

AUTO RICERCA

Una classificazione dei processi di osservazione nella ricerca esteriore

Massimiliano Sassoli de Bianchi

Numero 3

Anno 2012

Pagine 129-191



Riassunto

Basando la nostra analisi sull'approccio di *Geneva-Brussels* ai fondamenti della fisica, forniamo un chiarimento e una classificazione del concetto chiave di osservazione. Un'entità può essere osservata con o senza uno scopo. Nel secondo caso, l'osservazione è un processo di scoperta puramente non invasivo; nel primo caso, è un processo puramente invasivo, che può comportare aspetti sia di creazione che di distruzione. Un'entità può anche essere osservata con o senza che vi sia un controllo completo del processo di osservazione. In quest'ultimo caso, l'osservazione può essere descritta da un meccanismo di *rottura di simmetria*, attraverso il quale viene selezionato uno specifico processo osservativo deterministico da un insieme di processi potenziali, come formulato nell'*approccio a misure nascoste* proposto da Diederik Aerts. Si ha allora a che fare con un cosiddetto *test prodotto*, o *osservazione prodotto*, la cui conseguenza è che i risultati possono essere previsti solo in termini probabilistici, come nel caso delle tipiche misure quantistiche. Mostriamo inoltre che le osservazioni possono riguardare proprietà *intrinseche* (stabili) dell'entità osservata, oppure proprietà *relazionali* (effimere) tra l'osservatore e quest'ultima; inoltre, possono riguardare proprietà intermediarie, né puramente classiche, né puramente quantistiche. La nostra analisi ci permette di proporre una caratterizzazione concettuale generale delle misure quantistiche, come processi osservativi che coinvolgono tre aspetti: (1) osservazioni prodotto, (2) aspetti di pura creazione e (3) proprietà relazionali effimere. Esploriamo anche l'importante concetto di *non-spazialità* e sottolineiamo alcune differenze e somiglianze tra le osservazioni quantistiche e quelle classiche/relativistiche.

Premessa

Lo scopo del presente scritto è quello di fornire un chiarimento e una classificazione del concetto di osservazione, così come viene utilizzato nelle scienze fisiche. Per fare ciò, faremo ampio uso delle scoperte della *scuola di Geneva-Brussels* sui fondamenti della fisica, che annovera tra i suoi fondatori Josef Maria Jauch, Constantin Piron e Diederik Aerts (Si vedano ad esempio le referenze 1-10 e i lavori ivi citati). Pertanto, nel complesso, il presente saggio può essere considerato anche come una rassegna non tecnica di alcuni dei risultati e delle intuizioni sviluppate negli ultimi decenni da questa scuola, e più in particolare da Diederik Aerts, nella sua *visione della creazione-scoperta* [6, 7] e nel suo *approccio a misure nascoste* [7, 11].

Tuttavia, nel presente testo faremo alcune scelte didattiche che si discostano leggermente da quelle utilizzate da Aerts e collaboratori. La più importante riguarda il concetto di osservazione, che è il tema centrale del presente lavoro. Nell'ambito della visione della creazione-scoperta, si è soliti affermare che le misure quantistiche non sono semplici osservazioni, in quanto possono provocare un vero e proprio cambiamento di stato dell'entità misurata. Nel seguito, capovolgeremo tale affermazione e adotteremo una visione semantica opposta: *le osservazioni non sono solo rilevazioni di ciò che preesisteva in un sistema fisico, ma processi che in generale possono provocare cambiamenti*, e questo rimane vero anche al di fuori del dominio microscopico. In altri termini, il nostro punto di vista didattico sarà quello di mostrare che l'osservazione è un concetto molto più ampio di quello che si intende di solito, che include anche l'idea di *trasformazione*.

Data la natura di questo saggio, che da un lato ripercorre alcuni risultati (non sufficientemente noti) della scuola di Geneva-Brussels (e in particolare di Piron e Aerts) e dall'altro presenta questi stessi risultati con una prospettiva talvolta leggermente diversa, non è

evidentemente molto pratico distinguere sempre nel testo i pezzi di ragionamento che sono letteralmente presi in prestito da Piron, Aerts e collaboratori, e quelli che invece, pur ispirandosi a quei ragionamenti, sono qui presentati in una forma o prospettiva leggermente diversa, senza compromettere la leggibilità e la scorrevolezza del testo.

Pertanto, invitiamo il lettore che sarà affascinato dalle idee presentate in questo lavoro, a risalire alle fonti originali, alle quali faremo spesso riferimento nel testo, per apprezzare anche il diverso stile espositivo, le scelte didattiche e gli elementi esplicativi che sono stati forniti dai loro creatori.

Ma ci sono anche – crediamo – alcune interessanti idee ed esempi originali nella nostra analisi, che per quanto possiamo valutare non sono ancora stati resi pienamente espliciti dai suddetti autori, come ad esempio la nostra caratterizzazione delle misure quantistiche come osservazioni di *proprietà* genuinamente *relazionali* tra l'osservatore e le entità osservate, come spiegazione della loro natura effimera.

Detto questo, possiamo aggiungere che se avessimo avuto la possibilità di accedere ai chiarimenti concettuali presentati in questo articolo, quando da studenti ci siamo avvicinati per la prima volta alla fisica quantistica, sicuramente avremmo trovato il contenuto di questa teoria molto meno misterioso e la sua comprensione concettuale molto meno problematica.

Introduzione

L'osservazione è un concetto centrale nella scienza e la sua corretta comprensione è evidentemente della massima importanza. Anche al di fuori della scienza l'osservazione svolge un ruolo cruciale, poiché attraverso l'osservazione che, in generale, raccogliamo dati in provenienza dal reale. Un punto importante di cui è bene essere consapevoli è che *l'osservazione non è interpretazione*. Una cosa è osservare e un'altra è trarre conclusioni dalle nostre osservazioni; una

cosa è *descrivere* e un'altra è *spiegare* il contenuto delle nostre descrizioni.

In generale, riteniamo che l'osservazione debba essere un'attività neutra, senza altri obiettivi che l'osservazione stessa, mentre l'interpretazione dovrebbe essere un'attività molto più orientata allo scopo; lo scopo principale del processo interpretativo nella scienza è la *spiegazione* e, sulla base della spiegazione, la *previsione*.

L'osservazione è tipicamente associata al processo sperimentale di raccolta dei dati, mentre l'interpretazione è associata alla creazione di modelli e teorie esplicative. Tuttavia, una distinzione radicale tra osservazione e interpretazione non è possibile. Ci sono infatti elementi di oggettività nelle nostre interpretazioni teoriche dei dati sperimentali, considerando che l'evoluzione delle nostre teorie scientifiche si fonda su un metodo di natura critica.

Ma ci sono anche elementi di soggettività e convenzionalità (cioè interpretazione) nelle nostre presunte osservazioni oggettive. Questo perché vediamo necessariamente la realtà attraverso le lenti delle nostre teorie, che determinano cosa, come, dove e quando osservare. Citando Mark Twain, "Per chi ha solo un martello, prima o poi tutto sembrerà un chiodo". Il martello, nella metafora di Twain, rappresenta i nostri filtri cognitivi, le nostre teorie della realtà, i nostri paradigmi e le nostre visioni del mondo, che ci dicono cosa dobbiamo osservare e come farlo.

Ma un aspetto ancora più sottile è quello di divenire consapevoli che non solo le nostre osservazioni sono fortemente influenzate dalle nostre teorizzazioni e, viceversa, le nostre teorizzazioni sono fortemente influenzate dalle nostre osservazioni, ma anche la nostra comprensione della realtà è fortemente influenzata dalla nostra comprensione di ciò che un'osservazione è, o si ritiene debba essere.

Quanto appena espresso è ovviamente cruciale in tutti gli ambiti dell'attività umana. Nel presente scritto, tuttavia, limiteremo le nostre considerazioni alla fisica, esplorando le conseguenze di un'analisi più approfondita del concetto chiave di osservazione, al

fine di chiarire alcuni importanti problemi interpretativi delle teorie fisiche quantistiche e classiche/relativistiche.

Osservazione e scoperta

Se apriamo un buon dizionario, possiamo leggere che l'osservazione è un processo attraverso il quale un osservatore può acquisire (e registrare) informazioni su oggetti appartenenti alla sua realtà. Per fissare le idee, facciamo un esempio di un atto di osservazione molto semplice. Immaginate di trovarvi in una foresta. I vostri occhi sono spalancati e guardate semplicemente gli alberi che vi circondano. In altri termini, usando gli occhi e il cervello come strumento di osservazione, rilevate la luce del sole riflessa dagli alberi e, così facendo, raccogliete informazioni su alcune loro proprietà, come ad esempio la loro collocazione spaziale, le loro dimensioni, la varietà, i colori e così via. Un punto cruciale di questa attività di osservazione è che è completamente *non invasiva* rispetto alle entità osservate. Osservate gli alberi, ma la vostra osservazione non ha alcun effetto su di loro.

È probabilmente da esempi osservativi di questo tipo, tipici dell'interazione degli esseri umani con l'ambiente naturale, che è emerso una sorta di pregiudizio, a cui si aderisce in modo quasi inconsapevole, secondo il quale *sarebbe sempre possibile osservare le innumerevoli entità che popolano la nostra realtà senza disturbarle, cioè senza influenzarne lo stato e l'evoluzione*¹.

¹ A dire il vero, questo pregiudizio vale solo per le entità inanimate. Infatti, l'osservazione di entità viventi, come quando un cacciatore si nasconde per osservare una preda da lontano, può comportare alcuni livelli molto sottili di inevitabile disturbo che potrebbero influenzare il comportamento dell'entità vivente osservata. La realtà di tali fenomeni, come la cosiddetta *sensazione di essere fissati*, è molto controversa nei circoli scientifici, nonostante l'esistenza di alcune evidenze a loro favore (si veda ad esempio [12], un numero speciale del *Journal of Consciousness Studies* dedicato a questo argomento controverso). Ma indipendentemente dalla veridicità di questi fenomeni, dobbiamo osservare, per

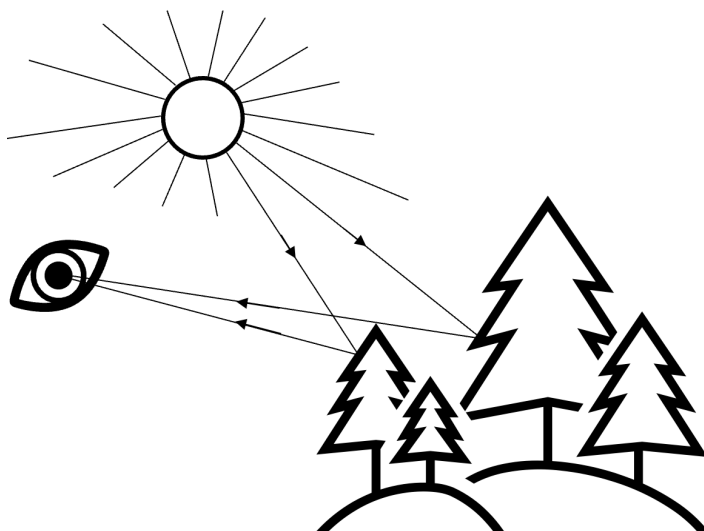


Figura 1 Una rappresentazione schematica dei raggi del sole che illuminano gli alberi di una foresta. Una parte di essi viene assorbita e una parte viene riflessa. Quest'ultima può essere raccolta dall'occhio di un viandante, che potrà così scoprire la loro presenza e ubicazione.

L'origine di tale pregiudizio è abbastanza ovvia. Viviamo in un ambiente terrestre che è quasi costantemente illuminato dalla luce del sole o dalla luce indiretta della luna (e in tempi più recenti dalla luce artificiale degli apparecchi di illuminazione elettrica). Pertanto, le entità che popolano la nostra realtà macroscopica emettono costantemente luce, sia quella che producono direttamente sia quella che riflettono. È così che siamo venuti a conoscenza di queste entità (naturalmente, stiamo semplificando, perché non è solo il senso della vista ad essere coinvolto nella scoperta del nostro ambiente), tanto che abitualmente le riteniamo nella loro condizione indisturbata

onestà intellettuale, che la convinzione comune tra gli esseri umani è che le entità viventi siano in grado di percepire, in qualche modo misterioso, se altre entità viventi stanno concentrando la loro attenzione su di loro.

quando emettono luce, sia essa diretta o indiretta. Per questo riteniamo che osservarle significhi raccogliere qualcosa che esse ci offrono spontaneamente, come se inviassero costantemente messaggi al mondo, informandolo sulle loro condizioni.

Per dirla in modo figurato, è come se il mondo ci parlasse costantemente, senza che noi gli chiediamo nulla di specifico, come una persona che recita un lungo monologo, esteriorizzando i suoi pensieri ad alta voce per chiunque sia disposto ad ascoltarli. Così, ascoltando i messaggi emessi spontaneamente dalle diverse entità che popolano la nostra realtà, siamo in grado di scoprire molti dei loro attributi e proprietà. Quindi, potremmo dire che la nostra comprensione più elementare del concetto di osservazione è che osservare un'entità significa *scoprire* ciò che un'entità è, senza influenzare in alcun modo la sua "esserità".

Questo modo di intendere il concetto di osservazione, come puro atto di scoperta, è profondamente radicato anche nella fisica, nel formalismo della meccanica classica, anche se in modo invisibile. Infatti, poiché si ritiene che l'osservazione non abbia effetti su ciò che viene osservato, essendo solo un atto di scoperta di ciò che è già presente in un sistema, non c'è bisogno di rappresentare esplicitamente l'osservatore in una teoria fisica. Pertanto, le teorie classiche descrivono gli stati, le proprietà e l'evoluzione delle entità fisiche assumendo a priori che tali stati, proprietà ed evoluzione sarebbero gli stessi qualora fossero osservati o non osservati (cioè scoperti o non scoperti) da un osservatore (tipicamente uno scienziato umano con il suo apparato sperimentale).

Porre domande

Ma cosa succede se il monologo della realtà cessa improvvisamente? O se fossimo stanchi di ascoltare solo passivamente quel monologo e volessimo iniziare una *conversazione*, un *dialogo interattivo*? Immaginate di trovarvi ancora una volta nella foresta, ma questa volta in una notte senza luna. Ciò significa che non potete più

osservare gli alberi, perché non emettono o riflettono più una luce che i vostri occhi umani sono in grado di percepire. Se tuttavia avete sempre intenzione di osservarli, dovete assumere una posizione più attiva nel vostro processo osservativo. Per esempio, potete accendere una torcia e usarla per illuminare gli alberi circostanti, per osservare la loro posizione spaziale.

Quando accendete una torcia, entrate nella scena della realtà e trasformate il monologo in un dialogo. Accendere una torcia per proiettare la sua luce nell'ambiente significa porre alle entità che lo abitano domande specifiche, le cui risposte corrispondono alla luce che esse diffonderanno verso di voi e che voi sarete in grado di rilevare, cioè di osservare.

Ora, come è noto, la pressione esercitata da una sorgente elettromagnetica, per quanto estremamente debole, non è nulla. Tale pressione (che varia a seconda che la luce venga assorbita o riflessa) non è certamente sufficiente a esercitare un'influenza apprezzabile sulla struttura macroscopica di alberi massicci, ma la situazione cambia drasticamente nel caso in cui si sia interessati a osservare, e quindi illuminare, oggetti molto più piccoli.

Che la luce sia in grado di esercitare una pressione, e quindi di perturbare gli oggetti che illumina, era ben noto anche prima dell'avvento della fisica quantistica. Tuttavia, non era considerato un problema, in quanto si riteneva che fosse sempre possibile, almeno in linea di principio, ridurre arbitrariamente l'intensità della sorgente luminosa e diminuire il suo effettivo disturbo, permettendo così di osservare qualsiasi entità – macroscopica o microscopica – senza influenzarne sensibilmente le condizioni (utilizzando a tal fine uno strumento di rilevazione più sensibile). Tornando alla nostra metafora dialogica, il presupposto classico è che sia sempre possibile non influenzare le risposte della realtà, semplicemente sussurrando le nostre domande e spalancando le orecchie per ascoltare i sussurri delle sue risposte.

Heisenberg è stato il primo a mettere seriamente in discussione la validità di tale pregiudizio, analizzando (con l'aiuto di Bohr) il

funzionamento di un ipotetico *microscopio gamma*, utilizzato per osservare le entità più piccole possibili: gli elettroni [13]. Non entreremo qui nelle numerose sottigliezze dell'analisi di Heisenberg, che gli permisero di fornire un primo argomento euristico a favore del suo famoso *principio di indeterminazione*. Ma ci permettiamo di segnalare quello che potrebbe essere un possibile fraintendimento riguardo alle ragioni che lo hanno portato a concludere che bisogna abbandonare l'idea che sia possibile osservare un elettrone senza influenzarne lo stato.

L'argomentazione abituale (semplificando all'estremo) è la seguente: a causa della natura quantistica della luce, che può trasferire energia e quantità di moto solo in piccoli pacchetti indivisibili, chiamati *fotoni*, è impossibile abbassare arbitrariamente l'intensità di un fascio di luce che illumina un elettrone, al di sotto di un certo livello, visto che la più bassa intensità possibile corrisponde al trasferimento di un singolo fotone, e che un singolo fotone porta con sé ancora una certa quantità finita di energia e quantità di moto, e quindi produrrà un effetto di disturbo non trascurabile su un piccolissimo elettrone.

Questo però non è del tutto esatto, perché nulla ci impedisce di abbassare arbitrariamente l'intensità di un fascio di luce, se lo vogliamo. Infatti, ciò può essere fatto riducendo non solo il numero di fotoni potenzialmente trasferiti per unità di tempo, ma anche riducendo la loro frequenza. Quindi, anche se la natura della luce è quantistica, si può sempre produrre, in linea di principio, un fascio di luce di intensità arbitrariamente bassa, che provocherà un disturbo trascurabile anche a un piccolo elettrone.

Perché allora Heisenberg, nel suo famoso *gedankenexperimente*, insistette nell'utilizzare solo fotoni gamma ad alta frequenza? Il motivo è noto: egli non era solo interessato a porre all'elettrone una domanda specifica, riguardante la sua posizione nello spazio, ma era anche determinato a ottenere da esso una *risposta molto precisa*. E poiché la risoluzione di uno strumento ottico è proporzionale alla lunghezza d'onda della radiazione utilizzata, per ottenere una

risposta precisa fu costretto ad utilizzare dei fotoni gamma, che però producevano un disturbo non trascurabile.

Heisenberg si rese conto che quando pretendiamo dalla realtà una risposta molto precisa alle nostre domande, non abbiamo più la garanzia che queste domande siano prive di conseguenze su ciò che viene osservato. In altri termini, in non abbiamo più la garanzia che le nostre osservazioni si riducano ad atti non invasivi di pura scoperta.

Osservazione e distruzione

Un pregiudizio comune è quello di credere che il problema evidenziato da Heisenberg con la sua analisi del microscopio gamma sia pertinente solo per il micromondo. In altri termini, si è soliti ritenere che l'inevitabile e irriducibile disturbo dell'osservatore sull'osservato (il cosiddetto *effetto osservatore*) sia solo una delle tante stranezze del micromondo, ma che nulla del genere possa realmente accadere nella nostra realtà macroscopica quotidiana. Secondo questo autore, invece, la vera stranezza è il fatto che abbiamo dovuto aspettare Heisenberg per capire che le nostre osservazioni, che riguardino entità microscopiche o macroscopiche, non possono essere ridotte a meri atti di scoperta, essendo molto più di questo.

Infatti, una cosa è osservare la realtà senza avere a priori alcuna idea di ciò che stiamo per osservare, e un'altra cosa è diventare molto più orientati allo scopo nei nostri processi osservativi, decidendo in anticipo ciò che vogliamo osservare e assicurandoci che saremo in grado di raccogliere informazioni precise a riguardo. L'osservazione non può allora più essere intesa come un'attività di scoperta puramente non invasiva.

Come esempio paradigmatico, consideriamo un piccolo pezzo di legno² e immaginiamo di voler *osservare la sua bruciabilità*, cioè la

² L'esempio paradigmatico di un pezzo di legno, che analizzeremo più avanti nel testo, è stato introdotto per la prima volta da Diederik Aerts, nella sua tesi di

sua proprietà di essere un pezzo di materia bruciabile. Quando prendete una decisione del genere, non vi limitate più a raccogliere le informazioni che vi vengono spontaneamente offerte dall'entità lignea, ascoltando passivamente il suo monologo, ma entrate drammaticamente in scena ponendo una domanda molto specifica e, soprattutto, pretendendo una risposta molto specifica.

Porre una domanda del genere, e avere la certezza di ricevere dall'entità lignea una risposta certa, richiede di agire in un modo molto specifico, che dipenderà dalla definizione adottata per la proprietà della *bruciabilità*. La bruciabilità, come tutti sappiamo, è la capacità di un corpo, in determinate condizioni, di combinarsi con l'ossigeno per produrre calore. Esistono ovviamente diversi modi (e livelli di sofisticazione) per definire la proprietà di combustione di un'entità³. Ma ai fini della nostra discussione, sarà sufficiente adottare la seguente definizione: "Un'entità fisica è bruciabile se, mettendola a contatto con la fiamma di un fiammifero per 30 secondi, ciò innescherà una reazione che produrrà la sua disintegrazione".

Avendo definito cosa intendiamo per bruciabilità, siamo ora in grado di osservarla nella nostra entità di legno. Ovviamente, c'è un solo modo possibile per effettuare tale osservazione: bisogna prendere l'entità, metterla a contatto con la fiamma di un fiammifero per 30 secondi e verificare se questo produce la sua disintegrazione. Se ciò avviene, si può dire che si è riusciti a osservare la sua bruciabilità, altrimenti che non si è riusciti a osservarla.

In sintesi, se vogliamo osservare qualcosa di specifico e non limitarci a raccogliere ciò che la realtà ci offre spontaneamente,

dottorato [4], come mezzo per illustrare l'importante concetto di incompatibilità sperimentale.

³ Questa libertà nel considerare diverse definizioni possibili per le proprietà che associamo alle entità fisiche rivela che esiste un importante livello di convenzionalità nella nostra descrizione del mondo. Questo non significa che le proprietà fisiche siano totalmente arbitrarie, o soggettive, ma che c'è anche un'importante componente umana nella loro costruzione.

dobbiamo diventare molto più attivi nei nostri processi osservativi e porre domande specifiche (nella fattispecie, la domanda è: “Il pezzo di legno è bruciabile?”). Per ricevere una risposta alle nostre domande dobbiamo metterle in pratica, cioè eseguire degli esperimenti specifici. E quando lo facciamo, possiamo ricevere dall’entità in esame una risposta positiva o negativa, a seconda che l’osservazione abbia successo (confermata) o non abbia successo (non confermata)⁴. Tuttavia, un dialogo di questo tipo non può più essere considerato come un’attività di scoperta non invasiva, potendo avere conseguenze drammatiche per l’entità sotto osservazione, che può dare la sua risposta come un cigno che offre il suo ultimo canto!

Osservazione e creazione

Nelle sezioni precedenti abbiamo considerato due forme opposte di osservazione. Una puramente non invasiva, come quando fissiamo gli alberi di una foresta, corrispondente a un puro atto di scoperta, e una totalmente invasiva, come quando osserviamo la bruciabilità di un pezzo di legno e così facendo distruggiamo la proprietà in questione, insieme all’entità che la possiede.

L’aspetto invasivo e distruttivo del processo osservativo è associato, come abbiamo visto, alla nostra scelta di partecipare più attivamente al dramma della realtà, ponendo domande specifiche e pretendendo risposte precise. Tuttavia, la distruzione della proprietà che si sta osservando non è necessariamente la regola e può accadere anche il contrario: può accadere che siamo noi a creare la stessa proprietà che vogliamo osservare! Questa può apparire come un’affermazione più sconcertante, ma è solo perché non siamo

⁴ Un protocollo di questo tipo, che consiste nel porre una domanda specificando l’esperimento da eseguire, e la regola da utilizzare per interpretare i risultati dell’esperimento in termini di alternative “sì” (successo) e “no” (insuccesso), viene solitamente chiamato “domanda sì/no”, “esperimento sì/no” o “progetto sperimentale”, nell’ambito della scuola di Geneva-Brussels.

solitamente consapevoli del fatto che i nostri atti di creazione possono essere considerati anche atti di osservazione, e viceversa.

A titolo illustrativo, consideriamo un esempio tratto dalle interazioni umane. Gli esseri umani possono manifestare diversi stati psicologici, caratterizzati da proprietà specifiche. Consideriamo ad esempio la *sospettosità*. Quando una persona è sospettosa (cioè quando la proprietà della sospettosità è attuale per quella persona) di solito esibisce un certo numero di comportamenti, tipici di quella condizione, come ad esempio quello di guardare le altre persone con una certa insistenza. Prendiamo questo comportamento come una caratterizzazione approssimativa della proprietà della sospettosità. Immaginiamo quindi di entrare in un luogo, ad esempio una sala da tè, e di voler osservare la sospettosità delle persone presenti. Supponiamo di sapere da altre fonti che queste persone, in quel preciso momento, non stanno manifestando alcuna sospettosità. Tuttavia, quando iniziate a osservarle *con attenzione continuativa*, per rilevare la loro eventuale sospettosità, il vostro comportamento apparirà loro molto sospetto, così che a loro volta potrebbero iniziare a guardarvi con una certa insistenza. Di conseguenza, dalla vostra osservazione potreste concludere che alcune delle persone presenti nella sala da tè manifestano la proprietà della sospettosità.

Questo esempio è interessante perché rivela che non sempre siamo consapevoli del fatto che possiamo essere noi stessi i creatori di ciò che crediamo di scoprire. Una possibile obiezione potrebbe essere che gli esseri senzienti possono comportarsi in modo molto diverso dalle entità inanimate, come abbiamo sottolineato in precedenza. Per rispondere a questa obiezione, facciamo un altro esempio.

Consideriamo un piccolo oggetto solido di forma qualsiasi, fatto di un materiale non elastico, e immaginiamo di voler osservare la sua *incomprimibilità*, che ai fini del presente esempio definiremo come segue: “Un’entità fisica è incomprimibile se, sottoposta all’azione di una pressa meccanica che esercita una pressione di 10’000 pascal, subisce una variazione di volume non superiore all’1% del suo volume iniziale”.

Quando eseguiamo l'osservazione di cui sopra, cioè quando sottoponiamo l'entità alla pressione di 10'000 pascal nella pressa, il risultato può essere positivo o negativo, a seconda del materiale di cui è fatta l'entità e della sua forma. Nel caso in cui l'esito dell'osservazione sia positivo, ovvero che in seguito all'azione della pressa la variazione di volume dell'entità sia inferiore all'1%, possiamo concludere di aver effettivamente osservato la sua incomprimibilità. Tuttavia, non possiamo certo affermare che il processo di osservazione abbia creato l'incomprimibilità, poiché la proprietà era chiaramente già posseduta dall'entità prima dell'osservazione.

Ma cosa succede se non osserviamo l'incomprimibilità, cioè se la riduzione di volume dell'entità è superiore all'1%? In questo caso, possiamo concludere che prima della nostra osservazione l'entità non era incomprimibile, come confermato dalla nostra osservazione. Tuttavia, dobbiamo anche concludere che dopo la nostra osservazione l'entità ha acquisito la proprietà di essere incomprimibile. Infatti, se decidessimo di eseguire nuovamente il test, sapremmo in anticipo, con certezza, che l'esito dell'osservazione sarebbe positivo. Questo perché per osservare la proprietà dell'incomprimibilità abbiamo dovuto comprimere l'entità, e un'entità (non elastica) che è stata compressa è anche un'entità che è diventata incomprimibile, secondo la nostra definizione di incomprimibilità. In altri termini, dobbiamo concludere che il nostro processo osservativo ha creato proprio la proprietà che doveva osservare.

Tutto questo può apparire un po' bizzarro, poiché non osservando l'incomprimibilità, l'effetto della nostra osservazione è comunque la creazione dell'incomprimibilità, ma le cose stanno così e dobbiamo quindi concludere che un'osservazione può benissimo creare ciò che viene osservato, non solo nel dominio delle interazioni psicologiche, tra esseri umani, ma anche in quello delle interazioni tra entità inanimate.

In realtà, possiamo anche trovare degli esempi in cui non è necessario che l'osservazione fallisca per creare la proprietà che viene

osservata. Consideriamo una particella classica bidimensionale puntiforme, di carica elettrica negativa, e immaginiamo di voler osservare la sua *posizione spaziale orizzontale*. Supponiamo che gli scienziati che vivono in questo insolito universo possano osservare le posizioni orizzontali solo utilizzando degli strani *righelli seghettati* (vedi la Figura 2), le cui cavità sono caricate elettricamente in modo positivo. La procedura di osservazione è la seguente: “Posizionare il righello seghettato lungo l’asse orizzontale sotto la particella; quindi, attendere che la particella venga attirata in una delle cavità del righello, la cui posizione corrisponderà quindi la posizione orizzontale misurata per la particella in questione”.

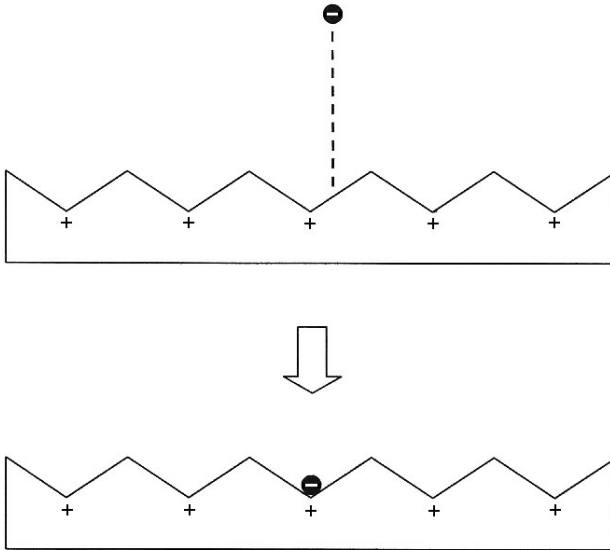


Figura 2 Osservazione della posizione orizzontale di una particella puntiforme mediante l’uso di un righello a dente di sega.

Chiaramente, a parte le circostanze molto particolari in cui la particella è già posizionata in perfetta corrispondenza con il centro di una delle cavità del righello seghettato, la procedura di osservazione

di cui sopra crea letteralmente la posizione orizzontale che si pone di osservare (cioè di misurare).

Classificare le osservazioni considerando i loro effetti

Finora abbiamo considerato solo gli effetti di un processo di osservazione in relazione alla proprietà specifica che viene osservata, ma naturalmente un'osservazione può potenzialmente influenzare (creare o distruggere) non solo la proprietà che si sta considerando, ma anche altre proprietà che l'entità osservata possiede, e questo può essere il caso anche quando l'osservazione è del tipo scoperta.

Torniamo al nostro pezzo di legno e immaginiamo di voler osservare la sua *galleggiabilità*. Supponiamo di definire la galleggiabilità come segue: “Un'entità fisica galleggia se, quando è totalmente immersa nell'acqua, subisce una forza verso l'alto superiore al suo peso, che la fa riemergere dall'acqua”.

Naturalmente, un'entità di legno, se fatta di legno convenzionale (non troppo denso), possiede la proprietà del galleggiamento, che quindi può essere osservata con successo. Contrariamente alla bruciabilità, il processo di osservazione della galleggiabilità non è distruttivo per l'entità. Infatti, alla fine del processo osservativo abbiamo ancora un pezzo di legno integro. Inoltre, l'osservazione della galleggiabilità non distrugge la galleggiabilità, come risulta evidente dal fatto che, se si decidesse di eseguire nuovamente l'osservazione, il risultato positivo sarebbe ancora una volta certo a priori. Tuttavia, non si può dire che il test sia totalmente non invasivo per quanto riguarda le altre proprietà possedute dall'entità lignea, come si evince dal fatto che la sua proprietà di *secchezza* viene ovviamente (temporaneamente) distrutta dalla procedura di osservazione.

Riassumiamo i risultati ottenuti fino a questo punto. Abbiamo visto che l'osservazione è un processo multiforme e che possiamo

distinguere diverse tipologie di osservazioni. Alcune osservazioni comportano un aspetto di pura scoperta, rispetto a ciò che viene osservato, mentre altre comportano aspetti di pura creazione o distruzione.

Le osservazioni che comportano un aspetto di pura scoperta possono essere suddivise in due categorie. Abbiamo la categoria delle *osservazioni-scoperta non invasive*, che lasciano l'entità osservata totalmente inalterata, come quando osserviamo gli alberi di una foresta raccogliendo la luce che spontaneamente ci offrono. E abbiamo la categoria delle *osservazioni-scoperta invasive*, che lasciano inalterata la proprietà osservata, come quando si osserva la galleggiabilità di un'entità di legno, senza comprometterla, ma distruggendo temporaneamente altre proprietà, come la sua secchezza.

Poi, ci sono i processi osservativi che comportano aspetti di pura creazione o distruzione di ciò che viene osservato. Questi sono ovviamente dei processi invasivi. Un'*osservazione-creazione invasiva* è un processo che crea la proprietà che osserva (ed eventualmente influisce anche su altre proprietà dell'entità osservata), come quando osserviamo la sospettosità di un essere umano, l'incomprimibilità di un oggetto non elastico o la posizione orizzontale di una particella puntiforme usando un righello seghettato. D'altra parte, un'*osservazione-distruzione invasiva* è un processo che distrugge la proprietà che osserva (ed eventualmente influisce anche su altre proprietà dell'entità osservata), come quando osserviamo la bruciabilità di un pezzo di legno.

Pregiudizio classico

Nella sezione precedente abbiamo classificato le osservazioni tenendo conto dei possibili effetti che possono produrre su ciò che viene osservato. Vogliamo ora considerare le osservazioni in relazione alla loro *predicibilità*. La domanda che ci si può porre è se l'esito di un dato processo osservativo sia in linea di principio prevedibile con

certezza, oppure no. Secondo il cosiddetto *pregiudizio classico* [1-3], gli esiti di tutti i processi osservativi dovrebbero essere in linea di principio prevedibili. Come mostreremo, tale pregiudizio è falso, ma prima di farlo, riesaminiamo i diversi esempi di osservazione che abbiamo considerato nelle sezioni precedenti, nella prospettiva della predicibilità.

Quando osserviamo gli alberi di una foresta, possiamo facilmente predire in anticipo la loro posizione spaziale, le loro dimensioni, la loro varietà e i loro colori, se ad esempio possediamo una mappa dettagliata del luogo. Tale mappa è una descrizione dello stato della foresta e può essere facilmente ottenuta da informazioni raccolte da osservazioni precedenti.

Per quanto riguarda le proprietà della bruciabilità e della galleggiabilità di un'entità di legno, anche in questo caso possiamo facilmente prevedere in anticipo l'esito positivo di queste osservazioni. Questo perché in passato abbiamo posto le stesse domande a innumerevoli entità di legno, ricevendo sempre risposte affermative. In alternativa, possiamo dedurre questi risultati da un'analisi dettagliata delle proprietà chimiche e fisiche dei materiali lignei. Ma qualunque sia il metodo utilizzato per raccogliere le nostre conoscenze sull'entità in questione, il punto è che siamo perfettamente in grado di prevedere in anticipo, con certezza, l'effetto dei processi osservativi per la bruciabilità e la galleggiabilità.

Lo stesso si può dire, ovviamente, per l'osservazione dell'incomprimibilità di un materiale non elastico. Conoscere in anticipo le caratteristiche del materiale ci permette certamente di prevedere se l'osservazione avrà successo o meno.

Inoltre, la nostra capacità di prevedere con certezza il risultato dell'osservazione della posizione orizzontale di una particella puntiforme, utilizzando un righello seghettato, dipende solo dalla nostra conoscenza della posizione della particella prima della misura, e più esattamente dalla precisione con cui conosciamo la sua posizione. E poiché nulla ci impedisce di predeterminare, con precisione arbitraria, le coordinate spaziali di una particella

puntiforme classica, è sicuramente possibile, almeno in linea di principio, prevedere in anticipo il risultato del processo osservativo con il righello a denti di sega⁵.

Infine, per quanto riguarda la prevedibilità dell'esito dell'osservazione della sospettosità, la situazione è un po' più controversa. Infatti, sebbene la grande maggioranza degli esseri umani risponda certamente in modo molto prevedibile quando riceve stimoli specifici, è anche vero che una minoranza di essi reagisce talvolta in modo altamente non prevedibile, indipendentemente dagli input che riceve dall'ambiente. Questa possibilità viene talvolta chiamata *libero arbitrio*. Ora, se ipotizziamo che gli esseri umani possano, in determinate circostanze, fare uso del loro libero arbitrio, allora non possiamo prevedere con assoluta certezza, nemmeno in linea di principio, l'esito di processi osservativi eseguiti su di loro (siano essi invasivi o non invasivi), come ad esempio l'osservazione della sospettosità.

Quello del libero arbitrio è un argomento molto controverso, in quanto molti pensatori ritengono che sia solo un'illusione. Si può però obiettare, ancora una volta, che le entità viventi sono intrinsecamente molto diverse rispetto a quelle inanimate e che la vera missione della fisica sia quella di studiare solo queste ultime e non le prime. Ci si può allora chiedere se, limitando l'indagine all'osservazione di entità inanimate, si possa concludere che, fino a prova contraria, dovrebbe essere sempre possibile, almeno in linea di principio, prevedere l'esito di qualsiasi osservazione, stabilendo così la validità del pregiudizio (deterministico) classico.

Naturalmente, tutti i fisici quantistici sanno che la meccanica quantistica ha invalidato tale pregiudizio, poiché nessuno sembra essere in grado di prevedere i risultati di quei processi osservativi

⁵ Se la posizione orizzontale della particella prima dell'osservazione corrisponde esattamente alla punta di uno dei denti, ovviamente non possiamo più prevedere con certezza l'esito dell'osservazione, perché sarà la conseguenza di un meccanismo di rottura della simmetria.

chiamati *misure quantistiche*. Tuttavia, contrariamente a quanto si crede, la falsità del pregiudizio classico non ha nulla a che fare con le specificità dei sistemi quantistici microscopici, ma con il modo in cui generalmente attribuiamo proprietà alle entità fisiche e le procedure che dobbiamo utilizzare per osservarle in pratica.

Per rendersene conto, torniamo all'esempio dell'entità "pezzo di legno" che è stata introdotta e analizzata per la prima volta da Diederik Aerts come semplice illustrazione di un sistema fisico macroscopico per il quale tutto il mistero dell'incompatibilità sperimentale è sotto i nostri occhi [4, 16]. Come abbiamo già sottolineato, un pezzo di legno (secco) è un'entità bruciabile. Ciò significa che se decidiamo di osservare la sua bruciabilità, possiamo prevedere con certezza, in anticipo, che l'osservazione avrà successo. Lo stesso vale chiaramente per la galleggiabilità.

Apriamo brevemente una parentesi per sottolineare che ogni volta che possiamo in linea di principio prevedere con certezza l'esito positivo dell'osservazione di una data proprietà, senza la necessità di eseguire in pratica l'osservazione, ciò equivale ad affermare che tale proprietà è una proprietà *attuale* dell'entità in esame. D'altra parte, se la previsione non è possibile, nemmeno in linea di principio, allora significa che l'entità non possiede tale proprietà o, più esattamente, che la possiede solo in senso *potenziale*. Una simile definizione dell'attualità e della potenzialità di una proprietà fisica ha origine nel famoso criterio di realtà di Einstein Podolsky e Rosen [14], che è stato successivamente rielaborato da Constantin Piron e Diederik Aerts [1-4] in quanto ingrediente chiave dell'approccio operativo e realistico della scuola di Geneva-Brussels (si veda anche la discussione in [15]).

Ora, come abbiamo detto, l'entità "pezzo di legno" possiede sia la proprietà della *bruciabilità* che quella della *galleggiabilità*. Questo significa che l'entità "pezzo di legno" possiede anche la *proprietà congiunta* della *bruciabilità e galleggiabilità*. Quello che stiamo affermando è un fatto generale sulla realtà, cioè che è sempre possibile attribuire più proprietà *congiuntamente* alle entità fisiche, e

poiché possiamo farlo, allora anche le proprietà che corrispondono a possedere due o più proprietà contemporaneamente devono essere delle proprietà attribuibili alle entità fisiche⁶.

Se ciò che stiamo affermando è corretto, come è indubbio che lo sia, dovremmo essere in grado di definire in termini operazionali i processi osservativi associati a delle *proprietà congiunte*, e nel nostro caso specifico di chiarire cosa significa esattamente osservare con successo la proprietà della *bruciabilità e galleggiabilità*.

Osservazione e incompatibilità

Come il lettore attento avrà probabilmente già capito leggendo questo scritto fino a qui, *osservare una data proprietà significa testarla*. Infatti, quando osserviamo con successo una proprietà non facciamo altro che confermare (sebbene non provare) la sua attualità. Quindi, osservare la proprietà della *bruciabilità e galleggiabilità* significa trovare una procedura sperimentale che ci permetta di testare congiuntamente entrambe le proprietà.

Questo può sembrare impossibile a prima vista. Infatti, l'osservazione della galleggiabilità è distruttiva rispetto alla bruciabilità, come risulta dal fatto che un pezzo di legno bagnato non brucia più, secondo la nostra definizione di bruciabilità. Allo stesso modo, un pezzo di legno bruciato non galleggia più, poiché la cenere di solito si dissolve o precipita quando viene immersa nell'acqua. Stiamo dicendo che i processi osservativi della *bruciabilità* e della *galleggiabilità* sono *reciprocamente incompatibili*. Questo non dovrebbe sorprenderci più del dovuto, se solo ricordiamo che stiamo parlando di processi osservativi invasivi, che influenzano lo stato e le proprietà intrinseche dell'entità osservata.

⁶ Per quanto riguarda la questione dell'attribuzione di più proprietà contemporaneamente, si veda in particolare l'interessante discussione nelle sezioni introduttive di [16].

Non dimentichiamo che la maggior parte delle nostre azioni sono invasive e, a causa della loro invasività, sono generalmente incompatibili, nel senso che l'effetto dell'esecuzione di una data azione A (come mettere un calzino) seguita da un'altra azione B (come mettere una scarpa) non è in generale equivalente all'esecuzione dell'azione B seguita dall'azione A , come è il caso delle osservazioni (misure) quantistiche quando associate a osservabili descritte da *operatori non commutativi*.

Ma se l'osservazione della *bruciabilità* è incompatibile con l'osservazione della *galleggiabilità*, come possiamo osservarle congiuntamente? In altri termini, cosa significa osservare (o testare) la proprietà della *bruciabilità e galleggiabilità*? La risposta a questa spinosa domanda è stata fornita molti anni fa da Constantin Piron [1-3], attraverso un'argomentazione molto semplice e allo stesso tempo piuttosto sottile, che ora spiegheremo.

Considerando che osservare significa testare, ciò di cui abbiamo bisogno è di un test valido per la proprietà della *bruciabilità e galleggiabilità*, cioè un test che verifichi, su un singolo pezzo di legno, l'attualità di entrambe le proprietà. Un tale test viene solitamente chiamato *test prodotto*, o *domanda prodotto*, ma noi useremo il termine più intuitivo di *osservazione congiunta*⁷. Consiste nel fare quanto segue: "Scegliere in modo non-deterministico quale delle due osservazioni eseguire, quella della bruciabilità o della galleggiabilità, poi eseguirla. Se ha successo, si dirà che anche l'osservazione congiunta ha avuto successo, cioè che si è riusciti a osservare congiuntamente le proprietà di *bruciabilità e galleggiabilità*."

Per capire perché l'argomentazione di cui sopra è corretta bisogna tenere a mente ciò che abbiamo sottolineato in precedenza: un'entità possiede in senso attuale una proprietà se e solo se è possibile (in linea di principio) prevedere con certezza che la sua osservazione produrrà

⁷ L'utilizzo del termine "prodotto" è dovuto alla formalizzazione matematica di questo processo osservativo, che non tratteremo però in questa sede.

un risultato positivo, qualora decidessimo di eseguirla. Il punto chiave da comprendere è che non è necessario eseguire in pratica l'osservazione per dedurre l'attualità di una proprietà. È sufficiente essere (in linea di principio) in grado di prevedere con certezza l'esito del processo osservativo.

Ora, dato che la procedura associata a un'osservazione congiunta (test prodotto) comporta una scelta non-deterministica, cioè una scelta il cui esito, per definizione, non può essere previsto in anticipo dall'osservatore, nemmeno in linea di principio, l'unico modo per garantire che l'osservazione abbia successo, qualora venga eseguita, è sapere in anticipo che il suo successo è indipendente da tale scelta non-deterministica. E questo può avvenire solo se le due proprietà – nel nostro caso la *bruciabilità* e la *galleggiabilità* – sono entrambe attuali.

Quindi, anche se la maggior parte dei nostri processi osservativi sono tra loro incompatibili, in quanto corrispondono a procedure invasive, ciò non significa che non possiamo definire una procedura per osservare (cioè testare) congiuntamente le proprietà ad esse associate. A tal fine, dobbiamo aggiungere ai nostri processi osservativi un ingrediente non-deterministico, quello di una scelta non predeterminabile.

Per molti lettori il ragionamento sopra esposto potrebbe apparire un po' strano. Questo perché non siamo abituati a pensare alle nostre osservazioni come a dei test sperimentali. Ma è proprio questo, in ultima analisi, il senso delle osservazioni orientate allo scopo: sono un modo per verificare l'esistenza (cioè l'attualità) di determinati *elementi di realtà*, solitamente denominati proprietà (scoprendole, creandole, o distruggendole). E poiché per costruzione le entità che formano la nostra realtà possono avere, contemporaneamente, più di una sola proprietà, sarebbe oltremodo strano se non esistesse alcuna possibilità di testare (cioè di osservare) un tale stato di cose⁸.

⁸ Questo non significa però che tutte le proprietà attribuibili a un sistema fisico debbano necessariamente essere testabili. Si veda ad esempio la discussione in [19].

Scelta indeterministica

Torniamo ora al pregiudizio classico, al fine di evidenziarne la falsità. Più precisamente, abbiamo il seguente risultato.

Teorema: Se le proprietà congiunte sono testabili, allora i sistemi fisici possono comportarsi in modo indeterministico.

Per dimostrare questo teorema, dobbiamo ricordare che per osservare una proprietà, formata dalla congiunzione di due o più proprietà, è necessario ricorrere a un'osservazione *prodotto*, che per definizione richiede un atto di scelta autentico, non-deterministico, cioè una scelta che l'osservatore non può prevedere in anticipo. Quindi, se assumiamo che le proprietà congiunte siano proprietà testabili, dobbiamo anche assumere che gli osservatori siano in grado di effettuare scelte puramente indeterministiche. Per dimostrare che ciò implica che i sistemi fisici, in determinate condizioni, possono comportarsi in modo indeterministico, prendiamo in esame un esempio di proprietà congiunta per la quale l'esito della sua osservazione non può essere previsto in anticipo, nemmeno in linea di principio.

A tal fine, si consideri la proprietà della *non-bruciabilità*, che si definisce con la stessa procedura della proprietà della *bruciabilità*, con l'unica differenza che a un esito negativo della seconda corrisponde un esito positivo della prima, e viceversa. Consideriamo poi la proprietà della *non-bruciabilità e galleggiabilità* e poniamoci la seguente domanda: "L'entità 'pezzo di legno' possiede tale proprietà congiunta?".

È chiaro che non possiamo prevedere l'esito dell'osservazione congiunta (test-prodotto) associata a questa domanda, nemmeno in linea di principio. Infatti, se viene scelto il test della *galleggiabilità*, l'esito sarà positivo, mentre se viene scelto il test della *non-bruciabilità*, l'esito sarà negativo. In altri termini, l'osservatore non può prevedere in anticipo il comportamento (cioè la risposta) del

sistema “pezzo di legno”, quando si osserva la proprietà congiunta della *non-bruciabilità e galleggiabilità* (cioè quando pone una domanda-prodotto). Non può farlo nemmeno in linea di principio, poiché l’elemento della scelta indeterministica è parte integrante del protocollo osservativo non può essere eliminato senza alterare la natura della proprietà osservata. Ciò significa che ogni volta che si osserva una proprietà di questo tipo un’entità fisica semplice come un pezzo di legno è in grado di esibire un comportamento non-deterministico.

Vale la pena notare che il teorema di cui sopra esprime semplicemente il fatto – per certi versi autoevidente – che esiste una corrispondenza strutturale tra il comportamento di un osservatore e il comportamento dell’entità osservata. Questo perché se esistono delle entità (siano esse umane o meno) che possono manifestare comportamenti indeterministici, allora queste entità possono essere utilizzate per eseguire osservazioni congiunte attraverso le quali si possono testare (osservare) le corrispondenti proprietà congiunte. Quando un osservatore fa questo, trasferisce la sua azione indeterministica all’entità in esame, che può così, anch’essa, manifestare un comportamento indeterministico, quantomeno quando si considerano specifiche proprietà congiunte, come quella della *non-bruciabilità e galleggiabilità* nel caso di un pezzo di legno.

Il fatto che non tutte le osservazioni siano osservazioni classiche (deterministiche) è stato evidenziato per la prima volta da Constantin Piron, ideatore della procedura corrispondente a un test prodotto [1-3]. Se abbiamo descritto questo risultato sotto forma di un pomposo “teorema della scelta indeterministica” è per il recente interesse per la relazione esistente tra “libero arbitrio umano” e “libero arbitrio dei sistemi microscopici”, come espresso nell’ormai famoso “teorema del libero arbitrio” (free will theorem) dimostrato da John Conway e Simon Kochen [20, 21], secondo il quale se gli sperimentatori possono effettuare delle scelte libere, allora lo stesso deve valere per alcuni sistemi fisici, come quelli formati da entità gemelle di spin-1.

È interessante notare che Conway e Kochen hanno dimostrato il loro teorema ipotizzando (tra le altre cose) che in determinate condizioni (separazioni di tipo spazio) le nostre scelte non possono influenzare i risultati di alcuni esperimenti. Invece, il teorema della scelta indeterministica di cui sopra si basa sull'osservazione che, al contrario e in generale, i risultati delle nostre osservazioni dipendono fortemente dalle nostre scelte.

Osservazione e controllo

In base al teorema della scelta indeterministica che abbiamo enunciato, se accettiamo che le proprietà congiunte siano osservabili (cioè testabili), allora il pregiudizio classico deve necessariamente essere falso. Pertanto, esistono processi osservativi i cui esiti non possono essere predetti in anticipo, nemmeno in linea di principio. Ciò significa che, in aggiunta alla nostra precedente classificazione, dove abbiamo diviso le osservazioni in base ai loro effetti, possiamo catalogare le osservazioni anche in base alla loro predicibilità, cioè in base al fatto che i loro esiti sono in linea di principio predicibili in anticipo, oppure no.

Vogliamo ora approfondire la nostra analisi generale dei processi osservativi e chiarire quale potrebbe essere un possibile meccanismo all'origine dell'impredicibilità di alcuni sistemi fisici, come quelli quantistici, il cui comportamento, apparentemente, può essere descritto solo in termini probabilistici.

Un punto importante che abbiamo chiarito finora è che molte delle nostre osservazioni comportano aspetti trasformativi, che possono consistere nella creazione o nella distruzione di ciò che si osserva, oppure di altre proprietà possedute dall'entità osservata. Quando parliamo di trasformazioni, una delle cose che ci vengono possibilmente in mente è la questione del *controllo*. Controlliamo o non controlliamo i nostri processi di creazione/distruzione? Avere il controllo significa avere la conoscenza e il potere di esercitare un'azione specifica per produrre, con precisione, l'effetto desiderato.

Se torniamo alla nostra analogia dialogica, avere il controllo significa porre una domanda in modo da poter prevedere perfettamente quale sarà la sua risposta. Non si tratta solo di pretendere una risposta precisa dal nostro interlocutore (come quando Heisenberg chiese l'esatta posizione di un elettrone, utilizzando un microscopio gamma), ma anche di ottenere con certezza una risposta predeterminata.

Finora, nella nostra discussione, abbiamo implicitamente assunto che l'osservatore abbia sempre il pieno controllo delle proprie azioni. Per esempio, abbiamo ipotizzato che sia in grado di immergere il pezzo di legno in un recipiente d'acqua senza rovesciarlo, quando ne osserva la galleggiabilità. Oppure, che non cambierà idea durante l'esecuzione di un certo esperimento, lasciando l'osservazione a metà senza poter ottenere alcun risultato significativo. Certamente, possiamo sempre assicurarci di esercitare un pieno controllo sui nostri processi osservativi quando si tratta di interazioni semplici e robuste. Questo però non può essere il caso quando poniamo delle domande-prodotto, che richiedono l'uso di scelte non deterministiche le quali, per definizione, sono al di fuori del nostro controllo.

Un'altra possibilità è che il processo osservativo coinvolga un *meccanismo nascosto* responsabile della selezione di un esito specifico; un meccanismo che l'osservatore non sarebbe assolutamente in grado di controllare, per una questione sia di mancanza di conoscenza sia di mancanza di potere. È importante sottolineare che non stiamo parlando di una mancanza di conoscenza dello *stato* dell'entità osservata (come si ipotizza in alcune teorie delle variabili nascoste), ma dell'interazione tra l'osservatore (o l'apparato di misura dell'osservatore) e l'entità osservata.

In altri termini, stiamo distinguendo una situazione di possibile conoscenza incompleta dello stato dell'entità da una situazione più sottile di mancata conoscenza dell'interazione effettiva che si verifica tra l'osservatore e l'entità osservata (che può anche essere intesa come una mancanza di controllo da parte dell'osservatore su alcuni aspetti della procedura di osservazione).

Chiaramente, se a causa di qualche meccanismo nascosto l'osservatore non può controllare completamente l'interazione, non sarà in grado di prevedere con certezza l'esito dell'osservazione, che quindi potrà descrivere solo, nella migliore delle ipotesi, in termini probabilistici. Può questo spiegare la comparsa di probabilità (*non-kolmogoroviane*) nelle misure della meccanica quantistica? È certamente possibile, come ha dimostrato Diederik Aerts nel suo *approccio a misure nascoste* [7,11], spiegando che a una data osservazione quantistica non-deterministica si può sempre associare un insieme di *interazioni deterministiche*, chiamate *misure nascoste* da Aerts, e che quando un'osservazione viene eseguita (su un'entità in un dato stato), una di queste interazioni nascoste viene selezionata e attualizzata. In altri termini, secondo questa visione, le probabilità quantistiche troverebbero la loro origine nella mancanza di conoscenza (o di controllo) da parte dell'osservatore su quale di queste interazioni nascoste (deterministiche) abbia effettivamente luogo durante il processo osservativo.

In realtà, il meccanismo a misure nascoste è molto più generale, in quanto può essere utilizzato per descrivere qualsiasi situazione probabilistica, non solo quelle quantistiche. Ciò significa che è in grado di fornire, in un certo senso, una descrizione completa delle strutture di probabilità che possiamo incontrare nel nostro mondo [23].

Macchina di spin

Particolarmente importante nell'analisi di Aerts è stata la possibilità di corroborare il suo quadro esplicativo attraverso una serie di modelli macroscopici espliciti, che possono esibire comportamenti classici, quantistici e intermediari, semplicemente variando il livello di controllo dell'osservatore sul meccanismo responsabile della selezione di una specifica interazione. Uno dei suoi esempi più famosi è la *macchina quantistica di spin*, che ora descriveremo brevemente [6,7,18].

L'entità fisica sottoposta a osservazione è una semplice particella puntiforme, localizzata sulla superficie di una sfera euclidea tridimensionale, di diametro L , i cui diversi stati possibili sono i diversi luoghi che può occupare su detta superficie. La particolarità del modello risiede nel modo in cui vengono effettuate le osservazioni. Infatti, per osservare lo stato (cioè la posizione) dell'entità, il protocollo sperimentale prevede l'utilizzo di una *banda elastica appiccicosa e uniforme*, che viene messa in estensione lungo una data direzione ρ , tra due punti diametralmente opposti della sfera, p_- e p_+ . Ogni orientamento ρ per l'elastico (che definisce un diametro della sfera) caratterizza una specifica osservazione con due esiti possibili.

La procedura sperimentale consiste nel lasciare che la particella puntiforme cada dalla sua posizione originale ortogonalmente sull'elastico e vi rimanga attaccata. La posizione della particella attaccata all'elastico definisce così due lunghezze, L_+ e L_- , corrispondenti alle distanze della particella dai punti terminali e p_+ e p_- . Poi, si attende che l'elastico si rompa, in un punto imprevedibile, in modo che la particella, attaccata a uno dei suoi due frammenti, venga tirata o verso p_+ o verso p_- , ottenendo così l'esito specifico dell'esperimento, vale a dire, lo stato spaziale acquisito dall'entità puntiforme come risultato del processo osservativo (le diverse fasi dell'osservazione sono descritte schematicamente nella Figura 3).

Con l'aiuto di un po' di trigonometria elementare, è facile calcolare le probabilità dei due esiti possibili. Infatti, la probabilità che la particella finisca nel punto p_+ (rispettivamente, p_-) è data dalla lunghezza L_+ (rispettivamente L_-) del frammento di elastico tra la particella e il punto finale, divisa per la lunghezza totale dell'elastico

$$L = L_+ + L_-$$

Quindi, se γ è l'angolo indicato nella Figura 3, tra la direzione determinata dal punto p_+ , rispetto all'origine della sfera, e la direzione associata alla posizione iniziale della particella, sempre

rispetto all'origine della sfera, si ottiene che le probabilità per gli esiti p_{\pm} sono date da:

$$P_{\pm} = \frac{L_{\pm}}{L} = \frac{1}{2}(1 \pm \cos \gamma) = \begin{cases} \cos^2 \frac{\gamma}{2} \\ \sin^2 \frac{\gamma}{2} \end{cases}$$

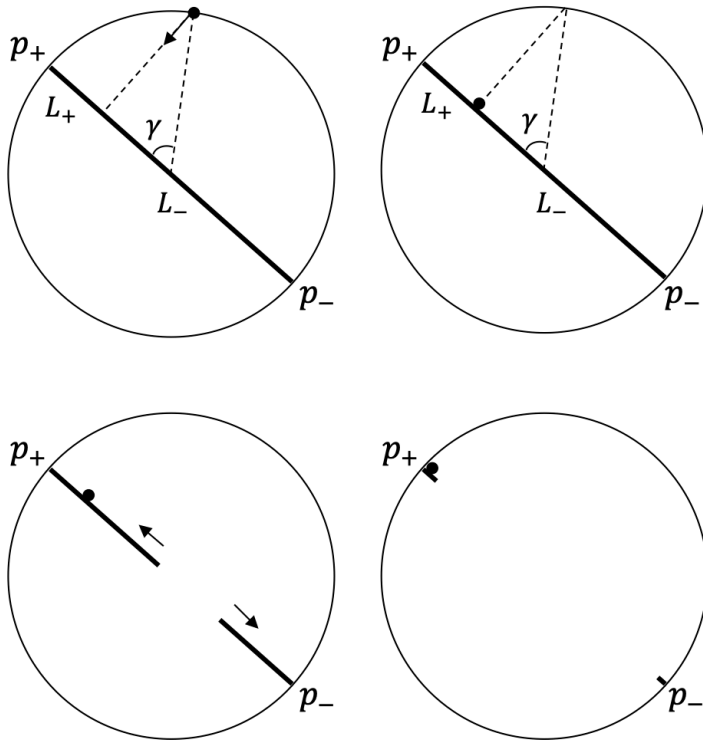


Figura 3 Rappresentazione schematica del processo osservativo della macchina di spin, nel piano della sfera tridimensionale in cui avviene.

Queste sono esattamente le probabilità quantistiche che si otterrebbero in una tipica *misura di Stern-Gerlach* con un'entità quantistica di *spin-1/2*, con ρ che corrisponde alla direzione scelta per l'orientamento. Dell'apparato di Stern-Gerlach, che va a sua volta a definire i due possibili sensi relativi a tale direzione ("su" o "giù"),

per la misura dello spin, con γ l'angolo tra l'orientamento dell'apparato e la direzione dello stato iniziale, di preparazione, dello spin sottoposto a misura [6,7,18].

Quindi, il processo osservativo della macchina quantistica di Aerts è perfettamente isomorfo al processo osservativo di un'entità quantistica di *spin*-1/2. Questo significa che, grazie al suo modello, è possibile rendere pienamente evidente, nel nostro teatro convenzionale tridimensionale, la struttura nascosta associata alla descrizione di un'entità quantistica bidimensionale, permettendo di comprendere ciò che possibilmente accade (strutturalmente parlando) quando il livello quantistico della nostra realtà interagisce con le nostre apparecchiature macroscopiche.

In realtà, si può fare molto di più, poiché è possibile costruire macchine quantistiche generalizzate per entità quantomeccaniche arbitrarie [11,23-26], il che significa che la spiegazione a base di "misure nascoste" può essere adottata per spiegare l'origine delle probabilità quantistiche per dei sistemi quantistici generali⁹.

Il modello di macchina quantistica di Aerts consente anche di descrivere strutture più generali, oltre a quelle classiche e quantistiche. Questo può essere fatto nell'esempio precedente scegliendo elastici con caratteristiche diverse. Infatti, se gli elastici utilizzati sono uniformemente rompibili (come abbiamo ipotizzato), allora l'osservatore si trova in una situazione di massima mancanza di conoscenza sul punto in cui l'elastico si romperà (cioè, in una situazione di massima mancanza di controllo su quale interazione si

⁹ Alcuni lettori potrebbero essere tentati di credere che, a causa del noto teorema di Gleason [29] e del teorema di impossibilità di Kochen-Specker [28], non sia possibile costruire modelli a base di misure nascoste come quello della macchina quantistica, per spazi di Hilbert di dimensione superiore a 2. Questo però non è il caso, poiché i "No-Go theorems" per le variabili nascoste si applicano solo a modelli con variabili nascoste che si riferiscono allo stato del sistema, e non a modelli in cui le variabili nascoste si riferiscono al processo osservativo; si veda in particolare [22], dove viene costruito un modello esplicito per uno spazio di Hilbert a 3 dimensioni.

realizzerà tra la particella e l'apparato di misura), e come abbiamo mostrato in questo caso la macchina riproduce esattamente le probabilità quantistiche (la regola di Born).

D'altra parte, se l'elastico utilizzato può rompersi solo in un singolo punto predeterminato, allora diventa possibile prevedere in anticipo, con certezza, l'esito dell'esperimento, e ci troviamo in una situazione di minima mancanza di conoscenza (massimo controllo dell'osservazione), dando luogo a una descrizione classica, puramente deterministica.

Ma si possono anche considerare casi intermediari, in cui gli elastici utilizzati sono uniformemente rompibili solo su alcuni dei loro segmenti. Questo corrisponde a una generalizzazione della macchina quantistica, chiamata "*modello ϵ* " [6], che dà luogo a descrizioni di probabilità più complesse, né classiche né quantistiche, ma realmente intermediarie, corrispondenti a situazioni di conoscenza o di controllo intermediari.

La macchina quantistica di Aerts fornisce un meccanismo semplice e convincente per spiegare le probabilità quantistiche come *probabilità epistemiche*, originate dalla nostra mancanza di controllo/conoscenza su ciò che accade esattamente durante il processo osservativo, cioè durante l'interazione tra l'osservatore (inteso anche come apparato di misura) e l'osservato. Più precisamente, grazie alla macchina di Aerts, possiamo comprendere che una misura quantistica è un'osservazione che comporta la selezione di uno specifico processo osservativo tra un certo numero di "processi osservativi nascosti" (cioè di "interazioni nascoste"), che nel modello corrispondono alle osservazioni classiche invasive che comportano un aspetto di creazione, associate ai diversi punti x in cui l'elastico uniforme può rompersi.

Più precisamente, se $O_{u,\rho}$ è una data osservazione, caratterizzata da una specifica direzione ρ dell'elastico uniforme (u), possiamo associarla a un insieme di osservazioni "nascoste" $O_{x,\rho}$, $x \in [0, L]$, dove x specifica un possibile punto di rottura dell'elastico. In altri termini, $O_{u,\rho}$ non corrisponde a un'osservazione *attuale*, ma a un

insieme di osservazioni deterministiche *potenziali*, una sola delle quali sarà selezionata durante l'esecuzione della procedura sperimentale, in un modo che è oltre le possibilità di controllo dello sperimentatore.

Pertanto, possiamo dire che una tipica osservazione quantistica (cioè una misura quantistica) è un'osservazione *congiunta* (test-prodotto) che sottende un meccanismo di *rottura di simmetria* attraverso il quale un'osservazione *attuale* viene selezionata tra un certo numero di osservazioni *potenziali*, in un modo che non può essere controllato (e quindi predetto) dall'osservatore. Se possiamo parlare di un processo di rottura di simmetria è perché tutte le osservazioni potenziali “nascoste” hanno la stessa possibilità a priori di realizzarsi, dato che si assume che l'elastico sia uniforme.

È interessante notare che se le misure quantistiche sono osservazioni congiunte, ciò significa anche che corrispondono a osservazioni di *proprietà congiunte*. Nella macchina quantistica di Aerts abbiamo semplicemente chiamato tale proprietà congiunta la *posizione* della particella puntiforme, ma per essere più precisi avremmo dovuto chiamarla la *posizione della particella puntiforme osservata utilizzando un elastico uniforme esteso lungo la direzione ρ* , che in breve possiamo chiamare (u, ρ) -posizione della particella. Questa (u, ρ) -posizione può essere intesa come la proprietà formata dalla congiunzione delle proprietà delle (x, ρ) -posizioni, dove una (x, ρ) -posizione è la *posizione osservata per mezzo di una banda elastica tesa lungo l'orientazione ρ che si romperà con certezza nel punto x* . Quindi, l'osservazione quantistica della (u, ρ) -posizione è il prodotto di osservazioni deterministiche di (x, ρ) -posizioni, realizzate per mezzo di elastici che possono rompersi solo in punti specifici.

Ora, l'interesse di modelli espliciti come la macchina quantistica è che, tra le altre cose, ci permettono di vedere ciò che di solito è nascosto. Infatti, nel modello possiamo ad esempio sostituire l'osservazione indeterministica della (u, ρ) -posizione con un'osservazione deterministica della (x, ρ) -posizione, semplicemente eseguendo l'esperimento con un elastico che si rompe solo nel punto

x , invece di un elastico uniformemente rompibile. Questo significa che, se volessimo, potremmo assumere il pieno controllo del processo osservativo e prevederne l'esito in anticipo.

Questo però non possiamo farlo (almeno per il momento) quando abbiamo a che fare con sistemi microscopici. Quando osserviamo, per esempio, lo spin di un'entità quantistica di $spin-1/2$, per mezzo di un apparato di Stern-Gerlach, sappiamo che, dal punto di vista strutturale, possiamo intenderla come un'osservazione congiunta con un meccanismo di rottura della simmetria che opera "dietro le quinte". Ma non sappiamo quali siano queste osservazioni nascoste potenziali nel caso di entità microscopiche, che sarebbero responsabili dell'emergere delle probabilità quantistiche non-kolmogoroviane. L'approccio a misure nascoste ci dice solo in quale direzione cercare, non cosa troveremo esattamente. Non dobbiamo cercare variabili nascoste associate allo stato dell'entità, ma delle variabili nascoste associate al processo osservativo, cioè ai processi osservativi "puri" (possibilmente deterministici) che sono selezionati attraverso un meccanismo di rottura di simmetria che non può essere controllato dallo scienziato partecipante.

Osservazioni intrinseche e relazionali

Nella sezione precedente abbiamo descritto il modello di macchina quantistica di Aerts e interpretato i suoi processi osservativi come prodotti di osservazioni deterministiche "nascoste". Anche se non sappiamo a cosa corrispondano queste osservazioni "nascoste" nel caso delle entità microscopiche, il modello di Aerts ha certamente il merito di sollevare un angolo del velo del mistero quantistico, demistificando parte della sua stranezza.

In base al *teorema della scelta indeterministica* che abbiamo enunciato, dobbiamo rinunciare al vecchio pregiudizio classico, poiché è sempre possibile creare delle *domande prodotto* tali che le corrispondenti risposte, per definizione, non possono essere previste in anticipo. D'altra parte, abbiamo anche visto che le misure

quantistiche hanno possibilmente la struttura di domande prodotto. Questo spiegherebbe perché i loro risultati possono essere previsti solo in termini probabilistici. Ma questo lascia anche aperta la porta alla possibilità di una loro decostruzione in termini di processi deterministici sub-osservazionali.

Quindi, se da un lato l'analisi della struttura generale delle domande che ci è consentito rivolgere alla realtà ci costringe ad abbandonare il pregiudizio deterministico, dall'altro non siamo certo costretti ad abbandonarlo a causa della meccanica quantistica, in quanto si possono intendere le osservazioni quantistiche come osservazioni-prodotto deterministiche, attuate da un meccanismo di rottura di simmetria.

Detto questo, analizzeremo ora le osservazioni secondo un altro importante criterio: l'*intrinsecità*. Per introdurre questo concetto, chiediamoci cosa succederebbe se, a distanza di tempo, ripetessimo l'osservazione della (u, ρ) -posizione della particella puntiforme nel modello della macchina quantistica di Aerts. Ipotizzando che nell'universo giocattolo dove vive tale particella questa sia un'entità puramente statica, allora la ripetizione della stessa osservazione $O_{u,\rho}$ darebbe sempre esattamente lo stesso risultato, perché una volta osservata (creata) una specifica (u, ρ) -posizione, questa rimarrà una proprietà perfettamente stabile nel tempo per tutta la durata di vita della particella.

La situazione è simile a quelle che abbiamo già considerato in relazione all'osservazione dell'*incomprimibilità* di un oggetto non elastico, o della *posizione orizzontale* di una particella puntiforme misurata da un righello seghettato, assumendo anche in questo caso che la particella sia intrinsecamente statica. In tutti questi esempi, una volta osservata la proprietà in questione, essa può essere riosservata anche in futuro, con certezza, se si esegue di nuovo esattamente la stessa osservazione. E questo significa che la proprietà in questione è una proprietà *intrinseca* dell'entità; intrinseca poiché stabilmente attuale per essa, per tutta la sua durata di vita, se lasciata indisturbata, cioè se non sottoposta a un processo invasivo, come ad

esempio l'osservazione della (u, σ) -posizione, con $\sigma \neq \rho$, nell'esempio della macchina quantistica¹⁰.

Anche la *bruciabilità* è una proprietà intrinseca di un'entità lineare, anche se in questo caso non possiamo osservarla in termini pratici, per più di una volta, poiché il processo osservativo è distruttivo. Ma ciò che è importante, ai fini della definizione di intrinsecità, non è che si possa effettuare più volte la stessa osservazione e raccogliere sempre la stessa risposta positiva, ma che la risposta affermativa sia sempre certa, indipendentemente dal momento in cui si sceglie di effettuare l'osservazione.

Per rendere più esplicito il nostro punto di vista sull'intrinsecità, consideriamo un corpo classico A che si muove lungo una data traiettoria nello spazio euclideo tridimensionale. Consideriamo la proprietà $P_A(\mathbf{x}_0)$ del corpo A di trovarsi in $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^3$ (se A non è puntiforme, allora \mathbf{x}_0 si riferisce alla posizione del suo centro di massa). Chiediamoci: $P_A(\mathbf{x}_0)$ è una proprietà intrinseca di A ?

Anche ipotizzando che il processo osservativo sia puramente non invasivo, cioè che si possa osservare la posizione di A senza disturbarlo (non usiamo in questo caso strumenti osservativi non convenzionali, come righelli a denti di sega o elastici appiccicosi), la risposta è chiaramente negativa. Infatti, se ad esempio A raggiunge il punto \mathbf{x}_0 solo al tempo t_0 , allora, per tutti i tempi $t \neq t_0$, l'osservazione della proprietà $P_A(\mathbf{x}_0)$ darebbe una risposta negativa. Ma anche al tempo t_0 la risposta potrebbe essere negativa, se ad esempio l'osservatore decidesse di traslare nello spazio il suo apparato di misura, ad esempio verso un punto \mathbf{c} , in modo che rispetto al sistema di riferimento traslato la posizione di A al tempo t_0 diventerebbe $\mathbf{x}_0 - \mathbf{c}$, e non \mathbf{x}_0 . Per queste ragioni, $P_A(\mathbf{x}_0)$ non può essere considerata una proprietà intrinseca di A .

¹⁰ È importante precisare che stiamo qui considerando le particelle puntuali in questi esempi come delle entità non solo puramente statiche, ma anche presenti in un mondo dove la posizione viene considerata una grandezza assoluta. Come vedremo nel seguito della nostra discussione, nel caso di particelle in uno spazio euclideo la posizione non può più essere considerata una proprietà intrinseca.

Consideriamo ora la proprietà $P_A(\mathbb{R}^3)$ di A di essere presente da qualche parte nello spazio euclideo tridimensionale (cioè la proprietà di A di essere un'entità spaziale). Se poniamo la stessa domanda di prima, la risposta è ora chiaramente affermativa: $P_A(\mathbb{R}^3)$ è una proprietà *intrinseca* di A , in quanto possiamo prevedere con certezza le posizioni che occuperà in ogni momento (risolvendo le equazioni del moto), per cui sappiamo con certezza che in ogni momento si troverà da qualche parte nello spazio, ciò indipendentemente dal tipo di traiettoria seguita da A e dal sistema di riferimento che verrà adottato dall'osservatore.

Ma allora, qual è la differenza fondamentale tra la proprietà $P_A(\mathbf{x}_0)$ e la proprietà $P_A(\mathbb{R}^3)$, che ci permette di decretare che la prima è una proprietà *effimera*, non intrinseca, che può essere associata ad A solo per un momento, e solo in relazione a uno specifico osservatore, mentre la seconda è una proprietà *intrinseca*, che può essere stabilmente associata ad essa, per tutti gli osservatori?

La risposta è abbastanza evidente: $P_A(\mathbf{x}_0)$ è una proprietà relazionale, mentre $P_A(\mathbb{R}^3)$ non lo è. Infatti, la posizione spaziale \mathbf{x}_0 di A può essere definita solo in relazione a uno specifico osservatore, associato a un determinato sistema di riferimento. Ma senza alcuna relazione con un osservatore *specifico*, possedere una posizione spaziale *specificata* è chiaramente una proprietà indefinita, priva di significato. Quindi, quando parliamo di una specifica posizione di A , in realtà stiamo parlando di una specifica *relazione* (spaziale) tra A e il sistema di riferimento dell'osservatore. In altri termini, $P_A(\mathbf{x}_0)$ non è una proprietà dell'entità A in sé, ma una proprietà dell'entità *composita* formata dalla combinazione dell'entità A e del sistema di riferimento dell'osservatore.

Ora, una proprietà relazionale non può essere una proprietà intrinseca, in quanto è una proprietà associata a una specifica *configurazione* del sistema composito formato dall'osservatore e dall'osservato, e non appena tale configurazione viene modificata (cioè si altera la relazione specifica tra i due sottosistemi), la proprietà relazionale cessa immediatamente di essere attuale. In altri termini,

dobbiamo distinguere tra le proprietà che le entità possono avere indipendentemente da uno specifico osservatore, e che quindi possono essere osservate da qualsiasi osservatore, da quelle che esprimono solo una relazione esclusiva e contingente tra l'entità e un determinato osservatore.

Apriamo una parentesi per sottolineare che ogni osservazione è, in ultima analisi, un'osservazione congiunta, cioè un test-prodotto. Nel caso dell'osservazione della posizione di A , prima di effettuare l'osservazione dobbiamo chiaramente scegliere un sistema di riferimento (un sistema di coordinate) specifico, tra un numero infinito di sistemi di riferimento potenziali. La procedura è quindi simile a quella di un'osservazione congiunta, con l'unica differenza che ora l'osservatore sa perfettamente quale scelta sta facendo e quindi, rispetto a quella scelta, il risultato dell'osservazione può essere previsto in anticipo, almeno in linea di principio.

Ma sapere quale scelta si sta facendo non significa avere il controllo sulla procedura che produce tale scelta. Questa riflessione può apparire un po' strana, poiché in fisica siamo abituati a considerare solo situazioni in cui il sistema fisico e l'apparato di misura sono già dati. Questo è il motivo per cui di solito crediamo così fortemente nel determinismo. Se tutto è dato, allora non ci sono ragioni note per pensare che il risultato del processo osservativo, se condotto correttamente, non sia predeterminato, qualunque esso sia.

Ma l'ipotesi che l'apparato sperimentale sia dato *a priori* non può essere giustificata in tutte le circostanze. Infatti, come abbiamo visto, quando osserviamo delle *proprietà congiunte* (e più in particolare delle proprietà congiunte associate ad osservabili incompatibili), fa parte della procedura osservativa stessa operare una scelta di natura imprevedibile, per selezionare l'esperimento che deve essere condotto. Pertanto, gli apparati non sono sempre dati *a priori*, e questo è il motivo per cui il pregiudizio classico (deterministico) non regge in generale (si veda anche la discussione in [3], pagina 11).

Detto questo, consideriamo ancora una volta l'osservazione della posizione di A e poniamoci la seguente domanda: Si tratta di

un'osservazione che comporta un aspetto di *scoperta*, oppure di *creazione*? Dato che abbiamo ipotizzato che il rilevamento dell'oggetto avvenga senza produrre alcun disturbo su di esso, saremmo tentati di rispondere che il processo osservativo comporta solo un aspetto di scoperta (non invasivo). Tuttavia, non dobbiamo dimenticare che il processo osservativo, per essere eseguito, richiede la scelta di un sistema di riferimento specifico e che la posizione è una proprietà relazionale, associata all'entità composta formata dall'entità A più il sistema di riferimento scelto.

Ora, anche se siamo abituati a pensare ai sistemi di riferimento in termini astratti, in pratica un sistema di riferimento è reso manifesto dalla presenza effettiva nello spazio di un osservatore fisico, sia esso un osservatore umano o lo strumento di misura di un osservatore umano. Pensiamo a un corpo rigido R , al quale abbiamo associato un determinato sistema di coordinate. Scegliere un sistema di riferimento è equivalente a scegliere uno stato specifico per il corpo R . E questa scelta *creerà* immediatamente certe posizioni piuttosto che altre per A , nel corso della sua evoluzione. Questo perché, come abbiamo spiegato, le posizioni spaziali specifiche di A non sono proprietà intrinseche, ma proprietà relazionali. E se le consideriamo in relazione a R , allora una posizione \mathbf{x} di A , per esempio al tempo t , è in realtà una proprietà interna del sistema composto $\{A, R\}$: una proprietà relazionale tra i suoi due sottosistemi, A e R .

Quando scegliamo uno stato specifico per il sistema di riferimento R , per effettuare l'osservazione della posizione, ciò che facciamo è agire in modo invasivo sul sistema composto $\{A, R\}$, cambiando la relazione interna tra i suoi componenti. In altri termini, *deformiamo* il sistema $\{A, R\}$, e ovviamente una tale deformazione non può essere considerata un atto di scoperta.

Quindi, anche se non siamo abituati a pensarla in questo modo, osservare la posizione di un oggetto classico è in realtà un processo che comporta un aspetto di creazione, in quanto la posizione dell'entità viene letteralmente creata durante la sua osservazione, e

questo anche se lo strumento di rilevazione scelto non disturba in alcun modo l'oggetto in questione!

Osservazioni congiunte e proprietà relazionali

Nella sezione precedente abbiamo considerato la possibilità di classificare le osservazioni distinguendo quelle che abbiamo definito *intrinseche*, stabilmente associate a un'entità fisica, indipendentemente da uno specifico osservatore, da quelle che abbiamo chiamato *relazionali*, che hanno invece un carattere più effimero e possono essere attribuite solo a sistemi composti formati dall'entità fisica sottoposta a osservazione e da uno specifico osservatore.

Abbiamo altresì sottolineato che le proprietà relazionali sono letteralmente create dal processo osservativo, in quanto richiedono una scelta circa lo stato del sistema scelto per effettuare la misura; scelta che influenzerà l'esito dell'osservazione. Lo abbiamo fatto considerando il semplice esempio dell'osservazione della posizione di un corpo classico, ma sarebbero stati possibili altri esempi, come ad esempio l'osservazione della sua *velocità* o *energia*.

In questa sezione vogliamo spingerci oltre nell'analisi delle proprietà relazionali, considerandole anche in situazioni in cui la scelta fatta dall'osservatore non è sotto il suo controllo, come nella macchina quantistica di Aerts. Questo ci aiuterà ad avvicinarci alla comprensione del mistero delle misure quantistiche. A tale scopo, consideriamo uno degli elastici uniformi utilizzati nella macchina quantistica. Qui non pensiamo all'elastico come a un apparecchio da usare per misurare la posizione di una particella puntiforme, come abbiamo fatto in precedenza, ma come a un'entità fisica in sé, di cui vogliamo osservare le proprietà fisiche.

Un'entità come un elastico possiede molte proprietà interessanti, come ad esempio la sua lunghezza quando non è in tensione, la sua

massa, il suo volume, ecc. Quello che considereremo, tuttavia, sono alcune proprietà decisamente meno convenzionali, che chiameremo il *mancinismo* e la *frammentazione* dell'elastico (questo esempio è una variante del “modello degli spaghetti” presentato in [15]).

Per osservare il mancinismo di un elastico, la procedura è la seguente: “Afferrare le due estremità dell'elastico con entrambe le mani, quindi allungarlo fino a romperlo (questo si può sempre fare, poiché un elastico possiede la proprietà intrinseca della *rompibilità*). Se il frammento più lungo rimane nella mano sinistra, allora l'osservazione del mancinismo ha avuto successo (vedi la Figura 4)”.

Ora, la procedura osservativa, per essere completa, deve specificare come osservare il mancinismo anche quando l'elastico è già rotto, in due o più frammenti (cosa che avviene sempre una volta effettuato il test del mancinismo). La prescrizione è la seguente: “Se l'elastico è già rotto, fare semplicemente l'esperimento usando il frammento più lungo”.

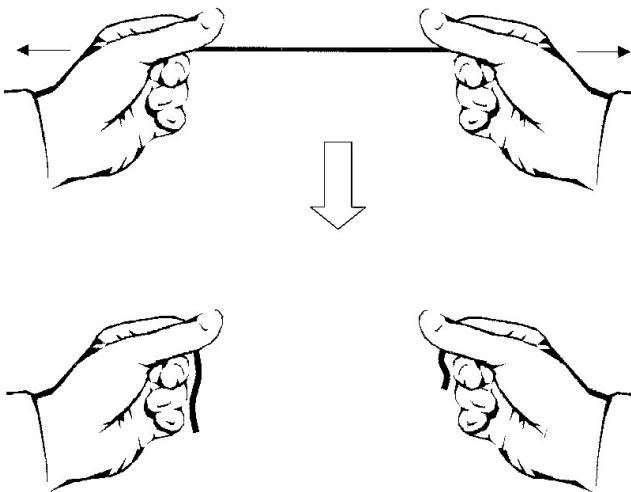


Figura 4 Osservazione del mancinismo di un elastico.

Analogamente all'osservazione della posizione della particella puntuale nel modello della macchina quantistica di Aerts, non si può

determinare in anticipo se un elastico è mancino o meno, e questo non è imputabile alla mancanza di conoscenza del suo stato. Anche con una conoscenza completa di tutte le proprietà intrinseche dell'elastico, fino al livello molecolare, non si può prevedere l'esito dell'osservazione, poiché *la proprietà di mancino viene creata durante l'osservazione stessa*, in base al punto specifico in cui l'entità elastica si rompe, come conseguenza di fluttuazioni che non sono sotto il controllo dell'osservatore.

Immaginate ora di aver appena osservato con successo il mancino di un elastico e di voler ripetere su quello stesso elastico la stessa osservazione. Secondo la procedura, basta prendere il frammento più lungo, afferrarlo con le due mani, allungarlo fino a romperlo e osservare se il frammento più lungo rimane di nuovo nella mano sinistra.

Chiaramente, il fatto che l'osservazione precedente abbia avuto successo non aiuta a prevedere l'esito della seconda osservazione. Infatti, per essere nuovamente osservata, la proprietà del mancino deve essere ricreata e il meccanismo di creazione non è deterministico. La situazione è chiaramente diversa rispetto all'osservazione della (u, ρ) -posizione della particella puntiforme nella macchina quantistica di Aerts. Infatti, come il lettore ricorderà, una volta osservata (creata) la (u, ρ) -posizione della particella, le successive osservazioni della stessa (u, ρ) -posizione produrranno lo stesso risultato, il che significa che la (u, ρ) -posizione è diventata una proprietà intrinseca e stabile dell'entità puntiforme statica in questione.

L'effimerità della proprietà del mancino dell'elastico è molto simile all'effimerità della maggior parte delle proprietà delle entità microscopiche quantistiche, come ad esempio la posizione di un elettrone. Infatti, la meccanica quantistica ci dice che, in generale, non solo non si può prevedere la posizione di un'entità microscopica prima della misura, ma non si può nemmeno farlo un tempo finito dopo una misura, per quanto piccolo sia questo tempo finito. Lo stesso vale per l'osservazione di altre proprietà, come la *quantità di*

moto, che è tra l'altro incompatibile con l'osservazione della posizione, come espresso dal principio di indeterminazione di Heisenberg.

Torniamo per un momento alla questione dell'incompatibilità e chiediamoci se anche l'osservazione di proprietà effimere come il mancinismo possa presentare incompatibilità rispetto ad altre misure, come nel caso delle osservabili quantistiche. Per farlo, consideriamo la proprietà di *frammentazione* di cui abbiamo accennato sopra, che definiamo operativamente come segue: "Mettete tutti i frammenti dell'elastico in una scatola, scuotete bene la scatola in modo che tutti i frammenti si mescolino. Poi, chiudendo gli occhi, aprite il coperchio della scatola e prendete il primo frammento che toccate. Riaprendo gli occhi, verificate se è più corto della metà della lunghezza dell'elastico originale integro. Se è così, l'osservazione della proprietà della frammentazione ha avuto successo".

Chiaramente, per un elastico non ancora rotto la proprietà di frammentazione non può essere osservata. Ciò significa che la proprietà inversa della *non-frammentazione*, definita con la stessa procedura osservativa di cui sopra, ma sostituendo il termine "più corto" con il termine "più lungo", è una proprietà intrinseca dell'entità elastica integra. Ma naturalmente, non appena l'elastico si rompe, ad esempio in seguito a un'osservazione invasiva della proprietà del mancinismo, la proprietà di frammentazione ha qualche possibilità di essere osservata. Ma non può essere osservata con certezza, come è chiaro dal fatto che la procedura di osservazione (non invasiva per l'elastico) comporta un meccanismo di selezione nascosto che non è sotto il controllo dell'osservatore. Quindi, la frammentazione, come il mancinismo, è una proprietà effimera, non una proprietà intrinseca.

Tuttavia, analogamente alle proprietà (intrinseche) della bruciabilità e galleggiabilità dell'entità "pezzo di legno", anche le proprietà (non intrinseche) del mancinismo e della frammentazione dell'elastico intrattengono tra loro una relazione di incompatibilità.

Infatti, l'osservazione della proprietà del mancinismo aumenta notevolmente la probabilità che l'osservazione della proprietà di frammentazione abbia successo, come risulta dal fatto che maggiore è il numero di frammenti, maggiore sarà la probabilità che l'osservatore ne scelga uno più corto della metà della lunghezza originale. In altri termini, eseguendo prima l'osservazione del mancinismo influenziamo l'esito del successivo test della frammentazione, e questa influenza è chiaramente espressione di incompatibilità sperimentale.

L'incompatibilità è quindi un fenomeno generale. Non si manifesta solo per l'osservazione di proprietà intrinseche, ma anche per quelle effimere. Il presente esempio riguarda una relazione di incompatibilità tra una proprietà invasiva, che coinvolge un aspetto di creazione (il mancinismo), e una proprietà non invasiva che coinvolge solo un aspetto di scoperta (la frammentazione). Tuttavia, si possono facilmente presentare anche esempi di incompatibilità tra proprietà effimere che sono entrambe invasive, e ci riferiamo per questo all'esempio degli spaghetti recentemente presentato in [15].

Dopo aver evidenziato che le proprietà, nonostante il loro carattere effimero, possono comunque intrattenere relazioni di incompatibilità con altre proprietà effimere, e che questo fatto non è una prerogativa delle entità microscopiche quantistiche, vogliamo ora chiarire che il loro carattere effimero è una conseguenza del fatto che non sono, *strictu sensu*, proprietà dell'elastico, ma proprietà relazionali del sistema composito costituito dall'elastico più l'apparato di misura (le mani dell'osservatore in questo caso).

Questo è abbastanza ovvio se si osserva da vicino il vero significato di una proprietà come il mancinismo. Infatti, per essere mancino, un elastico ha bisogno di... due mani! Più precisamente, ha bisogno delle due mani dell'osservatore, cioè della presenza dello strumento di misura e, più precisamente, di intrattenere con esso una relazione molto specifica. Infatti, è solo finché il frammento più lungo rimane attaccato alla mano sinistra dell'osservatore che possiamo dire che l'elastico possiede effettivamente la proprietà del mancinismo.

Tuttavia, per citare l'ultima frase in [4]: “[...] un processo di misura è in un certo senso un'unificazione e poi di nuovo una separazione dell'apparato di misura e del sistema fisico”.

È innegabile che uno dei nostri assunti inconsci è che quando osserviamo qualcosa su una data entità, ciò che stiamo osservando è qualcosa che riguarda solo quell'entità. Ma nella nostra discussione precedente abbiamo visto che questo assunto non è necessariamente vero, in particolare perché molte volte i nostri processi osservativi possono letteralmente creare ciò che stiamo osservando, e questo non accade solo nel dominio microscopico dei quanti. Tuttavia, possiamo altresì credere che una volta che la nostra osservazione ha creato la proprietà che viene osservata, tale proprietà apparterrà stabilmente all'entità, cioè diventerà una delle sue proprietà stabili. Ma questo, ancora una volta, non è necessariamente il caso, poiché molte delle proprietà che osserviamo sono in realtà delle *proprietà relazionali*.

Ora, se le proprietà sono relazionali, possono rimanere attuali solo fino a quando la relazione specifica che le definisce non sarà interrotta, cioè fino a quando l'osservatore e l'osservato rimarranno, in un certo senso, uniti in un modo molto particolare. Ma, come notato da Aerts nella citazione precedente, una misura comporta tipicamente una fase iniziale di unificazione seguita da una fase finale di separazione. Ciò significa che, in generale, una proprietà relazionale sarà prima creata e poi distrutta alla fine di un processo di misura.

Questo è ciò che possiamo vedere chiaramente nel nostro esempio paradigmatico dell'osservazione della proprietà del mancinismo. C'è un momento in cui le mani dell'osservatore interagiscono con l'entità elastica, fino a produrre un risultato specifico. Se il risultato è positivo, la proprietà relazionale del mancinismo diventa manifesta, cioè attuale, come dimostra il fatto che il frammento più lungo penzola dalla mano sinistra dell'osservatore (cfr. Fig. 3). Ma questo è vero solo finché tale configurazione sarà mantenuta, perché nel momento stesso in cui l'osservatore lascerà andare l'elastico, la proprietà relazionale del mancinismo sarà persa, e l'unico modo per

osservarla di nuovo, cioè per crearla di nuovo, è rieseguire la corrispondente procedura osservativa non-deterministica.

Naturalmente, una volta completata la procedura e osservata la proprietà del mancinismo, le tracce dell'interazione avvenuta potrebbero essere mantenute nella struttura dell'apparato di misura, anche dopo che questo si è separato dall'entità. Questo si può fare facilmente, ad esempio nel nostro esempio aggiungendo una telecamera all'esperimento, per registrare il risultato di ogni singola osservazione. Ma queste tracce, come quelle che vediamo sugli schermi quando "rileviamo" (di fatto creiamo) le posizioni di entità microscopiche, sono proprio questo: delle tracce! Cioè, dei ricordi di proprietà relazionali effimere che hanno già cessato di essere.

Concludiamo la presente sezione fornendo una caratterizzazione concettuale generale delle misure quantistiche. Una prima importante caratteristica di queste misure è che sono indeterministiche, nel senso che il loro esito può essere predetto solo in termini probabilistici. Come dimostrato da Aerts nel suo approccio a misure nascoste [7,11], l'aspetto probabilistico delle misure quantistiche può essere descritto in termini di osservazioni congiunte associate a test-prodotto che sottendono un meccanismo di rottura di simmetria che è al di là del potere di controllo dell'osservatore. Un'altra caratteristica importante è che le misure quantistiche comportano un aspetto di pura creazione (un fatto che in letteratura viene solitamente descritto con il concetto più vago di *contestualità*, che esprime il fatto che i risultati dei nostri esperimenti dipendono in generale da come vengono eseguiti).

Infatti, quando misuriamo la posizione di un elettrone, non stiamo scoprendo la posizione in cui si trovava prima della nostra osservazione, ma stiamo letteralmente creando una sua localizzazione spaziale. Questo non solo perché, come abbiamo già osservato, anche l'osservazione della posizione di un corpo classico implica un atto di creazione, ma perché, cosa ancora più sorprendente, le entità microscopiche quantistiche sono delle entità *non-spaziali*. Con questo intendiamo dire che, contrariamente a un'entità classica

macroscopica, $P_A(\mathbb{R}^3)$ non è una proprietà attuale se A è microscopico, poiché il principio di indeterminazione non ci permette di prevedere, *nemmeno in linea di principio*, le sue posizioni spaziali, il che significa che queste posizioni non possono preesistere al processo osservativo (una versione precisa di questo argomento si trova in [15])¹¹.

Un altro esempio paradigmatico, che indica che le proprietà quantistiche sono create dal processo di misura, è fornito dal famoso *teorema di Kochen-Specker* [28], che dimostra l'impossibilità di attribuire valori specifici a priori al quadrato dello spin di un'entità di spin-1, lungo un dato numero di assi, in modo compatibile con i possibili risultati sperimentali. Ma se l'entità non può possedere, in generale, valori specifici di spin prima della loro osservazione, questo è solo un altro modo per dire che questi valori sono creati dal processo osservativo.

Un'ultima importante caratteristica delle misure quantistiche è che corrispondono all'osservazione di proprietà effimere, cioè di proprietà che in generale possono essere effettive solo per un istante. Seguendo la nostra precedente analisi, l'effimero sembra essere una conseguenza del carattere relazionale delle proprietà quantistiche. In altre parole, se le proprietà quantistiche sono poste in esistenza (in attualità) solo in modo effimero dallo stesso processo osservativo che le definisce in termini operazionali, ciò è dovuto al fatto che esse esprimono essenzialmente l'attualità di una relazione tra l'entità e l'apparato di misura; una relazione che cessa di essere attuale non

¹¹ Da notare che un'entità microscopica, come ad esempio un elettrone, pur non possedendo in generale una posizione spaziale, resta nondimeno disponibile a interagire con degli strumenti di misura in grado di crearla. In altre parole, manifesta una presenza potenziale nello spazio, espressione di una sorta di "vicinanza" con la dimensione spaziale. Questo significa che la probabilità di rilevare un elettrone nello spazio, se questo fosse ipoteticamente cosparso di strumenti di misura, sarebbe pari a 1. Nel formalismo quantistico questo fatto è espresso dalla normalizzazione dei vettori di stato, la cui lunghezza è unitaria.

appena l'osservazione si è conclusa e l'entità e l'apparato sono nuovamente (sperimentalmente) separati.

Riassumendo, possiamo dire che una tipica misura quantistica può essere intesa come l'osservazione di una *proprietà relazionale* tra l'entità quantistica osservata e lo strumento di osservazione, che implica un meccanismo di *rottura di simmetria* non controllabile dallo sperimentatore, che seleziona un singolo processo osservativo invasivo, possibilmente deterministico, che a causa della sua invasività essenzialmente *crea* la proprietà osservata (cambiando lo stato dell'entità osservata).

Regimi intermediari

Vorremmo concludere la nostra rassegna dei diversi processi osservativi spiegando anche il significato delle *osservazioni intermediarie*, che non sono né puramente classiche, né puramente quantistiche. Ne abbiamo già accennato in precedenza in relazione alla macchina quantistica di Aerts, quando ci siamo riferiti alla sua variante del *modello* ϵ , in cui gli elastici non sono più uniformemente frangibili. In questo modello, ϵ è un parametro continuo che può variare da 0 a 1. Nel limite $\epsilon = 0$, gli elastici possono essere rotti solo in un determinato punto, per cui i processi osservativi sono puramente classici, nel senso che gli esiti possono essere previsti con certezza conoscendo solo lo stato dell'entità. Nel limite $\epsilon = 1$, invece, gli elastici sono perfettamente uniformi e i processi osservativi, come abbiamo spiegato, sono puramente quantistici, cioè strutturalmente equivalenti alle misure di uno *spin-1/2*, riproducendo le stesse probabilità di transizione di un tipico esperimento di Stern-Gerlach, predette dalla *regola di Born*. Ma nella situazione intermediaria, $0 < \epsilon < 1$, gli elastici utilizzati hanno una struttura più complessa, in quanto sono uniformemente rompibili solo nel loro segmento centrale (la cui lunghezza è proporzionale a ϵ), cosicché l'esito dei processi osservativi può essere prevedibile o imprevedibile, a seconda dello stato iniziale dell'entità (che

determina dove la particella puntiforme si attaccherà all'elastico, "cadendo" ortogonalmente su di esso). Una situazione intermedia di questo tipo dà origine a una struttura dello spazio degli stati che non può essere modellizzata da uno *spazio di fase* classico o da uno *spazio di Hilbert* quantistico, come è stato dimostrato in [6]. In altri termini, le osservazioni intermedie sono associate a strutture più generali e complesse di quelle derivanti da osservazioni puramente classiche o puramente quantistiche.

Un altro interessante esempio di processi osservativi intermediari è stato recentemente presentato dall'autore in [27], dove è stata introdotta una macchina quantistica macroscopica, chiamata *δ -quantum-machine*, in grado di riprodurre le probabilità di trasmissione e riflessione di un processo di scattering quantistico unidimensionale mediante un potenziale descritto da una funzione *delta di Dirac* (vedi la Figura 5).

Variando le procedure di osservazione, la macchina può anch'essa esibire, similmente al *modello ϵ* di Aerts, un'intera gamma di comportamenti intermediari che non possono essere descritti da un sistema di scattering classico o quantistico.

Qui vogliamo fornire un esempio veramente elementare di osservazione intermedia che, a seconda dello stato del sistema, può dare luogo a risultati prevedibili o imprevedibili per il processo osservativo. In realtà, abbiamo già introdotto un esempio del genere in questo articolo, quando abbiamo definito l'osservazione della proprietà di *frammentazione* di un elastico. A seconda dello stato dell'elastico, tale osservazione può essere totalmente prevedibile o perfettamente imprevedibile.

Per rendersene conto, osserviamo che delle osservazioni consecutive della proprietà del *mancinismo* (o più semplicemente della *rompibilità*) porranno l'elastico in stati diversi, caratterizzati da un numero crescente di frammenti. In termini generali, come abbiamo già osservato, questo aumenterà la probabilità di osservare la proprietà della *frammentazione*.

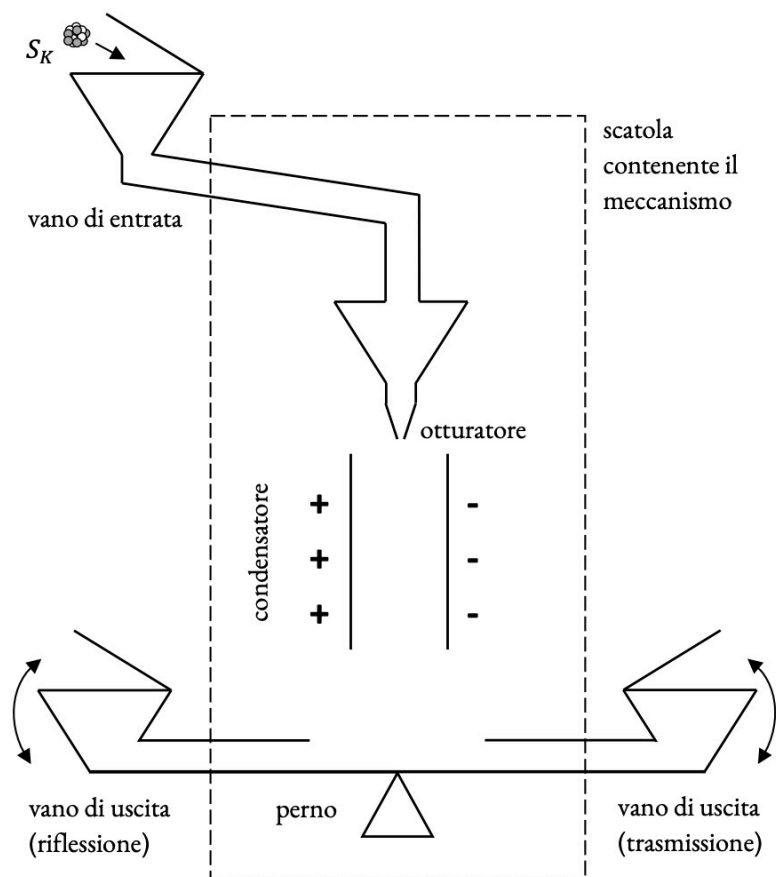


Figura 5 Il funzionamento della δ -quantum-machine è il seguente. Un'entità S_K , formata da K sfere elettricamente cariche, viene inserita in un vano di entrata, andando a cadere in un compartimento centrale, disassemblandosi. Un otturatore seleziona quindi un certo una o più sfere (a seconda della tipologia di misura), lasciandole cadere tra le piastre di un condensatore, producendo una deviazione della loro traiettoria a seconda della carica (positiva o negativa). Queste atterrano infine su un binario che si trova in equilibrio su un perno centrale, il quale si sblinacerà verso destra o verso sinistra. Il processo si ripete fino a quando tutte le sfere si ritrovano sia nel vano di uscita di destra (trasmissione) sia nel vano di uscita di sinistra (riflessione), con l'entità S_K interamente ricomposta [27].

Tuttavia, non appena l'elastico si trova in uno stato tale che la lunghezza di tutti i suoi frammenti è inferiore alla metà della

lunghezza totale originale, la proprietà di frammentazione può essere osservata con certezza. In altri termini, a seconda dello stato dell'entità, il risultato può essere prevedibile o imprevedibile, cioè possono verificarsi entrambe le situazioni, per uno stesso sistema. Questo è molto diverso dalle tipiche osservazioni classiche, dove indipendentemente dallo stato del sistema il risultato è sempre perfettamente predicibile, o dalle tipiche osservazioni quantistiche, dove il risultato non è predicibile con certezza (salvo la situazione eccezionale in cui il sistema si trova in un autostato dell'osservazione in questione).

A quest'ultima affermazione si può naturalmente obiettare che esistono circostanze, anche per le entità quantistiche, in cui certe osservazioni possono essere predette in anticipo, come nel caso, ad esempio, della carica elettrica di un elettrone. Questo è corretto ed è il motivo per cui in generale non si dovrebbe parlare di *sistemi* (o *entità*) quantistici o classici, ma di *processi osservativi* (o *proprietà*) quantistici, classici e intermediari, poiché un dato sistema può esibire sia proprietà quantistiche che classiche.

Il punto cruciale delle osservazioni intermedie, che le distingue da quelle classiche e quantistiche, è il fatto che, per uno stesso processo osservativo (cioè una stessa proprietà), il risultato può essere perfettamente predicibile o perfettamente imprevedibile (ma comunque sempre predicibile in termini probabilistici), a seconda dello stato in cui si trova il sistema osservato, e questa è una situazione che non può essere debitamente modellizzata nell'ambito della struttura matematica di uno spazio delle fasi o di uno spazio di Hilbert [6].

Non-spazialità

È giunto il momento di trarre alcune conclusioni dalla nostra panoramica sui processi osservativi nei sistemi fisici. Abbiamo analizzato l'osservazione prendendo in considerazione diverse prospettive. Abbiamo iniziato considerando che le osservazioni

possono essere perfettamente *non invasive*, quando sono eseguite senza uno scopo specifico, ma possono facilmente diventare parzialmente o totalmente *invasive*, quando rivolgono domande molto specifiche alle entità considerate. Questa invasività dei processi osservativi può manifestarsi sia in termini di *distruzione* delle proprietà osservate, sia di *creazione* delle stesse, con modalità che possono variare a seconda della definizione operativa scelta per definire la proprietà che si sta osservando. Abbiamo visto che tutto ciò è indipendente dal fatto che i sistemi osservati siano macroscopici o microscopici, per cui gran parte della stranezza delle osservazioni quantistiche, in particolare la loro *contestualità*, è in realtà presente anche quando si opera con le entità convenzionali (quindi non è poi così strana).

Un altro aspetto interessante che abbiamo sottolineato è che l'*incompatibilità* è anch'essa una caratteristica generale delle entità macroscopiche, legata al fatto che l'osservazione di un'entità influenzerà in generale il suo stato, quindi anche il risultato delle osservazioni successive. Questo però non significa che non si possano osservare congiuntamente delle osservabili incompatibili. Per farlo, basta utilizzare una procedura osservativa molto particolare, chiamata *test-prodotto*. Tale procedura implica un *atto di scelta indeterministico*, attraverso il quale si seleziona un processo osservativo specifico, possibilmente deterministico, tra una collezione di processi potenziali disponibili, poi lo si esegue.

Se tale selezione è il risultato di un meccanismo di *rottura di simmetria*, che rimane nascosto alla "vista" dell'osservatore, quindi al di fuori del suo potere di controllo, può emergere una struttura probabilistica di tipo quantistico, come è stato dimostrato da Aerts, nel suo *approccio a misure nascoste* [7,11].

Abbiamo anche visto che una caratteristica tipica delle osservazioni (misure) quantistiche è l'effimerità delle proprietà osservate e abbiamo proposto una spiegazione di questo fatto in termini di *proprietà relazionali*: le osservazioni quantistiche riguardano delle proprietà relazionali tra il sistema e l'apparato di

misura, e poiché, alla fine di un processo di misurazione, la loro connessione viene generalmente interrotta, questo è il motivo per cui le proprietà osservate, una volta create dall'interazione, vengono anche immediatamente dopo distrutte (non appena la stessa interazione tra l'entità e l'apparato di misura viene "spenta"). Questo spiegherebbe la tipica effimerità (cioè la non intrinsecità) delle proprietà quantistiche.

Nella nostra analisi abbiamo altresì sottolineato che le proprietà relazionali sono onnipresenti anche nella fisica classica, poiché anche l'osservazione di posizione, quantità di moto, energia, ecc., di un corpo classico, sono in realtà l'espressione di proprietà relazionali irriducibili tra l'entità osservata e il sistema di riferimento associato allo strumento di misura. Inoltre, abbiamo visto che le osservazioni congiunte (i test-prodotto) sono presenti anche nella fisica classica, sebbene non siano, di norma, riconosciute come tali, dato che il processo attraverso il quale un osservatore sceglie uno specifico processo osservativo, scegliendo ad esempio uno specifico sistema di riferimento, non è considerato parte integrante dell'esperimento.

Ma se allarghiamo la nostra prospettiva e intendiamo l'osservazione, ad esempio della posizione (del centro di massa) di un corpo macroscopico A , come l'osservazione di una proprietà relazionale tra A e uno strumento di misura R , allora la scelta di uno stato specifico per R (qui inteso nella sua funzione di sistema di riferimento) significa compiere uno specifico atto di creazione (invasivo) sul sistema composito $\{A, R\}$. In questo senso, dobbiamo riconoscere che le misure classiche e le misure quantistiche sono in realtà molto più simili di quanto ci si aspetterebbe.

L'utilizzo di diversi sistemi di riferimento per osservare le proprietà di un corpo A non è quindi un processo passivo come viene solitamente inteso. Infatti, poiché la maggior parte delle proprietà osservate sono irriducibilmente relazionali, quando consideriamo il punto di vista di diversi osservatori, associati a diversi sistemi di riferimento, dobbiamo ammettere che non stanno osservando la stessa proprietà. Infatti, quando parliamo di *posizione di A* , ciò che

intendiamo veramente è la “proprietà posizione-relazionale tra A e R ” – denotiamola $q_{A,R}$ – che è una proprietà non di A , ma dell’entità composita $\{A, R\}$. Quindi, quando cambiamo l’osservatore, passando dal quadro di riferimento R a, per esempio, il quadro di riferimento R' , l’osservatore R' osserva ora una diversa proprietà relazionale – $q_{A,R'}$ – associata a una diversa entità composita, $\{A, R'\}$.

Naturalmente, l’osservatore R' può anche essere interessato a osservare le proprietà relazionali associate al sistema composito $\{R, R'\}$, e chiedersi se la loro conoscenza gli consenta di dedurre le proprietà di $\{A, R\}$ da quelle di $\{A, R'\}$, e viceversa. Questa possibilità è resa manifesta dall’esistenza di alcune *trasformazioni* matematiche, la cui natura dipende ovviamente dal tipo di proprietà relazionali esistenti tra R e R' . Quando R e R' sono, per esempio, due sistemi di riferimento inerziali, se siamo interessati solo alle proprietà relazionali di tempo e posizione, allora queste trasformazioni sono le ben note *trasformazioni galileiane* o di *Lorentz*.

Un aspetto interessante è che esistono alcune classi di azioni che si possono eseguire su entrambi i sottosistemi A e R , tali da lasciare del tutto inalterate le proprietà del sistema composito $\{A, R\}$. Come è stato lucidamente sottolineato da Poincaré all’inizio del secolo scorso [30], è la possibilità di queste azioni *correlative* (chiamate *spostamenti*), che lasciano inalterate le proprietà del sistema composito $\{A, R\}$, che ha portato noi esseri umani, nel corso della nostra evoluzione, a costruire lo spazio geometrico euclideo, come modo conveniente per rappresentare l’insieme di tutte le possibili azioni di spostamento. Questo naturalmente non significa che il nostro spazio euclideo sia una pura invenzione umana. A questo proposito, è opportuno citare Aerts, nel suo commento dei risultati di Poincaré [5]:

“Poincaré analizza come la realtà dello spazio tridimensionale euclideo (o non-euclideo) sia stata costruita a partire dalle nostre esperienze quotidiane di esseri umani con gli oggetti che sono più importanti per noi (i corpi rigidi), e più vicini a noi. Ciò non significa che questo spazio tridimensionale sia una ‘invenzione’ dell’umanità.

Esiste, ma il modo in cui lo abbiamo ordinato e poi formalizzato, attraverso specifici modelli matematici, ne fa parte. In altre parole, ciò che chiamiamo la realtà tridimensionale dello spazio in parte esiste di per sé e in parte esiste grazie alle strutture che abbiamo costruito, basandoci sulla nostra specifica esperienza umana con essa”.

In effetti, come ha sottolineato Poincaré, anche le *deformazioni* dei corpi macroscopici (non rigidi) possono essere comprese in termini di spostamenti, se concepiamo un corpo macroscopico come un aggregato formato da un certo numero di sotto-entità separate, in modo che sia lo spostamento di alcune di esse, rispetto ad altre, a produrre l'effetto percepito della deformazione complessiva del corpo macroscopico. Ed è per questo che anche le deformazioni possono essere visualizzate, in qualche misura, nel nostro spazio ordinario.

Ma la costruzione del nostro teatro spaziale euclideo, pur essendo adatta a rappresentare azioni di spostamento, non può certo rappresentare tutte le possibili azioni che possono essere eseguite sulle diverse entità fisiche. Consideriamo ad esempio una banconota da dieci dollari e l'azione di strapparla in due pezzi¹². Dove sono i dieci dollari una volta che la banconota è stata strappata? A rigore di logica, scompaiono dal nostro spazio fisico euclideo e, al loro posto, compaiono due nuove entità “pezzo di carta”. È chiaro che questa azione di rottura, che è un processo di creazione-distruzione, non può essere descritta da un semplice spostamento, ed è per questo che dopo la sua esecuzione non possiamo più rappresentare i dieci dollari nel nostro spazio.

Ma è altresì chiaro che i dieci dollari non sono scomparsi completamente dalla nostra realtà: esistono ancora, ma in un senso diverso da prima. Se prima dell'azione di rottura erano dieci dollari

¹² Ricordiamo che questo era uno degli esempi preferiti di Constantin Piron, quando insegnava a Ginevra il suo corso di meccanica quantistica. Un altro era la sua enfasi nel distinguere – soprattutto quando scriveva alla lavagna – i gessi rompibili da quelli rotti!

attuali, appartenenti al nostro spazio fisico tridimensionale, in seguito all'azione di rottura sono diventati dieci dollari *potenziali*, non più appartenenti al nostro spazio fisico tridimensionale, ma comunque ancora appartenenti alla nostra realtà, come è evidente dal fatto che possono essere ricomposti, ad esempio incollando i due frammenti. In altri termini, esistono diverse *modalità di esistenza* possibili per le entità, e quando passano da una modalità all'altra, questo può far sì che escano dal nostro spazio fisico ordinario, cioè che non siano più rappresentabili al suo interno (tale meccanismo è stato recentemente analizzato in [27], attraverso il concetto di *p-attualità* (attualità di tipo processo, o *process-actuality*, in inglese), e rimandiamo il lettore interessato a questo articolo per un'ulteriore trattazione dell'argomento).

Ora, come abbiamo osservato in precedenza, quando le azioni di spostamento vengono eseguite simultaneamente su due sottosistemi A e R , le proprietà relazionali tra di essi rimangono invariate e l'osservazione di tali correlazioni è un ingrediente fondamentale nella costruzione del nostro spazio euclideo. (Per capire bene perché è così, rimandiamo il lettore interessato al libretto di Poincaré "La scienza e l'ipotesi" [30], e in particolare al suo capitolo 4, dove l'autore spiega in modo esauriente come un'attenta analisi delle leggi che regolano le nostre impressioni sensoriali possa averci portato al concetto di spazio geometrico. In questa analisi, un ingrediente fondamentale è la constatazione dell'esistenza di certi "movimenti correlativi", che permettono di collegare alcune classi di fenomeni che altrimenti non avremmo mai pensato di collegare).

D'altra parte, come il lettore sicuramente concorderà, se un'azione di rottura viene eseguita simultaneamente su A e R , tutte le proprietà relazionali tra di essi saranno radicalmente alterate. In altri termini, e contrariamente a un'azione di spostamento, un'azione di rottura eseguita su entrambi i sottosistemi A e R non lascerà inalterate le proprietà del sistema composito $\{A, R\}$, e a seconda di come sono stati definiti i sottocomponenti A e R , può arrivare a distruggerlo completamente. Ecco perché (seguendo lo stesso

ragionamento di Poincaré) queste azioni di rottura non hanno dato luogo alla costruzione di uno spazio geometrico che avrebbe svolto un ruolo simile a quello svolto dallo spazio euclideo in relazione agli spostamenti.

Ora, assumendo, come abbiamo fatto, che la specificità delle osservazioni (cioè delle misure) quantistiche sia quella di corrispondere a osservazioni di proprietà relazionali effettuate attraverso atti di creazione che coinvolgono processi di tipo “rottura” (si pensi alla rottura dell’elastico quando si osserva il “suo” mancinismo, e più in generale all’*attuale* che rompe la simmetria del *potenziale* in un’osservazione congiunta), si comprende facilmente perché le entità quantistiche, come gli elettroni, non possono essere convenientemente rappresentate all’interno del nostro spazio euclideo, in quanto appartengono di fatto a un più ampio *spazio di potenzialità*, che noi esseri umani abbiamo iniziato a scoprire, costruire e tentare di rappresentare solo di recente.

La spazialità non ordinaria delle entità quantistiche, che è di fatto un’espressione della loro *non-località* è stata analizzata a fondo da Aerts in una serie di lavori [5-7], e più recentemente anche dal presente autore [15,27,31]. Per un’ulteriore analisi di questo importante concetto, invitiamo quindi il lettore interessato a consultare questi lavori.

Vale la pena ricordare che l’insufficienza della rappresentazione euclidea si manifesta anche quando si ha a che fare con entità relativistiche, che si muovono a velocità relative elevate, poiché in questo caso le proprietà (relazionali) spaziali e temporali si mescolano, come dimostrano le trasformazioni di Lorentz. Per rappresentare adeguatamente le osservazioni classiche (qui nel senso di non-quantistiche), occorre allora sostituire lo spazio tridimensionale con una vera e propria struttura quadridimensionale. Questo però non consiste semplicemente nel sostituire il nostro naïf teatro spaziale tridimensionale con un altrettanto naïf teatro spaziale quadridimensionale, nel quale non sarebbe possibile un vero cambiamento, come è stato evidenziato da

Aerts nella sua analisi degli aspetti geometrici e processuali che sono insiti nella nostra costruzione della realtà; analisi alla quale rimandiamo il lettore interessato [7,32,33].

In questa sede ci limitiamo a osservare che nella nostra esperienza ordinaria (non-relativistica) con le entità macroscopiche classiche, la lunghezza di un regolo o il ticchettio di un orologio sono di solito considerati come proprietà intrinseche che potrebbero essere osservate in modo equivalente da diversi osservatori inerziali, indipendentemente dal loro stato di moto relativo. D'altra parte, la relatività ci ha insegnato che questo non è generalmente vero: le lunghezze dei regoli si contraggono e gli orologi si muovono più lentamente quando la loro velocità rispetto a un osservatore aumenta.

Questi effetti relativistici possono essere compresi, secondo l'interpretazione (geometrica) einsteiniana della relatività, come *effetti di parallasse generalizzati*: il fatto che due diversi osservatori inerziali, R e R' , osservino, cioè misurino, lunghezze (frequenze di ticchettio) diverse per uno stesso regolo (orologio) A , significa semplicemente che quelle che pensavamo fossero proprietà intrinseche sono in realtà proprietà relazionali dipendenti dall'osservatore. Ciò compreso, non c'è più alcun mistero nel fatto che una specifica proprietà del sistema composito $\{A, R\}$, che chiamiamo impropriamente lunghezza (frequenza) di A , sarà generalmente diversa da quella stessa proprietà associata al sistema composito $\{A, R'\}$. Dato che $\{A, R\}$ e $\{A, R'\}$ sono due sistemi diversi, non ci sono ragioni a priori per aspettarsi che presentino proprietà identiche.

D'altra parte, questi stessi effetti relativistici possono essere compresi anche secondo un'interpretazione di Lorentz della relatività, di tipo processuale. Infatti, se intendiamo il sistema composito $\{A, R'\}$ come il sistema che si ottiene a seguito di una certa azione di "deformazione" dinamica sul sistema $\{A, R\}$ – proprio quell'azione che trasforma il suo sottocomponente R in R' – allora possiamo sostenere che i tipici effetti relativistici sono anche il risultato di vere e proprie azioni fisiche compiute sull'entità

osservata, e questo senza bisogno di invocare l'esistenza di un *etere*. Il punto è che, contrariamente a quanto si ipotizza di solito, non stiamo osservando realmente una proprietà dell'entità A , ma una proprietà di un'entità composita più grande, $\{A, R\}$.

Si potrebbe obiettare che gli effetti relativistici, come la dilatazione temporale, hanno luogo principalmente non durante il periodo di accelerazione che trasforma un sistema di riferimento R , diciamo inizialmente a riposo rispetto ad A , in un sistema di riferimento R' , che si muove a una certa velocità costante rispetto ad esso. Pertanto, non sarebbe corretto dire che è il processo $R \rightarrow R'$ a essere responsabile degli effetti relativistici osservati. Naturalmente, dipende da come interpretiamo questa affermazione. Gli effetti relativistici, come abbiamo sottolineato, sono espressione di proprietà relazionali che dipendono solo dalla velocità relativa tra A e R' , non da un precedente processo di accelerazione che ha portato R' ad acquisire il suo stato di moto relativo. Tuttavia, è proprio tale processo di accelerazione a creare queste proprietà relazionali dipendenti dalla velocità (e non dall'accelerazione). In altri termini, non dobbiamo confondere il processo che ha creato una data proprietà con la proprietà stessa.

Concludiamo questo lavoro sottolineando che, sia nella fisica classica/relativistica che in quella quantistica, molti dei nostri problemi interpretativi potrebbero essere il risultato di una comprensione insufficiente della struttura complessa e articolata di un processo osservativo, e in particolare del fatto che molte delle nostre osservazioni sono in realtà, per così dire, delle *meta-osservazioni*, cioè osservazioni di proprietà congiunte (intrinseche o relazionali) che vengono create (o distrutte) dal processo osservativo stesso.

Bibliografia

[1] C. Piron, "Foundations of Quantum Physics," W. A. Benjamin Inc., Massachusetts (1976).

- [2] C. Piron, “La Description d’un Système Physique et le Présupposé de la Théorie Classique,” *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 3, pp. 131-152 (1978).
- [3] C. Piron, “Mécanique quantique. Bases et applications,” Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (Second corrected edition 1998), First Edition (1990).
- [4] D. Aerts, “Description of many physical entities without the paradoxes encountered in quantum mechanics,” *Found. Phys.*, 12, pp. 1131–1170 (1982).
- [5] D. Aerts, “An attempt to imagine parts of the reality of the micro-world,” pp. 3–25, in “Problems in Quantum Physics II; Gdansk ’89,” eds. Mizerski, J., et al., World Scientific Publishing Company, Singapore (1990). An Italian translation of this article is also available: “Un tentativo di immaginare parti del micromondo,” *AutoRicerca*, Volume 2, pp. 77–109 (2011).
- [6] D. Aerts, “The entity and modern physics: the creation-discovery view of reality,” in “Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics,” ed. Castellani, E. Princeton University Press, Princeton (1998).
- [7] D. Aerts, “The Stuff the World is Made of: Physics and Reality,” pp. 129–183, in “The White Book of ‘Einstein Meets Magritte’,” Edited by Diederik Aerts, Jan Broekaert and Ernest Mathijs, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 274 pp. (1999).
- [8] D. Aerts, “The missing element of reality in the description of quantum mechanics of the EPR paradox situation,” *Helv. Phys. Acta*, 57, pp. 421–428 (1984).
- [9] D. Aerts, “The construction of reality and its influence on the understanding of quantum structures,” *Int. J. Theor. Phys.*, 31, pp. 1815-1837 (1992).
- [10] W. Christiaens, “Some notes on Aerts’ interpretation of the EPR-paradox and the violation of Bell-inequalities,” pp. 259– 286, in “Probing the Structure of Quantum Mechanics: Nonlinearity, Nonlocality, Computation and Axiomatics,” World Scientific, Singapore, 394 pp. (2002).
- [11] D. Aerts, “A possible Explanation for the Probabilities of Quantum Mechanics,” *J. Math. Phys.*, 27, pp. 202–210 (1992).
- [12] “Sheldrake and his critics: the sense of being glared at,” *Journal of Consciousness Studies*, 12, pp. 1–126 (2005).
- [13] W. Heisenberg, “The Physical Principles of Quantum Theory,” University of Chicago Press (1930).
- [14] A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?,” *Phys. Rev.*, 47, pp. 777-780 (1935).

- [15] M. Sassoli de Bianchi, “Ephemeral Properties and the Illusion of Microscopic Particles,” *Foundations of Science*, 16, No. 4 pp. 393–409 (2011); doi: 10.1007/s10699-011-9227-x. Vedi anche, in italiano, “Proprieta effimere e l’illusione delle particelle microscopiche,” *AutoRicerca*, Volume 2, pp. 39–76 (2011).
- [16] D. Aerts, “Reality and probability: introducing a new type of probability calculus,” pp. 205–229, in “Probing the Structure of Quantum Mechanics: Nonlinearity, Nonlocality, Computation and Axiomatics,” World Scientific, Singapore, 394 pp. (2002).
- [17] D. Aerts, “Being and change: foundations of a realistic operational formalism,” pp. 71–110, in “Probing the Structure of Quantum Mechanics: Nonlinearity, Nonlocality, Computation and Axiomatics,” World Scientific, Singapore, 394 pp. (2002).
- [18] D. Aerts, “Quantum mechanics: structures, axioms and paradoxes,” pp. 141–205, in “The Indigo Book of ‘Einstein Meets Magritte’,” Edited by Diederik Aerts, Jan Broekaert and Ernest Mathijs, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 239 pp. (1999).
- [19] S. Smets, “The modes of physical properties in the logical foundations of physics,” *Logic and Logical Philosophy*, 14, pp. 37–53 (2005).
- [20] J. H. Conway and S. Kochen, “The free will theorem,” *Found. of Physics*, 36, pp. 1441–1473 (2006).
- [21] J. H. Conway and S. Kochen, “The strong free will theorem,” *Notices of the American Mathematical Society*, 56, pp. 226–232 (2009).
- [22] D. Aerts, B. Coecke, B. D’Hooghe and F. Valckenborgh, A mechanistic macroscopic physical entity with a three-dimensional Hilbert space description, *Helv. Phys. Acta*, 70, 793–802 (1997).
- [23] D. Aerts, “Quantum Structures, Separated Physical Entities and Probability,” *Found. of Physics*, 24, p. 1227 (1994).
- [24] B. Coecke, “Hidden measurement representation for quantum entities described by finite dimensional complex Hilbert spaces,” *Found. Phys.*, 25, p. 203 (1995).
- [25] B. Coecke, “Generalization of the proof on the existence of hidden measurements to experiments with an infinite set of outcomes,” *Found. Phys. Lett.*, 8, p. 437 (1995).
- [26] B. Coecke, “New examples of hidden measurement systems and outline of a general scheme,” *Tatra Mountains Mathematical Publications*, 10, p. 203 (1996).
- [27] M. Sassoli de Bianchi, “The δ -quantum machine, the k -model, and the non-ordinary spatiality of quantum entities,” *Found. of Sci.* 18, pp. 11–41 (2013).

[28] S. Kochen and E.P. Specker, “The problem of hidden variables in quantum mechanics,” *Journal of Mathematics and Mechanics*, 17, pp. 59–87 (1967).

[29] A.M. Gleason, *Measures on the Closed Subspaces of a Hilbert Space*, *J. Math. Mech.*, 6, 885–893 (1957).

[30] H. Poincaré, “La science et l’hypothèse,” Flammarion, Paris (1902).

[31] M. Sassoli de Bianchi, “From permanence to total availability: a quantum conceptual upgrade,” *Found. of Sci.* 17, pp. 223-244 (2012).

[32] Aerts, D., “Relativity theory: what is reality?” *Found. Phys.* 26, pp. 1627–1644 (1996).

[33] Aerts, D., “Towards a framework for possible unification of quantum and relativity theories,” *Int. J. Theor. Phys.* 35, pp. 2399–2416 (1996).

Nota: Questo articolo è una rivisitazione ed ampliamento di un articolo precedentemente pubblicato in inglese: Sassoli de Bianchi, M. (2013). *The Observer Effect*. *Found. of Sci.* 18, pp. 213-243.