

Si sa che Einstein, che pure aveva contribuito, nei primi anni della sua attività allo sviluppo della *fisica* quantistica, dopo la sua formulazione organica come *meccanica* quantistica, avvenuta intorno al 1927, mantenne, nel corso dell'intera esistenza, un atteggiamento fortemente critico nei suoi confronti. Quali le ragioni?

A monte di tutto, il venir meno, che la teoria appariva comportare, di una causalità rigorosa. Già in una lettera ai coniugi Born del 1924, quando gli eventi stavano maturando, Einstein scriveva:

“Le idee di Bohr sulla radiazione mi interessano molto, ma non vorrei lasciarmi indurre ad abbandonare la causalità rigorosa senza aver prima lottato in modo assai diverso da come s'è fatto finora. L'idea che un elettrone esposto a una radiazione possa scegliere *liberamente* l'istante e la direzione in cui spiccare il salto è per me intollerabile. Se così fosse, preferirei fare il ciabattino, o magari il biscaggiere, anziché il fisico”.

Prescindendo dall'esempio specifico, e parlando in termini generale, la meccanica quantistica non appare poter soddisfare il cosiddetto principio di causa, che può essere enunciato nei termini: “l'esatta conoscenza del presente permette di calcolare il futuro”, Come è stato detto, per quanto riguarda i fenomeni quantistici, “non è la conclusione che è falsa, ma l'ipotesi”. Quello che la meccanica quantistica non permette è infatti la completa conoscenza del presente. Detto in altri termini: non è violato un nesso causa-effetto; ma, altrettanto drammaticamente, è impossibile in linea di principio una completa individuazione delle “cause”, che individuiamo nei dati iniziali. Per fare un esempio specifico: potremmo, conoscute le forze agenti, conoscere la traiettoria seguita da una particella se potessimo determinare con esattezza le sue posizione e velocità iniziale, ma determinare la sua posizione, comporta fatalmente una trasmissione ad essa di velocità in misura non determinata.

E' anche risaputo che, nel 1935, quando ormai si era stabilito definitivamente negli Stati Uniti, Einstein scrisse un importante articolo l'obiettivo del quale non appariva essere l'acausalità della meccanica quantistica, ma la sua incompletezza, per usare i suoi stessi termini.

Verissimo: si tratta di un articolo che fu scritto in collaborazione con Nathan Rosen e Boris Podolsky. Prima di entrare nel merito di quanto detto dagli autori, vale forse la pena di fornire un esempio che da un lato fornisce un'idea immediata di che cosa s'intenda come non completezza, e dall'altro mostra come l'incompletezza sia legata all'acausalità, e come un completamento potrebbe porre rimedio a quel primo e fondamentale “difetto”. L'esempio ricalca in qualche misura quello che menzionava Einstein nel passo ricordato della lettera che ho ricordato inizialmente, ma forse è più immediatamente leggibile. Pensiamo ad un elemento radioattivo, più specificamente ad una popolazione di nuclei di un tale elemento: la meccanica quantistica assegna la probabilità di decadimento per unità di tempo (per inciso è quanto occorre e basta per derivare la cosiddetta legge esponenziale del decadimento, che è sperimentalmente

verificata), ma lascia completamente indeterminato, e cioè senza una causa specifica, l'istante in cui decade ciascuno dei componenti della popolazione. Esso potrebbe essere determinato dal valore (diverso da caso a caso) che una variabile non specificata potrebbe avere in ciascuno dei nuclei. Si ripristinerebbe così la causalità.

È anche vero, peraltro, che l'obiettivo di Einstein, Podolsky e Rosen era stato quello di dimostrare, sulla base di quello che usiamo chiamare esperimento mentale, o pensato, che la meccanica quantistica *era effettivamente* incompleta. A patto che i fenomeni naturali rispettino sempre il requisito della località.

Già, la località: è, con causalità e completezza, un'altra delle parole chiave sempre ricordate a proposito delle riflessioni einsteiniane sull'argomento. Possiamo dire, sinteticamente, che cosa intendiamo per località e come il requisito della località c'entri con la dimostrazione – se tale è stata – della incompletezza?

Ci provo, proponendo una versione in qualche modo aggiornata e – devo dirlo – piuttosto semplificata dell'argomentazione degli autori. La cosa sarà ripresa più tardi da Cristian Degli Esposti.

Parafrasando gli autori, diciamo intanto che cosa essi intendono per completezza di una teoria. Supponiamo di poter predire con certezza, per un qualche oggetto fisico, che valori si riscontrerebbero per un qualche insieme di grandezze fisiche ad esso attribuibili. Una teoria è completa, dicono gli autori, se garantisce l'attribuzione all'oggetto di tutti quei valori.

Difficile da capire? Vediamo di chiarire.

Consideriamo un sistema fisico che subisce un decadimento in due sottosistemi, diciamo genericamente due particelle. In certi casi specifici, si può dimostrare che effettuata la misura di certe grandezze fisiche su una delle due, automaticamente, cioè senza in alcun modo operare su di essa, si può appunto predire con certezza il valore che quelle stesse grandezze fisiche hanno sull'altra. Un esempio: le tre componenti, lungo tre assi coordinati, del vettore di spin della particella.

Ebbene, la meccanica quantistica dice che una particella non può avere valori definiti per tutte e tre le componenti dello spin. Dunque, scrissero gli autori, la meccanica quantistica è incompleta perché non garantisce l'attribuzione alla particella valori di quelle componenti che essa possiede con certezza.

Ma c'è l'altra parte della domanda: che cosa s'intende per località, meglio, come requisito della località? E che cosa c'entra la località con la completezza o meno?

Ecco, le cose potrebbero anche andare così: la meccanica quantistica vale, e dunque la particella – la seconda particella – *non ha di fatto* quei valori all'atto della sua separazione dall'altra. Ma, dal punto in cui è stata effettuata una misura sulla prima

particella, parte un segnale fisico che raggiunge l'altra e quei valori *glieli conferisce*. Per essere fisico, quel segnale non può però propagarsi con velocità superiore a quella della velocità della luce nel vuoto. È questo che si intende con la richiesta di località.

Per poter escludere che i valori delle componenti di spin della seconda particella siano acquisiti in conseguenza di un tale segnale si richiede un esperimento vero e proprio: un esperimento in cui si riuscissero a misurare le componenti cercate dello spin della seconda particella prima che un tale segnale abbia potuto raggiungere il punto in cui se ne effettua la misura. Una bella sfida sperimentale!

Domanda4: Ma Einstein ha poi indicato possibili vie per un completamento della meccanica quantistica?

A quanto risulta, no. La possibilità di un completamento della meccanica quantistica in termini di “variabili nascoste” fu presa però in esame da vari autori. Nel 1954 John Bell, in riferimento a esperimenti come quello proposto da Einstein, Podolsky e Rosen, si pose il problema se si potesse analizzarli in termini appunto di variabili nascoste, in grado di determinare, per ogni esemplare, o replica, del sistema soggetto al decadimento, l'esito di una qualsiasi coppia di misure di spin effettuate sulle due particelle finali. La cosa risultava possibile.

Ma Bell dimostrò che, se si formulava esplicitamente la richiesta della località (si parlò, da allora, di *teorie locali di variabili nascoste*), una certa combinazione di valori medi di prodotti delle misure degli spin delle due particelle (di qui in avanti la chiamerò – un termine inventato per l'occasione – termine di Bell) doveva avere valori diversi in una qualsiasi di tali teorie e in una meccanica quantistica senza variabili nascoste.

Tutto questo rimaneva però sulla carta. Lei accennava prima a possibili esperimenti reali. Sono stati effettivamente condotti? E se sì, a che conclusioni hanno portato?

Sì, accennavo prima a esperimenti in cui si riuscisse a misurare la componente cercata dello spin della seconda particella prima che un tale segnale avesse potuto raggiungere il punto in cui se ne effettua la misura. Dopo quanto mostrato da Bell, sarebbe questa una prova dell'incompletezza della meccanica quantistica? Lo sarebbe se il termine di Bell risultasse avere un valore compatibile con una teoria locale di variabili nascoste. Altrimenti non ci sarebbe nessuna teoria del genere in grado di descrivere i fatti, e quindi capace di completare – o dovremmo dire sostituire? – la meccanica quantistica.

Emerse che l'esperimento poteva diventare, da pensato o ideale che era, un esperimento reale, sostituendo le due particelle di spin $\frac{1}{2}$ con due fotoni, e i loro spin con gli stati di polarizzazione dei fotoni. Si trattava in essi di rispettare la richiesta che la misura della polarizzazione del secondo fotone fosse effettuata prima che un segnale fisico potesse raggiungere il punto in cui la si effettuava da quello in cui era stata eseguita l'analoga misura sul primo. Esperimenti condotti da Alain Aspect e collaboratori nei primi anni '80

vi riuscirono. Essi provarono poi che il valore trovato per il termine di Bell era proprio quello previsto dalla meccanica quantistica senza variabili nascoste.

Ma allora non si provava che la meccanica quantistica è incompleta, ma – e non è la stessa cosa – che non poteva essere completata – o sostituita – da una teoria locale di variabili nascoste.

Ma confermavano anche che, all'atto della misura della polarizzazione di uno dei due fotoni – solo allora e senza che alcun segnale fisico abbia potuto viaggiare fra i due – la corrispondente polarizzazione dell'altro acquisisce un valore definito.

Tenderemmo a dire allora che si è verificata una violazione della località. Si preferisce oggi parlare di una inseparabilità dei sistemi quantistici: i sistemi quantistici composti, anche quando i costituenti sono separati spazialmente da distanze grandissime e non possono comunicare fra loro, non si possono concepire come parti separate aventi di per sé proprietà definite.

Domanda6: Einstein sembrerebbe dunque alla fine avere avuto torto su tutto!

Dobbiamo distinguere. Va bene, la meccanica quantistica non può essere completata; va bene (o male): sotto un certo punto di vista si può dire che è violata la causalità. Ma si deve anche dire che: 1) Le domande poste erano legittime; 2) Hanno contribuito a che si attuassero esperimenti raffinati e sommamente indicativi; 3) Hanno contribuito ad ampliare e consolidare – per quanto ostica sia – la visione quanto-meccanica del mondo; 4) Rimane aperta la questione se la meccanica quantistica possa essere completata da teorie di variabili nascoste *non locali*.

Un'ultima cosa: eravamo partiti dall'insofferenza che Einstein provava nei confronti della acausalità della meccanica quantistica. Che cosa si può dire a questo proposito?

Una cosa che riguarda per l'appunto Einstein: sulla causalità egli rimase fermo fino alla fine. In una lettera a Born del 1944 egli scriveva:

“Le nostre prospettive scientifiche sono ormai agli antipodi tra loro. Tu ritieni che Dio giochi a dadi col mondo; io credo invece che tutto ubbidisca a una legge, in un mondo di realtà obiettive che cerco di cogliere per via meramente speculativa. Lo credo fermamente, ma spero che qualcuno scopra una strada più realistica – o meglio un fondamento più tangibile – di quanto non abbia saputo fare io”.

Per quanto riguarda tutti noi, limitiamoci a citare la speranza di Einstein.