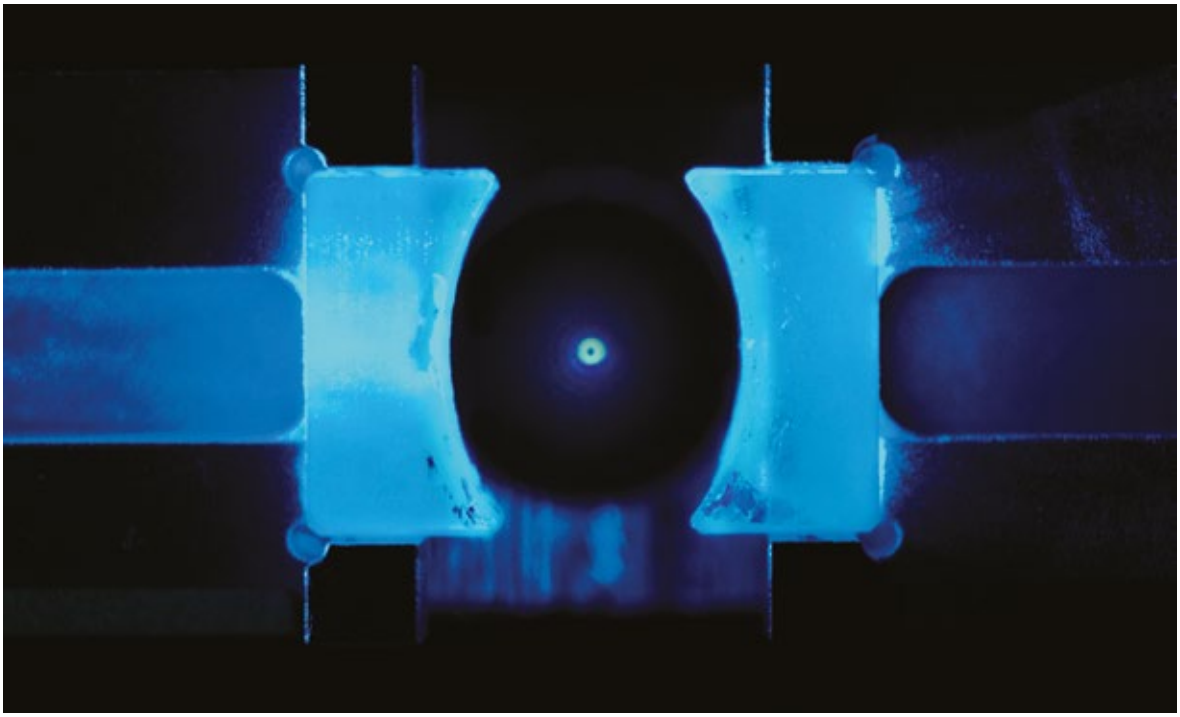
a.
Illustrazione del paradosso del gatto di Schrödinger.

La meccanica quantistica è la teoria di maggiore successo di sempre. Essa viene utilizzata all'interno dei computer e dei telefonini, sta alla base del modello standard della fisica delle particelle elementari o di una TAC in ospedale. Tuttavia, malgrado siano trascorsi più di 100 anni da quando è emersa come un pilastro della conoscenza del mondo e malgrado i suoi innumerevoli successi, è anche la teoria che ci fa discutere più di tutte. Ci interroghiamo ancora sui suoi significati, sulle sue (apparentemente) strane proprietà e anche sui possibili limiti di validità della teoria stessa che, va detto subito, non abbiamo ancora sfiorato. Tuttavia, termini quali entanglement oppure sovrapposizione di stati, proprietà quantistiche per eccellenza, riconducibili alla funzione d'onda che descrive il comportamento dei sistemi quantistici, sono entrati a far parte del bagaglio culturale di molti di noi. Non solo, le stesse proprietà vengono sempre di più utilizzate nelle nuove tecnologie quantistiche: dai computer e sensori quantistici alla crittografia quantistica (vd. p. 33, ndr).
Tra gli aspetti più dibattuti della fisica quantistica c'è il cosiddetto "problema della misura": come fa la funzione d'onda, che si trova in una sovrapposizione di stati, a collassare in uno di questi stati quando viene misurata? Questo problema è anche all'origine del cosiddetto paradosso del gatto di Schrödinger.

Per far capire ai suoi colleghi quanto fosse strana la meccanica quantistica applicata a un sistema macroscopico, Erwin Schrödinger inventò in un articolo del 1935 il famoso esperimento mentale che ha come protagonista un gatto chiuso in una scatola assieme a una sostanza radioattiva, che rappresenta il sistema quantistico. La sostanza radioattiva si trova in una sovrapposizione di stati, con una probabilità del 50% che emetta (o non emetta) radiazione dopo un tempo di (diciamo) 10 minuti. Se la radiazione viene emessa si aziona un meccanismo che rompe una fiala contenente del veleno, con conseguente morte dello sfortunato gatto. Ma, poiché lo stato è determinato dalla misura, trascorsi i 10 minuti, prima di aprire la scatola, lo stato non è ancora determinato (l'apertura della scatola corrisponde alla misura). E quindi, in quel momento, coerentemente con il fatto che la sostanza si trova in una sovrapposizione di stati, la risposta alla domanda: "che fine ha fatto il gatto?" è che il gatto è sia vivo che morto.
Il gatto di Schrödinger è diventato il paradigma del problema della misura e dopo tutti questi anni la comunità scientifica sta ancora discutendo su quale potrebbe essere la soluzione del paradosso. Non che non ci siano proposte: anzi, ce ne sono sin troppe! Alcune di esse assumono che in natura esistano soltanto particelle che avrebbero delle traiettorie determinate da condizioni aggiuntive (nel passato si parlava di onde che guidavano le particelle): si tratta dell'interpretazione di de Broglie-Bohm. C'è poi l'affascinante interpretazione dei *"molti mondi"*, dovuta a Hugh Everett III: ogni volta che viene eseguita una misura il mondo si divide, e ogni mondo realizza una delle possibilità. In questa interpretazione c'è dunque un mondo in cui il gatto è vivo e un altro in cui il gatto è morto. Queste due tipologie di interpretazioni, benché affascinanti, offrono – almeno per ora – poco appiglio ai fisici sperimentali: non c'è modo di confermare una delle due, in quanto le previsioni sperimentali sono identiche, in linea di massima, a quelle della meccanica quantistica standard. C'è però un'altra soluzione: una modifica radicale della meccanica quantistica, attraverso quelli che vengono definiti i "modelli di collasso dinamico".
I modelli di collasso risolvono il problema della misura all'origine, modificando l'equazione di Schrödinger, con l'aggiunta di termini non lineari e stocastici. I nuovi termini devono essere però aggiunti con criterio: non si possono contraddire le evidenze confermate della meccanica quantistica. Da una parte bisogna preservare proprietà quantistiche ben note delle particelle, quali l'interferenza dei fotoni oppure degli elettroni, una manifestazione implicita della sovrapposizione di stati, dall'altra i termini in più devono provocare il collasso della funzione d'onda evitando la sovrapposizione di stati negli oggetti macroscopici: le sedie, i pianeti, le stelle e noi stessi dobbiamo essere ben localizzati, e non stare "sia qua che là", in una sovrapposizione di stati. Il collasso deve essere dunque amplificato dal numero di particelle contenute nell'oggetto: per poche particelle il collasso deve avvenire in un tempo lunghissimo, mentre per un oggetto macroscopico, composto di un numero enorme di particelle, deve essere praticamente istantaneo. Esistono vari modelli di collasso – da quelli introdotti sin dagli anni '60 da Frigyes Karolyhazy e sviluppati ulteriormente da GianCarlo Ghirardi, Alberto Rimini, Tullio Weber, Philip Pearle e Angelo Bassi, a quelli nei quali il collasso è collegato alla gravità – i cosiddetti modelli di Diòsi-Penrose.
Modificando l'equazione di Schrödinger, tutti questi nuovi modelli fanno previsioni sperimentali diverse rispetto alla meccanica quantistica standard,



b.
Rivelatore Broad Energy Germanium Detector al laboratorio di bassa radioattività dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN.



c.
Raffreddamento del moto di una nanosfera di vetro allo stato fondamentale per mezzo di una cavità ottica nell'esperimento viennese di Markus Arndt.

offrendoci dunque la concreta possibilità di verificarli in laboratorio. Gli esperimenti vanno da test di interferenza con sistemi sempre più grandi, come gli esperimenti di Markus Arndt a Vienna con molecole attualmente contenenti migliaia di atomi, alcune organiche, a esperimenti che danno la caccia a riscaldamenti "anomali" dovuti ai termini non-lineari, ad esempio in esperimenti di optomeccanica. Ci sono poi esperimenti, nei laboratori sotterranei, nel silenzio cosmico, come ad esempio nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (INFN-LNGS), che danno la caccia alla cosiddetta radiazione spontanea prevista dai modelli di collasso, una radiazione elettromagnetica molto debole emessa dalle particelle cariche all'interno della materia. Proprio con quest'ultimo metodo ai LNGS, nel laboratorio di bassa radioattività, è stato stabilito un record nella ricerca di modelli di collasso, escludendo le versioni più semplici di tali modelli, e aprendo dunque la strada a lavori più complessi, sia dal punto di vista teorico (modelli nei quali si tenga conto di effetti di dispersione oppure di "memoria"), sia dal punto di vista sperimentale (rivelatori più complessi, analisi dati con l'utilizzo di metodi del tipo *machine* e *deep learning* (vd. in Asimmetrie n. 27)).
Si sta anche pensando a esperimenti per lo studio della meccanica quantistica e delle sue proprietà nello spazio, utilizzando apparati sperimentali sui satelliti, laddove la gravità e i rumori terrestri non pongano limiti alla sensibilità degli esperimenti (un esempio è la proposta MAQRO).
Chissà se un giorno troveremo una nuova teoria oppure confermeremo ancora la vecchia cara meccanica quantistica a scale sempre più macroscopiche. Intanto le tecnologie quantistiche avanzano: sempre più qubit nei computer quantistici, sempre più sensori che sfruttano l'entanglement o la sovrapposizione di stati.

Biografia
Catalina Curceanu è ricercatrice dell'INFN nei Laboratori Nazionali di Frascati (LNF), dove dirige un gruppo di ricercatori che svolgono esperimenti sia nel campo della fisica nucleare che quantistica. Autrice di più di 400 articoli scientifici e membro del Foundational Questions Institute (FQXi), è a capo di progetti europei e internazionali, quali QUBO finanziato dalla John Templeton Foundation.

10.23801/asimmetrie.2022.33.4

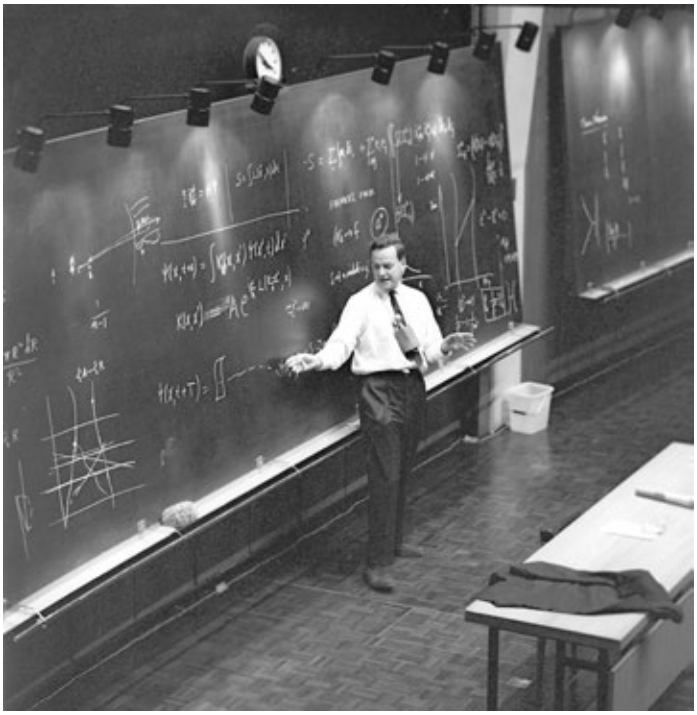
Quanti in pratica

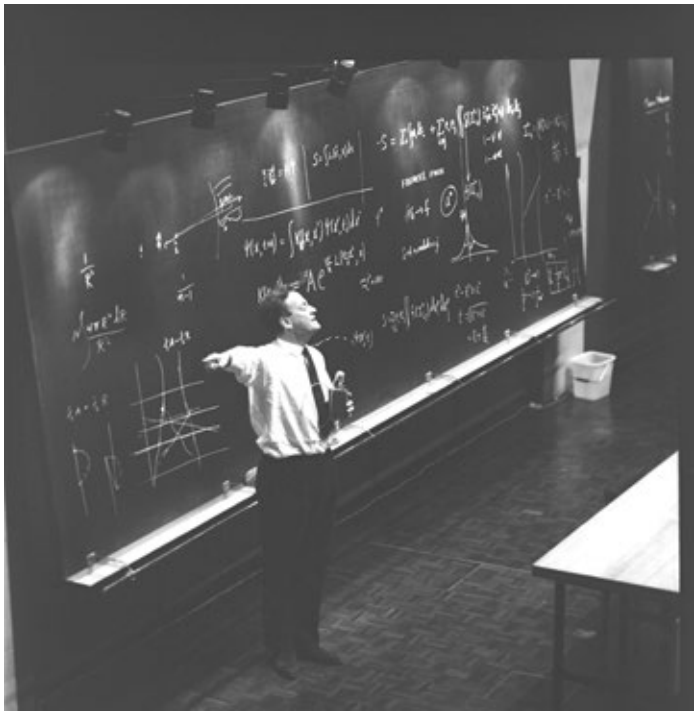
Attualità e prospettive delle tecnologie quantistiche

di Saverio Pascazio

Quando Schrödinger coniò il termine entanglement, come traduzione della parola tedesca *Verschränkung*, non avrebbe mai immaginato che, dopo quasi un secolo, il principio di sovrapposizione e l'entanglement sarebbero diventati i cardini di buona parte di quelle che oggi vengono chiamate tecnologie quantistiche. Naturalmente, sovrapposizioni ed entanglement, per poter essere utilizzati a fini pratici (alle scale temporali che caratterizzano il nostro quotidiano), devono essere robusti, cioè devono durare sufficientemente a lungo. Questo richiede e rende necessaria una certa resilienza nei confronti delle perturbazioni esterne, che di solito sono incontrollabili e tendono a cancellare gli effetti quantistici (un fenomeno noto come "decoerenza").
Le tecnologie quantistiche sono un campo emergente della fisica. Ma cosa consentono di fare? Come funzionano e perché? Cerchiamo di rispondere a queste domande. Il calcolo quantistico, le simulazioni quantistiche, i sensori, la crittografia e l'*imaging* quantistici sono tutti esempi di tecnologie quantistiche. Prima di descrivere brevemente queste applicazioni, è utile sottolineare alcune distinzioni. Molti dispositivi che utilizziamo nel quotidiano fanno pieno uso di effetti tipicamente quantistici. Fra questi i laser, i transistor e in generale i dispositivi basati sulle proprietà quantistiche dei semiconduttori, il cui utilizzo ha modificato profondamente la nostra vita (si pensi a telefonini e computer). Questi dispositivi vengono chiamati tecnologie "quantum 1.0" per differenziarli dalle tecnologie "quantum 2.0", che utilizzano sovrapposizioni ed entanglement, facendo uso di sistemi spesso ingegnerizzati, composti da un elevato numero di componenti quantistici elementari.
Il "calcolo quantistico" funziona utilizzando il cosiddetto "parallelismo quantistico", cioè eseguendo più calcoli allo stesso tempo.
Soltanto una misura quantistica opportunamente ingegnerizzata seleziona alla fine dell'intero processo il risultato del calcolo di nostro interesse. Questo consente di eseguire computazioni in modo esponenzialmente più rapido di un computer classico. Non esiste ancora un computer quantistico perfettamente funzionante, e il nemico da battere è la decoerenza: il parallelismo funziona, se i passaggi intermedi sono eseguiti in modo fra loro coerente, altrimenti il computer diventa classico. Uno degli algoritmi quantistici più famosi è quello di Shor, che consente di fattorizzare un numero in

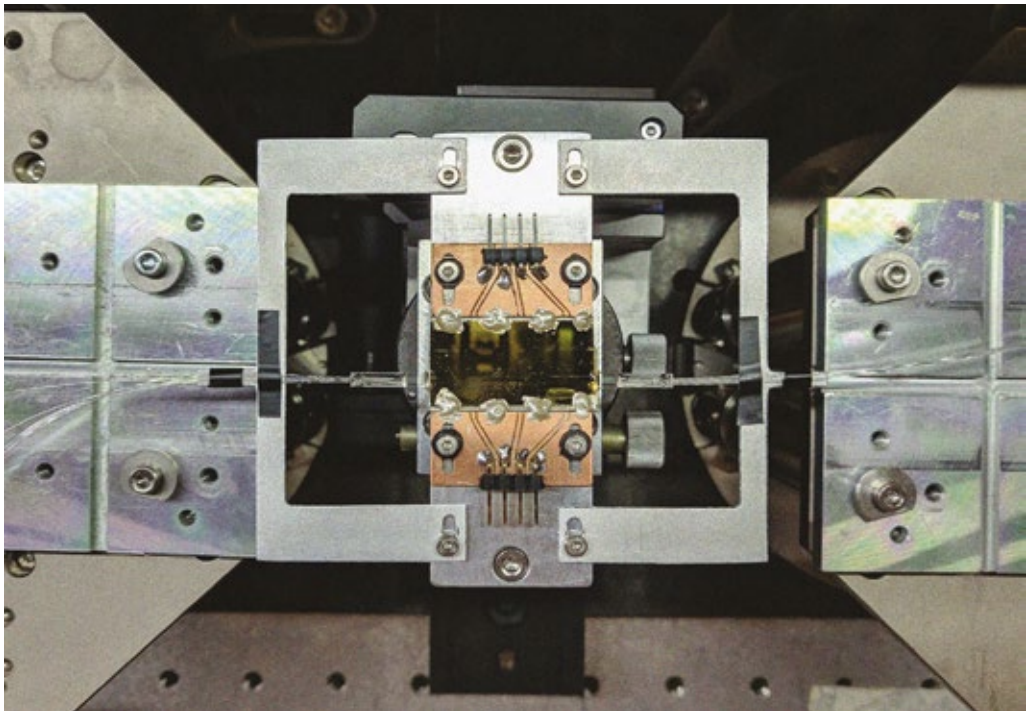
a.
Il nemico da battere nelle tecnologie quantistiche è la decoerenza. "HYBRID 2019 MAR 28", acrilico su tela e multistrato di betulla, opera di Eugenio Lopopolo (https://www.eugeniolopopolo.it).





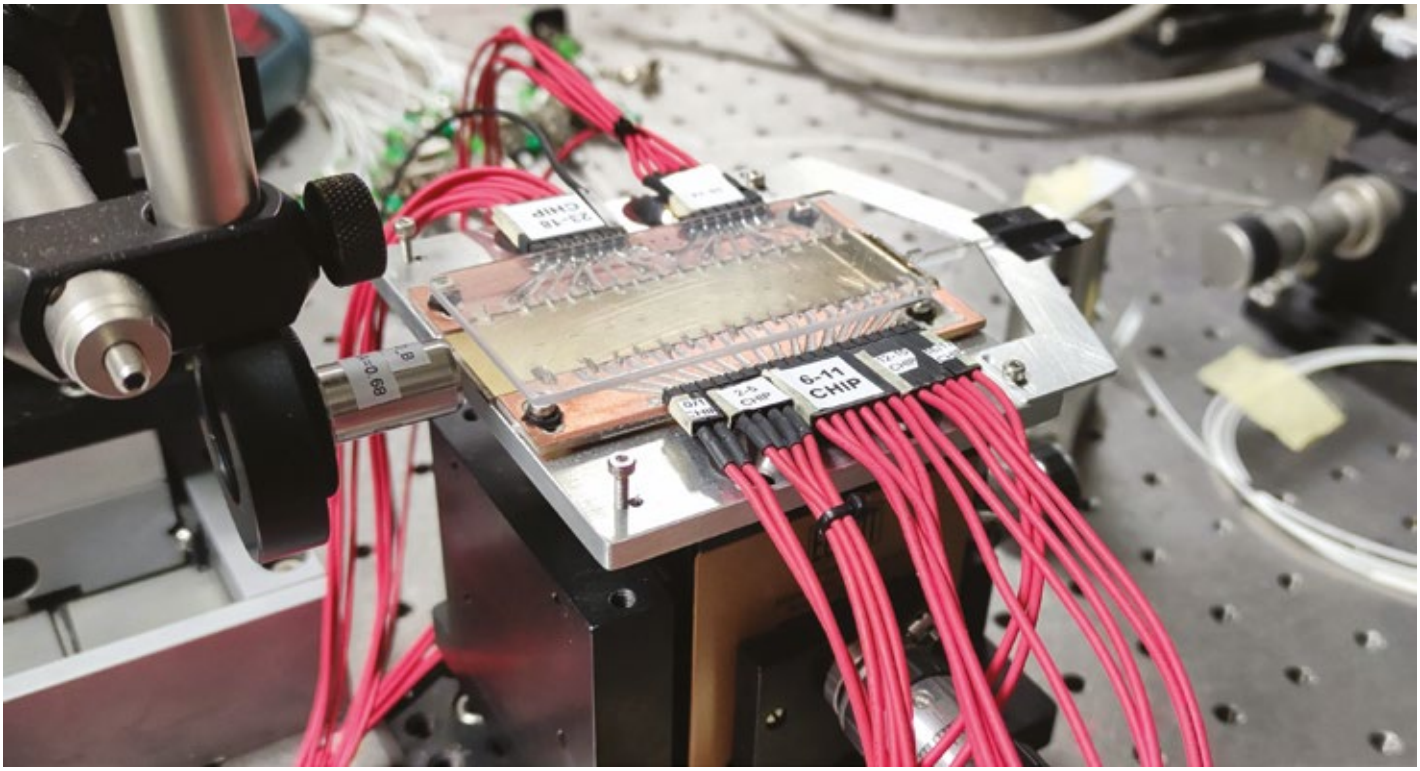
b./c.
Richard Feynman fu il primo a capire che un computer quantistico può simulare i fenomeni naturali meglio di un computer classico.

maniera esponenzialmente più rapida di qualsiasi algoritmo classico.
Le "simulazioni quantistiche" sono un buon compromesso. Fanno uso di computer quantistici dedicati, in grado di risolvere pochi problemi ben selezionati. Esistono già dei buoni simulatori quantistici, che fanno uso di sistemi atomici o ionici raffreddati: risolvono problemi che stanno molto a cuore ai fisici, quali alcune teorie quantistiche su reticolo, e problemi di sistemi a molti corpi, difficilissimi da trattare. L'idea di un simulatore quantistico risale a Feynman, che ne propose uno schema nel 1982.
I "sensori quantistici" sono in grado di fare misure estremamente precise utilizzando entanglement, interferenza e particolari stati quantistici. Le applicazioni sono svariate e molto diverse fra loro: si va dalla fotonica all'ottica quantistica, alle misure di campi elettrici e magnetici, alla gravimetria. L'esperimento LIGO, che ha rivelato le prime onde gravitazionali, utilizzava luce "*squeezed*" per misurare segnali di bassissima intensità, al di sotto del cosiddetto *standard quantum limit*.
La "crittografia quantistica" consente di comunicare in modo ultrasicuro (in gergo si dice "intrinsecamente sicuro") utilizzando l'entanglement. L'idea di base consiste nel distribuire una chiave crittografica quantistica che non può essere "copiata" grazie a una proprietà nota come "*no cloning theorem*". Si può fare un clone della pecora Dolly, ma non di uno stato atomico. Chi non è (fisicamente) in possesso della chiave non può decifrare i messaggi.
Le prime comunicazioni quantistiche ultrasicure sono già state effettuate, molte di esse in Europa e in Italia. Una bella applicazione è il "generatore quantistico di numeri casuali": i numeri generati superano tutti i test di aleatorietà che affliggono invece qualsiasi algoritmo non quantistico.
L'*imaging* quantistico sfrutta l'entanglement per ottenere superrisoluzione, cioè risolvendo sorgenti luminose al di sotto di tutti i limiti classici. Si riesce quindi a superare anche il famoso limite di Rayleigh, che è alla base dell'ottica tradizionale. Un esempio notevole è il cosiddetto "*ghost imaging*", con il quale si riesce a migliorare l'immagine di un oggetto incrociando l'informazione di due diversi rivelatori di luce.
La domanda spontanea a questo punto è: che cosa si può fare con le tecnologie quantistiche e in quali tempi? Rispondere a questa domanda, evitando facili ottimismi e slogan, non è semplice, soprattutto se si cerca di fare qualche previsione realistica.
Sensori, crittografia e *imaging* quantistici sono tutti esempi di tecnologie quantistiche il cui funzionamento è già stato provato, al di là di qualsiasi ragionevole dubbio. La domanda giusta qui è pertanto: quando potremo disporre di



d.
Interferometro in guida d'onda, realizzato tramite microfabbricazione laser a femtosecondi e utilizzabile per misure su stati di singoli fotoni. I fotoni sono iniettati all'ingresso del circuito e raccolti in uscita da collegamenti in fibra ottica.

queste tecnologie comprando i dispositivi che ci servono? L'indice che si utilizza è il TRL (Technology Readiness Level). Alcune tecnologie hanno già raggiunto TRL molto elevati, che vanno da 4 a 7. La commercializzazione è convenzionalmente fissata al valore 9.
Alcuni simulatori quantistici sono già funzionanti: qui il criterio giusto da considerare è il cosiddetto "vantaggio quantistico". Con questo termine si intende la dimostrazione sperimentale che un simulatore quantistico riesce a svolgere un compito che non è alla portata di nessun dispositivo classico esistente. La corsa verso il vantaggio quantistico è aperta, e sono in molti a competere, sia organi di ricerca che enti privati. Non esiste ancora un buon computer quantistico. Quelli disponibili sono in grado di fare calcoli che possono essere svolti anche su un computer classico oppure che realizzano il "vantaggio" con bassa probabilità. Tradotto in parole povere, questo vuol dire che i computer quantistici esistenti, se messi alla prova con problemi realmente difficili, fanno errori e danno il risultato giusto con probabilità molto piccola. Azzardare una previsione sui tempi è molto difficile. Possono volerci 10 anni.
Le tecnologie quantum 2.0 invece sono già disponibili o in certi casi dietro l'angolo. Fanno buon uso della sovrapposizione quantistica, dell'entanglement e di sistemi ingegnerizzati composti da molte particelle, creando, manipolando e misurando gli stati quantistici della materia e della radiazione. Attraggono enormi finanziamenti pubblici in Europa, negli Stati Uniti, in Canada, in Cina, in Giappone, in India e in Australia. Molte aziende private investono somme ingenti in questo settore, utilizzando ricercatori dedicati, spesso sottratti alle strutture pubbliche.
Le tecnologie quantistiche corrono verso TRL elevati e verso il vantaggio quantistico. Fanno uso di concetti che venivano rifiutati (o al meglio ritenuti "filosofia") fino agli anni '80. Come spesso accade in fisica, sono state le prime conferme sperimentali a spazzare via lo scetticismo e a farci capire che i paradossi erano ancorati al nostro modo di pensare, ai nostri pregiudizi di fisici classici. I paradossi di ieri sono la tecnologia di domani.
Anni fa, durante una conferenza a Napoli, un gruppo di fisici discuteva animatamente sull'interpretazione della meccanica quantistica. Il grande fisico George



Sudarshan, i cui contributi hanno spaziato dalla teoria delle particelle all'ottica quantistica, dai sistemi quantistici dissipativi all'effetto Zenone quantistico, ascoltava in silenzio. A un certo punto disse: "*It is a good thing that quantum mechanics does not depend on its foundations*" ("È una buona cosa che la meccanica quantistica non dipenda dai suoi fondamenti"). Vi è molta verità e anche una buona dose di saggezza in questa affermazione scherzosa. Le generazioni future utilizzeranno le tecnologie quantistiche senza chiedersi che fine abbia fatto il gatto di Schrödinger, un po' come noi usiamo il telefonino senza farci troppe domande sulle leggi quantistiche che governano il trasferimento di carica elettrica nei transistor.

e.
Processore fotonico riconfigurabile. Una complessa rete di microriscaldatori realizzata sulla superficie consente di modificare in modo dinamico la funzionalità del circuito ottico e realizzare così diverse operazioni quantistiche.

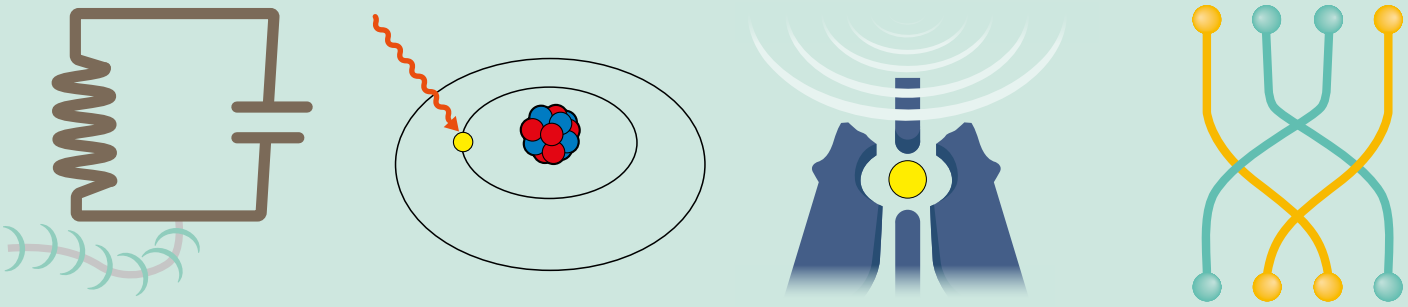
Biografia
Saverio Pascazio è un fisico teorico. È professore presso l'Università di Bari e si occupa di fisica quantistica, fenomeni complessi e complessità quantistica.

10.23801/asimmetrie.2022.33.5

Vantaggio o supremazia?

La ricerca sui computer quantistici

di Massimo Palma



Anelli superconduttori

Una corrente elettrica in assenza di resistenza oscilla avanti e indietro in un circuito ad anello. Iniettando un segnale di microonde si crea una sovrapposizione di stati quantistici.

Pro: Velocità. Basato su tecnologia a semiconduttori già esistente.

Contro: Lo stato quantistico collassa facilmente. Il circuito deve essere raffreddato.

Trappole ioniche

Atomi carichi elettricamente (cioè ioni) hanno livelli energetici quantistici che dipendono dalla posizione degli elettroni.
Con dei laser opportuni è possibile "raffreddare" e "intrappolare" gli ioni in sovrapposizioni di stati quantistici.

Pro: Stati molto stabili, con il più basso tasso di errore per operazione logica.

Contro: Processo lento. Servono molti laser.

Quantum dot

"Atomi artificiali" ottenuti aggiungendo un elettrone a dei piccoli frammenti di silicio puro. Mediante microonde si controlla lo stato quantistico dell'elettrone.

Pro: Stabilità. Basato su tecnologia a semiconduttori già esistente.

Contro: Non si riesce a creare correlazioni quantistiche fra molti dot.

Qubit topologici

Il comportamento di elettroni che si propagano attraverso strutture semiconduttrici artificiali può essere descritto in termini di "quasi-particelle". L'intreccio delle loro traiettorie puo essere utilizzato per codificare informazione quantistica.

Pro: Possibilità di ridurre notevolmente gli errori.

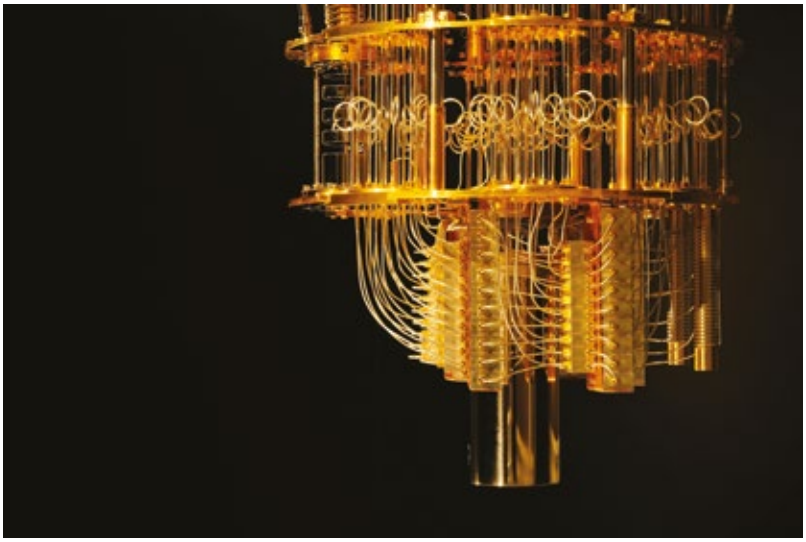
Contro: Esistenza non ancora confermata.

a.
Panoramica delle piattaforme fisiche già utilizzate o candidate per la realizzazione di dispositivi di calcolo quantistici.

Non è semplice orientarsi tra i titoli di testa di pagine web e di riviste online che spesso, con toni sensazionalistici, parlano dell'avvento della cosiddetta "supremazia quantistica" e farsi una idea chiara delle promesse e delle reali possibilità aperte nel campo dei calcolatori (o computer) quantistici. La stessa comunità scientifica oscilla tra grandi entusiasmi e grande prudenza. Oggi, con la realizzazione dei primi veri calcolatori quantistici e con un crescente interesse per le ricadute scientifiche ed economiche che ne derivano, è bene avere un quadro equilibrato e chiaro di cosa dobbiamo realisticamente attenderci dai computer quantistici nell'immediato futuro.
Il primo passo per comprendere cosa si intende per supremazia quantistica è quello di chiarire il concetto di complessità di un algoritmo. Per algoritmo si intende la sequenza di operazioni necessarie per risolvere un problema. La complessità di un problema viene misurata dal numero di operazioni dell'algoritmo che lo risolve in funzione della lunghezza dei dati del problema. Se codifichiamo i dati di un problema in stringhe di bit, ovvero in sequenze di numeri binari che possono assumere il valore 0 o 1, è immediato, ad esempio, rendersi conto che il numero di operazioni necessarie per

b./c.
David Deutsch (a sinistra) ha introdotto il concetto di computer quantistico e di macchina di Turing quantistica nel 1985. A destra, Richard Josza. L'algoritmo di Deutsch-Josza del 1992 è il primo esempio di algoritmo quantistico.

sommare due numeri è direttamente proporzionale alla lunghezza delle stringhe che li codificano, mentre per moltiplicarli è necessario un numero di operazioni proporzionale al quadrato della loro lunghezza. Le operazioni di un algoritmo che opera su stringhe di bit vengono descritte in termini delle cosiddette "porte logiche" (AND, OR, ecc.).
Un calcolatore è semplicemente un sistema fisico – l'hardware – che elabora i dati seguendo le indicazioni di un programma che esegue l'algoritmo – il software. Per essere più concreti, in un moderno calcolatore i bit sono codificati nella differenza di potenziale ai capi degli elementi circuitali delle singole celle di memoria e le porte logiche che agiscono su questi bit cambiano lo stato logico di tali celle secondo regole che dipendono dal programma. In altre parole, un computer traduce una sequenza di operazioni logiche in una sequenza di stati del suo hardware. È importante notare che se un calcolatore è più veloce di un altro significa semplicemente che essi attraversano la stessa sequenza di stati con velocità differenti, ovvero eseguono lo stesso algoritmo – la stessa sequenza di operazioni – ma uno dei due è più veloce nel compiere le singole operazioni.
Nel giro di pochi decenni abbiamo assistito a uno spettacolare processo di miniaturizzazione dei circuiti integrati che costituiscono l'hardware dei moderni computer. Le dimensioni delle singole celle di memoria stanno raggiungendo rapidamente la scala atomica. Quando le singole celle di memoria del computer raggiungono dimensioni microscopiche il loro comportamento non può più essere descritto dalle leggi della fisica classica, ma deve essere descritto dalle leggi della meccanica quantistica. In particolare, per il principio di sovrapposizione, un singolo bit può trovarsi contemporaneamente nei suoi stati logici 0 e 1, in altre parole diventa un quantum bit – ovvero un qubit.
La grande intuizione dei padri del calcolo quantistico fu che un hardware quantistico può eseguire algoritmi impossibili da far eseguire da un hardware classico, in quanto può elaborare in parallelo i dati codificati nella sovrapposizione dei suoi stati interni.
I primi algoritmi quantistici furono proposti da David Deutsch e Richard Jozsa alla fine degli anni '80 e nei primi anni '90. Se tali algoritmi ci appaiono oggi di interesse puramente accademico, essi ebbero il merito di attrarre l'attenzione della comunità scientifica interessata ai fondamenti della meccanica quantistica. Il vero punto di svolta ebbe luogo in quegli anni con la scoperta da parte di Peter Shor di un algoritmo efficiente per la fattorizzazione. Ciò che rende importante l'algoritmo di Shor è il fatto che la fattorizzazione è classicamente un problema complesso, nel senso che gli algoritmi classici noti richiedono un tempo molto lungo per fattorizzare grandi numeri. Inoltre, sul piano pratico, molti protocolli crittografici di uso comune si basano sulla complessità degli algoritmi di fattorizzazione (vd. p. 33, ndr).
La nascita dei primi algoritmi quantistici pose la necessità di capire quali problemi potessero essere risolti efficientemente su un computer quantistico.
È importante notare che sebbene un calcolatore quantistico, potendosi trovare in una sovrapposizione coerente di stati interni, possa elaborare in parallelo più dati, a causa del collasso del suo stato a seguito di una misura solo parte del risultato del processo di calcolo è accessibile. Come conseguenza l'attenzione si concentrò inizialmente su algoritmi quantistici in grado di calcolare in modo efficiente proprietà globali della funzione di interesse, ad esempio la sua periodicità, piuttosto che i suoi singoli valori al variare dell'input. In pratica quasi tutti i primi algoritmi



d.
Particolare del Quantum System One, il computer quantistico della IBM.

(incluso l'algoritmo di Shor) si basavano sul calcolo efficiente del periodo di opportune funzioni. Quale sia la classe di problemi che sicuramente sono risolubili in modo più efficiente da parte di un calcolatore quantistico descrivibile in termini di porte logiche quantistiche resta tuttora un problema aperto.
Un cambiamento di prospettiva ha iniziato ad aver luogo negli ultimi anni con l'avvento dei primi dispositivi di calcolo quantistici realizzati da IBM, Google, Rigetti, DWave, ecc. Non entreremo nel merito delle diverse architetture o delle diverse piattaforme fisiche utilizzate per realizzare questi processori, quello che è importante sottolineare è che tutti questi calcolatori operano nel regime cosiddetto *Noisy intermediate-scale quantum (*NISQ). In tale regime i calcolatori quantistici sono ben lontani dal lavorare in condizioni di "*fault tolerance"*, cioè, a causa delle loro dimensioni ancora ridotte, non è possibile eseguire programmi quantistici di correzione degli errori dovuti alla presenza del rumore ambientale, che distrugge rapidamente le sovrapposizioni coerenti di stati di qubit. In altre parole, l'ambiente fa collassare in tempi brevi lo stato dei qubit, trasformandoli a tutti gli effetti in bit classici e rendendo impossibile l'esecuzione di algoritmi quantistici.
In questo nuovo scenario nascono due nuove parole d'ordine: "supremazia quantistica" e "vantaggio quantistico". La prima cosa che i costruttori di questi primi calcolatori hanno voluto dimostrare è che, sebbene in regime NISQ, essi possono già risolvere problemi praticamente intrattabili su un calcolatore classico, regime appunto noto con il nome di supremazia quantistica. Diversi gruppi, fra cui Google, Xanadu e USTC (China) hanno dichiarato di aver raggiunto la supremazia quantistica. Tuttavia, si tratta di problemi dimostrativi, di interesse pratico molto contenuto.
Un secondo approccio più pragmatico è quello di progettare algoritmi che integrano programmi destinati a computer classici con programmi destinati a computer quantistici per risolvere problemi specifici, tipicamente di ottimizzazione, preoccupandosi non tanto di mostrare la supremazia o il carattere assolutamente ottimale dell'algoritmo rispetto agli algoritmi classici, quanto di migliorare rispetto all'esistente, ovvero di raggiungere il cosiddetto vantaggio quantistico. In questo spirito si stanno sviluppando algoritmi interamente classici ispirati ad algoritmi quantistici. Questa linea di ricerca è di grande interesse potenziale per la ricerca in chimica, in medicina, ma anche nell'ottimizzazione di processi di organizzazione aziendale.
Chiudiamo menzionando la ricerca tesa a esplorare algoritmi quantistici basati non sul paradigma delle porte logiche ma su modelli di reti neurali quantistiche. L'esplorazione di tale approccio promette interessanti sviluppi a breve.

Biografia
Gioacchino Massimo Palma ha lavorato presso l'Imperial College di Londra e il Clarendon Laboratory di Oxford. È direttore del Dipartimento di Fisica e Chimica "Emilio Segrè" dell'Università di Palermo. Si interessa di teoria quantistica dell'informazione dai primi anni '90.

10.23801/asimmetrie.2022.33.6

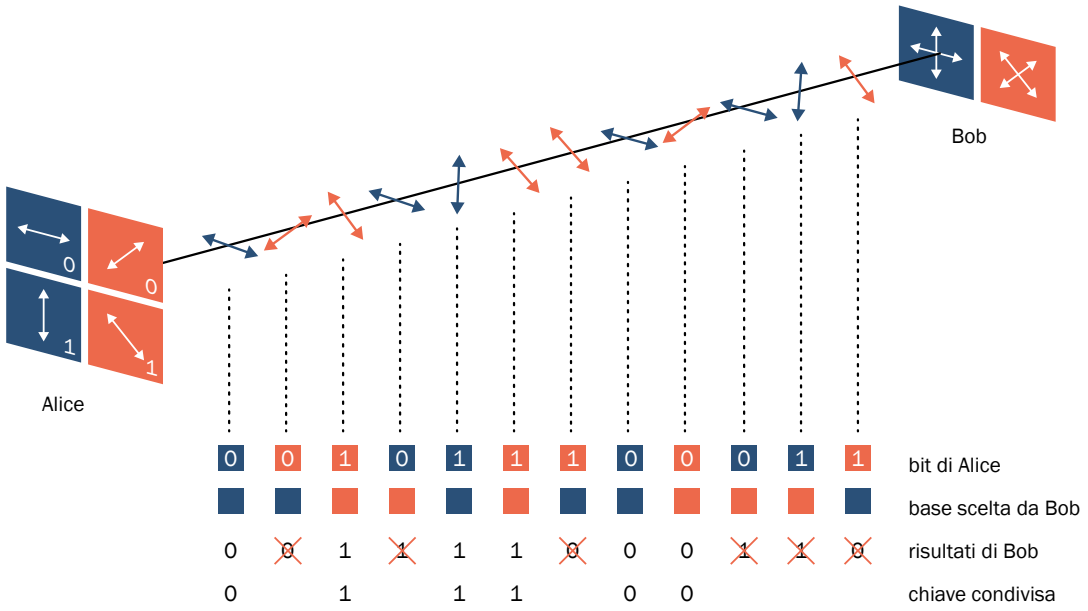
Comunicare nell’era dei quanti

Crittografia, teletrasporto e network quantistici

di Michele Rota, Francesco Basso Basset e Rinaldo Trotta

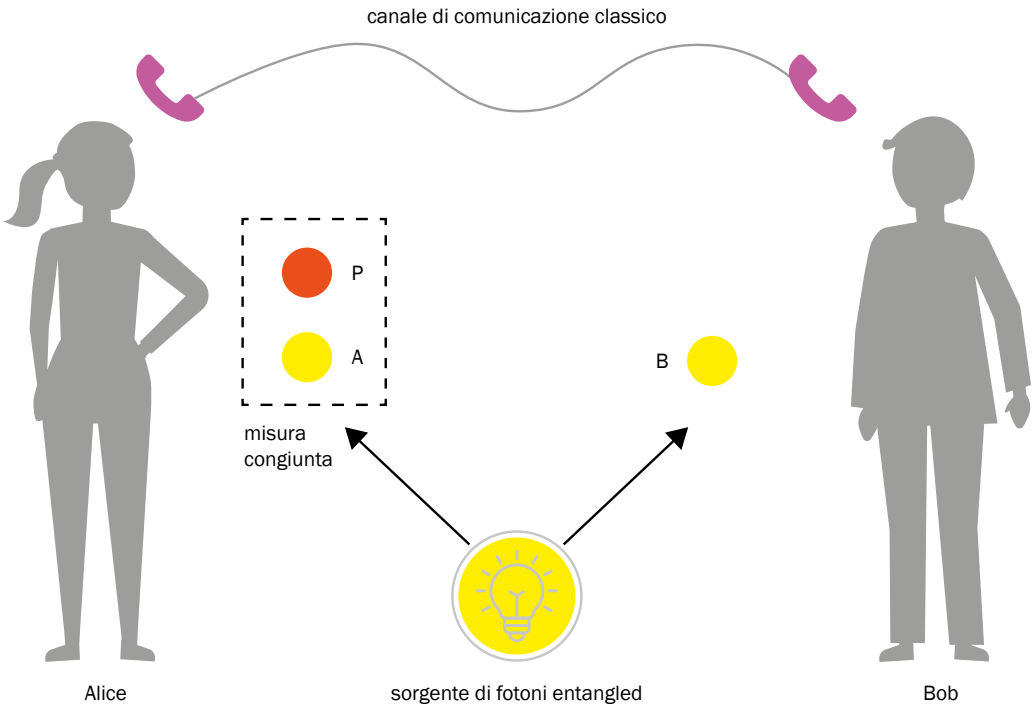
a.
Un esempio di cifrario di Cesare, in cui le lettere dell’alfabeto sono sostituite scorrendo rigidamente l’alfabeto di un numero predefinito di posti. Una ruota fa scorrere due sequenze alfabetiche permettendo la cifratura e la decifratura: a ogni lettera del cerchio interno corrisponde una lettera del cerchio esterno.

La necessità di nascondere o rendere illeggibile un messaggio a occhi indiscreti è stata una preoccupazione della società umana fin dall’invenzione della scrittura: questo ha portato alla nascita della crittografia, dal greco “scrittura nascosta”. Uno dei primi metodi di crittografia è attribuito a Giulio Cesare. Nel cifrario di Cesare le singole lettere del messaggio sono sostituite facendo scorrere l’alfabeto di un certo numero di posizioni, il che rende il messaggio apparentemente illeggibile (vd. fig. a). Sapendo di quante lettere spostarsi è però possibile ricostruire il messaggio originale applicando la trasformazione inversa: si tratta di un esempio di crittografia a chiave simmetrica, dove il segreto condiviso, la chiave, in questo caso è il numero di lettere spostate. La teoria dell’informazione, che nel XXI secolo ha dato delle basi rigorose al campo della crittografia, in realtà dimostra che, per evitare che un simile messaggio criptato venga decifrato, occorre impiegare un cifrario di Cesare diverso per ogni lettera. Nell’algoritmo *one-time pad*, che si ispira a questo principio, la sicurezza viene garantita utilizzando una chiave scelta in maniera completamente casuale, non riutilizzabile (*one-time*), e della stessa lunghezza del messaggio. È importante sottolineare che questo algoritmo “classico” di crittografia è teoricamente perfetto, nel senso che la sua sicurezza è comprovata da un teorema matematico dovuto a Claude Shannon. Tuttavia, rimane aperta l’enorme sfida di come scambiare la chiave tra le due parti in maniera sicura.
Una parziale soluzione a questo inconveniente è il metodo della chiave asimmetrica, in cui una chiave pubblica viene usata per cifrare un messaggio e una chiave privata e segreta è usata per poi decifrarlo. Un algoritmo a chiave simmetrica molto importante è l’algoritmo RSA (dalle iniziali degli ideatori Ron Rivest, Adi Shamir e Leonard Adleman) che è oggi alla base della comunicazione crittografata sulle reti informatiche. Questo metodo si affida a un principio di sicurezza computazionale: la fattorizzazione in numeri primi di un intero richiede risorse estremamente maggiori rispetto all’operazione inversa, ossia la moltiplicazione tra due numeri primi. Ad esempio, utilizzando un



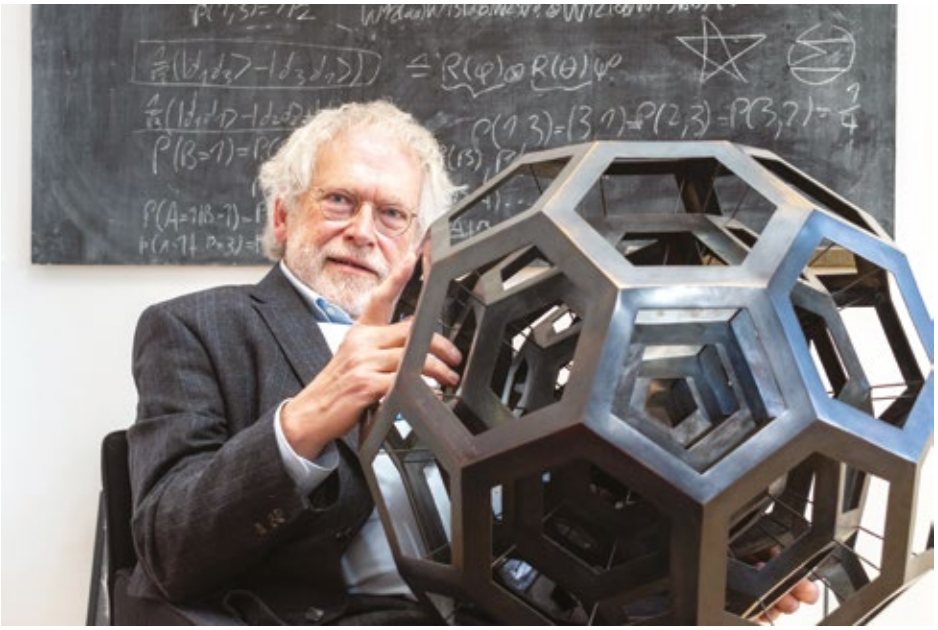
comune algoritmo classico di decodifica, la fattorizzazione di un intero risultante dal prodotto di due numeri primi di tre cifre richiederebbe miliardi di anni. Ma questa sicurezza apparente viene oggi messa in seria discussione dall'avvento della computazione quantistica.
Nel 1994 Peter Shor dimostrò che la fattorizzazione di cui sopra può essere eseguita in una manciata di secondi utilizzando un algoritmo che gira su un computer quantistico. L'avvento delle tecnologie quantistiche pone quindi a rischio la sicurezza dei metodi crittografici moderni, un problema non da poco considerando che già allo stato attuale le perdite stimate per frodi informatiche oscillano tra i 45 e i 654 miliardi di dollari nel solo 2018 (dal Rapporto *Systemic Cyber Risk 2020* del Comitato Europeo per il Rischio Sistemico). La risoluzione di queste difficoltà risiede proprio nella meccanica quantistica e nell'opportunità di guardare in maniera "positiva" ai divieti imposti dalle sue leggi caratteristiche.
È ben noto come la meccanica quantistica limiti le possibilità di intervento su alcune grandezze fisiche del mondo microscopico: è impossibile misurare contemporaneamente due grandezze "coniugate" (come, per esempio, la velocità e posizione di una particella quantistica), osservare uno stato quantistico senza perturbarlo in maniera irreparabile, leggere e copiare uno stato quantistico (*no-cloning*), e la lista dei divieti può continuare. Questa psicologia "negativa", come la definisce Nicolas Gisin, può però essere ribaltata pensando che tali divieti si applichino anche a un malintenzionato, che non può intercettare la chiave segreta senza introdurre errori che ne rivelino la presenza. Proprio questa interpretazione "positiva" dei divieti è alla base della crittografia quantistica e il principio di funzionamento è piuttosto semplice: una chiave segreta viene generata tra due parti trasmettendo un segnale quantistico su un canale in chiaro e codificando i bit della chiave in uno dei suoi gradi di libertà. Comunemente vengono utilizzati fotoni singoli e il loro stato di polarizzazione viene utilizzato per codificare i bit della chiave (vd. fig. b).
Ad ogni passaggio le due parti misurano casualmente lo stato di polarizzazione del singolo fotone e, *a posteriori*, si scambiano informazioni sul tipo di misura effettuata. Quando il tipo di misura coincide, il risultato è aggiunto come bit alla chiave crittografica, altrimenti è scartato. Come detto, le leggi della meccanica quantistica proibiscono di intercettare la chiave senza introdurre errori nella sequenza di bit scambiati, il che offre l'opportunità di verificare una eventuale violazione attraverso confronti mirati. Una volta che la segretezza della chiave viene certificata dalla meccanica quantistica, è possibile utilizzare metodi di crittografia classica, ad esempio *one-time pad*, per scambiare informazioni in maniera completamente sicura.

b.
Esempio del funzionamento di un protocollo di distribuzione di chiave crittografica (il cosiddetto BB84). Alice manda singoli fotoni a Bob, codificando i singoli bit dell'informazione in due "alfabeti" diversi scelti casualmente, dati dalla base della polarizzazione dei fotoni, lineare/orizzontale (blu) e diagonale/anti-diagonale (rosso). Bob riceve i fotoni e li misura scegliendo casualmente la base di misura e segna tutti i risultati ottenuti. Dopo la sessione di trasmissione Alice e Bob confrontano le basi di misura scelte e quando il fotone è stato preparato e misurato nella stessa base mantengono il bit corrispondente che andrà ad aggiungersi alla chiave crittografica. Se i fotoni vengono intercettati e misurati da un "ascoltatore" i risultati delle misure di Bob saranno incongruenti con quelli mandati da Alice e la violazione di sicurezza sarà rivelata.



Esistono già soluzioni commerciali, sviluppate da compagnie come Toshiba e ID Quantique, per lo scambio di chiave quantistica attraverso ordinarie fibre ottiche che raggiungono distanze di alcune centinaia di chilometri. Varie istituzioni di ricerca internazionali hanno realizzato reti dimostrative che coprono distanze maggiori utilizzando stazioni fidate intermedie, e tra esse possiamo annoverare l'iniziativa nazionale Italian Quantum Backbone. Questi progetti di ricerca e sviluppo mirano a realizzare la visione in cui la crittografia quantistica possa inserirsi nella rete di comunicazione globale, collegando diversi nodi mediante fibre ottiche a distanze continentali e intercontinentali e interfacciandosi con satelliti in orbita. Anche in quest'ultimo ambito si riscontra un intenso sviluppo tecnologico, con il satellite cinese Micius che nel 2016 ha dimostrato uno scambio quantistico di chiave segreta su una distanza di 1120 chilometri, sicuro contro eventuali attacchi diretti al satellite stesso.
Una sfida da superare nelle comunicazioni dirette su lunga distanza (si pensi ai 3000 chilometri della dorsale atlantica che connette l'Europa e il Nordamerica) e per la realizzazione in un network globale di comunicazione quantistica è costituita dall'attenuazione del segnale e dall'impossibilità di utilizzare i convenzionali amplificatori ottici, altra conseguenza del teorema di *no-cloning*. Non ci sorprende come la meccanica quantistica ancora una volta offra una soluzione attraverso il celebre protocollo di teletrasporto quantistico. Tramite il teletrasporto quantistico è infatti possibile trasferire fedelmente uno stato quantistico qualsiasi tra due luoghi, senza richiedere che un portatore di informazione in tale stato percorra fisicamente l'intera distanza interposta. Come mostrato in fig. c per la versione fotonica del teletrasporto, il fotone che codifica lo stato quantistico viene fatto "interagire" con un fotone di una coppia di fotoni fortemente correlati tra loro. Il legame tra questi fotoni è talmente forte che qualsiasi "cambiamento" su uno di essi si ripercuote istantaneamente sull'altro, indipendentemente dalla distanza. Questa proprietà, ovvero l'entanglement, permette, con l'ausilio di un canale di comunicazione classico, di trasferire lo stato quantistico sul secondo fotone della coppia e quindi di aumentare le distanze raggiungibili dai protocolli di crittografia.
È possibile fare un ulteriore passo e costruire un ripetitore quantistico in cui è l'entanglement stesso a essere teletrasportato.

c.
Schema del protocollo di teletrasporto quantistico. Alice è in possesso di un fotone (P), il cui stato vuole trasmettere a Bob. Producendo una coppia di fotoni entangled, si fa interagire il fotone di Alice con uno di questi fotoni (A). L'altro fotone entangled (B) è consegnato a Bob. Quando Alice misura lo stato congiunto di P e A, a causa dell'entanglement il fotone di Bob collassa in uno stato collegato con quello di P. Attraverso un canale classico Alice comunica a Bob il risultato della sua misura, e ciò permette a Bob di effettuare un'operazione su B portandolo esattamente nello stato in cui si P trovava all'inizio.



d.
Anton Zeilinger, premio Nobel per la Fisica 2022 insieme a John F. Clauser e Alain Aspect per aver aperto la strada alla scienza dell'informazione quantistica. Il suo gruppo a Innsbruck ha pubblicato nel 1998, in contemporanea al gruppo di Roma di Francesco De Martini, la prima dimostrazione del teletrasporto quantistico descritto in questo articolo.

Una delle proposte principali per realizzare un ripetitore quantistico si basa su un'infrastruttura composta da nodi intermedi, in cui l'entanglement viene teletrasportato a catena fino alle due parti in comunicazione. I nodi possono coinvolgere sia stazioni a terra collegate da fibre ottiche che satelliti in orbita. Con l'ausilio di hardware di memoria volatile (memoria quantistica) che permettono di sincronizzare i diversi nodi della catena, questo protocollo ha la capacità di superare i limiti di attenuazione dei canali di comunicazione ottica. A sottolineare l'importanza di questi concetti ricordiamo come il premio Nobel per la fisica di quest'anno sia stato assegnato a tre pionieri dell'entanglement, Alain Aspect, John Clauser e Anton Zeilinger, che con i loro studi hanno fatto sì che le formidabili proprietà della meccanica quantistica potessero essere applicate alla tecnologia. Lo sviluppo dei ripetitori quantistici presenta nuove sfide tecniche che coinvolgono enti di ricerca e un numero crescente di spin-off universitari e start-up. L'obiettivo principale è quello di realizzare dispositivi in grado di generare in maniera riproducibile miliardi di fotoni singoli o in stati di entanglement al secondo e, allo stesso tempo, di sviluppare componenti in grado di trasferire, manipolare e immagazzinare gli stati quantistici con elevata efficienza, frequenza di operazione e accuratezza. Diverse tecnologie quantistiche si sono dimostrate capaci di soddisfare alcuni dei requisiti ma, allo stato attuale, un ripetitore quantistico funzionale non è stato ancora realizzato. Le ricerche in atto richiedono ancora grandi sforzi, che tuttavia vale la pena sostenere in quanto la realizzazione di un network quantistico su scala globale potrebbe rivoluzionare il nostro modo di comunicare e scambiare informazioni nel prossimo futuro.

Biografia

Francesco Basso Basset è ricercatore presso il Dipartimento di Fisica della Sapienza Università di Roma. Specializzato in spettroscopia ottica, nanotecnologie a semiconduttore e ottica quantistica, la sua attività di ricerca si concentra sullo sviluppo di sorgenti fotoniche a quantum dot e sul loro impiego nell'informazione e comunicazione quantistica.

Michele Rota è assegnista di ricerca nel Dipartimento di Fisica della Sapienza Università di Roma, dove ha conseguito il dottorato di ricerca in fisica nel 2021. Si occupa di esperimenti di ottica per la comunicazione in network quantistici e dello sviluppo di nuove sorgenti di luce entangled basate su quantum dots.

Rinaldo Trotta è professore associato presso il Dipartimento di Fisica della Sapienza Università di Roma, dove coordina il gruppo di ricerca Nanophotonics. I suoi interessi spaziano dalla fisica dei semiconduttori nanostrutturati al campo dell'informazione e comunicazione quantistica.

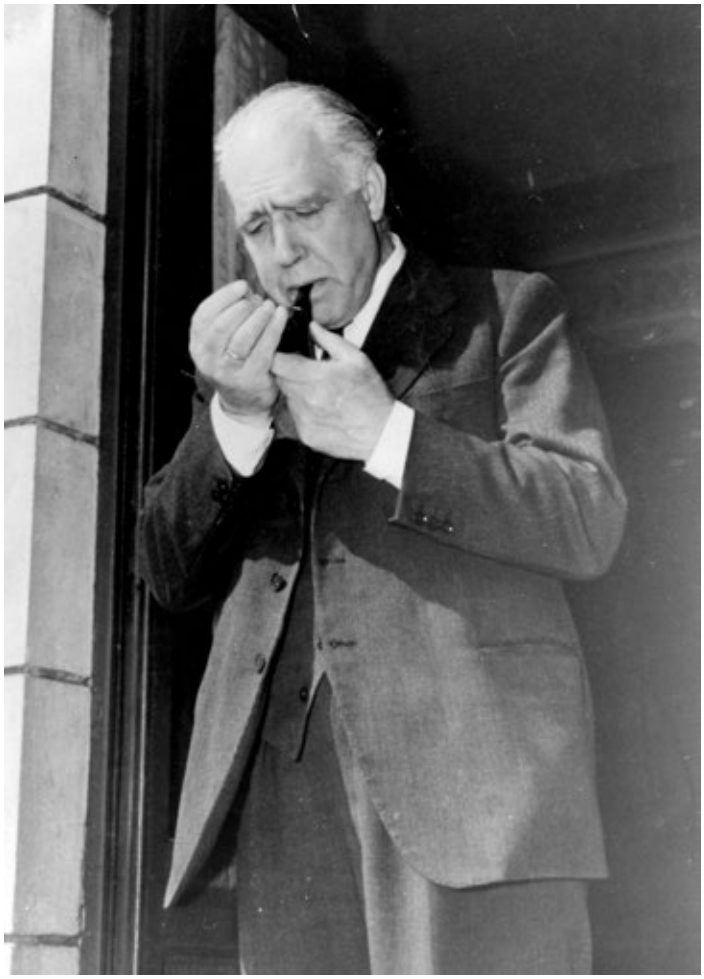
10.23801/asimmetrie.2022.33.7

Contraria sunt complementa

di Federico Laudisa

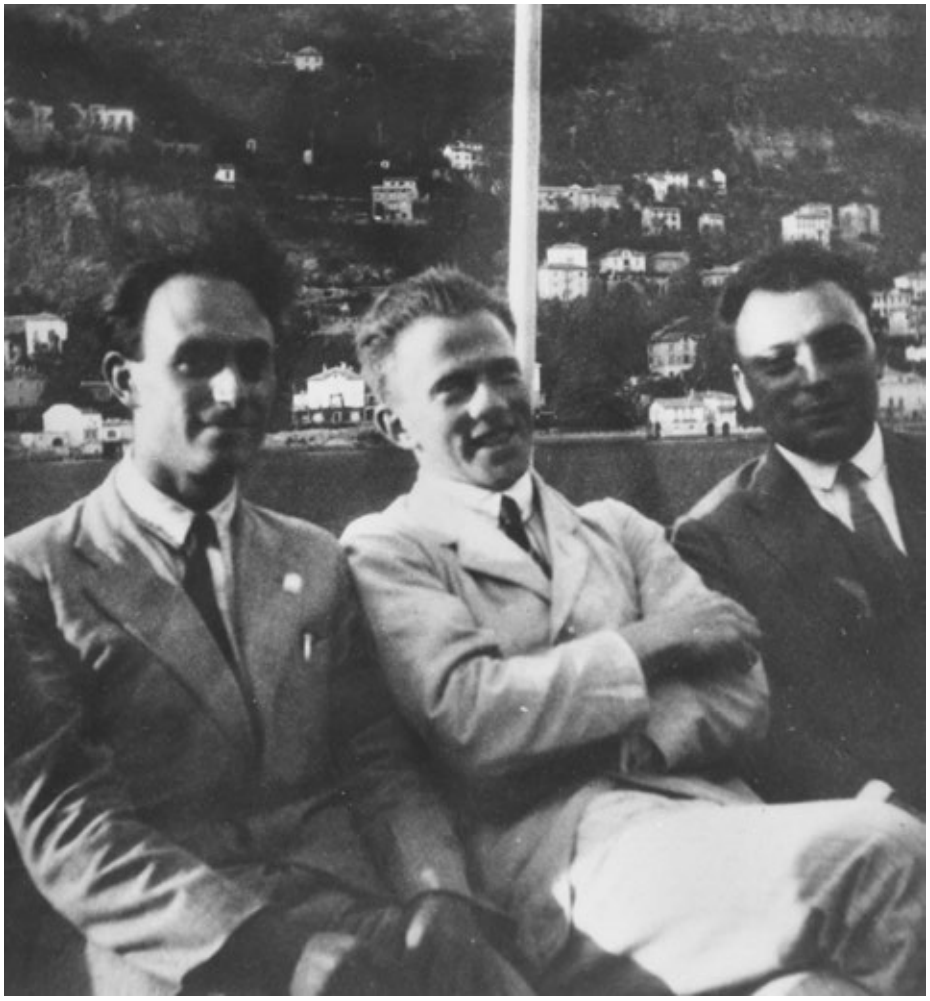
filosofo della scienza

a.
Niels Bohr.



"Bohr era principalmente un filosofo, non un fisico, ma comprendeva che la filosofia naturale nei nostri tempi diventa importante soltanto se ciascuno dei suoi dettagli può essere sottoposto alla prova inesorabile dell'esperimento". Questa descrizione di Niels Bohr (1885-1962), dovuta al suo allievo Werner Heisenberg (1901-1976), descrive efficacemente sia il ruolo che Bohr ha svolto nel costruire un quadro di riferimento concettuale per la teoria quantistica, sia la prospettiva autenticamente filosofica, che egli stesso ha privilegiato nel suo lavoro di scienziato nei decenni della maturità. Niels Bohr ha fornito contributi fondamentali alla fisica atomica nel periodo di costruzione della teoria quantistica – tanto da meritare il premio Nobel nel 1922 – ma nel periodo in cui la teoria si è consolidata, verso la fine degli anni '20 del XX secolo, egli si era ormai dedicato completamente a una riflessione di tipo filosofico, particolarmente attenta alle conseguenze di questa fondamentale ma bizzarra teoria su un'interpretazione generale del mondo naturale. La "filosofia naturale" di Bohr si realizza in particolare nel proporre una nozione dalla quale, secondo il fisico danese, discendono tutti gli aspetti più rivoluzionari e apparentemente enigmatici della teoria quantistica: la nozione di "complementarità". Questa nozione fu proposta ufficialmente in una conferenza intitolata *The quantum postulate and the recent development of atomic theory* (Il postulato quantistico e il recente sviluppo della teoria atomica), tenuta da Bohr il 16 settembre 1927 al Convegno internazionale dei fisici di Como, il primo grande congresso in cui si dibatté della neonata meccanica quantistica. La complementarità è definita dallo stesso Bohr come "essenziale per un'interpretazione consistente dei metodi della teoria quantistica": ma come si presenta questa nozione? Quali sono i suoi presupposti e quali le sue implicazioni?

Soffermiamoci in primo luogo sul significato intuitivo del termine complementarità. Nel linguaggio di uso comune, diciamo per esempio che due membri di un gruppo di lavoro sono "complementari", quando hanno competenze nettamente distinte ma tali che la loro integrazione funziona efficacemente per risolvere una certa classe di problemi.
Ebbene, nello sviluppo della fisica atomica nei primi trent'anni del XX secolo, i fisici si sono trovati a riconoscere la centralità di fenomeni per descrivere i quali abbiamo bisogno di descrizioni "complementari" in un senso simile: Bohr è stato il primo a mettere l'accento su questa circostanza e a sviluppare le conseguenze concettuali e di ampio respiro che ne discendono. Esistono due tipi fondamentali di fenomeni ai quali Bohr si riferisce nel suo uso della nozione di complementarità: in primo luogo, il cosiddetto "dualismo onda-particella" e, in secondo luogo, l'impossibilità di conciliare una descrizione spaziotemporale dei fenomeni quantistici con una loro descrizione causale.
Nel primo caso, esistono situazioni – l'esempio più noto è l'esperimento della doppia fenditura (vd. in Asimmetrie n. 12 p. 7, ndr) – nelle quali i sistemi quantistici sembrano comportarsi "come onde" o "come particelle" a seconda di quale procedura sperimentale di misura si decida di compiere. Nel secondo caso, esistono situazioni nelle quali ci troviamo a poter descrivere i sistemi quantistici o nei termini della loro configurazione spaziale oppure nei termini della loro quantità di moto, ma non nei termini di entrambi. Come scrisse Wolfgang Pauli, riferendosi con la *x* alla posizione e con *p* alla quantità di moto, "non si può fissare



b.
Fermi, Heisenberg, Pauli sul lago di Como nel settembre 1927, in occasione del Convegno internazionale dei fisici.

il valore delle *x* insieme a quello delle *p*. Si può guardare il mondo con l'occhio *x*, oppure con l'occhio *p*, ma se si tenta di aprirli entrambi si ha una visione confusa".
Secondo Bohr, in entrambi i casi siamo indotti a interpretare i fenomeni mediante l'uso di un principio di complementarità, secondo il quale la descrizione completa della situazione fisica ha bisogno di tutti e due i tipi di descrizione, anche se ciascun tipo potrà essere utilizzato su uno dei due tipi di fenomeni e non sull'altro. Sempre secondo Bohr, la necessità di adottare un punto di vista "complementare" sul mondo quantistico nel suo complesso si deve a ciò che, fin dal titolo del celebre articolo del 1927, cui abbiamo fatto riferimento, egli ha definito "postulato quantistico", vale a dire quella fondamentale proprietà di discretezza o discontinuità su cui aveva concentrato l'attenzione fin dalla proposta del suo primo modello atomico del 1913, nel quale gli elettroni erano confinati in stati stazionari su orbite quantizzate e le transizioni erano caratterizzate da processi discontinui di emissione o assorbimento di fotoni.
Come scrive efficacemente il fisico danese: "Il postulato quantistico implica che qualsiasi osservazione di fenomeni atomici comporterà un'interazione con l'apparato di osservazione che non può essere trascurato. Di conseguenza, non sarà possibile attribuire una realtà indipendente nel senso fisico comune né al fenomeno né agli apparati di osservazione. [...] Questo postulato implica una rinuncia alla coordinazione causale e spaziotemporale dei processi atomici".
Bohr sembra concepire insomma la complementarità come una vera e propria "condizione di possibilità" per la descrizione del mondo microfisico in un senso autenticamente scientifico.
In questa prospettiva, diventa allora importante il ruolo che il linguaggio svolge non soltanto nella descrizione dei fenomeni fisici, ma anche nella comunicazione tra gli scienziati. Da qui svolge un ruolo fondamentale l'armamentario linguistico e concettuale "classico", quello cioè che abbiamo ereditato dalla fisica precedente alla fisica atomica e che appare come un adeguato raffinamento del linguaggio con cui gli esseri umani, sistemi fisico-biologici macroscopici essi stessi, interagiscono comunemente. Ancora una volta nelle parole di Bohr: "Il postulato fondamentale dell'indivisibilità del quanto d'azione [...] ci costringe ad adottare una nuova modalità di descrizione designata come complementare nel senso che ogni data applicazione di concetti classici preclude l'uso simultaneo di altri concetti classici che in una differente connessione sono ugualmente necessari per la delucidazione del fenomeno".
Sulla base dunque dell'esigenza primaria che secondo Bohr una teoria fisica fondamentale deve soddisfare, cioè quella di fornire un'adeguata descrizione delle nostre esperienze fisiche sotto l'ipotesi che queste descrizioni soddisfino requisiti di oggettività e, soprattutto, di comunicabilità, è essenziale riconoscere che in qualsiasi resoconto dell'esperienza fisica sia le condizioni sperimentali sia le osservazioni devono essere descritte con gli stessi mezzi di comunicazione usati in fisica classica.

c.
Stemma di Niels Bohr (Ordine dell'elefante) con il motto "*Contraria sunt complementa*" (I contrari sono complementari).

[as] lampi

Quantenschaum
von Durs Grünbein

Nicht nur die Dinge selbst, ihre Erscheinung,
auch die Bedeutungen, die sie seit langem
haben, lassen sich wenden
ins Unvorstellbare.
Ein Mandelbaum, schau,
in voller Blüte, in einer Ecke entdeckt
des Botanischen Gartens, ist nicht nur Topos
in einem Lied, einem Liebesgedicht
sondern reine organische Materie auch.

Näher betrachtet, im extrem kleinen Maßstab,
unsichtbar für Auge und Mikroskop,
ist er ein Tanz von Blasen aus winzigsten
Teilchen in einem Abstraktum – Raumzeit
genannt in der Neuen Physik, die alles im All
in Relation setzt, relativistisch vernetzt:
eine gekrümmte, vierdimensionale Struktur.

Wenn Blasen das Wort ist, Momentum,
und nicht nur Metapher, die schnell zerplatzt.
Jeder Mandelbaum ist ein Quantenschaum.

"*Quantenschaum*", da: Durs Grünbein, *Äquidistanz. Gedichte*.
© Suhrkamp Verlag AG, Berlin, 2022.

Schiuma di quanti
di Durs Grünbein

Non solo le cose in sé, il come appaiono,
anche i significati che da un pezzo
hanno possono volgersi
all'irrappresentabile.
Guarda: un mandorlo
in fiore, scoperto in un angolo
del Giardino botanico, non è solo un topos
in un Lied, in una poesia d'amore,
è bensì anche pura materia organica.

Guardata da vicino, su scala minima,
invisibile all'occhio e al microscopio,
è una danza di bolle fatte di particelle da nulla
in un astratto – detto tempospazio
dalla nuova fisica, che nel tutto pone tutto
in relazioni di zero virgola nulla:
una struttura curva, a quattro dimensioni.

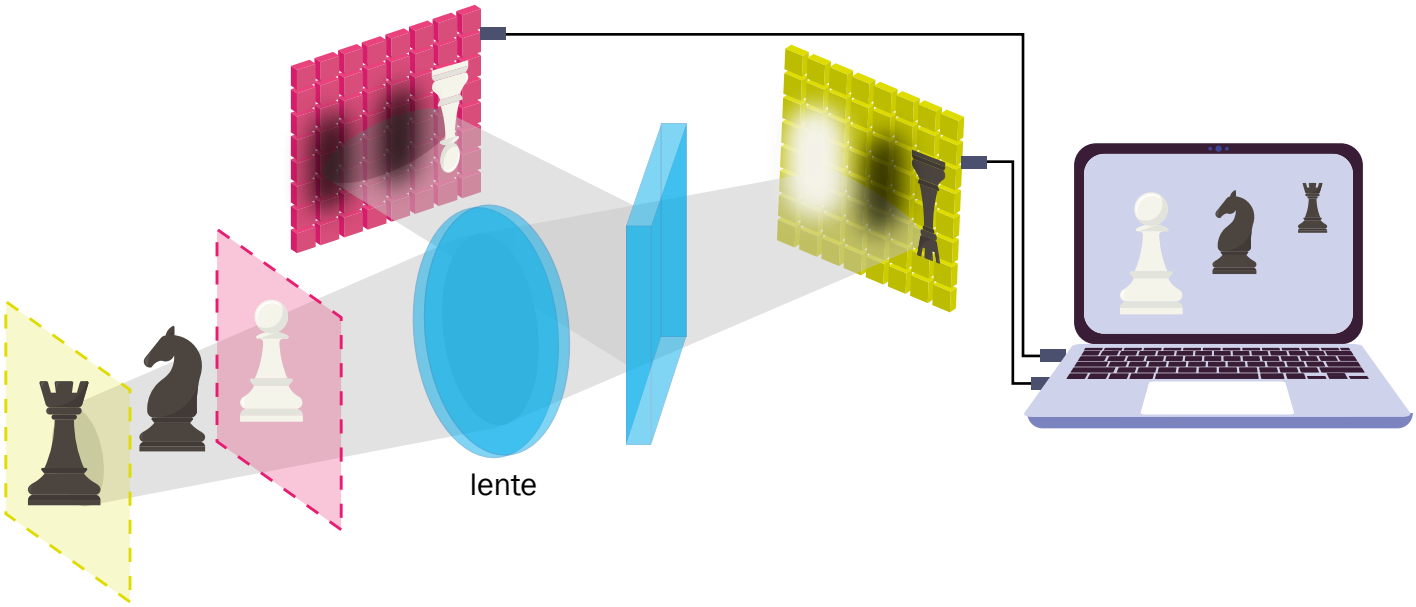
Se la parola è bolle, è momento
e non solo metafora che in un attimo esplode.
Ogni mandorlo è una schiuma di quanti.

Durs Grünbein, "Schiuma di quanti", trad. di Anna Maria Carpi
© 2020 Suhrkamp Verlag Berlin
© 2021 Giulio Einaudi editore s.p.a., Torino
Per gentile concessione di Giulio Einaudi editore S.p.A.

Imaging quantistico

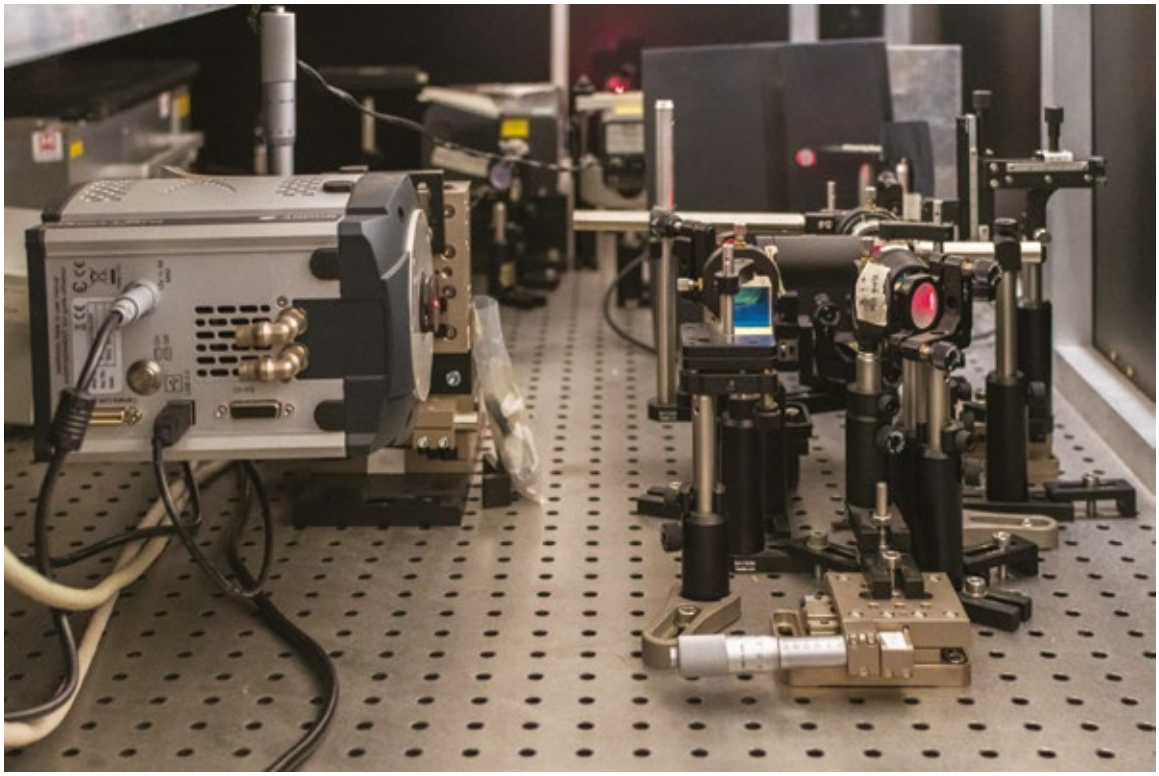
di Milena D'Angelo

fisica sperimentale della materia



a.
La fotografia plenottica quantistica consente di ampliare la profondità di campo dell'immagine acquisita, senza perdere risoluzione. La strategia si basa sull'utilizzo della luce correlata, proveniente dalla scena di interesse: un divisore di fascio consente di inviare su due sensori ad alta risoluzione la luce proveniente dalla scena, che ha attraversato la lente. I due sensori, presi separatamene, riproducono l'immagine a fuoco di due piani diversi della scena tridimensionale. La misura di correlazioni spazio-temporali tra le fluttuazioni di intensità misurate dai due sensori consente di recuperare l'informazione plenottica utile a ricostruire l'intera scena tridimensionale.

Se i computer quantistici promettono una rivoluzione, la fotografia quantistica non è da meno. Siamo abituati a scattare fotografie puntando al soggetto che ci interessa, e siamo costretti a cancellare le fotografie sfocate. Grazie all'*imaging* quantistico, invece, si possono progettare macchine fotografiche capaci di scattare la stessa fotografia, ma puntando alla sorgente luminosa che illumina il soggetto della fotografia, e non più puntando al soggetto stesso. In questo modo potremmo osservare anche soggetti che non sono facilmente accessibili. Possiamo anche progettare apparati fotografici che consentano di rimettere a fuoco, a posteriori, soggetti che nello scatto sono risultati sfocati. Tutto questo, utilizzando la tecnologia dell'*imaging* "plenottico" quantistico, che avviene senza perdita di risoluzione e con una profondità di campo altrimenti irraggiungibile.
Non solo macchine fotografiche, ma qualunque altro dispositivo per la ricostruzione di immagini può utilizzare questa tecnologia quantistica, da un microscopio a una telecamera per droni, satelliti, automobili e cellulari, da un endoscopio o un oftalmoscopio a un dispositivo per l'ispezione industriale. Si tratta di un vero e proprio cambio di paradigma, reso possibile dalla ricchezza delle informazioni che possono essere codificate nelle correlazioni quantistiche della luce e di qualsiasi tipo di radiazione, anche di natura non elettromagnetica. La particolarità di questo tipo di correlazioni è legata all'entanglement, cioè la proprietà per cui, in un sistema formato da più parti, lo stato di ogni singola parte può essere indeterminato, anche quando lo stato del sistema complessivo è ben definito. Questa peculiarità della teoria quantistica è talmente estranea alla nostra intuizione di persone che vivono



b.
Fotografia dell'apparato sperimentale di *imaging* plenottico quantistico basato su fotoni entangled, messo a punto nel Laboratorio di Tecnologie Ottiche Quantistiche 2.0 del Dipartimento Interateneo di Fisica dell'Università e del Politecnico di Bari e della sezione dell'INFN di Bari.

in un mondo "classico", da essere stata al centro di decennali dibattiti, fin dagli albori della meccanica quantistica. Solo alla fine del secolo scorso i fisici hanno intuito che proprio questi aspetti controintuitivi potevano essere in grado di generare una rivoluzione tecnologica, oggi nota come seconda rivoluzione quantistica.
Nel contesto dell'*imaging* quantistico, l'utilizzo di fasci di luce correlati in posizione e in quantità di moto consente di riprodurre le cosiddette "immagini fantasma": uno dei due fasci investe l'oggetto di interesse e viene rivelato da un sensore a singolo pixel. Questo sensore fa scattare un secondo sensore, dotato di risoluzione spaziale, che semplicemente punta alla sorgente, ossia rivela la luce che non ha investito il soggetto. Il fenomeno è stato dimostrato utilizzando, inizialmente, fotoni entangled e successivamente anche luce termica, o caotica. Le correlazioni spaziotemporali intrinseche alla luce caotica sono alla base della cosiddetta "interferometria di intensità", dimostrata per la prima volta nello storico esperimento di Hanbury-Brown e Twiss e successivamente spiegata nel quadro di riferimento dell'ottica quantistica da Roy J. Glauber, padre dell'ottica quantistica e Nobel per la Fisica (2005).
Il gruppo di Tecnologie Ottiche Quantistiche 2.0 dell'Università degli Studi di Bari ha esplorato questo fenomeno fino alle sue estreme conseguenze, realizzando dispositivi capaci di utilizzare le correlazioni della luce per ottenere le immagini plenottiche quantistiche, o "a correlazione", che contengono informazioni sia sulla distribuzione dell'intensità luminosa all'interno della scena di interesse sia sulla direzione di propagazione della luce. La ricchezza delle informazioni acquisite da un dispositivo plenottico a correlazione consente di modificare, a posteriori, il piano di messa a fuoco all'interno dello scatto e di ricostruire l'immagine tridimensionale del soggetto con risoluzioni senza precedenti. La tecnica, protagonista ad oggi di sei brevetti internazionali dell'Università degli Studi di Bari e l'INFN, è stata inizialmente sviluppata nel contesto della microscopia e sta destando l'interesse di medici e biologi, che ambiscono a disporre di microscopi ultra-veloci, per l'osservazione ad alta risoluzione di campioni tridimensionali spessi e di fenomeni dinamici. Nell'ambito biomedico, le tecniche di *imaging* quantistico potrebbero portare anche a dispositivi a raggi X che permetterebbero, sfruttando le correlazioni, una sostanziale riduzione della dose rilasciata al paziente durante una radiografia, mantenendo al tempo stesso un'alta risoluzione volumetrica e un basso rumore. Diverse società dei settori aerospazio e difesa hanno avviato proficue collaborazioni con università ed enti di ricerca per sviluppare competenze e *know-how* in questo settore, mirando allo sviluppo di dispositivi di *imaging* quantistico per applicazioni nell'ambito della sicurezza e dell'osservazione della Terra dallo spazio. In questi contesti, risultano di particolare interesse le nuove possibilità offerte dall'*imaging* quantistico di spingere le prestazioni fino ai limiti di risoluzione volumetrica e di rumore imposti dalla fisica, ma anche di osservare oggetti nascosti, o "dietro l'angolo". Di particolare interesse sono i dispositivi quantistici di acquisizione di immagini "iperspettrali", che promettono di fornire, con un solo scatto e senza perdita di risoluzione, un'elevatissima quantità di immagini di uno stesso soggetto a diverse lunghezze d'onda, consentendo enormi progressi in settori come l'agricoltura, il monitoraggio ambientale, la gestione dei rifiuti.

Rivelatori quantistici a caccia della materia oscura

di Matteo Massicci

Il calcolo automatico e le telecomunicazioni non saranno i soli settori a beneficiare dell'avvento di tecnologie quantistiche mature. La possibilità di sfruttare, anche alla nostra scala macroscopica, le proprietà del mondo quantistico sta infatti aprendo la strada verso un nuovo approccio nella ricerca di candidati per la materia oscura, la misteriosa e predominante componente di materia presente nell'universo, di cui siamo oggi in grado di osservare unicamente gli effetti gravitazionali (vd. Asimmetrie n. 4, ndr). E proprio lo sviluppo di sensori quantistici in grado di esplorare range di energia non accessibili con gli attuali rivelatori, e dietro i quali potrebbe nascondersi la materia oscura, è tra gli obiettivi su cui si stanno concentrando gli sforzi del SQMS (Superconducting Quantum Materials and Systems Center), centro del Fermilab dedicato alla ricerca di nuove tecnologie per il *quantum computing* e il *quantum sensing*. Un'attività a cui l'INFN, in veste di unico partner non statunitense dell'iniziativa, collabora in prima linea attraverso infrastrutture e gruppi di ricerca, come quello a cui lavora Caterina Braggio, ricercatrice INFN dell'Università di Padova. Il suo gruppo di ricerca si sta concentrando sullo sviluppo di un apparato sperimentale con il quale dare la caccia a una particolare classe di possibili costituenti della materia oscura, gli assioni (vd. in Asimmetrie n. 21 p. 34, ndr).

[as]: Che caratteristiche hanno i rivelatori di materia oscura di cui si sta occupando il vostro gruppo e in cosa consiste il vostro lavoro?

[Caterina Braggio]: I rivelatori su cui ci stiamo focalizzando si basano su una tecnologia in realtà già nota, sviluppata a partire da un'idea proposta nel 1982 dal fisico teorico Pierre Sikivie, il quale la concepì al fine di trovare evidenze della presenza di assioni all'interno dell'alone di materia oscura, *halo* in inglese, che, stando alle osservazioni astronomiche, circonderebbe la nostra galassia. Da qui il loro nome, "aloscopi". Questi strumenti si basano su cavità risonanti immerse in un campo magnetico, la cui ampiezza è milioni di volte quella del campo magnetico terrestre, all'interno delle quali si ipotizza possa avere luogo la conversione degli assioni in fotoni. Nell'ambito delle attività promosse da SQMS, il nostro lavoro, che è complementare alle attività portate avanti al Fermilab, mira ad aumentare l'efficienza del processo di conversione degli assioni in fotoni e di incrementare quindi la sensibilità degli aloscopi, connessa a

un parametro di cavità chiamato “fattore di merito”, rendendoli capaci di esplorare frequenze più elevate di quelle sondate finora.

[as]: In che modo i vostri aloscopi appartengono alla categoria delle tecnologie quantistiche?

[CB]: Oltre agli sforzi rivolti al miglioramento delle prestazioni delle cavità risonanti, che rappresentano indubbiamente il cuore degli aloscopi, nei nostri laboratori stiamo affrontando un’altra sfida legata alla ricerca di materia oscura mediante questa tipologia di *set up* sperimentale, ovvero l’individuazione del segnale prodotto dagli assioni convertiti in fotoni. Un compito particolarmente difficile a causa delle ridotte potenze di segnale previste dai modelli teorici, per cui il segnale è immerso nel rumore introdotto dal ricevitore elettronico utilizzato per la lettura del segnale in cavità. Il tempo necessario per sondare lo spazio plausibile dei parametri è deciso sulla base del livello di rumore introdotto, che risulta minimo se utilizziamo amplificatori superconduttivi operanti al limite quantistico. Apparati che sono inoltre raffreddati alle temperature più basse nell’universo, perché il contributo di rumore termico deve essere anch’esso soppresso.

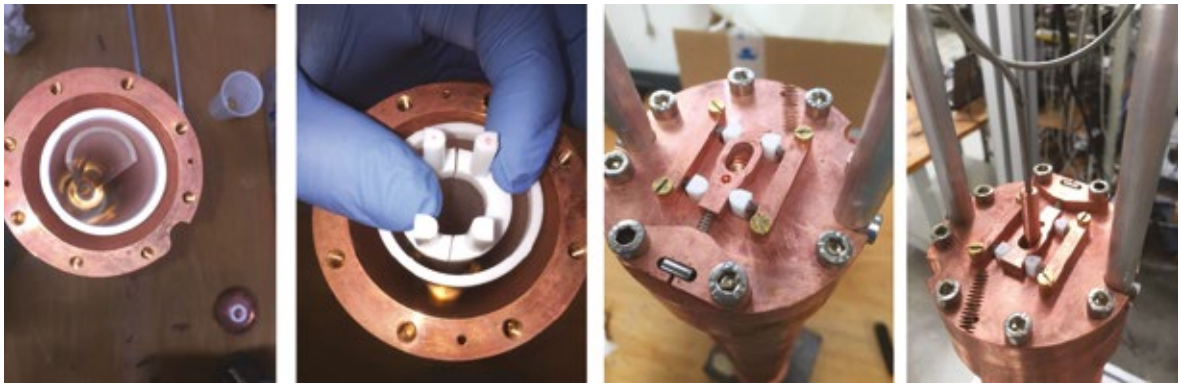
[as]: Quali sono i risultati raggiunti finora e in cosa si differenzia la vostra attività da quella che si sta svolgendo presso il centro SQMS?

[CB]: Il nostro lavoro di sviluppo di aloscopi di nuova generazione è complementare e parallelo rispetto a quello del gruppo statunitense ospitato al Fermilab, e ha consentito di ottenere ottimi risultati per quanto riguarda l’incremento delle prestazioni delle cavità risonanti. L’ultimo tra questi, pubblicato a nostra firma proprio quest’anno, fa riferimento allo studio di un prototipo che abbiamo realizzato inserendo due gusci di materiale dielettrico in una cavità cilindrica convenzionale in rame. La particolare configurazione così ottenuta ci ha infatti consentito di limitare i processi dissipativi sulle pareti di cavità, ottenendo quindi elevati fattori di merito. L’attività dei colleghi statunitensi si sta invece focalizzando sull’adozione di materiali superconduttori in grado di tollerare elevati campi magnetici, come avviene per alcune leghe di niobio, per la costruzione delle cavità. Una strategia che si è dimostrata a sua volta incoraggiante.

[as]: Quali saranno i prossimi passi nell’ambito della collaborazione SQMS e come vi state preparando a migliorare ulteriormente la sensibilità degli aloscopi?

[CB]: Sebbene la nostra tecnica di misura sia già avanzata, anche con l’utilizzo di amplificatori superconduttivi, lo spazio aperto per possibili assioni più pesanti, corrispondenti a frequenze più elevate, non può essere sondato in tempi ragionevoli. Questo limite, che è imposto dalla meccanica quantistica, viene superato cambiando paradigma nella lettura del segnale di cavità, ovvero andando a contare i fotoni generati piuttosto che le ampiezze del campo elettromagnetico della cavità. Sarà quindi necessario fare ricorso a sensori quantistici in senso stretto, come quelli che si basano su “atomi artificiali”, i qubit superconduttivi utilizzati per i primi dimostratori di calcolo quantistico. Ed è proprio questa la direzione che intraprenderemo nel prossimo futuro. Nel nostro laboratorio stiamo infatti preparando un esperimento pilota in cui l’aloscopio sarà dotato di un contatore di fotoni nelle microonde composto da un qubit con le caratteristiche appena descritte, chiamato *transmon qubit*, che aprirà la strada all’utilizzo di questi dispositivi nel campo della ricerca di materia oscura.

a.
Interno della cavità dielettrica e fasi del bloccaggio e movimentazione dei due semicilindri di zaffiro responsabili della variazione della frequenza di risonanza della cavità.



Lo stregatto nel paese dei quanti

di Giuliana Galati

In questo numero di Asimmetrie avremmo voluto intervistare il gatto di Schrödinger. Tuttavia, per farlo avremmo dovuto aprire la scatola in cui è rinchiuso, determinando così se è vivo o se è morto. Nel primo caso nessun problema, a parte qualche possibile graffio dopo tanta reclusione. Nel secondo caso dubitiamo avrebbe potuto miagolare qualcosa di interessante. Per evitare brutte sorprese, abbiamo deciso di rivolgerci a un altro gatto, altrettanto famoso: il Gatto del Cheshire, anche noto come Stregatto, pure lui coinvolto nel mondo dei quanti.

[as]: Salve, Gatto del Cheshire. Dal suo ampio sorriso deduco che è contento di rispondere alle mie domande!

[Gatto del Cheshire]: Si vede che non mi conosci: io ho sempre e da sempre questo sorriso! Dalle mie parti, già a inizio 1800 si usava dire "*to grin like a Cheshire cat*", cioè "sorridere come un gatto del Cheshire", ben prima che Lewis Carroll parlasse di me nel suo celebre libro.

[as]: Sicuramente, però, è con "Alice nel Paese delle Meraviglie" che è diventato famoso in tutto il mondo! Lei si definisce matto, come tutti nel Paese, e ha il potere di scomparire totalmente o parzialmente, lasciando solo alcune parti di sé visibili.

[GC]: È esatto.

Il gatto del Cheshire svanisce con estrema lentezza, cominciando dalla punta della coda, e finendo con il sorriso, che rimane sospeso nell'aria.

[as]: Wow! Vedere un gatto che sorride è cosa rara, ma un sorriso senza gatto non l'avevo mai visto! Pensavo fosse un'invenzione letteraria...

Il gatto del Cheshire riappare.

[GC]: Beh, inizialmente lo era. Fino a poco tempo fa non c'era nessuno fuori dal Paese delle Meraviglie che potesse separarsi da una parte di sé in questo modo.

[as]: Perché, adesso invece qualcuno può farlo?

[GC]: Nel Paese dei Quanti sì. È iniziato tutto dalla mente matta di alcuni fisici teorici... Come sai siamo tutti matti qui... Beh, loro hanno immaginato di poter mettere una particella in una scatola e una sua proprietà in un'altra.

a.
Alice e il Gatto del Cheshire in un'illustrazione del 1898.

[as]: In che senso?

[GC]: Immagina una persona che corre. A fine gara il suo corpo taglia il nastro del traguardo, mentre la sua velocità ne taglia un altro.

[as]: Difficile da immaginare... Si può fare davvero?

[GC]: Tra il 2013 e il 2014 un gruppo di scienziati ci è riuscito e ha dato il mio nome a questo effetto. Proverò a spiegarti come si fa, ma attenzione alle mie parole: come dice la Duchessa, mia padrona, "tu non sai un granché, e questo è un fatto".
Si prende un fascio di neutroni e lo si divide in due con un interferometro: si selezionano quelli che hanno la proprietà di avere lo spin parallelo alla direzione di propagazione da una parte, quelli con spin opposto dall'altra. I due fasci seguono cammini diversi e vengono ricombinati alla fine del percorso, dove si conta quanti neutroni ci sono o si misura la direzione del loro spin. Lungo uno dei due percorsi, però, si può inserire qualcosa che modifichi il fascio che passa di lì. Per esempio, si può inserire un filtro, che assorbe parte dei neutroni, oppure si può alterare il loro spin con dei campi magnetici. Quando si va a vedere cosa c'è alla fine, si trova che è come se i neutroni fossero nel primo fascio e seguissero un percorso, separati dal loro spin, che invece è nel secondo fascio e segue un altro percorso. In sostanza, gli stregatti vanno da una parte, i loro sorrisi dall'altra.
Con la stessa tecnica sono stati separati anche fotoni dalla loro polarizzazione.

[as]: Temo di essermi persa...

[GC]: Cercherò di essere più chiaro con un esempio. Immagina una fila di stregatti, con il loro bel sorriso stampato sul muso. Passano attraverso un cristallo magico che fa andare da un lato gli stregatti senza sorriso e dall'altro solo i sorrisi, su due percorsi diversi. Prima che i percorsi si uniscano nuovamente, sul cammino degli stregatti viene posta una trappola che ne cattura una parte. Alla fine del percorso si troveranno meno stregatti. Se però la trappola per stregatti viene posta sul percorso dei sorrisi nessuno stregatto ci cadrà dentro, e il numero totale al traguardo non cambierà.
Oppure possiamo mettere lungo il percorso una "macchina ruota sorrisi". Se la mettiamo sulla strada percorsa dagli stregatti senza sorriso non avrà alcuna influenza e all'arrivo ognuno di loro avrà il solito sorriso. Se la mettiamo lungo la strada percorsa dai sorrisi, invece, questi verranno ruotati e alla fine troveremo degli stregatti con il sorriso all'ingiù.

[as]: Continua a sembrarmi un fenomeno degno dei sogni di Alice...

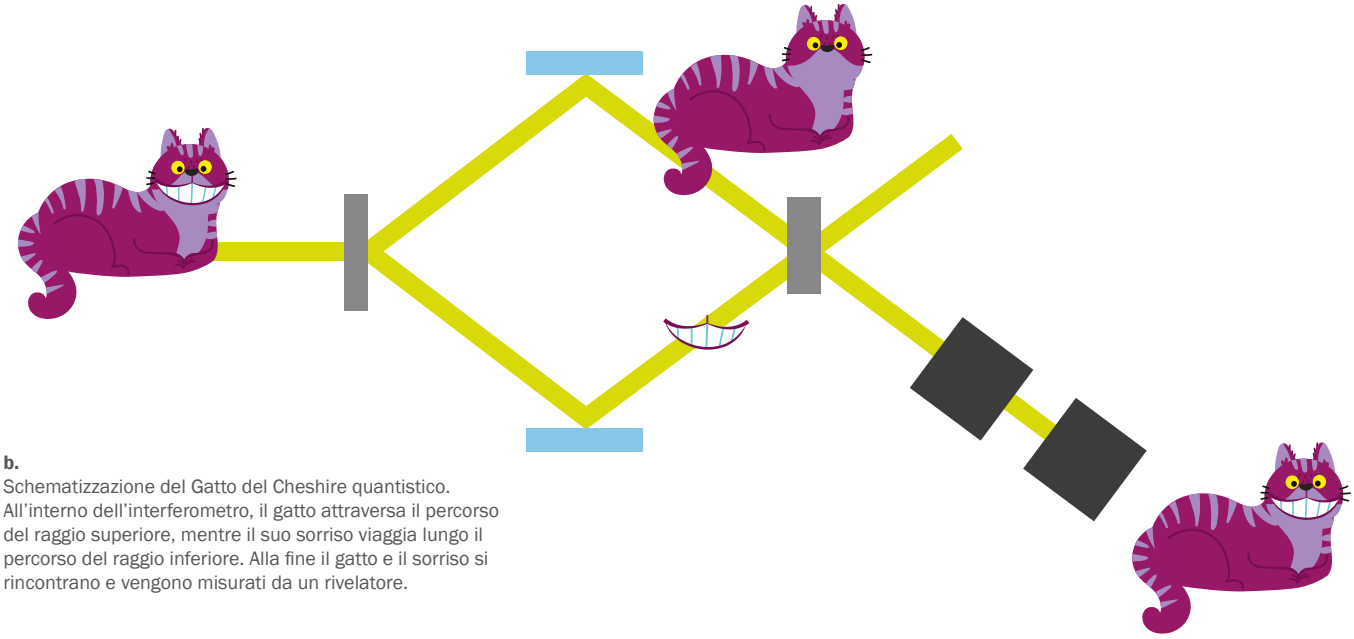
[GC]: E invece è la realtà del Paese dei Quanti! Si tratta di una scoperta che potrebbe consentire di fare complesse misure quantistiche o avere risvolti sul futuro delle tecnologie di comunicazione.

[as]: Potrebbe anche smettere di ridere in maniera così beffarda, però, faccio solo fatica a immaginarmelo...!

[GC]: Me l'aspettavo.

[as]: Un'ultima domanda... Mi può dire, per favore, quale strada devo prendere per uscire di qui?

[GC]: Dipende in gran parte da dove vuoi andare...



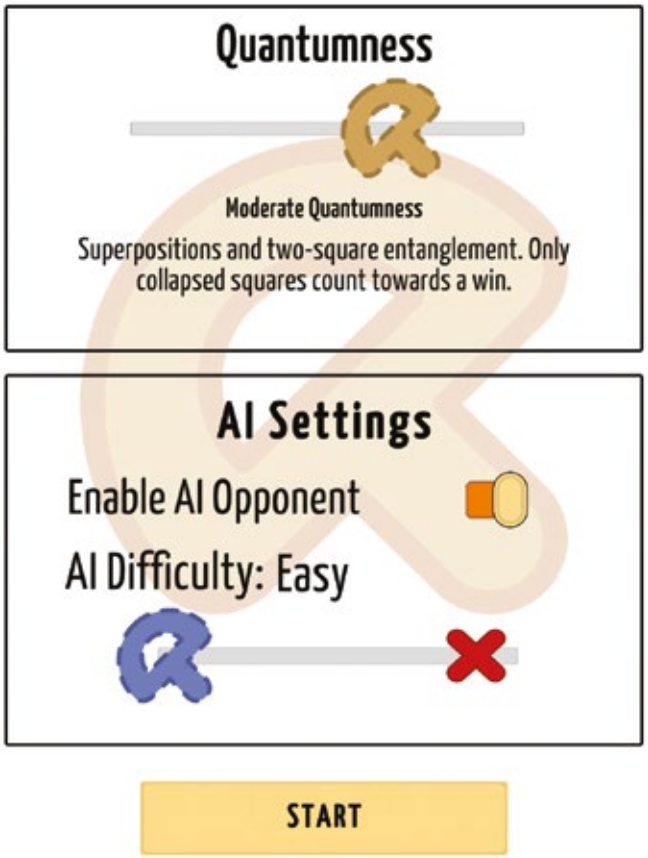
b.
Schematizzazione del Gatto del Cheshire quantistico. All'interno dell'interferometro, il gatto attraversa il percorso del raggio superiore, mentre il suo sorriso viaggia lungo il percorso del raggio inferiore. Alla fine il gatto e il sorriso si rincontrano e vengono misurati da un rivelatore.

Tris quantistico

di Anna Greco

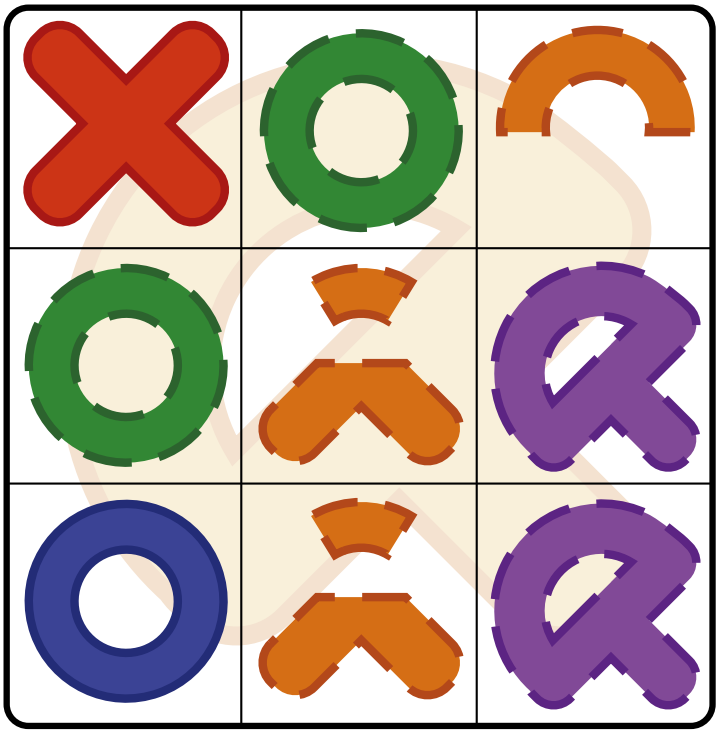
Due penne e un foglio sono tutto ciò che serve per giocare a tris, uno dei giochi più semplici e popolari, con poche regole lineari: uno schema 3x3, fatto di nove spazi da riempire a turno con il proprio simbolo, X oppure O, con lo scopo di disporne tre accanto in orizzontale, verticale o diagonale prima dell'avversario. Ma cosa succede se lo schema di gioco diventa quantistico?
Questa è la sfida di QuantumTiqTaqToe, una app sviluppata dal ricercatore Evert van Nieuwenburg con il supporto dell'Institute for Quantum Information and Matter del Caltech (California, USA).
Il gioco prevede quattro livelli di "*quantumness*", da "nessuna *quantumness*", in cui il gioco si riduce alle regole classiche, alla "alta *quantumness*". È possibile giocare in due o contro un'intelligenza artificiale. Nella versione gratuita del gioco, l'intelligenza artificiale è in modalità "facile", ma non è per niente semplice batterla nei livelli più avanzati. A seconda del grado di "*quantumness*", in cui si decide di giocare, cambiano le mosse possibili. Al primo livello si introduce il principio di sovrapposizione, al secondo l'entanglement e al terzo la possibilità di combinare entanglement e sovrapposizione.
La sovrapposizione permette di inserire il proprio simbolo simultaneamente in due spazi della griglia. Con l'entanglement il giocatore può scegliere di realizzare l'entanglement tra il proprio simbolo e quello dell'avversario. In quest'ultimo caso, il simbolo cambia e diventa una specie di Q, a metà tra O e X. Il gioco procede fino a che lo schema non si è riempito, e a quel punto lo stato del terreno di gioco collassa in uno stato finale, scelto fra tutti quelli possibili, e tutti i simboli assumono una posizione definitiva, lasciando liberi alcuni degli spazi. Se c'è entanglement fra due simboli, il valore assunto da uno dei due simboli condizionerà quello assunto dal simbolo entangled.
Si prosegue allo stesso modo fino alla vittoria di uno dei due giocatori o al pareggio.
Al massimo livello di "*quantumness*", si possono combinare fra loro le mosse, creando entanglement fra i propri stati sovrapposti e gli stati sovrapposti del proprio avversario. Si ottengono così stati di un nuovo tipo, con quattro possibili esiti dopo il collasso dello spazio di gioco. Esiste in tutti i livelli anche la possibilità di misurare uno stato prima che l'intero spazio di gioco sia riempito, utilizzando il proprio turno per richiedere che si definisca lo stato di una X od O.
Il gioco è gratuito nella sua versione base, mentre la versione completa può essere acquistata od ottenuta gratuitamente per finalità educative. QuantumTiqTaqToe, infatti, non è solo un curioso passatempo per chi già conosce la meccanica quantistica, ma uno strumento didattico per familiarizzare con

a.
QuantumTiqTaqToe permette di giocare con quattro livelli crescenti di "quantumness", in cui si introducono gradualmente sovrapposizione, misura ed entanglement degli stati. Si può giocare in due o contro un'intelligenza artificiale.



la logica del mondo quantistico. Esistono diversi giochi, inclusa una precedente versione del tris quantistico con un altro set di regole, che mirano a trasmettere uno o più concetti della meccanica quantistica. Affiancati ad altri strumenti didattici – lezioni frontali, laboratori, simulazioni – i giochi educativi sono una risorsa molto valida per consolidare e approfondire le conoscenze, a patto che rimangano divertenti e avvincenti.
La dinamica di gioco di QuantumTiqTaqToe rimane appassionante anche al crescere della difficoltà, e i giocatori sono invogliati così a capire quando e come utilizzare le caratteristiche quantistiche del gioco per volgere la situazione a proprio vantaggio. Mentre per il tris classico è possibile calcolare le combinazioni possibili e le possibilità di vittoria, per QuantumTiqTaqToe, con questo set di regole, non è noto se ci sia o meno una strategia vincente, e questo rende la sfida ancor più interessante.
Reinterpretando le regole di un gioco semplice e noto in chiave quantistica, ragazzi e ragazze possono sperimentare attivamente concetti astratti come stato, sovrapposizione ed entanglement. E magari percepire come meno ostiche le controintuitive regole del mondo quantistico.

Per esplorare la app:
https://quantumtictactoe.com



b.
Le mosse possibili in QuantumTiqTaqToe. In rosso, una X che è già stata misurata, quindi non cambierà una volta che lo stato del terreno di gioco collasserà, a differenza della O blu, non ancora determinata. Le due O in verde sono entangled fra loro, le due Q in viola sono uno stato entangled fra X e O, mentre le caselle arancioni sono due stati sovrapposti XX e OO entangled fra loro.

L'impervia montagna raffigura la forma dello spettro di emissione del corpo nero, che emette onde elettromagnetiche di ogni frequenza, sia visibile (dal rosso al violetto) che invisibile (ultravioletto e infrarosso, resi in bianco e nero). La trama dello spettro è un pizzo di quanti di energia che creano un motivo onnipresente.
Due scalatori s'inerpicano lungo le pareti scoscese per raggiungere il bosco sulla sommità, dove, celata tra le fronde, appare l'equazione di Schrödinger sotto forma di tronchi contorti, con radici ben salde nello spettro di corpo nero. Ben più semplice sarebbe stata la salita seguendo la scalinata della quantizzazione, ove gli unici gradini colorati corrispondono ai livelli di emissione dell'atomo di idrogeno. Un dodo è incerto sul da farsi, e per ora contempla il vuoto e quelle che sembrano facce di dadi incastonate nel pavimento. Sotto il pavimento, il caos regna sovrano, dal disordine all'ordine, dalle domande alle risposte, seguendo strade non scontate.
Sul fondo, presenza incombente ma discreta, la funzione d'onda domina la scena.

"Allegoria quantistica", tecnica mista su carta. Illustrazione e testo di Alessandro Nagar

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

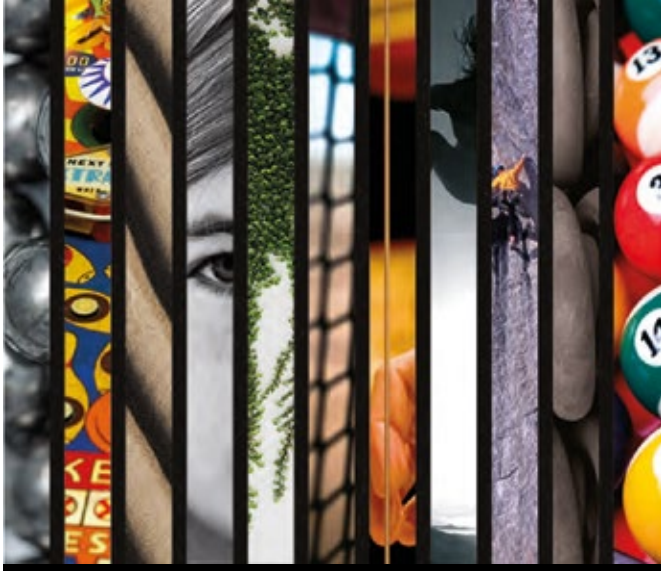
Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)
T + 39 06 94032423
/ 2552 / 2643 / 2942
comedu@lnf.infn.it
www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)
T +39 0862 437265/450
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)
T + 39 049 8068342 356
stage@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)
T + 39 095 542296
visiteguidate@lists.lns.infn.it
www.lns.infn.it

www.infn.it



Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

Per **abbonarti gratuitamente** ad Asimmetrie
o per **modificare** il tuo abbonamento vai su:
http://www.asimmetrie.it/index.php/abbonamento

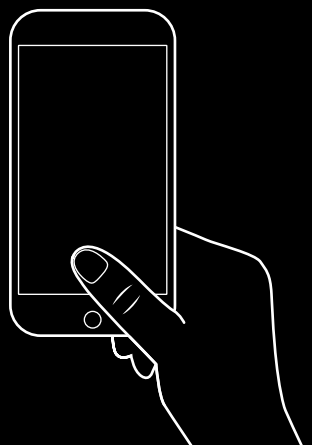
Si prega di tenere sempre aggiornato il proprio
indirizzo mail per ricevere le nostre comunicazioni.

Leggi anche le nostre **faq** su:
http://www.asimmetrie.it/index.php/faq

Asimmetrie è anche una app,
ricca di nuovi contenuti multimediali.

DISPONIBILE SU App Store

DISPONIBILE SU Google Play



ISSN 1827-1383
9 771827 138009

INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it