

La fisica di Star Trek

Intrecci, sovrapposizioni e gatti quantistici

di Marco Genovese

La meccanica quantistica, pur essendo una teoria di enorme successo, necessaria per comprendere non solo il mondo microscopico, dagli atomi alle particelle elementari, ma anche fenomeni come la conduzione nei metalli o per descrivere l'universo alle sue origini, non è conosciuta quanto altre teorie della fisica del XX secolo (come, ad esempio, la relatività). Essa presenta, infatti, alcune proprietà controintuitive che ne rendono ostica la comprensione. Tra le caratteristiche peculiari della meccanica quantistica vi è la possibilità che un sistema fisico non possieda una proprietà ben definita prima che questa venga misurata, ma si trovi in una "sovrapposizione" di possibilità. Ad esempio, succede che un elettrone non sia né in questa stanza, né nella vicina, ma in una sovrapposizione dei due casi e solo al momento della misura "collassi" in una delle due possibilità. Quando il principio di sovrapposizione (vd. approfondimento p. 9, ndr) è esteso a sistemi macroscopici (per i quali, in linea di principio, la meccanica quantistica continua a valere) si verificano delle situazioni paradossali. Un esempio emblematico venne proposto da Schrödinger con il suo famoso "gatto". Si immagini di avere una particella con una certa probabilità di decadere (cioè di trasformarsi in una con energia inferiore) in un dato intervallo di tempo. Per le leggi della

meccanica quantistica, dopo tale intervallo si avrà uno stato sovrapposto particella-decaduta, particella-non-decaduta. Si supponga inoltre che tale particella sia in una scatola chiusa, contenente una fiala di veleno, attivata dal suo decadimento, assieme a un gatto. Se le leggi della meccanica quantistica si estendono anche ai sistemi macroscopici, anche il gatto nella scatola finirà in una sovrapposizione gatto-vivo, gatto-morto (a seconda, se la particella decadendo abbia attivato il veleno o meno). Esempi di questo tipo hanno generato il dibattito, non ancora concluso, su come avvenga la transizione tra un mondo microscopico quantistico probabilistico e uno macroscopico classico deterministico. D'altro canto, quando il principio di sovrapposizione è esteso a sistemi di più particelle, si generano degli stati quantistici, per i quali il valore di una grandezza osservabile (ad esempio la polarizzazione) di una specifica particella in un certo stato quantico non è definito prima di effettuare una misura. Tuttavia quando si effettua una misura su una delle particelle dello stato, questo determina istantaneamente anche i valori delle grandezze osservabili di tutte le altre particelle, per quanto lontane: la cosiddetta *non-località quantistica*. È questo il fenomeno noto con il termine inglese di entanglement.

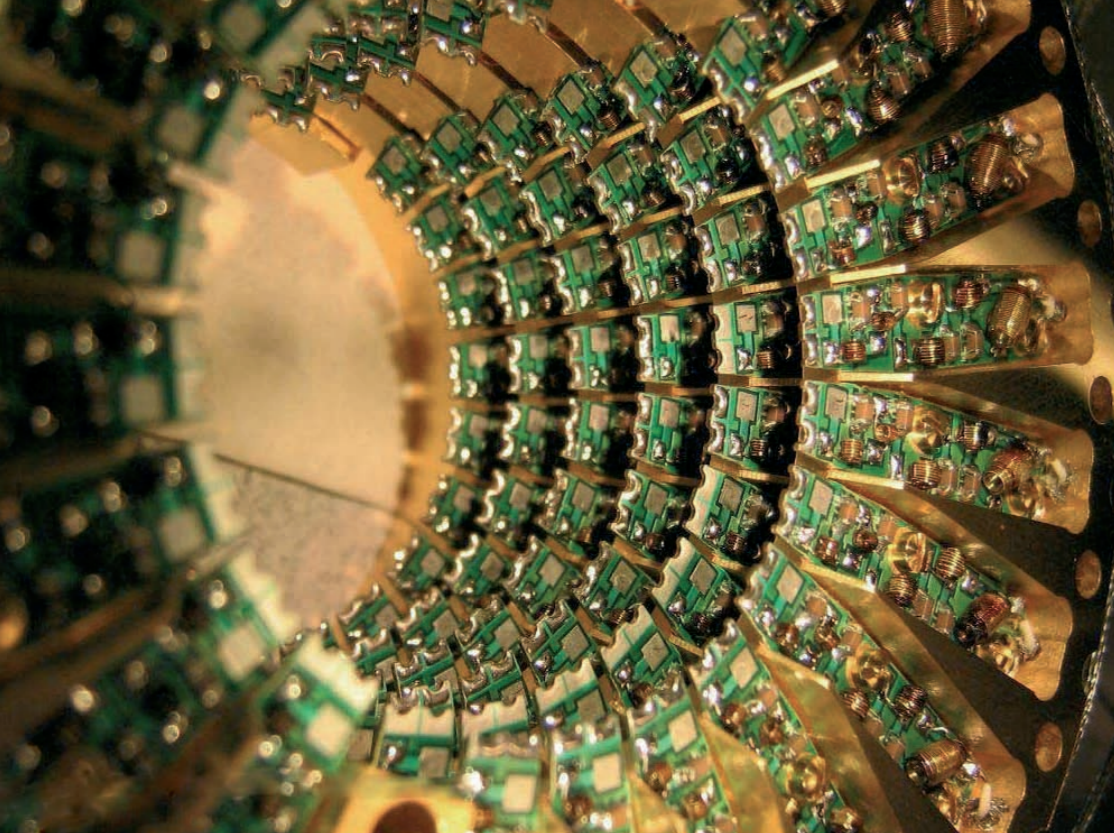


a.
John Bell al Cern negli anni '80.

Tali inusuali proprietà hanno originato un ampio (e non concluso) dibattito sui fondamenti della fisica nel corso del secolo passato. In sostanza, uno dei punti chiave di questo dibattito era, se potesse esistere una teoria più generale della meccanica quantistica, in cui tutti i risultati delle misure fossero fissati a priori da *variabili nascoste*, ovvero variabili descritte in una teoria più generale, al momento a noi ignota. John Bell dimostrò che nessuna teoria di questo tipo può riprodurre i risultati sperimentali della meccanica quantistica, quando si considerano stati di tipo entangled. Gli esperimenti condotti con fotoni entangled hanno quindi dimostrato la correttezza della meccanica quantistica nella sua versione standard. Tali esperimenti hanno però avuto anche, come spesso capita per la buona fisica di

base, un'importante ricaduta tecnologica, aprendo la strada allo sfruttamento dell'entanglement come risorsa per nuove tecnologie: le *tecnologie quantistiche*, che si propongono di superare i limiti delle attuali tecnologie sfruttando le proprietà dei sistemi quantistici. La prima e più sviluppata di queste discipline è l'*informazione quantistica*, che si occupa dello studio della codifica, trasmissione ed elaborazione dell'informazione sfruttando queste proprietà, in particolare quelle dei fotoni. Così come nell'informazione classica si codifica su due bit (0,1), in quella quantistica si codifica su un sistema a due livelli (ad esempio, la polarizzazione di un fotone), indicati con $|0\rangle$ e $|1\rangle$. Tuttavia, a causa del principio di sovrapposizione, ora anche uno stato con bit non definito, del tipo $a_0|0\rangle + a_1|1\rangle$

(ove a_0 e a_1 sono due coefficienti), sarà possibile. Allora, sarà anche possibile lo stato entangled del tipo $a_{0,0}|0,0\rangle + a_{1,0}|1,0\rangle + a_{0,1}|0,1\rangle + a_{1,1}|1,1\rangle$ e così via, continuando ad "aggiungere" 0 e 1 quasi all'infinito! È proprio per questa proprietà peculiare che si ottengono risultati non ottenibili con i sistemi classici. Questo consente di realizzare comunicazioni sicure, ovvero di codificare e trasmettere un messaggio sfruttando l'entanglement dei fotoni (vd. p. 10, ndr). Vi sono sistemi già commercializzati che permettono trasmissioni su fibra ottica di una chiave crittografica sino a oltre 100 km! E se si considera l'elaborazione di informazioni, si pensi che mentre il più veloce dei calcolatori attuali impiegherebbe molto di più della vita



b. Prototipo del primo computer quantistico "commerciale" a 16-qubit, sviluppato dall'azienda canadese D-Wave nel 2007.

dell'universo per ridurre in fattori un numero di cento cifre, un eventuale calcolatore quantistico potrebbe effettuare tale calcolo in pochi minuti! Primi esempi di calcolatori quantistici, per il momento a pochi *qubit* (*quantum bit*), sono stati recentemente realizzati usando fotoni o ioni. Il problema maggiore da superare per raggiungere prototipi con un numero di qubit significativo è mantenere per tempi utili la proprietà di entanglement, nonostante l'interazione con l'ambiente tenda a distruggerla: alcune idee in merito sono già in corso di studio. Una ulteriore tecnologia quantistica particolarmente "fantascientifica" è il cosiddetto *teletrasporto*, in cui, come nel film Star Trek, lo stato ignoto di una particella quantistica (ad esempio, la polarizzazione di un fotone) viene distrutto in un laboratorio da una misura congiunta con una componente di uno stato entangled e ricostruito esattamente eguale, sfruttando la condivisione dello stato entangled, in un laboratorio remoto, senza che le informazioni sullo stato vengano acquisite, né venga trasferita materia. La meccanica quantistica, infatti, proibisce che si possa caratterizzare completamente un singolo stato a causa del principio d'indeterminazione. Per il momento ciò è stato fatto per fotoni e atomi, ma nessuna legge fisica proibisce che in futuro

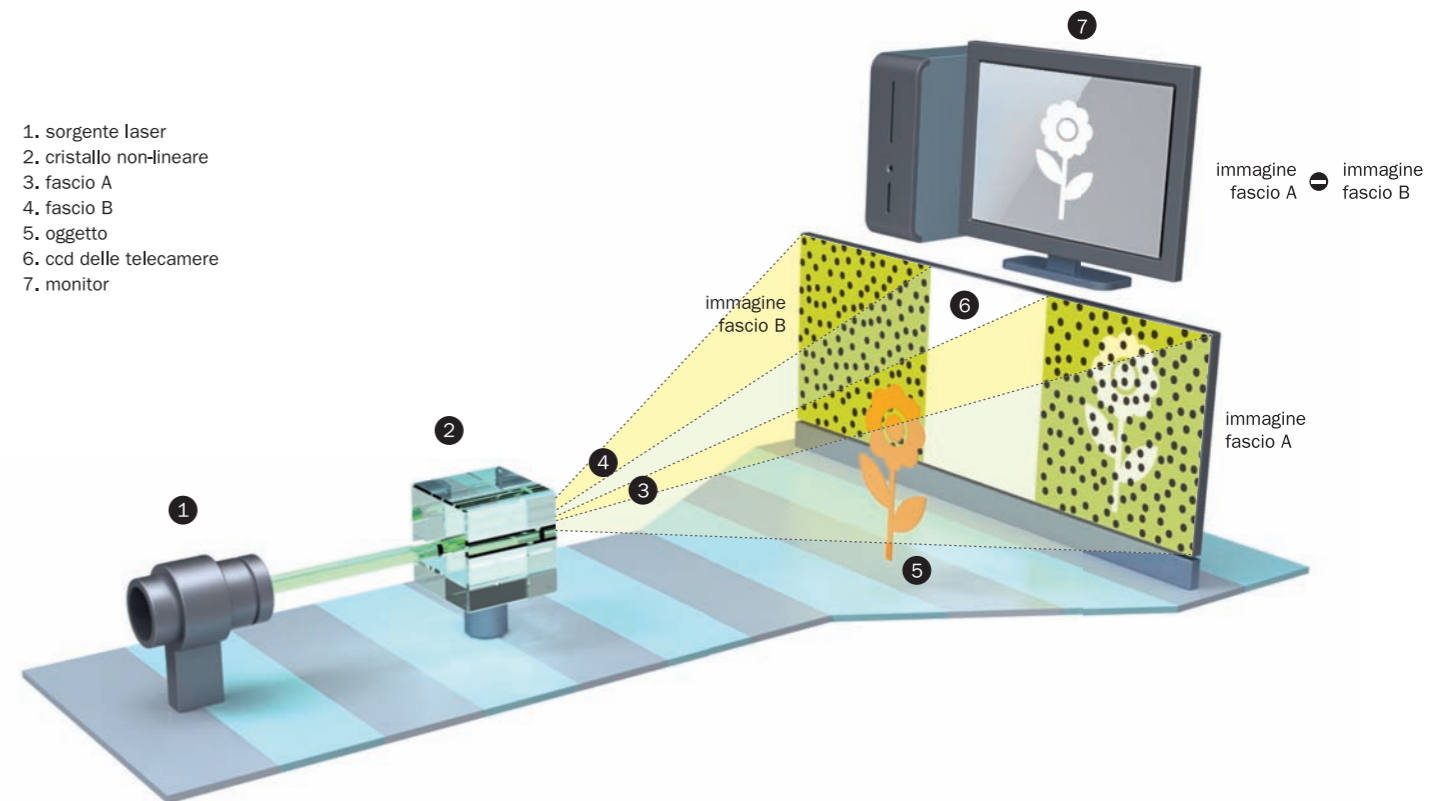


c. La celebre astronave Enterprise del telefilm "Star Trek", in cui si trova la cosiddetta "sala teletrasporto", usata per trasferire istantaneamente membri dell'equipaggio da una parte all'altra dell'universo.

possa essere esteso a sistemi molto più complessi (come il capitano Kirk e il suo equipaggio), anche se nessuno saprebbe al momento dire come. Infine un'altra tecnologia che pare molto promettente è la *metrologia quantistica*, che si propone di superare i limiti classici della misura utilizzando l'entanglement. In questo caso si potrebbero costruire *interferometri* (strumenti che misurano variazioni di lunghezza) estremamente precisi (in cui la precisione aumenta con il numero dei fotoni presenti e non con la sua radice quadrata), che permetterebbero, ad esempio, misure di posizione o una determinazione del tempo (per interferometri atomici) con

una precisione estremamente elevata. Inoltre è stato recentemente dimostrato come l'uso di fasci di luce entangled possa portare a una forte riduzione dei disturbi nella misura, il *rumore*, al di sotto del limite ottenibile con luce "classica" (quella di una lampadina o di un laser), permettendo di osservare oggetti debolmente assorbenti altrimenti invisibili. Un fenomeno così "bizzarro" e per anni fonte di dibattito epistemologico quale l'entanglement potrebbe quindi a breve diventare un elemento chiave per numerose tecnologie, che in un prossimo futuro pervaderanno la nostra vita quotidiana.

d. Schema di un esperimento di imaging quantistico con un interferometro. Un fascio di luce emesso da una sorgente laser crea una coppia di fasci entangled (A e B) in un certo tipo di cristallo (non-lineare). Uno dei due fasci (A) attraversa un oggetto debolmente assorbente (una deposizione a forma di fiorellino di uno strato monoatomico su un vetrino) e quindi entrambi i fasci sono misurati dal ccd di una telecamera. L'immagine dell'oggetto appare sottraendo l'immagine del fascio B dall'immagine del fascio A, poiché i due rumori sono esattamente uguali, a causa dell'entanglement.



1. sorgente laser
2. cristallo non-lineare
3. fascio A
4. fascio B
5. oggetto
6. ccd delle telecamere
7. monitor

immagine fascio A - immagine fascio B

Biografia

Marco Genovese è ricercatore presso l'Inrim (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica) a Torino, dove è responsabile del programma di Ottica Quantistica. Le sue ricerche hanno riguardato la meccanica quantistica, sia dal punto di vista sperimentale che teorico e, recentemente, i fondamenti della meccanica quantistica e applicazioni all'informazione e alla metrologia quantistica.

Link sul web

- <http://www.inrim.it>
- <http://www.newscientist.com/topic/quantum-world>
- <http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/quantumlab/english/>