

Quaderni d'altri tempi



Alain Aspect
Se Einstein avesse saputo
Dalle rivoluzioni
quantistiche
a una nuova idea di realtà

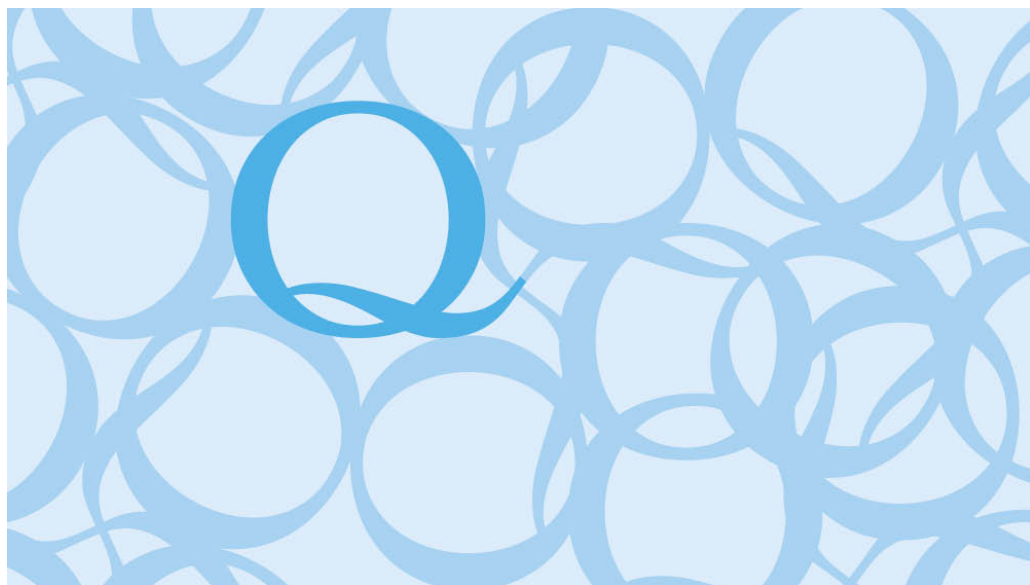
Traduzione di Giuseppe
Bozzi
Raffaello Cortina, Milano,
2026
pp. 336, € 25,00

L'ESPERIMENTO DA NOBEL CHE HA STRAVOLTO LA REALTÀ

di *Roberto Paura*

Era il 10 dicembre 2022 quando, esattamente un secolo dopo Albert Einstein, Alain Aspect – in frac e cravatta bianca di ordinanza – ritirava il premio Nobel della Fisica dalle mani del re di Svezia. Il secolo trascorso tra questi due eventi segna un passaggio radicale nella nostra comprensione della realtà: quando Einstein ritirò il suo premio per la scoperta dell'effetto fotoelettrico, la rivoluzione della fisica quantistica era già consolidata ma il dibattito sulla sua interpretazione era ancora agli albori e il grande fisico tedesco conservava – e conservò per tutta la vita – la “fede” in un universo deterministico, in cui gli aspetti probabilistici delle misurazioni quantistiche restavano di tipo epistemico, non ontologico, spiegabili cioè con limiti della nostra conoscenza sperimentale, destinati a essere superati da una teoria più profonda che li avrebbe ricondotti a una natura essenzialmente deterministica e prevedibile.

Quando a ritirare il premio è toccato ad Aspect, per il suo celebre esperimento con cui dimostrò il teorema delle disuguaglianze di Bell, la concezione di Einstein era ormai andata in pezzi.



Il Nobel rappresentava l'estrema sconfessione della concezione einsteiniana della realtà: l'universo non è deterministico, ma probabilistico; non esiste una realtà indipendente dall'osservatore; la causalità può essere di tipo non-locale, ossia tenere in relazioni istantanee causa-effetto oggetti distanti ben più del cono di luce definito dalla relatività

ristretta. Non stupisce che, come un giorno raccomandò con una punta di ansia John Bell al giovane Aspect durante il loro primo incontro a Ginevra nel 1975, “non bisogna dedicare troppo tempo a riflettere sui fondamenti della meccanica quantistica, poiché ciò mette a rischio la propria salute mentale” (Aspect, 2026). Come il vecchio dottor Gibarian che l’allievo Kris Kelvin scopre essersi suicidato all’arrivo nella stazione di Solaris nell’[eponimo capolavoro di Stanislaw Lem](#), così Bell aveva voluto mettere in guardia dai rischi di calarsi troppo a fondo nei paradossi della fisica perché, per citare Lem, non di sola fisica si tratta, “qui si tratta dell’uomo e dei limiti della conoscenza umana” (Lem, 2013).

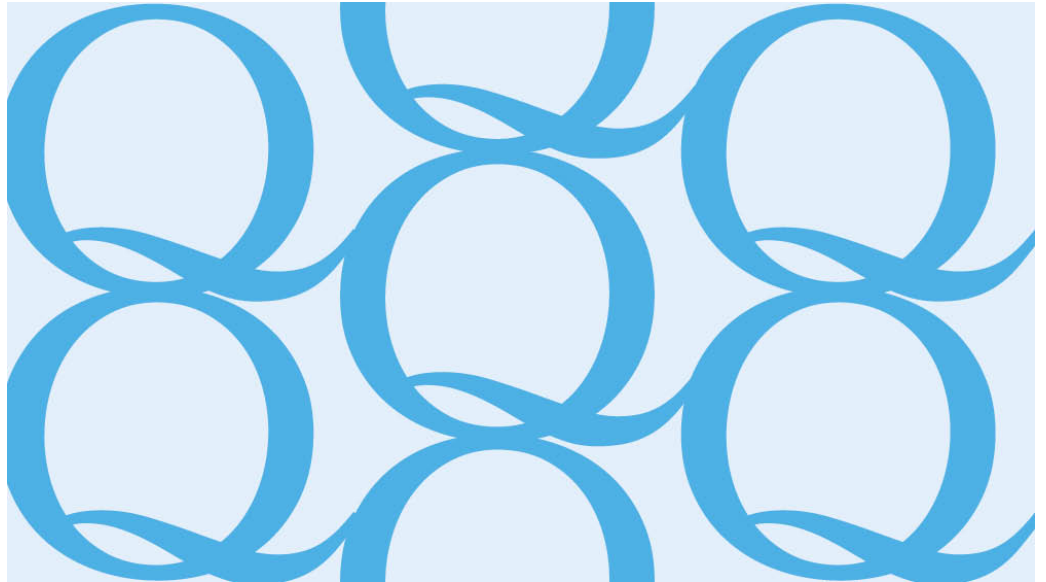
Una scatola verde

Aspect è però sopravvissuto all’ordalia ed è tornato tra noi mortali per raccontarci quello che ha visto nel suo libro *Se Einstein avesse saputo*, pubblicato in italiano da Raffaello Cortina, che fin dal titolo chiarisce il senso del libro, al tempo stesso resoconto di dove si sia spinta la conoscenza umana e confronto con l’impegnativa eredità di Einstein, che di fronte agli esperimenti di Aspect avrebbe inevitabilmente dovuto rimettere in discussione le sue convinzioni. È una storia che inizia nel 1974, quando Alain Aspect, di ritorno dal Camerun, dove per tre anni ha svolto il servizio nazionale come insegnante volontario, viene ricevuto dal direttore dell’Institut d’Optique di Parigi, Christian Imbert, per trovare un tema per la sua tesi di abilitazione:

“Nel corso dell’incontro, Imbert mi passa una di quelle scatole d’archivio verdi piene di documenti, dove, mi diceva, avrei probabilmente trovato un argomento interessante. Così sono tornato a casa e ho aperto subito la famosa scatola verde. Naturalmente, ho iniziato con il documento più breve: un articolo di John Stewart Bell, del CERN di Ginevra. Ricordo quel momento come se fosse ieri. Ero sbalordito, scosso da ciò che avevo appena letto”
(Aspect, 2026).

Cosa aveva letto Aspect? Si trattava, evidentemente, del breve articolo del 1964 dal titolo *Sul paradosso di Einstein-Podolsky-Rosen* (ora in Bell, 2010), in cui Bell ricostruiva la diatriba risalente a trent’anni prima tra Albert Einstein e Niels Bohr sull’interpretazione della meccanica quantistica, diatriba ruotante intorno a un esperimento mentale proposto da Einstein e dai suoi collaboratori e noto dalle loro iniziali come il “paradosso EPR”. Anche quell’articolo era breve: solo quattro pagine. Ma intendeva rispondere a un quesito essenziale: “La descrizione della realtà fisica fornita dalla meccanica quantistica può dirsi completa?”.

La risposta fornita da Einstein, Podolsky e Rosen era negativa. Se infatti si accettava [l’interpretazione dominante della meccanica quantistica](#), quella detta “di Copenaghen” perché attribuita essenzialmente al danese Niels Bohr, si incorreva in un grave paradosso: l’*entanglement*, ossia la correlazione tra le proprietà di due particelle quantistiche (come per esempio due fotoni) emesse da una stessa sorgente, violerebbe il principio di località, vale a dire l’assioma incontrovertibile della teoria della relatività secondo cui esiste un limite nelle relazioni causali tra due eventi dato dalla velocità della luce.



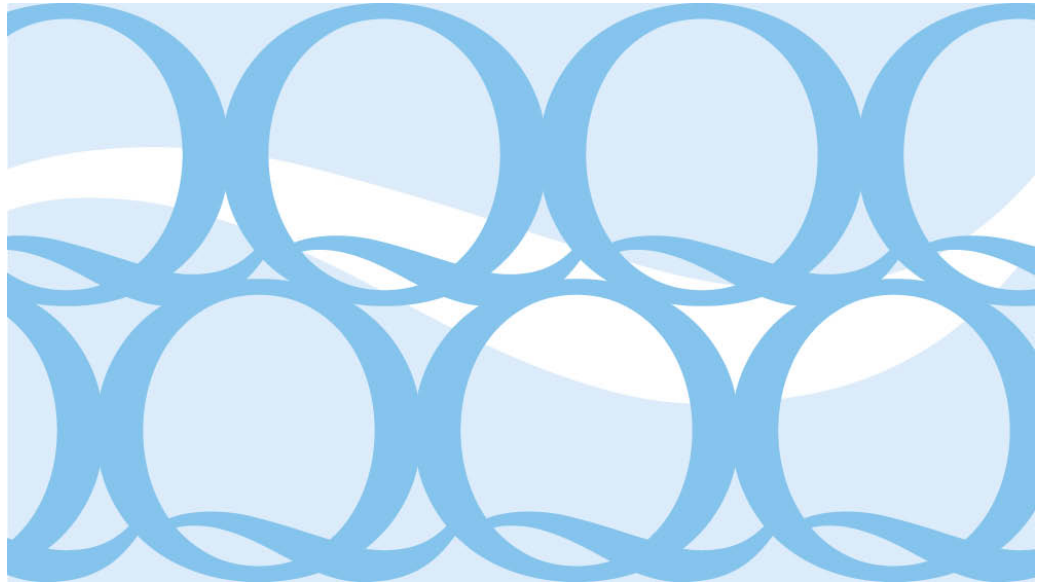
Il paradosso EPR descritto nell'articolo del 1935 mostrava infatti come la misurazione effettuata su una delle due particelle in stato di *entanglement* producesse un effetto istantaneo anche a distanze superluminali sull'altra particella, "costringendola" ad assumere un valore preciso correlato a quello della particella misurata dallo sperimentatore. Ovviamente, si trattava di un esperimento puramente mentale: ma il formalismo dimostrava che l'interpretazione di Copenaghen incorreva in una grave fallacia, per cui occorre prevedere l'esistenza di una teoria più profonda in grado di spiegare non più in modo probabilistico, ma deterministico, quella che Einstein definì come "un'inquietante azione a distanza", ossia l'*entanglement* non-locale. Per usare le parole dello stesso Einstein:

"Si può sfuggire a questa conclusione solo supponendo che la misura su S_1 modifichi (per telepatia) la situazione reale di S_2 , oppure rifiutando di attribuire realtà indipendenti a oggetto spazialmente separati l'uno dall'altro. Entrambe le possibilità mi sembrano del tutto inaccettabili"
(Einstein, 2022).

Le variabili nascoste

È noto che Niels Bohr replicò all'articolo EPR e cercò di confutarlo, senza per la verità presentare dimostrazioni inoppugnabili. Dal suo punto di vista, l'errore sostanziale di Einstein era quello di non accettare la natura paradossale della scala quantistica: ciò che è vero per i fenomeni macroscopici descritti dalla fisica classica – il principio di località, per cui le "azioni a distanza" non possono verificarsi (un discrimine tra scienza e magia che dobbiamo a Isaac Newton), l'indipendenza dell'oggetto osservato dall'osservatore, la prevedibilità di un fenomeno sulla base di leggi deterministiche – non è vero nel reame dell'infinitamente piccolo. Già nel 1932, nel suo fondamentale lavoro *I fondamenti matematici della meccanica quantistica*, John von Neumann intese dimostrare, tra le altre cose, l'impossibilità di teorie a "variabili nascoste" della meccanica quantistica, smentendo cioè l'ipotesi che teorie più profonde auspicate da Einstein potessero soppiantare l'interpretazione di Copenaghen attraverso parametri aggiuntivi in grado di spiegare l'*entanglement* senza violare il principio di località. Quella di von Neumann fu accettata per anni come una dimostrazione definitiva che Einstein era nel torto. Da allora, sulla questione

calò il silenzio.



Chi iniziò a metterlo in discussione fu David Bohm, classico “fisico eretico”, che riuscì a occuparsi degli aspetti fondamentali della meccanica quantistica negli anni Cinquanta perché, per via delle sue opinioni politiche, fu ostracizzato dall’ambiente accademico americano e pendolò tra l’Inghilterra e il Brasile, trovando la libertà necessaria per sviluppare le sue teorie. In particolare la “teoria dell’onda pilota” proposta da Bohm attribuiva realtà alla funzione d’onda che, nell’interpretazione di Copenaghen, è di natura puramente matematica: “pilotando” la particella dalla nuvola di probabilità del reame quantistico allo stato effettivo che assumerà al momento della misurazione, la funzione d’onda assumeva quella concretezza ontologica che Einstein cercava per le sue variabili nascoste. John Bell era stato molto colpito dalle idee di Bohm e si era reso conto che potevano inficiare la dimostrazione matematica di von Neumann. Ma, leggendo meglio l’articolo di Bohm, che faceva ricorso proprio al paradosso EPR, Bell notò che in realtà la teoria bohmiiana conservava la correlazione non-locale dell’entanglement. Ciò che Bohm aveva dimostrato era in realtà l’impossibilità di teorie *locali* con parametri aggiuntivi. L’inquietante azione a distanza non veniva rimossa nemmeno prevedendo una teoria più profonda. Bell provò a verificare tutto ciò, convinto che fosse possibile provare che Einstein aveva ragione: ma il suo teorema dimostrò infine, in modo più completo di von Neumann, che in realtà aveva torto. Come riassunse Aspect nell’introduzione al libro di Bell *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica* (che contiene i suoi articoli più importanti, incluso quello da cui Aspect sarebbe partito nel 1975):

“[...] poche righe di calcoli sono sufficienti per mostrare una contraddizione con le previsioni della meccanica quantistica. Più precisamente, anche se una siffatta teoria a «variabili nascoste» è in grado di riprodurre alcune delle correlazioni quantistiche previste, non è in grado di riprodurre le previsioni quantistiche per tutte le possibili configurazioni dell’apparato di misura. In generale, quindi, non è possibile comprendere le correlazioni di tipo EPR «completando» la teoria quantistica secondo le linee proposte da Einstein”
(Aspect in Bell, 2010).

Un teorema e la sua dimostrazione

Il teorema di Bell introduceva parametri identici per una coppia di particelle emesse in stato di entanglement, che costituiscono appunto i parametri aggiuntivi con cui poter spiegare l'esistenza di una loro correlazione a distanza. Nell'esempio di Bell ripreso da Aspect, un parametro di questo tipo è quello che spiega proprietà comuni di due gemelli: "se hanno gli occhi e i capelli dello stesso colore, se hanno reazione identica a determinate patologie, è semplicemente perché hanno gli stessi cromosomi" (Aspect, 2026).

In questo caso, la genetica è la teoria più profonda che serve a spiegare queste osservazioni. Ma Bell constatò che in questo modo era possibile ottenere risultati in linea con le previsioni della meccanica quantistica solo per alcune specifiche orientazioni dei polarizzatori che emettono i fasci di particelle, ma non per tutte. Era cioè possibile usare i parametri aggiuntivi per spiegare correlazioni *locali*, tra orientazioni nella stessa direzione o con angoli tra le orientazioni non troppo elevati.

Prendendo il valore di questi angoli (coefficienti di correlazione) tra quattro diverse orientazioni di due polarizzatori tra loro correlati (a e a del polarizzatore 1, b e b del polarizzatore 2), l'aggiunta di parametri rispetta le previsioni della meccanica quantistica solo se la quantità $S(a, a, b, b)$ è compresa tra -2 e $+2$, limite a cui si dà il nome di "disuguaglianze di Bell"; ma il valore calcolato da Bell risultava pari a 2 per la radice quadrata di 2 , ossia circa $2,83$, valore superiore a tali limiti, cosicché il teorema dimostrava la violazione delle disuguaglianze per teorie non-locali. Se il risultato non vi sconcerta come sconcertò Aspect quando lesse per la prima volta l'articolo, può tornare utile questa sua sintesi delle conseguenze del teorema:

"Quando si dice che questa realtà fisica è locale, si intende che è legata al sistema, che non può dipendere da ciò che accade in quello che in relatività viene chiamato «altrove», ovvero da eventi la cui eventuale influenza, se esistesse, dovrebbe propagarsi più velocemente della luce, o addirittura risalire indietro nel tempo. Per dirla in modo molto semplice, in un mondo realista locale, l'orientazione del polarizzatore *qui* non può influenzare istantaneamente la risposta del polarizzatore *lì*, e viceversa"
(Aspect, 2026).

Ebbene, il teorema dimostrava che questo non è vero per la nostra realtà, ossia che al livello fondamentale la natura è *non-locale*. Ma Bell ci era arrivato con la matematica: come Einstein, aveva sviluppato un esperimento che però non era possibile realizzare con le strumentazioni di allora. Questa era la sfida che Aspect aveva raccolto aprendo la scatola verde nel 1975. Per la verità, c'erano già stati dei tentativi sperimentali: in particolare quello di John Clauser, Abner Shimony e Michael Horne all'Università di Berkeley, e di Richard Holt e Francis Pipkin all'Università di Harvard, nella prima metà degli anni Settanta. I due esperimenti produssero risultati tra loro in contraddizione: quello di Harvard confermava le disuguaglianze di Bell (dunque confutava le conclusioni del teorema), quello di Berkeley le violava (dando quindi ragione a Bell). Aspect comprese che occorre tecnologie più raffinate per ottenere un risultato determinante. Ma non era solo questione di tecnologie: serviva un intuito speciale per la sperimentazione al fine di trovare soluzioni creative ai limiti tecnologici dell'epoca, e questo fu il vero asso nella manica di Aspect, che gli permise di avere successo nei laboratori francesi (caratterizzati, come scrive, da "mezzi limitati, ma un

ambiente eccezionale”) laddove gli americani avevano fallito. La sfida era la seguente:

“A una distanza di 6 metri tra la sorgente e ciascun polarizzatore, il tempo di volo dei fotoni è di 20 nanosecondi: è quindi necessario cambiare l’orientazione di ciascun polarizzatore in un tempo molto più breve, e con un intervallo di tempo tra due variazioni inferiore a 20 nanosecondi”
(Aspect, 2026).

Aspect risolse il problema cambiandone completamente i termini: anziché cercare di variare molto rapidamente l’orientazione dei polarizzatori, pensò di posizionare un commutatore in ciascun fascio di fotoni, “ovvero un sistema che invii alternativamente il fascio all’uno o all’altro dei due polarizzatori con orientazioni diverse ma fissi”. Facile certo a dirsi, più difficile a pensarsi e ancor più difficile a farsi: la realizzazione dei commutatori fu particolarmente laboriosa, ma alla fine – siamo nella primavera del 1982, sette anni dopo l’inizio della ricerca – l’esperimento confermò la violazione delle disuguaglianze di Bell di 5 deviazioni standard, livello considerato al di fuori di qualsiasi possibile errore statistico. L’esperimento di Aspect confermò, in realtà, ciò che i fisici già sapevano: Bohr aveva ragione, Einstein torto. La meccanica quantistica funziona.

“Ma il prezzo da pagare per questa immagine è alto: in questa descrizione, lo stato del secondo fotone, lontano dal primo, viene modificato istantaneamente al momento della misura del primo fotone. (...). Tuttavia, la causalità relativistica di Einstein proibisce interazioni istantanee: nessuna influenza può propagarsi più velocemente della luce. È comprensibile che Einstein abbia rifiutato una tale visione del mondo e abbia suggerito di completare la meccanica quantistica considerando che le coppie di fotoni si trovano in uno stato di polarizzazione ben definito dal momento in cui lasciano la sorgente. Tuttavia, i risultati dei test delle disuguaglianze di Bell ci costringono ad abbandonare questo punto di vista”
(Aspect, 2026).

Lasciamo perdere il sogno di usare questa scoperta per trasmettere informazioni a velocità superiori a quelle della luce; come Aspect ci ricorda, se pensiamo che una cosa del genere sia possibile allora non abbiamo capito nulla della meccanica quantistica, perché al suo cuore si situa il principio della casualità dei valori che le particelle assumono all’atto della misura, per cui non potremo mai sperare di “costringere” una particella ad assumere un certo stato affinché l’altra in stato di entanglement che si trova su Alfa Centauri assuma lo stato complementare. Dunque, almeno da questo punto di vista, Einstein aveva ragione; anche se, ironicamente, l’esistenza di questa censura cosmica richiede di accettare la natura intrinsecamente aleatoria della realtà, che non è di tipo statistico – come nel caso della probabilità usata in fisica statistica – ma oggettivo.

La realtà in sé

L’eredità degli esperimenti di Aspect consiste nell’esigenza di ripensare ciò che noi esseri umani siamo in grado di comprendere della realtà di cui facciamo parte. La rivoluzione della meccanica quantistica, che ancora oggi non cessa di stupirci, richiede un ripensamento

radicale delle nostre categorie concettuali, per evitare di ricadere nelle tentazioni deterministiche (è il caso del "superdeterminismo", una nuova classe di teorie che rilancia i parametri aggiuntivi ma è respinta da Aspect al punto da portarlo a dichiarare che, se fosse vera, deciderebbe di abbandonare per sempre la fisica), oppure dal lato opposto nel misticismo pseudoscientifico che nei paradossi della meccanica quantistica scorge la possibilità di far rientrare dalla finestra quella magia naturale che la rivoluzione scientifica aveva sbattuto fuori dalla porta. Nel suo *La biblioteca dei quanti* (il cui titolo originale è *The Rigor of Angels*), recentemente tradotto da Luiss University Press, William Egginton propone qualcosa del genere. Partendo da un confronto serrato tra le interpretazioni della meccanica quantistica, le opere di Jorge Luis Borges e la filosofia di Immanuel Kant, Egginton discute dei risultati di Alain Aspect sostenendo che "occorre pensare il paradosso in modo completamente diverso":

"Sì, nella vita di tutti i giorni Achille raggiunge la tartaruga e, sì, nella vita di tutti i giorni Diogene il Cinico può scacciare Zenone alzandosi in piedi e andando via. Ma la nostra vita di tutti i giorni non è una vita alla scala di Planck e alla velocità della luce. A livello quantistico uno ione di berillio non può cambiare il suo stato energetico mentre viene osservato (...). Per lo ione cambiare mentre viene osservato (...) richiederebbe che lo spazio-tempo fosse qualcosa di reale, qualcosa di indipendente, la cosa in cui avviene il cambiamento. Ma non è così. Non è altro che uno strumento per correlare le nostre osservazioni in tutto coerente"
(Egginton, 2025).

I paradossi della meccanica quantistica sono le antinomie kantiane. E Kant aveva pensato di risolvere le antinomie del nostro mondo dimostrando "che la condizione di possibilità di percepire qualsiasi cosa risiedeva nella nostra capacità innata di tradurre un caos altrimenti sconcertante di input sensibili in eventi ordinati nello spazio e nel tempo, le cui relazioni causali potevano essere stabilite oggettivamente", ma che al tempo stesso queste nostre categorie a priori, come Kant le battezzò, non possono essere verificate attraverso l'esperienza, cosicché sussiste una separazione radicale tra il modo in cui comprendiamo la realtà e la realtà *in sé*. E questa grande scoperta kantiana, la sua "rivoluzione copernicana", può aiutarci a dare senso al paradosso EPR:

"Come può una particella di una coppia in correlazione quantistica «dire» istantaneamente all'altra quale spin ha scelto, a prescindere dalla distanza che le separa? La risposta è semplice. Non può. L'elettrone non sa nulla; la particella non comunica nulla. Noi sì. Ma ciò che noi sappiamo in quel momento riguarda noi e basta. Non possiamo trasferire quella conoscenza altrove, se non attraverso la buona, vecchia comunicazione subliminale. Possiamo sapere che, siccome la nostra particella ha uno spin negativo, l'altra particella della coppia sarà misurata come spin positivo, ma finché non possiamo comunicarlo, questa conoscenza è irrilevante per la conoscenza del mondo (...). Solo gli dèi delle piccolissime e delle grandissime cose possono saperlo, e questi dèi non parlano"
(Egginton, 2025).

Che la realtà sia una questione di prospettiva, se non dal punto di vista dell'occhio di Dio (come talvolta dicono i fisici), è qualcosa che stiamo iniziando solo ora a comprendere. Per riuscirci occorre rinunciare a essere "come dèi", ed è una rinuncia che ci costa. Ma ce l'aveva già suggerito Umberto Eco chiudendo la sua opera prima, ricordandoci che ciò che possiamo conoscere della realtà non sono che i nomi. Se ci si consente di parafrasarlo, la meccanica quantistica ci insegna che *stat particulă pristina nomine, nomina nuda tenemus*.

l e t t u r e

- John Stewart Bell, *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica*, Adelphi, Milano, 2010.
- William Egginton, *La biblioteca dei quanti. Borges, Heisenberg, Kant e la natura ultima della realtà*, Luiss University Press, Roma, 2025.
- Albert Einstein, *Einstein secondo Einstein. Riflessioni autobiografiche e scientifiche*, a cura di Jurgen Renn e Hanoch Gutfreudn, Hoepli, Milano, 2022.
- Stanislaw Lem, *Solaris*, Sellerio, Palermo, 2013.

29 Maggio 2026