

Chiarezza Ontologica e Meccanica Quantistica

Nino Zanghi

Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova
INFN – Sezione di Genova
Via Dodecaneso, 33
16146 Genova

SOMMARIO

Il filosofo americano Hilary Putnam ha recentemente sottolineato la difficoltà di utilizzare le ricette analitiche tradizionali per chiarire la struttura ontologica della meccanica quantistica. Scopo di questo articolo è delineare le ragioni di questa difficoltà e proporre un approccio differente che ha al suo centro la nozione di *esseribile* locale, avanzata qualche anno fa da John Bell. Questa proposta permette di comprendere diverse interpretazioni della meccanica quantistica come realizzazioni di una stessa struttura, chiarificando così questioni di accesso epistemico e di ontologia.

ABSTRACT

The American philosopher Hilary Putnam has recently stressed the difficulty of using the traditional analytic recipes to clarify the ontological structure of quantum mechanics. The purpose of this article is to sketch the reasons for this difficulty and to propose a different approach which has at its core the notion of local *beable*, put forward some years ago by John Bell. This proposal allows us to understand different interpretations of quantum mechanics as realizations of the same structure, thus clarifying issues concerning their epistemic access and their ontology.

§1. Ontologia

Ancora oggi, molti anni dopo che il sogno neo-positivista di eliminare la metafisica si è infranto, ci sono scienziati e filosofi di tradizione empirista che hanno un moto di

stizza quando si parla di ontologia o di metafisica. Si tratta forse di un riflesso condizionato, una sorta di carattere culturale acquisito prodotto dall'ideologia che ha accompagnato la nascita e lo sviluppo della scienza moderna.

Non tutti però hanno avuto timore della metafisica, neanche in quegli anni in cui il sogno neo-positivista dominava ancora la scena. Agli inizi degli anni Quaranta, in un saggio in onore di Bertrand Russell, Albert Einstein scrisse:

Con la sua critica molto chiara, Hume non solo permise alla filosofia di avanzare in una maniera decisiva, ma anche – sebbene non per sua colpa – creò un pericolo per la filosofia, nel senso che, seguendo la sua critica, emerse una fatidica “paura della metafisica” che è diventata la malattia della filosofia empirista contemporanea. [10]

E in una lettera a Schrödinger, datata 1935, Einstein scriveva: «la vera difficoltà sta nel fatto che la fisica è un tipo di metafisica; la fisica descrive “la realtà”. Ma noi non sappiamo cosa sia “la realtà”, se non attraverso la descrizione fisica che ne diamo di essa».

La paura della metafisica ha avuto – e ha ancora – conseguenze disastrose nel limitare la portata conoscitiva di quelle costruzioni teoriche della fisica che fanno riferimento a enti non osservabili, anche se, come osservava John Bell: «Ammettere l'esistenza d'entità non visibili alle creature grossolane che noi siamo è, a mio parere, mostrare una decorosa umiltà, e non piuttosto una deplorable dipendenza dalla metafisica» ([5], p. 202).

In tempi recenti, il filosofo Willard Van Orman Quine ha contribuito notevolmente a dissipare la diffidenza verso questioni ontologiche. Secondo Quine, l'oggetto di

un'ontologia che sia in sintonia con i cardini della sensibilità filosofica contemporanea – in particolare, fallibilismo e naturalismo – non è tanto ciò che esiste *in astratto*, quanto ciò che le nostre migliori teorie scientifiche sostengono che esista. A tal fine, Quine consiglia di analizzare la struttura logica di tali teorie e determinare così quali sono le entità nel campo di variabilità dei loro quantificatori esistenziali.

Hilary Putnam ha recentemente posto l'accento sul fatto che il consiglio di Quine, per quanto possa sembrare apparentemente semplice e ovvio, è, tuttavia, di scarsa utilità per chiarire la struttura ontologica della meccanica quantistica [15]. Scopo di quest'articolo è tracciare – anche se solo sommariamente – le ragioni di questa difficoltà e suggerire un approccio differente.

§2. Monismo e Pluralismo Ontologico in Meccanica Quantistica

Per Putnam il nocciolo della questione è riassunto da un aforisma molto efficace: «standard quantum mechanics does not bear its ontology on its sleeve» [15]. Se si vuole comprenderne il senso e convincersi che davvero la meccanica quantistica non ha un'ontologia “in bella mostra sulle sue maniche” – è utile, in primo luogo, fare il punto sul cosiddetto *problema della misura*.

Secondo il formalismo quantistico, le misure eseguite su un sistema quantistico, con una data funzione d'onda, tipicamente portano a risultati casuali, ma la specificazione della funzione d'onda del sistema composto, comprendente l'apparato per eseguire misure di questo genere, non ne diminuisce la casualità.

La dinamica quantistica, che governa l'evoluzione della funzione d'onda, almeno quando non sono eseguite misure – e data, ad esempio, dall'equazione di Schrödinger – è completamente deterministica. Pertanto, nella misura in cui quei processi fisici particolari, che noi chiamiamo misure, sono regolati dalle medesime leggi fisiche fondamentali che governano tutti gli altri processi, si è naturalmente portati a formulare l'ipotesi che l'origine della casualità nei risultati delle misure quantistiche consista in condizioni iniziali casuali, ovvero nella nostra ignoranza della descrizione completa del sistema d'interesse, inclusa quella dell'apparato di misura, di cui si conosce al più solo la funzione d'onda.

Tuttavia, in base alla teoria quantistica ortodossa – e anche a molte interpretazioni non ortodosse – la descrizione completa di un sistema è fornita solamente dalla sua funzione d'onda, e non vi è proprietà del sistema, oltre alla sua funzione d'onda, che possa rendere conto della casualità quantistica osservata. Si è sovente sostenuto, sulla base dell'autorità di von Neumann, che tali proprietà, le cosiddette *variabili nascoste*, sono impossibili e che, come fatto di matematica, la media sull'ignoranza non può riprodurre previsioni compatibili con quelle del formalismo quantistico. Quest'affermazione è comune ancora adesso, nonostante che da più di mezzo secolo esista un contro-esempio ampiamente discusso, la teoria quantistica di David Bohm [6], su cui ritorneremo tra poco.

La convinzione diffusa è che la funzione d'onda fornisca una descrizione completa di un sistema quantistico. Non c'è dubbio che questa sia una possibilità attraente: *a parità di condizioni*, il monismo ontologico – la concezione secondo cui vi è un solo tipo di

realtà – è forse più affascinante del pluralismo ontologico. Ma il problema dell'origine della casualità quantistica già suggerisce che *non vi è parità di condizioni*.

Il monismo della funzione d'onda soffre di un altro grave difetto, a cui il problema della casualità è strettamente collegato. L'evoluzione di Schrödinger tende a produrre una diffusione sullo spazio delle configurazioni, sicché la funzione d'onda iniziale di un sistema macroscopico tipicamente evolve in una funzione che ha nel suo dominio configurazioni macroscopiche distinte, e di gran lunga diverse tra loro – una sovrapposizione macroscopica grottesca anche se la funzione d'onda è inizialmente piuttosto banale. Questo è esattamente ciò che accade nel processo di misura, nel corso del quale la funzione d'onda, che descrive il processo stesso, diventa una sovrapposizione di componenti che corrispondono alle varie letture dell'apparato a cui il formalismo quantistico assegna probabilità non nulle.

La difficoltà di questa concezione, di un mondo completamente descritto da tali funzioni d'onda esotiche, non è tanto che sia stravagante e bizzarro, ma piuttosto che questa concezione – o meglio la *nostra collocazione* in tale concezione, oltre a quella degli eventi casuali che si suppone siano regolati dal formalismo quantistico – è molto oscura.

Quanto è stato detto sinora è volto a sostenere non tanto l'impossibilità del monismo ontologico della funzione d'onda, quanto la sua *incompatibilità* con l'evoluzione di Schrödinger. In verità, il fascino del monismo della funzione d'onda è stato così forte che molte interpretazioni della meccanica quantistica comportano di fatto l'abrogazione di tale equazione. Questa abrogazione è spesso solamente implicita in alcune interpretazioni e, per la verità, a volte presentata come se fosse compatibile con la dinamica quantistica.

Questo è il caso, per esempio, di quando i postulati della misura, incluso il postulato del *collasso della funzione d'onda*, sono semplicemente combinati con l'equazione di Schrödinger nella formulazione della teoria quantistica della misura. Il *problema della misura* è solo un'espressione di questa incoerenza.

Ci sono state proposte più o meno recenti che hanno suggerito esplicitamente che l'evoluzione quantistica non sia da ritenersi di validità universale e che in condizioni opportune, comprendenti quelle che prevalgono durante i processi di misura, non valga l'equazione di Schrödinger. Un tratto comune di queste proposte è che la dinamica quantistica dovrebbe essere sostituita da una sorta di modifica non lineare (eventualmente non deterministica), di cui, a livello microscopico, l'evoluzione di Schrödinger è un'approssimazione molto buona. Una delle proposte più concrete in questo senso è quella di Gian Carlo Ghirardi, Alberto Rimini, e Tullio Weber, detta GRW [12]. Tale teoria modifica l'equazione di Schrödinger con l'inserimento di un "salto quantico" casuale e spontaneo della funzione d'onda ad un'altra che è localizzata macroscopicamente.

Ma il monismo della funzione d'onda è davvero così convincente che dobbiamo lottare per conservarlo di fronte alle difficoltà formidabili che esso comporta? Certamente no! In realtà, anche in assenza di tali difficoltà, e a parità delle altre condizioni, ci sono argomenti validi a favore della superiorità del pluralismo ontologico.

§3. Dualismo Ontologico

Nel corso dello sviluppo della fisica (per lo meno prima dell'avvento della meccanica quantistica), quando nuove entità teoriche astratte sono state introdotte in una

teoria, la loro rilevanza fisica, il loro stesso *significato*, nella misura in cui riguarda la fisica, è stato derivato dal loro ruolo dinamico nel governare l'evoluzione temporale di entità o variabili dinamiche più primitive – più familiari e meno astratte. Ad esempio, nell'elettrodinamica classica il significato del campo elettromagnetico deriva solamente dall'equazione della forza di Lorentz, cioè dal ruolo del campo nel governare l'evoluzione delle posizioni delle particelle cariche, con la specificazione delle forze, agenti su queste particelle, a cui il campo dà origine; mentre nella relatività generale una simile considerazione può essere fatta per il tensore metrico gravitazionale.

Che le cose siano andate così è piuttosto ovvio: perché, in primo luogo, si sarebbero introdotte queste entità teoriche astratte, se non per la loro rilevanza per il comportamento di *qualcos'altro*, che, in qualche modo, ha già significato fisico? In verità, forse si dovrebbe ritenere sorprendente che la funzione d'onda non sia stata introdotta in questo modo – in quanto si tratta di un campo sullo spazio delle configurazioni, piuttosto che sullo spazio fisico, la funzione d'onda è forse un'entità teorica ancora più astratta del campo elettromagnetico. Ma, in realtà, è stata proprio introdotta così!

Il concetto di funzione d'onda è nato nel 1924 con de Louis de Broglie, che, incuriosito dall'idea di Einstein del *Gespensterfeld*, propose che così come le onde elettromagnetiche sono in qualche modo associate con particelle (i fotoni), anche le particelle materiali, in particolare gli elettroni, dovessero essere associate con campi d'onda. De Broglie concepì queste onde come *onde-pilota*, che governano in qualche modo il movimento delle particelle, un modo che egli rese esplicito solo più tardi, alla fine degli anni Venti. In conseguenza di una serie di critiche mossegli da Wolfgang Pauli alla conferenza Solvay del 1927, de Broglie abbandonò presto la sua teoria delle onde

pilota, soltanto per ritornarci più di due decenni più tardi, dopo che le sue idee erano state riscoperte, estese, e notevolmente raffinate da David Bohm.

In un articolo pubblicato nel 1926, e scritto poco dopo che Schrödinger aveva inventato la meccanica ondulatoria, anche Max Born esplorò l'ipotesi che la funzione d'onda **agisse** come una “campo-guida” per il movimento degli elettroni. Come conseguenza di quest’ipotesi, Born in quest’articolo arrivò alla sua interpretazione statistica della funzione d'onda e a gettare le basi della teoria quantistica dello *scattering*. Born non specificò esplicitamente una legge di guida, ma espresse il suo convincimento che tale legge dovesse essere intrinsecamente statistica. Anche Born, come de Broglie, abbandonò in seguito l'ipotesi del “campo-guida”, in larga misura a causa della ricezione ostile da parte di Werner Heisenberg, che aveva insistito sul fatto che le teorie fisiche dovessero essere formulate direttamente in termini di quantità osservabili – come righe spettrali ed intensità – piuttosto che in termini di traiettorie microscopiche.

Se è fuori discussione che il dualismo ontologico *onda-particella* abbia svolto un ruolo essenziale nel contesto della scoperta della teoria, che cosa si può dire del suo ruolo nel contesto della giustificazione della meccanica quantistica ortodossa?

Le idee di Heisenberg furono perfezionate da Niels Bohr e portarono alla cosiddetta interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica, cioè all'interpretazione *ortodossa* della teoria che è ancora oggi alla base della maggior parte dei libri di testo di meccanica quantistica. Nell'interpretazione ortodossa permane una sorta di dualismo ontologico: anche qui il ruolo della funzione d'onda è di governare il comportamento di *qualcos'altro*, che *ha già* significato fisico. E questo *qualcos'altro* sono certi oggetti macroscopici, detti *apparati* o *strumenti di misura*, di cui la funzione d'onda governa il

comportamento durante il processo di misura. Si ha così un dualismo simbolicamente espresso dalla coppia (f, X) , dove f è la funzione d'onda e X sta per le variabili classiche che descrivono gli apparati di misura – le posizioni dei loro indici e dei loro puntatori, o dei simboli sulla schermata di un computer che rappresentano il risultato di un esperimento.

Solitamente, questa struttura non è resa esplicita in modo chiaro. Anche la dinamica di f e X non è precisata in modo chiaro e non ambiguo. Talvolta la dinamica della funzione d'onda f è data dall'equazione di Schrödinger e talvolta la dinamica delle variabili classiche X è quella fissata dalle leggi della meccanica classica e dell'elettromagnetismo classico. Ma quando le variabili classiche X interagiscono con le variabili quantistiche, rappresentate dalla funzione d'onda f , le leggi dinamiche cambiano: la funzione d'onda f evolve secondo una qualche regola di collasso e le variabili classiche X subiscono “salti” casuali, del tutto imprevedibili sulla base delle leggi classiche, che sono regolati statisticamente dalla funzione d'onda.

Le difficoltà concettuali di questa struttura sono state messe in evidenza in maniera molto efficace da Bell:

Così, nella teoria quantistica contemporanea, sembra che il mondo debba essere suddiviso in un sistema quantistico ‘fluttuante’ [‘wavy’ nell'originale] e in un resto che è, in qualche senso, ‘classico’. La divisione è fatta in un modo o nell'altro, in una particolare applicazione, secondo il grado di accuratezza e completezza richiesti. L'indispensabilità, e soprattutto la furtività [‘shiftiness’ nell'originale] di una tale divisione, è per me la grande sorpresa della meccanica quantistica. Questa introduce una fondamentale ambiguità nella teoria fisica fondamentale, anche se solo ad un livello di accuratezza e completezza che è al di là di quanto sia richiesto in pratica. Il tollerare una

tale ambiguità al livello più fondamentale, non solo provvisoriamente, ma in modo permanente, è la vera rottura con *l'ideale classico* ([5], p. 188, corsivo mio).

E ancora:

Le formulazioni convenzionali della teoria quantistica, e della teoria quantistica dei campi in particolare, sono vaghe ed ambigue in modo non professionale. I fisici teorici professionisti dovrebbero essere in grado di fare meglio. *Bohm ci ha mostrato un modo* ([5], p. 173, corsivo mio).

§4. Il Modo di Bohm

Il modo di Bohm per “fare meglio”, e ottenere così una formulazione della teoria quantistica che non sia né vaga né ambigua, è di una semplicità così sconcertante che risulta inspiegabile – se non in termini di sociologia della scienza – che non sia considerato dai libri di testo di meccanica quantistica.

Per comprendere questo modo occorre, in primo luogo, aver chiaro che vaghezza e ambiguità dello schema ortodosso (f, X) sono dovute a X , vale a dire alla nozione di variabile classica, una nozione che porta con sé la vaghezza della nozione di “macroscopico” (per cui vale il noto “paradosso del mucchio”, se si fanno le ovvie assunzioni che un oggetto che contenga, ad esempio, un numero di Avogadro di molecole sia macroscopico e che quando una molecola è tolta da un oggetto siffatto si ha ancora un oggetto macroscopico). Per ottenere uno schema soddisfacente basterà dunque eliminare l'ambiguità e la vaghezza delle variabili X .

Più precisamente, si può costruire uno schema (f, x) empiricamente adeguato e in accordo con *l'ideale classico*, sulla base delle seguenti assunzioni:

1. Le x sono variabili fisiche ben definite in tutte le scale e pertanto non dipendenti dalla scelta arbitraria del confine tra il microscopico e il macroscopico.
2. La funzione d'onda f 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. Le variabili x sono tali da corrispondere alle variabili classiche X dello schema ortodosso quando se ne fornisca una descrizione “a grana grossa” appropriata per la scala macroscopica (secondo la terminologia filosofica corrente, si richiede che le variabili X sopravvengano sulle variabili x).
4. L'evoluzione temporale delle variabili x è determinata dalla funzione d'onda f soltanto o, eventualmente, anche da opportune condizioni iniziali, ad esempio, il valore delle x ad un qualche “tempo iniziale”.
5. Le previsioni per la statistica delle variabili X concordano (almeno approssimativamente) con quelle della teoria quantistica ortodossa (nella misura in cui queste ultime sono non ambigue).

Ovviamente, nella misura in cui le teorie fisiche sono nostre libere creazioni, – sotto-determinate dall'evidenza empirica – il cui scopo è di rendere intelligibili le nostre esperienze, non abbiamo alcuna ragione di aspettarci che ci sia una regola univoca che permetta di trasformare lo schema (f, x) in una ben definita teoria fisica. In particolare, l'evidenza empirica difficilmente potrà indicarci quali sono le variabili x più adeguate ad afferrare la realtà fisica. Tuttavia, empiricamente indecidibile non significa completamente indecidibile. Ci possono essere differenze rilevanti per *potere esplicativo*, *semplicità* e *naturalità*.

Come possiamo procedere allora per decidere quale sia la scelta più appropriata per le x ? Una proposta modesta: prima si provi con l'ovvio! Poi si proceda al meno evidente e infine, come è probabile sia necessario, si consideri ciò che non è per niente ovvio. Sorprendentemente, se si mette in atto questa proposta, e ci si limita alla meccanica quantistica non-relativistica, ci si accorge che basta fermarsi al primo stadio della proposta. La scelta più ovvia per le variabili x (peraltro suggerita dal linguaggio che usualmente utilizziamo in fisica quantistica) è data dalle posizioni delle particelle quantistiche – elettroni, protoni e quant'altro. E la teoria che ne risulta è proprio la teoria quantistica di Bohm, o *meccanica bohmiana*, a cui abbiamo fatto cenno in §2.

Dunque l'*ontologia primitiva* della meccanica bohmiana – vale a dire, le entità di base che sono gli elementi costitutivi di tutto il resto secondo tale teoria – consiste in *particelle*, descritte dalle loro posizioni nello spazio che cambiano con il passare del tempo, alcune delle quali, a causa delle leggi che regolano la dinamica della loro evoluzione, possono combinarsi per formare i familiari oggetti macroscopici dell'esperienza quotidiana. Non si sostiene qui che il ruolo specifico della funzione d'onda nel governare il movimento delle particelle (cfr. punto 4 dello schema precedente) sia immediatamente ovvio, ma che possa risultare tale sulla base di considerazioni di semplicità e simmetria non solo nel caso non-relativistico [8], ma anche in teoria quantistica dei campi [7].

La meccanica bohmiana risulta così una nuova meccanica, una teoria deterministica – ma non-newtoniana – di particelle in movimento, con la funzione d'onda che guida questo movimento. Inoltre, mentre la sua formulazione non coinvolge la nozione d'osservabile quantistica – cosicché la sua relazione con il formalismo quantistico può

apparire d'acchito un po' oscura – si può dimostrare che la meccanica bohiana non solo rende conto dei fenomeni quantistici, ma include anche il formalismo quantistico usuale, basato su operatori auto-aggiunti come osservabili, come espressione naturale del suo stesso contenuto empirico [8, 9].

Nelle discussioni sulla teoria quantistica, postulare nell'ontologia altre entità, oltre alla funzione d'onda, è comunemente considerato postulare variabili nascoste, come le particelle in meccanica bohiana. A questo proposito, Bell scriveva:

Assurdamente, tali teorie sono conosciute come teorie a “variabili nascoste”. Assurdamente, perché non è nella funzione d'onda che si può trovare un'immagine del mondo visibile e i risultati degli esperimenti, ma nelle variabili “nascoste”(!) complementari. Certamente, queste variabili addizionali non sono confinate alla scala visibile “macroscopica”. Perché non è possibile dare una definizione precisa e non vaga di una tale scala. L'aspetto “microscopico” delle variabili complementari è, in effetti, nascosto a noi. Ma ammettere l'esistenza d'entità non visibili alle creature grossolane che noi siamo è, a mio parere, mostrare una decorosa umiltà, e non piuttosto una deplorable dipendenza dalla metafisica. In ogni caso, la più nascosta di tutte le variabili, nella teoria dell'onda pilota, è la funzione d'onda, che si manifesta a noi solo per la sua influenza sulle variabili complementari ([5], p. 201).

§5. *Esseribili* locali e Ontologia Primitiva

In §1 abbiamo sostenuto che il monismo della funzione d'onda è incompatibile con l'evoluzione di Schrödinger, non che è impossibile – e abbiamo accennato a teorie basate su modifiche non lineari e stocastiche di tale equazione,

come la teoria GRW. La domanda che a questo punto si pone è se – senza introdurre variabili addizionali – queste modifiche siano sufficienti per trovare in queste teorie un'immagine del mondo visibile e i risultati degli esperimenti.

La risposta è no. Per chiarire il senso di questa risposta è utile spiegare un termine introdotto nella discussione da Bell, il termine “esseribile” (vale a dire, ciò che “può essere”, un neologismo che traduce in italiano il neologismo inglese “beable” utilizzato da Bell). È importante sottolineare, con Bell, che: «il termine “esser-ibile” contrapposto a “osserv-abile” non è inteso a spaventare con della meta-fisica coloro che sono dediti alla vera-fisica. E' scelto piuttosto per aiutare a rendere esplicite alcune nozioni che sono già implicite e fondamentali per la meccanica quantistica ordinaria» ([5], p. 52). Bell così continua:

La parola *esseribile* sarà utilizzata per trasferire [al contesto quantistico] la distinzione familiare già in teoria classica tra quantità ‘fisiche’ e ‘non-fisiche’. Nella teoria elettromagnetica di Maxwell, per esempio, i campi \mathbf{E} e \mathbf{H} sono ‘fisici’ (*esseribili*, diremmo noi), ma i potenziali \mathbf{A} e V sono ‘non-fisici’. A causa dell’invarianza di *gauge*, la stessa situazione fisica può essere descritta da potenziali molto diversi. Non importa che nel *gauge* di Coulomb il potenziale scalare si propaghi con velocità infinita. Non si suppone che sia davvero lì. È solo una convenienza matematica. Noi saremo particolarmente interessati agli *esseribili* locali, vale a dire a quegli *esseribili* che (a differenza, ad esempio, dell’energia totale) possono essere assegnate ad una qualche regione delimitata dello spazio-tempo. Ad esempio, nella teoria di Maxwell, gli *esseribili* locali per una data regione sono solo i campi e tutti i funzionali degli stessi (ibid.).

Dopo aver proposto una scelta di *esseribili* locali per GRW (in effetti la teoria che più avanti chiameremo GRWf), Bell scrive:

Così siamo in grado di proporre questi eventi come base degli ‘*esseribili* locali’ della teoria. Queste sono le controparti matematiche nella teoria degli eventi reali che accadono in luoghi e a tempi definiti nel mondo reale (e, in quanto tali, distinte dalle tante costruzioni puramente matematiche che si presentano nell’elaborazione delle teorie fisiche, distinte da ciò che può essere reale ma non è localizzato, e distinte dalle ‘osservabili’ di altre formulazioni della meccanica quantistica, per le quali non abbiamo alcun uso qui) ([5], p. 205).

Si osservi che l’esempio più importante di *esseribile non-locale* è proprio la funzione d’onda f , che è reale, ma non localizzata.

Sono pochi i filosofi che hanno colto la rilevanza, non solo fisica, ma anche filosofica, della nozione di *esseribile* locale. Fanno eccezione, tra gli altri, il già citato Putnam [15] e Tim Maudlin [14]. Secondo Maudlin la comprensione di una teoria senza *esseribili* locali, e delle sue relazioni con le nostre credenze pre-teoriche – in un mondo che contiene oggetti localizzati, di composizione sconosciuta e in una certa disposizione che cambia nel tempo – sarà molto, molto più complessa della comprensione di una teoria con *esseribili* locali. È proprio perché gli *esseribili* locali non sono nascosti, perché (secondo la teoria) è facile produrre fisicamente correlazioni tra la disposizione di questi *esseribili* e lo stato di un apparato di misura (o lo stato del nostro cervello), che essi possono svolgere un ruolo corretto nella nostra *epistemologia*.

Non solo si può concordare con Maudlin sul ruolo epistemico degli *esseribili* locali, ma ci si può spingere oltre e sostenere che esse svolgono un ruolo corretto anche nella nostra *ontologia*.

Per spiegare questo, è utile ritornare allo schema (f, x) introdotto in §4 e supporre che le variabili x rappresentino *esseribili locali* – e non semplicemente *esseribili*. Sorprendentemente, risultano incluse nello schema così ristretto anche teorie in cui le x *non* sono variabili addizionali – cioè “variabili nascoste” – ma variabili che sopravvivono sulla funzione d’onda stessa, come in effetti è per le teorie GRWm e GRWf analizzate in [2] (per una trattazione di carattere divulgativo si veda [1, 4]). Queste variabili rappresentano, rispettivamente, per GRWm, una densità continua di materia nello spazio fisico tridimensionale, che evolve nel corso del tempo e, per GRWf, un insieme discreto di eventi nello spazio-tempo. Per entrambe le teorie, la dinamica della funzione d’onda è la stessa (di tipo GRW), ma non l’immagine del mondo visibile e la rappresentazione dei risultati degli esperimenti, che sono profondamente diversi per le due teorie – anche se le due teorie sono empiricamente equivalenti [13]. È inoltre importante osservare che la teoria GRWf ammette un’estensione relativistica [17], ma non la teoria GRWm. Alla luce di queste osservazioni, è difficile sostenere che gli *esseribili* locali svolgano un ruolo soltanto nell’epistemologia di queste teorie e non anche nella loro struttura ontologica.

Se inoltre si ritiene che scopo di una teoria fisica è di rendere intelligibili le nostre esperienze, nel senso specifico di rendere *comprensibili* le loro *controparti macroscopiche* “esterne” – e non semplicemente le apparenze – ci sembra inevitabile concludere che le variabili x debbano rappresentare *esseribili* locali, vale a dire “roba”

che è localizzata nello spazio (o nello spazio-tempo), perché tali sono le controparti macroscopiche delle nostre esperienze. Se invece si ritiene che lo scopo di una teoria fisica è di spiegare le apparenze *tout court*, questo vincolo sulle variabili x viene a cadere; in tal caso sarebbero però richieste *bridge-laws*, nel senso dei neo-positivisti, o si dovrebbe invocare una qualche versione di funzionalismo, per esempio *à la* Dennett. Il primo approccio ci sembra più interessante e, in ogni caso, preferibile al secondo, visto il carattere problematico delle *bridge-laws* e del funzionalismo. A margine, osserviamo che il primo approccio ha un distinto sapore kantiano, come ha colto Einstein quando, con acutezza e estrema semplicità, osservò che «[u]na delle grandi scoperte di Immanuel Kant fu il riconoscimento che la costruzione di un mondo esterno reale sarebbe priva di senso senza la sua comprensibilità. [11]»

Quando analizziamo l'architettura concettuale di uno schema (f, x) basato su *esseri* locali – ad esempio, per la meccanica bohmiana, le teorie GRW o persino le teorie a molti mondi [3] – ci rendiamo conto che l'asimmetria tra la funzione d'onda f e le variabili x non è semplicemente una questione di accesso epistemico, ma che la struttura matematica di un tale schema è *fondata* sulle variabili x , nel senso che il *significato* stesso delle entità di tale struttura – incluso quello della funzione d'onda – è derivato dal ruolo che esse hanno in *relazione* alle variabili x , ad esempio, il ruolo nomologico che la funzione d'onda ha nel governare il comportamento delle variabili x (nel senso illustrato all'inizio di §3). Nella misura in cui relazioni concettuali rimandano a relazioni ontologiche, si può dunque parlare di una vera e propria *dipendenza ontologica* delle entità della teoria dalle variabili x , *che hanno quindi un ruolo fondante* per la teoria stessa e costituiscono ciò che è stato chiamato l'*ontologia primitiva* della teoria [8, 2]. Si osservi

che in alcuni casi, la dipendenza ontologica va esattamente nella direzione opposta a quella della sopravvenienza; ad esempio, nella teoria GRWm la funzione d'onda f determina univocamente la densità di materia x nello spazio fisico – quindi x sopravviene su f – pur non avendo un significato fisico indipendente da quello così definito.

Questa conclusione può risultare poco comprensibile se si seguono rigidamente i canoni della filosofia analitica tradizionale, ma forse diventa più comprensibile, se non addirittura ovvia, in un quadro analitico più liberale e più sensibile alle suggestioni della fenomenologia husserliana, in cui la relazione ontologica di “fondazione” (*Fundierung*) svolge un ruolo rilevante [16].

Ringraziamenti. L'autore ringrazia Luisa Montecucco (Università di Genova, Dipartimento di Filosofia) e Mario Alai (Università di Urbino, Dipartimento di Filosofia) per una lettura attenta del manoscritto e utili suggerimenti.

Riferimenti bibliografici

- [1] Allori A., Dorato M., Laudisa, F., Zanghi N., *La natura delle cose. Introduzione ai fondamenti e alla filosofia della fisica* (Carocci, Roma) 2005.
- [2] Allori A., Goldstein S., Tumulka R., Zanghi N., *BJPS* **59** (2008) 353.
- [3] Allori A., Goldstein S., Tumulka R., Zanghi N., *Many-Worlds and Schrödinger's First Quantum Theory*, in preparation.
- [4] Allori A. e Zanghi N., in *Strutture dello spazio tra fisica e psicologia*, a cura di Fano E. e Antonelli M., *Teorie e Modelli*, **XII**, III (2009) 9.
- [5] Bell J.S., *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, 2^a ed. (Cambridge University Press, Cambridge) 2004 (passi tradotti dall'A.).
- [6] Bohm D., *Phys. Rev.* **85**, (1952) 166.
- [7] Dürr D., Goldstein S., Tumulka R., Zanghi N., *Phys. Rev. Lett.*, **93**, (2004) [090402](#).

- [8] Dürr D., Goldstein S., Zanghì N., *Jour. Stat. Phys.*, **67** (1992) 843.
- [9] Dürr D., Goldstein S., Zanghì N., *Jour. Stat. Phys.*, **116** (2004) 959.
- [10] Einstein A., in *The Philosophy of Bertrand Russell*, 3^a ed., a cura di Schilpp P.A. (Harper & Row, New York) 1963, p.289.
- [11] Einstein A. *Fisica e realtà* in *Albert Einstein. Opere scelte*, a cura di Bellone E. (Bollati Boringhieri, Torino) 1988, p.530.
- [12] Ghirardi G.C., Rimini A., Weber T., *Phys. Rev. D.*, **34** (1986) 470.
- [13] Goldstein S., Tumulka R., Zanghì N., *The Quantum Formalism and the GRW Formalism*, arXiv:0710.0885v1 [quant-ph].
- [14] Maudlin T.W.E., *Jour. Phys. A*, **40** (2007) 3151.
- [15] Putnam H., “Quantum Mechanics and Ontology,” intervento al convegno “Analysis and Interpretation in the Exact Sciences. A Workshop in Honour of William Demopoulos”, 2-4 maggio 2008, London, Ontario, Canada.
- [16] Rota G.C., in *Discrete Thoughts*, a cura di Kac M., Rota G.C., Schwartz (Birkhäuser, Boston-Basel-Berlin) 1992, p. 171
- [17] Tumulka R., *Jour. Stat. Phys.* **125** (2006), 821.