

Francesco Prandel
(franz.prandel@gmail.com)

SUL PROBLEMA DELLA MISURA NELLA MECCANICA QUANTISTICA

Sintesi Nel presente lavoro viene esaminato il “problema della misura” posto dalla meccanica quantistica. La discussione del problema si basa sull’analisi dei concetti di “sistema fisico isolato”, di “stato possibile di un sistema fisico” e di “interazione tra sistemi fisici”. La soluzione del problema che viene proposta è suggerita dalla posizione filosofica di W. Heisenberg sulla teoria, che egli ha espresso nei termini del binomio metafisico potenza-atto.

Parole chiave Problema della misura, meccanica quantistica, sistema, stato, interazione, potenza e atto

Molte fra le astrazioni che caratterizzano la moderna fisica teorica sono state discusse nella filosofia dei secoli passati. In quei tempi queste astrazioni potevano essere ignorate come meri esercizi mentali da quegli scienziati la cui unica preoccupazione era la realtà, ma oggi siamo costretti dal progresso dei risultati sperimentali a prenderle in seria considerazione.

W. HEISENBERG (Heisenberg, 1971)

Introduzione

W. Heisenberg fu il primo a esibire una formulazione coerente della meccanica quantistica (MQ) (Heisenberg, 1925). Nel dibattito sui fondamenti concettuali della teoria, in diverse occasioni il fisico tedesco ha utilizzato i concetti metafisici di “potenza” e “atto”, seppure intesi in sensi diversi da quelli coi quali li ha introdotti Aristotele. Si consideri, a titolo di esempio, la seguente sua considerazione (Heisenberg, 1958).

Negli esperimenti sugli eventi atomici noi abbiamo a che fare con cose e fatti, con fenomeni che sono esattamente altrettanto reali quanto i fenomeni della vita quotidiana. Ma gli atomi e le stesse particelle elementari non sono altrettanto reali; formano un mondo di possibilità e potenzialità piuttosto che un mondo di cose o di fatti.

Secondo A. Shimony (Shimony, 1990) «Heisenberg ha tratto dalla meccanica quantistica una tesi metafisica profonda e radicale: che lo stato di un oggetto fisico è una raccolta di potenzialità. Ma la sua scoperta è incompleta, in quanto la transizione dalla potenzialità all’attualità rimane misteriosa». L’intento del presente lavoro è quello di esaminare questa transizione e di proporre una spiegazione.

Che un corpo possa agire su un altro a distanza attraverso il vuoto, senza la mediazione di nient’altro, è per me un’assurdità tale che credo nessun uomo, con una competente facoltà di pensiero in materia filosofica, possa mai cadere in essa.

ISAAC NEWTON

Sistemi isolati e interazioni

Nel presente lavoro per “sistema isolato” si intende un sistema che non interagisce con altri sistemi. Si potrebbe pensare che i sistemi isolati siano una mera astrazione, cioè dei casi limite idealmente estrapolabili dai sistemi reali. Questo se si ritiene che le interazioni tra i sistemi fisici siano continue nel tempo. Ad esempio, se l’interazione tra l’elettrone dell’atomo di idrogeno e il protone che ne costituisce il nucleo fosse continua nel tempo, l’elettrone e il protone non sarebbero mai isolati l’uno dall’altro, a meno che l’atomo non venga ionizzato e l’elettrone portato a distanza infinita dal protone.

Tuttavia secondo R. Feynman (Feynman, 1985) «l’elettrone viene mantenuto entro una certa distanza dal nucleo dell’atomo dallo scambio di fotoni col protone». Se le interazioni tra i sistemi fisici non sono *continue* nel tempo – come accade nel caso in cui vengano veicolate dallo scambio dei mediatori delle interazioni stesse – allora, nell’intervallo di tempo più o meno breve che intercorre tra un’interazione e l’altra, i sistemi fisici risultano effettivamente isolati.

Se si considera la parola "stato" come una descrizione della potenzialità piuttosto che di una realtà, allora il concetto di potenzialità coesistenti è abbastanza plausibile, poiché una potenzialità può comportare la sovrapposizione con altre potenzialità.

W. HEISENBERG (Heisenberg, 1958)

Stati possibili e sovrapposizione

In questo lavoro per "stato possibile" di un sistema fisico si intende ogni suo stato che rispetta i vincoli ai quali il sistema è soggetto. Un sistema isolato è soggetto solamente ai suoi vincoli *interni*, cioè a quei vincoli che definiscono il sistema stesso, e dunque sussistono indipendentemente dal contesto fisico in cui il sistema è inserito. In altri termini, un sistema isolato non è soggetto a vincoli che l'interazione con altri sistemi gli imporrebbe di rispettare, e che nel seguito verranno detti vincoli *esterni*. Pertanto un sistema isolato non può discriminare tra i suoi stati possibili, cioè assumere uno (o qualcuno) dei suoi stati possibili ed escludere i rimanenti, che pure rispettano i medesimi vincoli interni.

Si supponga infatti, per assurdo, che un sistema isolato S si trovi in uno soltanto dei suoi stati possibili. Ciò significherebbe che, oltre ai vincoli interni che nel determinano gli stati possibili, è soggetto ad un ulteriore vincolo che seleziona lo stato in cui si trova, cioè che esclude i rimanenti. Tale vincolo non può essere interno, perché ciò sarebbe in contrasto con la premessa secondo la quale anche gli altri stati del sistema sono possibili. Deve dunque trattarsi di un vincolo esterno, cioè deve essere posto da un sistema S' diverso da S, il che richiede che i due sistemi interagiscano. Ma questa richiesta è incompatibile con la premessa che il sistema S è isolato. Sembra dunque necessario concludere che un sistema isolato sovrappone tutti i suoi stati possibili. In effetti, come ha osservato Heisenberg (Heisenberg, 1955), «un sistema tagliato fuori dal mondo esterno è di carattere potenziale ma non attuale». Diremo pertanto che lo stato di un sistema isolato è uno stato *potenziale*, intendendo con ciò affermare che si tratta di uno stato *plurale*, dato dalla sovrapposizione di *tutti* i suoi stati possibili, quelli che soddisfano i suoi vincoli interni.

Tale conclusione è decisamente contro-intuitiva, perché i sistemi fisici si presentano all'osservazione sempre e soltanto in uno dei loro stati possibili. Ma i sistemi osservati non sono sistemi isolati, proprio perché l'osservazione di un sistema richiede un'interazione con lo stesso. Pertanto, il carattere contro-intuitivo della conclusione sopra tratta poggia sul pregiudizio secondo il quale anche i sistemi isolati, come quelli osservati, si troverebbero in uno solo dei loro stati possibili (con l'unica differenza che, nel caso dei sistemi isolati, non sarebbe possibile conoscere il loro stato). Sulla base di quanto considerato la sovrapposizione di stati che caratterizza i sistemi isolati assume una valenza *ontologica*, ancor prima che *epistemica*. Tuttavia risulta interessante considerare questa sovrapposizione anche dal punto di vista epistemico.

Una teoria fisica deve fornire una descrizione dei sistemi fisici conosciuti che sia coerente con le evidenze sperimentali disponibili. Nel migliore dei casi questa descrizione è anche completa, nel senso che descrive *completamente* ciascuno dei sistemi fisici noti. Tale descrizione può considerarsi completa se *comprende e compone tutti* gli stati possibili del sistema, cioè tutti gli stati del sistema compatibili con i vincoli cui è soggetto. Pertanto, se la teoria descrive un sistema tramite una funzione di stato, questa deve esprimere formalmente la sovrapposizione degli stati del sistema.

Proprio perché la descrizione massimale del sistema richiede che la sua funzione di stato formalizzi la *sovrapposizione* di tutti i suoi stati possibili, e proprio perché si tratta di stati *possibili*, non *effettivi*, la funzione di stato ha una valenza necessariamente *statistica* nel senso che, come viene sostenuto nel seguito, deve esprimere la frequenza relativa con la quale il sistema S, altrimenti isolato, assume ciascuno dei suoi stati possibili quando interagisce con un altro sistema S'. In altre parole, se la descrizione del sistema data dalla sua funzione di stato è completa, i valori che questa assume sullo spazio degli stati possibili non possono che esprimere le *frequenze relative* con le quali il sistema li assume *effettivamente* in virtù dall'interazione con un altro sistema.

Da questo punto di vista il carattere intrinsecamente statistico della funzione d'onda non rappresenta un limite della meccanica quantistica. Anzi, per quanto appena considerato, se una teoria fisica offre una descrizione *completa* dei sistemi fisici, non sembra ragionevole richiedere che preveda gli esiti delle misure.

Le relazioni formali contenute in questa teoria – cioè il suo intero formalismo matematico – dovranno essere contenute probabilmente, sottoforma di deduzioni logiche, in ogni teoria non inutile del futuro.

A. EINSTEIN (Einstein, 1949)

Equazione di stato

Secondo il primo principio della termodinamica un sistema fisico isolato conserva la propria energia. Sulla base del teorema di simmetria di Noether, ad ogni simmetria della lagrangiana di un sistema fisico corrisponde una quantità conservata dallo stesso. Se si richiede che anche la funzione di stato contenga l'informazione massimale sul sistema, deve esprimere formalmente le stesse simmetrie della lagrangiana. Poiché un'operazione di simmetria è definita come una trasformazione che lascia invariato il suo oggetto, la funzione di stato deve risultare invariante sotto l'azione dell'operatore corrispondente alla quantità conservata dal sistema. Sulla scorta di queste premesse sembra necessario richiedere che la funzione di stato ψ di un sistema isolato sia autofunzione dell'operatore \hat{H} corrispondente all'energia del sistema, con l'autovalore E ad esprimere la relativa quantità conservata.¹ In quest'ottica l'equazione di stato di un sistema isolato è la seguente.

$$\hat{H}\psi = E\psi \quad (1)$$

Il vincolo che tale equazione pone al sistema cui si riferisce, cioè al sistema isolato, è quello di conservare l'energia E . Pertanto la funzione di stato ψ che la risolve deve sovrapporre tutti gli stati degeneri del sistema, che ne rappresentano tutti gli stati possibili, assegnando a ciascuno il proprio peso statistico.

Fin quando la riduzione del pacchetto d'onda sarà una componente essenziale, e fin quando non sapremo esattamente quando e in che modo essa sostituisce l'equazione di Schroedinger, noi non avremo una formulazione esatta e non ambigua della nostra teoria fisica più fondamentale.

J. BELL (Bell, 1987)

Interazione e riduzione

Si consideri un sistema S che interagisce con un altro sistema S' . In virtù dell'interazione i due sistemi diventano le parti del sistema composto SS' . Dal punto di vista di un terzo sistema S'' isolato rispetto al sistema SS' , questo sovrappone tutti i suoi stati possibili. Ciascuno di tali stati, oltre a rispettare i vincoli interni cui è soggetto il sistema composto SS' , deve associare *uno* stato possibile del sistema componente S a *uno* stato possibile dell'altro sistema componente S' . Ne consegue che l'interazione tra due sistemi altrimenti isolati S e S' deve ridurre le rispettive sovrapposizioni di stati possibili a una coppia di stati effettivi. Tale processo di riduzione, che in quest'ottica risulta logicamente necessario, non ammette una formalizzazione matematica in quanto comporta la transizione *discontinua* tra due funzioni di stato *irriducibili* l'una all'altra, quella del sistema isolato S (prima e dopo la misura) e quella del sistema isolato SS' (durante la misura).

Il presente lavoro si propone di spiegare questo processo di riduzione prendendo le mosse dalla posizione filosofica di W. Heisenberg (Heisenberg, 1955), secondo il quale le equazioni della meccanica quantistica «governano il possibile e non l'effettivo». Infatti l'equazione (1) regola i sistemi isolati che, come sopra osservato, sono sistemi di natura *potenziale*, non *attuale*. A tal proposito conviene ribadire che, come ha osservato lo stesso Heisenberg (Heisenberg, 1955), «un sistema tagliato fuori dal mondo esterno è di carattere potenziale ma non attuale». Ma che cosa significa, dal punto di vista fisico, che un sistema isolato «è di carattere potenziale ma non attuale»? La proposta avanzata dal presente lavoro è quella di assumere che i termini «potenziale» e «attuale», anziché esprimere una distinzione meramente nominale, individuino due distinti *livelli* della realtà fisica. Più precisamente, dal momento che l'esistenza del livello «attuale» della realtà fisica non è in discussione, la proposta è quella di ipotizzare l'esistenza di un secondo livello di realtà fisica, il livello «potenziale», quello che secondo Heisenberg è regolato dalla meccanica quantistica.

¹ Poiché la stessa richiesta può avanzarsi rispetto alle altre quantità conservate da un sistema isolato, la funzione di stato ψ del sistema deve essere autofunzione anche dei relativi operatori.

La proposta potrebbe apparire quantomeno esotica. Tuttavia, dal punto di vista metodologico, risulta per certi versi analoga a quella che la cosmologia ha da tempo avanzato ipotizzando l'esistenza dell'energia oscura, al fine di rendere compatibili certe evidenze cosmologiche – come l'espansione accelerata dell'universo – con la teoria della relatività generale.

Se si prende sul serio l'esistenza di un livello *potenziale* della realtà fisica, il carattere statistico della funzione d'onda diventa una conseguenza di questa ipotesi. Infatti, a causa dell'interazione su cui si basa la misura, il sistema da misurare cessa di essere isolato, cioè passa dal livello potenziale a quello attuale. Per quanto sopra considerato a proposito dei sistemi isolati, nel livello potenziale il sistema S sovrappone tutti i suoi stati possibili, mentre in base a quanto appena considerato a proposito dei sistemi interagenti S e S', nel livello attuale il sistema S (e il sistema S') assume solo uno dei suoi stati possibili. Ne consegue che l'interazione introdotta dalla misura impone al sistema S (e al sistema S') di assumere uno solo dei suoi stati possibili e, proprio in quanto la misura seleziona uno degli stati *possibili*, i suoi esiti non possono che presentare una distribuzione intrinsecamente statistica.

Se la funzione di stato di un sistema S descrive il sistema isolato, l'effetto della misura non è quello di provocarne "collasso", ma semmai quello di far venir meno il suo significato fisico. Infatti, all'atto della misura, il sistema misurato S cessa di essere un sistema isolato, e dunque la sua funzione di stato cessa di descriverne l'evoluzione. L'interazione tra il sistema misurato S e il sistema di misura S' configura un sistema isolato SS' differente dal primo, che sarà dunque descritto da una funzione di stato diversa.

L'interpretazione proposta differisce da quella a "molti mondi" avanzata da Hugh Everett III (Everett, 1957) nel senso che, per quanto considerato nel presente lavoro, i "molti mondi" configurerebbero il livello *potenziale* della realtà fisica, mentre il "mondo" rappresenterebbe la realtà fisica *attuale*.

L'atomo più semplice, chiamato idrogeno, è formato da un elettrone e da un protone. Tramite lo scambio di fotoni, il protone trattiene vicino a sé l'elettrone che gli danza intorno.

R. FEYNMAN (Feynman, 1985)

L'atomo di idrogeno

Secondo l'ipotesi sopra avanzata la realtà fisica sarebbe strutturata su due livelli, quello potenziale e quello attuale. Tale ipotesi viene ora utilizzata per proporre una descrizione dell'atomo di idrogeno. In questo tentativo i generici sistemi S e S' sopra considerati assumono rispettivamente i ruoli dell'elettrone e del protone, mentre il sistema composto SS' rappresenta l'atomo stesso. La descrizione proposta assume che l'elettrone e il protone interagiscano scambiandosi mediatori dell'interazione, e dunque che la loro interazione non sia continua nel tempo. In questo caso l'elettrone e il protone alternano fasi di interazione a fasi di isolamento, cioè passano dal livello attuale al livello potenziale della realtà fisica, e viceversa.

Per quanto sopra considerato, nella fase di interazione ciascuno di essi assume uno dei propri stati possibili. In particolare, se l'interazione è tale da selezionare una delle loro posizioni possibili, nella fase di interazione l'elettrone e il protone prendono posizione l'uno rispetto all'altro. Infatti la posizione di un sistema fisico è definita solo in *relazione* a un sistema di riferimento, e poiché in termini fisici questa relazione deve essere considerata come un'*interazione*, il sistema di riferimento non può essere inteso come un astratto sistema di coordinate spazio-temporali, ma come un sistema fisico vero e proprio, col quale l'altro sistema interagisce. In questo senso, se l'interazione tra S e S' seleziona una delle loro posizioni possibili, ciascuno dei due sistemi diventa il sistema di riferimento dell'altro.

Una volta cessata l'interazione, l'elettrone e il protone si trovano isolati l'uno dall'altro. In base a quanto sopra considerato a proposito dei sistemi isolati, nelle fasi di isolamento sia l'elettrone che il protone sovrappongono i propri stati possibili, ognuno con il proprio peso statistico. In particolare, poiché l'equazione di Schrödinger è formalmente analoga all'equazione del calore (con coefficiente di diffusione immaginario), cessata l'interazione i pesi statistici delle posizioni dell'elettrone e del protone evolvono nel tempo. Poiché il coefficiente di diffusione è inversamente proporzionale alla massa, la diffusione dell'elettrone è molto più rapida rispetto a quella del protone.

Si può dunque, con buona approssimazione, considerare il protone come un corpo *persistente e in quiete*, e l'elettrone come un corpo *effimero e in movimento*. Questo movimento non va però inteso come una variazione continua della posizione, proprio perché l'elettrone alterna fasi in cui prende posizione a fasi in cui la perde. In altri termini, se si valutasse il processo solamente dal punto di vista del livello attuale della realtà fisica, si arriverebbe alla conclusione che l'elettrone “scompare” dalla posizione che ha assunto in virtù dell'interazione con il protone, e “ricompare” in una posizione differente in virtù dell'interazione successiva. Naturalmente, tra le due interazioni l'elettrone non “scompare” nel senso che cessa di esistere, anche perché ciò violerebbe il principio di conservazione dell'energia. Secondo lo schema concettuale proposto, al venir meno dell'interazione con il protone l'elettrone diventa un sistema isolato, cioè passa dallo stato attuale della realtà fisica al suo livello potenziale, che è regolato dall'equazione di Schrödinger. Poiché l'operatore \hat{H} corrispondente all'energia dell'elettrone contiene sia il termine cinetico che il termine relativo al potenziale di interazione, cessata l'interazione la posizione dell'elettrone diffonde fino a ripristinare lo stato stazionario corrispondente alla sua energia, o almeno fino all'interazione successiva. Ciò spiega in che modo l'elettrone cambia posizione senza per questo seguire delle traiettorie attorno al nucleo, e dunque senza perdere energia per irraggiamento elettromagnetico. In quest'ottica un orbitale atomico rappresenta la posizione potenziale dell'elettrone, mentre la misura di posizione restituisce la sua posizione attuale.

Veramente è convinto che la Luna esista solo quando la si guarda?

ALBERT EINSTEIN (Einstein, 1986)

Sistemi macroscopici

I due livelli di realtà fisica ipotizzati possono ritenersi tali se sono fisicamente differenti, cioè se sono regolati da leggi fisiche diverse. Come già osservato, secondo Heisenberg le leggi della meccanica quantistica “governano il possibile e non l'effettivo”. Si pone dunque la seguente questione: se il livello potenziale della realtà fisica è regolato dalla meccanica quantistica, da quale meccanica è regolato il suo livello attuale?

Nella sezione precedente il protone che costituisce il nucleo dell'atomo di idrogeno è stato approssimato a un corpo *persistente*. Questo perché la sua diffusione è piuttosto lenta rispetto a quella dell'elettrone. A maggior ragione può essere considerato persistente l'atomo d'idrogeno (a meno che non lo si consideri a sua volta un sistema isolato) Questo non tanto per il contributo – peraltro trascurabile – della massa dell'elettrone alla riduzione del coefficiente di diffusione, quanto perché sembra ragionevole supporre che l'atomo di idrogeno interagisca ancor più frequentemente con l'ambiente. In quest'ottica la frequenza di interazione con l'ambiente è ancora maggiore per l'atomo di carbonio, e aumenta considerevolmente per una molecola C_{60} (Zeilinger, 1999). Gli effetti di interferenza sono stati osservati anche per molecole più pesanti del fullerene. Tuttavia, se al crescere delle dimensioni del sistema aumenta la sua frequenza di interazione con l'ambiente, diventa sempre più difficile mantenerlo isolato, cioè evitare la sua transizione dal livello potenziale della realtà fisica al livello attuale. Inoltre, come già osservato, a una maggior massa del sistema corrisponde un minor coefficiente di diffusione, per cui un sistema più massivo impiega più tempo per passare dallo stato puro in cui è stato preparato dall'interazione allo stato puro cui tende asintoticamente nel tempo, quello del sistema isolato da un tempo infinito.

Sembra dunque ragionevole attendersi che gli effetti della decoerenza ambientale (Castagnino, 2008) si manifestino più nettamente per i sistemi mesoscopici.

Nel caso di un sistema macroscopico la frequenza di interazione con l'ambiente è tale che il sistema rimane isolato per un tempo insufficiente a diffondere apprezzabilmente. Pertanto il suo movimento, guidato dal potenziale cui è soggetto, può considerarsi con buona approssimazione continuo. In quest'ottica, alla domanda sopra formulata sembra possibile rispondere che, nel caso dei corpi macroscopici, lo stato attuale della realtà fisica è regolato dalla meccanica classica.

Ecco qui una splendida teoria, forse tra le più perfette, precise ed affascinanti che l'uomo abbia mai concepito. Abbiamo prove esterne ma più di tutto interne che la sua validità è limitata, che essa non descrive tutto ciò che pretende di descrivere. Il campo di validità della teoria è certamente enorme, ma sotto sotto essa ci sussurra. «Non prendermi in modo assoluto o con troppa serietà. Sono in certo modo legata ad un mondo di cui non parlate quando parlate di me».

J. OPPENHEIMER (Oppenheimer, 1957)

Conclusioni

L'ipotetico livello potenziale della realtà fisica, riservato ai sistemi isolati, è per sua natura inaccessibile all'esperienza, ma la sua evoluzione è prevedibile tramite l'equazione di Schrödinger, che è deterministica. Il livello *attuale* della stessa realtà, che è invece prerogativa dei sistemi interagenti, è accessibile all'esperienza, ma per i sistemi microscopici la sua evoluzione è imprevedibile a causa del carattere intrinsecamente statistico della funzione di stato. Tale evoluzione risulta prevedibile solo per i sistemi macroscopici, in accordo con la meccanica classica.

Ogni interpretazione della meccanica quantistica, e in particolare ogni soluzione del problema della misura, introduce un elemento di novità rispetto alla visione classica. L'ipotesi che esista un livello potenziale della realtà fisica è piuttosto impegnativa. Inoltre, non sembra possibile né confermarla né smentirla, nemmeno in linea di principio, il che la rende alquanto problematica dal punto di vista scientifico. Tuttavia sembra un'ipotesi piuttosto naturale almeno in quanto, in virtù della linearità degli operatori coinvolti, il formalismo della meccanica quantistica pare descrivere proprio una realtà di carattere potenziale.

BIBLIOGRAFIA

- Bell J, 1987, *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica*, Adelphi, Milano, 2010
- Castagnino M. et al., 2008, *A general theoretical framework for decoherence in open and closed systems*, Classical and Quantum Gravity, 25
- Einstein A., 1949, in Bell J. S., *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica*, Adelphi, Milano, 2010
- Einstein A., 1950, *Pensieri degli anni difficili*, Bollati Boringhieri, Torino, 2014
- Einstein A., 1948, in Pais A., «Sottile è il Signore...». *La scienza e la vita di Albert Einstein*, Bollati Boringhieri, Torino, 1986
- Everett III, Hugh, 1957, "Relative State" formulation of Quantum Mechanics, in *Reviews of Modern Physics*, vol. 29, n. 3
- Feynman R., 1989, *QED*, Adelphi, Milano, 2010
- Heisenberg W., 1925, *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.*, in *Zeitschrift für Physik*, vol. 33, pp. 879-893.
- Heisenberg W., 1955, *Niels Bohr e lo sviluppo della fisica*, ui.adsabs.harvard.edu,
- Heisenberg W., 1958, *Fisica e filosofia*, Il Saggiatore, Milano, 2013
- Heisenberg W., 1971, *Fisica e oltre*, Bollati Boringhieri, Torino, 2013
- Oppenheimer J., 1957, in Moore J. W., *Chimica fisica*, Piccin, Padova, 1979
- Shimony, A., 1990, *Sixty-two years of uncertainty*, Plenum Press, New York
- Zeilinger A. et al., 1999, *Wave-particle duality of C₆₀ molecules*, *Nature*, vol. 401, n. 6754