

Ontologie quantistiche di particelle, campi e lampi

Valia Allori¹ e Nino Zanghì²

22 aprile 2007

La meccanica quantistica è una delle più grandi conquiste intellettuali del xx secolo. Le sue leggi regolano il mondo atomico e subatomico e si riverberano su una miriade di fenomeni del mondo macroscopico, dalla formazione dei cristalli alla superconduttività, dalle proprietà dei fluidi a bassa temperatura agli spettri di emissione di una candela che brucia o di una supernova che esplode, dai meccanismi di combustione della fornace solare ai principi di base delle nanotecnologie. Non c'è quasi nulla nel mondo che ci circonda su cui non soffi l'alito delle leggi quantistiche. Tuttavia, per come è usualmente presentata nei libri di testo, la meccanica quantistica è sostanzialmente un'insieme di regole per calcolare le distribuzioni di probabilità dei risultati di qualunque esperimento (nel dominio di validità della meccanica quantistica). In quanto tale, non ci fornisce direttamente una descrizione della realtà. Una descrizione della realtà, cioè un'*ontologia*, dovrebbe dirci che cosa c'è nel mondo e come si comporta, quali sono i processi che si realizzano a livello microscopico e, di conseguenza, fornirci una spiegazione del formalismo quantistico.

1. Einstein, Schrödinger e il problema della completezza

Mentre sulla correttezza del formalismo quantistico c'è un accordo pressoché generale, quale sia la l'ontologia quantistica rimane un punto controverso. Si è persino dubitato se una descrizione della realtà debba conformarsi alle regole della logica ordinaria e se tale descrizione sia davvero desiderabile. In verità, si è anche sostenuto che la teoria quantistica ci costringa ad abbandonare la realtà di un mondo esterno che esiste oggettivamente, indipendentemente dalla mente umana. In

1 Department of Philosophy, Davison Hall, Rutgers, The State University of New Jersey, 26 Nichol Avenue, New Brunswick, NJ 08901-1411, USA. E-mail: vallori@eden.rutgers.edu

2 Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova and INFN sezione di Genova, Via Dodecaneso 33, 16146 Genova, Italy. E-mail: zanghi@ge.infn.it

questi ultimi anni è poi cresciuta in popolarità una visione della meccanica quantistica basata sulla teoria dell'informazione. Si tratta di un vestito che sembra nuovo, confezionato sull'onda dello sviluppo teorico e sperimentale delle teorie dell'informazione e della computazione quantistica, ma in realtà è un abito usato: già nel 1952 Schrödinger metteva in guardia contro l'idea di ridurre la meccanica quantistica a semplice rappresentazione della nostra conoscenza (Schödinger, 1995, pp. 70-81).³

Lo scetticismo verso la possibilità di rappresentare con immagini chiare e non ambigue quello che accade nel mondo ha radici lontane. Negli anni Venti del xx secolo, Niels Bohr incominciò a difendere l'idea che il realismo scientifico tradizionale era infantile e non scientifico, e propose quella che è ancora chiamata l'interpretazione di Copenhagen della meccanica quantistica. In base a questa dottrina le leggi fisiche non hanno più a che fare con come è fatto il mondo, ma con la nostra possibilità di conoscerlo, che è intrinsecamente limitata: la meccanica quantistica di Copenhagen rifiuta in linea di principio di fornire una storia consistente a quello che accade agli oggetti microscopici. L'insistenza di Albert Einstein sulla possibilità di arrivare ad una formulazione più completa, in cui l'osservatore non giochi alcun ruolo privilegiato, sembrerebbe in effetti molto modesta se confrontata con le categoriche asserzioni di Bohr riguardanti l'impossibilità, in linea di principio, di una descrizione completa della realtà fisica indipendente dall'osservatore. Ciò nonostante, la maggioranza dei fisici ritiene che il dibattito tra Einstein e Bohr, durato decenni, sia stato vinto da Bohr.

Tuttavia, oggi possiamo affermare con certezza che quel dibattito è stato risolto, e, in effetti, a favore di Einstein. Quello che Einstein desiderava e che Bohr riteneva impossibile esiste. Esiste una meccanica quantistica senza l'osservatore in cui il processo di misura può essere analizzato in termini di concetti più fondamentali. Inoltre, oggi disponiamo di diverse formulazioni di questo tipo. Dal 1952 esiste una teoria che rende conto di tutti i fatti quantistici in maniera naturale ed elegante: si tratta della meccanica bohmiiana, anche nota come teoria d'onda pilota di de Broglie-

³ Per un critica recente, si veda Daumer & al. (2006).

Bohm. Questa teoria descrive un mondo in cui gli elettroni, i quark e le altre particelle puntiformi si muovono lungo traiettorie ben definite, sebbene non classiche, secondo una precisa legge del moto determinata dalla funzione d'onda. Dovrebbe essere insegnata agli studenti, sosteneva John Stuart Bell, come una legittima alternativa all'ortodossia. E nel 1986 i fisici italiani GianCarlo Ghirardi, Alberto Rimini and Tullio Weber ebbero successo nello sviluppare un secondo tipo di teoria realista, incoraggiata da Bell, e nota come localizzazione spontanea, o teoria GRW. Ciascuno di questi due approcci può essere visto come una risposta al problema di formulare una meccanica quantistica senza l'osservatore e come una realizzazione dell'intuizione di Einstein che la funzione d'onda non fornisce una rappresentazione completa della realtà fisica e della sua idea che una teoria più completa è possibile.

Fu Erwin Schrödinger, il padre della funzione d'onda, a mostrare perché la funzione d'onda non fornisce una descrizione completa dei sistemi fisici. Per chiarire questo punto, Schrödinger aveva ideato un esperimento mentale in cui un gatto viene messo in una stanza insieme a una sorgente radioattiva. La sorgente radioattiva è collegata a una fiala di veleno gassoso da un dispositivo tale che, quando un nucleo radioattivo decade, rompe la fiala, il veleno ne esce e uccide il gatto. In questo modo si amplifica su scala macroscopica (il gatto) una sovrapposizione quantistica microscopica: la funzione d'onda microscopica è la *somma* di due funzioni d'onda, ciascuna delle quali corrisponde ai due stati possibili del nucleo (decaduto/non decaduto) e ad essa, sulla base della *linearità* dell'evoluzione di Schrödinger, corrisponde una funzione d'onda macroscopica finale che è la *somma* di due funzioni d'onda, una corrispondente allo stato di vita del gatto e l'altra a quello di morte. Ma questa funzione d'onda finale, essendo "sparpagliata" sia sulle configurazioni atomiche corrispondenti al gatto vivo che su quelle corrispondenti al gatto morto, non rappresenta lo stato possibile del gatto alla fine dell'esperimento, che è di certo o vivo o morto. È questo carattere di sparpagliamento della funzione d'onda che preoccupava Schrödinger, uno sparpagliamento che, come diceva Schrödinger, "produce un offuscamento delle cose tangibili e visibili per cui il termine 'offuscamento' è semplicemente sbagliato" (Schrödinger,1935).

Nonostante le difficoltà che comporta assumere che la funzione d'onda fornisca una descrizione completa di un sistema quantistico, tale concezione è tuttora largamente diffusa. Si tratta certamente di una possibilità attraente: *ceteris paribus*, il monismo, cioè che ci sia solo un genere di realtà, è forse più attraente del pluralismo ontologico. Ma le altre cose non sono, come abbiamo appena visto, uguali. In effetti, il fascino del monismo della funzione d'onda è così forte che la maggior parte delle interpretazioni della meccanica quantistica, inclusa l'interpretazione ortodossa, comportano, in forma più o meno esplicita, l'abrogazione del carattere universale dell'equazione di Schrödinger.

Secondo una variante dell'interpretazione ortodossa, di solito attribuita a Dirac e von Neumann, quando un osservatore effettua una misura, l'equazione di Schrödinger deve essere "sospesa" e sostituita da una diversa legge dinamica, la regola di "collasso" della funzione d'onda. Secondo questa regola, la somma di funzioni d'onda in cui si trova il sistema *prima* della misura si trasforma, *dopo* la misura, in uno dei termini della somma, secondo una legge di probabilità determinata dalla funzione d'onda iniziale e dalle modalità con cui la misura viene effettuata.⁴ Quindi soltanto quando un osservatore entra nella stanza ed effettua una misura lo stato del gatto risulta determinato. Ma quando un processo fisico deve essere considerato un processo di misura? John Bell (1990) così lamentava: "Sembrirebbe che la teoria riguardi esclusivamente 'i risultati delle misurazioni', e che non abbia nulla da dire su tutto il resto. Che cosa qualifica un sistema fisico perché sia un 'misuratore'? La funzione d'onda del mondo ha per caso atteso di 'saltare' per migliaia di anni fino a che non è apparsa la prima creatura vivente monocellulare? Oppure ha aspettato ancora un po' di più, per aspettare qualche sistema meglio qualificato... magari con un dottorato?"

Per superare queste obiezioni, nel corso degli anni ci sono state differenti proposte che hanno suggerito che, indipendentemente dall'intervento di un osservatore esterno, l'evoluzione della funzione d'onda non sia regolata dall'equazione di Schrödinger. Un tratto comune di queste

⁴ Si osservi che la regola del collasso viola la linearità dell'evoluzione di Schrödinger: una trasformazione lineare deve infatti trasformare somme in somme.

proposte è che la dinamica quantistica debba essere sostituita da una qualche modifica non lineare e stocastica che, su scala microscopica, risulti equivalente, con elevato grado di approssimazione, all'evoluzione di Schrödinger.

A queste proposte di modifica dell'equazione di Schrödinger si potrebbe obiettare nel seguente modo: l'evoluzione temporale quantistica comprende una bellezza matematica profonda che sembra dire: "Non alterarmi! Non degradare la mia integrità!" Quindi, in considerazione del fatto che l'equazione di Schrödinger, e più in generale la teoria quantistica, in cui tale equazione (includere le sue estensioni relativistiche) svolge un ruolo così prominente, è stata verificata con un grado notevolissimo di precisione sperimentale, le proposte di modifica dell'evoluzione di Schrödinger sembrano nel migliore dei casi dubbie, basate su considerazioni puramente concettuali e filosofiche. Ma il monismo basato sulla funzione d'onda è davvero così indispensabile da costringerci a lottare duramente per mantenerlo di fronte alle ardue difficoltà che comporta?

2. Ontologia di particelle e meccanica bohmliana

Quando nuove entità teoriche astratte sono introdotte matematicamente in una teoria fisica, l'importanza fisica di queste entità, il loro significato stesso, nella misura in cui la fisica è interessata, risulta dal loro ruolo dinamico, dal ruolo che giocano nell'evoluzione temporale delle entità o variabili dinamiche più primitive, più familiari e meno astratte. Per esempio, nell'elettrodinamica classica il significato del campo elettromagnetico deriva solamente dall'equazione della forza di Lorentz, cioè dal ruolo del campo nel regolare l'evoluzione delle posizioni delle particelle cariche, con la specificazione delle forze, agenti su queste particelle, a cui il campo dà origine. In effetti, perchè queste astrazioni sarebbero state introdotte, se non per la loro attinenza con comportamento di qualcos'altro, che in qualche modo ha già rilevanza fisica? Forse dovrebbe essere considerato sorprendente che, nel corso dello sviluppo storico della meccanica quantistica, la funzione d'onda non sia stata introdotta in questo modo!

Ma in realtà, è stato proprio così. Nel 1924 Louis de Broglie propose che come le onde

elettromagnetiche sono associate in qualche modo con le particelle, i fotoni, così le particelle materiali, in particolare gli elettroni, dovrebbero essere associate con delle onde. De Broglie immaginò queste onde come “onde pilota” che regolano in qualche modo il movimento delle particelle, in un modo che soltanto successivamente, verso la fine degli anni 20, rese esplicito (de Broglie, 1928). Tuttavia, sotto la pressione della critica di Wolfgang Pauli, presto de Broglie abbandonò la sua teoria dell’onda pilota, a cui ritornò dopo più di due decenni, dopo che le sue idee furono riscoperte, estese e notevolmente raffinate da David Bohm.

Inoltre, nel 1926, in un articolo scritto subito dopo i lavori di Schrödinger, Max Born esplorò le conseguenze di questa congettura (Born, 1926). Born considerò l’ipotesi che la funzione d’onda potesse essere un campo guida per il movimento degli elettroni e, in conseguenza di questa ipotesi, egli arrivò sia alla sua interpretazione statistica della funzione d’onda sia alla creazione della teoria quantistica della diffusione. Born non specificò esplicitamente una legge guida, ma suppose che la funzione d’onda dovesse determinare soltanto statisticamente il movimento dell’elettrone e che una dinamica deterministica fosse impossibile. Come de Broglie, anche Born abbandonò rapidamente l’ipotesi del campo guida, soprattutto a causa del giudizio estremamente negativo di Werner Heisenberg, che insisteva sul fatto che le teorie fisiche devono essere formulate direttamente in termini di quantità osservabili, come le linee spettrali e le intensità, piuttosto che in termini di traiettorie microscopiche.

L’ipotesi del campo guida fu ripresa da David Bohm che riscoprì in maniera indipendente la teoria d’onda pilota di de Broglie e mostrò come il formalismo quantistico usuale potesse essere derivato dai principi di base della teoria di de Broglie. In questo modo, Bohm costruì la prima alternativa convincente alla formulazione prevalente di Copenhagen. I due lavori che Bohm pubblicò nel 1952 erano intitolati “A suggested Interpretation of Quantum Theory in Terms of Hidden Variables”, cioè una proposta di interpretazione della teoria quantistica in termini di quelle “variabili nascoste” che, secondo la vulgata allora corrente (e purtroppo ancora oggi in voga), von Neumann aveva “dimostrato” essere impossibili.

Nell'introduzione al primo di questi due lavori Bohm scrive: "La maggior parte dei fisici ha ritenuto che le obiezioni come quelle sollevate da Einstein non sono rilevanti, in primo luogo, perché la forma presente della meccanica quantistica con la sua interpretazione probabilistica usuale è in accordo eccellente con una vasta gamma di esperimenti, per lo meno nel dominio delle distanze maggiori di 10^{13} centimetri, e, in secondo luogo, perché non è stata ancora proposta alcuna interpretazione alternativa consistente. Lo scopo di questo articolo ... è, tuttavia, una tale interpretazione alternativa. In contrasto con l'interpretazione usuale, questa interpretazione alternativa permette di concepire che ciascun sistema individuale sia in uno stato precisamente definibile, i cui cambiamenti nel tempo sono determinati da leggi definite, analoghe (ma non identiche) alle equazioni classiche del moto. Le probabilità quantistiche sono considerate (come le loro controparti in meccanica statistica classica) soltanto come una necessità pratica e non come una manifestazione dell'assenza in linea di principio di una determinazione completa nelle proprietà della materia al livello quantistico."

La meccanica bohmiana fornisce dunque una possibile descrizione della realtà quantistica che sta dietro le regole di calcolo del formalismo quantistico convenzionale. Questa teoria ha un'*ontologia di particelle*, e descrive un sistema di particelle in parte mediante la sua funzione dell'onda che evolve, come di consueto, secondo l'equazione di Schrödinger. Tuttavia, la funzione dell'onda fornisce soltanto una descrizione parziale del sistema. Questa descrizione è completata dalla specificazione delle posizioni effettive delle particelle, la cui evoluzione è regolata da una equazione di guida che stabilisce come le velocità delle particelle siano determinate dalla funzione dell'onda. Perciò, in meccanica bohmiana, il movimento delle particelle è in qualche modo "coreografato" dalla funzione d'onda. In particolare, quando una particella è soggetta all'esperimento delle due fenditure, la fenditura attraverso cui passa, e il punto d'arrivo sullo schermo, sono completamente determinati dalla sua posizione e dalla funzione d'onda iniziale. La meccanica bohmiana risolve tutti paradossi della meccanica quantistica, eliminando stranezze e misteri. Con una teoria di questo tipo, in cui la descrizione della situazione dopo una misura

comprende, in aggiunta alla funzione d'onda, per lo meno i valori delle variabili che registrano il risultato, non c'è alcun problema della misura. In meccanica bohiana gli indici degli apparati di misura hanno sempre una orientazione ben definita perché le particelle che formano l'indice di un apparato hanno sempre, secondo questa teoria, posizioni ben definite. Analogo discorso vale per lo stato di salute del gatto di Schrödinger.

In meccanica bohiana, la legge che regola il moto delle particelle nello spazio fisico rende manifesto l'effetto più drammatico della meccanica quantistica, la *non-località*: il fatto che eventi fisici possano reciprocamente influenzarsi più velocemente della velocità della luce, anche a distanze arbitrariamente grandi, senza che questa influenza reciproca sia mediata da campi fisici (come, ad esempio il campo elettromagnetico o quello gravitazionale) o da particelle (o energia o segnali) che possono in qualche modo “viaggiare” da un evento ad un altro. Lungi dall'essere un difetto, si tratta questo di un notevole pregio della teoria, in quanto, sulla base dell'analisi di Bell (1964) e degli esperimenti di Aspect & al. (1981), la non località è una legge di natura. Si potrebbe dire che la meccanica bohiana non fa altro che ereditare e rendere esplicito il carattere non locale implicito nella nozione, comune a tutte le formulazioni ed interpretazioni della meccanica quantistica, di una funzione dell'onda sullo *spazio delle configurazioni*. A questo riguardo, ricordiamo che la *configurazione* di un sistema di particelle è l'insieme ordinato dei punti nello spazio fisico occupati dalle particelle, e che lo spazio delle configurazioni è la totalità di tutti i possibili insiemi di questo tipo.⁵

3. Il significato della funzione d'onda e la freccia di Zenone

Per comprendere meglio il *significato* della funzione d'onda in meccanica bohiana, un confronto con il campo metrico può essere utile. Un campo metrico su uno spazio determina un sistema di possibili relazioni geometriche tra tutti i punti dello spazio, relazioni che assumono significato

⁵ Un insieme ordinato di punti è matematicamente rappresentato dalla nozione di *vettore*: l'ordine rende i punti *distinguibili*, associando ad essi come etichetta il loro numero d'ordine: il primo punto rappresenta la posizione nello spazio della particella “1”, il secondo quella della particella “2”, e così via.

fisico quando i punti sono “occupati” da oggetti fisici (ad esempio, in uno spazio euclideo con tre oggetti, il campo metrico determina le distanze relative tra gli oggetti e le relazioni angolari tra di loro). Poiché la funzione d’onda associa un valore numerico ad ogni insieme ordinato di punti nello spazio, anch’essa determina un sistema di relazioni tra questi punti. Ma di che tipo di relazioni si tratta?

Quando l’insieme dei punti rappresenta le posizioni effettive delle particelle, tutte le proprietà cinematiche delle particelle, (le loro velocità, assolute e relative, le loro accelerazioni, assolute e relative, etc.) risultano fissate dalla funzione d’onda. La funzione d’onda determina pertanto le relazioni che correlano le proprietà cinematiche delle particelle con le loro posizioni: secondo la legge di guida, la velocità di ciascuna particella è una funzione delle posizioni di tutte le particelle. A differenza delle relazioni metriche usuali, queste relazioni “cinematiche” variano nel corso del tempo, perché nel corso del tempo varia la funzione d’onda; ciò nondimeno, specialmente alla luce della lezione della relatività generale secondo cui il campo metrico è un ente dinamico, questa differenza sembra poco significativa. Ben più significativa è la natura locale/non-locale delle relazioni: le relazioni metriche sono *locali*, essendo determinate da un campo locale (il tensore metrico), mentre le relazioni cinematiche della meccanica bohmiiana sono *non-locali*, essendo determinate dalla funzione d’onda sullo spazio delle configurazioni.

La meccanica bohmiiana fornisce pertanto una *nuova* teoria del movimento, una teoria basata su concetti profondamente diversi da quelli classici, quali “forza”, “azione per contatto”, “spingere e tirare” (“push & pull”). Questa novità suggerisce nuove strade per la fisica. Particolarmente interessante è la prospettiva di un’unificazione delle relazioni cinematiche e geometriche in un solo schema concettuale, una sorta di “geometro-dinamica quantistica non-locale” (per un primo passo in questa direzione, si veda la sezione 4 di Tumulka, 2007). Ma questa novità ci permette anche di riconsiderare, da una diversa prospettiva, un problema filosofico molto antico.

Zenone di Elea riteneva che, nonostante le apparenze, il movimento non fosse possibile: la freccia, ad ogni istante di tempo, è ferma in una data regione di spazio, e questa condizione, ad

esempio espressa da una “fotografia” istantanea, non contiene alcun germe del cambiamento successivo di posizione — perché la freccia dovrebbe dunque cambiare posizione? Solitamente, si ritiene che con l’avvento della moderna analisi matematica e la teoria dell’infinito attuale di Cantor sia stato possibile risolvere questo paradosso (si veda, ad esempio, Russell 1975, p.149). Bohm era di diverso avviso (Bohm, 1980, p. 202) e recentemente sono state espresse critiche analoghe ed evidenziati gli svantaggi delle soluzioni tradizionali (Arntzenius, 2000).

Nella misura in cui si ritiene che le soluzioni tradizionali del paradosso di Zenone lascino qualcosa di irrisolto, si dovrebbe forse apprezzare ancor di più la teoria bohiana del movimento. Con una teoria del movimento in cui la “fotografia” istantanea di un insieme di oggetti in movimento include anche la funzione d’onda, l’argomento originale di Zenone sembra perdere molto della sua forza originaria. A differenza della teoria classica del movimento, in cui le velocità risultano determinate soltanto dal confronto di due “fotografie” in rapida successione, in meccanica bohiana esse sono determinate da *una sola* fotografia, cioè, uscendo di metafora, da un’ontologia di particelle e funzione d’onda, entrambe *oggettive e reali* ad ogni istante di tempo, con la funzione d’onda che racchiude, ad ogni istante di tempo, il germe del movimento successivo degli oggetti. Questa immagine si preserva anche nel limite newtoniano della teoria e quindi si estende anche ad oggetti macroscopici che, come la freccia di Zenone, si muovono in accordo con le leggi newtoniane del movimento.⁶ Diceva Bell (1987, p.128): “Nessuno può comprendere questa teoria finché non è disposto a considerare [la funzione d’onda] come un campo oggettivo e reale anziché soltanto ‘un’ampiezza di probabilità’. Anche se si propaga non nello spazio tridimensionale, ma nello spazio 3N-dimensionale [delle configurazioni].”

Al riguardo, un’avvertenza: all’innegabile uguaglianza dei “diritti ontologici” di particelle e funzione d’onda fa da controcanto una disuguaglianza di ruolo: la funzione d’onda, stabilendo le relazioni cinematiche istantanee e come queste cambiano nel tempo, determina le leggi del moto

⁶ Nel limite classico non si preserva tutta la funzione d’onda, ma soltanto la sua componente più rilevante che genera le velocità delle particelle, e che nel limite classico diventa l’azione di Jacobi. Per maggiori dettagli si veda Allori & al. (2002).

delle particelle e ha dunque un carattere “nomologico” (Allori & al., 2006); le particelle hanno invece un carattere “primitivo” (in senso semantico): senza il riferimento alle particelle, la nozione stessa di funzione d’onda, come funzione delle possibili posizioni delle particelle, perderebbe senso.

4. Tipicità e incertezza assoluta

Come abbiamo ricordato in precedenza, il carattere statistico della teoria quantistica fu, per la prima volta, pienamente riconosciuto nel 1926 da Max Born, poco dopo che Schrödinger scoprì la sua famosa equazione. Born postulò che la configurazione di un sistema di particelle fosse casuale, con distribuzione di probabilità data dal modulo quadrato della loro funzione d’onda. Questa distribuzione, la distribuzione di Born, assume un rilievo particolare in meccanica bohmliana. Come conseguenza elementare dell’equazione di Schrödinger e dell’equazione di guida, si ha che se la configurazione di un sistema è casuale, con distribuzione di Born ad un qualche tempo, allora questo sarà vero anche per qualunque altro tempo. Questa proprietà della dinamica bohmliana, che è stata chiamata *equivarianza* (Dürr & al., 1992), permette di dimostrare che un universo bohmliano, benché deterministico, evolve in maniera tale che un’apparenza di casualità emerge, precisamente come descritto dal formalismo quantistico (Dürr & al., 1992, 2004a). L’ingrediente cruciale per comprendere lo stato e il ruolo di tale descrizione statistica è la nozione di *tipicità*, una nozione fondamentale in meccanica statistica.⁷ Quindi, con la meccanica bohmliana, la descrizione statistica nella teoria quantistica assume, come era già stato anticipato da Einstein (1979, p. 215), “una posizione approssimativamente analoga a quella della meccanica statistica nell’ambito della meccanica classica.”

Si può inoltre dimostrare che in un universo regolato dalla meccanica bohmliana ci sono limitazioni precise e irriducibili per quel che riguarda la possibilità di ottenere conoscenza, limitazioni che non possono essere diminuite in nessun modo mediante il progresso tecnologico

⁷ Per una introduzione elementare alla nozione di tipicità e al suo ruolo nell’analisi classica di Boltzmann, si veda il capitolo 2 in Allori & al. (2005).

degli strumenti di osservazione e misura. Questa incertezza è assoluta ed è in preciso accordo con il principio di indeterminazione di Heisenberg.⁸

5. Campi quantistici e ontologia di particelle

A partire dal 1952 la teoria di Bohm è stata investigata e sviluppata: degni di nota sono la chiarificazione degli assiomi della teoria fatta da Bell (1987), l'analisi delle probabilità e del ruolo della tipicità (Dürr & al., 1992, 2004a), le ricerche sul non-equilibrio quantistico (Valentini, 2002), e l'estensione della teoria alle particelle identiche, cioè a bosoni e fermioni (Bacciagaluppi, 2003, Goldstein & al., 2005, Dürr & al. 2007). Sono stati inoltre proposti diversi modi di estendere la meccanica bohmiana alla teoria quantistica dei campi.

Uno di questi (Bohm, 1952, Part II), per i bosoni (cioè per i campi quantistici di forza), è basato su campi nello spazio fisico tridimensionale che sono guidati da un funzionale d'onda secondo un analogo infinito-dimensionale dell'equazione di guida. L'altra proposta (Dürr & al. 2004b) trae spunto da un lavoro di Bell (1987, p. 173) e assegna traiettorie agli elettroni e a qualunque sorta di particelle che intervengono in una data teoria quantistica di campo. In contrasto con la meccanica bohmiana originale, questa seconda proposta comporta una dinamica secondo cui le particelle possono essere create e distrutte. Ma i processi di creazione e distruzione di particelle (ad esempio, l'annichilazione di un elettrone e di un positrone) sono eventi intrinsecamente stocastici, mentre la meccanica bohmiana fornisce una descrizione completamente deterministica dell'evoluzione della configurazione di un insieme di particelle. Come è possibile combinare questi due aspetti in un unico schema dinamico?

In generale, la maniera più semplice di combinare un'evoluzione deterministica con una stocastica è quella di immaginare che l'evoluzione deterministica avvenga per un certo tempo indisturbata, e poi, a un istante di tempo casuale, sia interrotta da quella stocastica, dopo di che

⁸ Per una discussione non tecnica di questo punto, si veda il capitolo 3 in Allori & al (2005), per una discussione più approfondita il riferimento obbligato è il lavoro originale di Dürr & al. (1992).

riprende il sopravvento quella deterministica e così via. E questa è proprio la strada che è stata seguita da Dürr & al. (2004b) per costruire una dinamica a numero variabile di particelle.

La dinamica così costruita ha luogo in uno spazio delle configurazioni a numero variabile di particelle ed è matematicamente descritta da un processo stocastico a salti di tipo markoviano. Secondo questa dinamica, le traiettorie delle particelle sono “pezzi” di traiettorie bohmiane, con numeri diversi di particelle, “incollati” tra loro da leggi stocastiche (in accordo con le probabilità di variazione del numero di particelle predette dalla teoria quantistica dei campi). Come per la meccanica bohmiana convenzionale, il movimento della configurazione è guidato, sebbene adesso in maniera stocastica, dalla funzione d’onda (che adesso non è più una funzione sullo spazio delle configurazioni, ma un elemento dello spazio di Fock). La dinamica (analogamente alla dinamica bohmiana convenzionale) è *equivariante*, ed è quindi possibile dimostrare che la teoria risulta (analogamente alla meccanica bohmiana convenzionale) in accordo con le previsioni probabilistiche della teoria quantistica dei campi (Dürr & al., 2005).

In margine, è interessante osservare che, sebbene la teoria si basi su un’*ontologia di particelle*, gli operatori quantistici di campo svolgono un ruolo molto importante nella sua costruzione: quello di fornire una ben definita relazione tra eventi spazio-temporali e le funzioni d’onda “astratte” della teoria quantistica dei campi; sono, per così dire, proprio ciò che “il dottore ha prescritto” per la costruzione efficiente di una teoria che descrive la creazione, il movimento e la distruzione di particelle.

6. La proposta di Ghirardi, Rimini e Weber

Nelle prime pagine di questo articolo abbiamo detto che non solo la meccanica bohmiana, ma anche la teoria GRW può essere vista come una realizzazione dell’intuizione di Einstein che la funzione d’onda non fornisce una rappresentazione completa della realtà fisica e della sua idea che una teoria più completa è possibile. È giunto il tempo di chiarire il senso questa affermazione.

La proposta originaria di Ghirardi, Rimini e Weber (1986) rende conto in maniera esatta e non ambigua (cioè indipendentemente dall'intervento di un osservatore esterno) di quando e come il collasso della funzione d'onda prende il sopravvento sull'evoluzione di Schrödinger. Ma il collasso della funzione d'onda è un fenomeno casuale, mentre l'evoluzione di Schrödinger è deterministica; come è possibile combinare queste due evoluzioni in un unico schema dinamico? La soluzione adottata dalla teoria GRW è, da un punto di vista strettamente matematico, analoga a quella che abbiamo discusso poc'anzi nel caso dell'ontologia di particelle per la teoria quantistica dei campi.

Secondo la teoria GRW, l'evoluzione di Schrödinger della funzione d'onda avviene per un certo tempo indisturbata, e poi, con una data frequenza media, subisce un "salto" casuale, dopo di che riprende suo corso, e così via. Nella formulazione originaria della teoria GRW, questo "salto" corrisponde a moltiplicare la funzione d'onda per una "funzione di localizzazione" (ad esempio, una gaussiana) centrata in un punto dello spazio fisico. La funzione di localizzazione è caratterizzata da una ben definita lunghezza di localizzazione che misura le dimensioni lineari del suo supporto spaziale (lo scarto quadratico medio della gaussiana), e il punto dello spazio fisico in cui è centrata risulta determinato soltanto probabilisticamente dalla funzione d'onda prima del "salto". Sia la frequenza media dei salti che la lunghezza di localizzazione sono da ritenersi nuove costanti di natura (perlomeno nella formulazione GRW originaria). I valori numerici di queste due costanti risultano fissati, con un certo margine di variabilità, dal requisito che la teoria sia in accordo con i dati sperimentali. La teoria così definita risulta quindi, nei limiti della precisione sperimentale presente, in accordo con la teoria quantistica ortodossa (nella misura in cui le sue previsioni sperimentali sono non ambigue). Tuttavia la teoria GRW prevede che, su una ben definita scala spaziale ed energetica, l'interferenza quantistica sia soppressa; si tratta di una previsione genuina della teoria che la rende falsificabile sperimentalmente.

La caratteristica più importante della teoria GRW è che se ad un qualche istante di tempo la funzione d'onda di un sistema macroscopico è sovrapposizione di due funzioni d'onda, ciascuna

delle quali ha supporto in configurazioni macroscopicamente distinte (ad esempio, una ha supporto nelle configurazioni atomiche corrispondenti al gatto vivo e l'altra in quelle corrispondenti al gatto morto), allora, in poco meno di un decimillesimo di secondo e con probabilità prossima a uno, si realizza spontaneamente almeno un evento di localizzazione che fa precipitare la sovrapposizione macroscopica in uno dei due termini che la compongono. In altre parole, senza l'intervento di alcun osservatore esterno, ma solo in virtù della struttura dinamica della teoria GRW, la sovrapposizione macroscopica si trasforma spontaneamente in una delle funzioni d'onda di cui è sovrapposizione. E questo avviene in accordo con le probabilità predette dalla meccanica quantistica ortodossa, a meno di piccolissime correzioni che risultano di gran lunga sotto la portata di un qualunque strumento di misura.

La funzione d'onda nella teoria GRW sembrerebbe dunque fornire una descrizione completa dei sistemi fisici. Ma è davvero così? Possiamo davvero concludere, unicamente sulla base del fatto che i sistemi macroscopici sono praticamente sempre descritti dalle corrette funzioni d'onda (quelle che si otterrebbero nella formulazione ortodossa facendo collassare la funzione d'onda in conseguenza di una osservazione) che la teoria GRW fornisca una soluzione davvero soddisfacente del paradosso del gatto? Riteniamo di no, e non per amore dei cavilli filosofici, ma perché pensiamo dietro l'apparente soluzione ci sia una difficoltà molto seria che la seduzione del linguaggio tende a nascondere e a oscurare.

Il punto cruciale è il seguente: sebbene nella teoria GRW si parli di *configurazioni*, la configurazione di un sistema non rappresenta, in questa teoria, l'insieme (ordinato) delle posizioni delle particelle nello spazio fisico che costituiscono il sistema, come invece accade in meccanica bohmiana o in meccanica classica. Il linguaggio particellare è del tutto improprio per questa teoria e una soluzione del problema del gatto che ne utilizzi in maniera determinante le risorse è del tutto fuorviante. Se nella teoria GRW la funzione d'onda del gatto rapidamente evolve in uno dei due termini della sovrapposizione, ad esempio quello corrispondente al "gatto morto", l'unica conclusione che possiamo trarre è che la funzione d'onda del gatto ha supporto sulle configurazioni

che la meccanica quantistica ortodossa o la meccanica bohiana assegnerebbero allo stato di gatto morto. Una conclusione più forte, riguardante lo stato *effettivo* del gatto, sarebbe soltanto una *petitio principii*: in questa teoria il gatto non è un agglomerato di particelle, perché in questa teoria non ci sono particelle, ma soltanto funzioni d'onda sullo spazio delle configurazioni.

7. Quanto “astratto” può essere lo spazio fisico “concreto”?

Per comprendere l'obiezione che stiamo sollevando è importante avere chiaro che nella teoria GRW lo spazio delle configurazioni ha un significato non convenzionale. Con questo intendiamo che non esiste alcun principio secondo cui la configurazione di un sistema rappresenta *davvero* l'insieme (ordinato) delle posizioni delle particelle nello spazio fisico: in questa teoria non ci sono posizioni nello spazio con cui costruire la configurazione di un sistema, perché, tanto per incominciare, non ci sono particelle! Rappresentare la configurazione di un sistema come un insieme di punti nello spazio fisico non ha, in questa teoria, più valore oggettivo di quanto ne abbia in fisica classica la scelta di coordinate cartesiane, cilindriche o sferiche per rappresentare il movimento di un punto nello spazio euclideo, o la scelta di un sistema di coordinate in relatività generale. Tale rappresentazione (e la conseguente struttura dello spazio delle configurazioni come prodotto di copie dello spazio fisico tridimensionale) risulta invece fissata in meccanica bohiana e in meccanica classica, perché in meccanica bohiana e in meccanica classica la nozione di punti materiali che si muovono nello spazio euclideo tridimensionale è una nozione *primitiva*: la meccanica bohiana e la meccanica classica sono teorie di particelle, descritte ad ogni istante dalle loro posizioni nello spazio fisico tridimensionale. Al contrario, ciò che è primitivo nella teoria GRW è la funzione d'onda. Come uscire dall'impasse?

Forse si potrebbe ingoiare il rospo e assumere che sia lo spazio delle configurazioni, *non strutturato in prodotto di spazi tridimensionali*, il “vero” spazio fisico, con la funzione d'onda che rappresenta la realtà fisica in maniera del tutto analoga alla rappresentazione fornita da un campo classico sullo spazio fisico tridimensionale. Si tratterebbe di una rappresentazione della realtà ben

poco intuitiva e molto astratta (lo spazio fisico dell'universo avrebbe una dimensione elevatissima, dell'ordine di 10^{80}) ma, come diceva Schrödinger a proposito della funzione d'onda nel già citato "articolo del gatto": "che la funzione d'onda sia un costrutto matematico non intuitivo e astratto è uno scrupolo che viene sempre fuori verso nuovi strumenti di pensiero e non reca con sé un grande messaggio (Schrödinger,1935)." Inoltre, la fisica moderna ci abituato ad un progressivo allontanamento dallo spazio del senso comune, prima con lo spazio-tempo quadridimensionale della teoria della relatività e poi con gli spazi decadimensionali delle teorie di supercorda. Infine, una proposta di questo tipo è stata, in effetti, recentemente portata avanti e difesa (Albert 1996). Tuttavia, molte sono le critiche che sono state avanzate verso questa proposta; si veda, ad esempio, Monton (2002), Allori & al. (2006) e Allori (2007). Qui ci limiteremo ad una rapida ricapitolazione dei punti salienti.

In primo luogo, osserviamo che in una rappresentazione della realtà di questo tipo verrebbero meno i presupposti stessi del problema della misura: non sarebbe più neanche chiaro che cosa significhi per un indice di un apparato di misura puntare in una certa direzione dello spazio fisico. Per questa ragione riteniamo che la teoria GRW, vista come una teoria della funzione d'onda sullo spazio astratto delle configurazioni, non possa fornire alcuna soluzione davvero soddisfacente al problema della misura. Ma non solo: per una interpretazione di questo tipo molte di quelle che sono ritenute le innovazioni concettuali della meccanica quantistica verrebbero meno, a partire dalla non-località. In un teoria di questo tipo la possibilità stessa di parlare di località e non-località è fuori luogo. Infatti, per poter parlare di località si deve presupporre l'esistenza di un'arena, lo spazio-tempo, in cui gli eventi fisici accadono. L'argomento di non località di Bell (1964) non può implicare che una tale versione della meccanica quantistica sia non locale; l'argomento di Bell dà inoltre per scontato che le misure quantistiche abbiano risultati, per cui non si applica a qualunque versione della meccanica quantistica in cui questo non vale.

Infine, verso questa proposta e verso qualunque proposta di rappresentazione della realtà fisica che comporti un *gap* incolmabile con l'esperienza ordinaria, si può avanzare un argomento di

tipo trascendentale. Se, con Einstein, si ritiene che il fine della scienza sia, da un lato, la comprensione più completa possibile della connessione tra le esperienze sensoriali nella loro totalità, e dall'altra il raggiungimento di questo fine mediante l'uso di un numero minimo di relazioni e concetti e primitivi, risulta inconcepibile come tale obiettivo possa essere raggiunto postulando come concetto primitivo la nozione di funzione d'onda. Infatti, se da un lato la funzione d'onda permette di stabilire relazioni funzionali tra configurazioni, in assenza di una identificazione *univoca* delle configurazioni con insiemi di punti nello spazio tridimensionale, non si comprende come tali relazioni possano permettere di stabilire connessioni tra le esperienze sensoriali della realtà macroscopica dell'esperienza ordinaria fatta di gatti, tavoli e sedie che vivono nello spazio tridimensionale. Ci sembra che con questa interpretazione della teoria GRW ci si trovi di fronte ad un *gap* incolmabile tra i concetti connessi con le esperienze sensoriali e il sistema di concetti primitivi con cui si vuole descrivere la realtà, un divario per molti versi analogo al *gap* (epistemologico e/o ontologico) tra il mentale e il fisico (Chalmers, 1999).

Si osservi che il problema non è tanto nel carattere stravagante e bizzarro della rappresentazione della realtà fornita dalla funzione d'onda, quanto nella difficoltà di “collocare” in essa noi stessi e gli oggetti dell'esperienza ordinaria in quanto parte del mondo. Come era già stato osservato da Rudolf Carnap (1997), nella misura in cui la rappresentazione simbolica della fisica è assimilabile ad una mappa stradale, la mappa è utile se, *assumendo un punto di vista esterno alla mappa*, possiamo, per così dire, indicare un punto della mappa e dire: “siamo qui”. Un problema di “collocazione” già si presenta per la rappresentazione quadridimensionale della realtà fornita dalla teoria della relatività, ma una riflessione attenta di questo caso mostra che il problema può essere risolto, perlomeno per quanto riguarda la collocazione di noi stessi come oggetti puramente fisici.⁹ Tuttavia, il problema diventa insormontabile quando la possibilità di individuare noi stessi e gli oggetti dell'esperienza ordinaria è bloccata in partenza, come accade con la rappresentazione

⁹ Rimarrebbe irrisolto il problema di collocare in questa rappresentazione la nostra prospettiva soggettiva del mondo, che di certo non è quadridimensionale, ma, come ebbe a dire Einstein in una conversazione con Carnap (1963), occorre rassegnarsi al fatto che la nostra percezione soggettiva dello scorrere del tempo non può essere afferrata dalla fisica. Per questo aspetto del problema mente-corpo si veda anche Lockwood (1989).

della realtà basata solo sulla funzione d'onda e come accade, più in generale, quando i concetti primitivi della rappresentazione fisico-matematica della realtà sono troppo “astratti” — in un senso difficile da precisare, ma precisarne il senso significa avere già risolto parte del problema. Malgrado siano stati versati fiumi di inchiostro su questo (a partire dall'idealità di spazio e tempo di Kant e dal "principium individuationis" di Schopenhauer), rimane tuttora aperto, perlomeno in larga misura, il problema di comprendere quanto “astratta” possa essere la scelta dei concetti primitivi di una teoria fisica, senza che venga meno la possibilità di rappresentare, in termini di essi, la moltitudine dei concetti e degli enunciati più prossimi all'esperienza e senza che, al contempo, si cada nello strumentalismo (che resta, più o meno consciamente, e specialmente alla luce degli sviluppi molto astratti della fisica teorica contemporanea, un atteggiamento abbastanza diffuso tra i fisici). A nostro avviso, il maggiore avanzamento verso una soluzione di questo problema è ancora costituito dalle analisi che Einstein espone in *Fisica e Realtà* (Einstein, 1988). A questo proposito, ci sembrano inoltre rilevanti alcuni sviluppi recenti: gli strumenti dell'*analisi concettuale* sviluppati da Frank Jackson (2000), l'approfondimento della nozione di *spiegazione riduttiva* proposto da Chalmers & Jackson (2001) e la nozione di *ontologia primitiva* (Allori & al., 2006, Allori, 2007).

8. Un'ontologia di campo per la teoria GRW

C'è un modo molto semplice di uscire dall'impasse e di risolvere il problema filosofico che abbiamo appena discusso: assumere che anche nella teoria GRW, così come nella meccanica quantistica ortodossa, la funzione d'onda non fornisca una descrizione completa dei sistemi fisici e completare la teoria con variabili che descrivono strutture che vivono nello spazio tridimensionale o, più in generale, nello spazio-tempo. Questa è la strada che è stata seguita da Gian Carlo Ghirardi.

Ghirardi ha proposto che la nozione davvero primitiva nella teoria GRW *non sia la funzione d'onda*, ma un *campo scalare* nello spazio-tempo *univocamente* determinato dalla funzione

d'onda.¹⁰ Si può dimostrare che su scala macroscopica questo campo può essere identificato con l'usuale densità di massa degli oggetti fisici e la descrizione che ne emerge, in termini di come la massa degli oggetti si distribuisce nello spazio fisico tridimensionale, risulta in completo accordo con la nostra esperienza quotidiana, e include gatti, apparati di misura ed eventi di scintillazione su un schermo. Ad esempio, secondo questa descrizione, il gatto non risulta essere un agglomerato di particelle, ma corrisponde ad una data configurazione del campo che, su scala macroscopica, ne disegna le sembianze familiari. In particolare, quando, per una qualche ragione, si produce una sovrapposizione della funzione d'onda negli stati di vita e di morte, avviene una pressoché immediata evoluzione del campo verso la particolare distribuzione di masse che corrisponde o allo stato di vita o a quello di morte (l'evoluzione è intrinsecamente stocastica con probabilità in accordo con quelle della meccanica quantistica).

L'immagine del mondo fisico che ne risulta, di un mondo continuo e non atomico, sebbene diversa da quella della meccanica bohmiana, e da quella suggerita dalle formulazioni convenzionali della meccanica quantistica, non comporta alcuna contraddizione con le previsioni della meccanica quantistica ortodossa (nei limiti della conoscenza sperimentale presente), ma risulta in accordo con tutti i fenomeni quantistici noti. Questa ontologia ricorda, per alcuni versi, l'interpretazione originale di Schrödinger della sua funzione d'onda in termini di densità continua di carica elettrica. Ma mentre Schrödinger fu costretto ad abbandonare la sua interpretazione originale, in conseguenza dello sparpagliamento della funzione d'onda, le modifiche non-lineari e stocastiche dell'equazione di Schrödinger della teoria GRW evitano queste difficoltà e rendono questa teoria completamente adeguata per una descrizione completa della realtà fisica.¹¹

Si può quindi ritenere che la teoria GRW sia una teoria del campo scalare nello stesso senso in cui la relatività generale classica è fondamentalmente una teoria del campo metrico o la meccanica bohmiana è una teoria di particelle in movimento nello spazio fisico. È interessante

¹⁰ Per maggiori dettagli al riguardo e per riferimenti alla letteratura originale raccomandiamo vivamente un saggio recente molto bello di Ghirardi (2007).

¹¹ Si veda Allori & al., 2006 per discussione più ampia di questo punto e per la proposta di una formulazione a "multi-mondi" dell'interpretazione originale di Schrödinger.

osservare che poiché qualunque cosa che c'è nel mondo, inclusi i tavoli, le sedie, i gatti e gli apparati di misura, risulta determinato da questo campo, la teoria GRW, così interpretata, viene a essere l'unico esempio noto di teoria che porti a compimento, in maniera soddisfacente, il programma di Einstein di una pura teoria di campo che renda conto anche dei fenomeni quantistici. Quando la teoria GRW è interpretata in questo modo, come una teoria basata su un'*ontologia di campo*, le obiezioni basate sul carattere astratto della funzione d'onda scompaiono.

Ma c'è un *caveat*: parlare di “interpretazione” è fuorviante: più che ad una “interpretazione”, ci troviamo di fronte ad una riformulazione vera e propria della teoria che, seguendo la terminologia introdotta in Allori & al. (2006), chiameremo teoria GRWm (con ‘m’ che sta per ‘massa’). In questa teoria, il ruolo della funzione d'onda (che evolve secondo le equazioni non-lineari e stocastiche della teoria GRW originaria) è completamente analogo al suo ruolo in meccanica bohmiana: governare l'evoluzione temporale delle variabili che descrivono l'ontologia “primitiva” della teoria, cioè le particelle in meccanica bohmiana e il campo scalare nella teoria GRWm. Come in meccanica bohmiana, anche nella teoria GRWm (e nella teoria GRWf a cui accenneremo tra breve), la distribuzione di Born e la nozione di *tipicità* giocano un ruolo molto importante nella descrizione statistica dei fenomeni fisici e nella derivazione delle previsioni probabilistiche della teoria. Per maggiori dettagli su quest'ultimo punto e per un confronto accurato tra meccanica bohmiana e teoria GRWm, si veda Allori & al. (2006).

9. Ontologia di lampi

Che non siano le leggi di evoluzione della funzione d'onda a determinare la teoria, ma quelle per l'ontologia primitiva, è suggerito dalla seguente osservazione: a partire dalle stesse equazioni per la funzione d'onda si possono immaginare scelte differenti delle variabili primitive e non c'è alcuna ragione a priori per ritenere che le conseguenze fisiche di queste scelte siano identiche; in generale, scelte differenti delle variabili primitive definiscono teorie differenti. In effetti, alcuni anni prima di Ghirardi, una scelta diverse per le variabili primitive era stata proposta da Bell (1987).

La proposta di Bell rende conto della struttura degli eventi nello spazio fisico tridimensionale in termini dei punti nello spazio tempo che corrispondono agli eventi di localizzazione della funzione d'onda. Secondo questa proposta, una storia del mondo consiste in un insieme discreto di eventi nello spazio-tempo. Sono questi eventi a costituire ciò che Bell chiamava le “beables” locali della teoria, e che noi chiameremo *lampi*. Seguendo la terminologia introdotta in Allori & al. (2006), chiameremo GRWf la teoria che ne risulta (“lampo” è “flash” in inglese). Questi *lampi* sono “le controparti matematiche nella teoria degli eventi reali che accadono in luoghi e tempi definiti nel mondo reale (a differenza delle molte costruzioni puramente matematiche che si presentano nel calcolare le conseguenze delle teorie fisiche, a differenza delle cose che possono essere reali ma non localizzate, e a differenza delle “osservabili” di altre formulazioni della meccanica quantistica, di cui qui non abbiamo bisogno.) Un pezzo di materia allora è una galassia di tali eventi (Bell, 1987, p. 204).”

L'importanza della scelta delle variabili primitive di una teoria si manifesta chiaramente quando si considerano le proprietà di simmetria della teoria.¹² Recentemente Roderich Tumulka (2006), ha costruito un modello relativistico della teoria GRWf, dimostrando l'invarianza della legge stocastica per la “galassia” di lampi nello spazio-tempo. Al contrario la teoria GRWm non è suscettibile di un'estensione relativistica di questo tipo (a meno che non si introducano variabili geometriche addizionali, come una foliazione dello spazio-tempo).

10. Teorie quantistiche senza osservatori

Vogliamo concludere con alcune considerazioni che riguardano la struttura comune di meccanica bohiana, GRWm e GRWf. Quando queste teorie sono analizzate attentamente, emerge una lezione filosofica molto importante: nella struttura di queste teorie si possono scorgere alcune caratteristiche molto generali che sono, in effetti, comuni a tutte le “teorie quantistiche senza l'osservatore”, cioè a tutte le formulazioni precise e serie della meccanica quantistica che non sono

¹² Per un'analisi approfondita di questo punto si veda Allori & al. (2006).

basate su nozioni vaghe e imprecise come “misura” o “osservatore”. Queste caratteristiche possono essere così riassunte:

1. La teoria è basata su un'ontologia chiara, *l'ontologia primitiva*, che descrive la materia nello spazio e nel tempo: le particelle in meccanica bohmiana (sia nella sua versione tradizionale che nella sua estensione alla teoria quantistica dei campi), la densità di massa nella teoria GRWm, i lampi nella teoria GWf.
2. C'è una funzione d'onda che evolve secondo l'equazione di Schrödinger in maniera esatta oppure, almeno per sistemi microscopici, in maniera soltanto approssimata (eventualmente con correzioni stocastiche e non-lineari).
3. La funzione d'onda governa (eventualmente in maniera stocastica) l'evoluzione temporale delle variabili che descrivono l'ontologia primitiva.
4. La teoria fornisce una nozione di storia tipica dell'universo, per esempio mediante una distribuzione di probabilità sullo spazio delle possibili storie dell'ontologia primitiva.
5. Le previsioni devono concordare (almeno approssimativamente) con quelle della teoria quantistica ortodossa (nella misura in cui quest'ultime sono non ambigue).

Queste caratteristiche sono comuni a tutte e tre le teorie, ma sono anche i *desiderata*, presumibilmente anche le condizioni necessarie, di una qualunque teoria quantistica senza osservatori.

Riferimenti bibliografici

D, Z. Albert (1996), *Elementary Quantum Metaphysics*, in “Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal”, a cura di J. Cushing, A. Fine, and S. Goldstein, pp.277–284. Dordrecht: Kluwer.

V. Allori (2007), *Fundamental physical theories: mathematical structures grounded on a primitive ontology*, Ph.D. thesis, Department of Philosophy, Rutgers University.

V. Allori, D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghì (2002), *Seven Steps Towards the Classical World*, Journal of Optics B 4, 482-488.

V. Allori, M. Dorato, F. Laudisa e N. Zanghì (2005), *La natura delle cose, introduzione ai fondamenti e alla filosofia della fisica*. Carocci, Roma.

- V. Allori, S. Goldstein, R. Tumulka, N. Zanghì (2006), *On the Common Structure of Bohmian Mechanics and the Ghirardi–Rimini–Weber Theory*, quant-ph/0603027.
- F. Arntzenius (2000), *Are There Really Instantaneous Velocities?*, *The Monist*, 83: 187-208
- A. Aspect, P. Grangier, G. Roger (1981) *Experimental Test of Realistic Local Theories via Bell's Theorem*, *Phys. Rev. Lett.* 47, 460– 463.
- G. Bacciagaluppi (2003), *Derivation of the symmetry postulates for identical particles. Pilot-Wave Theories*, quant-ph/0302099 e PITT-PHIL-SCI00000993.
- J. S. Bell (1964), *On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox*, *Physics* 1, 195–200.
- J. S. Bell (1987), *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- J. S. Bell (1990), *Against “measurement”*, *Physics World* 3, 33-40.
- D. Bohm (1952), *A Suggested Interpretation of Quantum Theory in Terms of “Hidden” Variables*, Parts I and II. *Physical Review* 85, 166–193.
- D. Bohm (1980), *Wholeness and the Implicate Order*, Routledge & Kegan Paul, London, Boston.
- M. Born (1926), *Quantenmechanik der Stoss vorgänge*, *Zeitschrift für Physik* 38, 803– 827.
- L. de Broglie (1928), in “Solvay Congress (1927), Electrons et Photons: Rapports et Discussions du Cinquieme Conseil de Physique tenu Bruxelles du 24 au 29 Octobre 1927 sous les Auspices de l’Institut International de Physique Solvay”, Paris, Gauthier-Villars.
- R. Carnap (1963), *Autobiography*. In “The Philosophy of Rudolf Carnap” (a cura di P.. Schilpp) Open Court.
- R. Carnap (1997), *La costruzione logica del mondo*, UTET, Torino.
- D. Chalmers (1999), *La mente cosciente*, McGraw-Hill, Milano.
- D. Chalmers, F. Jackson (2001), *Conceptual Analysis and Reductive Explanation*, *Philosophical Review*, 110, 315-61
- M. Daumer, D. Dürr, S. Goldstein, T. Maudlin, R. Tumulka e N. Zanghì (2006), *The Message of the Quantum?* p. 129-132 in “A. Bassi, D. Dürr, T. Weber and N. Zanghì, *Quantum Mechanics: Are there Quantum Jumps? and On the Present Status of Quantum Mechanics*”, AIP Conference Proceedings 844, American Institute of Physics.
- D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghì (1992), *Quantum Equilibrium and the Origin of Absolute Uncertainty*, *Journal of Statistical Physics* 67, 843–907.
- D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghì (2004a), *Quantum Equilibrium and the Role of Operators as Observables in Quantum Theory*, *Journal of Statistical Physics* 116, 959–1055.
- D. Dürr, S. Goldstein, R. Tumulka, N. Zanghì (2004b), *Bohmian Mechanics and Quantum Field Theory*. *Physical Review Letters* 93, 090402.
- D. Dürr, S. Goldstein, R. Tumulka, N. Zanghì (2005), *Quantum Hamiltonians and Stochastic Jumps*, *Communications in Mathematical Physics* 254, 129.
- D. Dürr, S. Goldstein, R. Tumulka, N. Zanghì (2007), *Quantum Mechanics in Multiply-Connected Space*, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* 40, 2997-3031.
- A. Einstein (1979), *Autobiografia Scientifica*, Boringhieri, Torino.
- A. Einstein (1988), *Fisica e realtà*, in “A. Einstein. Opere scelte (a cura di E. Bellone)”, Bollati Boringhieri, Torino.
- G. C. Ghirardi, A. Rimini, T. Weber (1986), *Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic*

Systems, Phys. Rev. D34, 470–491.

G. C. Ghirardi (2007), *Some reflections inspired by my research activity in quantum mechanics*, J. Phys. A: Math. Theor. 40, 2891–2917.

S. Goldstein, J. Taylor, R. Tumulka, N. Zanghì (2005), *Are all particles identical?* J. Phys. A: Math Gen. 38 1567–76.

F. Jackson (2000), *From Metaphysics to Ethics: A Defence of Conceptual Analysis*, Oxford University Press.

M. Lockwood (1989), *Mind, Brain and the Quantum*, Cambridge, MA: Basil Blackwell Ltd..

B. Monton (2002), *Wave Function Ontology*. Synthese 130: 265–277.

B. Russell (1975), *La conoscenza del mondo esterno*, Longanesi, Milano.

E. Schrödinger (1995), *The Interpretation of Quantum mechanics. Dublin seminars (1949-1955) and other unpublished essays*, a cura di M. Bitbol, OX BOW PRESS, Woodbridge.

E. Schrödinger (1935), *Die Gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*, Naturwissenschaften 23, 807-812.

R. Tumulka (2006), *A Relativistic Version of the Ghirardi–Rimini–Weber Model*, J. Statist. Phys. 125, 821-840.

R. Tumulka (2007), *The ‘unromantic pictures’ of quantum theory*, J. Phys. A: Math. Theor. 40, 3245–3273.

A. Valentini (2002), *Subquantum Information and Computation*, Pramana J. Phys. 59, 269–277.