

Il gatto di Schrödinger

LORENZO MACCONE

Dipartimento di Fisica "A. Volta" @ INFN Sezione di Pavia

Tutti noi abbiamo una precisa concezione della realtà¹: esiste un mondo "là fuori" che ha proprietà oggettive e indipendenti da noi. Questo è errato: la fisica moderna ci insegna che molte delle proprietà di un oggetto sono create dall'atto stesso di osservazione, e non esistevano (o, meglio, non avevano un valore definito) prima che l'oggetto fosse osservato. L'esperimento del gatto fu proposto come provocazione da Schrödinger per evidenziare questo aspetto paradossale della meccanica quantistica, quando in molti ancora pensavano che tale teoria fosse incompleta oppure sbagliata. Oggi i fisici sperimentali sono sempre più vicini alla realizzazione pratica della proposta di Schrödinger, ma i fisici teorici non sono ancora riusciti a conciliare la meccanica quantistica con il senso comune. Che questa sia un'impresa impossibile?

In seguito ad una provocazione di Einstein, nel 1935 il fisico Schrödinger pubblicò l'esperimento concettuale del gatto. Ciò suscitò un vespaio di tale portata che ancora oggi gli scienziati dibattono su come vada interpretato questo esperimento. Ma andiamo con ordine: di cosa si tratta?

Supponiamo, scrive Schrödinger, di prendere una scatola perfettamente isolata dall'esterno. Nella scatola mettiamo un gatto e una particella radioattiva. Le particelle radioattive possono trasformarsi in altri tipi di particelle. La scatola è dotata di un meccanismo che apre una boccetta di veleno che uccide il gatto quando la particella si trasforma (vedi Fig. 1). Tra tutte le possibili sostanze radioattive, ne scegliamo una che abbia un tempo di dimezzamento di un'ora. Questo vuol dire che, se attendiamo un'ora, la particella ha un'uguale probabilità di trasformarsi oppure di non trasformarsi: nessuno può prevedere se si trasformerà oppure no. Dopo aver preparato questo diabolico marchingegno, chiudiamo la scatola e aspettiamo un'ora. Cosa accadrà al gatto?

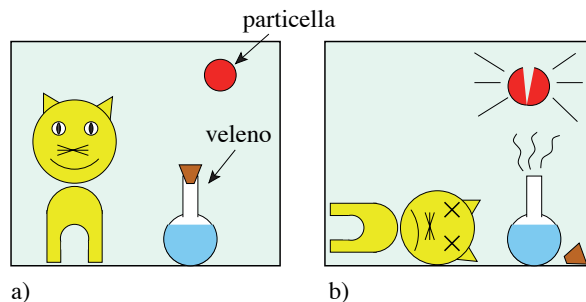


Figura 1: Esperimento del gatto. a) Se la particella radioattiva non si trasforma, il gatto dopo un'ora è ancora vivo. b) Se la particella si trasforma, si apre una boccetta di veleno e il gatto muore. Nell'esperimento di Schrödinger avviene una combinazione delle due situazioni: dopo un'ora il gatto è contemporaneamente vivo e morto.

La risposta più ovvia è che il gatto avrà un'uguale probabilità di morire, oppure di rimanere in vita (a seconda se la particella si è trasformata oppure no). All'apparenza non c'è nulla di strano in una situazione di questo tipo: in fin dei conti tutti noi abbiamo esperienze di eventi casuali. Ad esempio, quando lanciamo una moneta, prima di guardare il risultato diremo che la moneta ha uguale probabilità di essere "testa" oppure "croce". Cosa c'è dunque di così paradossale nell'esperimento del gatto?

Per rispondere, è necessario analizzare più accuratamente il processo di trasformazione della particella radioattiva. Dicendo che "dopo un'ora la particella ha uguale probabilità di trasformarsi oppure no", stiamo raccontando solo parte della storia. Infatti, se analizziamo un'altra proprietà, che chiameremo "più/meno", troviamo che la particella è sicuramente "più", e non è mai "meno". Cosa si intende per proprietà "più/meno"? E' una proprietà facilmente misurabile, ma non si può definire in termini più comprensibili perché non è riconducibile a niente di familiare². Tuttavia questo non è importante: ci interessa solamente che possiamo misurare questa proprietà e assegnare alla particella un valore ben preciso, cioè "più". E' facile (usando le regole quantistiche di evoluzione) dimostrare che se la scatola del gatto è perfettamente isolata, allora anche il gatto avrà proprietà "più" e non "meno". Cioè, analizzando la proprietà "più/meno", abbiamo eliminato la probabilità dall'esperimento: il gatto che ha probabilità uguali di essere vivo o morto, è sicuramente "più". Un gatto "più" non è né vivo né morto. Per mancanza di parole che esprimano tale proprietà (ricordate, la proprietà "più/meno" non è assimilabile a concetti che ci sono familiari), spesso si dice che un gatto nello stato "più" è contemporaneamente vivo e morto³.

² In maniera un po' approssimativa, possiamo dire che è una proprietà legata all'aspetto ondulatorio della particella, e ci dice in che modo la particella interferisce con se stessa. Infatti, la misura di tale proprietà si compie in laboratorio con esperimenti interferometrici.

³ Anche un gatto "meno" è contemporaneamente vivo e morto, ma è di-

¹ Questo articolo è già stato pubblicato sugli Atti dell'Accademia degli Agiati, anno 260, ser. VIII, Vol. 10B, pg.19 (2011).

Un'analogia può forse aiutare: la luce gialla può essere vista come una combinazione di luce rossa e verde, così come il gatto più è una combinazione di gatto vivo e morto. Così come non ha senso chiederci se la luce gialla è rossa o verde (è entrambi), allo stesso modo non ha senso chiedersi se un gatto più è vivo o morto, è entrambi! [Notate, però, che nel primo caso consideriamo solo il colore (un'unica proprietà), ma nel secondo stiamo considerando due proprietà distinte.]

Le proprietà “vivo/morto” e “più/meno” sono quindi complementari. Se conosco il valore di una (so che il gatto è “più”), non ho nessuna informazione sull'altra (il gatto è “vivo” e “morto” con uguale probabilità). Questo è molto controintuitivo: noi siamo abituati a dare un valore congiunto a tutte le proprietà che un oggetto può avere. Magari non ne conosciamo il valore, ma pensiamo che tale valore “esista” in qualche modo. Invece, a causa della meccanica quantistica, dobbiamo necessariamente concludere che il valore delle proprietà non è sempre pre-esistente alla misura, ma è talvolta determinato dalla misura stessa. Almeno, questo è vero se le proprietà di oggetti distinti sono considerate indipendenti⁴ (e tipicamente ci aspettiamo che lo siano: non ci aspettiamo che la vita o morte del gatto dipenda dalla posizione di un sasso su Marte).

Quando guardiamo gatti “normali”, abbiamo completa informazione sulla proprietà vivo/morto (e nessuna informazione sulla proprietà complementare più/meno). Schrödinger invece ci dà una ricetta per ottenere un gatto di cui abbiamo completa informazione sulla proprietà più/meno (sappiamo che è più), e quindi non abbiamo nessuna informazione sulla proprietà complementare vivo/morto. Eppure ci aspettiamo intuitivamente che questa proprietà sia sempre ben definita per i gatti!

stinguibile dal gatto “più” per via di un segno diverso nel suo vettore di stato (il segno - invece del +) si veda il box 1.

⁴ Questa è la conseguenza del teorema di John Bell, le cui previsioni sono state in larga parte verificate da sofisticatissimi esperimenti. Il teorema di Bell afferma che se le proprietà di oggetti distinti sono indipendenti, allora non possono essere sempre pre-determinate: infatti le correlazioni che si possono creare in meccanica quantistica tra oggetti distinti sono più forti di quanto sarebbe permesso se le proprietà fossero pre-determinate e indipendenti. In alternativa al punto di vista presentato in questo articolo (dove facciamo cadere la predeterminazione), si potrebbe pensare ad una non-indipendenza delle proprietà di oggetti distinti. Questa strada è percorribile solo con grossa difficoltà perché il concetto stesso di esperimento viene messo in discussione: chi può dire che la scelta dell'apparato o della misura da compiere non sia determinata dall'oggetto stesso dell'esperimento?



E c c o
dov'è il paradosso del gatto: tutti noi possiamo aspettarci di vedere un gatto decisamente vivo oppure decisamente morto (anche se magari non sappiamo quale dei due), ma nessuno di noi ha mai visto un gatto “più”, cioè contemporaneamente vivo e morto!

Inoltre, supponendo di avere un gatto più, dobbiamo stare molto attenti a come interagiamo con il gatto: se lo osserviamo in maniera tale da poter estrarre l'informazione sul suo stato di salute (vivo/morto), perderemmo tutta l'informazione sulla proprietà più/meno, che è complementare alla prima! Come vedremo, interagire con il gatto più senza rovinare questa sua proprietà è estremamente complicato.

Analizzando il formalismo della meccanica quantistica, si vede subito che la proprietà “più/meno” non ha nulla di speciale, se confrontata con la proprietà “vivo/morto”. Perché allora una delle due ci è familiare, mentre l'altra ci è aliena a tal punto che non abbiamo neanche parole adeguate a descriverla? Naturalmente, nasce il sospetto che la meccanica quantistica sia errata e vada modificata. Esistono molte pro-

poste in tal senso, la più famosa delle quali è stata proposta da italiani: i professori Ghirardi, Rimini e Weber delle università di Trieste e di Pavia. È, però, sempre più chiaro (anche agli stessi proponenti) che tali teorie alternative potrebbero ben presto trovarsi in difficoltà nello spiegare gli esperimenti sempre più raffinati, che vengono compiuti⁵. Ancora nessuno è riuscito a creare un gatto “più”, ma non è troppo difficile in laboratorio creare oggetti microscopici “più”: fotoni, atomi e addirittura molecole complesse. I gatti, naturalmente, sono composti di fotoni, atomi e molecole. Sembra ormai che l’esperimento concettuale di Schrödinger (magari in una forma meno dannosa per i gatti) si riuscirà presto a realizzare in pratica.

Se, come pare, la meccanica quantistica è corretta, allora è necessario trovare qualche meccanismo che ci impedisca di vedere gatti “più” nella vita di tutti i giorni. La portata concettuale della proposta di Schrödinger è tale che ancora oggi, a distanza di 75 anni dalla sua proposta, non c’è un consenso comune su come affrontare tale problema. Addirittura, il premio Nobel Gell-Mann narra che il fisico vivente più famoso, Stephen Hawking, abbia detto “ogni volta che sento parlare del gatto di Schrödinger cerco la mia pistola”! Ciononostante, la maggior parte dei fisici teorici sono convinti che la soluzione al ‘problema gatto’ risieda nel meccanismo della “decoerenza”. Tale meccanismo afferma che, quando il sistema non è più isolato (cioè quando apro la scatola per vedere come sta il gatto), alcune proprietà (come più/meno) si degradano molto rapidamente e rimangono solo le proprietà complementari (come vivo/morto). Infatti, l’informazione sul valore delle prime viene dispersa nell’ambiente esterno in maniera irrecuperabile.

Una metafora può forse aiutare a capire. Supponiamo che il valore della proprietà “più/meno” sia stato scritto su un sottilissimo foglio di ghiaccio conservato dentro un frigorifero. Se vogliamo conoscere il valore di tale proprietà, dobbiamo aprire il frigorifero e guardare il foglio di ghiaccio. Esso è però talmente sottile, che appena tolto dal frigorifero si scioglie immediatamente: il valore della proprietà “più/meno” si perde nell’ambiente perché del foglio ci rimane solamente qualche goccia d’acqua mista ad inchiostro, da cui è praticamente impossibile ricavare cosa ci fosse scritto sopra. Naturalmente è possibile inventarsi un esperimento che ci permetta di leggere il foglio (ad esempio cercare di leggerlo molto rapidamente, oppure abbassare la temperatura esterna, ecc.).

Uscendo dalla metafora, la situazione del gatto è del tutto analoga: la proprietà “più/meno” è molto delicata e il suo valore si disperde nell’ambiente in tempi brevissimi (dell’ordine di 10-20 secondi per i gatti), mentre la proprietà a “vivo/morto” è più robusta e non viene dispersa affatto. Esistono, però, esperimenti attentamente controllati che permettono di leggere anche la proprietà “più/meno”, anche se nessuno

è ancora riuscito ad eseguirli su oggetti complessi come un gatto.

Rimane, però, un ultimo punto da chiarire: da dove deriva questa differenza tra le due proprietà? Perché una è talmente delicata da essere quasi impalpabile, mentre l’altra è talmente robusta da essere immune alla decoerenza?

La risposta si può trovare nel fatto che tutte le interazioni che conosciamo in fisica sono locali, cioè ogni volta che due oggetti interagiscono tra loro, lo fanno punto per punto nello spazio. I gatti “vivi” e i gatti “morti” sono, come tutti sappiamo, ben localizzati nello spazio. Un gatto vivo è costituito da una coda viva, da un corpo vivo e da una testa viva. Stessa cosa dicasi per il gatto morto: ciascun pezzo del gatto è morto. Al contrario, la proprietà “più” riguarda collettivamente tutto il gatto (e la boccetta): un gatto “più” non è costituito da una coda “più” e una testa “più”. [Tecnicamente si dice che le parti del gatto “più” sono “entangled” (intrecciate).] Un gatto “più” non è localizzato nello spazio. Infatti, esso è contemporaneamente vivo e morto: quindi è contemporaneamente in piedi, visibilmente nervoso, e a terra esanime.

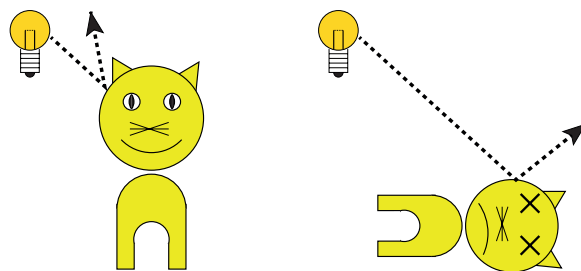


Figura 2: Decoerenza: la luce che interagisce con il gatto viene deviata in direzioni diverse a seconda se il gatto è vivo o morto. Quindi estrae informazione localizzata solo sulla proprietà “vivo/morto”, mentre l’informazione sulla proprietà “più/meno” è estratta in maniera delocalizzata.

Analizziamo più in dettaglio il meccanismo della decoerenza. Consideriamo un raggio di luce che colpisce il gatto. Il raggio trasporta nell’ambiente l’informazione che riguarda il gatto. Infatti viene riflesso in una direzione dal gatto vivo e in un’altra direzione dal gatto morto (vedi Fig. 2). Quindi le proprietà “vivo/morto” e “più/meno”, che inizialmente erano solo proprietà del gatto (e della particella radioattiva), ora diventano proprietà del sistema formato da gatto, particella e raggio di luce: anche il raggio di luce contiene (grazie alla sua direzione di propagazione) l’informazione “vivo/morto” e “più/meno”. Dato che la luce interagisce localmente con il gatto, una misura della proprietà “vivo/morto” è molto semplice: si tratta di compiere una misura locale per scoprire in che direzione il raggio è stato riflesso: se vedo che la testa del gatto è viva, posso concludere che il gatto è vivo. Al contrario, una misura della proprietà delocalizzata “più/meno” necessita di una misura globale che abbracci tutto il sistema (gatto, particella e raggio di luce). Se anche riuscissi a scoprire che la testa del gatto è “più”, questo non mi permette di concludere che il gatto è “più”! La proprietà “più” della testa (locale) è diversa dalla proprietà “più” del gatto (globale): un gatto globalmente “più” (come quello creato dal marchingegno-

⁵ Naturalmente il metodo scientifico ci impone di prendere in considerazione tutte le possibili teorie scientifiche che spiegano un fenomeno: una teoria può essere scartata solo nel momento in cui essa è stata dimostrata falsa sperimentalmente. Per ora non sono ancora state falsificate molte delle teorie alternative alla meccanica quantistica.

gno di Schrödinger) non è costituito da una testa “più” e da una coda “più”, ma è globalmente “più”. Quindi, se anche un solo componente del sistema non viene considerato dalla misura, tale proprietà si perde irrimediabilmente. Se, quando apriamo la scatola, perdiamo anche un singolo raggio di luce che sfugge dalla finestra o viene assorbito dal muro del laboratorio, abbiamo irrimediabilmente perso l’informazione sulla proprietà “più/meno”: nessun esperimento potrà più dirci se il gatto era “più” o “meno” (a meno di non riuscire a recuperare l’informazione contenuta in quel raggio di luce perso). Naturalmente, in ogni situazione reale, una miriade di raggi di luce colpiscono gli oggetti e si perdono. Inoltre, in aggiunta ai raggi di luce esistono miriadi di altri meccanismi che disperdono informazione nell’ambiente (per esempio le collisioni con le particelle dell’atmosfera, l’interazione con il pavimento della scatola, la forza gravitazionale di oggetti in posizioni distinte, ecc.). Questo spiega la incredibile delicatezza delle proprietà delocalizzate dei sistemi quantistici e il motivo per cui il tempo di decoerenza è fantasticamente breve per oggetti complessi come un gatto.

Prima di concludere, è bene dare una precisazione. I lettori più familiari con la meccanica quantistica sanno che uno dei maggiori problemi interpretativi di tale teoria è il “problema della misura”, che è strettamente legato al ‘problema gatto’. Purtroppo, tale problema non può essere risolto dal meccanismo di decoerenza (per ragioni prettamente tecniche⁶), nonostante la decoerenza sia in grado di spiegare quasi tutte le situazioni pratiche (incluso l’esperimento del gatto). E’ infatti possibile inventarsi esperimenti concettuali, ancora più astrusi di quello proposto da Schrödinger, dove il meccanismo della decoerenza non può aiutare⁷!

In conclusione, abbiamo ripercorso l’esperimento concettuale provocatorio del gatto di Schrödinger, analizzandolo alla luce dei recenti progressi della ricerca in meccanica quantistica, la stupefacente teoria che regola il nostro mondo. La ricerca sui fondamenti di tale teoria è stata rinvigorita di recente grazie al forte sviluppo della teoria dell’informazione quantistica, dove si pone l’accento sullo scambio di informazione tra sistemi fisici. Tale prospettiva di analisi risulta particolarmente fruttuosa, visto che la meccanica quantistica è una descrizione di come la realtà sia percepibile, cioè di quali informazioni sulla realtà siano accessibili e di come vi si possa accedere.

6 Derivare la regola di Born dalla decoerenza è impossibile senza cadere in un ragionamento circolare. Infatti, la regola di traccia parziale, su cui si basa la decoerenza, si riesce a derivare solamente assumendo la regola di Born.

7 Sono esperimenti in cui, dentro alla scatola, invece del gatto viene posto un osservatore (animato o meccanico) che registra i risultati di esperimenti quantistici.

Box 1: Descrizione matematica

In questo box diamo una spiegazione matematica, e quindi più rigorosa, del fenomeno del gatto. Il lettore che non abbia familiarità con i concetti di vettore e matrice è invitato a leggere il testo principale. Il primo postulato della meccanica quantistica afferma che tutta l’informazione che noi abbiamo su un sistema può essere racchiusa in un vettore, detto ‘stato’. Le due proprietà dicotomiche complementari “vivo/morto” e “più/meno” possono essere descritte da un vettore bidimensionale:

$$\begin{aligned} |\text{vivo}\rangle &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \equiv |\text{morto}\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \\ |\text{più}\rangle &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \equiv |\text{vivo}\rangle + |\text{morto}\rangle; \\ |\text{meno}\rangle &= \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \equiv |\text{vivo}\rangle - |\text{morto}\rangle; \end{aligned}$$

Il marchingegno di Schrödinger mette il gatto nello stato $|\text{più}\rangle$ cioè in una somma di $|\text{vivo}\rangle$ e $|\text{morto}\rangle$ una situazione in cui non è né vivo, né morto. Cosa succede quando il gatto viene colpito da un raggio di luce, come descritto in Fig. 2? Il raggio di luce estrae informazione sullo stato del gatto. Dato che l’interazione è locale, il raggio di luce si correla con le proprietà locali del gatto, cioè con la proprietà “vivo/morto”. Supponiamo che il gatto sia vivo. Allora, dopo l’interazione lo stato del sistema formato da gatto e raggio sarà $|\text{vivo}\rangle|\text{raggio } v\rangle$, dove il primo vettore si riferisce allo stato del gatto, e il secondo allo stato del raggio (per “raggio v ” si intende “raggio che ha colpito un gatto vivo”). Analogamente lo stato finale del sistema, se il gatto era morto, sarà $|\text{morto}\rangle|\text{raggio } m\rangle$. Se, invece, il gatto era in uno stato “più”, allora per la linearità della meccanica quantistica lo stato del sistema evolverà come

$$\begin{aligned} |\text{più}\rangle &= |\text{vivo}\rangle + |\text{morto}\rangle \rightarrow \\ &|\text{vivo}\rangle|\text{raggio } v\rangle + |\text{morto}\rangle|\text{raggio } m\rangle, \end{aligned}$$

che è chiamato stato *entangled*. Se molti raggi colpiscono il gatto “più”, allora il sistema evolverà nello stato

$$\begin{aligned} &|\text{vivo}\rangle|\text{raggio } v\rangle|\text{raggio } v\rangle|\text{raggio } v\rangle \dots \\ &+|\text{morto}\rangle|\text{raggio } m\rangle|\text{raggio } m\rangle|\text{raggio } m\rangle \dots, \end{aligned}$$

Dalla forma di questo stato, si vede che è molto semplice recuperare la proprietà “vivo/morto”: è sufficiente misurare uno solo dei raggi. Al contrario, la proprietà “più/meno” è molto difficile da recuperare, perché risiede nell’operazione di somma tra le due serie di vettori. Per recuperare tale proprietà, è necessario compiere una misura che abbracci *tutti* i raggi e anche il gatto. La perdita di anche uno solo dei sottosistemi risulta in un’operazione di traccia parziale che oblitera il segno relativo tra le due serie di vettori nello stato globale, e quindi cancella la proprietà “più/meno”. Questo è l’effetto della decoerenza.