
Problemi epistemologici in meccanica quantistica

Claudio Garola

Dipartimento di Matematica e Fisica Ennio De Giorgi
Università del Salento, Lecce

Il dibattito sulle possibili interpretazioni della meccanica quantistica (MQ) è vivace ancora oggi, benché sia trascorso quasi un secolo dalla nascita della teoria. Le ragioni che hanno impedito finora di raggiungere soluzioni condivise possono essere comprese più a fondo se si analizza il linguaggio della MQ utilizzando nozioni di logica matematica per chiarirne gli aspetti sintattici e semantici. Questo punto di vista, insolito negli studi sui fondamenti della MQ, permette sia di suggerire una scelta fra posizioni diverse proposte in letteratura, sia di proporre alternative a tesi largamente condivise ma problematiche. Si analizzano in particolare nel presente lavoro, facendo riferimento a ricerche precedenti, i temi cruciali della *logica quantistica*, della *probabilità quantistica* e della *contestualità* (dipendenza dei risultati di una misura dal contesto di osservazione) della MQ. Tale analisi dimostra che la logica quantistica non è necessariamente associata a una nozione di verità quantistica incompatibile con la nozione classica di verità, che la probabilità quantistica ammette un'interpretazione epistemica se la nozione di contestualità è introdotta come primitiva nel linguaggio della MQ, e, infine, che l'asserzione stessa che la MQ è una

teoria contestuale può essere messa in discussione se si modificano le premesse epistemologiche implicite nei teoremi che dovrebbero dimostrarla.

1. Introduzione

Quando si analizza una teoria scientifica è opportuno distinguere fra lo studio della sua evoluzione storica (sia in senso tecnico che in senso metodologico ed epistemologico) e la *ricostruzione razionale* che è possibile effettuare in un dato momento, con gli strumenti di analisi che in quel momento sono disponibili. Lasciando agli storici della scienza il primo di questi compiti, ci occuperemo in questo articolo di alcuni problemi epistemologici che emergono in meccanica quantistica (MQ), nello stadio attuale della sua evoluzione, quando se ne ricostruiscono razionalmente gli aspetti fondamentali. Il nostro studio sarà effettuato adottando una prospettiva originariamente proposta dal gruppo di ricerca in fondamenti della MQ del Dipartimento di Fisica dell'Università del Salento. In sintesi, si tratta di utilizzare strumenti di logica matematica per analizzare la struttura sintattica e le proprietà semantiche del linguaggio della MQ, individuandone gli aspetti caratteristici e i nuclei problematici. Come vedremo, uno studio di questo tipo conduce a risultati interessanti, alcuni dei quali smentiscono credenze diffuse che impediscono di individuare possibili alternative alle interpretazioni esistenti (e controverse) della MQ. Esso richiede tut-

tavia una serie di premesse, poiché la MQ è una teoria complessa che poggia su teorie precedenti per differenziarsene poi in modo radicale. Discuteremo pertanto nella Sezione 2 alcune regole e principi del linguaggio naturale che sfuggono in genere all'attenzione critica dei parlanti perché impliciti e apparentemente ovvi: in particolare, un principio di *oggettività delle proprietà* che assume l'indipendenza dall'osservazione delle proprietà degli oggetti fisici. La rilevanza di tali aspetti per i nostri scopi è dovuta al fatto che la meccanica classica (MC) li fa propri nel suo linguaggio, che costituisce poi a sua volta la base del successivo (e antagonistico) linguaggio della MQ. Nella Sezione 3 presenteremo poi la *concezione epistemologica standard*, che ricostruisce razionalmente quali siano le parti costitutive di una teoria fisica evoluta. Tenendo conto di questi preliminari, prenderemo in considerazione nella Sezione 4 il linguaggio della MC, osservando come anch'esso sottenda il principio di oggettività e come, di conseguenza, la MC possa offrire una descrizione della realtà fisica intuitivamente accettabile anche se non immediata. Nella Sezione 5 mostreremo invece come la MQ neghi il principio di oggettività e come questa negazione abbia conseguenze profonde: in particolare, l'impossibilità di creare modelli intuitivi della realtà fisica, la proposta di un nuovo linguaggio (la *logica quantistica*) che alcuni ricercatori ritengono sottendere una nozione di *verità quantistica* diversa dalla nozione classica di verità e con essa incompatibile, l'introduzione di una nozione non classica di probabilità (la *probabilità quantistica*) che non sarebbe interpretabile come misura (indiretta) delle limitazioni della nostra conoscenza (probabilità *epistemica*) ma che rifletterebe invece la struttura fondamentale del mondo fisico (probabilità *ontica*). Le Sezioni 6 e 7 saranno allora dedicate a discutere brevemente la logica quantistica e la probabilità quantistica, rispettivamente, allo scopo di mostrare come esse possano essere connesse con le corrispondenti nozioni classiche in modi usualmente non riconosciuti. Nella Sezione 8, infine, si mostrerà che l'interpretazione stessa della MQ come teoria contestuale può essere messa in discussione, poiché poggia su teoremi la cui dimostrazione richiede un'assunzione epistemologica legittima ma non logicamente necessaria.

2. Il ruolo delle proprietà nel linguaggio naturale

Come accennato nella Sezione 1, l'uso del linguaggio naturale comporta processi mentali complessi di cui usualmente non ci rendiamo conto, avendo appreso ad attuarli in modo automatico fin dalla prima infanzia. L'analisi di questi processi è importante da molti punti di vista: in particolare, perché porta a comprendere meglio quale visione intuitiva del mondo si celi dietro le nostre parole. L'umanità si è interrogata su questi temi, direttamente o indirettamente, fin dall'antichità, e la letteratura sull'argomento è vastissima. A noi interessa, in questa sede, solo una breve ed elementare analisi di alcuni aspetti della nozione di proprietà, che ricorre frequentemente nel parlare quotidiano.

Quando parliamo di oggetti individuali che appartengono al mondo materiale, o a un modello mentale, o a un sistema di credenze, ecc., utilizzando l'articolo indeterminativo (*una* lavagna, *un* numero, *un'*anima, ...) intendiamo indicare un oggetto generico appartenente a una classe, che è predefinita (rispetto all'oggetto) da una o più proprietà caratterizzanti, all'interno della quale i singoli oggetti particolari sono caratterizzati da ulteriori proprietà specifiche. Dato allora un oggetto individuale a e una proprietà P , un tipico enunciato elementare del linguaggio naturale sarà " a ha la proprietà P ": ad esempio, "questa lavagna è bianca" o "il numero 7 è dispari" o "la mia anima è immortale". Un enunciato di questo tipo (brevemente, $P(a)$ nel seguito) può avere una *interpretazione semantica* che gli assegna un valore di verità ($V = \text{vero}$, $F = \text{falso}$) il quale, tuttavia, non è necessariamente noto o prevedibile. Occorre allora introdurre una distinzione fondamentale. Nel primo esempio proposto sopra, il termine "lavagna" ha interpretazione empirica, e il valore di verità assegnato all'enunciato "questa lavagna è bianca" può essere controllato empiricamente mediante un'osservazione diretta o strumentale che *verifichi* o *falsifichi* l'enunciato (cioè fornisca una prova empirica della sua verità o della sua falsità). Negli altri esempi, invece, i termini "numero 7" e "anima" non hanno interpretazione empirica, e il valore di verità può essere assegnato in base a una nozione di verità matematica (nel secondo esempio) o in base a credenze religiose (nel terzo esempio), ma non può essere controllato empiricamente.

Gli enunciati *elementari* (o *atomici*) della forma $P(a)$ che ammettono un controllo empirico sono ele-

menti di una classe di enunciati elementari detti *osservativi*, cioè di enunciati che descrivono i risultati di una procedura osservativa possibile [1]. Questa classe comprende anche enunciati che stabiliscono *relazioni* empiricamente controllabili, come “Aldo è più alto di Andrea” e costituisce un nucleo linguistico fondamentale per ogni teoria scientifica nel cui linguaggio compaiano oggetti individuali (è opportuno notare tuttavia che anche nelle teorie scientifiche possono esistere enunciati il cui valore di verità è definito ma non empiricamente controllabile: verità e conoscenza della verità sono infatti nozioni diverse, che non dovrebbero essere identificate).

Considerando ora l'insieme degli enunciati osservativi, si assume implicitamente nel linguaggio naturale il seguente principio, che chiameremo *principio di oggettività*.

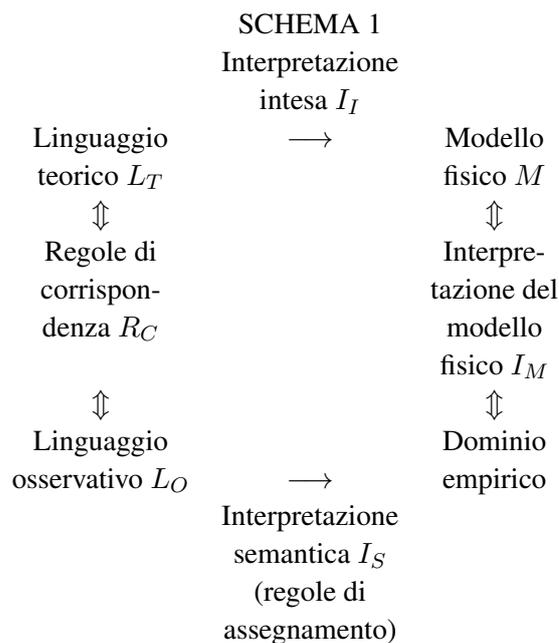
O. I valori di verità degli enunciati osservativi preesistono a un eventuale controllo empirico (brevemente, osservazione).

Nel caso di enunciati osservativi della forma $P(a)$ il principio O stabilisce l'*oggettività delle proprietà* (o il *realismo delle proprietà*), da intendersi non in senso ontologico ma in senso semantico (cioè relativo ai valori di verità). Il ruolo dell'osservazione non è perciò quello di definire la nozione di verità, che resta distinta da quella di *verificazione*, ma quello di portare a nostra conoscenza valori di verità ignoti o di confermare/disconfermare valori di verità ipotizzati. L'osservazione stessa mostra poi che i valori di verità degli enunciati osservativi sono spesso collegati fra loro. Ad esempio, se “Il cielo è coperto” è vero, in genere “il sole splende” è falso, mentre se “Carlo è influenzato” è vero, in genere “Carlo è febbricitante” è falso. Da questo punto di vista il ruolo della scienza è perciò quello di studiare i valori di verità degli enunciati osservativi e le loro relazioni. L'impresa, tuttavia, è difficile, e richiede la costruzione di strutture linguistiche e concettuali molto complesse. Inoltre, evolvendosi, mette in discussione, con la meccanica quantistica e con la nozione di *contestualità*, le premesse stesse da cui è partita. Dedicheremo pertanto la prossima sezione a illustrare brevemente le articolazioni concettuali e linguistiche di teorie scientifiche evolute (come le attuali teorie fisiche) secondo un punto di vista epistemologico largamente diffuso.

3. La concezione epistemologica standard

Si ritiene abitualmente che la fisica moderna nasca quando il ruolo dell'osservazione e della misura nella comprensione dei fenomeni naturali è pienamente riconosciuto, in opposizione al medioevale principio di autorità. La necessità di correlare i risultati numerici ottenuti conduce in seguito allo sviluppo e all'uso estensivo dell'apparato matematico, con la costruzione di modelli matematici e geometrici. Questi ultimi evolvono poi in teorie complesse in cui sono introdotte leggi generali ed entità teoriche solo indirettamente connesse con enunciati osservativi.

Secondo la *concezione epistemologica standard*, o *punto di vista ricevuto*, (e.g., [2], [3], [4]) una teoria fisica evoluta è esprimibile in un metalinguaggio in cui sono riconoscibili diversi elementi correlati fra loro. Lo Schema 1 riassume tali elementi e le loro correlazioni (nello schema le frecce orizzontali rappresentano applicazioni e quelle verticali relazioni complesse e variabili con la teoria).



Commentiamo brevemente lo Schema 1. Il *linguaggio teorico* L_T comprende l'apparato matematico della teoria, e la sua *interpretazione empirica* I_E avviene tramite *regole di corrispondenza* R_C che connettono L_T con un *linguaggio osservativo* L_O . Quest'ultimo è interpretato su un dominio empirico tramite *regole di assegnamento*, che ne forniscono un' *interpretazione semantica* I_S , e la composizione di I_S e R_C fornisce l'interpretazione empirica richiesta (è importante osservare che I_E è in genere

indiretta e incompleta: indiretta perché esistono in genere in L_T termini teorici che sono interpretati via R_C solo indirettamente, tramite l'interpretazione di termini teorici derivati; incompleta perché i valori possibili delle entità teoriche, spesso infiniti, sono in genere solo parzialmente interpretati su domini finiti). L_T ha inoltre spesso un' *interpretazione intesa* I_I su un *modello fisico* M , che non è indispensabile in linea di principio ma che gioca un ruolo fondamentale per la comprensione intuitiva, la giustificazione e lo sviluppo della teoria (con lo svantaggio, peraltro, che l'esistenza stessa di M conduce spesso a vederlo come rappresentativo di una realtà ontologica sottostante ai fatti empirici, trasformandolo in un ostacolo alla formulazione di teorie diverse e alternative). Tale interpretazione può essere *diretta e completa*, a differenza di quanto accade nel caso di I_E . Infine, anche il modello M può avere un'interpretazione I_M sul dominio empirico, in modo da completare lo Schema 1 coerentemente con I_E .

Il punto di vista ricevuto è stato criticato da diversi punti di vista (e.g., [5], [6]). In particolare, le regole di corrispondenza R_C (e quindi l'interpretazione I_M di M) dipendono dall'interpretazione globale della teoria e possono essere controverse. Tuttavia le distinzioni nello Schema 1 restano, a nostro parere, fondamentali, e di esse terremo conto nel seguito.

4. Il linguaggio della meccanica classica

Come si è detto nella Sezione 1, il linguaggio della MC fa propri alcune regole e principi del linguaggio naturale che sono rilevanti da un punto di vista epistemologico ma che sono usualmente applicati in modo automatico dai parlanti poiché sono appresi per imitazione fin dalla prima infanzia. In particolare, l'esistenza di oggetti individuali, il ruolo delle proprietà nel caratterizzare classi e individui specifici e, soprattutto, il principio di oggettività O. Nel quadro dello Schema 1 quest'ultimo ha una funzione fondamentale, perché permette di costruire un'interpretazione intesa diretta e completa del linguaggio teorico della MC su un modello fisico M (costituito da punti materiali, traiettorie, corpi rigidi, ecc.), indipendentemente dalle problematiche relative a R_C e a I_M , che sarebbero invece rilevanti se i valori di verità degli enunciati osservativi dipendessero anche dal controllo empirico che ne viene eventualmente effettuato. Si

ottiene così un supporto importante per l'intuizione fisica, e quindi per l'evoluzione della teoria.

Da un punto di vista formale, gli aspetti più elementari del linguaggio della MC possono essere schematizzati come segue.

Innanzitutto, nel linguaggio teorico della MC le nozioni di *sistema fisico* e *grandezza fisica* sono introdotte come primitive. Una proprietà può essere allora definita come una coppia $P = (A, \Delta)$, dove A è una grandezza fisica e Δ un intervallo dell'asse reale, e la formula $P(a)$ rappresenta formalmente l'enunciato "la grandezza fisica A assume valore in Δ sul sistema fisico a ", o, brevemente, " a possiede la proprietà P ". Uno stato S può essere poi definito come un insieme di proprietà, e la formula $S(a)$ rappresenta formalmente l'enunciato "il sistema fisico a possiede tutte le proprietà in S " o, brevemente, " a è nello stato S ".

È ben noto, poi, che in MC ogni sistema fisico è associato a uno spazio delle fasi \mathcal{F} i cui punti rappresentano univocamente tutti e soli i possibili stati (puri) del sistema. Si tratta di uno spazio euclideo di dimensione $2n$, se n è il numero delle variabili di posizione del sistema, e in esso ogni proprietà è rappresentata da un sottoinsieme di punti. Questa rappresentazione di stati e proprietà è fondamentale per chiarire quali condizioni di verità siano implicitamente adottate nel linguaggio della MC. Consideriamo infatti la formula $P(a)$. Al sistema fisico a è associato (univocamente) uno stato S_a , e quindi un punto di \mathcal{F} , che per brevità denoteremo ancora con S_a . Alla proprietà P è associato invece un sottoinsieme \mathcal{F}_P di \mathcal{F} . L'enunciato rappresentato da $P(a)$ è vero (brevemente, l'enunciato $P(a)$ è vero) se e solo se $S_a \in \mathcal{F}_P$. Questa definizione di verità è conforme alla definizione classica di verità [7] e sottende il principio O perché non vi compare alcuna dipendenza dall'osservazione (cfr. Sezione 2). Inoltre $P(a)$ appartiene sia al linguaggio teorico che al linguaggio osservativo della MC (via regole di corrispondenza), ed è un enunciato osservativo: infatti in MC ogni grandezza fisica, e quindi ogni proprietà, è associata, tramite regole di assegnamento (cfr. Sezione 3), a procedure osservative (o *misure*) empiricamente possibili che rivelano il valore che essa assume su un dato sistema fisico. Nel caso di una proprietà P , una misura di P sul sistema fisico a stabilisce se a possiede o non possiede la proprietà P , e quindi verifica o falsifica $P(a)$, fornendo una prova empirica del suo valore di verità.

A partire da quanto precede si può formalizzare un sottolinguaggio elementare $L(x)$ del linguaggio

della MC considerando una variabile x che rappresenta un generico esemplare di un sistema fisico, e poi introducendo connettivi classici \neg, \wedge, \vee , (interpretati come *non, e, o*, rispettivamente) e regole ricorsive per ottenere *formule ben formate (fbf) molecolari* connettendo fra loro formule elementari della forma $P(x)$ (ad esempio, $\neg P(x)$ e $P(x) \wedge Q(x)$ sono fbf, mentre $\wedge \vee P(x)$ non lo è). Si possono poi introdurre le regole semantiche della logica classica (ad esempio, tabelle di verità) che definiscono un' *assegnazione di verità* sull'insieme $\Phi(x)$ di tutte le fbf per ogni interpretazione di x su un sistema fisico specifico. L'insieme delle assegnazioni di verità definisce su $\Phi(x)$ una relazione di (*pre*)ordine logico $<$ (definito ponendo, per ogni coppia $(P(x), Q(x))$ di fbf di $\Phi(x)$, $P(x) < Q(x)$ sse per ogni interpretazione di x per cui $P(x)$ è vero anche $Q(x)$ è vero) e una relazione di *equivalenza logica* \equiv (definita ponendo, per ogni coppia $(P(x), Q(x))$ di fbf di $\Phi(x)$, $P(x) \equiv Q(x)$, sse $P(x) < Q(x)$ e $Q(x) < P(x)$). La struttura d'ordine $(\Phi(x), <)$ possiede allora alcune proprietà algebriche che la caratterizzano: in particolare, la *distributività* (per ogni terna $(P(x), Q(x), R(x))$ di fbf di $\Phi(x)$, si ha $(P(x) \wedge Q(x)) \vee R(x) \equiv (P(x) \vee R(x)) \wedge (Q(x) \vee R(x))$), che è un attributo fondamentale della logica classica. Inoltre, se si considerano l'insieme quoziente $\Phi(x)/ \equiv$ e l'ordine $<'$ canonicamente indotto su di esso dall'ordine $<$, la struttura d'ordine $(\Phi(x)/ \equiv, <')$ è un reticolo Booleano, matematicamente equivalente a un'algebra di Boole $(\Phi(x)/ \equiv, \neg', \wedge', \vee')$ (dove \neg', \wedge', \vee' rappresentano le operazioni indotte canonicamente su $\Phi(x)/ \equiv$ dai connettivi \neg, \wedge, \vee , rispettivamente). Questa algebra è detta *algebra delle proposizioni* (o *algebra di Lindenbaum-Tarski*) di $L(x)$.

Concludiamo questa sezione osservando che in MC tutte le proprietà sono *compatibili*, nel senso che esse possono essere misurate congiuntamente, e quindi i valori di verità degli enunciati osservativi in cui esse compaiono possono essere controllati congiuntamente. Ne segue che il valore di verità di ogni enunciato molecolare è empiricamente controllabile, poiché un controllo congiunto dei valori di verità degli enunciati osservativi che lo compongono permette di controllare il valore di verità dell'enunciato stesso. Inoltre, si può dimostrare che ogni enunciato molecolare è logicamente equivalente, in MC, a un enunciato osservativo, e in questo senso può essere ritenuto anch'esso osservativo.

5. La meccanica quantistica

Nelle opere che trattano le difficoltà concettuali della MQ è frequente trovare la citazione di una famosa asserzione di Feynmann: "... I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics" [8]. Tuttavia da un punto di vista semantico questa affermazione è ambigua. Che cosa significa in realtà "capire"? In che senso non capiamo una teoria che utilizziamo ogni giorno con enorme successo? Cercheremo in questa sezione di rispondere a queste domande analizzando il linguaggio della MQ nel quadro dell'*interpretazione standard* (o di *Copenhagen*) di questa teoria.

Come primo passo osserviamo che anche nel linguaggio teorico della MQ, come in quello della MC, compare la nozione primitiva di sistema fisico, mentre la nozione di grandezza fisica è sostituita dalla nozione di *osservabile*. Una proprietà è allora definita come una coppia $P = (A, \Delta)$, dove A è un'osservabile e Δ un intervallo dell'asse reale, e la formula $P(a)$ rappresenta formalmente l'enunciato "l'osservabile A assume valore in Δ sul sistema fisico a " (che è osservativo, come nel caso della fisica classica, perché è associato a una possibile misura di P). La nozione di stato, tuttavia, non può essere introdotta in analogia con la definizione classica, e quindi compare come primitiva, perché la MQ compie ora un passo epistemologico fondamentale: la negazione del principio di oggettività O. Questa negazione è introdotta nel corso della costruzione e interpretazione della teoria (Bohr: inseparabilità del sistema fisico microscopico dall'apparato di misura [9]; Heisenberg: le proprietà dei sistemi microscopici prima di una misura sono *potenziali* e divengono *attuali* solo dopo una misura [10]). In questa fase, tuttavia, la negazione del principio O appare come una scelta decisiva ma non ha una giustificazione che la renda inevitabile (l'argomentazione basata sull'analisi dell'esperimento delle due fenditure, che si ritrova ancora oggi nei manuali di MQ elementare, è discutibile da vari punti di vista [11]). Per avere un supporto (apparentemente) definitivo alla negazione del principio O occorre attendere fino agli anni sessanta del secolo scorso, quando un primo lavoro di Bell, nel 1964 [12], un secondo lavoro di Bell, nel 1966 [13], e un lavoro di Kochen e Specker, nel 1967 [14], dimostrano che l'introduzione nella MQ del principio di oggettività implicherebbe contraddizioni con le leggi della MQ. Più precisamente, il lavoro di Bell del 1966

e quello di Kochen e Specker del 1967 dimostrano che il valore di verità di un enunciato che attribuisce una proprietà a un sistema fisico dato non può sussistere a priori rispetto a una misura della proprietà, perché dipende dal contesto adottato per controllare se il sistema possiede la proprietà in questione. In altre parole, essi dimostrano che la MQ è una teoria contestuale (teorema di Bell-Kochen-Specker). Il lavoro di Bell del 1964 considera invece sistemi fisici composti da sottosistemi e dimostra che misure diverse di proprietà effettuate su un sottosistema possono attualizzare proprietà diverse sull'altro sottosistema, indipendentemente dalla distanza fra i due sottosistemi. In altre parole, esso dimostra la *contestualità a distanza*, o *nonlocalità*, della MQ (teorema di Bell). A causa di questi teoremi si ritiene comunemente che l'impossibilità di assumere il principio O in MQ non possa essere messa in discussione, perché "matematicamente dimostrata" come conseguenza ovvia della contestualità.

Le implicazioni della negazione del principio O sono in genere controintuitive. È da questa negazione, infatti, che seguono famosi paradossi (cioè contraddizioni con le aspettative intuitive, da non confondere con antinomie della teoria), come quelli di Einstein Podolski-Rosen, del gatto di Schrödinger e dell'amico di Wigner. Il primo di essi consiste nel fatto che la scelta e l'effettuazione di una misura da parte dell'osservatore può selezionare istantaneamente a distanza le proprietà che vengono attualizzate (la "spooky action at a distance", criticata da Einstein). Gli altri mettono in evidenza il fatto che l'ipotesi che le MQ sia una teoria universale (quindi applicabile anche agli apparati di misura) implica l'intervento della coscienza dell'osservatore nell'attualizzazione delle proprietà del sistema osservato.

Più in generale, la negazione del principio O impedisce la costruzione di un'interpretazione intesa della MQ su un modello M che sia diretta e completa, al contrario di quanto accade in MC (cfr. Sezione 4), poiché un'interpretazione di questo tipo assegnerebbe, tramite l'interpretazione di M sul dominio fisico (cfr. Sezione 3) un valore di verità ad ogni enunciato osservativo, indipendentemente dall'osservazione. Viene meno così un importante supporto all'intuizione fisica. Se "capire" significa costruire un modello, ed eventualmente ipostatizzarlo, allora si spiega l'asserzione di Feynmann citata all'inizio di questa sezione.

La negazione del principio O ha inoltre conseguen-

ze in logica. Infatti enunciati osservativi della forma $P(a)$ non sono dotati di valore di verità, e lo acquistano solo quando si effettua una misura della proprietà P . In questo senso la nozione di verità si identifica con la nozione di verificaione: l'enunciato $P(a)$ è vero *se e solo se* (*sse*) è verificato da una misura, falso se e solo se è falsificato. Un linguaggio con connettivi classici costruito a partire da enunciati elementari di questo tipo non ammette un'interpretazione semantica che attribuisca ad ogni enunciato (atomico o molecolare) un valore di verità: sono possibili solo assegnazioni parziali dipendenti dai processi di misura effettuati. Da queste considerazioni nasce la logica quantistica, di cui tratteremo nella prossima sezione.

Infine, la negazione del principio O ha conseguenze in teoria della probabilità. Essa implica infatti che sia impossibile un'interpretazione *epistemica* (o *di ignoranza*) delle probabilità quantistiche: la probabilità non può essere una misura (indiretta) della nostra ignoranza dei valori di verità degli enunciati considerati, poiché tali valori non preesistono all'osservazione. La probabilità quantistica sarebbe quindi *ontica*. Inoltre essa non soddisfa gli assiomi della probabilità classica, come vedremo nella Sezione 7.

Le conseguenze della negazione del principio O considerate sopra sono sconcertanti e contrastano fortemente con la concezione classica del mondo. Sorge quindi spontanea la domanda: la negazione di questo principio è effettivamente inevitabile? Oppure è possibile trovare un'interpretazione della MQ che, senza ritornare necessariamente a una visione tradizionale, ci fornisca una descrizione del mondo più vicina alla nostra intuizione recuperando il principio di oggettività? Come si è visto, si ritiene comunemente che i teoremi di Bell e Bell-Kochen-Specker (e numerosi teoremi "no-go" successivi) mostrino rigorosamente che non è possibile mantenere un principio di oggettività in MQ, e che quindi la risposta alle domande precedenti sia necessariamente negativa. Tuttavia un'analisi approfondita mostra che i teoremi in questione dipendono da un'assunzione epistemologica implicita. Se tale assunzione non è accettata, la dimostrazione dei teoremi non può essere completata. Non si può quindi escludere, almeno da un punto di vista logico, che un'interpretazione della MQ che mantenga il principio O (un'interpretazione, quindi, "realistica", almeno in senso semantico) sia in linea di principio possibile. La comunità dei fisici è spesso ostile a processi critici di questo tipo. Ne daremo tuttavia un breve rendiconto nella Sezione 8.

6. Il linguaggio della meccanica quantistica e la logica quantistica

Sia nel linguaggio della MC che in quello della MQ si considerano solo proprietà atte a formare enunciati osservativi. Tuttavia in MC tutte le proprietà sono fra loro compatibili nel senso specificato al termine della Sezione 4. In MQ, invece, esistono proprietà *incompatibili*, nel senso che esse non possono essere misurate congiuntamente, e quindi i valori di verità degli enunciati osservativi in cui esse compaiono non possono essere controllati congiuntamente. A causa di questo fatto e della negazione del principio O, non è possibile adottare le procedure utilizzate in MC per costruire un sottolinguaggio elementare del linguaggio della MQ. Si possono infatti introdurre gli stessi simboli per i connettivi e le stesse regole formali per la formazione di formule ben formate (fbf), ma la negazione del principio O impedisce di assegnare alle fbf valori di verità a priori rispetto all'osservazione, contrariamente a quanto avviene in MC, e le fbf molecolari non sono in genere osservative se contengono proprietà incompatibili. L'individuazione di un linguaggio di base per la MQ è perciò effettuata in letteratura in modo diverso, facendo ricorso alla rappresentazione matematica di sistemi fisici, stati e proprietà in MQ.

Nelle presentazioni elementari della MQ (quindi, in particolare, in assenza di regole di superselezione), ogni sistema fisico è associato a uno spazio di Hilbert \mathcal{H} sui complessi, i cui vettori rappresentano gli stati (puri) del sistema. I sottospazi chiusi di \mathcal{H} o, equivalentemente, i proiettori ortogonali su \mathcal{H} , rappresentano le proprietà del sistema. Ogni esemplare individuale a del sistema fisico considerato si trova in uno stato S rappresentato da un vettore unitario $|\psi\rangle$ di \mathcal{H} , e un enunciato elementare della forma $P(a)$, dove P è una proprietà del sistema rappresentata da un proiettore P , è associato dalla regola di Born a un numero reale $|\langle P|\psi\rangle|^2 \in [0, 1]$ rappresentante la probabilità che P sia attualizzata in una misura di P su a . Nasce così la proposta di Birkhoff e von Neumann [15]: quella di considerare le proprietà come proposizioni di una logica non classica, la logica quantistica, che costituirebbe così il linguaggio di base della MQ.

Da un punto di vista matematico, la logica quantistica si differenzia dalla logica classica per la sua struttura algebrica. L'insieme $\mathcal{L}(\mathcal{H})$ dei sottospazi chiusi di \mathcal{H} , che rappresentano le proposizioni di questa lo-

gica, è infatti parzialmente ordinato dalla relazione di inclusione \subset , e la struttura d'ordine $(\mathcal{L}(\mathcal{H}), \subset)$ è notoriamente equivalente a una struttura algebrica di reticolo ortomodulare $(\mathcal{L}(\mathcal{H}), \perp, \cap, \cup)$ (dove \perp , \cap e \cup rappresentano operazioni di ortocomplementazione, intersezione e unione, rispettivamente, su $\mathcal{L}(\mathcal{H})$). L'insieme delle proposizioni \mathcal{P} è allora dotato di un ordine \prec indotto da \subset e di operazioni indotte da \perp , \cap e \cup (che denoteremo ancora, per brevità, con \perp , \cap e \cup). Pertanto $(\mathcal{P}, \perp, \cap, \cup)$ è un reticolo ortomodulare. Se l'ordine \prec è interpretato come ordine logico (*implicazione*) in logica quantistica, questo reticolo può essere confrontato con l'algebra delle proposizioni della MC introdotta in Sezione 4. È immediato verificare che le due strutture non sono isomorfe (tranne in casi molto particolari) e che i connettivi quantistici \perp , \cap e \cup hanno interpretazioni che non coincidono con quelle dei connettivi classici \neg , \wedge e \vee . Il linguaggio della MQ sarebbe quindi profondamente diverso da quello della MC.

Secondo alcuni autori (e.g., [16], [17]) la logica quantistica formalizzerebbe le proprietà di una nozione non classica di verità (che chiameremo *Q-verità* nel seguito) implicita nella MQ, e quest'ultima richiederebbe nuove modalità di ragionamento, inconciliabili con le modalità classiche. Questa posizione si presta facilmente a una generalizzazione. Infatti, i sostenitori del *pluralismo locale* ritengono che ogni teoria scientifica si costruisca una propria logica, che deve essere utilizzata nei ragionamenti interni alla teoria, e rifiutano l'idea che esista un'unica logica che presiede ai ragionamenti matematici e scientifici. Il pluralismo locale, tuttavia, può essere criticato da diversi punti di vista. Innanzitutto, infatti, esso rende difficile capire come sia possibile assegnare criteri di razionalità indipendenti dalle teorie specifiche, distinguendo teorie scientifiche e teorie non scientifiche (affrontando cioè il *problema della demarcazione*). In secondo luogo, resta da spiegare il rapporto fra il metalinguaggio in cui sono costruite le teorie, che è un frammento del linguaggio naturale che sottende la nozione classica di verità, e i linguaggi specifici di singole teorie che sottendono nozioni di verità non classiche.

Al punto di vista del pluralismo locale si contrappone il *pluralismo globale* [18]. Secondo questa posizione, strutture logiche non classiche formalizzano le proprietà di nozioni metalinguistiche diverse dalla nozione di verità, eventualmente dipendenti dalla teoria a cui ci si riferisce, non le proprietà di una

nozione di verità alternativa alla nozione classica. Aderendo a questa prospettiva, il gruppo di ricerca sui fondamenti della MQ di Lecce ha dimostrato che è possibile individuare una struttura isomorfa alla logica quantistica immersa nel linguaggio $L(x)$ della MC introdotto nella Sezione 4 [19], [20]. La procedura seguita è complessa, ma i passi che conducono al risultato finale sono facili da descrivere. Infatti, si introduce innanzitutto su $L(x)$ una nozione (metalinguistica) di *verità certa* (brevemente, *C-verità*), definita a partire dalla nozione classica di verità ma tale da assegnare ad ogni fbf di $L(x)$ uno di tre possibili valori *C-vero*, *C-falso* e *C-indeterminato*. Si introduce poi sull'insieme $\Phi(x)$ di tutte le fbf di $L(x)$ un *ordine fisico* \prec , più forte dell'ordine logico e indotto dalla C-verità, e si seleziona un sottoinsieme $\Phi_V(x) \subset \Phi(x)$ di fbf *verificabili* di $\Phi(x)$. Se la selezione di $\Phi_V(x)$ è effettuata tenendo conto delle proprietà della nozione di verifica in MQ, la struttura d'ordine $(\Phi_V(x), \subset)$ ammette un'operazione (unaria) di ortocomplementazione ed è isomorfa alla logica quantistica.

Il risultato descritto sopra è interessante per due motivi. Innanzitutto, esso mostra che la logica quantistica non è caratteristica della MQ, poiché una struttura isomorfa ad essa può essere ritrovata all'interno di un linguaggio classico la cui semantica, come si è visto all'inizio di questa sezione, non è compatibile con la MQ (esempi di strutture isomorfe ad una logica quantistica nel caso di sistemi macroscopici cui si applica la MC sono stati infatti proposti ripetutamente da vari autori della scuola di Bruxelles (e.g., [21])). In secondo luogo, esso suggerisce di identificare la nozione di Q-verità con la nozione di C-verità su fbf verificabili, che è derivata dalla nozione classica di verità e non si oppone ad essa, anche se ha caratteristiche diverse (in particolare, come si è visto, ha tre possibili valori). Questa identificazione è confermata dai risultati ottenuti in un successivo lavoro [22], in cui una logica classica, generalizzata introducendo una semantica solo parzialmente definita per renderla compatibile con la MQ (cfr. Sezione 5), è estesa in senso pragmatico, considerando, oltre agli enunciati della logica classica, *asserzioni* (cioè enunciati sul cui valore di verità il parlante è impegnato, e che possono quindi essere *giustificate* o *ingiustificate*, ma non vere o false) e *connettivi pragmatici* che collegano asserzioni. Infatti si può provare che questa estensione include la logica quantistica se si considerano solo enunciati verificabili e se l'asserzione di un enunciato

di questo tipo è considerata (empiricamente) giustificata quando l'enunciato risulta (certo) vero in MQ. La logica quantistica può quindi essere considerata come una struttura che formalizza le proprietà della nozione metalinguistica di giustificazione in MQ, conformemente al punto di vista del pluralismo globale, e non come il linguaggio di base della MQ.

7. La probabilità quantistica

La probabilità classica possiede una struttura matematica ben definita, determinata dal sistema di assiomi enunciati da Kolmogorov [23], ma ne sono state proposte molte "interpretazioni" (matematica, frequentista, soggettivista). La maggioranza degli studiosi, comunque, concorda nel considerarla come una misura (indiretta) della nostra incompleta conoscenza di tutte le condizioni che determinano l'accadere di un evento fisico: essa è cioè epistemica.

Da un punto di vista classico, la probabilità che un dato evento fisico accada equivale alla probabilità che l'enunciato che asserisce l'accadere dell'evento abbia valore di verità V (*vero*). Le distribuzioni di probabilità della MC si possono quindi tradurre immediatamente in distribuzioni di probabilità sul linguaggio della MC. In modo analogo le distribuzioni di probabilità della MQ si possono tradurre in distribuzioni di probabilità sul linguaggio della MQ, che è costituito, secondo il punto di vista standard, dalla logica quantistica. Ma questa logica non ha, come si è visto, la struttura della logica classica: in particolare, la probabilità classica è definita sull'algebra di Lindenbaum-Tarski, che è un reticolo Booleano (cfr. Sezione 4), mentre la probabilità quantistica è definita sulla logica quantistica, che ha struttura di reticolo ortomodulare, generalmente non distributivo (cfr. Sezione 6). Conseguentemente la probabilità quantistica non soddisfa gli assiomi di Kolmogorov. Inoltre essa non può costituire una misura (indiretta) della nostra ignoranza di valori di verità preesistenti a una misura, a causa della negazione del principio di oggettività: essa infatti si riferisce a valori di verità successivi a una misura, e quindi a un processo di attualizzazione determinato dall'osservatore. Secondo molti studiosi, la probabilità quantistica costituisce allora un elemento primario della nostra descrizione del mondo, e in questo senso essa è considerata ontica (cfr. Sezione 5).

La tesi che precede, comunque, è criticabile a causa della scelta della logica quantistica come linguaggio

fondamentale della MQ. Infatti, abbiamo visto nella Sezione 6 che tale logica non è caratteristica della MQ. Inoltre, essa può essere intesa come formalizzazione matematica delle proprietà di una nozione di giustificazione empirica piuttosto che di quelle di una nozione di verità. Si potrebbe tentare di superare quest'ultima obiezione accettando una teoria verificazionista della verità, secondo cui *vero* significa *verificato*, e *falso* significa *falsificato*. Ma l'identificazione di verità e verificabilità confonde la verità con la conoscenza (empirica) della verità, e non tiene conto del fatto che la nozione di verifica presuppone la nozione di verità (la verifica di un enunciato osservativo si effettua infatti determinando empiricamente il suo valore di verità). Inoltre, come abbiamo già osservato nella Sezione 2, in una teoria scientifica possono esistere enunciati il cui valore di verità è definito ma non empiricamente controllabile. Infine, non è chiaro come la logica quantistica possa tener conto della caratteristica fondamentale del linguaggio della MQ secondo l'interpretazione standard di questa teoria: la negazione del principio di oggettività, o, equivalentemente, la contestualità (cfr. Sezione 5).

Tenendo conto delle obiezioni esposte sopra è stato introdotto in un recente lavoro [24] un nuovo linguaggio per l'interpretazione standard della MQ che tiene conto fin dall'inizio della contestualità, in modo tale che su di esso si possano definire assegnazioni classiche di verità, distribuzioni di probabilità classiche, e, come probabilità derivate, probabilità quantistiche. L'idea centrale di questa proposta consiste nel considerare un linguaggio simile al linguaggio $L(x)$ introdotto in Sezione 4, associando ad ogni proprietà P una famiglia di possibili procedure di misura macroscopiche. Ogni procedura associata a P è poi a sua volta associata a una famiglia di μ -contesti, ognuno dei quali rappresenta una possibile configurazione microscopica della procedura. Gli enunciati elementari della forma $P(x)$ sono allora sostituiti da enunciati della forma $P_C(x)$, dove P_C rappresenta una *proprietà contestuale* e $P_C(x)$ rappresenta formalmente l'espressione "il sistema fisico x possiede la proprietà P nel μ -contesto C ", o, brevemente, "il sistema fisico x possiede la proprietà contestuale P_C ". Utilizzando come elementari questi nuovi enunciati, si costruisce un linguaggio dotato di semantica e connettivi classici, associato quindi a una nozione classica di verità. Su questo linguaggio è allora possibile assegnare distribuzioni classiche di probabilità subordinata (*probabilità condizionali μ -contestuali*).

Queste probabilità costituiscono tuttavia nozioni puramente teoriche e non sono empiricamente controllabili. Ma se si introduce una relazione binaria di *misurabilità congiunta* sull'insieme delle fbf si possono definire probabilità quantistiche empiricamente controllabili come medie delle probabilità condizionali μ -contestuali su sottoinsiemi di μ -contesti. Il procedimento è complesso e non è possibile descriverlo nei dettagli in questa sede: ma quanto precede è sufficiente per comprendere che esso permette di considerare le probabilità quantistiche come probabilità derivate a partire da probabilità classiche, e quindi di considerarle come epistemiche (con riferimento ai valori di verità assegnati a enunciati ove compaiono proprietà contestuali invece che semplici proprietà). Anche questo risultato è innovativo e mette in discussione convinzioni largamente diffuse.

8. Il realismo delle proprietà e i teoremi di Bell e di BKS: un'analisi critica

Nelle Sezioni 6 e 7 le considerazioni sul linguaggio della MQ, sulla logica quantistica e sulla probabilità quantistica fanno riferimento all'interpretazione standard della MQ, in cui la contestualità di questa teoria (e quindi la negazione del principio O) è accettata come un dato di fatto. Tuttavia si è osservato nella Sezione 4 che le "prove matematiche" della contestualità possono essere sottoposte a un'analisi critica che ne rivela la dipendenza da un'ipotesi epistemologica implicita senza la quale le prove stesse non possono essere completate [25]. Questa osservazione è particolarmente importante perché suggerisce che sia possibile, adottando una diversa prospettiva epistemologica, elaborare un'interpretazione della MQ che non implichi la contestualità e le sue conseguenze controintuitive. Dedicheremo perciò la presente sezione ad approfondire questo argomento, evitando per quanto possibile di entrare in dettagli tecnici.

Come punto di partenza della nostra analisi, consideriamo le dimostrazioni dei teoremi di Bell e Bell-Kochen-Specker. Esse sono costruite secondo lo schema seguente.

- (i) Sia L una legge teorica della MQ.
- (ii) Siano L_1, L_2, \dots leggi della MQ relative a un sistema fisico a dedotte da L ed *empiricamente controllabili* (brevemente, *testabili*) perché in ognuna di esse compaiono solo osservabili fra loro compatibili,

ma non *congiuntamente testabili* perché in alcune di esse compaiono osservabili non compatibili con le osservabili che compaiono nelle altre.

(iii) Si supponga che tutte le osservabili che compaiono in L_1, L_2, \dots abbiano valore predeterminato su a .

(iv) Si dimostra, scegliendo esempi opportuni, che qualunque scelta di valori delle osservabili falsifica qualcuna delle leggi.

La falsificazione ottenuta in (iv) può essere interpretata in due modi.

Secondo l'interpretazione standard essa dimostra che l'ipotesi in (iii) è incompatibile con la MQ, e che i valori delle osservabili non sono predeterminati. Scegliendo di controllare L_1 su a si determina un contesto di misura che per ogni osservabile che compare in L_1 attualizza uno dei valori potenziali che l'osservabile può assumere, in modo tale che L_1 risulta verificata se è dedotta correttamente da L . Analogamente se si sceglie L_2 , ecc. Ma se un'osservabile compare in più di una legge, il valore attualizzato dipende dalla legge scelta, perché il contesto di misura richiesto per il controllo dipende da tale legge.

Alternativamente, si può spiegare la falsificazione accettando che i valori delle osservabili siano predeterminati (ipotesi (iii)) e mettendo invece in discussione la generalità dell'apparato delle leggi teoriche, senza tuttavia rinunciare alla correttezza delle previsioni quantistiche. Si può ritenere infatti che la legge L faccia parte di un calcolo da cui sono deducibili leggi derivate. Se queste sono testabili, esistono contesti di misura atti a controllarle empiricamente, e i valori delle osservabili che in esse appaiono sono vincolati a soddisfarle in tali contesti. Se le leggi derivate non sono testabili (come, ad esempio, la congiunta di L_1, L_2, \dots o, necessariamente, la L stessa), non esiste alcun contesto in cui esse siano empiricamente controllabili e i valori delle osservabili che in esse compaiono non sono tenuti a soddisfarle.

L'interpretazione standard sottende una posizione di tipo classico per quanto riguarda le leggi della teoria, che sono considerate comunque valide (per alcuni esprimono verità ontologiche, come la concezione ontica della probabilità) anche quando non sono empiricamente controllabili, e un punto di vista non classico per quanto riguarda le assegnazioni di verità agli enunciati elementari della forma "l'osservabile A ha valore in Δ su a ", che non hanno valore di verità predeterminato.

Inversamente, l'interpretazione alternativa esprime

una posizione classica per quanto riguarda le assegnazioni di verità, ma non ipostatizza l'apparato delle leggi teoriche e si limita ad assumere che tale apparato produca leggi testabili valide nei contesti in cui esse possono essere controllate empiricamente, ma non necessariamente valide in altri contesti. Essa sembra quindi più coerente con l'ispirazione originaria della MQ, che considerava "metafisica" ogni asserzione che non potesse essere empiricamente controllata.

Entrambe le prospettive incontrano comunque qualche difficoltà concettuale.

Nel caso dell'interpretazione standard la difficoltà principale è costituita dalla non-località (teorema di Bell, cfr. Sezione 5).

Nel caso dell'interpretazione alternativa si introduce una contestualità delle leggi testabili della MQ che si contrappone alla contestualità dei valori delle proprietà ipotizzata dall'interpretazione standard e che attribuisce un ruolo controintuitivo all'apparato teorico da cui le leggi stesse sono dedotte. Si deve notare, tuttavia, che questo tipo di contestualità apre nuove prospettive di sviluppo della teoria, suggerendo che possa esistere uno schema più ampio di leggi teoriche che fornisce leggi valide indipendentemente dal contesto di misura: la MQ sarebbe allora una teoria incompleta, come sosteneva Einstein. Inoltre l'interpretazione alternativa conserva le predizioni della MQ, poiché ogni predizione prende necessariamente la forma di una legge particolare testabile.

Tenendo conto di quanto precede, il gruppo di ricerca sui fondamenti della MQ di Lecce ha proposto in alcuni lavori uno schema teorico in cui le leggi della MQ sono spiegate come casi particolari di leggi più generali [25], [26], [27]. In questi lavori si accetta il principio O di Sezione 2, assumendo che tutte le proprietà predicabili per un dato sistema fisico siano, in ogni situazione fisica, possedute o non possedute dal sistema, nel senso che tutti gli enunciati osservativi della forma $P(x)$ (cfr. Sezione 5) hanno valore di verità, indipendentemente da ogni controllo empirico (*realismo semantico*). Si introduce poi, per ogni misura di una proprietà del sistema, una probabilità di non-rivelazione dipendente dalla proprietà stessa e dallo stato del sistema (cioè dall'insieme delle proprietà possedute dal sistema). La probabilità quantistica è allora reinterpretata assumendo che essa si riferisca solo al sottoinsieme di sistemi microscopici rivelabili dalla misura (supposta "esatta", e quindi con efficienza pari ad uno) e non all'insieme di sistemi che sono stati preparati e su cui si effettua la misura.

Questa ipotesi permette, da un lato, di recuperare il formalismo della MQ, e dall'altro di reinterpretare tale formalismo evitando la contestualità. Si deve notare, tuttavia, che i fisici sperimentali sostengono attualmente di fare osservazioni in cui sono rivelati tutti i sistemi preparati. Se tale rivendicazione fosse corretta, la proposta del gruppo di Lecce, che è falsificabile, sarebbe messa in discussione (ma non necessariamente falsificata).



[1] C. Dalla Pozza e A. Negro: *Come distinguere scienza e non-scienza*. Carocci Editore, Roma (2017).

[2] R. B. Braithwaite: *Scientific Explanation*. Cambridge University Press, Cambridge (1953).

[3] C. G. Hempel: *Aspects of Scientific Explanation*. Free Press, New York (1965).

[4] R. Carnap: *Philosophical Foundations of Physics*. Basic Books Inc., New York (1966).

[5] T. S. Kuhn: *The Structure of Scientific Revolution*. Chicago University Press, Chicago (1962).

[6] F. Feysabend: *Against Method: Outline of an Anarchist Theory of Knowledge*. New Left Books, London (1975).

[7] Tarski, A.: The concept of truth in formalized languages. In J.M. Woodger (Ed.), *Logic, Semantics, Metamathematics* (pp. 152-268). Oxford University Press, Oxford (1956).

[8] R. P. Feynmann: The Messenger Lecture Series at Cornell, Lecture 6. In *The Character of Physical Laws*. The MIT Press, 1967/1917 (1964).

[9] N. Bohr: *Atomic Physics and Human Knowledge*. John Wiley and Sons, London (1958).

[10] W. Heisenberg: *Physics and Philosophy: the Revolution of Modern Science*. Harper, New York (1958).

[11] C. Garola e S. Sozzo: (2010). Realistic aspects in the standard interpretation of quantum mechanics, *Humana.mente. J. Phil. Stud.* **13**, 81-101.

[12] J. S. Bell: On the Einstein-Podolski-Rosen Paradox, *Physics* **1** (1964), 195–200.

[13] J. S. Bell: On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics, *Rev. Mod. Phys.* **38** (1966), 447–452.

[14] S. Kochen e E. P. Specker: The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics, *J. Math. Mech.* **17** (1967), 59–87.

[15] G. Birkhoff and J. von Neumann: The Logic of Quantum Mechanics, *Ann. Math.* **37** (1936), 823–843.

[16] N. Rédei: *Quantum Logic in Algebraic Approach*. Kluwer, Dordrecht (1998).

[17] M. L. Dalla Chiara, R. Giuntini e R. Greechie: *Reasoning in Quantum Theory*. Kluwer, Dordrecht (2004).

[18] S. Haack: *Philosophy of Logic*. Cambridge University Press, Cambridge (1978).

[19] C. Garola: Physical propositions and quantum languages, *Int. J. Theor. Phys.* **47** (2008), 90-103.

[20] C. Garola e S. Sozzo: Recovering quantum logic within an extended classical framework, *Erkenntnis* **78** (2013), 399-419.

[21] D. Aerts: Foundations of quantum physics: a general realistic and operational approach, *Int. J. Theor. Phys.* **38** (1999), 289-358.

[22] C. Garola: Interpreting quantum logic as a pragmatic structure, *Int. J. Theor. Phys.* **56** (2017), 3770-3782.

[23] A. N. Kolmogorov: *Foundations of the Theory of Probability*. Chelsea Publishing Company, New York (1956).

[24] C. Garola: An epistemic interpretation of quantum probability via contextuality, *Found. Sci.* (2018), DOI 10.1007/s10699-018-9560-4.

[25] C. Garola e M. Persano: Embedding quantum mechanics into a broader noncontextual theory, *Found. Sci.* **19** (2014), 217-239.

[26] C. Garola: A survey of the ESR model for an objective interpretation of quantum mechanics, *Int. J. Theor. Phys.* **54** (2015), 4410-4422.

[27] C. Garola, S. Sozzo e J. Wu: Outline of a generalization and a reinterpretation of quantum mechanics recovering objectivity, *Int. J. Theor. Phys.* **55** (2016), 2500-2528.



Claudio Garola: è stato professore associato di Istituzioni di Fisica Teorica e professore ordinario di Logica e Filosofia della Scienza presso il Dipartimento di Fisica dell'Università del Salento, ed è attualmente in pensione. Durante il periodo di servizio ha tenuto corsi di Fisica Generale, Algebra, Istituzioni di Fisica Teorica e Fondamenti di Meccanica Quantistica. La sua attività di ricerca ha riguardato argomenti di fisica teorica, di elettromagnetismo, di algebra e di fondamenti della fisica. In particolare, nel settore dei fondamenti ha introdotto una metodologia non convenzionale, consistente nell'analizzare le strutture sintattiche e le proprietà semantiche dei linguaggi delle teorie fisiche per individuare i punti problematici e le assunzioni implicite che ne condizionano lo sviluppo. Dopo il pensionamento, nel 2011, ha continuato a collaborare con riviste internazionali e ha proseguito le ricerche iniziate nel periodo in cui era in servizio. I suoi lavori più recenti riguardano la logica quantistica, la probabilità quantistica e (in collaborazione) una generalizzazione della meccanica quantistica che ne modifica l'interpretazione standard, evitando noti paradossi.

