

## La candela

*Nota: Questa avrebbe dovuto essere la 85-ma puntata della “Candela” che non è stata pubblicata perché la rivista Naturalmente cessò le pubblicazioni. La puntata è gravemente incompleta, ma forse vale la pena di far conoscere quello che volevo metterci. Non ho apportato alcuna modifica al testo com’era rimasto nove anni fa.*

Nell’ultima puntata dedicata alla m.q., scritta quasi due anni fa [1], concludo dicendo:

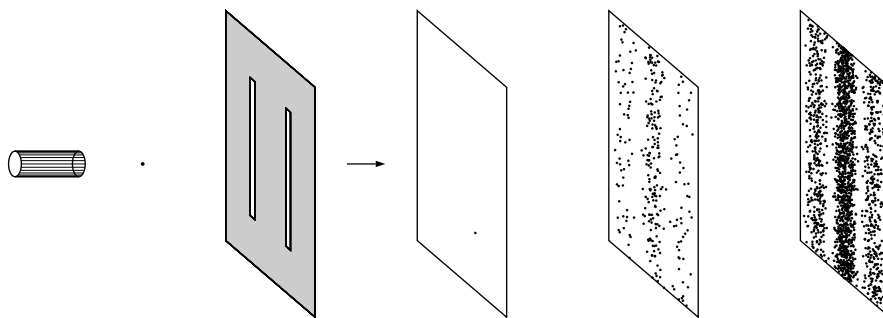
*Non vorrei aggiungere altro sul PdI, ma mi restano ancora diverse cose da dire. In primo luogo non ho chiuso il discorso sull’indeterminismo: l’ho sganciato dal PdI, ma l’ho fatto rientrare in ballo quando — parlando delle nuove regole del gioco — ho usato la parola fatidica: probabilità. Dovrei poi dire qualcosa su quello che era un altro cavallo di battaglia ai tempi di Heisenberg: il dualismo onda-corpuscolo. Infine avevo annunciato il tema del successo della m.q. nella spiegazione del mondo e nella costruzione della nuova realtà materiale in cui siamo ormai immersi.*

Eccoci qua: vediamo di chiarire dove e in che misura l’indeterminismo e la probabilità fanno parte del modo di pensare e dei risultati pratici del fisico che oggi (o anche 90 anni fa, se è per questo) usa la m.q. come suo essenziale strumento di lavoro.

Cominciamo con la probabilità: l’esempio che si trova universalmente in tutte le esposizioni divulgative è quello degli esperimenti d’interferenza, che possono essere fatti con la luce (fotoni) ma anche con elettroni o altre particelle. La fig. 1 mostra in modo schematico un tipico esperimento del genere. Da sinistra a destra si vede:

- a) il “cannone” che emette gli elettroni, uno dopo l’altro
- b) un singolo elettrone emesso dal cannone
- c) uno schermo con due fenditure
- d) la superficie dove vengono rivelati gli elettroni: è mostrato l’arrivo di un elettrone.

Lasciamo per ora da parte il resto della figura.



Quello che si osserva è che ciascun elettrone arriva sul rivelatore in una posizione diversa e *imprevedibile*: è appunto questo l'indeterminismo. La teoria (la m.q.) non permette di prevedere *dove* arriverà il prossimo elettrone: sebbene tutti gli elettroni vengano emessi *nello stesso stato*, all'atto della rivelazione si ottengono risultati diversi da un caso all'altro.

La teoria permette solo di calcolare la *probabilità* che un elettrone arrivi in un determinato punto del rivelatore, ma come accade sempre quando si tratta di probabilità, l'esito del singolo evento può variare senza alcuna regolarità.

Per inciso, è proprio questo aspetto della teoria che risultava inaccettabile ad Einstein, il quale rimase sempre convinto che una teoria siffatta dovesse essere *incompleta*. Tentò di dimostrarlo in vari modi: il più famoso è il paradosso EPR, al quale ho accennato quasi due anni fa [2] e che non posso neppure provare a spiegare. Ma è ormai opinione generale dei fisici che i suoi sforzi siano stati senza successo: come altri lavori successivi — teorici e sperimentali — hanno dimostrato, non c'è modo di “completare” la m.q. per rendere prevedibili i risultati di esperimenti come quello che sto descrivendo. Nel senso che ogni possibile completamento andrebbe da un lato contro un fondamentale teorema di J.S. Bell (1964) e sviluppi successivi; dall'altro contro i risultati accertati di esperimenti più complessi: quelli di Aspect (1982) e seguenti.

Però il carattere probabilistico di una previsione non consiste solo nell'imprevedibilità della singola prova. Com'è ben noto, nella ripetizione delle prove tende a manifestarsi una *regolarità statistica*, nel senso che la frequenza dei vari risultati tende ad avvicinarsi alla probabilità prevista dalla teoria. Ricordo che si tratta di una questione delicata, che ora non posso approfondire. Per fortuna mi è già capitato di parlarne (dieci anni fa) [3] per cui rimando il lettore davvero volenteroso a quella vecchia puntata.

A noi ora basta l'idea di senso comune: se ripetiamo l'esperimento con molti elettroni, ci aspettiamo che i punti d'arrivo di questi si distribuiscano secondo la probabilità che la teoria prevede. Ciò è mostrato nella quarta parte della figura, dove si vede che con un buon numero di elettroni si notano regioni più probabili e altre meno, nella forma di bande (*frange*) verticali. L'ultima parte a destra non fa che ribadire il concetto, ma con molti più elettroni, tanto che i punti di arrivo non sono più separatamente distinguibili: si vedono ora

delle classiche *frange d'interferenza*, familiari ai fisici da alcuni secoli, in altro contesto.

(A scanso di equivoci: gli schermi mostrati nella terza, quarta e quinta parte della figura *non sono schermi diversi*. Sono solo rappresentazioni dello stesso schermo in *fasi diverse* dell'esperimento: quando è arrivato un solo elettrone, quando ne sono arrivati un buon numero ma non moltissimi, e infine quando il numero di elettroni è davvero grande.)

\* \* \*

Ma debbo subito insistere su un punto: *non tutto nella m.q. è indeterministico*. Anzi, ci sono moltissimi risultati (e in corrispondenza, fatti osservabili, fenomeni) che non hanno niente d'indeterministico. Il carattere indeterministico si manifesta solo in certe condizioni, anche se molto comuni, che spiegherò più avanti: ora preferisco illustrare con qualche esempio ciò che ho appena asserito.

In realtà quando mi sono messo a pensare agli esempi, mi sono trovato in serio imbarazzo, perché gli esempi possibili sono tantissimi; avevo solo il problema di selezionare quelli più semplici da spiegare e più appariscenti, evidenti. Questo solo per dire che il detto indeterminismo sicuramente esiste, ma nella corrente "vulgata" della m.q. viene assai esagerato, mettendo del tutto in ombra tanti altri fatti che mostrano un carattere niente affatto indeterministico della teoria. Ma andiamo al sodo.

Cominciamo per es. dai cristalli: intendo quelli che si trovano in natura in tanti minerali, anche non "nobili," preziosi: pensiamo alla pirite o al salgemma, e poi quarzo, galena, gesso, zolfo ... e innumerevoli altri. Senza dimenticare i fiocchi di neve... Quello che hanno in comune tutti i cristalli è la regolarità geometrica delle loro forme, che fin dalla fine del '700 (Haüy) fu attribuita alla disposizione regolare di unità elementari (gli attuali atomi).

È facile capire che la regolarità è possibile perché le unità elementari, gli atomi, *sono tutti uguali*: per dimensioni, forma, interazioni. Forse è meglio essere più precisi: sono tutti uguali gli atomi di *uno stesso elemento chimico* (zolfo, ferro, cloro, sodio, ossigeno ...). Negli esempi che ho portato, con un'unica eccezione sono presenti più elementi: per es. zolfo e ferro nella pirite. Ma si capisce facilmente che ciò non ostacola la regolarità della disposizione geometrica a livello microscopico, che si traduce appunto nelle forme semplici ed eleganti dei cristalli macroscopici.

Questo non costituì un problema per tutto l'800: gli atomi erano appunto concepiti come palline o comunque piccolissime entità: tutte identiche tra loro in una sostanza pura; di poche specie diverse in minerali chimicamente composti. La difficoltà nacque col modello atomico di Rutherford: in questo modello "planetario" gli elettroni si muovono attorno al nucleo, e non c'è ragione (se si sta alle leggi della fisica classica) perché due atomi diversi dello stesso elemento chimico debbano avere le stesse dimensioni e forma. Anzi, non si potrà dire

questo neppure di un singolo atomo, che di momento in momento cambierà la disposizione dei suoi elettroni, i quali potranno muoversi restando più vicini al nucleo o più lontani, su orbite più o meno allungate, ecc. Come si potrebbe mai costruire un cristallo con atomi così fatti?

Un primo abbozzo di soluzione la diede Bohr, come ho ricordato nella puntata 79 [2], con la sua *condizione di quantizzazione*: i raggi delle orbite atomiche non possono essere qualsiasi, ma formano un insieme discreto. In particolare esiste un raggio minimo, che corrisponde allo *stato fondamentale* dell'atomo: quello di minima energia. Si può capire, su questa base, come mai gli atomi di uno stesso elemento risultino identici tra loro, se sono nello stato fondamentale, come (per ragioni che ora debbo tralasciare) c'è da aspettarsi accada per gli atomi di un cristallo. Ho già velocemente ricordato in [2] e ho raccontato un po' più a fondo in [4] come il tentativo di Bohr non riuscisse ad andare oltre l'idrogeno, e fosse presto sostituito dalla *nuova* meccanica quantistica.

Nella m.q. di Schrödinger–Heisenberg non ci sono orbite di elettroni, ma qualcosa di molto più inafferrabile: la famigerata “funzione d'onda” (l'orbitale dei chimici). La posizione degli elettroni non è determinata (molto inappropriatamente si parla di “nuvola di probabilità”), eccetera eccetera. Però gli *stati stazionari* di un atomo sono perfettamente determinati, possiedono un valore preciso di energia, e in un senso determinato (ma non banale da chiarire) anche precise *dimensioni*. Lo stato di minima energia si chiama *stato fondamentale*, e nelle condizioni usuali praticamente tutti gli atomi di una certa porzione di materia — per es. il nostro cristallo — si trovano in questo stato. È così che si spiega che gli atomi possano formare un cristallo geometricamente regolare, e così si spiegano anche molte altre cose: vediamo.

Tra i fatti di evidenza quasi immediata, dopo i cristalli metterei la luce emessa o assorbita dagli atomi. Ne ho parlato diffusamente in [4], e più sommariamente in [2], per cui non vorrei ripetermi. Per il presente discorso ciò che conta è che da oltre 150 anni fisici e chimici sanno che ogni elemento chimico (quindi ogni specie atomica) allo stato gassoso può assorbire ed emettere luce solo di determinate lunghezze d'onda; tanto che la spettroscopia è da allora un efficacissimo metodo di analisi chimica, e ha pure consentito la scoperta di nuovi elementi. Ora non importa come questo sia stato spiegato, dopo tanti infruttuosi tentativi, solo dalla m.q.; importa solo notare che quando noi osserviamo la luce emessa con uno spettroscopio, osserviamo in realtà la *somma di innumerevoli processi elementari*, in cui ogni atomo emette luce per proprio conto. Non potremmo vedere delle righe spettrali ben definite, se non fosse che *tutti gli atomi emettono precisamente le stesse lunghezze d'onda*: dunque il processo di emissione (e quello di assorbimento) sono in questo senso *deterministici*.

\* \* \*

Lasciamo ora gli atomi, per occuparci di molecole. Anche qui, il fatto empirico e l'ipotesi di spiegazione risalgono a molto addietro: diciamo due secoli.

L'idea è che *tutta la materia è formata di molecole*, che sono aggregati di atomi; che gli atomi di un dato elemento sono tutti identici fra loro, e si legano sempre in uno o pochi modi semplici a formare le molecole. Più avanti la teoria sarebbe diventata più quantitativa, mostrando la costanza delle energie di legame, la forma e le dimensioni definite delle molecole, ecc.

Detto in modo semplice ed evidente: una molecola di acqua è formata da due atomi d'idrogeno e uno di ossigeno. Ma non solo: tutte le molecole hanno *la stessa forma* (una larga V) *la stessa distanza* fra i vari atomi, *la stessa energia di legame*. Il che comporta delle precise proprietà fisiche e chimiche, che sono le stesse ovunque si trovino molecole di  $H_2O$ .

La spiegazione del legame chimico rimase a lungo un problema aperto, perché la fisica classica non era in grado di darne ragione. Anche qui, solo la m.q. risolse il problema, e si può forse dire che nei primi anni della nuova teoria questo sia stato il suo risultato più importante e impressionante: non occorre postulare nuovi tipi di forze, diverse da quelle già note alla fisica dell'800: bastava l'interazione elettrostatica tra elettroni e nuclei, e degli elettroni tra loro, per ricostruire in ogni dettaglio, usando la nuova meccanica, tutte le particolarità dei legami osservati fra gli atomi nelle molecole. Anche qui, un indiscutibile determinismo: tutte le molecole di acqua sono identiche e hanno le stesse proprietà, sulla Terra e in ogni parte dell'Universo osservabile.

Sulle molecole vale la pena di aggiungere qualcosa. Pensiamo a molecole un po' più complicate di  $H_2O$ , come per es. una proteina (un esempio di *macromolecola*). Sappiamo che le proteine sono catene, anche molto lunghe, formate da unità relativamente semplici, dette *aminoacidi*, che nei viventi conosciuti sono — credo — di soli 20 tipi diversi. Ma ciò che conta per il mio discorso è che in un organismo ogni proteina svolge una precisa funzione: componente di un tessuto, regolatore chimico (enzima), agente del sistema immunitario, ecc. Essendo una molecola complessa, una proteina può svolgere la sua funzione in quanto assume una precisa disposizione geometrica: la catena si avvolge su se stessa in vari modi, fino a raggiungere una determinata *struttura terziaria*, che è appunto la configurazione tridimensionale completa della proteina, influenzata anche dall'ambiente in cui si trova.

Orbene: questa complessa struttura di una proteina, che se non si mantenesse in modo stabile comprometterebbe la sua funzione e quindi non consentirebbe la vita dell'organismo, in ultima analisi dipende da un insieme di *legami chimici* di vario tipo, in cui non entro per le solite ragioni: per brevità e per scarsità (mia) di conoscenza. Ma ci basta notare che i costituenti di una proteina (gli aminoacidi) sono a loro volta molecole che hanno una composizione e una configurazione del tutto riproducibili in ogni caso e circostanza. Inoltre gli aminoacidi formano anch'essi dei legami esattamente riproducibili, in ogni esemplare della proteina in esame. Insomma, ancora una volta ci troviamo davanti a un esatto *determinismo*, che ha alla base la natura quantistica dei legami chimici.

E tanto potrebbe bastare, se non fosse possibile un'obiezione: è ben noto che esistono delle varianti di ogni proteina, a volte irrilevanti o poco influenti per la funzione della proteina stessa; altre volte invece tali da comprometterne la funzionalità.

L'obiezione è pienamente sensata, ma per quanto riguarda il nostro tema c'è solo da dimostrare che quelle variazioni non sono dovute a indeterminismo quantistico, ma a varie altre cause. Però, visto che lo stesso problema si ripresenterà fra breve, in relazione all'argomento che sto per introdurre, ne riparliamo fra poco.

\* \* \*

Infatti, restando in tema di macromolecole e di biologia, è ovvio che si debba parlare di un altro tipo di macromolecola (tra molte che ce ne sono): il DNA. Non mi fermo a descrivere funzione e struttura del DNA, che presumo più o meno ben conosciute a chi mi legge. Di nuovo, mi preme osservare che la sopravvivenza di ogni organismo vivente si basa sulla *stabilità* del suo DNA somatico, che assicura la continua produzione delle proteine, sempre uguali come ho detto sopra. Come sempre, non c'è niente di semplice, specialmente in biologia, per cui anche l'affermazione che ho appena fatta può essere criticata con l'esempio dei procarioti (penso soprattutto ai batteri) nei quali le mutazioni sono essenziali alla sopravvivenza (in realtà più di una popolazione che di un individuo) e non ha neppure senso parlare di DNA somatico. Diciamo che quanto ho detto vale per gli eucarioti, e speriamo bene...

Nel paragrafo che precede ho già introdotto la parola chiave: *mutazione*. Dunque il DNA non si riproduce sempre uguale a se stesso, ci sono dei cambiamenti (per es. una base al posto di un'altra) che possono essere ignorati se i sistemi di correzione (dei quali so poco o niente) riescono a eliminare le copie "sbagliate," mentre a volte possono essere dannosi e anche letali per l'organismo. Ma qui noi siamo interessati alla fisica, non alla biologia o alla patologia, e ci dobbiamo quindi chiedere: che cosa origina le mutazioni? Sono forse la prova che certi processi biochimici non sono del tutto deterministici, per motivi intrinsecamente quantistici?

Dato che le mie conoscenze di chimica, in particolare organica, più in particolare biochimica, sono insufficienti, ho cercato di documentarmi. Spero di aver capito bene: il DNA in soluzione acquosa subisce idrolisi spontanea, e si stima che in una cellula circa 10 000 siti purinici al giorno vengano depurinati (ricordo che delle 4 basi che entrano nel DNA, sono purine l'*adenina* A e la *guanina* G). Come ho già detto, esistono meccanismi di correzione di questo danno, ma non sono infallibili: c'è una tendenza preferenziale a rimpiazzare una G mancante con una A. Ed ecco prodotta una mutazione *spontanea*, ossia non dovuta a fattori esterni come radiazioni ionizzanti o agenti chimici mutageni.

A noi interessa solo rispondere alla domanda: che cosa causa la depurinazione, ossia il distacco di una purina? È segno di un processo quantistico a

carattere indeterministico, o ha un'altra causa? La risposta è la seconda. È la normale *agitazione termica* che provoca urti (per es. di molecole di  $H_2O$ ) il cui effetto è di eccitare la vibrazione del legame glicosidico della purina, che lo indebolisce e ne favorisce la rottura. Agitazione termica, urto, vibrazione . . . non sono fenomeni quantistici: sono del tutto comprensibili nel linguaggio della fisica classica. Dunque, per quello che ho potuto capire, la *casualità* di una mutazione è la normale casualità di tanti fenomeni che accadono a scala microscopica a causa del moto disordinato della materia a quella scala.

Ho voluto usare una formula parzialmente dubitativa perché non ho capito tutto sull'argomento: in particolare non ho chiaro il meccanismo delle *transizioni tautomeriche*, che almeno da parte di qualche ricercatore sarebbero attribuite a effetti genuinamente quantistici [conferenza?]. Purtroppo questi sono i miei limiti, che denuncio per primo. Cosa che invece non fanno i tantissimi che straparlano di m.q. senza conoscerne neppure le minime basi. . .

\* \* \*

Anche se potrei sviluppare ancora a lungo il tema (l'elencazione di fenomeni in cui la m.q. produce effetti deterministici) debbo limitarmi, e d'altra parte spero di aver portato esempi e argomenti sufficienti per la mia tesi generale: non è vero — o almeno, non è vero in modo semplicistico — che la m.q. abbia indotto i fisici ad “aprirsi all'indeterminato” (Consigliere); a “pensare l'universo in termini probabilistici” (Muratori) ecc. ecc. Viceversa, c'è tutto un “universo” di fenomeni in cui la m.q. ha risolto problemi, ha fatto e fa previsioni *certe*, da cui si trae da un lato una migliore comprensione del mondo, e dall'altro ha prodotto e produce applicazioni pratiche che hanno cambiato il nostro mondo.

Desidero sottolineare questo punto, che per me è filosoficamente fondamentale: proprio perché la m.q. può fare previsioni del tutto accurate, si possono progettare e costruire oggetti del tutto prevedibili e riproducibili. Per es. tutti i componenti elettronici che ormai sono onnipresenti, anche senza che noi ne siamo consapevoli, in qualunque oggetto di uso comune: telefoni, televisori, computer, ma anche elettrodomestici, automobili . . . per non parlare degli aerei, dei più diversi impianti industriali. . . Se il funzionamento di questi componenti non fosse estremamente sicuro e riproducibile, niente funzionerebbe come previsto: avremmo il caos, nel piccolo della vita domestica e nel grande delle città e degli stati.

Ma forse è opportuno chiarire meglio *come e dove* la m.q. entra nel funzionamento di tutti gli oggetti che ho citato. Possiamo dire che “in principio era il transistor.” Questo piccolo oggetto, inventato attorno al 1948 da Brattain, Bardeen, Shockley, è il componente di base di tutta l'elettronica attuale. Non è possibile né utile farne la storia; debbo invece spiegare dove entra la m.q. È presto detto: alla base di qualsiasi transistor c'è la comprensione dello stato solido, e in particolare dei *semiconduttori*. La fisica dello stato solido è nata con la m.q.,

e la teoria sottostante ha permesso la progettazione di materiali aventi le volute proprietà per realizzare dispositivi (appunto i transistor) col comportamento *macroscopico* atteso.

E qui mi sembra necessario dissipare un possibile equivoco. Il comportamento macroscopico di cui ho appena parlato non è il risultato di una media statistica su una grande quantità di sistemi, come accade per es. nel comportamento di un gas. Spiego meglio: un gas soddisfa a delle leggi semplici, che si riassumono (nell'approssimazione del “gas perfetto”) nella famosa *equazione di stato*:

$$PV = nRT.$$

Non sto a spiegare i simboli né a fare altri commenti; ricordo solo che l'equazione appena scritta contiene tra l'altro la *legge di Boyle*:

*a temperatura fissata volume e pressione di un gas sono inversamente proporzionali.*

Questo è un esempio di legge macroscopica (riguarda quantità di gas a scala umana) la cui spiegazione ultima sta nel comportamento disordinato di un'immenso numero di molecole (sistemi elementari microscopici).

Le proprietà dello stato solido che stanno alla base del transistor sono tutt'altra cosa. In un solido ci sono un gran numero di elettroni, i cui possibili stati di energia sono fissati dalla natura degli atomi che compongono il solido e dal tipo di cristallo. Questi stati, in particolare la presenza di *bande permesse* e di *bande proibite*, sono rigorosamente determinate e stabiliscono il comportamento di *tutti* gli elettroni; attraverso questo, fissano le proprietà macroscopiche del solido: per es. il suo essere *isolante*, *conduttore*, *semiconduttore*. La fisica dei solidi, basata sulla m.q., permette di prevedere in modo sottile come queste proprietà variano con la composizione chimica del materiale, ed è giocando sulle variazioni che è possibile realizzare materiali delle proprietà adatte per funzionare in un transistor.

Di più non posso dire, ma spero di aver dato almeno un'indicazione di come la m.q. determini il comportamento di oggetti macroscopici quali i transistor cosiddetti “discreti,” e poi (molto più importante oggi) di costruire insiemi estremamente complessi, i cui elementi sono piccolissimi alla scala umana ma ancora molto grandi rispetto ai singoli atomi (potrei parlare di “scala mesoscopica”). Questi insiemi complessi sono i “circuiti integrati” che stanno alla base di tutta l'elettronica di oggi, anche nelle applicazioni più comuni.

\* \* \*

Riassumiamo. Questa puntata si era aperta con la dichiarazione programmatica che ci saremmo occupati dell'“indeterminismo” della m.q. Ho introdotto il discorso col famoso esperimento delle due fenditure, versione moderna — quantistica — di un esperimento antico e classico: l'esperimento di Young (1801) che



dimostrò il fenomeno dell'*interferenza* della luce. La versione di cui ho parlato è pensata per elettroni ed è stata realmente eseguita, anche se non nella forma schematica illustrata dalla figura.

In questo esperimento l'indeterminismo si manifesta nel fatto che il punto d'arrivo sul rivelatore di ciascun singolo elettrone *non è prevedibile*: sappiamo fare solo una previsione *statistica*, in termini di probabilità. È quasi ovvio pensare che ciò stia a indicare una basilare *incompletezza* della teoria, dipendente dal fatto che in essa non si tiene conto di qualche ulteriore *variabile*, che se fosse nota e fosse inserita in una teoria *completa* renderebbe possibile la previsione che manca alla m.q. Questa era — come ho già ricordato — la ferma convinzione di Einstein, ma a 80 anni di distanza dal famoso articolo mi sento di dire che il punto di vista oggi largamente dominante sia che “Einstein aveva torto.”

Abbiamo proseguito sviluppando però una tesi diversa, e solitamente trascurata da chi vuole sottolineare la rinuncia della scienza alla certezza, la sua “apertura all'indeterminato e al molteplice”: il fatto che la stessa m.q. permette in moltissimi casi, anche di grande importanza pratica, spiegazioni e previsioni perfettamente determinate e verificabili con grande affidabilità. Come ho scritto all'inizio, *non tutto nella m.q. è indeterministico*. Non intendo ripetermi.

Al contrario, voglio ora cercare di elencare (anche se in modo sommario) in quali casi si manifesta il famigerato indeterminismo. Tenterò poi di presentarne un abbozzo di spiegazione.

\* \* \*

Il primo caso sono esperimenti come quello con le due fenditure, rappresentato nella figura all'inizio. Se eseguiamo l'esperimento con un solo elettrone, non siamo in grado di dire in che punto dello schermo esso arriverà: è il caso mostrato dal primo schermo (dopo la freccia). Se ripetessimo più volte questo esperimento con un solo elettrone, troveremmo ogni volta l'elettrone in una posizione diversa: ecco un caso in cui l'esito dell'esperimento è *indeterminato*. Come ho già detto all'inizio, ciò che la m.q. ci permette di calcolare è la *probabilità* che l'elettrone atterri in un posto o in un altro; abbiamo già visto che se ripetiamo l'esperimento con molti elettroni essi si dispongono secondo questa probabilità, e con un gran numero di elettroni si ottiene un sistema di *frange*, secondo quanto previsto dalla teoria.

Bisogna però dire che esperimenti del genere sono *artificiosi*, nel senso che bisogna progettarli *ad hoc* per vedere il risultato che abbiamo detto. Oggigiorno hanno praticamente solo valore didattico. Una classe di esperimenti in cui pure si manifesta l'indeterminismo, e che vengono praticati continuamente in gran numero in laboratori di tutto il mondo, sono quelli che con parola inglese vengono chiamati di *scattering* (diffusione, sparpagliamento).

Il precursore di questi esperimenti è la serie con cui negli anni 1909-1913 Rutherford dimostrò che la struttura degli atomi è quella che oggi tutti cono-

scono: un *nucleo*, di carica positiva e massa praticamente uguale a quella di tutto l'atomo, circondato da un numero di elettroni, mediamente assai più distanti della dimensione del nucleo. Una cosa va detta per correttezza storica: sebbene questa serie di esperimenti porti generalmente il nome di Rutherford, essi furono in realtà concepiti e realizzati da Geiger e Marsden, che lavoravano nel laboratorio di Rutherford. A Rutherford si deve invece l'interpretazione teorica, culminata nella famosa "formula di Rutherford," di cui dirò tra poco, e nel concetto di "nucleo atomico."

Ma non è lo scopo né il risultato degli esperimenti di Geiger e Marsden che c'interessa, bensì il *metodo*: consisteva nel mandare un fascio di particelle  $\alpha$  attraverso una sottile foglia d'oro. Le particelle attraversavano la foglia d'oro, ma venivano deviate più o meno dalla loro traiettoria originale; alcune tornavano addirittura indietro, subendo una deviazione superiore a  $90^\circ$ .

Debbo ancora dire come fosse possibile "vedere" le singole particelle  $\alpha$ . Quello che in realtà si vedeva (in senso letterale, con gli occhi degli sperimentatori) erano i lampi di luce che venivano emessi quando le particelle colpivano uno *schermo* di adatto materiale (ZnS, se ricordo bene).

L'idea era che una particella  $\alpha$  poteva colpire un atomo di Au con una traiettoria più centrale o più radente, ossia passando a distanze diverse dal centro dell'atomo. Anche se non era possibile vedere queste traiettorie, e tanto meno misurare le distanze, si poteva fare un'*analisi statistica*, ossia misurare con che frequenza le particelle venivano deviate ai diversi angoli. La formula di Rutherford dice appunto quale distribuzione statistica ci si deve aspettare in una precisa ipotesi: che la carica positiva dell'atomo non sia distribuita in tutto lo spazio occupato da un atomo, ma sia invece concentrata in una regione molto piccola (appunto il nucleo).

Gli esperimenti mostrarono che proprio questo accadeva, e diedero quindi adito a un preciso *modello* atomico: il *modello di Rutherford*, che ho già descritto.

L'ipotetico lettore attento e ipercritico che mi sono più volte immaginato, a questo punto ha pronta un'obiezione: sta bene, negli esperimenti di cui ci hai parlato si ragiona in termini di probabilità, il che suona in linea con l'indeterminismo. Ma in realtà quella probabilità nasce solo dal fatto che lo sperimentatore non è in grado di vedere l'effettiva traiettoria delle particelle  $\alpha$ , e può solo supporre che esse siano disposte *a caso*, con uguale probabilità nella sezione del fascio. È da questa mancanza di conoscenza che deriva il comportamento statistico: si tratta dunque di una probabilità *epistemica*, ossia dovuta a insufficiente conoscenza, mentre quella della m.q. è *non epistemica*, intrinseca alla teoria [5]. Oltre tutto, al tempo di Rutherford la m.q. non esisteva ancora, e infatti il calcolo di Rutherford usa la solita meccanica newtoniana: calcola la traiettoria di una particella  $\alpha$  che passerebbe a una certa distanza dal nucleo se non fosse respinta della forza elettrostatica di questo. Da qui ricava la distribuzione di probabilità

nell'ipotesi detta, che le traiettorie siano disposte a caso. Dunque il tuo esempio mi pare del tutto fuori posto.

- [1] NATURALMENTE **26** (2013), n. 4 e  
<http://www.sagredo.eu/candela/candel181.pdf>
- [2] NATURALMENTE **26** (2013), n. 2 e  
<http://www.sagredo.eu/candela/candel179.pdf>
- [3] NATURALMENTE **18** (2005), n. 2 e  
<http://www.sagredo.eu/candela/candel148.pdf>
- [4] NATURALMENTE **21** (2008), n. 1 e  
<http://www.sagredo.eu/candela/candel159.pdf>
- [5] NATURALMENTE **19** (2006), n. 1 e  
<http://www.sagredo.eu/candela/candel151.pdf>