

## ***Viviamo in un universo governato dalle leggi quantistiche del Caso e della Probabilità!***

**Probabilità:** in fisica, per probabilità s'intende esattamente ciò che s'intende nel nostro quotidiano, o quando si gioca al lotto. Si tratta della possibilità, dell'eventualità, che un certo fatto possa verificarsi. Se una moneta perfettamente coniatata viene lanciata senza alcun trucco, ci sono esattamente 50 probabilità su 100 di ottenere una "testa" e 50 probabilità su 100 di ottenere una "croce". Le probabilità dei due risultati sono quindi 1 su 2. Come dimostra questo semplice esempio, se si considera ogni possibile esito di un certo processo, il totale delle probabilità è esattamente pari a 1. Le probabilità vanno sommate per i diversi risultati possibili dello stesso evento.

Un esempio un po' più complesso ci dimostra come possiamo calcolare le probabilità. Se lanciamo due dadi (d'ora in poi si darà sempre per scontato che tutto sia perfettamente equo e non ci sia possibilità d'inganno), quali sono le probabilità di ottenere un particolare totale, compreso tra 2 e 12? Per ogni dado, abbiamo 6 possibili risultati, quindi le probabilità di ottenere un certo valore per ogni dado sono di 1 su 6, ovvero  $1/6$ . Tuttavia, nella combinazione dei possibili esiti di due dadi, le probabilità non sono più le stesse. Per ottenere il totale di 2 c'è una sola combinazione possibile, nella quale ogni dado lanciato dà 1. Le probabilità che ogni singolo dado si fermi sull'1 sono 1 su 6, le probabilità che entrambi diano 1 si ottengono moltiplicando le due probabilità, quindi sono 1 su 36 ( $1/6 \times 1/6$ ).

Le probabilità di ottenere un totale pari a 3 sono invece diverse. Possiamo giungere a questo totale in due modi diversi: con il primo dado che dà 1 e il secondo che dà 2, oppure viceversa. Ogni differente combinazione ha una probabilità di 1 su 36, quindi le probabilità totali di ottenere un totale 3 sono  $1/36$  più  $1/36$ , vale a dire  $1/18$ . Il risultato complessivo più probabile di due dadi è 7,

che può essere dato da 6 diverse combinazioni (1+6, 2+5, 3+4, 4+3, 5+2, 6+1) e ha una probabilità complessiva di 1 su 6.

Nel caso di più fenomeni che interagiscono tra loro e molte possibili combinazioni nell'ottenimento del risultato, il calcolo delle probabilità in questi termini diventerebbe tedioso, mentre la figura complessiva delle probabilità può essere descritta statisticamente, ed è rappresentata da una distribuzione in cui ci sono molte diverse modalità per ottenere i risultati più probabili (il 7 della nostra coppia di dadi), e solo qualche modalità per ottenere i risultati meno probabili (equivalenti al 2 della nostra coppia di dadi). Si dice che gli eventi più rari stiano nella "coda" della distribuzione. In ogni caso, anche se non possiamo prenderci il tempo di considerare tutte le diverse possibilità, la natura lo fa per noi, attraverso l'operare del "caso".

Nel suo volume *The Cosmic Code*, Heinz Pagels fornisce un esempio del modo in cui opera il caso su larga scala, analizzando il numero di morsi di cane riportati negli ospedali di una grande città nel corso degli anni. Considerando un intervallo di 5 anni, il numero degli eventi riportati era di 68, 70, 64, 66 e 71, con una media di 68 morsi all'anno. «Dal momento che gli eventi sono casuali e indipendenti», dice Pagels, «la distribuzione è stabile». È *possibile* che capitino un anno in cui si hanno solo 5 eventi del genere, e un altro anno in cui ce ne sono 500, ma si tratta di probabilità molto remote, situate nella coda della distribuzione.

Una delle caratteristiche importanti di questo genere di studio è che con i dati provenienti da un numero sufficiente di anni (un numero sufficiente di risultati indipendenti *dell'esperimento*) gli statistici possono ricavare una curva delle probabilità e farsi un'idea della distribuzione complessiva, così da calcolare la probabilità di eventi rari che non sono mai stati osservati realmente. Si tratta dello stesso genere di analisi statistica che porta i meteorologi a parlare dell'inondazione o dell'uragano che avviene una volta in un secolo, anche se in realtà non si possiedono i dati degli ultimi cento anni. Essi intendono dire

che un evento del genere ha 1 possibilità su 100 di verificarsi nel corso di ogni anno, proprio come ci si aspetta di ottenere un 2 ogni 36 lanci dei dadi. Ma così come potrebbe accadere di ottenere un 2 con due lanci consecutivi, potrebbe accadere il verificarsi di due inondazioni "una volta in un secolo" in due anni consecutivi. La probabilità è al cuore del mistero della realtà quantistica, giacché il mondo quantistico obbedisce rigidamente alle regole probabilistiche. Con ciò *non* s'intende dire che avendo un gran numero di eventi quantistici in corso nello stesso istante sia possibile prevedere cosa accadrà in modo statistico, come nel caso della previsione dei morsi di cane, che nella città presa in esame da Pagels potevano essere previsti nel numero di 68 all'anno (si veda *interpretazione d'insieme*). La probabilità quantistica può essere vista all'opera a livello di singoli atomi, fotoni ed elettroni. Quel che è peggio, la probabilità associata a un'entità quantistica in rapporto alla scelta di un esito in uno specifico luogo è influenzata, istantaneamente, da ciò che sta accadendo in un altro luogo (si veda *esperimento di Aspect, esperimento della doppia fenditura*). È un po' come se le probabilità di ottenere un 6 con il nostro dado, a casa nostra, dipendessero dalle probabilità di ottenere un certo valore con un altro dado a casa di qualcun altro.

Un altro limpido esempio di probabilità all'opera nel mondo quantistico ci è dato dal *decadimento* (v.) radioattivo. Ogni nucleo di un campione di materiale decade spontaneamente, in modo casuale, in accordo con le modalità insondabili del caso. Eppure l'effetto combinato è che esattamente la metà dei nuclei di un certo campione (indipendentemente dal valore iniziale) decadono entro un tempo preciso, definito *tempo di dimezzamento* (v.). Fu proprio questo genere di comportamento quantistico a indurre Albert Einstein alla sua famosa considerazione: «Non posso credere che Dio giochi a dadi». Tutto sembra però dimostrare che il mondo quantistico sia realmente dominato dal caso.

Non bisogna peraltro pensare che la probabilità quantistica sia sempre analoga alla probabilità nel nostro quotidiano. Un esempio relativo alla *polarizzazione* (v.) può aiutarci a chiarire questo concetto.

Le lenti polaroid di un comune paio di occhiali da sole sono fatte in modo da trasmettere solo la luce polarizzata verticalmente. Possiamo immaginarle come una siepe di paletti, con delle fenditure verticali, mentre la luce che cade sulle lenti assomiglia a una pioggia di lance, o frecce, orientate un po' in tutte le direzioni. I fotoni con frecce verticali potranno passare attraverso le fenditure della siepe, mentre i fotoni che portano frecce orientate in qualsiasi altra direzione si arresteranno sull'ostacolo.

La scelta della polarizzazione verticale sugli occhiali da sole è dovuta al fatto che la luce riflessa sulle superfici orizzontali, come una strada o il mare, tende ad avere una polarizzazione orizzontale, quindi una lente a polarizzazione verticale elimina il riflesso, oltre a eliminare, ovviamente, tutta la luce solare che non sia polarizzata verticalmente. Se prendiamo due paia di occhiali del genere, e ne capovolgiamo uno, avremo due serie di filtri polarizzanti, uno che trasmette solo la luce polarizzata verticalmente, l'altro che trasmette solo la luce polarizzata orizzontalmente. Indossandoli uno sopra l'altro, in modo che le lenti siano a stretto contatto, il risultato sarà il buio totale: nessuna trasmissione della luce.

Che accade invece se teniamo la seconda coppia di lenti in modo che la polarizzazione sia orientata a 45 gradi rispetto al primo paio? Verrebbe da pensare che se la prima lente ha una polarizzazione verticale, solo la luce con una polarizzazione del genere, frecce in su, possa oltrepassarla, e che quel genere di orientamento non possa oltrepassare un ostacolo con un orientamento di 45 gradi. Accade invece che metà della luce oltrepassa il secondo filtro polarizzante e ne viene fuori con una polarizzazione diagonale. Probabilmente si sarà già capito cosa accade. Ponendo dopo i primi due un terzo filtro, con polarizzazione orizzontale, metà

della luce polarizzata diagonalmente (un quarto dell'originale!) ne fuoriesce, sotto forma di luce polarizzata orizzontalmente! Considerando il sistema di tre lenti come un unico insieme, sembrerebbe di aver fatto passare una luce con apparente polarizzazione orizzontale attraverso un sistema che include un filtro a polarizzazione verticale, il che equivale a far passare una freccia in orizzontale attraverso una fenditura verticale.

Potremmo anche, volendo, cominciare con due filtri polarizzanti, con orientamento ad angolo retto, così da non permettere il passaggio della luce. Inserendo il terzo filtro tra i primi due, orientato in modo che, apparentemente, dovrebbe bloccare la luce di entrambi, abbiamo la trasmissione del 25% del fascio luminoso.

Gli esperimenti con due polarizzatori possono essere compiuti in diversi modi, e il numero di fotoni ottenuti varia in modo perfettamente regolare, passando dal 100% quando i due filtri hanno lo stesso orientamento, allo zero quando tra gli orientamenti c'è un angolo retto. Lo stesso effetto si verifica se i singoli fotoni vengono scagliati, uno per volta, attraverso l'apparato sperimentale. Nella configurazione di base con i tre filtri, di cui due a angolo retto e uno in diagonale, solo un fotone su quattro riesce ad arrivare al rivelatore, ma non c'è modo di prevedere in anticipo quale fotone passerà e quale invece verrà fermato dagli ostacoli incontrati.

Sembra quasi che ogni fotone "a polarizzazione verticale" (vale a dire un fotone che ha oltrepassato un filtro a polarizzazione verticale) abbia in realtà una probabilità ben definita di essere orientato con una polarizzazione diversa: zero possibilità di essere polarizzato orizzontalmente, 50% di essere polarizzato diagonalmente, e via dicendo. Secondo l'interpretazione standard della fisica quantistica (vedi *interpretazione di Copenhagen*), il fotone deve essere considerato un'entità in cui c'è una *sovrapposizione di stati* (v.) finché non raggiunge il filtro polarizzatore. A quel punto il fotone "decide" se essere polarizzato nel modo corretto per superare l'ostacolo (scegliendo casualmente,

come se lanciasse un dado). Se passa oltre, si ritrova in una nuova sovrapposizione di stati, con probabilità diverse che governeranno l'esito del successivo incontro con un filtro polarizzatore. Il suo comportamento è sempre regolato dalle rigide regole probabilistiche, ma le probabilità variano in funzione degli eventi. Come dice Paul Davies nel suo *Other Worlds*:

*«Bisogna sottolineare come l'indeterminazione quantistica non significhi semplicemente che non possiamo sapere quale direzione di polarizzazione sia realmente attribuita al fotone, giacché in realtà il concetto di fotone con una direzione di polarizzazione definita non può esistere. C'è un'indeterminazione inerente all'identità del fotone stesso, indeterminazione che non è quindi correlata alla nostra conoscenza delle qualità del fotone». Con "indeterminazione inerente" s'intende che possiamo descrivere l'esito degli eventi quantistici solo in termini di probabilità. Si veda anche dualità onda-particella.*

*Il comportamento bizzarro dei filtri polarizzatori.*

*Eliminando il filtro mediano, gli altri due filtri si "incrocerebbero" ad angolo retto tra loro, e la luce non potrebbe passare, giacché le probabilità che la luce che passa per un filtro a polarizzazione verticale fuoriesca con polarizzazione orizzontale sono pari a zero. Con un filtro polarizzatore di 45 gradi in mezzo agli altri due, il 25% della luce riesce a oltrepassare il triplo sistema di filtri. Ciò è dovuto al fatto che ci sono 50 probabilità su cento che la luce che passa per un filtro a polarizzazione verticale subisca una polarizzazione a 45 gradi, e 50 probabilità su cento che quella frazione di luce che supera il filtro a polarizzazione diagonale sia orientata orizzontalmente e possa oltrepassare l'ultimo filtro.*

*Con "indeterminazione inerente" s'intende che possiamo descrivere l'esito degli eventi quantistici solo in termini di probabilità. Si veda anche dualità onda-particella.*

