

Il teletrasporto dalla fantascienza alla realtà

L'uomo ha sempre sognato di spostarsi con la velocità del pensiero o per lo meno, dopo l'avvento della relatività di Einstein (1905) che poneva un limite invalicabile alle velocità possibili in natura, di spostarsi come gli eroi dei fumetti, più velocemente della luce, per poter raggiungere nell'arco di una vita pianeti di stelle lontane centinaia o migliaia di anni-luce. Ma è curioso che proprio un celebre teorema di Einstein del 1937, ottenuto in collaborazione con i fisici Podolski e Rosen, detto per questo "Teorema EPR", diede l'avvio a una serie di ricerche che sembrano contraddire il postulato einsteiniano secondo il quale niente può muoversi più velocemente della luce. Einstein credeva fermamente nell'esistenza oggettiva di un mondo esterno e riteneva perciò insoddisfacente l'interpretazione ortodossa della meccanica quantistica, elaborata da Niels Bohr e accettata praticamente da tutti i fisici atomici, secondo la quale un oggetto possiede una proprietà solo quando questa è osservata. Il suo biografo Isaac Pais, che fu anche un fisico di notevole valore, ricorda una domanda maliziosa che gli fece Einstein durante una passeggiata: "Lei crede davvero che la Luna non esista quando nessuno la guarda?". I punti salienti della visione einsteiniana del mondo sono: (1) Perché una **teoria sia completa** ogni elemento di realtà fisica deve avere una controparte nella teoria. (2) Quali sono gli **elementi di realtà** fisica? (si chiede Einstein). "Se, senza disturbare in alcun modo un sistema, è possibile predire con certezza (cioè con probabilità uguale a 1) il valore di una quantità fisica, allora esiste un *elemento di realtà fisica* corrispondente a questa quantità fisica [il sistema possiede oggettivamente la relativa proprietà]". Vediamo come si svolge il ragionamento in EPR.

<<Consideriamo il seguente esempio. Due particelle, le cui variabili coniugate di moto (quantità di moto) e di posizione sono rispettivamente (p_1, q_1) e (p_2, q_2) , si trovano in uno stato iniziale di quantità di moto totale definita $P = p_1 + p_2$ e di distanza relativa definita $Q = q_1 - q_2$. Il commutatore quantistico di P e Q è $[\hat{P}, \hat{Q}] = 0$, quindi è possibile misurare simultaneamente P e Q ¹. (P e Q sono compatibili).

Dopo l'interazione iniziale si lasci andare le particelle ognuna per suo conto e dopo un sufficiente lasso di tempo si compiano osservazioni sulla particella 1: misurando p_1 si conoscerà p_2 senza intervenire sulla particella 2 e, successivamente, misurando q_1 si conoscerà q_2 senza intervenire sulla particella 2. Quindi p_2 e q_2 sono entrambi, simultaneamente, elementi di realtà della particella 2, per i quali la meccanica quantistica non ha strumenti di descrizione e quindi la meccanica quantistica è incompleta>>.

La località è un punto cruciale. "Se all'istante della misurazione i due sistemi non interagiscono più, nessun cambiamento reale può aver luogo nel secondo sistema come conseguenza di un qualunque intervento sul primo". Gli elementi di realtà di un sistema fisico non possono essere influenzati istantaneamente a distanza. La particella 2 possiede quindi una proprietà che non trova espressione nell'apparato formale della teoria quantistica.

Nelle intenzioni di Einstein il teorema EPR doveva dimostrare che la meccanica quantistica è essenzialmente incompleta, che ci dovevano essere delle "variabili nascoste" non ancora identificate che avrebbero reso la teoria deterministica come la meccanica classica ("Dio non gioca a dadi"). Il teorema EPR poneva e dimostrava questo dilemma: o la meccanica quantistica è incompleta o non

¹ $[\hat{p}, \hat{q}] f(p, q) = -i\hbar \frac{d(qf)}{dq} + qi\hbar \frac{df}{dq} = -i\hbar f \Rightarrow [\hat{p}, \hat{q}] = -i\hbar \neq 0$, perciò per una stessa particella posi-

zione q e momento coniugato p sono incompatibili (Heisenberg). Però P e Q commutano, perciò sono compatibili.

esiste una realtà oggettiva (e siccome per Einstein era incontestabile l'esistenza di una realtà oggettiva esterna, si doveva concludere con l'incompletezza della meccanica quantistica). Ma il fisico irlandese John Bell (1928-1990) nel 1964 scrisse un articolo rivoluzionario intitolato "Sul *paradosso Einstein-Podolsky-Rosen*" nel quale dimostrava che, se la meccanica quantistica avesse delle variabili nascoste e quindi fosse incompleta, doveva valere una certa disuguaglianza, ora detta disuguaglianza di Bell². Nel 1982 il fisico francese Alain Aspect, direttore del centro di Ricerca al CNRS (Centro Nazionale Francese per la Ricerca Scientifica) e Professore all'Istituto Politecnico, Membro dell'Accademia delle Scienze, fece una serie di memorabili esperienze che falsificavano in modo certo la disuguaglianza di Bell. Non c'erano dubbi: la meccanica quantistica è una teoria completa, non ci sono variabili nascoste e perciò non vale il principio di "località", che nella concezione realistica di Einstein era irrinunciabile, secondo il quale eventi spazialmente separati non possono essere correlati in modo istantaneo. Nel 2005 Aspect fu insignito della medaglia d'oro del CNRS per le sue ricerche nel settore dell'ottica quantistica e della fisica atomica. Le sue ricerche furono continuate, fra gli altri, dal fisico austriaco Anton Zeilinger, che nel 1997 riuscì a produrre il teletrasporto di fotoni. Per questo nel 2010 fu insignito del premio Wolf. Zeilinger scrisse un bel libro divulgativo sull'argomento³. Però i fotoni lontani, per essere osservati, richiedevano la distruzione dei fotoni di partenza, opportunamente preparati. Adesso un gruppo di ricercatori dell'Università di Vienna è riuscito a ottenere lo stesso risultato senza questo effetto collaterale. Jian-Wei Pan e colleghi ritengono che il proprio metodo possa costituire un passo in avanti verso la comunicazione quantistica a grande distanza. La ricerca è stata pubblicata sulla rivista "Nature". Il teletrasporto quantistico prevede che sia possibile trasferire lo stato quantico di una particella - definito in termini della sua polarizzazione - a grandi distanze. La particella, in sé, non viene trasferita: quella ricevente acquisisce esattamente la stessa polarizzazione di quella trasmittente. Il principio di indeterminazione vieta di conoscere con esattezza lo stato del fotone trasmesso, ma una proprietà detta correlazione non locale (in inglese "entanglement") fa sì che questo non sia un problema per il teletrasporto. Negli esperimenti precedenti, dove si usava un laser diretto su un cristallo con proprietà ottiche non lineari, la rivelazione del fotone teletrasportato ne richiedeva spesso la distruzione. Usando un filtro per ridurre l'intensità dei fotoni da teletrasportare, i ricercatori sono stati in grado di ridurre in modo significativo questi eventi spuri. Sono così riusciti, con una accuratezza del 97%, a teletrasportare lo stato quantico di un fotone senza l'effettivo bisogno di osservarlo con un rivelatore che lo avrebbe distrutto. Teletrasporto quantistico significa che tutte le informazioni contenute in una particella quanto-meccanica (come un fotone o un atomo) vengono trasmesse istantaneamente a un'altra particella, anche se le due sono separate da una grande distanza. Alcuni schemi per il teletrasporto di fotoni sono stati dimostrati sperimentalmente in numerosi laboratori e tutti si sono concentrati su come trasmettere stati interni della particella, come la polarizzazione (lo spin). Esplorando il teletrasporto di atomi, un gruppo di scienziati di varie istituzioni, fra cui il Weizmann Institute israeliano e la F. Schiller University tedesca, ha proposto un esperimento per trasmettere tutte le informazioni di un atomo, compresi i suoi stati esterni, come la sua energia cinetica e la quantità di moto. Questa procedura replica le proprietà quantistiche del moto di una particella ed è descritta sull'edizione del 2 aprile 2010 di «Physical Review Letters». Per esempio, se la particella da teletrasportare C ha

² Giancarlo Ghirardi: "Un'occhiata alle carte di Dio", Gruppo Editoriale Il Saggiatore 1997, Net 2003

³ Anton Zeilinger: "Il velo di Einstein", Einaudi 2006

prodotto frange di diffrazione dopo essere passata attraverso una doppia fenditura, allora lo stesso schema di frange verrebbe prodotto dalla particella B, che riceve le informazioni teletrasportate. I ricercatori propongono di dissociare una molecola raffreddata a pochi Kelvin in due atomi (A e B) con un impulso laser. In seguito l'idea è quella di «connettere» i due atomi in modo che ciascuno sia in uno stato che ha relazioni precise con quello del suo partner (entanglement). Fatto questo, si lascia che un atomo (A, per esempio) collida con la particella di cui si vogliono teletrasportare le proprietà. Dopo la collisione è possibile misurare i momenti di A e C e, con queste informazioni in mano, i ricercatori sanno come colpire e deflettere l'atomo B in modo che il suo moto simuli quello della particella C. Come conseguenza dei postulati della meccanica quantistica non è possibile la creazione di un duplicato esatto di uno stato quantistico sconosciuto. Sorprendentemente, è però possibile trasferire lo stato quantistico di un sistema in un altro sistema (senza bisogno di conoscerlo). Questo, ovviamente, a patto di rispettare il teorema di “no-cloning”, ossia distruggere l'informazione nel sistema originale. Supponiamo che una persona di nome Aldo abbia un atomo di rubidio (l'elemento che i fisici in questo campo utilizzano abitualmente) nel suo stato di minima energia, e che un'altra di nome Bruno abbia un atomo dello stesso tipo, anch'esso nello stato di minima energia. L'aspetto importante è che questi due atomi sono indistinguibili; questo significa che *non c'è differenza* tra di essi. Se Aldo e Bruno avessero, per esempio, due sfere di vetro, apparentemente identiche, e le scambiassero, ci sarebbero comunque dei cambiamenti. Se si avesse un potente microscopio, si sarebbe sicuramente in grado di distinguere le due sfere. Al contrario per atomi dello stesso tipo nello stesso stato quantistico *non c'è nessuna differenza*. La situazione in cui Aldo ha il primo atomo e Bruno il secondo è *esattamente* la stessa rispetto al caso in cui i due si scambiassero gli atomi. In un certo senso, è sbagliato affermare che due atomi hanno individualità o identità. Sarebbe più corretto dire che due posizioni nello spazio-tempo hanno la proprietà di avere i campi quantistici fondamentali nello stesso stato che definisce lo stato di minima energia di un atomo di rubidio. Immaginiamo che l'atomo di Aldo sia in qualche stato complicato (eccitato). Assumiamo di non conoscere questo stato quantistico e, come conseguenza del teorema di non discriminazione quantistico, di non essere in grado di conoscerlo. Quello che possiamo fare è *teletrasportare* lo stato nell'atomo di rubidio di Bruno. In seguito a questa operazione, l'atomo di Bruno è esattamente nello stato in cui era quello di Aldo in precedenza. Solo che Aldo e Bruno non hanno bisogno di incontrarsi; è sufficiente che condividano uno stato entangled (correlato) e che possano comunicare. Qualcuno ha pensato che l'entanglement e il teletrasporto distruggeranno la teoria della relatività di Einstein in quanto violerebbero il postulato del limite invalicabile della velocità della luce; ma questo non è vero. Intanto ricordiamo che la relatività di Einstein ha oramai una base sperimentale imponente sia di laboratorio sia di ingegneria; a sua volta la meccanica quantistica domina la fisica della materia e la tecnologia. Si tratta di mettere d'accordo questi due pilastri del pensiero scientifico. Il fatto è che la non località ha una ‘natura molto sottile’: non può, per esempio, essere usata per inviare segnali più veloci della luce. Si può facilmente dimostrare che ogni volta che si vuole mandare un messaggio usando correlazioni EPR è necessario mandare informazione complementare (per esempio sull'orientazione di un polarizzatore) attraverso un canale normale (velocità del segnale $v < c$) che ovviamente non viola la causalità e la proprietà di località. Anche gli informatici si interessano oramai all'entanglement. La generazione di sequenze di numeri casuali è simulata applicando algoritmi numerici che producono sequenze pseudo casuali, ma che a rigore sono deterministiche. Perciò almeno in linea di principio chiavi crittografiche basate su sequenze pseudo casuali potrebbero

essere violate. Ora sono state già prodotte piccole sequenze di numeri veramente casuali sfruttando l'entanglement (Rivista "Le scienze", giugno 2010).