



Sven Ortolì e Jean-Pierre Pharabod

# METAFISICA QUANTISTICA

*I nuovi misteri dello Spazio e del Tempo*



# Le Navi

---

Titolo originale: *Métaphysique  
quantique*

© 2012, Éditions La Découverte, Parigi,  
Francia

Prima edizione digitale 2017  
© 2013 Lit Edizioni Srl

Castelvecchi è un marchio di Lit  
Edizioni

Sede operativa: Via Isonzo 34, 00198  
Roma

Tel. 06.8412007 - fax 06.85865742  
[www.castelvecchieditore.com](http://www.castelvecchieditore.com)  
[info@castelvecchieditore.com](mailto:info@castelvecchieditore.com)

Traduzione dal francese di David  
Santoro

ISBN: 9788868267063

---

Sven Ortoli  
Jean-Pierre Pharabod

METAFISICA  
QUANTISTICA

I nuovi misteri dello Spazio e  
del Tempo

C A S T E L V E C C H I

*A Bernard d'Espagnat, il primo in  
Francia a cogliere  
l'importanza fondamentale dei  
problemi  
di cui tratta questo libro*

# PRELUDIO

Il nostro mondo è quantistico. La prova? Guardatevi attorno, sopra una scrivania, ad esempio, dove troneggia un computer scintillante extrasottile dotato di un processore più rapido di Atalanta e di una scheda grafica da far

impallidire un miniaturista. L'apparecchio è collegato in wi-fi a una stampante nascosta altrove, a qualche metro di distanza. Non lontano dal pc uno smartphone all'ultima moda lampeggia discretamente; il suo proprietario non sa ancora servirsene del tutto, ma è felice di possederlo (un po' meno dopo aver tentato di decifrarne le istruzioni...). Nel cassetto un telecomando a infrarossi giace accanto a un lettore mp3, pronto a fornire riparo musicale da conversazioni troppo rumorose, open space *oblige*. Tutte cose che, appena accese, fanno piombare l'utente in un piacevole benessere. Tuttavia non è di questo che vogliamo parlare, ma di voi, di noi, dell'*Homo*

*quanticus* del Ventunesimo secolo. L'uomo che a partire dal Big Bang dell'informazione del secolo precedente non ha smesso di vedere la sua «infosfera» – termine coniato dal futurologo Alvin Toffler – gonfiarsi come un universo in espansione. Pensate alle dimensioni della bolla mentale che circonda un neonato: lo spazio medio oltre il quale generalmente non riceve più informazioni ha un'estensione pari all'incirca a qualche metro; una volta divenuto adulto, la bolla – la sua infosfera – comprende l'intero pianeta. Dalla sera alla mattina l'*Homo quanticus* riceve, analizza, scarta, conserva, ordina e invia un centinaio di messaggi. Modesto, ma decisivo

contributo ai trecento miliardi che circolano ogni giorno. Con un clic, mentale ancor prima che fisico, si sposta da Shanghai a New York e passa da un'e-mail in sospenso (due settimane di ritardo, un tempo geologico!) a un'asta su eBay che ha già attirato molti acquirenti.

Fate il confronto con il suo antenato del Rinascimento: nel corso della sua vita, che raramente superava un terzo della nostra, un contadino da quando nasceva a quando moriva non incontrava più di un centinaio di persone, oltre agli abitanti del suo villaggio. La sua geografia, come la sua storia, erano racchiuse nel raggio di una decina di

chilometri dal campanile del paese. Voci e messaggi gli giungevano in misura assai limitata, e nel migliore dei casi alla velocità di duecento chilometri al giorno – solo i potenti possedevano un cavallo – sempre ammesso che il suo villaggio si trovasse su una direttrice importante. Da una rete sociale all'altra, l'*Homo quanticus* ha smesso di contare i suoi «amici». A partire dall'invenzione del telegrafo ottico (Chappe, 1791) e di quello elettrico (Morse, 1832), i messaggi gli giungono approssimativamente alla velocità della luce, ma soprattutto sono passati da una modalità di diffusione gerarchica, piramidale, a una rete fatta di maglie, sia verticali che orizzontali, i cui nodi sono

mobili. Insomma la geometria non è più la stessa, per quanto riguarda sia la diffusione di notizie e di voci che le modalità di incontro.

*L'Homo quanticus* si installa in permanenza nello spazio e nel tempo. E vi si installa proprio grazie a quegli oggetti *high tech* che lo circondano e ne costituiscono un prolungamento, e che è opportuno osservare, anche se solo sommariamente, con l'occhio del filosofo abituato a interrogarsi sulla natura delle cose: cosa hanno essi in comune?

In primo luogo, presentano un'estensione nello spazio reale – un cellulare, ad esempio, misura otto

centimetri di lunghezza per cinque di larghezza e mezzo di spessore – e virtuale – conferiscono al loro possessore il dono dell'ubiquità.

In secondo luogo, sono stabili. Salvo casi di paranoia galoppante, nessuno si aspetta di vederli esplodere, disintegrarsi o sparire con un sibilo che ne indichi il passaggio a una quarta (o nona) dimensione – malgrado alcuni di noi possano ipotizzarlo: «Ma se lo avevo messo proprio qui!»; ovviamente, in questo preciso caso tutti (ri)diventiamo animisti e ci vediamo non l'effetto della nostra distrazione, ma della malevolenza: oggetti inanimati, non avrete per caso un'anima? Sì, a

quanto pare, e infida!

In terzo luogo, tutti questi oggetti sono individualizzati e anche se il vostro collega di fronte possiede uno smartphone simile (in realtà vi ha spiegato con calcolata indifferenza che il suo è il nuovo modello dotato di 4D), il vostro è graffiato (ringraziate i vostri pargoli!) e contiene tante di quelle informazioni su di voi che lo riconoscereste da un altro a colpo sicuro.

Alcuni potrebbero obiettare che queste proprietà sono anche quelle del primo oggetto che si trova in un ufficio, dal foglio di carta A4 al «Fujiyama in primavera» (una delle tante boules-à-

neige collezionate da un collega).

Ma la somiglianza cessa con il punto seguente.

In quarto luogo, basta esaminare in profondità questi oggetti per constatare che ognuna delle nostre micromacchine, dal computer al «bip» dell'automobile, è frutto delle tecnologie derivate dai semiconduttori o dai laser. Di conseguenza esse sono eredi in linea diretta di quella parte della fisica detta «meccanica quantistica», che contribuisce al Pil dei Paesi industrializzati in misura che varia tra il 5% e il 10%.

Il nostro rapporto con il mondo è

talmente cambiato che oggi noi siamo diversi dagli uomini e dalle donne esistiti prima di Internet. Con l'arrivo del 2000 si è finalmente prodotta una cesura che non era solo simbolica, ma che si è tradotta, e oggi ce ne rendiamo conto, in un uso diverso della realtà. Si tratta della proiezione nello spazio e nel tempo attraverso strumenti che comprimono l'uno e l'altro – da Google Earth a Skype; del rapporto con gli altri attraverso i social network – da Craigslist a Facebook; del modo di ragionare e del metodo di ricerca delle informazioni, per parole chiave o a volte per immagini, e attraverso un'iterazione continuamente riproposta che, come il Pifferaio di Hamelin, conduce verso

orizzonti inattesi. Senza contare la sovrabbondanza di informazioni propria della nostra epoca.

Tutto ciò viene mediatizzato da delle macchine nate da uno strano corpus scientifico, quello della meccanica quantistica. Un corpus i cui oggetti ultimi sono entità matematiche astratte, grosso modo *bosoni* e *fermioni*, che vengono manipolati in spazi di Fock (sui quali manterremo una certa discrezione) mediante operatori di creazione e distruzione (che, a loro volta, non ci renderanno più loquaci). Ora, questi oggetti ultimi possiedono delle proprietà davvero sconcertanti: prima di tutte, la non località, quel misterioso fenomeno

che i fisici chiamano «intricazione» (o *entanglement*) il cui risultato tangibile è quello di legare due particelle – fotoni, atomi o elettroni – in modo tale che un'azione esercitata sull'una comporta istantaneamente un'azione sull'altra; anche se sono separate da anni luce di distanza! Subito dopo troviamo l'atemporalità, ossia l'appartenenza a una realtà non localizzabile nel tempo né nello spazio!

Alcune delle loro proprietà sono talmente stupefacenti che per cercare di spiegarle alcuni fisici non esitano a lanciarsi arditamente lungo sentieri inesplorati. Per giustificare ad esempio il fatto che gli oggetti quantistici –

elettroni o fotoni, atomi o molecole – siano descritti in termini di sovrapposizione di stati (un capitolo di questo libro è dedicato a questo delicato concetto), studiosi come David Deutsch ipotizzano che il nostro mondo non cessi di svilupparsi in diramazioni, che generano a loro volta altre diramazioni, nelle quali altri noi stessi vivono ognuno la propria esistenza. Irritante per alcuni, stimolante per altri, questa ipotesi evidenzia, in modo caratteristico, l'origine matematica dei trionfi della tecnologia moderna da cui scaturiscono domande vertiginose che a buon diritto possono essere definite «metafisiche».

Non è del tutto sorprendente: una

teoria scientifica non si riduce a un formalismo matematico, ma dipende anche dall'ontologia che postula, ossia dal suo modo di descrivere la realtà fisica e di rendere conto di un'esperienza. Per citare un esempio famoso, nel formulare la legge di gravità Isaac Newton ha fatto l'ontologia di un'azione a distanza istantanea, mediante una forza. Il concetto, come è noto, avrebbe avuto grande successo: da quella forza sarebbe nata la meccanica classica, con i suoi pesi e le sue masse, le sue attrazioni e repulsioni, e con essa l'universo mentale e il crogiolo culturale in cui si sarebbero fusi equazioni, esperienze e accessori che avrebbero costituito la base della

rivoluzione industriale e dei tempi moderni. Lo scopo di questo libro è proprio quello di esplorare le stranezze ontologiche della meccanica quantistica scommettendo sul fatto che è qui, in questo universo mentale in costruzione, che risiede il nostro futuro.

Perché se la prima rivoluzione quantistica, quella del Ventesimo secolo, ci aveva fornito in qualche modo le regole del gioco di un mondo al quale non possiamo accedere direttamente – quello degli atomi – lo aveva fatto a prezzo di un pragmatismo senza concessioni: funziona, cosa volete di più?

Guardate i computer, la

superconduttività, la superfluidità o la magnetoresistenza gigante, guardate cosa siamo capaci di fare!

Solo che ora fa capolino la seconda rivoluzione quantistica, e stavolta non si tratta d'altro se non dell'utilizzo tecnologico diretto dei concetti più singolari della teoria: non località (con la crittografia quantistica o il «teletrasporto»), mondi multipli (con il computer quantistico) e perché no – senza che ciò autorizzi il viaggio nel tempo – l'intervento nel passato (con la «gomma quantistica»). Si può dire che non possiamo essere avari di domande sui fondamentali di questa teoria. A cominciare, prima di tutto, da quella

dell'*entanglement*, che lega oggetti e sistemi, come se lo spazio fosse abolito e di cui il fisico Alain Aspect, uno dei personaggi chiave di questa storia, ha scritto nel 2007: «Grazie alle idee elaborate da Albert Einstein e John Bell l'*entanglement* ci porta alle soglie della seconda rivoluzione [...] e ci permette di guardare più profondamente nel cuore dei grandi misteri quantistici»<sup>1</sup>.

# 1. I FANTASMI DELLA MATERIA

## **Guerra fredda e vascelli fantasma**

Non sfuggirà al lettore che il sottomarino e la particella hanno in comune il fatto che non se ne scorge traccia una volta che siano stati inviati

in missione. E quando vengono individuati cambiano entrambi comportamento; la somiglianza finisce qui. Ma, per illustrare una delle esperienze più stupefacenti della fisica, oltre che una delle più ricche, può essere utile fare una deviazione nelle profondità degli oceani prima di tentare di tuffarci in un mondo non meno abissale, quello delle fenditure di Young.

I sottomarini russi della flotta del nord sono sottoposti, come è noto, a una sorveglianza il più stretta possibile da parte delle forze della Nato. Al momento di salpare da una base della penisola di Kola per essi è quasi

impossibile sfuggire a uno dei molteplici sguardi che li spiano tutti i giorni: informatori sui moli, autentici falsi pescherecci norvegesi che battono il mare di Barents, aerei da ricognizione nel cielo, senza contare, a quattrocento km di altezza i satelliti Big Bird. Ma per questi sottomarini portatori di morte il grande gioco a nascondino con l'avversario comincia più tardi, quando, approfittando del rumore delle navi di superficie che li hanno accompagnati fino alla zona di immersione, i mostruosi capodogli d'acciaio si dileguano sott'acqua.

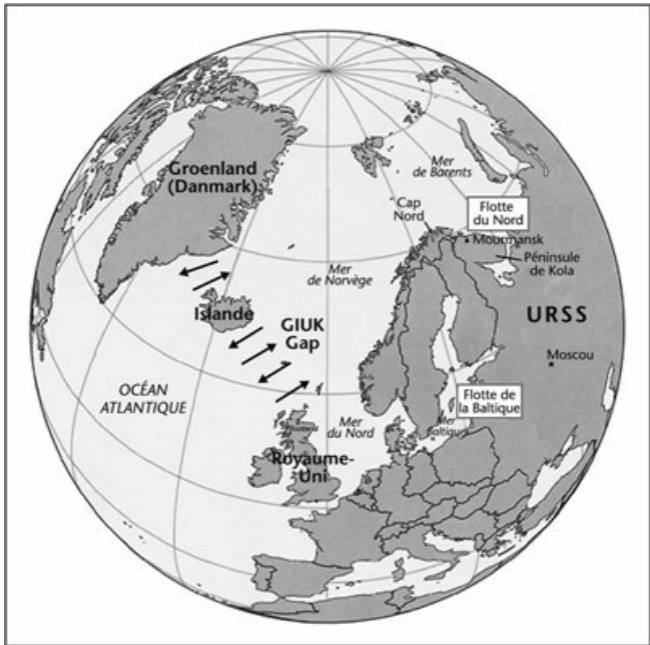


Figura 1. Il varco GIUK (Groenlandia, Islanda, Regno Unito).

Un sottomarino russo ha due possibili

strade per raggiungere la sua zona di pattugliamento nell'Atlantico del nord. O si nasconde da qualche parte lungo i trecento km dello stretto che separa la Groenlandia dall'Islanda (Graenlandssund, per gli islandesi), oppure tenta di attraversare la vasta distesa (800 km) che va dall'Islanda alla Scozia, più o meno nei pressi delle isole Faroe. Ovviamente è in questa zona che si concentrano la ricerca e la lotta antisottomarini dell'Alleanza atlantica.

Se il sottomarino viene individuato e si ostina a raggiungere la zona assegnatagli, lo farà sotto la scorta più o meno discreta di una squadra di cacciatorpediniere. La sua missione sarà

fallita, dato che le sentinelle sono riuscite a rintracciare il suo tragitto da una parte o dall'altra dell'Islanda. Se al contrario il sottomarino riesce a passare inavvertito, nessuno saprà niente della sua rotta. In seguito, se affiora in superficie a largo delle coste americane le sentinelle depistate avranno la dimostrazione del fatto che la preda è sfuggita alla loro sorveglianza. Forse gli avranno attribuito una probabilità del 31% di essere passato a sinistra e del 69% di essere passato a destra, ma in nessun caso avranno immaginato che il sottomarino sia passato simultaneamente da una parte e dall'altra dell'Islanda. È inconcepibile che il sottomarino si sdoppi in due vascelli fantasma

sommersi per ricostituirsi poi da qualche parte in pieno Atlantico del nord, e che prima di questa resurrezione sia passato per quella che potremmo chiamare la sovrapposizione di due stati, lo stato «Graenlandssund» e lo stato «Faroe».

Eppure è quel che accade se al sottomarino sostituiamo una particella di luce (un fotone) o di materia (elettrone, protone, neutrone, eccetera), o anche un banale atomo cui si offra la possibilità di imboccare se non uno dei due «canali» da una parte e dall'altra dell'Islanda, almeno una delle due fenditure dell'esperimento di Young.

Young era un medico inglese di

talento, appassionato di lingue antiche ed esotiche – venne battuto sul filo di lana da Champollion nella decifrazione della stele di Rosetta – e di scienze. Nel 1803 realizzò per la prima volta l'esperimento che porta il suo nome. All'epoca egli lo aveva effettuato con la luce, ossia dei fotoni, ma nel secolo scorso è stato ripetuto con degli elettroni, dei neutroni e perfino con degli atomi. Eccone una descrizione ripresa da un nostro libro precedente<sup>2</sup>.

## **L'esperimento di Young, portatore di una nuova visione del mondo**

Un tiratore, bendato, si esercita alla carabina sparando contro un muro di

pietra nel quale sono state praticate due aperture verticali identiche, molto strette e abbastanza ravvicinate; il tiratore si trova a uguale distanza da tali aperture. Dietro questo primo muro ce n'è un secondo, disposto parallelamente a esso e di legno liscio, che trattiene le pallottole che hanno superato il primo ostacolo e sul quale si vedono chiaramente gli effetti dei successivi impatti. La maggior parte delle pallottole vengono fermate dal primo muro, alcune attraversano la prima fenditura direttamente o rimbalzando su uno dei suoi bordi, altre ancora fanno altrettanto con la seconda fenditura. L'accumulazione degli impatti sul secondo muro dopo, ad esempio, un

milione di tiri permette tracciare una curva che indica il numero di impatti per unità di superficie. Per i nostri scopi il secondo muro viene sostituito da uno nuovo, sempre di legno, e la fenditura sinistra del primo muro viene chiusa. Il tiratore ripete il suo esercizio un milione di volte. Poi la fenditura sinistra viene riaperta e quella destra chiusa; il tiratore effettua ancora un milione di tiri. Alla fine, si ottiene la stessa curva del primo esperimento: essa è la somma di quella ottenuta con la prima fenditura chiusa e di quella ottenuta con la seconda fenditura chiusa. In altre parole, la probabilità che una pallottola colpisca un determinato punto del secondo muro quando le due fenditure sono aperte è la

somma delle probabilità che ciò avvenga quando l'una o l'altra fenditura è chiusa, risultato che possiamo riassumere con la formula  $P = P_1 + P_2$ .

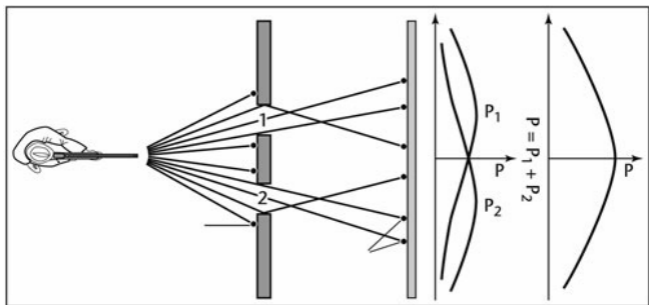


Figura 2.

Nell'esperienza delle fenditure di Young il tiratore viene sostituito da una fonte luminosa monocromatica, ossia viene emessa una luce di lunghezza

d'onda fissa e precisa. Al posto del muro (e molto più vicino alla fonte) si utilizza uno schermo solcato da due fenditure verticali ( $F_1$  e  $F_2$ ) e una lastra fotografica prende il posto del secondo muro (in realtà Young aveva usato un dispositivo equivalente alle due fenditure, ma diverso, e ovviamente un semplice schermo al posto della lastra fotografica). Se si attiva la fonte per un tempo sufficiente a impressionare la lastra, ma non tale da sovraesporla, si osserverà su di essa un'alternanza di bande verticali più o meno chiare o scure, che permettono di tracciare una curva relativa all'intensità della luce che colpisce la lastra: è il fenomeno delle *interferenze*.

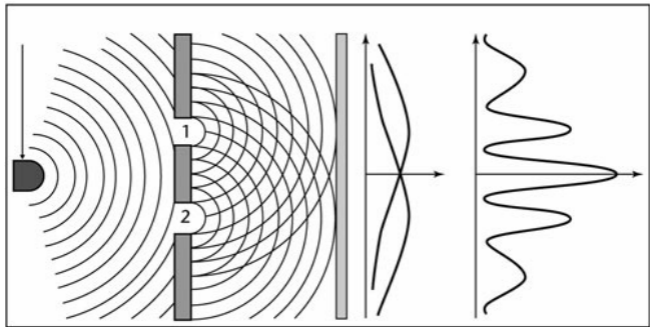


Figura 3.

Ma se ora cambiamo la lastra e ostruiamo alternativamente la fenditura  $F_1$  e la  $F_2$ , otteniamo due curve la cui somma non restituisce la curva iniziale. Per passare dalle curve relative all'apertura di una sola fenditura alla curva complessiva corrispondente all'apertura di entrambe bisogna applicare una formula matematica più

complicata di una semplice somma: l'intensità complessiva è la somma delle intensità parziali aumentata di un valore che varia tra più due volte e meno due volte la radice quadrata del prodotto delle intensità. È il carattere ondulatorio della luce che porta a questo risultato.

Tuttavia, a partire dal 1905 (l'anno dei quanti di luce di Einstein) sappiamo che la luce è composta da fotoni, spesso rappresentati sotto forma di corpuscoli. Le eventuali collisioni o interazioni tra le miriadi di fotoni che compongono la luce sono responsabili di questo fenomeno delle interferenze? Per saperlo basta emettere i fotoni uno a uno. Lo si può fare, ad esempio,

riducendo a sufficienza l'intensità della fonte. Si constata allora che i fotoni producono ognuno un impatto quasi puntuale ben localizzato sulla lastra fotografica: prova incontestabile della loro natura corpuscolare. Tuttavia, se le due fenditure sono aperte, l'accumulazione degli impatti al termine di un periodo di tempo molto lungo riprodurrà la figura delle interferenze!

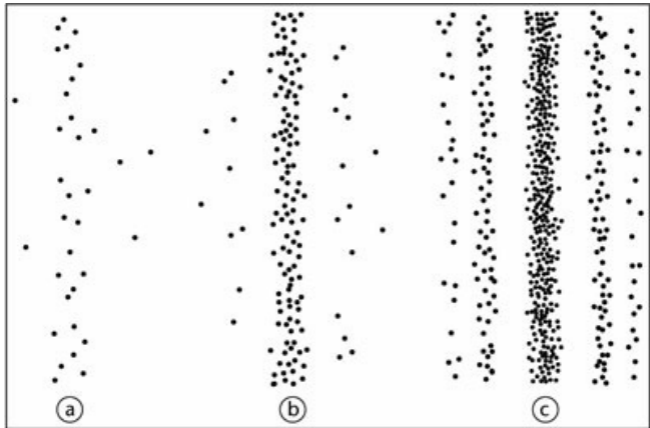


Figura 4.

In altre parole, un fotone non si comporta allo stesso modo se una sola fenditura è aperta o se lo sono entrambe, il che è incompatibile con l'idea di un corpuscolo che passi attraverso una sola fenditura per volta. Bisogna ammettere che può passare per entrambe al tempo

stesso e viaggiare nella sovrapposizione di due stati, e riconoscere, d'accordo con il grande teorico della fisica Paul Dirac che nell'esperimento delle fenditure di Young «un fotone non interferisce che con se stesso» (in altri tipi di esperimenti è possibile far interferire tra loro più fotoni, ma questa è un'altra storia).

## **Sulla sovrapposizione degli stati in generale e sulle fenditure di Young in particolare**

Questa interferenza con se stesso, negli esperimenti del tipo delle fenditure di Young è stata verificata anche per gli elettroni, i neutroni e gli stessi atomi.

Quindi, per andare dalla fonte alla destinazione finale i granelli di luce, le particelle elementari di materia e perfino i conglomerati di particelle che sono gli atomi, viaggiano in una sovrapposizione di stati « $F_1$ » e « $F_2$ » prima di riassemblarsi al loro arrivo. Ciò assesta un duro colpo a molte delle nostre immagini classiche, per esempio a quella delle particelle come minuscole palline, e ancor più a quella dell'atomo come microsistema planetario. In realtà non è che certi neutroni, protoni ed elettroni passino per  $F_1$  e gli altri per  $F_2$  prima di raggrupparsi per non si sa quale miracolo combinatorio. Sono piuttosto due fantasmi completi dell'atomo che viaggiano in parallelo e

si concretizzano in un solo atomo reale all'arrivo. La verifica di questa ipotesi è stata ripetuta più volte: dei fisici giapponesi, per citare un esempio, hanno raffreddato con il laser degli atomi di neon<sup>3</sup> fino a un millesimo di grado sopra lo zero assoluto, poi li hanno lasciati cadere su una lastra attraversata da due fenditure parallele, larghe due micron e distanti tra loro sei micron, e hanno potuto osservare la formazione progressiva di frange d'interferenza<sup>4</sup>.

Esperienze analoghe sono state realizzate in seguito con dei fullereni, molecole formate da sessanta atomi di carbonio. Conclusione: tutti gli oggetti quantistici, che siano fotoni, elettroni,

protoni, neutroni, atomi o molecole possono benissimo imboccare due strade simultaneamente venendosi a trovare in quella che viene definita sovrapposizione di due stati. Quest'ultima costituisce un pilastro della meccanica quantistica. Un oggetto quantistico può trovarsi in un solo stato quantistico o in una sovrapposizione di due, tre, quattro o di un'infinità di tali stati. Tali stati non sono solo la sua posizione o velocità, ma possono essere più specificamente propri della meccanica quantistica, come il suo spin<sup>5</sup> o, per il fotone, la sua polarizzazione.

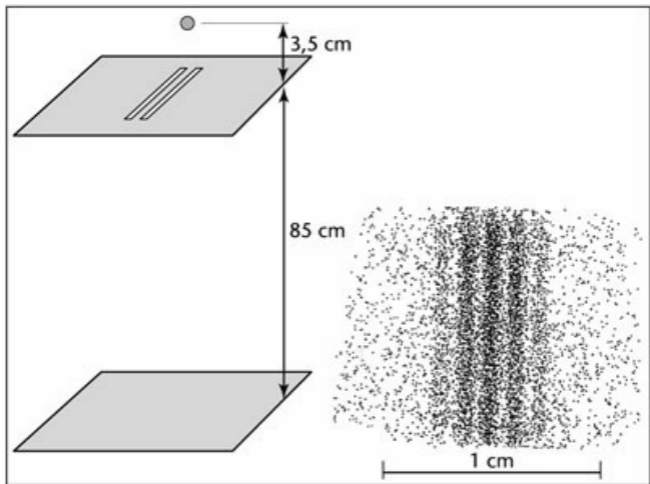


Figura 5. La figura si riferisce a un esperimento perfezionato, realizzato da F. Shimizu, K. Shimizu e H. Takuma dopo la pubblicazione del loro articolo.

In verità, l'oggetto quantistico – entità bizzarra e astratta che verso il 1970 l'epistemologo argentino Mario Bunge

aveva proposto di indicare col nome di *quanton*, purtroppo con scarso successo – non ha equivalenti nel mondo che ci circonda. Non era così per gli oggetti abituali della fisica prima dell'elaborazione della meccanica quantistica. Fino ad allora la fisica disponeva complessivamente di due solidi modelli, corredati di metafore inossidabili per descrivere i fondamenti dell'universo: i corpuscoli – che fanno subito pensare a delle minuscole palline – e le onde – che rimandano alle immagini dei movimenti o delle increspature dell'acqua. La rivalità tra questi due modelli non è mai venuta meno da quando nel Diciassettesimo secolo l'olandese Christiaan Huygens e

l'inglese Isaac Newton hanno discusso della natura ondulatoria (Huygens) o corpuscolare (Newton) della luce. All'epoca le idee di Huygens non reggevano il confronto con l'immenso prestigio dello scopritore della gravitazione universale e l'ipotesi corpuscolare godeva del favore generale. Ma nel 1802 la tendenza si inverte – Newton era ormai morto da tre quarti di secolo – quando il giovane Thomas Young dimostra attraverso il suo celebre esperimento che la luce è un fenomeno ondulatorio. I fisici tardano un po' a reagire ma un decennio più tardi, in particolare grazie a François Arago e Augustin Fresnel, il modello dell'onda luminosa diviene dominante. Questa

situazione dura fino agli inizi del Ventesimo secolo, quando Einstein introduce, nel 1905, il suo *quanto di luce* (ribattezzato *fotone* nel 1926). Nel 1913 il danese Niels Bohr quantifica le orbite degli elettroni intorno al nucleo atomico. Dieci anni più tardi Louis de Broglie avanza l'ipotesi secondo cui se la luce presenta un aspetto corpuscolare la materia deve a sua volta presentare un aspetto ondulatorio. Il tedesco Werner Heisenberg, e poi l'austriaco Erwin Schrödinger, nel 1925 e nel 1926, gettano le basi della meccanica quantistica. Questa volta non c'è più spazio per le immagini classiche: né il fotone, né l'elettrone, né il protone o l'atomo possono più essere considerati

come onde o corpuscoli, ma vanno pensati come entità ben più strane. Non si smetterà più di studiarli fino ai nostri giorni ricorrendo a esperimenti ingegnosi che per la maggior parte sono in realtà degli avatar delle fenditure di Young.

## **Dove la semplice possibilità di un'informazione cambia il problema**

Se un sottomarino che viaggia dal mare di Barents agli Stati Uniti viene individuato nel Graenlandssund, si è certi che non si trova tra la Scozia e l'Islanda, e viceversa. A dire il vero già prima che avvenga una qualsiasi individuazione si sa che esso non

procederà allo stesso tempo lungo entrambi i percorsi. Ma cosa accade a una particella di cui è stato dimostrato il passaggio simultaneo attraverso le due fenditure di Young? Il fatto è ben noto ai fisici: se la particella viene individuata su uno dei due percorsi possibili prima che raggiunga lo schermo o la lastra fotografica, le interferenze spariscono. Perché?

Heisenberg ha spiegato questo enigma mediante il suo *principio di indeterminazione*. Nel 1927 egli ha dimostrato che non si poteva conoscere simultaneamente la posizione e la velocità di una particella con una precisione infinita. Più esattamente, se

indichiamo con  $\Delta x$  l'incertezza relativa alla posizione della particella e con  $\Delta p$  l'incertezza sul suo momento (ossia il prodotto della sua massa per la sua velocità) il prodotto  $\Delta x \cdot \Delta p$  è sempre superiore o uguale al *quanto d'azione*<sup>6</sup> di Planck diviso per  $4\pi$ ; è quella che viene chiamata «relazione di Heisenberg». Per sapere quale strada ha imboccato la particella, dice il fisico, basta dirigere un fascio di luce a lunghezza d'onda corta subito dopo il piano su cui si trovano le fenditure e parallelamente a esso.

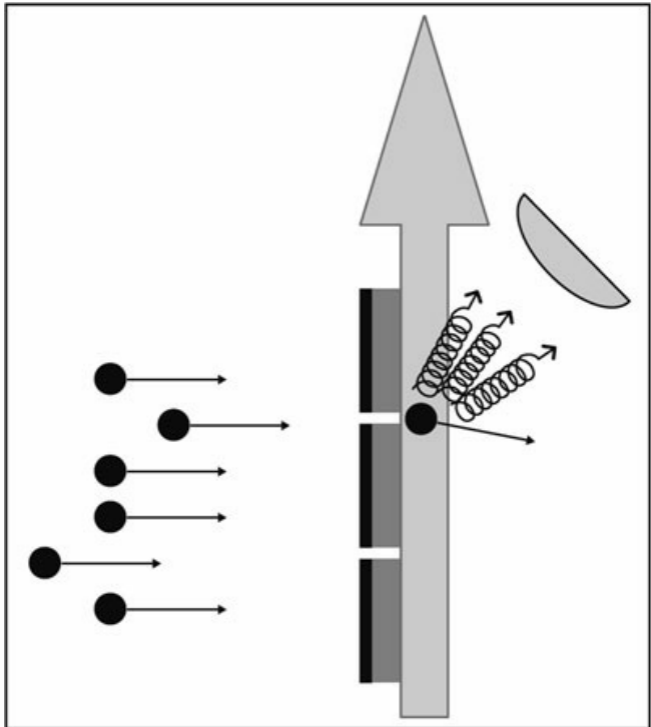


Figura 6. Tratta da: Serge Haroche e Jean-Michel Raimond, *Exploring the Quantum*,

Oxford University Press, New York, 2006,  
fig. 2.3.

Il fascio colpisce la particella quando esce dalla fenditura inferiore, o da quella superiore. Nel punto di incontro si produce una dispersione di luce, che è possibile rilevare. Ma a partire dalla relazione di Heisenberg si può dimostrare che la traiettoria della particella viene disturbata in misura sufficiente affinché, statisticamente, le interferenze spariscono<sup>7</sup>. Il che, dopo tutto, non è poi tanto strano: se si volesse misurare la traiettoria di un pallone da calcio tirandogli contro delle palle di caucciù, è facile immaginare che essa subirebbe delle deviazioni.

Ma non è così semplice. Se si utilizzano degli atomi, particelle abbastanza pesanti da non essere deviate, se ne può «marcare» il percorso modificando lo stato di un elettrone esterno al nucleo atomico. La traiettoria non viene modificata, eppure le interferenze cessano<sup>8</sup>. La spiegazione di Heisenberg è quindi insufficiente. In realtà non si tratta di una questione di energia ma d'informazione. Basta sapere che la particella è passata per questo o quel percorso perché le interferenze spariscono. Questo effetto, confermato dall'esperimento di Dürr, Nonn e Rempe, ma già noto grazie a esperimenti di interferometria dei neutroni, è uno dei più sottili e stupefacenti della meccanica

quantistica.

## 2. GLI UCCELLI-PESCI

## **Dalle parti di Escher**

Il sesto pianeta in orbita attorno a Fomalhaut, graziosa stella della costellazione del Pesce australe, possiede una caratteristica che potrebbe

trasformarlo, nel bene e nel male, nella destinazione preferita degli amanti dei quattro angoli della galassia: un fiume strano e magnifico. I suoi abitanti lo hanno battezzato Eraclito in omaggio a una personalità estrosa, e nota presso di loro per il celebre aforisma secondo cui non si ha mai l'occasione di farsi due volte una prima impressione<sup>9</sup>.

Il fiume Eraclito scorre maestoso nello spaziotempo, come nessun altro fiume, praticamente immenso, più ampio delle foci riunite dello Yangzi e del Mississippi. Inoltre, è talmente tumultuoso che uno strato di spruzzi e vapori d'acqua si alza in permanenza fino a cento metri al di sopra dei flutti. Chiunque osservi, dall'una o dall'altra

riva, lo spettacolo familiare dell'Eraclito non vede altro che questo manto lanuginoso dal quale si levano a volte i richiami delle creature che abitano il territorio – note acute che emergono dal frastuono delle acque – senza che si sappia con esattezza se provengono dal mondo aereo o da quello acquatico. Su una riva e sull'altra del fiume, ognuno ha la sua opinione. Su quella occidentale i cacciatori hanno l'abitudine di salpare in canoa, gli archi a portata di mano sul banco del rematore, all'inseguimento delle prede che dovessero comparire, bagliori bianchi tra le brume candide. Dimostrando un'abilità incredibile, tirano a casaccio basandosi, assicurano,

sul rumore delle loro ali. La selvaggina catturata, a loro detta, appartiene senza dubbio al mondo aereo, come testimoniano le piume delle loro prede, il becco, le ali ben delineate.



Figura 7. M.C. Escher, *Sky and Water 2*, 1938, © Cordon Art-Baarn-the Netherlands.

Sulla riva orientale i pescatori vanno con la loro flottiglia a gettare le reti, ripescandone spesso creature guizzanti dalle squame, essi giurano, dai colori incomparabili, e le cui branchie palpitano con violenza al contatto con l'aria. Prova evidente, dicono con condiscendenza, che non le si potrebbero confondere con dei volatili.

Da una parte e dall'altra del fiume, le due tribù non si amano, ma in genere si ignorano, per via del fatto che si incontrano raramente, fatta eccezione per una catena di isolotti che fa da zona franca dove si esercita il baratto.

Fu naturalmente su uno di quegli isolotti che una giovane cacciatrice occidentale si innamorò, ricambiata, di un pescatore orientale. Essi si incontravano discretamente, avvolti nel manto protettivo della bruma. L'uno insegnava all'altra i segreti della sua arte. Il pescatore si mise a cacciare, la cacciatrice a pescare. Ma cambiare le abitudini era difficile e accadeva che il cacciatore puntasse l'arco verso il fondo del fiume, e che la cacciatrice lanciasse la sua rete verso il cielo. La cosa curiosa, come essi notarono, era che ciò non impediva loro di catturare dei pesci con la rete e degli uccelli con l'arco. Mistero del quale ben si guardarono di parlare alle rispettive famiglie, per

timore di vedere scoperta la loro relazione.

## **L'idea di complementarità**

I misteriosi animali di questo racconto non possono essere descritti se non quando vengono catturati e la loro natura dipende dallo strumento che serve a catturarli. Allo stesso modo, le entità quantistiche non possono essere descritte se non quando vengono sottoposte a un tipo di esperimento che le costringe a manifestarsi sotto forma di corpuscoli, o a un altro tipo di esperimento che le obbliga ad apparire sotto forma di onda. È una delle ragioni che hanno portato Niels Bohr a

enunciare nel 1927 il suo *principio di complementarità*, che ha poi precisato nel 1931 nell'introduzione a una raccolta di testi:

Il postulato fondamentale dell'indivisibilità del quanto d'azione [...] ci obbliga, per via della connessione tra i fenomeni e la loro osservazione, ad adottare un nuovo modo di descrizione, designato come complementare, nel senso che ogni applicazione di concetti classici preclude l'uso simultaneo di altri concetti classici che in una diversa connessione sono ugualmente necessari per la spiegazione del fenomeno<sup>10</sup>.

Quest'idea di complementarità si applica agli aspetti ondulatori e corpuscolari dell'oggetto quantistico,

ma non solo; ad esempio essa riguarda anche la posizione e la velocità di un tale oggetto in movimento (se la sua posizione è perfettamente nota, non è possibile dire nulla circa la sua velocità, e viceversa). E come osserva Bernard d'Espagnat, Bohr non parla di «due descrizioni [...] parziali ma non antagoniste»<sup>11</sup>, bensì di una complementarità conflittuale.

In questo principio apparentemente banale si cela in realtà una miniera di sottigliezza. Esso sottolinea il legame fondamentale che unisce la meccanica quantistica e il concetto di informazione (così come definito alla fine del capitolo precedente).

Ecco cosa dicono due attenti studiosi della stranezza quantistica:

Possiamo dire che gli aspetti ondulatori e corpuscolari delle particelle di materia o di luce sono complementari. La natura ondulatoria delle particelle si manifesta se il dispositivo sperimentale non ci permette di misurarne le posizioni. Al contrario, la loro natura corpuscolare si rivela se si effettua una misurazione della posizione o se si acquisiscono informazioni sul percorso della particella. Non è neppure necessario registrare tali informazioni. Il semplice fatto che un dispositivo di interferometria sia stato modificato in modo da rendere tali informazioni disponibili è sufficiente a distruggere l'interferenza e a rivelare l'aspetto corpuscolare delle particelle<sup>12</sup>.

Poco importa dove navighi il sottomarino quantistico: il lancio di boe sonar passive su uno dei suoi possibili percorsi ne altera definitivamente il comportamento.

## **Dove si invita il lettore a una breve lezione di interferometria**

Perché due fantasmi di fotone, o meglio una successione di coppie di fantasmi, provocano, al riunirsi, frange di interferenza, ossia, approssimativamente, delle bande verticali equidistanti in alcune delle si accumulano i fotoni, mentre le altre sono praticamente vuote? Per rispondere a questa domanda, esaminiamo un

dispositivo di fenditure di Young con una fonte S, due fenditure  $F_1$  e  $F_2$ , un primo fotone che si materializza sulla lastra in un punto A ubicato orizzontalmente rispetto a S, a uguale distanza da  $F_1$  e  $F_2$ , e un secondo fotone che si materializza più in alto, in un punto B nettamente più vicino a  $F_1$  che a  $F_2$ .

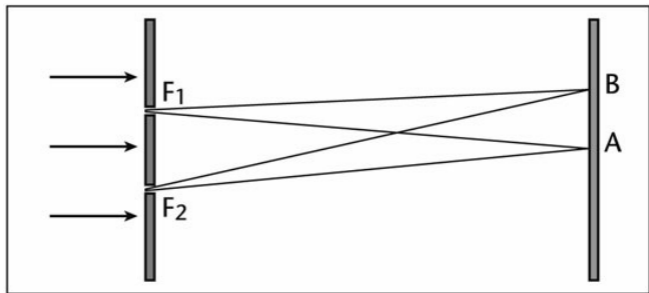


Figura 8.

In prima approssimazione, a partire da un'idea di Louis de Broglie relativa alle particelle di materia, descriviamo il fotone mediante un semplice *numero complesso*, utilizzando l'immagine di un orologio; la lunghezza della lancetta è il *modulo* del numero complesso, e l'angolo che essa forma con una direzione fissa, ad esempio quella delle ore 3, è la sua *fase*. La lancetta compie  $\nu$  giri completi al secondo, dove  $\nu$  è la frequenza della luce utilizzata.

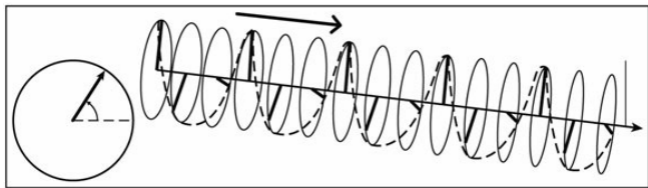


Figura 9. Tratta da due figure del box *L'idée*

*de Louis de Broglie*, in Jean-Pierre  
Pharabod e Bernard Pire, *Le Rêve des  
physiciens*, Odile Jacob, Parigi, 1993.

Per ragioni di simmetria il primo fotone, che arriva ad A, considererà che le lancette dei due fotoni fantasma avranno girato nella stessa misura. I due fantasmi non sono *sfasati* e producono a colpo sicuro un fotone reale sulla lastra.

Ma per il secondo, che arriva a B, i percorsi dei fantasmi non sono simmetrici a partire da  $F_1$  e  $F_2$ , il secondo fantasma ha un percorso un po' più lungo, la sua lancetta gira di più, e si verifica uno sfasamento  $\varphi$  tra i due fantasmi. Se  $\varphi$  è uguale a  $180^\circ$  o a  $180^\circ$  più (o meno) un multiplo qualsiasi di

$360^\circ$ , i due fantasmi si annullano, e sulla lastra non compare nessun fotone reale. Infatti la probabilità che un fotone reale compaia sulla lastra è pari al quadrato del coseno di  $\varphi/2$ .

Oltre a questo fenomeno legato allo sfasamento, si osserva una riduzione dell'intensità delle frange di accumulazione a partire da un massimo situato al centro (in A; si veda la Figura 8). Ciò deriva da una parte da un fenomeno di diffrazione durante il passaggio attraverso le fenditure, dall'altra da un'attenuazione dell'onda dovuta alla maggiore distanza percorsa.

La maggior parte degli esperimenti nel campo dell'ottica quantistica

attualmente utilizzano gli interferometri di Mach-Zehnder, anziché le fenditure di Young. Questo dispositivo è più facile da impiegare, consente una maggiore varietà di esperimenti e fornisce risultati più facili da interpretare, ma il principio è lo stesso.

Sono stati due Ludwig, Mach e Zehnder, a inventare nei primi anni Novanta dell'Ottocento l'interferometro che porta il loro nome. Come il dispositivo di Young, un interferometro usa una *fonte* (luminosa nel Diciannovesimo secolo, ma che oggi può essere costituita anche da particelle elementari, atomi o molecole), un *separatore* (le fenditure) e un *rilevatore*

(lo schermo, la lastra fotografica). È così anche per un Mach-Zehnder, tenendo presente che nel caso dei fotoni i separatori possono essere degli specchi semitrasparenti, e i rilevatori delle cellule fotoelettriche.

Supponiamo che un fotone venga inviato orizzontalmente su uno specchio semitrasparente inclinato a  $-45^\circ$ , la cui superficie riflettente sia rivolta verso la fonte. Secondo il buon senso, e anche secondo la fisica *locale* di Einstein (secondo cui non si può esercitare un effetto da un punto a un altro a una velocità superiore a quella della luce), esso avrebbe una possibilità su due di proseguire nella stessa direzione senza subire modifiche e una su due di venire

riflesso verso il basso. Chiamiamo questo fotone Ludwig; se passa (zero modifiche) resta nello stato Zero (o «Zehnder»), e viene captato dal rilevatore Z; se invece viene riflesso, dal lato «anteriore» dello specchio, subisce uno sfasamento di  $180^\circ$  e viene pertanto modificato, diciamo allora che entra nello stato «Modificato» (o Mach), e verrà captato dal rilevatore M (se il lato riflettente fosse stato rivolto nell'altra direzione, il fotone si sarebbe riflesso sul lato «posteriore» del separatore, e non avrebbe subito lo sfasamento). Se si emette una quantità rilevante di fotoni uno alla volta, si constaterà che in media uno su due atterra sul rilevatore Z, e uno su due sul

rilevatore M. Il buon senso e Einstein sembrano avere ragione.

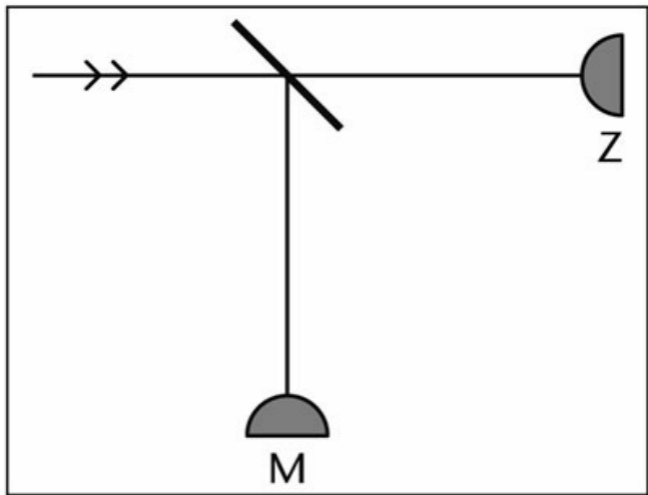


Figura 10. Tratto da V. Scarani, *Initiation à la physique quantique*, Vuibert, Parigi, 2003, figura 1.

Inseriamo degli altri specchi, perfettamente riflettenti stavolta, sul percorso dei fotoni Zehnder e Mach, a uguale distanza dal separatore, il primo dei quali invia i fotoni Zehnder verso il basso, e il secondo i fotoni Mach verso destra. Queste due nuove traiettorie si incrociano; collochiamo dopo il punto di incrocio il rilevatore Z sulla parte verticale della traiettoria dei fotoni Zehnder, e il rilevatore M sulla parte orizzontale della traiettoria dei fotoni M. Anche in questo caso si osserva che in media un fotone su due raggiunge Z, e uno su due M.

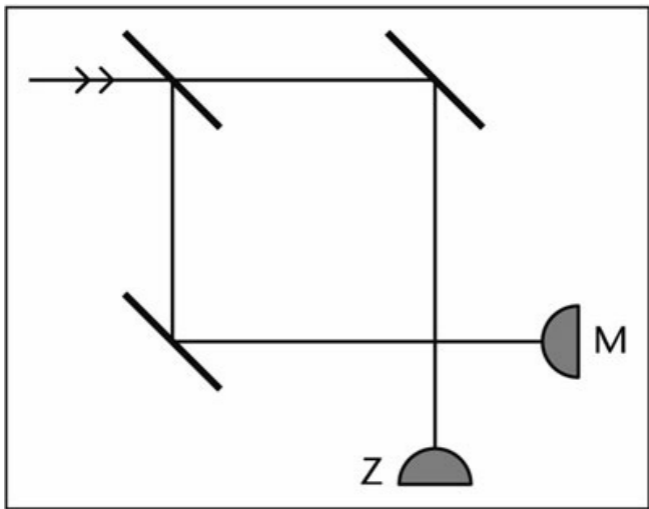


Figura 11. Tratta da V. Scarani, *Initiation à la physique quantique*, op. cit., figura 3.

Ora, all'intersezione di queste due nuove traiettorie collochiamo un altro specchio semiriflettente. «Normalmente», la metà dei fotoni

Zehnder dovrebbe attraversare questo nuovo separatore e finire sul rilevatore Z, e l'altra metà dovrebbe venire riflessa verso destra e arrivare su M; la metà dei fotoni Mach dovrebbe attraversare il separatore e giungere su M, e l'altra metà venire riflessa verso il basso e raggiungere Z. In totale si dovrebbe ritrovare sempre la metà dei fotoni su Z e l'altra metà su M.

Ma non è affatto ciò che si osserva. Tutti i fotoni finiscono su M! La spiegazione è la seguente: in realtà ogni volta il fotone Ludwig ha viaggiato simultaneamente attraverso i due rami del dispositivo in una sovrapposizione dello stato Zehnder e dello stato Mach.

Sugli specchi perfettamente riflettenti i fotoni vengono riflessi dalla faccia anteriore e subiscono lo stesso sfasamento di  $180^\circ$ : nessun cambiamento per quanto riguarda il loro spostamento relativo, che è sempre di  $180^\circ$ .

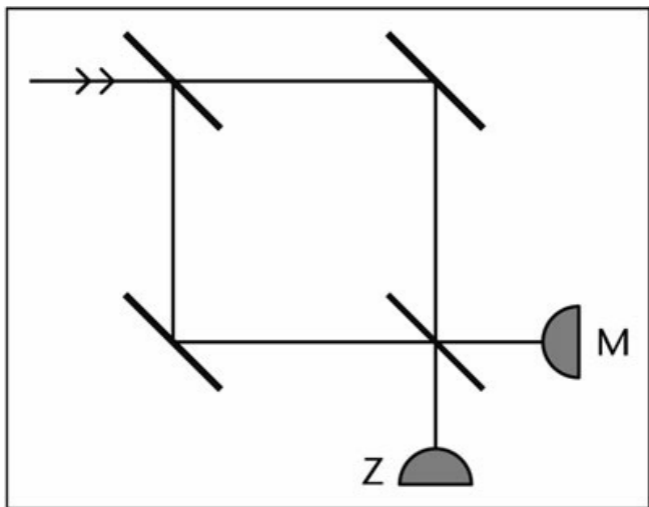


Figura 12. Tratta da V. Scarani, *Initiation à la physique quantique*, op. cit., figura 3.

Cosa accade quando i fantasmi Zehnder e Mach arrivano sul secondo separatore? La parte riflettente di quest'ultimo è stata rivolta verso M (qui sta l'astuzia): la parte riflessa verso M del fantasma Zehnder subisce uno sfasamento di  $180^\circ$  che le fa assumere la stessa fase della parte che transita del fantasma Mach; queste parti si sommano. Al contrario, la parte riflessa del fantasma Mach si riflette sulla faccia posteriore del secondo separatore, non vi subisce nessuno sfasamento e pertanto non assume la stessa fase del fantasma Zehnder, e si annulla con essa. Non resta che un solo vero fotone che si dirige

verso M (naturalmente i coefficienti della «sovrapposizione di stati» sono tali da farci trovare un fotone e non 1,37 o 0,85...).

Variando la lunghezza di uno dei tragitti prima del secondo separatore e procedendo ad esempio come indicato nella figura 13, si può introdurre, come nel caso delle fenditure di Young, un angolo di sfasamento  $\varphi$  legato allo spostamento della lancetta dell'orologio che rappresenta in modo sommario il fotone. Si osserverà allora che il numero di fotoni raccolti da M sarà proporzionale a  $\cos^2(\varphi/2)$  (il quadrato del coseno di  $\varphi/2$ ), e quello dei fotoni raccolti da Z proporzionale a  $1 -$

$\cos^2(\varphi/2)$ . In particolare, per  $\varphi$  pari a un multiplo dispari di  $180^\circ$  non vi sarà più nessun fotone in M e arriveranno tutti su Z. Vi è un'eccellente analogia tra le fenditure di Young e l'interferometro di Mach-Zehnder.

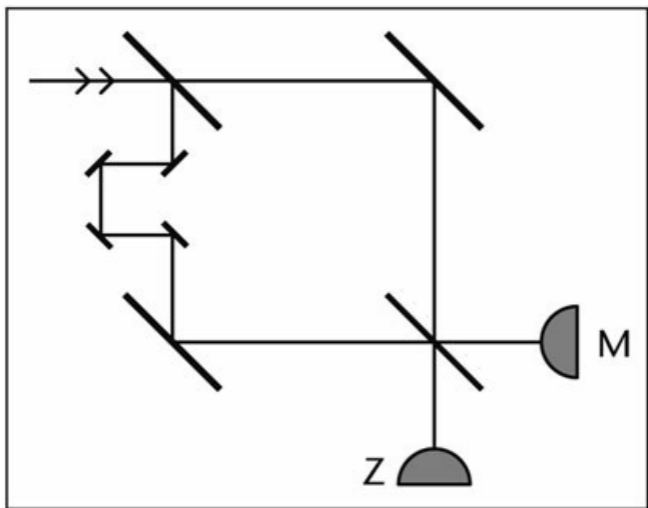


Figura 13. Tratta da V. Scarani, *Initiation à la physique quantique*, op. cit., figura 4.

## **È possibile invertire il corso normale del tempo?**

Ma quand'è che Ludwig ha deciso di imboccare le due strade allo stesso tempo? Si potrebbe supporre che, grazie al suo «fiuto», o a qualche influenza misteriosa del resto del dispositivo di misurazione sul separatore, esso abbia avvistato il separatore che lo attendeva. Allora, chi la fa l'aspetti, ha scelto di percorrere una sola via in assenza del secondo separatore, e tutte due simultaneamente in sua presenza. In una conferenza tenuta il 2 maggio 2007

all'Istituto di astrofisica di Parigi<sup>13</sup>, Alain Aspect giudica questa ipotesi un'interpretazione troppo ingenua della complementarità e se ne prende gioco con garbo:

Dato che non posso realizzare i due esperimenti al tempo stesso e che Bohr insiste tanto sul fatto che il comportamento degli oggetti dipende dallo strumento di misurazione mi dico: Ah, ecco che il fotone che sta arrivando<sup>14</sup>, ora si dà un'occhiata intorno e dice: «Ah, non hanno messo la lamina semiriflettente<sup>15</sup>, allora faccio finta di essere una particella». Ma poi quando arriva la lamina è lì e il fotone dice: «Ah, è un interferometro, ho capito, allora mi comporto come un'onda».

Il fisico americano John Archibald Wheeler ha trovato un modo per verificare questa ipotesi. Si ricordi che se durante un esperimento con le fenditure di Young si individua la particella su uno dei due percorsi prima che raggiunga lo schermo o la lastra fotografica le interferenze scompaiono. Nel 1978 Wheeler aggira l'ostacolo con un'idea che è all'origine di tutti gli esperimenti detti *a scelta ritardata*: egli immagina che due telescopi siano collocati molto lontano dalla fenditure, ognuno puntato su una di esse. Cosa accade se, dopo che il fotone ha oltrepassato il piano su cui si trovano le fenditure viene bruscamente inserito uno schermo prima che esso raggiunga il

telescopio 1 o il telescopio 2? È possibile che, qualora lo si faccia per un gran numero di fotoni, si osservi l'interferenza di quelli per i quali si è deciso inserire lo schermo e non l'interferenza di quelli per i quali si è deciso di non inserirlo? Questo esperimento, relativamente semplice nella sua concezione, non ha potuto essere realizzato in modo perfetto fino al 2006, con l'aiuto di un interferometro di Mach-Zehnder, da un'équipe del laboratorio di fotonica quantistica e molecolare (Cnrs/Ens Cachan), in collaborazione con Philippe Grangier e Alain Aspect<sup>16</sup>. I fotoni utilizzati sono polarizzati linearmente, le due sezioni che fuoriescono da un separatore

corrispondono a delle polarizzazioni ortogonali. Il funzionamento del secondo separatore è attivato aleatoriamente da un modulatore elettro-ottico. La lunghezza dell'interferometro è di 48 metri. La rapidità del modulatore e le dimensioni dell'interferometro permettono di agire sul fotone quando ha già percorso circa metà del suo tragitto. Si constata che vi è interferenza solo per i fotoni per i quali è stato inserito il secondo separatore. E nessun fotone ha avuto il tempo di «studiare» l'apparecchio che stava per affrontare prima di aver superato il primo separatore. Se uno credesse alle onde e ai corpuscoli, e all'influenza del futuro sul passato, potrebbe dire che lo

sperimentatore ha imposto al fotone di comportarsi come un'onda o un corpuscolo ben prima che esso passasse attraverso il primo separatore. Wheeler stesso scriveva: «Abbiamo una strana inversione del corso normale del tempo. Ora, inserendo o togliendo lo specchio abbiamo un effetto inevitabile su ciò che abbiamo il diritto di dire sulla storia *già* passata del fotone»<sup>17</sup>.

Vi è un'unica soluzione per sfuggire a questa conclusione che è stata una manna per i romanzi di fantascienza degli anni Sessanta: prendere in considerazione l'esistenza di influenze «non locali». In tal modo, anche negli esperimenti senza il secondo separatore il fotone

viaggerebbe fino all' / agli obiettivo/i (figure 10 e 11) sotto forma di due fantasmi, che potrebbero essere separati teoricamente da una distanza molto grande. Se ad esempio esso arriva prima su Z, e viene individuato oppure no, allora risulterà non individuato o individuato su M. Si può dire che la *misurazione quantistica* effettuata dal dispositivo  $Z + M$  proietta il fotone su uno solo dei suoi due stati. Questo aspetto è stato trattato egregiamente dal matematico Roger Penrose, che insiste sul carattere non locale e olistico della teoria quantistica<sup>18</sup>. Descrivendo un esperimento mentale realizzato con un interferometro Mach-Zehnder dotato di rami ognuno dei quali di lunghezza pari

a 1,4 anni luce, egli si pone, in modo meno umoristico, le stesse domande di Alain Aspect sul «fiuto» del fotone, afferma che non occorre «attribuire alla particella nessuna preveggenza di questo tipo», e, senza neanche appellarsi agli esperimenti a scelta ritardata, giunge alla conclusione secondo cui:

In ciascuno dei due esperimenti descritti in precedenza<sup>19</sup>, riteniamo che la funzione d'onda si divida in due parti presso il separatore iniziale e che l'aspetto corpuscolare dell'onda/particella si manifesti solo a chi la rileva, quando la misurazione viene infine effettuata. La misurazione rende manifesto il carattere olistico della funzione d'onda, nel senso che la particella compare in un solo luogo, poiché la sua apparizione in un luogo ne

impedisce l'apparizione simultanea in qualsiasi altro.

Per terminare, segnaliamo che gli esperimenti a scelta ritardata possono porre seri problemi nella relatività ristretta (concetti di prima e dopo, di simultaneità, di trasmissione istantanea di una specie di informazione). Alain Aspect ne è cosciente e afferma, sempre nella stessa conferenza: «Come si può ben vedere vi è un conflitto con la relatività, con le idee relativiste». Come vedremo alla fine di questo libro pochi fisici hanno tentato di evitare questo conflitto proclamando la possibilità di un ritorno al passato...

## **È possibile comprendere il mondo?**

Fino alla fine del Diciannovesimo secolo, ripetiamolo, i fisici hanno utilizzato due modelli per teorizzare il mondo, l'onda e la particella, modelli che comprendiamo intuitivamente grazie alle metafore classiche delle biglie e delle onde. Tutto ciò ha funzionato molto bene fino all'avvento del discontinuo, del quanto d'azione di Planck.

Ma poi si è dovuto rinunciare alle immagini tradizionali: i costituenti ultimi dell'universo non sono riducibili alle metafore classiche. Ciò non significa che si debba rinunciare a qualsiasi forma di rappresentazione, cosa peraltro

di cui non sappiamo fare a meno: al pari del mondo, non siamo riducibili a pura ragione, e le metafore possiedono quel qualcosa in più, un supplemento di senso che una formula matematica non riuscirebbe a comunicare appieno. Per la verità, nel campo di cui ci occupiamo, abbiamo interesse a riconoscere il notevole successo, anche per quanto riguarda le applicazioni tecnologiche, d'un ciarpame epistemologico fatto di formule matematiche, di principi fisici e immagini sconcertanti. Inoltre, abbiamo a disposizione il principio di complementarità, che permette a sua volta di comprendere in forma più intuitiva questi costituenti elementari. Possiamo arrivare a dominarli meglio?

Sulla delicata questione della natura della realtà, bisogna rivolgersi ai filosofi analitici e ai metafisici contemporanei? Ludwig Wittgenstein ha scritto che la filosofia è «una lotta contro il fascino che esercitano su di noi le forme di espressione»; senza alcun dubbio il vocabolario quantistico esercita a volte su di noi il potere di una sirena, anche se la filosofia può certamente rivelarsi utile per «sciogliere i nodi del nostro pensiero». Nel frattempo, i fisici più informati su questi problemi non rinunciano a una conquista pragmatica e al tempo stesso concettuale di questo nuovo mondo. Ad esempio, scrivono Serge Haroche e Jean-Michel Raimond:

Invece di cercare di «comprendere» la stranezza quantistica, attualmente i fisici si adoperano a definirla e a misurarla. Essi studiano, teoricamente e sperimentalmente, l'*entanglement*, la non località e la decoerenza in sistemi di complessità crescente. In tal modo, essi acquisiscono una sorta di familiarità con questi concetti. Essi sviluppano un nuovo tipo di intuizione che permette loro di indovinare il risultato di un esperimento prima di realizzarlo o addirittura di simularlo attraverso il calcolo. Sapere se una simile intuizione quantistica è diversa dalla «comprensione» è una questione che lasciamo ai filosofi<sup>20</sup>.

### 3. LA DECOERENZA DEL GATTO

## **I pesci solubili**

È un bacino enigmatico, dalle acque oscure, quasi nere, che riflette i volti di chi vi si affaccia, ma non rivela niente degli esseri che lo abitano. Tutt'attorno,

uomini in attesa: vigilano, come grandi trampolieri attenti e pazienti, lo sguardo sui galleggianti delle loro canne da pesca, unici legami tra il mondo di sotto e quello di sopra. A volte, uno di essi estrae trionfante dall'acqua un essere acquatico guizzante e dai colori cangianti che tira a sé con abile gesto del polso.

Di quanto si cela in questa oscura massa liquida si conoscono solo quei «pesci» dato che non può essere esplorata se non alla cieca, con canna e filo secondo le abitudini: il bacino resiste ad ogni altra incursione. Durante i primi tempi della sua esplorazione, quando si è trattato di delinearne la

geografia, è stata forte la tentazione di rappresentarsi il mondo di sotto come quello di sopra e di immaginare che le creature del bacino si comportassero come i loro omologhi dei fiumi e dei laghi circostanti: intente a rovistare sul fondo, pronte a inghiottire una mosca in superficie, insabbiate sotto una pietra, insomma localizzate, anche se non si sapeva bene dove.

Ma ben presto ci si è dovuti ricredere. Il mondo là sotto, almeno questo era certo, non obbediva alle stesse regole del mondo di sopra: alcuni pescatori ne dedussero che i loro pesci si concretizzavano solo al momento della cattura: prima, essi ipotizzavano, erano diluiti in tutto il bacino, con

maggiore o minore concentrazione a seconda dei punti. Quando avveniva esattamente questa trasformazione? I materialisti assicuravano che il momento chiave era quello in cui il pesce mordeva l'amo. Poco numerosi, ma non meno decisi, gli idealisti affermavano che ad essere determinante era l'apparizione dei pesci agli occhi dei pescatori. Nessuno è stato in grado di dirimere la questione, anche se la seconda tesi costringeva, a dire il vero, a delle sorprendenti acrobazie intellettuali e ha perso sostenitori col passare del tempo.

Se in questo racconto sostituiamo il pesce con un elettrone, il bacino con un

apposito contenitore e il pescatore con un fisico, incontriamo esattamente le stranezze di un qualsiasi oggetto quantistico che si trovi in una *sovrapposizione di stati* fino al momento in cui non viene pescato, ossia misurato (in questo caso preciso – che i fisici chiamano «la particella in una scatola» – gli stati, infiniti di numero, sono tutte le ubicazioni possibili all'interno della scatola). È perché vi è misurazione che tutte le sue potenzialità si riducono a una sola: si parla allora di *riduzione della funzione d'onda*.

## **Intravedere l'oggetto quantistico**

In che modo questa immagine del

pesce solubile (coincidenza surrealista: nel 1924 André Breton ha pubblicato una raccolta con questo titolo) può chiarire la meccanica quantistica e addirittura il suo arsenale matematico? Quest'ultimo è ben fornito, ma una delle sue armi, la funzione d'onda di Schrödinger, corrisponde molto bene all'immagine in questione. Ad esempio, per quanto riguarda la posizione di una particella, questa funzione (complessa tanto nel senso comune quanto nell'accezione matematica) permette di descrivere la particella come «distribuita» entro confini che non può oltrepassare, con una determinata *probabilità di presenza* in ognuno dei punti dello spazio che le è stato

assegnato. Questa probabilità, generalmente nulla ai confini di tale spazio, cede il passo a una posizione reale e ben definita quando si effettua una misurazione della sua posizione. Naturalmente, si troverà più spesso la particella dove la probabilità della sua presenza è grande rispetto a un punto in cui non lo è. Matematicamente parlando, la probabilità di presenza è proporzionale al quadrato del modulo della funzione d'onda (complessa!) di Schrödinger.

L'arsenale matematico dispone anche di altre armi. Gli spazi di Hilbert<sup>21</sup>, spazi *vettoriali* astratti, sono equivalenti alla funzione d'onda. Certe

combinazioni di spazi di Hilbert, dette «spazi di Fock»<sup>22</sup>, permettono di analizzare i casi, inaccessibili alla funzione d'onda, in cui la velocità delle particelle è talmente prossima a quella della luce che esse possono sparire al momento della collisione dando luogo ad altre particelle. In questo caso si può anche utilizzare il metodo degli *integrali di cammino* di Feynman<sup>23</sup>, che in effetti è equivalente. Infine, alcuni termini in questi integrali diventano trascurabili quando la velocità ridiscende a valori abituali, e allora ritroviamo la funzione d'onda di Schrödinger.

Si può ricavare un abbozzo di

rappresentazione mentale di questa funzione d'onda con l'aiuto di piccoli disegni su base matematica, ad esempio l'onda rappresentata nella terza parte del capitolo precedente. Quest'onda è quella che viene chiamata «onda piana monocromatica», ossia teoricamente non limitata nello spazio, che si propaga in una direzione fissa e con una lunghezza d'onda ben precisa. Louis de Broglie nel 1923 ha ipotizzato (a buon diritto) che, dato che la luce aveva un aspetto corpuscolare, le particelle di materia dovevano avere un aspetto ondulatorio. Sovrapponendo onde piane monocromatiche orientate nella stessa direzione, ma con lunghezze d'onda variabili entro due limiti, è possibile

rappresentare una particella di materia che si sposta in quella direzione sotto forma di *pacchetto di onde*:

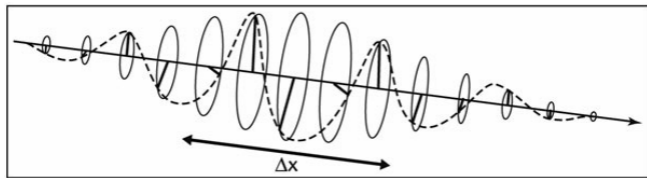


Figura 14. Tratta da J.P. Pharabod e B. Pire, *Le Rêve des physiciens*, op. cit., p. 104.

Nella figura 14 è rappresentata schematicamente un'estensione media  $\Delta x$  della particella, corrispondente alla sua natura ondulatoria.

Un'altra immagine interessante è quella di un atomo di idrogeno. Nel

1911 Rutherford inventa il «modello planetario» dell'atomo, con degli elettroni che ruotano attorno a un nucleo, e nel 1913 Bohr quantifica tale modello stabilendo che gli elettroni possono percorrere solo alcune traiettorie. Nel caso dell'atomo di idrogeno, pertanto, un solo elettrone ruota attorno a un protone.

Ma, con la meccanica quantistica questa immagine si offusca. L'elettrone non è più un corpuscolo che gira attorno a un protone, ma una pulsazione a *simmetria sferica*<sup>24</sup> attorno a esso, pulsazione rappresentata in ogni punto da un numero complesso, come nel disegno riportato nella pagina seguente.

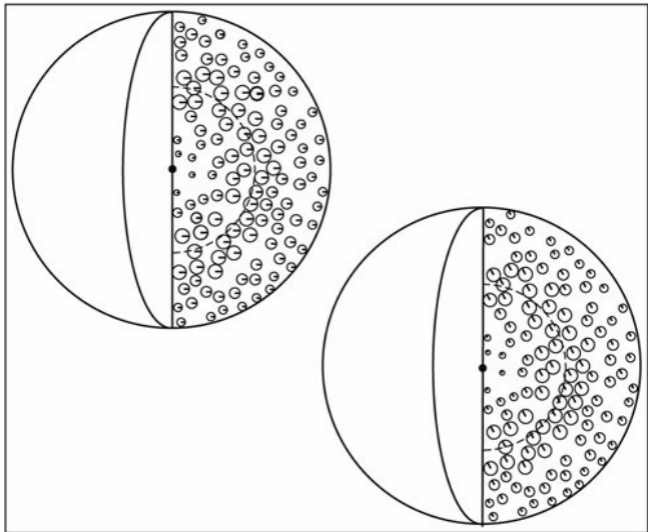


Figura 15. Tratta da J.P. Pharabod e B. Pire, *Le Rêve des physiciens*, op. cit., p. 111.

Questa figura corrisponde a due momenti successivi dello stato fondamentale di un atomo di idrogeno,

separati da un intervallo di  $0,5 \times 10^{-16}$  secondi. Il protone P è al centro di una sfera di raggio pari a un decimilionesimo di millimetro, della quale abbiamo asportato un quarto. I piccoli orologi all'interno rappresentano, per dei punti scelti a caso, la probabilità di trovare l'elettrone a una distanza  $r$  dal protone: nella convenzione che abbiamo adottato, la lunghezza della loro lancetta è proporzionale a  $r^2$  moltiplicato per il quadrato del modulo della funzione d'onda. La semicirconferenza tratteggiata descrive la distanza alla quale tale probabilità è massima. Al di fuori della sfera così rappresentata è ancora possibile trovare l'elettrone, ma

con una probabilità sempre più bassa man mano che ci si allontana da P. La rapidità dello spostamento della lancetta dell'orologio corrisponde alla frequenza della pulsazione. L'angolo  $\theta$  definito dalla lancetta è la fase della funzione d'onda.

Dopo tutto, quest'immagine, piuttosto matematica, della funzione d'onda di un atomo non è molto distante da quella, quasi onirica, del pesce solubile (anche se quest'ultima immagine corrisponde in realtà a quella della funzione d'onda confinata in una scatola). Non è proibito tentare di rappresentarsi visivamente un oggetto quantistico, con tutte le precauzioni necessarie – in particolare

avendo ben presente che non si tratta di un oggetto in senso stretto.

## **Un mondo estremamente vago**

Nel maggio del 1925, durante un soggiorno sull'isola di Helgoland il giovane Werner Heisenberg, all'epoca ventitreenne, getta le basi della prima forma della teoria quantistica, la meccanica delle matrici. Un anno dopo, Erwin Schrödinger introduce la sua funzione d'onda. Dopo qualche diverbio, la piccola comunità dei fisici quantistici constata che i due modelli sono equivalenti.

A partire dal suo modello,

Heisenberg scopre nel 1927 che non si può avere simultaneamente una precisione assoluta nella misurazione della posizione  $x$  di una particella e del suo momento  $p$  (ossia, il prodotto della sua massa per la sua velocità). Se chiamiamo  $\Delta x$  l'imprecisione sulla posizione e  $\Delta p$  quella sul momento, il prodotto  $\Delta x \cdot \Delta p$  è necessariamente pari a circa  $\hbar = h/2\pi$ , dove  $h$  è la costante di Planck (la vera equazione è  $\Delta x \cdot \Delta p > \hbar/2$ ).

La posizione ha la dimensione di una lunghezza, ossia di una velocità moltiplicata per un tempo; il momento ha la dimensione di una massa moltiplicata per una velocità. Pertanto,  $\Delta x \cdot \Delta p$  ha la

dimensione di un'energia (massa moltiplicata per il quadrato di una velocità) moltiplicata per un tempo; è un'*azione*, come il quanto di Planck. Tuttavia, esiste un'equazione  $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$ , dove E è l'energia e t il tempo, ma si tratta di un'equazione molto difficile da interpretare.

Heisenberg battezza la sua scoperta come il *principio di incertezza* e ne attribuisce la causa in primo luogo alla perturbazione creata dal dispositivo di misurazione sull'oggetto quantistico studiato. Oggi sappiamo che non è così e che queste equazioni traducono una vaghezza intrinseca per quanto riguarda il concetto di posizione e di velocità di

una particella. Ad esempio, prima di essere misurata la particella in movimento è in uno stato ondulatorio molto ben illustrato dalla figura 14 (un «*pacchetto di onde*», per riprendere un termine caduto in disuso). In questo disegno è indicata un'estensione spaziale che corrisponde molto bene al  $\Delta x$  di Heisenberg. Inoltre, esiste un'estensione  $\Delta p$  in quello che viene chiamato lo *spazio dei momenti*. È l'operazione della *misurazione* che forza la particella ad adottare una posizione precisa o una velocità precisa piegandosi in qualche modo alla nostra richiesta. Alla base di questo fenomeno sta il concetto di «sovrapposizione di stati». Un oggetto quantistico può

trovarsi in una sovrapposizione finita di stati discontinui (come lo spin per un elettrone) o in una sovrapposizione infinita di stati continui (come la posizione o la velocità per lo stesso elettrone, in movimento verso lo schermo fosforescente di un vecchio televisore a tubo catodico). La misurazione lo proietta solo su uno degli stati possibili, e gli altri scompaiono. A causa di quale mistero? Sarà un gatto a rivelarcelo.

Segnaliamo infine un problema terminologico. Nei Paesi anglosassoni è saldamente consolidata l'espressione «principio di incertezza» (*uncertainty principle*), che ha dato luogo a varie

divagazioni filosofiche. Tuttavia, in primo luogo non si tratta proprio di un principio ma di una conseguenza dei postulati della meccanica quantistica. E più che di «incertezza», che rimanda un po' alle nostre imperfezioni, sarebbe meglio parlare di «indeterminazione», che si riferisce piuttosto all'oggetto studiato. Peraltro, il termine «indeterminazione» viene sistematicamente utilizzato in Germania e in Italia.

## **Il gatto di Schrödinger**

Al di fuori delle operazioni di misurazione la funzione d'onda obbedisce all'equazione di Schrödinger,

che descrive l'evoluzione della particella in funzione del tempo. Ma se si misura una delle proprietà di questa particella, la sua posizione ad esempio, questa funzione, che poteva essere descritta da una somma finita o infinita di funzioni elementari, si riduce a una di esse (una posizione all'interno di una scatola, ad esempio), a partire dalla quale l'evoluzione riprenderà come previsto dall'equazione di Schrödinger. La violenza di questo fenomeno di misurazione quantistica è stata definita a lungo «riduzione del pacchetto di onde»; oggi si parla invece di «riduzione della funzione d'onda» o più semplicemente di «misurazione».

L'esempio del pesce solubile nello stagno, con l'amo del pescatore che svolge il ruolo di apparecchio di misurazione, corrisponde molto bene alla misurazione della posizione di una particella in una scatola. Quest'immagine, difficilmente estendibile all'insieme delle situazioni di misurazione quantistica, permette tuttavia di porre una semplice domanda: il pesce solubile si materializza in pesce ordinario sott'acqua, quando morde l'amo, o sotto il nostro sguardo, quando possiamo finalmente osservarlo? Erwin Schrödinger nel 1935 ha elaborato un paradosso su questo aspetto<sup>25</sup>. Egli ha immaginato un dispositivo di misurazione che, con un numero molto

piccolo di cambiamenti successivi di scala può trasferire la sovrapposizione di stati da un oggetto quantistico a un gatto, che sarà al tempo stesso vivo e morto. Questa idea ha suscitato molteplici dibattiti, e perfino scontri, sulla concezione del mondo. Ad esempio, diversi fisici, tra cui il celebre Eugène Wigner, hanno sostenuto che era la coscienza dell'osservatore che guardava il gatto a determinare se fosse vivo o morto.

Il fisico austriaco l'aveva congegnato così: collocate in una cassaforte un gatto e un atomo radioattivo che ha una probabilità su due di disintegrarsi nell'ora seguente. Aggiungete un flacone

di acido cianidrico collegato a un dispositivo che lo romperà non appena rilevata la disintegrazione. Dopo un'ora l'atomo si trova in una sovrapposizione di stati, disintegrato e non disintegrato. Ma, di conseguenza, nella funzione d'onda del sistema globale, mescolato in parti uguali c'è anche il gatto morto e il gatto vivo. Almeno, fino a quando un osservatore non vada a guardare all'interno, dato che questo atto corrisponde a una rilevazione, e che in quel momento si verifica la riduzione a uno solo dei due stati possibili.

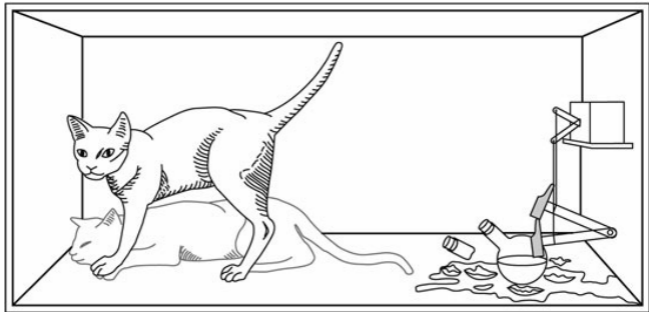


Figura 16. Tratta da B.De Witt, *Quantum mechanics and Reality*, in «Physics Today», settembre 1970.

In realtà è ancora più complicato. Se indichiamo con  $M$  e  $V$  gli stati del gatto da morto e da vivo, lo stato quantistico del gatto può essere rappresentato da una *matrice di densità*, ossia, semplificando a oltranza, una tabella quadrata di quattro elementi con in alto

MM e MV, e in basso VM e VV. I «termini incrociati» MV e VM rappresentano quelle che potremmo considerare come delle «frange di interferenza» tra la vita e la morte. Questo perlomeno era il modello prima che intervenisse la teoria della decoerenza, che permette di sbarazzarsi di questi termini incrociati.

Schrödinger aveva immaginato questo esperimento mentale per illustrare le difficoltà del passaggio dal mondo quantistico al mondo classico. Ma si è dovuto attendere quasi mezzo secolo perché dei teorici (in particolare Wojciech Zurek) postulassero che se il comportamento quantistico non persiste

a livello macroscopico (salvo eccezioni) si ha un effetto di decoerenza. Il fisico Roland Omnès ne fornisce un'analogia fisica: quando un'onda luminosa entra in un mezzo trasparente (vetro, acqua) tutte le molecole emettono delle ondine che interferiscono per lasciare sussistere un'unica onda rifratta che si propaga più lentamente. Tra le ondine si producono ovunque interferenze mutuamente distruttrici, salvo nel caso dell'onda macroscopica, che sussiste. L'effetto di decoerenza è analogo alla soppressione delle interferenze che conduce a una sola onda macro. Ecco perché il gatto, sistema macroscopico, non può presentarsi in uno stato misto, morto e vivo al tempo

stesso. Vi è una sorta di frontiera dove l'effetto di decoerenza annulla i comportamenti quantistici. Ma in che modo spariscono, e in quale momento? Cos'è questa decoerenza che – lasciamo da parte i superconduttori e i superfluidi – impedisce ai sistemi quantistici di persistere al livello classico? Qual è la natura di questo fenomeno che vieta all'insieme dei miliardi e miliardi di atomi di cui siamo costituiti di comportarsi quantisticamente o, in altre parole, di sdoppiarci in ogni istante?

È comprensibile che questo interrogativo abbia inquietato, sul piano sperimentale, numerosi fisici: qual è il destino del gatto di Schrödinger? Si può stabilire se è possibile che sia vivo e

morto al tempo stesso? Nel settembre del 1996, presso il dipartimento Kastler Brossel della Scuola normale superiore di Parigi, uno dei più begli esperimenti realizzati dalla fine del secolo precedente ha dato una risposta inequivocabile a questa domanda. In prossimità dello zero assoluto, verso  $-272\text{ C}^\circ$ , Serge Haroche, Jean-Michel Raimond, Michel Brune e la loro équipe hanno organizzato una splendida escursione nel più profondo della materia che ha permesso loro di osservare il passaggio che separa il nostro mondo da quello degli atomi. In altre parole, hanno in parte risolto il paradosso di Schrödinger.

Per riuscirci e costruire una situazione semplice in cui si possa misurare senza ambiguità la decoerenza, ci è voluta una ventina d'anni di sviluppo di tecniche sperimentali di incredibile complessità: si è trattato, per prima cosa, di costruire delle «trappole per fotoni», ovvero delle autentiche gabbie in cui è possibile controllare l'interazione tra un atomo e una particella di luce. Queste gabbie sono delle cavità, costituite da specchi sferici di niobio collocati l'uno di fronte all'altro, capaci di immagazzinare queste particelle di luce sufficientemente a lungo (circa centocinquanta microsecondi) perché possano interagire con degli atomi che vi vengono inviati

uno alla volta. Non atomi qualsiasi, perché gli esperimenti di Haroche e Raimond utilizzano degli atomi detti di Rydberg, ossia dei giganteschi atomi circolari (2.500 volte la taglia dell'atomo di idrogeno) i cui elettroni, poco legati al nucleo atomico, sono di conseguenza molto sensibili alle perturbazioni. Per via della loro taglia questi atomi sono delle autentiche antenne sensibili a una determinata radiazione a microonde.

Essi vengono dapprima abilmente preparati in modo da trovarsi in una sovrapposizione di due stati corrispondenti a due indici diversi di rifrazione della radiazione della cavità.

Poi vengono immessi successivamente nella cavità, raffreddata al di sotto di 1K ( $-272\text{ C}^\circ$ ). Si ottiene così l'equivalente di un «gatto di Schrödinger»; infatti il campo (l'insieme dei fotoni) della cavità è in una sovrapposizione di stati corrispondente ai due stati dell'atomo.

L'esperimento inizia quindi con l'immissione di un atomo nella cavità che crea questo doppio stato del campo. Il problema ora è sapere quando il campo subirà la decoerenza e cesserà ritrovarsi in questo stato duplice. A tale scopo, dopo un certo tempo (dell'ordine di decine di microsecondi), si immette nella cavità un secondo atomo. Esso ne uscirà in uno stato che permetterà di

stabilire se il campo era in uno stato duplice o semplice. Si constata che più è lungo l'intervallo tra le due immissioni, maggiori sono le probabilità di trovare il campo in uno stato semplice. Vi è una decoerenza del campo tanto più rapida quanto maggiore è il numero di fotoni. Questo campo funge da strumento di misurazione quantistica, al tempo stesso sofisticato e rudimentale, e si constata che più esso è «grossolano» (o se si preferisce macroscopico), più gli effetti quantistici scompaiono rapidamente.

Ma perché il campo ha abbandonato il suo stato «duplice»? Da dove viene questa misteriosa decoerenza? La spiegazione corrente è che il campo ha

interagito con l'ambiente esterno, che ha scambiato un quanto con il resto dell'universo, il che ha provocato la decoerenza. In tal modo, il dispositivo di misurazione quantistica non sarebbe in realtà altro che lo strumento di una mediazione tra il microsistema da misurare e il resto dell'universo, tra la parte e il tutto.

Tuttavia, c'è un problema. Certo, la decoerenza ha imposto al gatto di essere vivo o morto non appena vi è stata interazione tra l'interno della cassaforte e l'esterno – ad esempio, al momento di schiudere la porta. In questo caso l'osservatore non ha neppure avuto il tempo di gettare uno sguardo, e quindi

non ha niente a che fare con questo fenomeno. La decoerenza ha impedito al gatto di essere una mescolanza dei due stati – o, come si dice, essa ha eliminato le «frange di interferenza». Ma perché il gatto è vivo, o perché è morto? Continuiamo a non saperlo. Si può invocare, come fa Roland Omnès, un «principio di unicità» e dire che, visto che esiste una sola realtà empirica, non vi è che un gatto, vivo o morto. Oppure, come i fisici inglesi della scuola di Oxford, il più celebre dei quali è David Deutsch, si può seguire l'interpretazione di Everett-Graham-DeWitt e sostenere che l'universo si è scisso in due, una parte in cui il gatto è vivo, l'altra, in cui il gatto è morto (curiosamente, questa

interpretazione, che sembra ispirata alla fantascienza, attualmente va per la maggiore).

A questo proposito, Haroche e Raimond hanno una posizione che sdrammatizza un po' il problema: «Certi fisici trovano questo stato di fatto fastidioso. Altri sono pronti ad accettare questa caratteristica intrinsecamente statistica della teoria quantistica»<sup>26</sup>.

## 4. UNIVERSI PARALLELI

*Il Giardino dei  
sentieri che si  
biforcano è  
un'immagine  
incompleta, ma non  
falsa, dell'universo  
quale lo concepiva*

*da Ts'ui Pên. A  
differenza di  
Newton e di  
Schopenhauer, il  
suo antenato non  
credeva in un tempo  
uniforme, assoluto.  
Credeva in infinite  
serie di tempo, una  
rete crescente e  
vertiginosa di tempi  
divergenti,  
convergenti e  
paralleli. Questa  
trama di tempi che  
s'accostano, si  
biforcano, si  
tagliano o  
s'ignorano per  
secoli, comprende  
tutte le probabilità.*

*Nella maggior parte di questi tempi noi non esistiamo; in alcuni esiste lei e io no; in altri io, e non lei; in altri, entrambi.* JORGE LUIS BORGES, *Il giardino dei sentieri che si biforcano* (1941)<sup>27</sup>

## **Nel castello di Schrödinger**

È la seconda volta quest'anno. Non ho alcun bisogno di avvicinarmi alla finestra che dà a est, sulla valle, per immaginare il serpente di luce tremolante che ondeggia sulla strada. Nessun bisogno di tendere l'orecchio

per indovinare il lontano mormorio da cui potrei rapidamente cogliere le loro vociferazioni. Hanno paura. Ogni volta, hanno paura. Ma non faccio niente per impedire loro di condurre le loro miserabili vite. Ho perfino proposto loro di beneficiare delle mie riserve. Cioè, della parte di esse di cui non ho bisogno. All'epoca hanno rifiutato. Come se volessi avvelenarli. Come se fossi responsabile della loro Geenna. Bisogna dire che hanno vita dura, e breve. Dopo la grande catastrofe sopravvivono a stento e muoiono spesso prima dei trent'anni. È ormai la quarta generazione che vedo passare.

Ancora un decennio fa mi accadeva spesso di scendere al villaggio. Al

crepuscolo, per non leggere sui volti dei più anziani i primi segni di disfacimento. La maggior parte distoglieva lo sguardo al mio passaggio, ma almeno non ero più solo per un'ora. Quel tempo è finito. Non oso lasciare il mio castello di cemento. Vecchio dalle ossa di vetro che un sasso, lanciato da qualcuno più temerario degli altri, basterebbe a far inciampare, forse a tramortire. E a che sarebbero serviti tutti questi anni di solitudine e di pena? Avrebbero fatto presto a piantarmi uno spiedo nel cuore. No, non mi muovo più di qui. E poi, sto per raggiungere il mio obiettivo.

Toh, si avvicinano. A giudicare dal

rumore stanno uscendo dal bosco; tra poco scenderanno a guardare il torrente. Poi resterà loro meno di un chilometro per venire ad abbattere le mie mura. Quante volte hanno trovato il coraggio di arrivare fin qui? Trentacinque, quaranta? A dire il vero, ne ho perso il conto. E non hanno mai imparato a eludere le mie difese. A volte si fermano davanti alla porta d'acciaio che blocca l'entrata del complesso. Sono capaci di restarci per ore, in silenzio. Io mi avvicino e li contemplo dalla vetrata che sovrasta la porta. Mi beo dei loro volti senza rughe. So che non dureranno, ma che voglia ho di toccarli. Da lassù vedo palpitare le loro vene e mi sembra di sentir battere il loro cuore. Quando sono

calmi offro loro un cerimoniale: al mio comando le porte scorrono l'una dopo l'altra e un pugno di loro penetra timidamente nei corridoi fino a raggiungere la rotonda che circonda la cassaforte. Possono osservarmi a loro agio attraverso i finestrini. Con calma, controllo il revolver, la cui canna color antracite è puntata contro la testa della poltrona di fronte agli schermi di controllo. Quando risuonano tre squilli mi sistemo sulla poltrona, la canna incollata alla tempia. Prima, prendevo sempre un gatto sulle ginocchia, lontano omaggio che ero il solo a comprendere, ma l'ultimo è morto tanto tempo fa. Sullo schermo principale si sgrana una litania di numeri. Corrispondono alla

probabilità del passaggio successivo di sette particelle di spin down verso il dispositivo che farà scattare il grilletto. È il momento per me di prendere il microfono e di recitare ai miei ospiti il vangelo secondo sant'Everett. Parlo loro della teoria della funzione d'onda universale, racconto loro dei mondi multipli e come nascono. Come ogni misurazione faccia sì che l'universo si sdoppi e svolga la sua storia, indipendente dall'altra, producendo senza sosta biforcazioni che si ripetono all'infinito: miliardi di miliardi di nuove copie dell'universo, tra le quali sceglierò quella in cui la mia vita continua. Dico loro che quelli che mi vedranno morto apparterranno a

diramazioni differenti e che lascio loro in eredità il mio laboratorio. Gli altri vedranno nella mia sopravvivenza la testimonianza della realtà del Multiverso. Quando il segnale squilla e il tamburo ruota, perfino io ho un brivido di terrore: esiste forse un universo in cui le pallottole che uso non sono a salve? C'è un universo in cui non faccio finta? Presto lo saprò. Presto, farò l'esperimento con delle vere pallottole. Presto. La prossima volta, magari.

## **Suicidio quantistico: da Moravec a Tegmark**

Nel 1987, Hans Moravec, allora

professore di robotica a Carnegie Mellon, si è chiesto perché il suicidio non sia diventato la soluzione più pratica per risolvere tutti i principali problemi esistenziali. Lì dove un filosofo si sarebbe interrogato, ad esempio, su cosa distingua un evento più importante da uno che lo è meno, e in fin dei conti su cosa sia un evento, l'ingegner Moravec non si è perso in sottigliezze: se la teoria degli universi paralleli è corretta, egli dice in sostanza, basta rimescolare le carte e cercare l'universo «giusto». Egli ha quindi proposto di utilizzare una macchina adeguata, che generi una casualità quantistica (e non una pseudocasualità prodotta da un programma di calcolo) e

invii un impulso a un minidetonatore collegato a una sostanza esplosiva delicatamente impiantata nel cranio del candidato. Il gioco è fatto, affermava Moravec, perché anche se il candidato doveva morire nella maggior parte dei casi, vi sarebbe necessariamente qualche sua copia – ne basterebbe una – che sopravviverebbe per un colpo di fortuna la cui probabilità è certo molto bassa (qualcosa come 1 possibilità su 100 elevato alla 100), ma ciò nondimeno concreta se si considera che il numero degli universi è infinito. Evidentemente, se il numero degli universi non è infinito, ma solo gigantesco, allora chi avrà tentato la sorte avrà ben poche possibilità di

cavarsela. Ma almeno non avrà da lamentarsi. C'era dell'intuizione, ma il dispositivo non era veramente idoneo dal punto vista quantistico.

Dieci anni più tardi un giovane cosmologo svedese-americano, Max Tegmark, ha elaborato l'idea di Moravec immaginando un dispositivo un po' più sofisticato e ricorrendo a una «pistola quantistica»: ogni volta che uno preme il grilletto essa misura lo spin  $z$  di una particella in uno stato di sovrapposizione del tipo «stato alto + stato basso». Se la misura dello spin risulta «alta» un segnale aziona una pistola, stavolta autentica. Se la misura è «bassa» si ode uno schiocco sonoro. La

sola esigenza, precisava Tegmark, è che l'intervallo di tempo tra la misurazione dello spin e l'attivazione del revolver sia inferiore al centesimo di secondo per evitare che la cavia sappia se l'esito è fatale o meno. La prima volta c'è una possibilità su due, ma al decimo tentativo, la probabilità si è ridotta a un decimo. Nella teoria degli universi multipli ogni volta che si effettua una misurazione compaiono due nuovi universi, uno in cui lo sperimentatore è morto e l'altro in cui è vivo. Lo sperimentatore morto non è ovviamente cosciente di esserlo, resta cosciente solo quello che ode lo schiocco dell'apparecchio, il cui rumore significa che è sopravvissuto. Aveva una

probabilità su due al primo colpo, ma al secondo schiocco sa di essere molto fortunato poiché aveva solo una possibilità su quattro di sopravvivere al secondo colpo. Con un minimo di ostinazione, dopo il decimo schiocco saprà che l'ipotesi dei mondi multipli rischia di essere falsa solo allo 0,1%; a questo livello l'interpretazione «Multiverso» è quasi certa, per lo sperimentatore che è il solo a saperlo e non può comunicarlo a nessuno. Infatti su mille mondi possibili ora ce ne sono novecentonovantanove in cui i testimoni costernati hanno visto lo sperimentatore perire in un bagno di sangue. Naturalmente tutto ciò non tiene conto di tutti gli universi, come ha fatto notare il

filosofo David Lewis, in cui le cavie rischiano di trovarsi ridotte allo stato vegetativo, o gravemente ferite, senz'altro non morte, ma neanche tanto vive.

Tutte queste speculazioni si fondano su un predicato, quello della pluralità degli universi. Perché va tanto di moda? Come si è arrivati a questa invasione di libri, articoli e riferimenti nelle riviste scientifiche? Forse gli storici delle idee che si dedicheranno a questo argomento tra qualche decennio lo spiegheranno con l'angoscia di un pianeta che vede l'azzurro volgere progressivamente al grigio dell'inquinamento? Essi osserveranno, in ogni caso, che quella

che fino ad allora era stata una brillante variazione della fantascienza, all'inizio del Ventunesimo secolo è diventata un'ossessione della fisica contemporanea. L'atto di nascita di questa metamorfosi è ben noto poiché è tutt'uno con la presentazione della tesi di dottorato di Hugh Everett avvenuta nel 1957.

## **L'eredità di Everett**

Il giovane Everett non aveva atteso quel momento per fare irruzione sulla scena delle grandi speculazioni fisiche e/o metafisiche: a dodici anni aveva scritto ad Albert Einstein per chiedergli quale fosse la natura di ciò che assicura

la coesione dell'universo e proporgli le proprie idee. Il grande fisico gli aveva gentilmente risposto:

Caro Hugh,  
non esiste una forza irresistibile come non esistono corpi inalterabili. Sembrerebbe però che esista un ragazzo ostinato che si è fatto vittoriosamente strada attraverso gli strani ostacoli che lui stesso aveva creato<sup>28</sup>.

A ventiquattro anni il giovane studente di Princeton ha conservato qualche tratto di quel ragazzo. Segue i seminari di Niels Bohr e si interessa alla meccanica quantistica. Nel 1955 presenta a John Archibald Wheeler un saggio talmente audace che quest'ultimo gli risponde di sentirsi «francamente troppo timido per

mostrarlo a Bohr nella forma attuale», poiché esso si presterebbe «ad essere soggetto a interpretazioni mistiche da parte di troppi lettori inesperti». Tuttavia Wheeler, che apprezza Everett, lo aiuta a redigere la sua tesi. Nell'aprile del 1957 Everett supera brillantemente l'esame e la sua tesi viene pubblicata nel luglio dello stesso anno<sup>29</sup>.

In seguito Everett abbandona la fisica per la matematica, il suo primo amore, e si mette al servizio dell'esercito. Tuttavia, su incitamento di Wheeler, si reca a Copenaghen nel marzo del 1959 per incontrare Bohr che rifiuta di discutere di «qualsiasi nuova teoria

emersa» e non permette nemmeno a Everett di esprimersi. Ha forse scorto in lui un pericoloso concorrente in termini di interpretazione? Probabilmente no, all'epoca ha settantacinque anni e ritiene di non avere più tempo da perdere... In ogni caso, Everett è disgustato dalla fisica.

Intraprende una brillante e remunerativa carriera matematicomilitare, inventando in particolare i moltiplicatori di Lagrange generalizzati, a quanto pare molto utilizzati nei *war games*. Amante del buon cibo, dell'alcol, dei sigari e del poker, muore nel 1982 in seguito a una crisi cardiaca.

Qual è la sua idea? Quando si effettua una misurazione quantistica – di una riduzione della funzione d'onda per usare un linguaggio più efficace – solo una delle possibilità espresse nella funzione si manifesta ai nostri occhi; e anche con il fenomeno della decoerenza è impossibile spiegare perché le altre possibilità spariscono. Non importa, afferma Everett: l'universo sarebbe rappresentato da una funzione d'onda globale, che egli chiama «funzione d'onda universale». L'oggetto quantistico di cui si misura una proprietà si trova in una sovrapposizione di stati che induce nella nostra mente una sovrapposizione di stati di coscienza, in qualche modo un gatto di Schrödinger

più complicato. Pertanto, egli scrive:

Ad ogni osservazione (o interazione) che si succede, lo stato dell'osservatore si scinde in un certo numero di stati differenti. Ogni diramazione rappresenta un risultato diverso della misurazione e lo stato proprio corrispondente allo stato dell'oggetto-sistema<sup>30</sup>. Tutte le diramazioni esistono simultaneamente nella sovrapposizione dopo una sequenza qualsiasi di osservazioni. La «traiettoria» della configurazione mnemonica di un osservatore che effettui una serie di misurazioni non è pertanto una sequenza lineare di configurazioni di memoria, ma un albero con biforcazioni, dove tutti i risultati possibili esistono simultaneamente in una sovrapposizione finale con diversi coefficienti nel modello matematico<sup>31</sup>.

Modello di cui nella sua tesi egli ha dimostrato la perfetta adeguatezza alla meccanica quantistica. Egli aggiunge: «Dal punto di vista della teoria, tutti gli elementi della sovrapposizione (tutte le “diramazioni”) sono reali, nessuno è più “reale” degli altri». Precisiamo anche che è impossibile per un osservatore in una configurazione di memoria rendersi conto dell'esistenza di un'altra diramazione dell'universo (e quindi di un altro se stesso in un'altra configurazione di memoria) perché tutte queste diramazioni sono matematicamente (e paradossalmente per i non matematici) «ortogonali», cosa che si comprende più facilmente nel linguaggio comune se al posto di questo

termine usiamo «parallele», da cui l'espressione spesso utilizzata di «universi paralleli».

## **Gli eredi**

All'epoca, al di fuori di ambienti assai ristretti, la tesi di Everett ha poca risonanza. Nel campo della fantascienza l'ucronia di Philip Dick *La svastica sul sole* (1962) potrebbe essere considerata una sua notevole illustrazione a posteriori. La storia si svolge in un'America spartita tra il Giappone e la Germania dopo la vittoria di Hitler e in cui il protagonista scrive lui stesso un'ucronia nell'ucronia, *La cavalletta non si alzerà più*, in cui descrive una

Germania che ha perso la guerra nel 1947. Egli finisce per rendersi conto di comunicare attraverso una tecnica cinese di divinazione con un altro mondo in cui Hitler è stato effettivamente sconfitto. Ma è molto probabile che Dick abbia scritto il suo capolavoro nella totale ignoranza del lavoro di Everett (senza contare che le diramazioni dell'universo di Everett non possono entrare in comunicazione tra loro).

Nel 1970 il fisico americano Bryce DeWitt, marito della francese Cécile Morette, fondatrice della scuola di fisica di Houches, decide di riabilitare questo lavoro. DeWitt aveva scoperto il pensiero di Everett nel 1957:

All'inizio mi sono stupito del fatto che qualcuno finalmente, dopo tanti anni e tanti articoli noiosi, proponesse qualcosa di nuovo e di innovativo sull'interpretazione della meccanica quantistica. Poi sono rimasto profondamente turbato<sup>32</sup>.

Egli pubblica un articolo su «Physics Today»<sup>33</sup> che suscita una moltitudine di reazioni. Già il sottotitolo dell'articolo è provocatorio: «La soluzione al dilemma dell'indeterminazione, potrebbe essere un universo in cui tutte le soluzioni possibili di un esperimento si realizzano?». In primo luogo, DeWitt scrive in uno stile sfavillante con immagini sensazionali, o sensazionalistiche secondo i suoi

detrattori:

Questo universo è costantemente sul punto di scindersi in un numero prodigioso di nuove diramazioni derivanti da misurazioni, ossia da interazioni tra le miriadi dei suoi componenti. [...] Ricordo ancora lo shock che ha rappresentato il mio incontro con il concetto del multiverso. L'idea di 10 elevato alla 100 copie leggermente imperfette di me stesso che si dividono in nuove copie sempre più irriconoscibili non facile da riconciliare con il buon senso. È la vendetta della schizofrenia<sup>34</sup>.

Fatto sta che grazie ai suoi sforzi Everett diventa celebre. DeWitt gli chiede una versione completa della sua tesi e la pubblica in un libro sui «mondi

multipli» che egli elabora insieme a uno dei suoi studenti, Neill Graham<sup>35</sup>.

Ma in questo libro DeWitt e Graham reificano la tesi di Everett e, da processo governato dalla coscienza, la trasformano in meccanismo automatico, che porta alla moltiplicazione del numero di universi ogni volta che, da qualche parte, avviene un fenomeno di riduzione della funzione d'onda, ad esempio tutte le volte che un elettrone in sovrapposizione di stati di spin positivo e negativo lungo una certa direzione deve, in funzione del proprio ambiente, scegliere il segno del proprio spin. Secondo gli autori l'universo in queste occasioni dà vita ad altri due universi,

uno in cui lo spin dell'elettrone è positivo, l'altro in cui è negativo. Il che implica l'esistenza di miriadi di miriadi di universi gli uni reali quanto gli altri, che non interagiscono tra loro perché matematicamente ortogonali (ossia paralleli, nel senso della fantascienza) e in cui ognuno di quelli che corrispondono alla nostra epoca contiene un esemplare di noi stessi.

Il libro di DeWitt e Graham si vende molto bene, e la notorietà di Everett tra i fisici cresce. Nel 1977 DeWitt e Wheeler lo invitano a un seminario all'Università del Texas. DeWitt presenta a Everett uno dei suoi studenti, l'inglese David Deutsch, che resta molto

colpito da Everett. L'incontro sarà fruttuoso e porterà Deutsch a trovare nel 1985 la chiave fisico-matematica del computer quantistico<sup>36</sup>.

Nato nel 1953, Deutsch, laureatosi in fisica a Oxford, unisce l'arditezza teorica (difende le idee di Everett e di DeWitt) a una spaventosa efficacia nell'uso delle tecnologie d'avanguardia. Nel 1977 propone un assemblaggio che dovrebbe permettere di realizzare un esperimento che dimostri l'esistenza di questi universi multipli. Il principio di questo assemblaggio corrisponde a quello che oggi viene chiamato un «computer quantistico», ossia una macchina che utilizza algoritmi che

elaborano i dati attraverso sistemi in stato di sovrapposizione quantistica, e non più i classici bit di dati. In seguito dimostrerà che «un simile algoritmo permette di individuare le proprietà di certe funzioni matematiche in un sola operazione, mentre un algoritmo classico ne richiede almeno due per effettuare la stesso compito»<sup>37</sup>. Di qui, la superiorità del calcolo quantistico.

Le idee di Everett, DeWitt e Deutsch hanno sempre più seguaci. Esse eliminano due aspetti paradossali della meccanica quantistica: la riduzione della funzione d'onda (perché non avviene) e la non località. Ma si pone almeno un problema serio. È facile concepire una

biforcazione in due rami di uguale probabilità, come per un elettrone in una sovrapposizione di stati di spin positivo e negativo. Si possono anche concepire biforcazioni a tre, quattro, cinque (o più) rami di uguale probabilità. Ma che ne sarebbe di una biforcazione a tre rami di probabilità rispettivamente pari al 17,1%, 49,3% e 33,6%?

Per un ipotetico osservatore dell'intero universo, o piuttosto del multiverso formato dall'insieme delle diramazioni dell'universo, non c'è alcun problema. Lo stato di questo multiverso evolve inesorabilmente secondo l'equazione di Schrödinger alla quale obbedisce la funzione d'onda

universale. Le probabilità osservate dagli abitanti di ogni diramazione non sono altro che la misura della loro ignoranza dell'insieme, essi possono elaborare statistiche solo in base al loro limitato quantitativo di osservazioni. Per tali abitanti si pone tuttavia il problema dell'incoerenza, che David Wallace, un collega di Deutsch, riassume così: «Quando si produce effettivamente un risultato, che senso può avere considerarlo come incerto?». Sono state proposte diverse sofisticate soluzioni matematiche. Nel 1999 Deutsch ha proposto una soluzione radicale introducendo alcuni elementi di teoria delle decisioni nell'interpretazione di Everett e proponendo una specie di

gioco quantistico che gli consente di ritrovare le probabilità abituali della meccanica quantistica. Inutile dire che non ha convinto tutti.

## **È necessario un principio di unicità?**

Alcuni fisici come Roland Omnès in Francia e Robert Griffiths negli Stati Uniti hanno cercato di eliminare dalla meccanica quantistica la funzione d'onda sviluppando un'ipotesi detta delle «storie coerenti» (Griffiths) o delle «storie quantistiche» (Omnès), in cui utilizzano, tra l'altro, il fenomeno della decoerenza per giungere a una descrizione puramente quantistica del nostro mondo macroscopico. Una teoria

interessante, ma che fa a pugni con quella di Everett.

Non è facile descrivere le idee di Omnès e Griffiths senza ricorrere a strumenti matematici molto elaborati, come gli spazi di Hilbert e i proiettori. Precisiamo soltanto, seguendo quanto dice Omnès, che per descrivere un esperimento di fisica quantistica essi definiscono una successione di intervalli di tempo relativamente precisi, durante i quali l'oggetto quantistico passa da uno stato caratteristico all'altro seguendo una «storia». In realtà, in generale, occorre tutta una «famiglia di storie» per descrivere un fenomeno. Ad esempio, in un esperimento sulle fenditure di Young

«tipico» (ossia senza particolari astuzie del genere «scelta ritardata») l'oggetto passerà da uno stato «uscita dalle due fenditure» allo stato «arrivo sul microrivelatore numero  $N$  dello schermo», supponendo che lo schermo sia interamente ricoperto di minuscoli rilevatori. Se vi sono in tutto  $N$  microrilevatori, l'oggetto avrà una famiglia di  $N$  storie. Ovviamente – ed è normale poiché si tratta di una semplice parafrasi delle esposizioni abituali della meccanica quantistica – le probabilità delle diverse storie sono tali che si ritrova statisticamente la nota figura delle interferenze. Tuttavia secondo Omnès e Griffith, non c'è riduzione della funzione d'onda, ma

semplicemente una storia che prevale in base al grado di probabilità.

Se si applicano le sue idee al caso del gatto di Schrödinger, la decoerenza permette di eliminare quasi istantaneamente, nella famiglia delle storie possibili, tutte quelle in cui esistono delle interferenze del tipo «morto e vivo». Non si può avere un gatto mortovivo; o è morto, o è vivo. Ma, e questo è il nodo del problema, la decoerenza continua a non spiegare perché si ottiene un risultato piuttosto che un altro. Omnès ne è ben consapevole e deve introdurre un principio di unicità della realtà. Egli scrive in una delle sue opere:

Un esperimento di misurazione, nella realtà, porta in effetti a un dato unico, a un fatto tangibile, indubitabile. E cosa abbiamo da proporre a fronte di questo? Una teoria più che mai intrecciata di probabilità, un gioco di possibilità<sup>38</sup>.

E in effetti una famiglia di storie somiglia abbastanza a una treccia di probabilità. L'insieme delle famiglie di storie a partire dal Big Bang somiglia molto a una funzione d'onda dell'universo, conforme alle leggi della meccanica quantistica, ma che sarebbe solo un gioco di possibilità, con una sola storia reale accompagnata da una miriade di storie virtuali. Questa funzione d'onda dell'universo ricorda qualcosa a Omnès:

Dobbiamo peraltro citare, anche senza accoglierla, una strana idea avanzata da Everett nel 1956 [secondo cui] la funzione d'onda dell'universo scaturita all'inizio dei tempi [...] è una funzione che si accorda a tante realtà parallele che seguono separatamente il loro corso<sup>39</sup>.

Dopo aver dichiarato di essere pronto a riconoscere questa idea come folle, egli ne ammette la solidità nel senso della fisica, e si rivolge alla metafisica:

Per il solo fatto che la teoria di Everett esiste e che non può essere confutata, risulta che la questione dell'unicità della realtà non appartiene più al campo della scienza, del verificabile, ma a quello della filosofia, delle opzioni metafisiche<sup>40</sup>.

Ci siamo, Omnès è obbligato a uscire

dalla scienza pura. Egli prosegue: «Prendiamo in considerazione, al contrario di Everett, un'altra eventualità, che bisognerà definire metafisica malgrado tutto ciò che ci attira di essa: la realtà è unica». E deve quindi anche enunciare un principio di unicità della realtà:

La realtà è unica. Essa si evolve nel corso del tempo in modo tale che fatti diversi che prendono forma in condizioni identiche hanno frequenze di apparizione conformi alle probabilità teoriche<sup>41</sup>.

Al che i sostenitori di Deutsch hanno buon gioco a rispondere: è più facile introdurre un principio supplementare che non si può giustificare, o dei mondi

supplementari che invece non hanno bisogno di giustificazione?

Ci guarderemo bene dal prendere una decisione...

## 5. ESISTE LO SPAZIO?

## **Il giardino di John Bell**

All'epoca la scoperta del monolito nero trasforma il pianeta in un pandemonio. Hal 2 come l'avevano soprannominato gli archeologi che lo

avevano liberato dal suo involucro di ghiaccio, da qualche parte nell'inlandsis antartico, era indubbiamente di origine extraterrestre. Immediatamente, quel parallelepipedo di cinque metri di altezza per due di larghezza diventa una posta politica di primaria importanza, che porta l'umanità sull'orlo di una guerra generalizzata. Le fantasie che ha suscitato sono innumerevoli e, tutto sommato, povere di inventiva. Ma spesso erano violente, come dimostrato dalle manifestazioni di odio che hanno accompagnato la polemica sulla scelta del Paese che avrebbe avuto l'onore di ospitarlo sul suo territorio. In questa occasione, se non altro, un attentato terroristico ha dimostrato l'assoluta

indistruttibilità di Hal 2, dato che l'esplosione di una decina di chili di pentrite ha cancellato qualsiasi cosa in un raggio di cento metri, a eccezione dell'artefatto.

Questa storia è ben nota e ricordiamo che dopo qualche decennio di ricerche e di analisi sempre meno accanite, Hal 2 ha smesso di suscitare attenzione ed è stato collocato in un angolo appartato d'un vecchio giardino botanico, in mezzo a dei platani centenari.

È stato allora che ha cominciato a inviare segnali. Si ignora chi sia stato il primo ad accorgersene; forse un bambino, che si è messo a gridare per la meraviglia vedendo, per qualche istante,

le chiome degli alberi situati a nord del parallelepipedo tingersi di un rosso autunnale e quelle degli alberi a sud circonfuse di bianco e rosa. A meno che non sia stata una coppia di innamorati, sorpresi di udire un concerto di campanelle tintinnanti venire dal fogliame a est dei platani, cui sembrava rispondere un soffio grave e potente da ovest. O uno sportivo stupito di cogliere, lungo un asse intermedio rispetto ai precedenti, effluvi di rose e pompelmi da un lato e di nocciole e mostarda dall'altro. In pieno inverno questi fenomeni non potevano passare inosservati. Il pandemonio tornò ad essere la regola, ma almeno c'era finalmente qualcosa da studiare: gli

statistici, sempre pronti a esercitare la loro arte, osservarono che Hal 2 emetteva segnali sotto forma di coppie di opposti, la cui comparsa non era sistematicamente sincronizzata, ma era tale che l'osservazione di uno degli elementi della coppia permetteva di prevedere a colpo sicuro cosa sarebbe spuntato sul lato opposto. Dopo qualche giorno, questi fenomeni cessarono e comparvero dei diagrammi da una parte e dall'altra del parallelepipedo. Qualche istante dopo, un uccello d'un arancione sfavillante spiccava il volo dal lato rivolto a nord, mentre da sud, con un potente battito di ali, si alzava un uccello dalle piume turchesi. Ogni 5.391 secondi, con una regolarità che non

conosceva eccezioni, comparivano i digrammi. Non si vedevano sempre gli uccelli che ne fuoriuscivano e ci vollero diversi giorni per accorgersi che a volte, senza che si capisse come, essi raggiungevano le chiome degli alberi, invisibili, ma lasciando udire, da un lato, canti fatti di trilli acuti e, dall'altro, note più basse e modulate come quelle di un cuculo. Una terza caratteristica venne scoperta da una cuoca dei dintorni che ogni giorno portava i pasti agli scienziati: ella si accorse che tanto da una parte quanto dall'altra si diffondeva un odore di muschio e miele, o un delicato profumo di violetta, associato a una punta d'aglio.

Dopo qualche mese, si ebbe la ragionevole certezza che non ci fosse altro da individuare e che queste tre coppie di fenomeni erano le uniche a ripetersi periodicamente. A parte il piccolo dettaglio che, una volta individuate due coppie di fenomeni, la terza non si manifestava. Come se l'uccello dalle tre caratteristiche non ne svelasse più di due prima di sparire per sempre.

Naturalmente vennero formulati numerosi tentativi di spiegazione, ma tra tutte le teorie che godevano dei favori del pubblico, una ottenne un successo senza limiti. In sintesi, essa supponeva che all'interno del monolito, in una

dimensione occulta, una piega dello spaziotempo – non se ne sapeva niente, ma suonava bene – si nascondesse un Deus ex machina, detto il Grande giardiniere, più raramente il Grande uccellatore, così come altre volte si parlava del Grande orologiaio. Alcuni scienziati, meno inclini alle derive botanico-religiose, parlarono più prudentemente di variabili locali nascoste: in altri termini, di un programma informatico o biologico contenuto nel cuore dell'artefatto che avrebbe emesso quelle coppie di uccelli obbedendo a una programmazione originaria che implicava che essi si rivelassero sempre sotto forma di coppie di opposti il loro piumaggio, il

loro canto, o il loro profumo. Altri ipotizzarono una comunicazione istantanea tra i volatili che consentisse quella stupefacente complementarità delle loro proprietà. Un fisico più arguto degli altri fece osservare che un semplice argomento di teoria degli insiemi avrebbe potuto perlomeno far propendere per le teorie locali o per quelle non locali. Quegli uccelli, fece notare, sono arancioni o blu, cantano come fringuelli o come cuculi, ed emanano un profumo di miele o di violetta. Queste tre dualità sono verificate, continuò, e danno luogo a otto possibili combinazioni. Le si può riunire sotto la forma di una disuguaglianza che sfrutterà ad esempio il fatto che gli

uccelli arancioni che cantano come fringuelli emanano un profumo di miele o di violetta. Oppure, attraverso lo studio statistico degli strani volatili del giardino, si giunge alla conclusione assurda che gli uccelli arancioni che cantano come fringuelli sono più numerosi degli uccelli che emanano profumo di miele e cantano come fringuelli sommati agli uccelli arancioni che sanno di violetta.

Ciò significa, concludeva egli laconicamente, che non ci sono più variabili nascoste nel monolito. Gli uccelli acquisiscono le loro proprietà e dettano via via quelle dei loro gemelli. La sua tesi venne accolta con un certo

malcontento, ma nessuno trovò argomenti da opporgli. La teoria del Grande giardiniere venne provvisoriamente accantonata.

## **Alcune obiezioni di Einstein all'assunto della non località**

Il famoso principio di incertezza di Heisenberg, che è alla base della meccanica quantistica, non avrebbe potuto vedere la luce in un'epoca più incerta di quella in cui volgevano al termine gli «anni folli», appena prima della crisi mondiale del 1929 e dell'ascesa del nazismo. Neanche il suo nome di battesimo è sfuggito agli imprevisti del tempo, visto che si tentò

poco dopo di sostituirlo – con limitato successo geografico – con quello di «principio di indeterminazione», in modo da prestare meno il fianco a interpretazioni arrischiate.

Durante questo periodo travagliato, alcuni fisici scrutano con perplessità, a volte con ripugnanza, le stranezze della teoria dei quanti. Einstein, soprattutto, non l'apprezza affatto. In nome di cosa una particella sarebbe privata, in primo luogo, di una posizione nello spazio e, in secondo luogo, di un vettore velocità (una direzione e una velocità di spostamento)? Come accettare che essa sia solo una semplice probabilità di acquisire l'una o l'altra concretizzazione

di tale posizione o di tale vettore velocità in occasione di una misurazione? I critici si consolano supponendo che i concetti assurdi della meccanica quantistica siano semplicemente il riflesso di un'insufficienza, di un'incompletezza che un giorno o l'altro verrà colmata. Einstein tenta di assestare un colpo mortale alla teoria dei quanti. Nel del 1935 egli presenta con i suoi colleghi Boris Podolsky e Nathan Rosen quello che prenderà poi il nome di «paradosso EPR»<sup>42</sup>.

Il problema sollevato dai tre è decisivo: immaginate, essi dicono, un sistema formato da due oggetti

quantistici che abbiano interagito e poi si siano separati; secondo la teoria quantistica esso è descritto da una funzione d'onda unica, che esprime certe leggi di conservazione. Ne consegue, essi fanno osservare, che se si misura la posizione (o la velocità) di uno di questi oggetti, si conoscerà immediatamente la posizione (o la velocità) del secondo, e ciò senza perturbarlo con una misurazione. Essi concludono pertanto che le posizioni e le velocità dei due oggetti quantistici sono ben definite prima della misurazione, in ragione di un «principio di realtà» che essi formulano così: «Se, senza perturbare in alcun modo un sistema, si può prevedere con certezza il valore di una quantità

fisica, esiste un elemento di realtà fisica che corrisponde a tale realtà». Si parlerà in seguito di «variabili nascoste locali» per designare quegli elementi di realtà ignorati dalla teoria quantistica. Qualche mese più tardi Niels Bohr risponde in modo sottile, ma non troppo chiaro a quell'articolo<sup>43</sup>. La controversia si spegne poco a poco nell'arco di qualche anno, in mancanza di esperimenti in grado di far prevalere uno dei punti di vista antagonisti. Ciò non impedisce a Einstein, nel 1947, di continuare a brontolare, in una lettera al collega Max Born, contro quella «azione fantomatica a distanza», risultato implicito del fatto che la misurazione della posizione (o della velocità) di una

particella sembra concretizzare istantaneamente, o in ogni caso a una velocità superiore a quella della luce, la stessa proprietà per un'altra particella potenzialmente molto distante dalla prima.

Negli anni Cinquanta il fisico angloamericano David Bohm raccoglie il testimone e tenta di elaborare una teoria rivale della meccanica quantistica. Egli si interessa a una situazione in cui le variabili continue che sono la posizione e la velocità sono sostituite da proprietà che possono prendere solo uno dei due valori, ad esempio lo spin di certi oggetti quantistici<sup>44</sup>. Nel 1957 pubblica

assieme al fisico israeliano Yakir Aharonov un primo progetto di esperimento su delle cosiddette particelle di *spin*  $\frac{1}{2}$ . John Bell, un fisico irlandese che lavora al Cern (Organizzazione europea per la ricerca nucleare) riflette sulla questione. Egli dimostra che se gli spin di queste particelle sono definiti prima della loro misurazione, le correlazioni tra i risultati delle misurazioni, effettuate seguendo direzioni diverse dell'asse dello spin, devono obbedire statisticamente a una certa disuguaglianza<sup>45</sup>. Ma la meccanica quantistica predice che, per alcune di tali direzioni, la disuguaglianza deve essere violata e che si troveranno delle

correlazioni statistiche troppo forti.

Il caso delle particelle di spin  $\frac{1}{2}$ , come gli elettroni, i protoni e i neutroni, corrisponde bene a quello degli uccelli del nostro piccolo apologo. La migliore illustrazione della «disuguaglianza di Bell», in questo caso, si deve a Bernard d'Espagnat<sup>46</sup>. Ma quasi tutti i primi esperimenti sono stati effettuati su fotoni, che non hanno uno spin propriamente detto, ma una *polarizzazione*. La formula della disuguaglianza, allora, è più complicata e più difficile da dimostrare. A tale riguardo si può far riferimento, ad esempio, al nostro libro precedente<sup>47</sup>.

All'idea di Bohm e alla disuguaglianza di Bell in Francia non viene prestata quasi nessuna attenzione; praticamente solo d'Espagnat ne fa menzione<sup>48</sup>. Negli Stati Uniti, al contrario, l'idea si fa strada. Un primo esperimento viene effettuato nel 1972 da Stuart Freedman e John Clauser, e dà ragione alla meccanica quantistica. Ne seguono altri che confermano le previsioni della meccanica quantistica in linea generale, ma non sempre: si tratta di esperimenti non molto precisi. Un giovane fisico francese Alain Aspect, affronta il problema, coraggiosamente, dato che la maggioranza dei suoi colleghi disdegna questo tipo di argomenti, atteggiamento

che incontrerà anche Anton Zeilinger in Austria qualche anno più tardi. Ciò non impedirà a Clauser e a Zeilinger di ricevere nel 2010 il premio Wolf per la fisica – l'ultima tappa, forse, prima del Nobel.

Nel suo esperimento, Aspect immette atomi di calcio in un recipiente cilindrico in cui è stato fatto il vuoto. All'interno del recipiente si sprigionano due raggi laser che cedono energia agli atomi che li attraversano. Gli elettroni di calcio si eccitano, poi si diseccitano, emettendo ogni volta due fotoni «gemelli». Questi fotoni vengono emessi in tutte le direzioni, ma tra la moltitudine che viene emessa, alcuni si infilano in

due tubi disposti da una parte e dall'altra del cilindro e che conducono a delle apparecchiature che ne misurano la polarizzazione. La lunghezza totale del dispositivo è di tredici metri e ogni fotone percorre quindi più di sei metri, il che non ha niente di microscopico.

Anche se nessuno dei partecipanti all'esperimento di Aspect si chiamava Alice o Bob, usiamo questi due personaggi (come è ormai abitudine fare) per chiarire un po' questo esperimento. La misurazione della polarizzazione dà  $+1$  o  $-1$ . Alice misura la polarizzazione del fotone partito verso sinistra seguendo due direzioni  $A$  e  $A'$ ; Bob fa altrettanto per il fotone

partito verso destra. Non si può effettuare al tempo stesso la misurazione per  $A$  e  $A'$ , né per  $B$  e  $B'$ . Le sole misurazioni simultanee possibili sono quattro: per  $A$  e  $B$ , per  $A$  e  $B'$ , per  $A'$  e  $B$  e per  $A'$  e  $B'$ . Indichiamo con  $a$  il valore trovato per  $A$ , con  $a'$  quello per  $A'$ , con  $b$  quello per  $B$  e con  $b'$  quello per  $B'$ . Il valore di  $a$  può essere uguale solo a  $+1$  o  $-1$ , e lo stesso vale per  $a'$ ,  $b$  e  $b'$ . Con dati statistici sufficienti si trovano i valori medi dei prodotti  $ab$ ,  $ab'$ ,  $a'b$  e  $a'b'$ , ossia  $E(ab)$ ,  $E(ab')$ ,  $E(a'b)$  e  $E(a'b')$ . La disuguaglianza di Bell in questo caso si scrive:

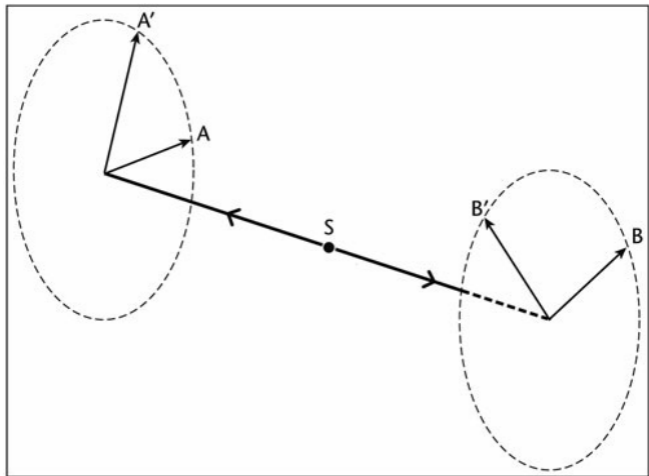


Figura 17.

$$|E(ab) - E(ab') + E(a'b) + E(a'b')| < 2$$

Ora, secondo la teoria quantistica, la quantità  $|E(ab) - E(ab') + E(a'b) + E(a'b')|$  può essere superiore a 2, e,

per certe combinazioni delle direzioni A, A', B e B', addirittura arrivare a  $2\sqrt{2}$ . Nel 1981 Aspect e la sua équipe ottengono una violazione fino ad allora mai osservata<sup>49</sup>: 2,70.

Sebbene sembri a priori incongruo, si può supporre che le apparecchiature di misurazione della polarizzazione si informino l'una con l'altra, attraverso segnali misteriosi, delle rispettive regolazioni e che modifichino di conseguenza i risultati che daranno. Tuttavia, esse non possono comunicare a una velocità superiore a quella della luce. L'équipe di Aspect introduce allora un dispositivo molto rapido per permettere di modificare la direzione di

misurazione dopo che i fotoni hanno lasciato la fonte. Niente da fare. La disuguaglianza viene sempre violata. Bisogna imputare il fenomeno all'aspetto periodico del dispositivo? Neppure: altri utilizzeranno in seguito dispositivi aleatori, sempre con lo stesso risultato.

Quali conclusioni trarre da tutto ciò? Se la disuguaglianza di Bell viene violata, ciò vuol dire che un fotone non porta in sé niente che fissi il valore dalla polarizzazione che verrà misurata: non vi sono variabili nascoste locali. Ma se per una coppia di fotoni gemelli si misura la polarizzazione lungo la stessa direzione, si trova sempre lo

stesso valore per entrambi. Tutto avviene come se la prima misurazione effettuata fissasse istantaneamente il valore che si troverà per il secondo fotone<sup>50</sup>, quella che Einstein definiva «un'azione fantomatica a distanza». Come se il concetto di separazione spaziale fosse scomparso per questi due fotoni, da cui l'espressione «non località» utilizzata per indicare questa proprietà misteriosa.

Tredici metri, nel caso dell'esperimento di Aspect, sono già una distanza macroscopica. Ma questo misterioso fenomeno si attenua con la distanza? Due esperimenti effettuati tra il 1997 e il 1998 dimostrano che non è

così. All'Università di Innsbruck, Zeilinger e i suoi collaboratori riprendono l'esperimento di Aspect su una distanza di quattrocento metri, introducendo dei cambiamenti rapidi e aleatori che escludono che un fotone possa essere informato della configurazione che troverà il suo gemello. Da parte sua, Nicolas Gisin e la sua équipe dell'Università di Ginevra realizzano un esperimento simile in cui dei fotoni vengono emessi da Ginevra mediante fibre ottiche, alcuni in direzione del villaggio di Bernex, gli altri verso quello di Bellevue, a undici chilometri da Bernex. Stesso risultato. Da notare che Gisin non ha utilizzato un dispositivo del tipo di Aspect per

misurare le polarizzazioni dei fotoni gemelli, ma ha fatto interferire questi ultimi in un interferometro di Franson, che ne combina due di Mach-Zehnder, uno per ciascun fotone. Ma, come quello di Aspect, questo esperimento fornisce una prova sperimentale della non località del nostro universo.

Ma cosa ne è delle altre particelle? Questa strana gemellanza (il termine consacrato ormai è *entanglement*) è riservata ai fotoni? Nel 1976 un esperimento effettuato con dei protoni presso il Centro di studi nucleari di Saclay da M. Lamehi-Rachti e W. Mittig indicava una violazione della disuguaglianza di Bell, ma con una

precisione insufficiente. A Innsbruck (Tirolo) come Boulder (Colorado), in particolare, vengono utilizzati comunemente atomi ionizzati *entangled* in esperimenti preliminari all'eventuale realizzazione di computer quantistici. Si tratta quindi di una proprietà generale degli oggetti quantistici.

Ed essi non sono, o comunque non solo, microscopici! Le correlazioni constatate in questi esperimenti sono correlazioni tra risultati visibili e leggibili, forniti da apparecchiature di dimensioni rispettabili, e testimoniano di un legame incomprensibile tra oggetti perfettamente macroscopici. Come scrive D'Espagnat: «A proposito del

teorema di Bell, un errore di comprensione che si commette spesso consiste nel credere che le disuguaglianze che egli tira in ballo riguardano delle quantità legate – sotto forma di proprietà – alle cose stesse»<sup>51</sup>. Dopo aver fornito qualche dato sugli esperimenti effettuati alla maniera di Aspect sulla polarizzazione dei fotoni, e aver citato le critiche filosofiche secondo cui non ne deriva automaticamente la non località, egli conclude:

Bisogna sapere che queste critiche mancano completamente il bersaglio, perché il teorema di Bell non ha per oggetto quantità che si suppone posseggano i fotoni. In realtà è per pura

comodità di linguaggio che si parla di fotoni o di altre «particelle». I nomi che figurano nelle disuguaglianze che qui entrano in gioco (e chiamate «risultati di misurazione» conformemente all'uso) sono dei semplici risultati di osservazione. Sono – tralasciando ogni interpretazione in termini di valori posseduti da delle «grandezze» – i nomi dei «clic» registrati dalle apparecchiature di rilevazione.

Con ciò D'Espagnat non esprime una mancanza di fiducia nella teoria quantistica, ma vuol dire che la disuguaglianza di Bell è definitivamente verificata sperimentalmente. Principale conseguenza: l'universo è non locale, in che significa, tra l'altro, che solo un'altra teoria non locale potrebbe sostituire la meccanica quantistica.

Come dice ancora D'Espagnat:

Oggi sappiamo che uno dei suoi principali «avatar», la non località, resterà certamente vera anche qualora il formalismo quantistico dovesse un giorno venire sostituito da un altro più efficace.

Ecco esattamente ciò che cercava Bohm: una teoria basata su *variabili nascoste non locali*, solo che la sua non è più efficace della meccanica quantistica in generale e perde terreno nel campo relativistico delle grandi velocità.

Alain Aspect ha affrontato tutti questi temi nella memorabile conferenza (già citata) da lui tenuta all'Istituto di astrofisica di Parigi il 2 maggio 2007<sup>52</sup>.

Pur non essendo particolarmente incline alla metafisica, egli ha comunicato all'uditorio i suoi interrogativi:

Vi è un conflitto tra la fisica quantistica e la concezione del mondo alla maniera di Einstein. [...] Ciò obbliga a rivedere radicalmente un certo numero di concetti che potremmo avere nella nostra testa, consciamente o inconsciamente. [...] Bisogna riconoscere che la fisica quantistica possiede in sé una strana proprietà, che alcuni chiamano non località e che altri preferiscono chiamare olismo.

Interrogativi che aveva raccolto assieme al suo collega Philippe Grangier in un libro collettivo uscito nel 2005<sup>53</sup>:

Ci si è a volte dovuti chiedere quale fosse

il concetto da abbandonare, tra la località da una parte e il realismo dall'altra. Per parte nostra, sembra difficile vedere questi due concetti come indipendenti: come concepire delle realtà fisiche indipendenti per due sistemi separati spazialmente ma che resterebbero in contatto attraverso un'interazione istantanea, superluminale? Per noi la non località della meccanica quantistica – spesso presentata come la conclusione della violazione delle disuguaglianze di Bell – corrisponde a una negazione in blocco della visione realista locale del mondo: i fotoni gemelli *entangled* non sono due sistemi distinti dotati di due copie identiche di uno stesso insieme di parametri. Una coppia di fotoni *entangled* deve essere considerata come un sistema unico, inseparabile, descritto da uno stato quantistico globale, impossibile da scomporre in due stati

relativi a ciascuno dei due fotoni: le proprietà della coppia non si limitano all'unione delle proprietà dei due fotoni. Per sottolineare questa caratteristica del formalismo quantistico, che contrasta con una visione realista locale, si può parlare di «olismo quantistico».

Conclusione di Jean-Louis Basdevant e Jean Dalibard, entrambi professori di fisica all'École polytechnique: «Abbiamo delle risposte sperimentali, quantitative a degli interrogativi che sfiorano la metafisica»<sup>54</sup>.

Di qui la spinta a mettersi a indagare, oltre che nella fisica quantistica, anche nella metafisica propriamente detta.

## Ping-pong e teletrasporto

Ogni giocatore di ping-pong sa dare un effetto alla pallina, ossia imprimerle un movimento di rotazione su se stessa che ne modificherà la traiettoria e il rimbalzo: il taglio, il topspin e il sidespin sono gli effetti più praticati. In inglese non si dice «effetto», ma «spin». A livello internazionale questo è anche il termine utilizzato per designare una proprietà analoga degli oggetti quantistici, elettroni, protoni o neutroni, ad esempio. Ma quando si decide di misurare lo spin di un elettrone seguendo un certo asse, si trova sempre che ruota attorno a quell'asse, in un senso di rotazione o nell'altro, e quindi

non attorno a un altro asse, come se si piegasse alla nostra scelta, o piuttosto come se l'asse di rotazione non fosse definito prima della nostra misurazione. L'analogia con la pallina da ping-pong non finisce qui. In effetti, la matematica dello spin di un elettrone può essere rappresentata da un punto segnato sulla superficie di una pallina da ping-pong. Se si sceglie un sistema costituito da tre diametri della pallina perpendicolari tra loro, lo stato dello spin dell'elettrone sarà rappresentato dal vettore (il segmento orientato) che parte dall'intersezione  $O$  tra i tre diametri (il centro della pallina) e arriva al punto  $M$  segnato sulla superficie.

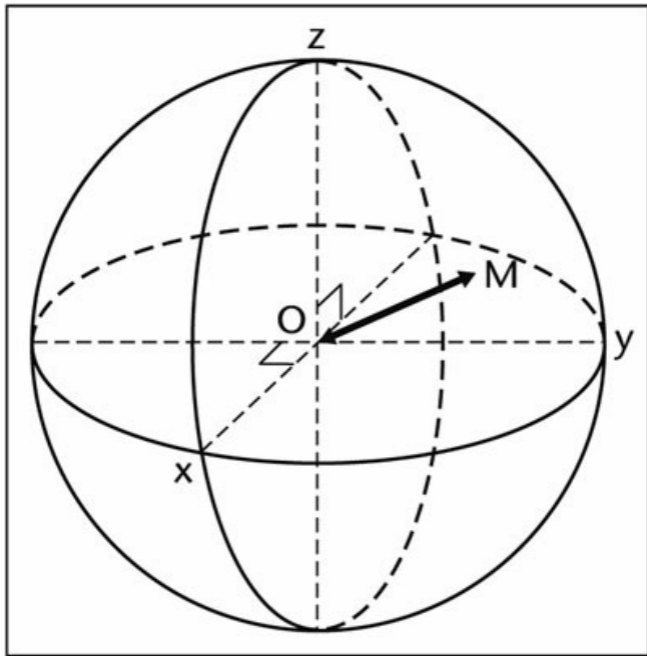


Figura 18.

La sfera così rappresentata è detta sfera di Bloch, dal nome del fisico

svizzero Felix Bloch. Se si effettua una serie di misurazioni dello spin seguendo l'asse delle  $z$  (asse verticale nella figura riportata qui sopra) su una «popolazione» di elettroni tutti corrispondenti al punto  $M$  segnato sulla pallina, diciamo per semplificare che si troverà il valore  $+1$  (se l'elettrone sembra ruotare in un certo senso) o il valore  $-1$  (se sembra ruotare nell'altro senso)<sup>55</sup>. Se associamo lo spin  $+1$  all'orientamento positivo dell'asse delle  $z$ , la media statistica di questi  $+1$  e  $-1$  è pari al coseno dell'angolo  $\theta$  tra l'asse delle  $z$  e il vettore  $OM$ . Ad esempio, se  $\theta = 60^\circ$ , ci saranno tre volte più  $+1$  che  $-1$ , e la media sarà  $0,5$ . Lo stesso per l'asse delle  $x$  e per l'asse delle  $y$ .

Pertanto il vettore  $OM$  rappresenta il valore medio delle misurazioni dello spin effettuate lungo le tre direzioni  $Ox$ ,  $Oy$  e  $Oz$ .

Si noti che una volta che la misurazione è stata effettuata per l'asse delle  $z$ , se la si ripete lungo lo stesso asse si ottiene sempre lo stesso risultato,  $+1$  o  $-1$ . Nei termini della meccanica quantistica, si direbbe che l'elettrone non smette più di ruotare nello stesso senso attorno allo stesso asse. Ma se si effettua una nuova misurazione dell'elettrone lungo un asse leggermente inclinato verso  $Oz$  c'è una piccola probabilità di trovare il risultato opposto ( $-1$  o  $+1$ ). E se la nuova

misurazione viene effettuata seguendo l'asse  $Ox$  o  $Oy$ , o qualsiasi asse situato nel piano definito da  $Ox$  e  $Oy$ , vi è una probabilità su due di trovare  $+1$  o  $-1$ . Ecco perché sopra abbiamo specificato la «popolazione» di elettroni su cui vengono effettuate le misurazioni; ogni elettrone deve essere misurato una sola volta.

Ipotizziamo ora che due sperimentatori, Alice e Bob, creino nel loro laboratorio una coppia di elettroni *entangled*, A e B, poi che Bob viaggi fino ai confini del mondo portando con sé l'elettrone B dentro una scatola concepita affinché esso non subisca alcuna modifica e conservi il suo stato quantistico. Alice e Bob hanno

convenuto di usare lo stesso sistema di assi ortogonali  $O_x$ ,  $O_y$  e  $O_z$ . A un certo punto arriva Charles che trova Alice in laboratorio e le affida un elettrone C chiedendole di «teletrasportarlo» a Bob, ossia di fare in modo che lo spin di B diventi identico a quello di C. A tale scopo, Alice accoppia C e A, poi effettua su questa coppia di elettroni quella che viene chiamata una «misurazione di Bell». Se indichiamo con  $[A+\rangle$  lo stato dello spin di A quando esso assume valore  $+1$ ,  $[A-\rangle$  quando assume valore  $-1$ , e altrettanto per C, vi sono solo quattro risultati possibili per la misurazione di Bell effettuata sulla coppia C e A:

$$[C+\rangle [A-\rangle - [C-\rangle [A+\rangle$$

$$[C+\rangle [A+\rangle - [C-\rangle [A-\rangle$$

$$[C+\rangle [A+\rangle + [C-\rangle [A-\rangle$$

$$[C+\rangle [A-\rangle + [C-\rangle [A+\rangle$$

Per semplicità, chiamiamo i risultati 0, 1, 2, e 3.

Alice allora telefona a Bob e gli comunica il risultato che ha trovato. Se è 0 Bob non fa niente, il suo elettrone è già nello stato di spin che aveva quello di Charles quando è arrivato al laboratorio da Alice. Se è 1, Bob fa ruotare il suo elettrone di  $180^\circ$  attorno all'asse delle x. Se è 2, stessa cosa attorno all'asse y. Se è 3, stessa cosa attorno all'asse delle z. Ogni volta l'elettrone di Bob si ritrova nello stato di spin iniziale dell'elettrone di Charles.

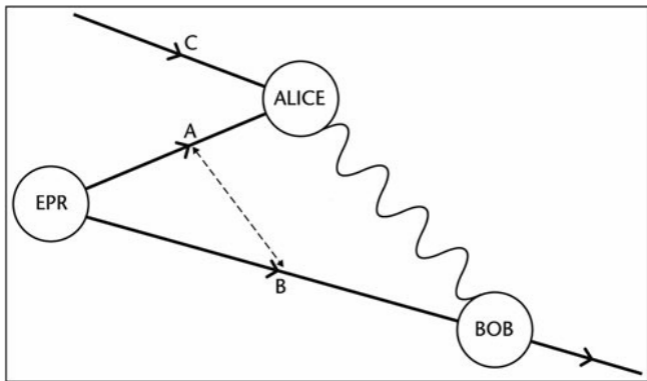


Figura 19.

È qui che le cose si fanno interessanti. Per definire la posizione di un punto su una sfera occorrono per esempio due angoli, l'angolo  $\theta$  – formato dal vettore  $OM$  con l'asse  $Oz$  – e l'angolo  $\varphi$  – formato con l'asse  $Ox$  dalla proiezione  $Om$  del vettore  $OM$  sul piano definito

dagli assi  $Ox$  e  $Oy$ :

Ma per fissare esattamente la posizione di un punto preso a caso su una sfera occorre un'infinità di cifre. Se limitiamo la precisione e ci accontentiamo di dieci cifre «significative» si dovrà per esempio scrivere  $\theta = 31^{\circ}56871164$  e  $\varphi = 19^{\circ}723562$ .

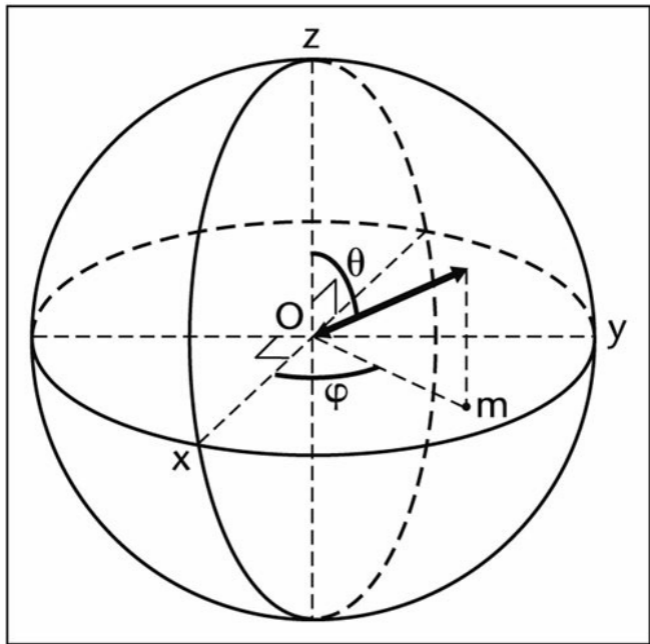


Figura 20.

Ma Alice ha trasmesso una sola cifra presa fra una lista di quattro: 0, 1, 2, e 3

– che si scrivono su base binaria 00, 01, 10 e 11. Sono quindi bastati quattro bit perché lo spin dell'elettrone B si allineasse con una precisione infinita sullo stato iniziale dello spin dell'elettrone C, che può trovarsi a una distanza molto grande. Roger Penrose scrive a riguardo:

In termini classici ordinari ci sarebbe stato bisogno delle informazioni contenute nella scelta senza restrizioni di un punto in un continuo: strettamente parlando, un'infinità di cifre per una precisione perfetta!<sup>56</sup>.

Le prime esperienze non sono state fatte su particelle di spin  $\frac{1}{2}$ , ma su fotoni che non hanno uno spin propriamente detto,

ma una proprietà analoga detta «polarizzazione». La matematica è un po' diversa, ma il risultato è lo stesso: con le informazioni contenute in appena quattro bit si può allineare esattamente la polarizzazione del fotone di Bob su quella del fotone di Charles. Il primo esperimento in assoluto è stato realizzato nel 1997 da un'équipe diretta dal fisico austriaco Anton Zeilinger<sup>57</sup>. Successivamente, Zeilinger ha effettuato numerosi esperimenti sul teletrasporto e altri aspetti sorprendenti della meccanica quantistica. Egli è autore di un libro assai originale<sup>58</sup> in cui è riuscito a illustrare, senza dimostrazione matematica, i concetti e i risultati sperimentali quantistici più contrari al

nostro senso comune.

Per gli oggetti quantistici dotati di spin, gli esperimenti di teletrasporto sono stati realizzati anche con degli atomi ionizzati, invece che con degli elettroni. Nel 2004 un'équipe austriaca diretta da Rainer Blatt (dell'Università di Innsbruck) e un'équipe americana diretta David Wineland (National Institute of Standards and Technology, Boulder), ne hanno effettuati alcuni su distanze molto brevi. E nel 2008, presso il Joint Quantum Institute dell'Università del Maryland, è riuscito un esperimento con atomi ionizzati su una distanza di un metro, un'autentica prodezza tecnologica<sup>59</sup>.

## **Il computer quantistico, una potenza fenomenale!**

La differenza tra l'unità d'informazione classica (il bit) e quella quantistica (il qubit) può essere illustrata da una pallina da ping-pong al centro della quale sia stata inserita una minuscola fonte luminosa. Questa fonte materializza l'informazione classica: se è spenta, la pallina è opaca, il bit è uguale a 0; se è accesa, la superficie traslucida della pallina diventa luminosa, il bit è uguale a 1 (esso può assumere solo due valori).

Invece l'informazione quantistica è rappresentata dalla geometria

dell'insieme della superficie della pallina (è in effetti l'immagine utilizzata in precedenza per la sfera di Bloch). Un punto su questa sfera definisce la probabilità di ottenere  $-$  o  $+$  (d'ora in avanti  $|0\rangle$  o  $|1\rangle$ ) come risultato della misurazione dello spin lungo un asse qualsiasi della sfera. Tale punto è definito da due angoli  $\theta$  e  $\varphi$  che possono variare in modo continuo, il che equivale a dire che il qubit contiene una quantità infinita di informazioni. Tuttavia, se si sceglie un asse e si effettua una misurazione (necessariamente quantistica) dello spin si trovano solo i valori  $|0\rangle$  o  $|1\rangle$ ; come nel caso del bit classico, i valori possibili sono solo due. A priori, non si

è avuto nessun vantaggio rispetto alla nostra minuscola luce (di cui possiamo ora dimenticarci).

Precisiamo di passaggio che se matematicamente un qubit è una sfera di Bloch, fisicamente esso corrisponde a certi oggetti quantistici: fotoni<sup>60</sup> o atomi ionizzati, allo stato attuale della tecnica. Come utilizzare tutte le informazioni del qubit in un computer quantistico? In realtà, se perdiamo l'essenziale di queste informazioni quando guardiamo, i qubit possono trasmettersi benissimo integralmente, per combinazione, *entanglement* o teletrasporto<sup>61</sup>.

L'idea del computer quantistico

consiste pertanto nell'assemblare un certo numero di qubit e lasciare che se la sbrogliano da soli, guidandoli verso certe operazioni più o meno elementari, ma senza mai badare ai risultati intermedi e ottenere i risultati finali con l'aiuto di sofisticati algoritmi matematici<sup>62</sup>.

Le operazioni in questione vengono effettuate al momento del passaggio dei qubit attraverso delle *porte logiche*. Poiché non vi è riduzione della funzione d'onda al momento di questi passaggi, la sovrapposizione degli stati di ogni particella sussiste e si può parlare di calcolo massicciamente «parallelo», un po' come per i calcoli che utilizzano

simultaneamente più computer accoppiati. David Deutsch si spinge oltre, suggerendo che tali calcoli potrebbero effettivamente essere realizzati in più mondi paralleli... In ogni modo, la potenza teorica di questo tipo di computer è fenomenale e aumenta esponenzialmente con il numero dei qubit. Un computer quantistico costituito da cento qubit potrebbe gestire circa  $1^{30}$  dati informatici, ossia mille miliardi di miliardi di miliardi.

Ma ne siamo ancora lontani, e per il momento il numero di qubit gestiti perfettamente può essere calcolato sulle dita di due mani. Ciò dipende essenzialmente dai fenomeni di

decoerenza che si producono tanto più rapidamente quanto maggiore è il numero dei qubit. D'altra parte, i prototipi realizzati con qualche qubit non sono affatto delle miniature: attorno al nucleo effettivamente minuscolo formato dai qubit stessi si dispiegano cavi, voluminose apparecchiature di regolazione e manipolazione, computer classici che le pilotano, eccetera. Niente a che vedere con una pulce elettronica standard.

Non ci si aspetta di ottenere degli autentici computer quantistici prima di qualche decennio. Ma esistono già delle applicazioni di quella che alcuni chiamano la seconda rivoluzione

quantistica. Ad esempio, nella crittografia vengono già trasmesse delle chiavi di decifrazione secondo una procedura di *distribuzione quantistica* che utilizza la non località in modo tale che qualsiasi intrusione volta a impossessarsene viene immediatamente scoperta. Per il momento, questa tecnica sorprendente è utilizzata soprattutto per le scommesse on line su Internet.

## **Libertà quantistica**

Conseguenza imprevista, l'assenza di variabili nascoste locali, unita all'*entanglement*, potrebbe testimoniare della nostra assoluta libertà! È la tesi del fisico Anton Zeilinger e dei

matematici John Conway, inventore del celebre «gioco della vita» (che simula la vita e la morte delle cellule secondo un modello in cui, come nel gioco del Go, ogni pezzo viene collocato una volta per tutte e il suo destino è determinato da un insieme di regole semplici), e Simon Kochen.

In una conversazione pubblicata il 16 febbraio dal settimanale svizzero «Die Weltwochen», Zeilinger affronta il caso di una particella dalla posizione e dalla velocità indeterminate.

ZEILINGER: Quando uno guarda al microscopio e la localizza, la particella dà una risposta: «Eccomi qui!», il che vuol dire che la posizione diventa una realtà in

quel momento. Prima la particella non aveva affatto una posizione. [...] Ma la risposta che dà la natura è completamente aleatoria.

GIORNALISTA: Io scelgo il dispositivo di misurazione e la natura sceglie il risultato?

ZEILINGER: Esatto, io lo chiamo le due libertà: prima la libertà dello sperimentatore di utilizzare il dispositivo di misurazione, che dipende dal mio libero arbitrio; e poi la libertà della natura di darmi la risposta che preferisce. L'una è condizione dell'altra. È una proprietà molto sottile. È un peccato che i filosofi non dedichino più a tempo a rifletterci sopra.

Egli aggiunge che il solo modo di evitare questa conclusione è quello di considerare il mondo completamente «predeterminato» (si può pensare alla

funzione d'onda universale di Everett).

Conway e Kochen entrano ancor più nei dettagli ed elaborano un *teorema del libero arbitrio* allo scopo di dimostrare definitivamente la correttezza di questa affermazione. Il loro teorema parte da un teorema iniziale di Simon Kochen ed Ernst Specker (1967), che rappresenta più o meno, per le particelle di spin 1, l'equivalente della disuguaglianza di Bell per quelle di spin  $\frac{1}{2}$ . Poi Conway e Kochen passano a considerare una coppia *entangled* di particelle di spin intero e sviluppano la loro dimostrazione. Dato che essa presenta una certa complessità matematica, rimandiamo all'appendice per una sua

disamina.

In ultima analisi, questo teorema sottolinea che vi è qualcosa di più nell'indeterminismo quantistico: il libero arbitrio delle particelle, come quello degli esseri umani, non potrebbe essere ridotto all'aleatorietà delle probabilità classiche. Come scriveva Sartre: «Siamo soli, senza scuse. Un fatto che esprimerei dicendo che l'uomo è condannato ad essere libero»<sup>65</sup>.

Il logico e matematico francese Jean-Yves Girard elabora questa opposizione tra concetti quantistici e probabilità classiche in modo differente e più astratto, confrontando «spazi coerenti

probabilistici» e «spazi coerenti quantistici» nel suo libro *Le point aveugle* (2006). Egli giunge alla conclusione che i tentativi, battezzati presuntuosamente come «logica quantistica», effettuati nel secolo scorso per sottomettere la meccanica quantistica alla nostra logica sono destinati al fallimento, e che dovrebbe essere invece la nostra logica a piegarsi alla teoria quantistica. Egli scrive: «La logica quantistica è, in effetti, una specie di punizione inflitta alla natura, colpevole di non obbedire ai pregiudizi dei logici...Viene da pensare a Serse quando fa sferzare il mare che aveva travolto il suo ponte di barche»<sup>64</sup>.

## 6. A RITROSO NEL TEMPO

## **Il vecchio dittatore**

Sprofondato nella sua poltrona di pelle, il vecchio dittatore aveva gli occhi socchiusi. Attorno a lui le voci dei suoi familiari ronzavano come uno

sciame di mosche in un'estate torrida. Di solito si divertiva a indovinare i loro dialoghi senza ascoltarli, affidandosi unicamente ai sottili cambiamenti di intonazione e di intensità che segnavano immancabilmente le loro meschine falsità. Se c'era una cosa di cui era sicuro, dopo trent'anni di regno assoluto, quella era la sua capacità di scoprire la minima menzogna. Era una cosa ai limiti della divinazione, gli aveva detto un giorno, con fervore mistico, la sua prima moglie che aveva poi finito per lasciarlo. Ma oggi le bassezze della sua piccola corte lo lasciavano indifferente. Ne conosceva i segreti più minuti; perfino i più occulti, come il piano ordito dal suo

secondogenito per impossessarsi del potere, dopo la sua morte, in barba a quel babbeo del fratello maggiore. O cosa si celava dietro gli sguardi indifferenti di suo genero nei confronti della giovane sorella della moglie. No, niente di tutto ciò aveva importanza oggi. L'uomo che stava per essere ammesso in sala gli aveva fatto pervenire una proposta insolita. Se non fosse stato il fisico responsabile del programma nucleare, non avrebbe prestato attenzione alle sue elucubrazioni. Quell'uomo non era un folle. Senza di lui, suo nipote, che dirigeva ufficialmente il dipartimento incaricato, non sarebbe mai riuscito a concepire le armi che garantivano il suo

potere. Quell'uomo era prezioso, tanto prezioso che lui stesso l'aveva cancellato dalla lista delle «foglie morte», rosario di proscritti in cui un imbecille troppo zelante lo aveva inserito con moglie e figli qualche anno prima. Troppo tardi per la sua famiglia, ma l'uomo era sopravvissuto, senza mostrare alcun risentimento. Egli si era poi risposato e aveva avuto degli altri figli. Segno se non altro di saggezza politica.

Ancor prima che la sua guardia del corpo, un uomo dal collo taurino che vegliava sulla sua sicurezza da quasi trent'anni, gli mormorasse qualcosa all'orecchio sollevò le palpebre e

osservò il longilineo cinquantenne che avanzava leggero verso di lui: il fisico non sembrava provare timore. Senza il minimo imbarazzo salutò l'anziano uomo che posava su di lui uno sguardo di basilisco. Con un cenno il dittatore l'invitò a sedersi su una sedia opportunamente avvicinatagli dalla guardia del corpo.

«Tu pretendi di aver trovato il modo di dialogare con il futuro».

«Di dialogare no, rispose il fisico».

Il dittatore sollevò una palpebra con fare interrogativo.

«Mi stai facendo perdere del tempo?».

«Sta a te giudicare. Ho il modo di ottenere un sì o un no. Questo non è

ancora un dialogo, ma potrebbe esserti utile».

«Hm, disse il dittatore. Tu sei al corrente, immagino, delle voci secondo cui so infallibilmente se qualcuno mi sta dicendo la verità».

«Sì, e immagino che anche tu abbia udito quella secondo cui io sarei il più grande dei tuoi sapienti».

«Hm, riprese il vecchio, rispondi: stai per annunciarmi che puoi inviare qualcuno nel futuro?».

«No, ma posso inviare un messaggio che giungerà al destinatario in dieci o cento anni».

«Questo so farlo anch'io».

«Certo, ma la risposta del destinatario sarà nelle tue mani non appena il

messaggio sarà stato inviato».

«E come farai?», chiese il vecchio stringendo gli occhi.

«I corpuscoli di luce, come quelli di materia, sono dei minotauri: metà onde e metà particelle. Effettuerò un esperimento in un labirinto fatto su misura per loro».

«E poi?».

«Finché impedisco a chiunque di conoscere il loro percorso, esse si comportano come onde e lasciano delle interferenze, come il mostro cretese lasciava le ossa dei giovani ateniesi. Se mando Teseo a cercarlo, localizzo il Minotauro e le ossa spariscono. La presenza o l'assenza di interferenze è il segnale che attendo».

«Che rapporto c'è con il futuro?».

«Posso creare delle coppie di minotauri che hanno la particolarità di essere legati tra loro come si dice lo siano i gemelli. I primi vengono diretti attraverso due percorsi verso una lastra che ne registra gli impatti. I secondi viaggiano in un labirinto fatto di due corridoi all'interno dei quali un sistema di specchi farà in modo che rimbalzino anche per dieci anni se occorre; alla fine di tale decennio qualcuno deciderà o meno, per esempio abbassando una leva, di cancellare per metà di essi ogni traccia che permetta di indicare quale delle due vie hanno preso.

La bellezza e la stranezza della cosa è che i loro omologhi che avranno

completato il loro periplo dieci anni prima avranno anticipato questa scelta, come se potessero scegliere il loro passato in funzione dell'avvenire. Non chiedermi di spiegare questo fatto. È così. Di conseguenza, se desideri che faccia questo esperimento, ti verrà data la risposta a una domanda che tu avrai stabilito. Avrai letto nel futuro».

Il dittatore lo guardò a lungo senza dire una parola, poi disse: «Ti giocheresti la vita, la tua e quella dei tuoi cari? Benino si occuperà di te e della tua nuova famiglia se mi menti, disse indicando con un cenno del mento l'uomo dal collo taurino che lo guardava sereno».

«Senza esitazione».

«Molto bene, avrai il denaro necessario. Hai sei mesi di tempo. Fai costruire il tuo apparecchio. Incaricherò qualcuno di aprire tra dieci anni la busta sigillata in cui avrò scritto la mia domanda. Che io sia morto o no, seguirà le mie istruzioni».

Ventitré settimane dopo il fisico invitò il dittatore a raggiungerlo nel suo laboratorio.

«L'ora della verità», dice laconicamente il vecchio entrando nella stanza con il suo guardaspalle.

Il fisico annuisce e schiaccia un pulsante che fa richiudere la porta del laboratorio.

«Cominciamo! Lo schermo di controllo è alla tua sinistra», dice

indicandoglielo. «Riproduce l'impatto dei fotoni. Mettiti sulla poltrona e sii paziente: occorre che il numero di coincidenze sia sufficientemente cospicuo».

«Aspetterò».

Dieci minuti dopo il dittatore riprende la parola: «Ti sei chiesto quale domanda ho inserito nella mia lettera?».

«Suppongo che abbia a che fare con la tua morte».

«No, cioè, non del tutto».

Poi il vecchio torna a tacere.

«Ecco», dice infine il fisico, «credo sia passato un tempo sufficiente».

«Fammi vedere!», dice imperioso il suo interlocutore.

Il fisico scopre allora lo schermo su

cui appare un conglomerato di punti.

«Cosa significa?», chiede il dittatore, «sono le tue interferenze?».

«Non necessariamente», risponde il fisico. «Per verificare bisognerà attendere dieci anni».

«Mi hai mentito?», domanda il dittatore incredulo.

«No, risponde il fisico, il risultato è impresso su questa lastra, ma per svelarne il segreto, ossia per conoscere il codice di decifrazione mi occorrono delle cifre che saranno accessibili solo tra dieci anni. In cambio, posso confermarti che stai per morire, perché ho installato nella tua poltrona una barretta di cobalto nel momento in cui sei entrato nella stanza, sei stato

irradiato costantemente e la dose letale è oramai stata ampiamente superata. Proverai delle vertigini, nausea e morirai con dolore. Per quanto mi riguarda sono morto da molto tempo, quando hai condannato la mia famiglia. Nella tua agonia pensa tuttavia alla bellezza della cosa: da qualche parte su questo schermo c'è veramente un'informazione che viene dal futuro».

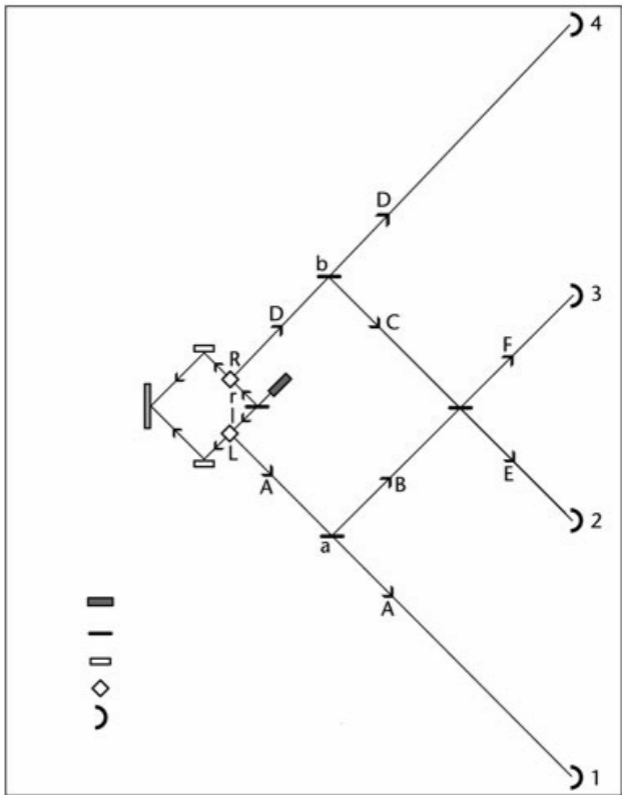
## **La gomma quantistica a scelta ritardata**

All'inizio degli anni Ottanta, poco dopo che John Wheeler aveva esposto la sua idea di esperimento a «scelta ritardata», e mentre l'esperimento di

Aspect era ancora in corso di realizzazione, due fisici, Kai Drühl e Marlan O. Scully hanno concepito un progetto estremamente ambizioso che combinava al tempo stesso la scelta ritardata e il paradosso EPR dei fotoni gemelli. Il primo dei due lavorava a Monaco presso l'istituto Max Planck di ottica quantistica; il secondo all'Istituto di ottica moderna dell'Università del Nuovo Messico, ad Albuquerque. Essi hanno formulato una proposta di esperimento, pubblicata nell'aprile del 1982 sull'autorevole rivista «Physical Review A»<sup>65</sup>.

Ed eccone lo schema, non semplicissimo ma che cercheremo di descrivere nel modo migliore possibile.

Una fonte – in sostanza un laser – emette dei fotoni uno a uno, a intervalli di tempo molto distanziati affinché si possa sapere, una volta che abbiano raggiunto un bersaglio sul quale vengono rilevati, di quale fotone si tratta – il n. 5, il n. 111 o il n. 3.957.



## Figura 21.

Subito dopo aver lasciato la fonte, i fotoni arrivano su un separatore e prendono simultaneamente due vie, la via  $l$  e la via  $r$  – secondo la meccanica quantistica se non si effettua su una delle vie una misurazione che obbliga il fotone a esservi o a non esservi, esso si trova in effetti sulle due vie al tempo stesso. Sulla via  $l$  si trova un *convertitore*  $L$ , che trasforma ciascun fotone in due fotoni gemelli: il *fotone segnale* – che continua lungo la sua direzione iniziale – e il *fotone passivo* – che viene deviato verso un'altra direzione. Il fotone segnale prosegue il suo cammino fino a raggiungere uno specchio che lo riflette su uno schermo.

Lo stesso avviene per la via r con il convertitore R.

Se non fosse stato inserito un convertitore lungo il percorso dei fotoni iniziali non ci sarebbe stato alcun modo di forzarli a scegliere una delle strade, e sullo schermo si sarebbero osservate delle *interferenze*. Ma ora, grazie ai fotoni passivi, possiamo sapere quale via è stata presa e non si osserva di fatto alcuna interferenza dell'insieme.

Qual è quindi il problema? È che se, molto tempo dopo che i fotoni segnale sono arrivati sullo schermo, si forzano i fotoni passivi a interferire, la metà dei fotoni segnale già sullo schermo, e che possiamo identificare uno per uno,

disegnano a loro volta (senza spostarsi, è l'osservatore che scopre questa figura grazie alla numerazione dei fotoni) una figura d'interferenza, vale a dire che i fotoni sono stati forzati a posteriori a imboccare le due strade al tempo stesso. A tale scopo è sufficiente inserire sulle traiettorie dei fotoni passivi dei separatori a e b, che ne dirigano la metà verso uno stesso separatore c; questi fotoni passivi prenderanno allora la via E o la via F verso i rilevatori 2 e 3 senza che sia possibile dire se un fotone che arriva su 2 o su 3 viene da a o da b. Si sarà in tal modo riusciti a far interferire la metà dei fotoni passivi. E, in un colpo solo, a creare una figura d'interferenza tra gli impatti dei fotoni

segnale sullo schermo. E si può decidere di inserire i separatori a, b e c molto tempo dopo che tali impatti si sono verificati. Se non fossero stati inseriti, tutti i fotoni passivi sarebbero stati rilevati su 1 e su 4, ogni fotone segnale avrebbe preso una sola strada e avremmo saputo quale. Ma poiché essi vengono inseriti, la metà dei fotoni segnale dimentica la strada presa e, nel passato, ne prende un'altra (che è in realtà una strada doppia). In questo modo è stato possibile modificare *la storia* dei fotoni; il futuro ha cambiato il racconto che viene fatto del passato.

L'esperimento non è stato facile da realizzare; i suoi risultati (conformi alle

previsioni stupefacenti della teoria quantistica) sono stati pubblicati il 3 gennaio 2000 sulla «Physical Review Letters» con il titolo *Gomma quantistica a «scelta» ritardata*<sup>66</sup>. Cosa curiosa, questo articolo non ha suscitato molte reazioni finché non è stato notato dal celebre fisico americano Brian Greene, seguito poco dopo dal suo altrettanto eminente collega israeliano Yakir Aharonov.

Nel suo libro intitolato *La trama del cosmo*<sup>67</sup>, Brian Greene ha descritto con chiarezza e maestria i principi e la realizzazione dell'esperimento e ne ha tratto delle conclusioni filosofiche. In un articolo dal titolo provocatorio apparso

nel 2005, *Il tempo e il quanto: cancellare il passato e modificare il futuro*<sup>68</sup>, Yakir Aharonov e M. Suhail Zubairy citano Greene:

Questi esperimenti assestano un colpo magistrale ai nostri concetti convenzionali di spazio e tempo. Un avvenimento accaduto anni dopo un altro e a una distanza considerevole si rivela ciononostante essenziale per la nostra descrizione di quest'ultimo. Comunque lo si possa giudicare dal punto di vista classico (quello del senso comune) be'... è completamente folle! Naturalmente ciò deriva dal fatto che il giudizio classico non è adatto a un universo quantistico.

In seguito ai successivi esperimenti di Marlan O. Scully e poi di Jean-François

Roch e forse grazie alla pubblicità fatta da Brian Greene, la questione del tempo è diventata una pietra di paragone nella meccanica quantistica. È da questo che si può giudicare il valore di una teoria. E, per il momento, si può dire che nel campo della fisica la storia non dipende senza dubbio solo dal passato, ma può essere influenzata anche dal futuro. Si può anche associare questa constatazione alle strane correlazioni tra particelle apparentemente separate nello spazio, tutte cose verificate nell'esperimento di Aspect e in quelli successivi, e che hanno fatto dire ad alcuni che in realtà l'universo è «non locale». Viene pertanto da domandarsi se per caso non cerchiamo di applicare i

concetti di «spazio» e di «tempo» a una realtà ultima che li ignora.

## **«Causalità retrograda»**

Olivier Costa de Beauregard (1911-2007) non aveva scelto di dedicarsi alla fisica. Dopo aver intrapreso la carriera di ingegnere aeronautico, nel 1940 entra nella sezione «Fisica teorica» del Cnrs e comincia a lavorare sotto la direzione di Louis De Broglie. Nel 1947 egli formula un'ipotesi più che arditamente: la causalità non va obbligatoriamente dal passato al futuro, ma può anche procedere in direzione inversa. Tesi che non riscuoteva affatto il gradimento del suo direttore: «Questo discorso, devo

riconoscerlo, non seduceva Louis De Broglie. Mme Tonelat, che aveva assistito alla conversazione mi ha chiesto, una volta usciti dalla stanza se avevo colto lo sguardo che mi aveva lanciato Louis De Broglie, come se dubitasse della mia salute mentale...»<sup>69</sup>. L'ipotesi viene tuttavia pubblicata nel 1953<sup>70</sup>. Essa permette a Costa de Beauregard di spiegare il paradosso Epr senza fare ricorso alla non località e rispettando, secondo lui, la relatività: è sufficiente che la prima particella misurata invii nel passato un segnale che forza, al momento del loro accoppiamento, l'altra particella ad assumere un valore conforme alle previsioni della meccanica quantistica.

In altri termini egli sostituisce la stranezza della non località con quella della «causalità retrograda». Abbiamo davvero guadagnato qualcosa nel cambio?

Sebbene l'idea di Costa de Beauregard faccia pensare a certe modalità di calcolo dell'elettrodinamica quantistica, in cui si può considerare il positrone (l'elettrone positivo) come un elettrone normale che risale il corso del tempo, essa finora non ha incontrato molto successo. Forse perché colui che l'aveva concepita si interessava troppo da vicino alla parapsicologia... Solo due fisici americani, William Davidon e soprattutto John Cramer, hanno sostenuto

attivamente idee analoghe, Cramer elaborando addirittura una teoria più dettagliata e complicata, da lui battezzata «teoria della transazione».

Ma con gli esperimenti della scelta ritardata e soprattutto della gomma quantistica a scelta ritardata questa idea comincia ad essere presa in considerazione. Già il «semplice» teletrasporto quantistico pone dei problemi a Roger Penrose. Egli immagina un esperimento in cui conserva presso di sé una particella di spin  $\frac{1}{2}$  di una coppia *entangled* mentre uno dei suoi colleghi parte per Titano con l'altra particella. Una volta giunto, questi stabilisce un contatto telefonico.

Allora un amico passa da Penrose portandosi in tasca, come per caso, una particella di spin  $\frac{1}{2}$  e gli chiede di trasferire questo spin alla particella che si trova ora su Titano. Nessun problema, afferma Penrose, ed effettua il teletrasporto. Ma l'operazione non manca di lasciarlo perplesso:

Qualcosa di reale è stato trasmesso dal mio amico al mio collega, ma il canale classico<sup>74</sup> (di soli 2 bit) è troppo stretto per fornire lo spazio che lasci passare l'infinità di bit rimanenti. Eppure vi è una connessione che stabilisce il legame. Essa consiste in una sezione breve tra me e il mio amico, una sezione lunga – che risale il tempo a ritroso – tra me e l'origine della nostra coppia EPR, e una sezione lunga che va da questo punto di origine fino al

mio collega su Titano. [...] Il problema, evidentemente, è che essa contiene una sezione che si estende per cinque anni nel passato!<sup>72</sup>

In termini più generali, Zeilinger ha di recente osservato che:

Sono possibili altre interpretazioni per spiegare la «bizzarria quantistica» – in particolare la natura delle interazioni che si svolgono in seno a una coppia di particelle *entangled*. Una di esse, ad esempio, ipotizza che un'osservazione abbia influenza sul «passato», di modo che una misurazione effettuata in un dato istante su una particella *entangled* determinerebbe le proprietà dell'altra al momento (tuttavia precedente!) della sua emissione...<sup>73</sup>.

Zeilinger non crede a questa interpretazione, ma a suo giudizio non può essere esclusa, né teoricamente, né sperimentalmente.

# CONCLUSIONI

L'idea di uno spazio che ci separi dagli oggetti o dagli esseri che non possiamo toccare con mano nasce spontanea. Noi pensiamo questa distanza, questo scarto che separa due amanti, due case, le rive di un fiume, o

la Luna e la Terra, senza rifletterci sopra due volte. L'idea insomma è così naturale che Immanuel Kant afferma nella *Critica della ragion pura* che «lo spazio è una rappresentazione a priori, necessaria, che sta a fondamento di tutte le intuizioni esterne». In altri termini, Kant considera lo spazio, e tra l'altro il tempo, come intuizioni pure, anteriori ad ogni esperienza e indipendenti dalle sensazioni. «Dubito», precisa tuttavia il filosofo di Königsberg, «che qualcuno abbia mai spiegato correttamente cosa è lo spazio»<sup>74</sup>. Fondamentalmente perché egli ritiene che si possa dire molto di un oggetto senza cercare di darne una definizione, ad esempio che:

Spazio e tempo sono *quanta continua*, perché non si può darne una parte senza chiuderla fra limiti (punti e istanti), e perciò, solo in guisa che la parte data sia a sua volta uno spazio o un tempo. Lo spazio dunque consta soltanto di spazi, il tempo di tempi<sup>75</sup>.

Centocinquant'anni dopo, questa non-definizione non funzionava più. Lo spaziotempo di Einstein aveva sfumato le differenze tra i due concetti, e non era che un assaggio dello sconvolgimento che si sarebbe prodotto. Il rapporto soggetto-oggetto è uscito malconco dall'apparizione della meccanica quantistica, e con esso il modello kantiano di uno spazio dato a priori.

Werner Heisenberg, che ha cercato di conciliare la filosofia kantiana e la meccanica quantistica, riferisce nella sua autobiografia di un'appassionata discussione tra la filosofa Grete Hermann, il fisico Carl Friedrich von Weizsäcker e lui stesso, avvenuta nel 1934. Come egli spiega:

Kant ha osservato in modo molto preciso come si acquisisce davvero la conoscenza sperimentale e credo che la sua analisi sia essenzialmente giusta. Ma quando stabilisce i concetti di spazio e tempo, e la categoria della «causalità», come degli a priori rispetto alla conoscenza sperimentale corre il rischio di farne degli assoluti e di pretendere che debbano manifestarsi sotto la stessa forma e con lo stesso contenuto in qualsiasi teoria dei

fenomeni fisici. Ma non è così, come dimostrano la teoria della relatività e la teoria quantistica<sup>76</sup>.

Sostituendo la questione dell'oggettività delle conoscenze, della causalità e della realtà del mondo al centro del dibattito epistemologico, i fondatori della meccanica quantistica hanno dovuto confrontarsi immediatamente con la teoria kantiana della conoscenza. Il meno che si possa dire è che non è stata una passeggiata. Dallo scontro Einstein-Bohr all'elaborazione di un criterio di demarcazione da parte dell'irlandese Bell, dall'esperimento di Aspect all'esplorazione della non località, la storia che a suo modo racconta il nostro libro è fatta di straordinarie prodezze

sperimentali e di tentativi infruttuosi di tornare al buon vecchio rapporto soggetto-oggetto.

Ma i fatti sono ostinati. Per provvisoria che possa essere, la conclusione è inevitabile. Il nostro universo, con il suo spazio, il suo tempo, i suoi oggetti, i suoi esseri, emerge da un altro universo, da un sostrato che sembra farsi beffe delle rappresentazioni necessarie care a Kant. Bernard d'Espagnat, uno dei primi in assoluto ad aver colto l'importanza di questo fenomeno, chiama tale sostrato «la realtà velata». Altri fisici e alcuni filosofi si sono impegnati in un dibattito metafisico sulla natura della realtà, sulla realtà o

meno dell'esistenza di tale sostrato e addirittura di noi stessi. Altri più pragmatici, come Serge Haroche, Nicolas Gisin, Anton Zeilinger o Jean-Michel Raimond – per citarne solo alcuni – esplorano instancabilmente questa nuova via, sia teoricamente che sperimentalmente, e sviluppano lungo il cammino quella che essi chiamano un'«intuizione quantistica». Grazie a loro oggi sappiamo che ci troviamo a cavallo di due universi totalmente differenti. Nel primo gli orologi fanno tic-tac e messaggi e messaggeri percorrono le loro strade a una velocità inferiore o uguale a quella della luce. Nel secondo lo spazio e il tempo sembrano essere ignorati, come nel

mondo di Alice e della Regina Rossa. Universi differenti, ma mutuamente indispensabili, se si crede al «teorema del libero arbitrio» di John Conway e Simon Kochen: se noi siamo liberi, anche le particelle lo sono, in una misura che non ha più nulla a che vedere con una dimensione probabilistica del caso. Senza dubbio è difficile concepire il legame che potrebbe esistere tra le particelle e noi. Di sicuro siamo molto lontani dal comprendere il passaggio tra i due mondi. Ma con il suo solo disvelamento la sottigliezza dell'indeterminazione quantistica si rivela ben più profonda di tutto ciò che abbiamo immaginato finora: una rivoluzione di enormi proporzioni ci

aspetta dietro l'angolo, e sarà  
certamente non locale!

# APPENDICI

# APPENDICE 1

## **L'esperimento di Afshar: è possibile eludere il principio di complementarità?**

Il fisico irano-americano Shahriar Afshar ha creduto nel 2004 di aver avuto ragione del principio di complementarità di Bohr. Egli pretendeva di aver messo alle corde con il suo esperimento il principio di

complementarità, secondo il quale un osservatore può scegliere di osservare un oggetto quantistico (fotone, elettrone, atomo, eccetera) sia come onda che come corpuscolo, ma mai sotto entrambe le forme al tempo stesso. Dato che il suo esperimento ha goduto di una certa celebrità fino ad oggi, ci è parso necessario illustrarlo nel dettaglio.

Afshar non utilizza un Mach-Zehnder, ma torna alle tradizionali fenditure di Young (in realtà usa dei «fori di spillo» al posto delle fenditure, senza che ciò alteri il principio). Egli invia un raggio laser su una lastra bucata da due «fori di spillo» che chiameremo «fori di Young». Più oltre, su uno schermo, egli osserverà delle interferenze – di forma

più complicata delle semplici strisce che si ottengono con le fenditure, ma poco importa. Se dopo la lastra viene inserita a una distanza sufficiente una lente ottica convergente, egli potrà spostare lo schermo fino a trovare la distanza alla quale su di esso si formano le immagini quasi puntuali dei due «fori di spillo». E poiché la lente rifocalizza tutta la luce su queste due immagini, non ci sono più interferenze; verrebbe da dire che i fotoni passati attraverso uno dei fori finiscono sull'immagine ottica del foro stesso. Se si toglie la lente le interferenze ricompaiono.

Siamo in grado di calcolare, nell'ipotesi ondulatoria, la probabilità

di presenza di un fotone in un piano parallelo alla lastra e collocato tra la lastra e la lente, quando i due fori di Young sono aperti (in realtà, non otturati) Ashfar ha concepito e realizzato una «griglia» dal disegno molto complicato, in cui le «barre» corrispondono alle zone in cui tale probabilità di presenza è molto bassa. Quando la colloca nella posizione del piano prescelto non accade niente: non si ha praticamente alcuna perdita di intensità luminosa per quanto riguarda le immagini dei fori di spillo sullo schermo. Se al contrario uno dei fori viene otturato, l'intensità luminosa dell'immagine del foro aperto diminuisce notevolmente. Afshar ne

deduce che, nel caso in cui i due fori sono aperti, il suo dispositivo permette di captare simultaneamente il carattere corpuscolare e ondulatorio della luce, mettendo nell'angolo il principio di complementarità.

Come si può confutare questa conclusione? In realtà il suo esperimento può essere paragonato a un esperimento con interferometro di Mach-Zehnder a scelta ritardata. In tale esperimento i fotoni emessi uno a uno possono essere raggruppati in due popolazioni distinte, costituite aleatoriamente: quella dei fotoni che passano per il secondo separatore, e quella in cui non c'è un secondo separatore. Studiando

separatamente ogni popolazione, si trovavano delle interferenze (quindi delle onde) per la prima popolazione, e unicamente dei corpuscoli per la seconda.

Nel caso dell'esperimento di Afshar, si può immaginare (senza poterlo realizzare sperimentalmente, al momento) un esperimento a scelta ritardata definendo le seguenti corrispondenze:

- i due fori di Young (Afshar)  $\langle V \rangle$  il primo separatore (Mach-Zehnder)
- l'assenza di lente (Afshar)  $\langle V \rangle$  il secondo separatore (Mach-Zehnder)
- la lente (Afshar)  $\langle V \rangle$  l'assenza del secondo separatore (Mach-Zehnder)

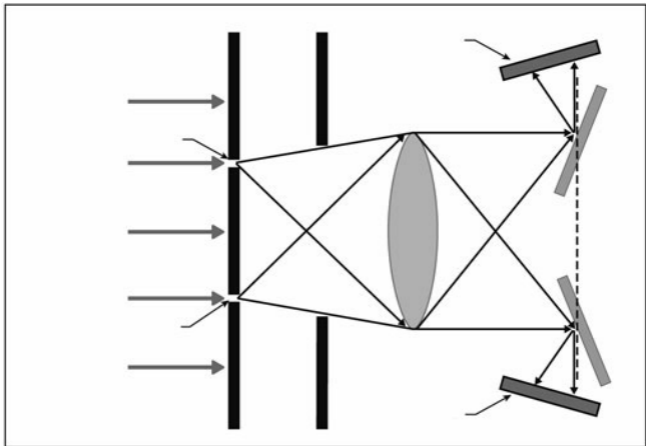


Figura 22. Fonte Wikipedia.

In entrambi i casi (Afshar e Mach-Zehnder), si suppone che i fotoni siano inviati uno per uno

Per il Mach-Zehnder, in assenza del secondo separatore, ognuno dei due

rilevatori ha una probabilità su due di rilevare il fotone, come si osserva statisticamente. Ciò ci porta a dire che, in questo caso, il fotone passa per un ramo del percorso o per l'altro (esperimento «quale percorso?»), e che lo si è misurato in quanto corpuscolo. Ma se si inserisce il secondo separatore tutti i fotoni finiscono sul medesimo rilevatore. E, facendo variare la lunghezza del tragitto ottico lungo uno dei due rami si può ottenere una ripartizione sinusoidale degli impatti sui due rilevatori, che corrisponde alle interferenze nel caso delle fenditure o dei fori di Young. Con il secondo separatore si osserva quindi il fotone sotto forma di onda.

Ma si può inserire o togliere il secondo separatore molto dopo che il fotone abbia superato il primo (da cui l'espressione «scelta ritardata»). Si constata allora che si hanno sempre interferenze per i fotoni che hanno incontrato sul loro cammino tale dispositivo in funzione, mentre non vi sono interferenze per quanto riguarda gli altri. La conclusione è molto chiara: il fotone viaggia sempre in una sovrapposizione di stati «ramo 1» + «ramo 2» (o «foro 1» + «foro 2» nel caso Afshar/Young); è la misurazione quantistica effettuata nel dispositivo di rilevazione che dà l'apparenza – quando non viene inserito un secondo separatore – che esso sia passato per un ramo o per

l'altro, e che quindi si comporti come un corpuscolo (la rilevazione da parte di uno dei rilevatori impedisce la rilevazione da parte dell'altro; come si vedrà più avanti è la «non località» della misurazione quantistica).

Passiamo all'esperimento di Afshar, ricordando che i fotoni vengono emessi uno per uno. La lente rifocalizza tutta la luce sulle immagini dei due fori di Young. Collochiamo dei rilevatori di fotoni lì dove si formano queste immagini. È evidente, per ragioni di simmetria, che tali rilevatori avranno ciascuno una probabilità su due di rilevare il fotone e ci si troverà nella situazione Mach-Zehnder senza la

seconda lamina separatrice.

Se invece di inserire il secondo separatore come in un esperimento del tipo Mach-Zehnder si toglie la lente, si ritroveranno le interferenze sullo schermo. Supponiamo che Afshar abbia trovato un dispositivo per togliere o inserire aleatoriamente la sua lente, con la stessa efficacia temporale degli sperimentatori dell'équipe dell'ENS Cachan per quanto riguarda il secondo separatore. Si troveranno due popolazioni di fotoni, una a carattere ondulatorio, l'altra a carattere corpuscolare, e si torna esattamente alla stessa discussione che nel caso Mach-Zehnder, con la stessa conclusione:

prima della misurazione (o, per riprendere una terminologia obsoleta ma eloquente, prima della «riduzione del pacchetto di onde»), il fotone occupa tutto lo spazio che gli viene concesso (ossia tutto lo spazio occupato dall'«onda» nella descrizione classica).

Ma la occupa con una certa «probabilità di presenza». E siamo perfettamente in grado di calcolare, in tale area, gli spazi in cui la probabilità di presenza del fotone è nulla o quasi. La griglia concepita da Afshar ricopre solo questi spazi, e non serve quindi praticamente a niente: essa non bloccherà che un numero trascurabile di fotoni. Questo spiega il risultato:

nell'esperimento di Afshar così come è stato effettivamente realizzato, con una lente fissa (e non rapidamente rimuovibile come nel nostro «esperimento mentale») la misurazione ha verificato solo il carattere corpuscolare del fotone, che fa scattare uno dei due rilevatori, e l'inserimento della griglia non è servito essenzialmente a niente, solo a realizzare praticamente lo stesso esperimento che si ottiene quando è assente. La complementarità non è quindi stata violata.

# APPENDICE 2

## **Il teorema del libero arbitrio**

Se io sono libero, le particelle elementari lo sono anch'esse. Questa è la sostanza di uno strano teorema che si deve a due matematici di alto livello, John Conway e Simon Kochen. Ma prima di affrontarlo passiamo per un primo teorema dimostrato nel 1967 da Simon Kochen ed Ernst Specker, di cui

diamo una versione semplificata elaborata da Asher Peres<sup>77</sup>.

Supponiamo che una particella di spin  $1$ <sup>78</sup>, un mesone vettore, ad esempio, venga collocata al centro di un cubo di lato uguale a  $2$  (unità non precisata) e che si voglia misurare il valore del quadrato del suo spin lungo certe direzioni, definite da degli assi ricavati da un insieme di punti situati sulla superficie del cubo e diretti verso il centro. I punti sono scelti in modo che ciascun asse sia ortogonale almeno rispetto a due degli altri assi. A tale scopo, iscriviamo su ogni faccia del cubo un quadrato di lato  $\sqrt{2}$  concentrico rispetto ad essa, dai lati paralleli a

quelli della faccia, e consideriamo i vertici degli angoli del quadrato, il suo centro e i punti che dividono a metà ognuno dei lati; otteniamo così nove punti in totale, contrassegnati dai piccoli rombi riportati nella figura 23.

Dato che il cubo ha 6 facce, abbiamo 54 punti. Se aggiungiamo i punti che corrispondono al centro degli spigoli del cubo, che sono 12, otteniamo 66 punti. Ma ci si può limitare a 33, poiché ogni punto dell'insieme ha, in questo insieme, un punto simmetrico rispetto al centro del cubo, e si trovano entrambi sullo stesso asse. Immaginiamo di osservare il cubo da un punto di vista situato leggermente a destra e in alto, e

di limitarci alle facce anteriore, destra e superiore del cubo, come riportato nel disegno seguente con i 33 punti individuati:

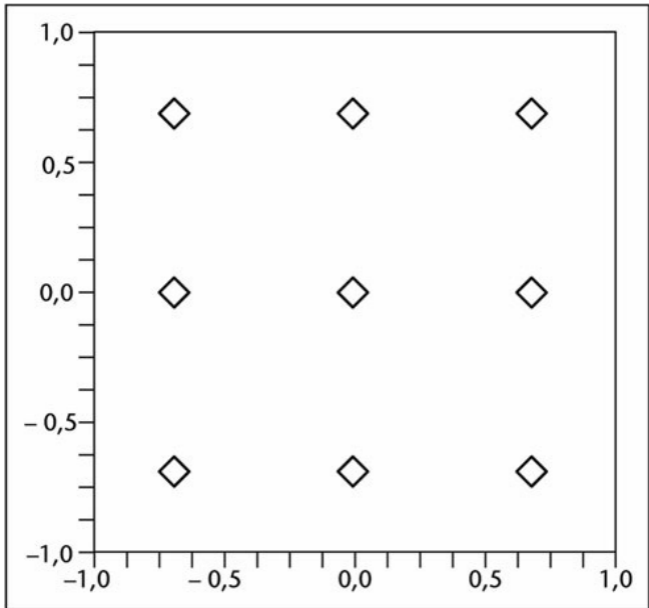


Figura 23.

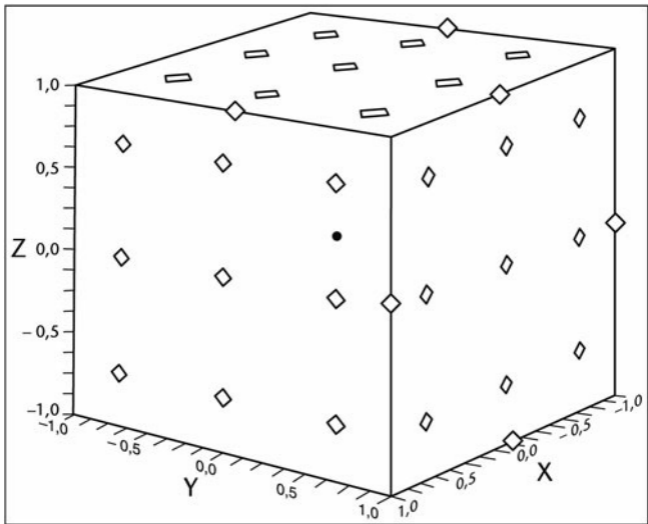


Figura 24.

Supponiamo che il valore del quadrato dello spin che si otterrà seguendo l'asse che congiunge uno di tali punti al centro del cubo sia

determinato prima della misurazione dalle proprietà intrinseche della particella, sia che esse siano «innate» (dovute alla natura stessa della particella), sia che siano «acquisite» (attraverso le sue interazioni con l'ambiente). La teoria quantistica impone che se si effettua la misurazione successivamente su tre assi ortogonali i risultati siano  $(0, 1, 1)$ , o  $(1, 0, 1)$  o infine  $(1, 1, 0)$ <sup>79</sup>; Conway e Kochen chiamano ciò «l'assioma SPIN». Prendiamo come primo punto il centro della faccia destra (punto in cui il rombo è contrassegnato con una croce qui di seguito) e supponiamo di aver trovato 0 per l'asse che origina da questo punto, che chiameremo «primo asse 0». Questo

asse è perpendicolare al piano che contiene i cinque punti del segmento che va dal centro dello spigolo posteriore della faccia superiore al centro dello spigolo anteriore, e i tre punti della verticale mediana del quadrato inscritto nella faccia anteriore (in tutto otto punti i cui rombi sono segnati in nero). Il centro del cubo è su questo piano, quindi gli assi che originano da questi otto punti sono ortogonali al «primo asse 0». Inoltre, nell'insieme di questi otto assi secondari, ognuno è ortogonale rispetto all'altro. Abbiamo quindi trovato otto punti dai quali originano degli assi per i quali il quadrato dello spin vale 1.

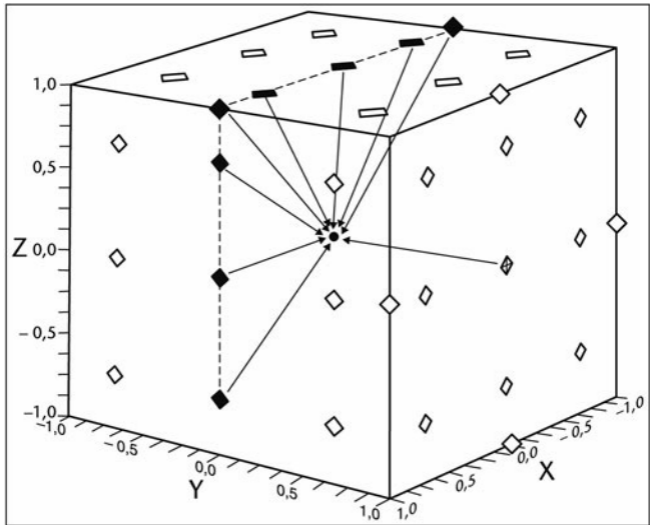


Figura 25.

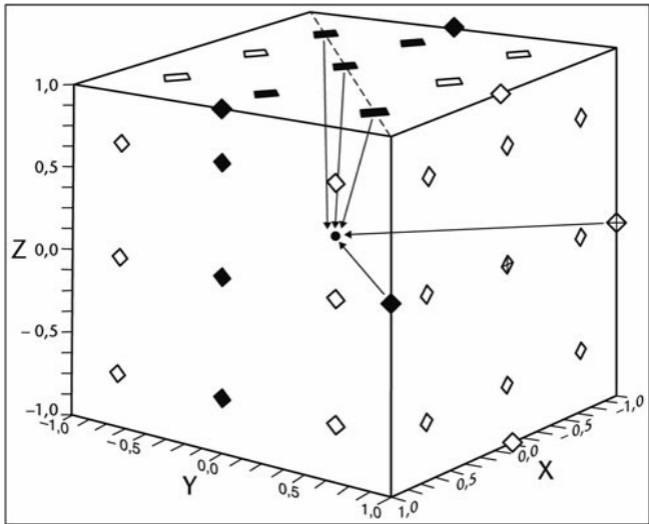


Figura 26.

Assegniamo ora il valore 0 allo spin misurato sull'asse che va dal punto situato a metà dello spigolo posteriore della faccia destra (segnato anch'esso

con una crocetta) al centro del cubo. Questo asse, il «secondo asse 0», è perpendicolare al piano definito dallo spigolo posteriore della faccia sinistra (che non si vede) e dallo spigolo destro della faccia anteriore. Questo piano taglia la faccia superiore nel senso di una delle sue diagonali, sulla quale si trovano tre punti rappresentati da un rombo, di cui quello centrale è già segnato in nero. La diagonale ha lunghezza pari a  $2\sqrt{2}$ , e la distanza tra i due punti segnati con i rombi non anneriti è pari a 2; il triangolo isoscele che ha per vertici questi due punti e il centro del cubo ha altezza pari a 1 ed è quindi rettangolo: gli assi che originano da questi due punti sono ortogonali tra

loro (e rispetto al «secondo asse 0»), e si possono annerire i due rombi. Il piano contiene lo spigolo destro della faccia anteriore; l'asse originato dal punto a metà di tale spigolo è quindi perpendicolare al «secondo asse 0», ma anche all'asse che va dal centro della faccia superiore al centro del cubo. Si può quindi annerire anche il rombo del punto a metà di tale spigolo.

Ora abbiamo quindi due punti contrassegnati da una crocetta ( $\text{spin} = 0$ ) e 11 punti dai rombi anneriti (quadrato dello  $\text{spin} = 1$ ). Possiamo continuare il gioco. Il piano definito dallo spigolo inferiore della faccia anteriore e lo spigolo posteriore della faccia superiore

taglia la faccia destra lungo una diagonale su cui si trovano tre rombi, di cui quello in mezzo è già contrassegnato da una crocetta. Se definiamo un «terzo asse 0» che parte dal centro del rombo in alto potremo annerire il rombo in basso. Si può proseguire fino a quando resta un solo punto per il quale non si conosce il quadrato dello spin lungo l'asse originato da esso. Ma allora non funziona più. Se si cerca di attribuire il valore 0 allo spin misurato lungo quest'asse, si troverà un altro asse ortogonale ad esso dotato a sua volta di valore 0 per lo spin, quindi una combinazione non ammessa (0, 0, 1). Se si cerca il valore 1 per il quadrato dello spin, si troveranno due assi ortogonali

tra loro e rispetto a tale asse che avranno anch'essi valore 1, una combinazione non ammessa (1, 1, 1).

Simon Kochen ed Ernst Specker avevano dimostrato questo teorema utilizzando 117 punti; come abbiamo appena visto Peres ne usa solo 33.

In generale si deduce da questo teorema che il valore del quadrato dello spin lungo l'asse prescelto non è definito dalle sole proprietà intrinseche della particella prima della misurazione; anche il contesto sperimentale esercita una sua influenza.

Il celebre matematico inglese John Conway e Simon Kochen si sono spinti

oltre. Nel 2006, essi hanno pubblicato il loro «teorema del libero arbitrio», elaborato a partire dalla versione presentata da Peres del teorema Kochen-Specker. Essi sono giunti a una conclusione ancora più stupefacente: se gli sperimentatori hanno la libertà di scelta, allora gli oggetti quantistici hanno una forma elementare di libero arbitrio.

## **Non località**

Conway e Kochen iniziano introducendo il paradosso EPR, e quindi la non località, in questa problematica. Come si è visto in un precedente capitolo, siamo in grado di effettuare

esperimenti di tipo EPR con dei fotoni o dei corpuscoli di spin  $\frac{1}{2}$ . Ma non siamo ancora in grado di realizzarne con particelle materiali di spin 1, il che non impedisce in alcun modo di concepirli.

Se si fanno interagire due particelle di spin 1 si ottiene a volte una coppia di particelle «gemelle», che chiameremo A e B. Inviamo queste particelle gemelle in due direzioni diverse. Per riprendere i nomi ormai divenuti classici, l'osservatore Alice misurerà il quadrato dello spin di A lungo tre assi ortogonali  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Se l'osservatore Bob misura il quadrato dello spin di B lungo un asse  $w$  parallelo a uno di questi tre assi e di orientazione identica, egli rileverà lo

stesso valore trovato da Alice per l'asse in questione. Questa è la «non località», prevista dalla teoria quantistica e già verificata sperimentalmente per i fotoni e le particelle di spin  $\frac{1}{2}$ . I fisici non pensano che possa andare diversamente per le particelle di spin intero. Conway e Kochan parlano a tale proposito di «assioma TWIN».

## **Relatività**

Conway e Kochen fanno allora entrare in gioco la relatività. Le due particelle, al momento della loro misurazione, sono in due zone diverse dello spazio, che possono anche essere molto distanti tra loro. Se le misurazioni

avvengono simultaneamente in un sistema di riferimento inerziale relativistico<sup>80</sup>, si può riprendere tutta l'argomentazione di Einstein, Podolsky e Rosen e concludere che la località è violata, che c'è una sorta di influenza a distanza fantomatica e istantanea. Per sfuggire a questa conclusione, affermano Conway e Kochen, si potrebbe supporre che tutto ciò che accade nell'universo è fissato in anticipo, discende da un piano implacabile stabilito all'origine (un qualcosa di equivalente alla predestinazione teologica). Ma i nostri due autori postulano che Alice e Bob scelgano liberamente gli assi lungo i quali effettuare le misurazioni e che il risultato delle misurazioni dell'uno sia

indipendente dalla scelta dell'altro.

Supponiamo che le particelle gemelle non abbiano questa libertà di scelta, e che i risultati che verranno trovati da ciascun osservatore dipendano dalla «storia» della rispettiva particella e dall'asse (o dagli assi) scelto per le osservazioni. Per storia della particella bisogna intendere l'insieme delle influenze che essa ha subito prima di essere misurata, influenze che non possono essere più veloci della luce<sup>81</sup>. Conway e Kochen indicano tale proprietà con l'espressione «assioma FIN» (FIN per finito)<sup>82</sup>. Alice sceglierà tre assi ortogonali  $x$ ,  $y$  e  $z$ , e Bob un asse  $w$ . Se Alice e Bob sono sufficientemente

distanti l'uno dall'altra , la scelta degli assi  $x$ ,  $y$  e  $z$  per Alice non può influenzare la particella B e quella dell'asse  $w$  da parte di Bob non può influenzare la particella A. Se l'asse  $w$  ha lo stesso orientamento di uno degli assi  $x$ ,  $y$  o  $z$ , il valore trovato da Alice per il quadrato dello spin lungo tale asse ( $z$ , ad esempio) sarà uguale a quello trovato da Bob lungo l'asse  $w$  (dato che le particelle A e B formano una coppia EPR). Ciò vuol dire che questo valore non dipende dalla scelta da parte di Alice degli assi  $x$  e  $y$  (che devono solo essere ortogonali all'asse  $z$  e tra loro, il che li definisce come dotati di una rotazione attorno più o meno all'asse  $z$ ). Supponiamo allora che Alice e Bob

prendano per gli assi  $z$  e  $w$  la successione delle 33 direzioni definite da Asher Peres. Poiché il valore trovato da Alice (e da Bob) lungo un asse dato non dipende dagli altri assi scelti, né da una eventuale «scelta» fatta dalla particella (è la nostra ipotesi di partenza), i valori trovati da Alice sui tre assi da lei esaminati saranno sempre, in virtù del teorema SPIN  $(0, 1, 1)$  o  $(1, 0, 1)$ , o  $(1, 1, 0)$ . Ma il teorema di Kochen-Specker-Peres dimostra che è impossibile.

Conclusione: la particella deve essere «libera» di rispondere «ciò che vuole» alla domanda che le viene posta. A meno che evidentemente non si

supponga, come abbiamo scritto in precedenza, che tutto è predeterminato, compresa la scelta che crediamo di fare misurando in questo o quel modo, idea respinta da Conway e Kochen.

Nella conclusione del loro articolo<sup>83</sup> Conway e Kochen riconoscono di aver parlato in modo provocatorio di «libero arbitrio» delle particelle. Tuttavia, essi affermano, queste particelle possiedono una forma elementare di libertà, che è alla base del carattere non deterministico della meccanica quantistica. Essi scrivono: «A dire il vero, è naturale supporre che questa libertà sia la spiegazione ultima della nostra stessa libertà». Il che sarebbe una

risposta fisico-matematica a uno dei più  
profondi interrogativi umani...

# NOTE

1. A. Aspect, *To Be or Not to Be Local*, in «Nature», vol. 446, 2007.

2. S. Ortolì – J.P. Pharabod, *Le Cantique des quantiques*, La Découverte, Parigi, 1984 (2007).

3. Si ricorda che un atomo di neon è composto da dieci protoni, dieci neutroni e dieci elettroni.

4. F. Shimizu – K. Shimizu – H. Takuma, *Double-slit Interference With Ultracold Metastable Neon Atoms*, in «Physical Review A», vol. 46, R17, 1992.

5. Sorta di movimento vorticoso, come quello di una palla da tennis, ma intorno a un asse non definito.

6.  $6,626 \cdot 10^{-34}$  joule al secondo.

7. S. Haroche – J.M. Raimond,

*Exploring the Quantum*, Oxford University Press, New York, 2006, capitolo 2.2.

8. S. Dürr – T. Nonn – G. Rempe, *Origin of Quantum-mechanical Complementarity Probed by a ‘Which Way’ Experiment in an Atom Interferometer*, in «Nature», vol. 395, 1998, pp. 33-37.

9. Del primo Eraclito sappiamo poco oltre al fatto che non si bagnava mai due volte nello stesso fiume, il che fa probabilmente di lui un grande viaggiatore.

10. N. Bohr, *Atomtheorie und die Naturbeschreibung*, Springer, Berlino, 1931.

11. B. d’Espagnat, *Traité de physique*

*et de philosophie*, Fayard, Parigi, 2002.

12. S. Haroche – J.M. Raimond, *Exploring the Quantum*, op. cit., capitolo 2.2.

13. A. Aspect, *Des objections d'Einstein aux photons jumeaux : une nouvelle révolution quantique?*, Institut d'astrophysique de Paris, 2 maggio 2007 (reperibile presso il sito del Cerimes: <http://www.cerimes.fr>).

14. Nel punto in cui è installato il primo separatore.

15. Il secondo separatore.

16. V. Jacques – E. Wu – F. Grosshans – F. Treussart – Ph. Grangier – A. Aspect – J.-F. Roch, *Experimental Realization of Wheeler's delayed choice experiment*, in «Science», n.

315, p. 966, 2007.

17. J.A. Wheeler, *Law Without Law*, in J.A. Wheeler – W.H. Zurek (a cura di), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, 1983.

18. R. Penrose, *The Road to Reality*, Jonathan Cape, Londra, 2004, capitolo 7.21.

19. Quelli con e senza il secondo separatore.

20. S. Haroche – J.M. Raimond, *Exploring the Quantum*, op. cit., capitolo 2.

21. David Hilbert, matematico tedesco (1862-1943).

22. Vladimir Fock, fisico russo (1898-1974).

23. Richard Feynman, fisico americano (1918-1988).

24. Ossia, presenta le stesse caratteristiche lungo tutto il raggio tracciato a partire dal centro (il protone).

25. E. Schrödinger, *Die Gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*, in «Naturwissenschaften», n. 23, 1935.

26. S. Haroche – J.M. Raimond, *Exploring the Quantum*, op. cit., capitolo 2.5.4.

27. J.L. Borges, *Il giardino dei sentieri che si biforcano*, in *Opere*, Mondadori, Milano, 2003, vol.1, pp. 700-701.

28. P. Byrne, *The Many Worlds of*

*Hugh Everett III*, Oxford University Press, New York, 2010, p. 26.

29. H. Everett III, “*Relative State*” *Formulation of Quantum Mechanics*, in «Review of Modern Physics», vol. 29, n. 3, luglio 1957.

30. Ossia, lo stato proprio dell’insieme oggetto quantistico-sistema di misurazione.

31. Ibidem.

32. P. Byrne, *The Many Worlds of Hugh Everett III*, op. cit., p. 304.

33. B.S. DeWitt, *Quantum Mechanics and Reality*, in «Physics Today», vol. 23, n. 9, settembre 1970.

34. Ivi, p. 308.

35. B. DeWitt – N. Graham (a cura di), *The Many-Worlds Interpretation of*

*Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1973.

36. D. Deutsch, *Quantum Theory, the Church-Turing Principle and the Universal Quantum Computer*, atti della Royal Society of London, vol. 400, 1985.

37. Intervista a D. Deutsch, *Le monde quantique*, in «Les Dossiers de la recherche», n. 29, novembre 2007.

38. R. Omnès, *Philosophie de la science contemporaine*, Gallimard, Parigi, 1994.

39. Ibidem.

40. Ibidem.

41. Ibidem.

42. A. Einstein – B. Podolsky – N. Rosen, *Can Quantum-mechanical*

*Description of Reality be Considered Complete?*, in «Physical Review», vol. 47, 1935, p. 777.

43. N. Bohr, *Can Quantum-mechanical Description of Reality be Considered Complete ?*, in «Physical Review», vol. 48, 1935, p. 696.

44. D. Bohm, *Quantum Theory*, Prentice Hall, Englewood Cliffs (NJ), 1951.

45. J.S. Bell, *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, in «Physics», n. 1, 1964, pp. 195-200.

46. B. D'Espagnat, *Théorie quantique et réalité*, in «Pour la Science», gennaio 1980.

47. S. Ortolì – J.P. Pharabod, *Le Cantique des quantiques*, op. cit.,

capitolo 4 e appendice.

48. B. D'Eespagnat, *Conceptions de la physique contemporaine*, Hermann, Parigi, 1965.

49. A. Aspect – P.Grangier – G. Roger, *Experimental Realization of Einstein Podolsky-Rosen Gedanken Experiment*, in «Physical Review Letters», vol. 49, n. 91, 1982.

50. Il che pone già un problema per la teoria della relatività, poiché ciò che si trova prima per un osservatore può trovarsi dopo per un altro.

51. B. D'Espagnat, *Traité de physique et de philosophie*, op. cit.

52. A. Aspect, *Des objections d'Einstein aux photons jumeaux: une nouvelle révolution quantique?*, conf.

cit.

53. A. Aspect – F. Bouchet – E. Brunet – C. Cohen-Tannoudji – J. Dalibard – T. Damour – O. Darrigol – B. Derrida – P. Grangier – F. Laloe – J.-P. Pocholle, *Einstein aujourd'hui*, EDP Sciences, Les Ulis, 2005.

54. J.L. Basdevant – J. Dalibard, *Mécanique quantique*, Éditions de l'École polytechnique, Palaiseau, 2003.

55. In realtà  $0 + h/2$  o  $0 - h/2$ , dove  $h$  è il quanto d'azione  $h$  diviso per  $2\pi$ ; si dice in tal caso che si ha a che fare con particelle di spin  $1/2$ .

56. R. Penrose, *The Road to Reality*, op. cit., capitolo 23.9, *Quantum Teleportation*.

57. D. Bouwmeester – J.W. Pan – K.

Mattle – M. Eibl – H. Weinfurter – A. Zeilinger, *Experimental Teleportation*, in «Nature», vol. 390, 1997, p. 575.

58. A. Zeilinger, *Dance of the Photons*, Farrar, Straus and Giroux, New York, 2010.

59. S. Olmschenk – D.N. Matsukevich – P. Maunz – D. Hayes – L.M. Duan – C. Monroe, *Quantum Teleportation Between Distant Matter Qubits*, in «Science», vol. 323, p. 5913, 2009, p. 486.

60. Che possono a loro volta essere rappresentati da una sfera di Bloch, si veda M. Le Bellac, *Le Monde quantique*, EDP Sciences, Les Ulis, 2010, capitolo 8.

61. Esistono anche progetti che non

utilizzano singoli oggetti quantistici, ma dei qubit su base collettiva: scatole quantistiche o circuiti superconduttori.

62. Ad esempio, l'algoritmo di Shor per i qubit *entangled*.

63. J.P. Sartre, *L'existentialisme est un humanisme*, Nagel, Parigi, 1946.

64. J.Y. Girard, *Le Point aveugle*, Hermann, Parigi, 2006.

65. M.O. Scully – K. Drühl, *Quantum Eraser: a Proposed Photon Correlation Experiment Concerning Observation and 'Delayed Choice' in Quantum Mechanics*, in «Physical Review A», vol. 25, n. 4, pp. 2208-2213.

66. Y.H. Kim – R. Yu – S.P. Kulik – Y. Shih – M.O. Scully, *Delayed 'Choice' Quantum Eraser*, in «Physical

Review Letters», vol. 84, 2000, pp. 1-5.

67. B. Greene, *La trama del cosmo*, Einaudi, Torino, 2006.

68. Y. Aharonov – M.S. Zubairy, *Time and the Quantum: Erasing the Past and Impacting the Future*, in «Science», vol. 307, n. 5711, 11 febbraio 2005, pp. 875-879.

69. O. Costa de Beauregard, *Le Temps déployé*, Le Rocher, Parigi, 1988.

70. O. Costa de Beauregard, *Une réponse à l'argument dirigé par Einstein, Podolsky et Rosen contre l'interprétation bohrienne des phénomènes quantiques*, «Comptes rendus de l'Académie des Sciences», n. 236, 1953.

71. La linea telefonica.

72. R. Penrose, *The Road to Reality*, op. cit., capitolo 23.9.

73. A. Zeilinger – M. Aspelmeyer, *Une incroyable illusion de réalité*, in «Les Dossiers de la recherche», n. 38, febbraio 2010.

74. I. Kant, *L'unico argomento possibile per una dimostrazione dell'esistenza di Dio*, in *Scritti precritici*, Laterza, Bari, 2000.

75. I. Kant, *Critica della ragion pura*, Laterza, Roma-Bari, 2000, pp. 152-158.

76. W. Heisenberg, *La Partie et le Tout*, Flammarion, Parigi, 1990, p. 169.

77. A. Peres, *Two Simple Proofs of the Kochen Specker Theorem*, in

«Journal of Physics A», vol. 24, L175, 1991.

78. In modo molto approssimativo si può dire che lo spin è una rotazione attorno a un asse non definito prima della sua misurazione.

79. Per gli esperti, ciò deriva dal fatto che gli operatori quadratici  $S^2_x$ ,  $S^2_y$  e  $S^2_z$  commutano per 3 direzioni ortogonali  $x$ ,  $y$ , e  $z$ .

80. Ossia uno stesso sistema di coordinate di spaziotempo.

81. È il concetto relativistico di «cono di luce».

82. Per rispondere alle critiche di un pugno di fisici sostenitori di una «estensione non lineare» della meccanica quantistica, Conway e

Kochan hanno recentemente sostituito FIN con un assioma MIN meno stringente, ottenendo lo stesso risultato (J.H. Conway – S. Kochen, *The Strong Free Will Theorem*, in «Notices of the AMS», vol. 56, n. 2, 2009).

83. Ibidem.

# BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

Per un'iniziazione:

S. ORTOLI – J.P. PARABOD, *Le Cantique des quantiques. Le monde existe-t-il ?*, La Découverte, Parigi, 1984 (2007).

J. GRIBBIN, *Le Chat de Schrödinger*, Le Rocher, Parigi, 1986.

V. SCARANI, *Initiation à la physique quantique*, Vuibert, Parigi, 2003.

É. KLEIN, *Petit Voyage dans le monde des quanta*, Flammarion, Parigi, 2003.

Per confermare le proprie  
conoscenze:

J.L. BASDEVANT, *Douze Leçons de mécanique quantique*, Vuibert, Parigi, 2006.

R. OMNES, *Comprendre la mécanique quantique*, EDP Sciences, Les Ulis, 2000.

M. LE BELLAC, *Le Monde quantique*, EDP Sciences, Les Ulis, 2010.

A. ZEILINGER, *Dance of the Photons*, Farrar, Straus and Giroux, New York, 2010.

Approcci più generali alla fisica  
fondamentale:

J.P. PHARABOD – B. PIRE, *Le Rêve des physiciens*, Odile Jacob, Parigi, 1993.

B. DIU, *Les atomes existent-ils vraiment ?*, Odile Jacob, Parigi, 1994.

B. GREENE, *La Magie du cosmos. L'espace, le temps, la réalité: tout est à repenser*, Robert Laffont, Parigi, 2005.

R. PENROSE, *The Road to Reality*, Jonathan Cape, Londra, 2004.

### Corsi di meccanica quantistica:

E. WICHMANN, *Physique quantique, Berkeley: cours de physique*, vol. 4, Armand Colin, Parigi, 1974.

J.M. LÉVY-LEBLOND – F. BALIBAR, *Quantique*, InterÉditions, Parigi, 1984.

J.L. BASDEVANT – J. DALIBARD, *Mécanique quantique*, Éditions de l'École polytechnique, Palaiseau, 2003.

M. LE BELLAC, *Physique quantique*, EDP Sciences, Les Ulis, 2007 (II ed.).

Sulle interpretazioni minoritarie:

O. COSTA DE BEAUREGARD, *Time, the Physical Magnitude*, D. Reidel Publishing, Dordrecht, 1987.

R. OMNÈS, *Philosophie de la science contemporaine*, Gallimard, Parigi, 1994.

C. BRUCE, *Les Lapins de M. Schrödinger*, Le Pommier, Parigi, 2004.

J. BRICMONT – H. ZWIRN, *Philosophie de la mécanique quantique*, Vuibert, Parigi, 2009.

Ricerca all'avanguardia:

S. HAROCHE – J.M. RAIMOND,  
*Exploring the Quantum*, Oxford  
University Press, New York, 2006.

Sulle questioni filosofiche sottostanti:

B. D'ESPAGNAT, *À la Recherche du  
réel*, Gauthier-Villars, Parigi, 1979.

B. D'ESPAGNAT, *Traité de physique  
et de philosophie*, Fayard, Parigi, 2002.

J. ALLDAY, *Quantum Reality. Theory  
and Philosophy*, CRC Press, Taylor &  
Francis Group, Oxford, 2009.

Opere di filosofia e scienza:

F. NEF, *Qu'est-ce que la  
métaphysique ?*, Gallimard, Parigi,  
2004.

A. BARRAU – D. PARROCHIA (a cura di), *Forme et origine de l'Univers*, Dunod/La Recherche, Parigi, 2010.

M. SERRES, *La Naissance de la physique dans le texte de Lucrèce*, Minuit, Parigi, 1977.

# INDICE

## Preludio

1. I fantasmi della materia
2. Gli uccelli-pesci
3. La decoerenza del gatto
4. Universi paralleli
5. Esiste lo spazio?

## 6. A ritroso nel tempo

### Conclusioni

### APPENDICI

#### Appendice 1

#### Appendice 2

#### Note

#### Bibliografia essenziale