

Il teorema di Bell e la non località

Questioni di metafisica sperimentale

Nella *Critica della ragion pura* Immanuel Kant si chiedeva se la metafisica fosse possibile in quanto scienza: la sua risposta, come sappiamo, fu negativa. Il testo di Kant fu pubblicato nel 1781, quando l'idea di scienza era profondamente diversa da come oggi la possiamo concepire. A quell'epoca non esistevano la termodinamica e l'elettromagnetismo, né tanto meno la relatività e la meccanica quantistica, solo per citare alcuni tra gli esempi più eclatanti. Giunti ormai al termine di questa breve introduzione alla fisica, ai suoi problemi e al suo ruolo culturale, ci piace riformulare la domanda di Kant in termini più attuali:

*le affermazioni di tipo metafisico ammettono una verifica sperimentale?
oppure
un'affermazione di natura metafisica può essere confutata sperimentalmente?*

Nel lungo dibattito sulla MQ queste domande hanno svolto un ruolo cruciale. Il formalismo della teoria, in effetti, fu formulato in un arco molto ristretto di anni. Il suo significato, tuttavia, si mostrò da subito elusivo e difficile da interpretare. Ben presto nacquerò dibattiti serrati, soprattutto tra Einstein e Bohr: entrambi sapevano quale fosse il modo corretto di fare i conti, ma le loro opinioni divergevano completamente quanto al significato profondo di quello che i conti dicevano. Poco per volta è emersa, e forse non ha ancora cessato di emergere, una risposta davvero sorprendente alla domanda posta da Kant:

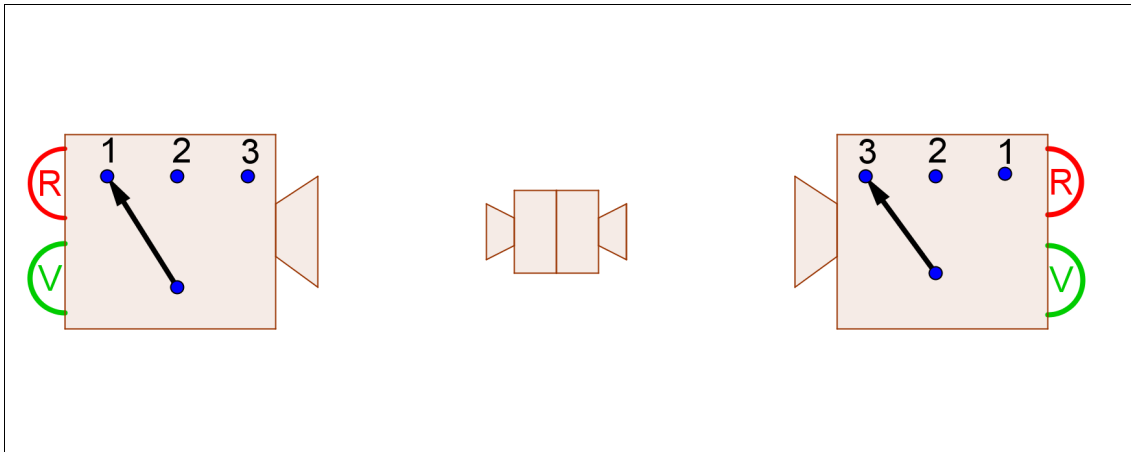
*sì, ci sono domande di natura metafisica
alle quali è possibile rispondere per via sperimentale.*

In queste pagine conclusive cercheremo di dare un'idea del modo in cui si è giunti a questa consapevolezza, e su quello che abbiamo imparato a proposito del modo in cui è fatto il mondo che conosciamo.

Un esperimento, la sua storia, il suo strano risultato

L'esperimento che stiamo per descrivere fu concepito da Einstein nel 1935. Si trattava, per quell'epoca, di un esperimento puramente ideale, nel senso che, con le tecniche di allora, sarebbe stato impossibile realizzarlo per davvero. Quasi

trent'anni dopo, nel 1964, John Bell scoprì che quell'esperimento, se mai fosse stato realizzabile in futuro, avrebbe permesso di scegliere tra due alternative, entrambe sorprendenti per diverse ragioni. L'esperimento fu realizzato per la prima volta nel 1982, e da allora, sotto diverse forme, è stato ripetuto molte volte, ottenendo sempre lo stesso risultato. Una delle forme possibili è illustrata dalla prossima figura.



L'apparato al centro della figura lancia una coppia di particelle in direzioni opposte. La coppia si trova in uno stato che, nel formalismo della meccanica quantistica, è descritto come stato di singoletto. Ciascuna particella entra in un apparato che può scegliere quale misura effettuare fra tre differenti misure, indicate in figura con le etichette 1, 2 e 3. Ogni misura ha due possibili risultati, indicati dall'accendersi sull'apparato o di una luce rossa (R) oppure di una luce verde (V). Ogni volta che la sorgente ha emesso una coppia di particelle, ciascun apparato sceglie a caso, indipendentemente dall'altro, quale delle tre misure effettuare: in pratica ciascun apparato è dotato di un generatore di numeri casuali che produce i valori 1, 2 e 3 con distribuzione uniforme. L'output del generatore comanda il selettore che sceglie la misura da effettuare.

Nella situazione indicata in figura l'apparato di sinistra è pronto a misurare la grandezza 1, quello di destra la 3. Se nell'apparato di sinistra si accende la luce verde e in quello di destra la luce rossa, allora possiamo indicare il risultato di questa misura con la quaterna di simboli 13VR, il cui significato dovrebbe essere ovvio. L'esperimento viene protratto a lungo, su moltissime coppie di particelle: al termine avremo come risultato una lunga successione di quaterne come quella appena scritta. Potremmo per esempio ottenere una lista come questa:

13VR 11RV 32VV 12RR 12RV 22VR 31VV ...

Analizzando le successioni che si ottengono in molti esperimenti si scoprono due fatti notevoli:

1. quando i due apparati effettuano per caso la stessa misura, fatto che si verifica mediamente in un terzo dei casi, allora si accendono sempre luci di colore opposto. Nell'esperimento dell'esempio ciò accade con le quaterne 11RV e 22VR, e mai accade che si registrino quaterne come 11RR, oppure 22VV, ... (le quaterne che non si ottengono mai sono 6 in totale);
2. la successione di R e di V è del tutto casuale: ciascun apparato risponde V, in media, per metà delle volte, e ciascuna coppia di colori (VV, RR, VR, RV) si presenta, in media, un quarto delle volte.

Entrambi questi fatti sono correttamente previsti dal formalismo della Meccanica Quantistica. I due fatti, presi insieme, sono tali da suscitare la più grande meraviglia in tutte le menti capaci di pensare.

Un'alternativa drammatica

Se pensate con attenzione al risultato dell'esperimento appena descritto, concentrandovi in particolare sul fatto che i risultati sono opposti quando i rivelatori misurano la stessa grandezza, vi accorgete che siamo di fronte ad un'alternativa secca:

o è vera l'opzione 1:

ciascun rivelatore è in grado di accorgersi istantaneamente che l'altro rivelatore sta effettuando la stessa misura, in modo tale da poter produrre risultati opposti

oppure è vera l'opzione 2:

le due particelle lasciano la sorgente munite di un set di istruzioni (la cui natura sarà caso mai tutta da precisare) che dicono al rivelatore come comportarsi in ciascuna delle sue possibili regolazioni

Se fosse vera l'opzione 2, allora ci sarebbe qualcosa di sbagliato nella Meccanica Quantistica: essa prevede infatti che il risultato della misura non sia predeterminato in alcun modo. Nello stato di singoletto in cui la coppia di particelle è stata preparata, il risultato della misura nasce nel momento stesso in cui ciascuna particella interagisce con il proprio rivelatore.

Se fosse vera l'opzione 1, allora ci sarebbe qualcosa di sbagliato nell'idea che l'universo nel quale viviamo sia separabile. La teoria della relatività ristretta ci ha insegnato che eventi che accadono in luoghi distinti dell'universo non possono esercitare alcun tipo di influenza l'uno sull'altro, se la distanza che li separa è di tipo spazio.

L'opzione 2 è falsa

Proviamo a immaginare quale forma potrebbe avere un set di istruzioni capace di realizzare l'opzione 2. Ciascuna particella potrebbe per esempio lasciare la sorgente munita di una terna di valori che spieghi al rivelatore come comportarsi a seconda della misura che sceglie di eseguire. La terna (RRV) starebbe cioè a significare che il rivelatore deve rispondere rosso se misura la grandezza 1, rosso se misura la grandezza 2, verde se misura la 3.

Terne di questo tipo ce ne sono 8 in tutto, il che significa che ogni particella dovrebbe partire con una terna scelta a caso tra queste 8, mentre l'altra particella della coppia partirebbe allora con la terna opposta. Gli 8 casi possibili sono elencati nella prima colonna della tabella che segue. La coppia di rivelatori può a sua volta misurare una qualsiasi tra le 9 combinazioni elencate nella prima riga della stessa tabella. La combinazione 1 + 3 significa per esempio che il rivelatore di sinistra misura la grandezza 1 e quello di destra la 3.

| | 1 + 1 | 1 + 2 | 1 + 3 | 2 + 1 | 2 + 2 | 2 + 3 | 3 + 1 | 3 + 2 | 3 + 3 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| RRR + VVV | RV | RV | RV | RV | RV | RV | RV | RV | RV |
| VRR + RVV | VR | VV | VV | RR | RV | RV | RR | RV | RV |
| RVR + VRV | RV | RR | RV | VV | VR | VV | RV | RR | RV |
| RRV + VVR | RV | RV | RR | RV | RV | RR | VV | VV | VR |
| RVV + VRR | RV | RR | RR | VV | VR | VR | VV | VR | VR |
| VRV + RVR | VR | VV | VR | RR | RV | RR | VR | VV | VR |
| VVR + RRV | VR | VR | VV | VR | VR | VV | RR | RR | RV |
| VVV + RRR | VR | VR | VR | VR | VR | VR | VR | VR | VR |

Abbiamo insomma 72 possibilità, in 48 delle quali le risposte dei due rivelatori risultano opposte. La conclusione è lampante:

se

la coppia di particelle fosse dotata di un set di istruzioni di questo tipo

allora

le risposte dei due rivelatori sarebbero opposte nei $2/3$ dei casi

ma

i rivelatori danno esiti opposti in metà dei casi, e $1/2 < 2/3$

quindi

*non esiste alcun set di istruzioni,
esattamente come previsto dalla Meccanica Quantistica*

quindi

ciascun rivelatore è in grado di accorgersi di quello che l'altro sta facendo, in modo tale da fornire risposte discordi quando le misure effettuate coincidono.

Einstein non poteva credere all'esistenza di simili "spooky actions at a distance". Proprio lui, che formulando la teoria della relatività ristretta, aveva spiegato al mondo come nessuna azione potesse propagarsi nello spazio ad una velocità superiore a quella della luce.

Einstein si rese conto, già nel 1935, che se la Meccanica Quantistica fosse stata corretta, ciò avrebbe significato che viviamo in un universo non locale. La Meccanica Quantistica si è davvero dimostrata corretta in tutti gli esperimenti condotti a partire dal 1982, quindi l'universo nel quale viviamo non è locale.

Possiamo allontanare quanto ci pare i due rivelatori, rendendo grande quanto vogliamo il quadrato s^2 della loro distanza spazio - temporale, rendendo quindi impossibile anche ad un fotone il viaggio tra l'uno e l'altro dei due eventi di rivelazione. Tutto ciò non conta: nei casi in cui i due rivelatori si trovano ad effettuare la stessa misura, essi sono in grado di "comunicare" tra di loro in modo da fornire sempre risultati opposti.

Qualunque sia l'immagine del mondo che vi siete fatti leggendo queste pagine, ricordatevi di aggiungere, al quadro generale, anche quest'ultimo dettaglio.