

## Einstein, Podolsky e Rosen (05/04/06)

Riprendiamo la base della MQ: il Principio d'Indeterminazione di Heisenberg:

$$\Delta x \times m \Delta v \approx \hbar$$

**Interpretazione** dei quantistici duri e puri (in termini politici attuali: *quantocelòduristi*): data una particella di massa  $m$ , la sua posizione  $x$  e la sua velocità  $v$  sono *indeterminate*. All'atto della misura, assumono valori *incerti*, legati tra loro dal PdI. Critica di Einstein: la natura non può essere indeterminata intrinsecamente; se il PdI funziona sperimentalmente, vuol dire che nella MQ *manca qualcosa*.

Nel 1935 Einstein propose, assieme a Podolsky e Rosen, un esperimento concettuale in cui *due particelle* vengono create in modo tale per cui le loro posizioni e velocità relative sono *legate in modo conosciuto*. Misurando indipendentemente, e con enorme precisione, la posizione di una e la velocità dell'altra, la legge che specifica il loro legame dovrebbe permettere di ricavare posizione e velocità di ciascuna meglio di quanto permesso dal PdI.

La risposta di Bohr fu piuttosto confusa: si basava sull'idea che le due misure indipendenti fossero in realtà una sola misura, perché le due particelle hanno avuto un'origine unica, e quindi ci si dovrebbe aspettare a priori che il PdI non fosse violato. Gran parte del mondo scientifico accettò la risposta di Bohr.

Contro-obiezione di Einstein: se le due particelle sono molto lontane tra loro, possiamo pensare di eseguire i due esperimenti a distanza di tempo così breve che, se nessun segnale può superare la velocità della luce, *la seconda particella non può fare in tempo a sapere che la prima è stata misurata*. Per di più, la Relatività dimostra che, in questo caso, se definiamo *Evento A* la misura della prima particella ed *Evento B* la misura della seconda particella, a seconda della velocità di un qualsiasi osservatore rispetto a chi esegue le misure, può succedere che l'*Evento A* avvenga *prima* dell'*Evento B*, o anche *dopo*. È disposto, Bohr, ad ammettere che possa esistere un qualche genere d'informazione in senso lato che si trasmetta istantaneamente tra una particella e l'altra? Infatti, secondo l'interpretazione di Bohr, le proprietà fisiche di una particella sono indeterminate finché non siano misurate. Ma certe leggi fisiche (per esempio: la conservazione della quantità di moto, del momento della quantità di moto, dell'energia eccetera) debbono comunque rimanere valide per l'insieme delle due particelle. Dunque, la misura della quantità di moto della prima particella, facendo assumere un valore ben definito alla sua velocità (se misuro solo la velocità, l'incertezza può essere piccola quanto mi pare), *costringe* la seconda particella ad assumere a sua volta una *velocità ben precisa*, altrimenti, misurandola, si potrebbe violare un principio di conservazione. Per far questo, la seconda particella deve *sapere* non solo che la prima è stata misurata, ma anche *il risultato della misura* e, a causa della possibile inversione dei tempi di misura, deve anche *saperlo istantaneamente*.

Bohr annaspò ma continuò a sostenere in un modo o nell'altro che le due particelle possiedono un grado di "legame" tra loro così elevato ("*entanglement*") che i due esperimenti e i due apparati di misura relativi vanno considerati come uno solo, anche se sono a grande distanza tra loro

Prima di seguire col racconto giallo, descriviamo meglio la scena del crimine, semplificando le cose rispetto alla prima proposta di EPR, che era un po' complicata. Supponiamo che esista una particella che non abbia carica elettrica, e che non possieda neppure *rotazione* (il suo *spin* è zero). Date certe circostanze (che si possono verificare in natura, ma non è il caso di esaminarle in dettaglio), questa particella può *disintegrarsi in una coppia elettrone - positrone*. Se la prima particella era immobile, queste due nuove particelle partono con velocità uguale ma in direzioni opposte, affinché sia conservata la quantità di moto. Inoltre, poiché sono particelle con rotazione intrinseca (*spin* = 1/2), per conservazione del *momento della quantità di moto*, esse debbono *ruotare in senso opposto*. Per meglio chiarire: nel momento in cui decidessimo di misurarle, esse dovrebbero *assumere spin in direzioni opposte* perché, secondo l'interpretazione di Bohr, finché non le misuriamo il loro spin non è orientato in nessuna direzione e in tutte. Insisto sul fatto che, se *possedessero realmente* spin come ipotizzato da Einstein, non ci sarebbe problema: quando le misuriamo, una ha spin in su e l'altra in giù; il problema sorge solo quando la vediamo come Bohr. In questo caso, lo spin *si determina solo all'istante della misura* e, per non violare la conservazione del momento della quantità di moto, se lo spin della prima a essere misurata

è in su, allora deve succedere per forza che una misura dello spin della seconda fornisca come risultato: “in giù”. Ma come fa la seconda a sapere che la prima è stata misurata e il suo spin è stato trovato “in su”, se le due particelle sono così distanti, e le misure si susseguono a tempi così brevi, che nessun segnale alla velocità della luce può aver fatto in tempo ad arrivare dalla prima particella alla seconda? Anzi: esiste tutta una serie di osservatori in moto relativo rispetto alle due particelle per i quali la prima particella a essere misurata è stata quella che noi, finora, abbiamo chiamato “seconda”, e il suo spin è “in giù” (cambiano solo i tempi relativi di esecuzione delle misure, non i risultati).

Siccome gli esperimenti non erano fattibili con le tecnologie dell'epoca, il problema rimase un po' in predicato, anche se nessuno dubitava che avesse ragione Bohr. D'altra parte, in assenza di altre idee, era chiaro a priori che anche un eventuale esperimento non avrebbe potuto dire nulla, poiché gli spin dell'elettrone e del positrone sarebbero stati trovati opposti sia che avesse ragione Einstein sia che avesse ragione Bohr, e la cosa cadde nel dimenticatoio. Nel 1955 morì Einstein, nel 1962 morì anche Bohr. Ma John Stewart Bell (1928 – 1990) non aveva dimenticato l'esperimento EPR. Nel 1966 dimostrò che, se aveva ragione Einstein, i risultati di un certo tipo di misure di correlazione statistica (non è il caso di essere troppo specifici in questa sede; semmai chiediamo ad Adriano di ripetere la sua lezione sulla “*crittografia quantistica*”) avrebbero dovuto fornire un valore non superiore a 2; se aveva ragione Bohr, questi risultati avrebbero potuto raggiungere circa 2,6. In questo secondo caso, però, sarebbe stato necessario ammettere che, in MQ, il concetto di “distanza” non ha il significato tradizionale. La MQ deve essere *non locale*, nel senso che non si può definire, al suo interno, il *qui* e il *là*.

Lo sviluppo della tecnologia consentì di eseguire solo nel 1985 il primo esperimento EPR semplificato in laboratorio, e ne venne fuori che, in effetti, Bohr aveva previsto giusto. Quando Bell venne a sapere del risultato dell'esperimento di Alain Aspect, che confermava il suo teorema e, di conseguenza, la non-località della MQ, si pose una domanda che si può riformulare in questo modo: «Nel 1936, l'aspetto non-locale era un po' nascosto tra le righe dell'esperimento proposto da EPR, e probabilmente nessuno aveva ancora le idee del tutto chiare in proposito, Ma se a Bohr fosse stato proposto l'esperimento così come è stato eseguito, Bohr stesso se la sarebbe sentita di proclamare ad alta voce e chiaramente che «Ebbene sì, la MQ è *non locale*!» davanti a una platea di fisici?

Bisogna però aggiungere subito che la non-località, se pure è in violazione allo spirito della Relatività, non ne viola la lettera. Infatti, nella Relatività, il principio di causalità non è violato da eventuali informazioni superluminali “*non utilizzabili*”, e l'informazione che si passano le due particelle tra loro è, per sua natura, non utilizzabile da altri. Infatti, sia il primo sperimentatore che il secondo vedono, al susseguirsi delle misure con coppie di particelle sempre nuove, un susseguirsi di “su” e “giù” del tutto casuale, come se si trattasse di una sequenza di “testa o croce”. Addirittura, nessuno dei due può sapere se l'altro ha eseguito la misura o no, finché le informazioni dell'uno non siano trasmesse all'altro in modo consueto, per esempio per mezzo di onde elettromagnetiche. Solo allora ciascuno dei due sperimentatori può verificare che, effettivamente, ogni misura dell'altro era complementare alla sua.

Oggi come oggi, l'entanglement è misurato per coppie di fotoni che viaggiano su fibra ottica fino a distanze di circa 150 km. Poi, le inevitabili interazioni dei fotoni con l'ambiente distruggono l'entanglement. Per utilizzare quest'effetto in modo commercialmente conveniente, alcuni fisici cinesi hanno sperimentato qualche settimana fa il “*rientanglement*” di un intero fascio di fotoni generati da un laser, da parte di uno dei fotoni iniziali, prima che questo perda memoria del suo entanglement. In questo modo, *ricaricando* l'entanglement originario ogni centinaio di chilometri, si potrebbe superare qualsiasi distanza.

Si noti che Bell, cui è riconosciuto il maggior avanzamento della MQ dal 1930 in poi, *non ha avuto* il premio Nobel.