

---

# È possibile comprendere la Meccanica Quantistica?

**Claudio Garola**

*Dipartimento di Matematica e Fisica "E. De Giorgi", Università del Salento, Lecce*

---

## 1. Introduzione

Nonostante sia trascorso quasi un secolo dalla sua nascita, e nonostante il suo enorme successo esplicativo e predittivo, la meccanica quantistica è tuttora ritenuta una teoria fisica sconcertante, e il dibattito sulle sue possibili interpretazioni è ancora in corso. La maggioranza dei fisici accetta l'interpretazione detta di Copenhagen (o standard). Tuttavia da questa interpretazione conseguono numerosi paradossi, alcuni dei quali sono abbastanza noti anche fra i non addetti ai lavori: ad esempio, il paradosso del gatto di Schrödinger (un povero gatto si trova in uno stato ambiguo in cui non può essere né vivo né morto finché non è guardato da un osservatore dotato di coscienza); il paradosso dell'amico di Wigner (in cui nuovamente entra in gioco il ruolo della coscienza dell'osservatore: in questo caso quella dell'amico che osserva il gatto di Schrödinger e quella di Wigner che osserva l'amico); il paradosso di Einstein, Podolski e Rosen (non proposto, in realtà, da questi autori) in cui compare quella "spettrale azione a distanza" che tanto infastidiva Einstein. Chi ha più familiarità con la meccanica quantistica sa bene, poi, che ancora oggi non è chiaro come la descrizione del mondo microscopico che essa fornisce possa conciliarsi con la descrizione del mondo macroscopico fornita

dalla fisica classica. Inoltre, la meccanica quantistica sembra possedere, secondo alcuni autori, una sua propria logica, diversa dalla logica classica, e la probabilità quantistica ha struttura e proprietà diverse da quelle della probabilità classica. Per queste ragioni la meccanica quantistica è ritenuta anche da molti fisici una disciplina di difficile, se non impossibile, comprensione. È famosa, in particolare, un'affermazione di Richard Feynman (premio Nobel per la fisica nel 1965) risalente all'anno in cui ricevette il premio Nobel [1]:

"... I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics"

"... credo di poter dire con sicurezza che nessuno capisce la meccanica quantistica".

In tempi più recenti Steven Weinberg (premio Nobel per la fisica nel 1979) ha raccontato in una conversazione con Sabine Hossenfelder [2]:

"I've had a whole career without knowing what quantum mechanics is. I tell this story in one of the books that my colleague Philip Candelas was referring to a graduate student whose career essentially disintegrated, and I asked what went wrong, and he said, 'He

tried to understand quantum mechanics'. He could have a perfectly good career without it. But getting into the fundamentals of quantum mechanics is a losing game."

"Io ho fatto un'intera carriera senza sapere che cos'è la meccanica quantistica. Racconto questo fatto in uno dei libri che il mio collega Philip Candelas stava citando a uno studente laureato la cui carriera era stata fondamentalmente distrutta. Io gli chiesi che cosa fosse andato storto, ed egli disse 'ha provato a capire la meccanica quantistica'. Avrebbe potuto avere un'ottima carriera se lo avesse evitato. Ma entrare nel campo dei fondamenti della meccanica quantistica costituisce un gioco perdente."

Non avendo preso atto in tempo di queste autorevoli testimonianze, intorno al 1980 si è formato presso l'Università di Lecce un gruppo di ricerca sui fondamenti della fisica dedicato, in particolare, a studiare i problemi sollevati dalla meccanica quantistica.

Ma che cosa significa veramente capire una teoria? Molti ricercatori sembrano pensare che una teoria sia comprensibile quando è possibile costruirne un modello in cui le entità fondamentali siano rappresentate da entità geometriche intuitivamente accessibili, come le traiettorie dei punti materiali in meccanica classica o le onde in elettromagnetismo. Tuttavia, secondo l'opinione dominante modelli di questo tipo sono vietati in meccanica quantistica da espliciti teoremi, e quindi essa non può essere capita in questo modo.

D'altronde, anche se si intende la comprensibilità in un modo meno restrittivo, rinunciando a costruire modelli di tipo classico, molte previsioni della meccanica quantistica contrastano con l'intuizione fisica ordinaria (brevemente, la teoria è **controintuitiva**), come i paradossi citati sopra mettono bene in evidenza. È quindi ragionevole ritenere che un'analisi delle premesse implicite nella formazione di un'immagine intuitiva del mondo fisico possa permettere di riconoscere quali di esse siano rifiutate dalla mec-

canica quantistica, chiarendo in questo modo le ragioni della controintuitività di questa teoria e permettendo, almeno in questo senso, di capirla.

Nella prima parte del presente lavoro (Sezioni 2-8) si cerca pertanto di fornire un'analisi di questo tipo in un modo accessibile al lettore non specialista, individuando le scelte fondamentali che rendono controintuitiva la meccanica quantistica attraverso un costante confronto con la meccanica classica e mostrando poi come queste scelte siano all'origine anche delle cruciali differenze esistenti fra la probabilità quantistica e la probabilità classica. Basandosi principalmente sui risultati ottenuti dal gruppo di Lecce, l'analisi in questione presenta numerose novità rispetto alle trattazioni reperibili nella letteratura su temi simili. In particolare, lo studio dei presupposti epistemologici sottesi alla meccanica quantistica e alla nozione quantistica di probabilità è effettuato utilizzando strumenti elementari di logica formale e di statistica, al fine di analizzare il linguaggio della teoria sia da un punto di vista sintattico che da un punto di vista semantico. Si introduce in questo modo una prospettiva interdisciplinare che aiuta notevolmente a chiarire gli argomenti trattati.

La comprensione della meccanica quantistica così ottenuta, comunque, non ne elimina gli aspetti controintuitivi (anche se uno specialista potrebbe asserire di essere in grado di ristrutturare la propria intuizione fisica primaria adattandola alla teoria), le cui conseguenze negative non devono essere sottovalutate perché gran parte della creatività della nostra mente dipende da intuizioni che sono accettate e sistematizzate dalla parte cosciente della mente stessa. Anche per questo molti dei fisici che si sono occupati di fondamenti della meccanica quantistica si sono dedicati al problema di cercarne interpretazioni alternative o di modificarne alcuni aspetti tecnici per renderla più conforme all'intuizione, e quindi più comprensibile. Nella seconda parte del lavoro (Sezioni 9 e 10) si discutono pertanto alcune analisi effettuate dal gruppo di Lecce, da cui segue in particolare che esistono alternative logiche al punto di vista standard che non sono state individuate da altri autori e che possono ripristinare entro certi limiti l'intuitività della teoria.

Per concludere, conviene osservare che il pre-

sente lavoro rappresenta un complemento ideale di un precedente articolo su Ithaca [3], poiché ne amplia la prospettiva interdisciplinare, ne riprende alcuni temi approfondendoli e completandoli, e introduce ulteriori analisi ed esempi. Tuttavia esso è autosufficiente, e la sua lettura non richiede la conoscenza dell'articolo precedente.

## 2. Il linguaggio della meccanica classica e della meccanica quantistica.

Sia in meccanica classica sia in meccanica quantistica si introduce nel linguaggio teorico (vedi l'inserto) la nozione primitiva di **sistema fisico** (di cui sono esempi il punto materiale, il corpo rigido, ecc., in meccanica classica, e l'elettrone, l'atomo di idrogeno, ecc., in meccanica quantistica). Dato un sistema fisico, si introduce poi la nozione teorica di **stato** del sistema. Comunque tale nozione sia definita (esistono in proposito punti di vista diversi), uno stato di un sistema fisico può essere interpretato empiricamente su una classe di apparati macroscopici tra loro fisicamente equivalenti (brevemente, **preparazioni**), atti a preparare esemplari individuali del sistema fisico (brevemente, **oggetti fisici**) [10, 11]. Dato uno stato  $S$ , scegliendo una o più preparazioni ad esso associate e attivandole ripetutamente si produce un insieme di oggetti fisici che "sono nello stato  $S$ ". Questo insieme costituisce una **popolazione** dal punto di vista degli studiosi di statistica. Ovviamente si può produrre un numero arbitrario di insiemi (popolazioni) di oggetti fisici nello stato  $S$ , su cui si possono effettuare tutte le misure che si desiderano, e questa procedura può essere ripetuta per ogni stato del sistema fisico.

Sia in meccanica classica sia in meccanica quantistica, per ogni sistema fisico si introducono poi ulteriori entità teoriche fondamentali: la nozione di **grandezza fisica** (in meccanica classica) e di **osservabile** (in meccanica quantistica), la nozione di **valore** di una grandezza fisica/osservabile e la nozione di **insieme di valori** che una data grandezza fisica/osservabile può assumere. Queste nozioni corrispondono alle nozioni statistiche di **carattere**, **modalità** e **spazio campionario**, rispettivamente. Ogni grandez-

za fisica/osservabile  $A$  può essere interpretata empiricamente su una classe di apparati macroscopici tra loro fisicamente equivalenti, atti ad effettuare misure che hanno come risultato valori (o insiemi di valori) di  $A$ .

Una classe particolarmente importante di grandezze fisiche/osservabili di un sistema fisico è quella costituita da tutte le grandezze fisiche/osservabili **dicotomiche** (quelle, cioè, che possono assumere due soli valori: convenzionalmente, 0 e 1). Infatti, si considerino per semplicità solo grandezze fisiche/osservabili il cui insieme di possibili valori (spazio campionario) è finito o numerabile (grandezze fisiche/osservabili **discrete**: se una grandezza fisica/osservabile non è discreta intervengono complicazioni matematiche che non interessano ai fini della presente discussione). Se  $A$  è una grandezza fisica/osservabile discreta e  $\Delta$  è un sottoinsieme di valori di  $A$ , la coppia  $E = (A, \Delta)$  può essere interpretata come la **proprietà** "avere valore di  $A$  in  $\Delta$ ". A questa proprietà si associa allora una grandezza fisica/osservabile dicotomica, denotata per brevità ancora con  $E$ , interpretata da un punto di vista empirico su una classe di equivalenza di apparati che misurano  $A$  e assegnano a  $E$  un valore (in genere, 1) quando il risultato appartiene a  $\Delta$ , un altro valore (in genere, 0) in caso contrario. Effettuando su un oggetto fisico  $a$  una misura di questo tipo si potrà controllare empiricamente se  $a$  possiede la proprietà  $E$  (risultato 1) o se  $a$  non la possiede (risultato 0). La proprietà  $E$  è quindi una proprietà **misurabile**. Variando  $\Delta$  è poi possibile associare a ogni grandezza fisica/osservabile  $A$  una famiglia  $\mathcal{E}_A$  di proprietà (misurabili) della forma  $(A, \Delta)$ , ed è facile riconoscere che  $\mathcal{E}_A$  individua a sua volta univocamente la grandezza fisica/osservabile  $A$ . L'unione di tutte le famiglie di questo tipo costituisce allora l'insieme  $\mathcal{E}$  di tutte le proprietà (misurabili) associate al sistema fisico considerato. Questa definizione di  $\mathcal{E}$  permette di introdurre una formalizzazione elementare degli elementi di base del linguaggio teorico di una teoria fisica. Infatti, data una costante individuale  $a$  che denota un oggetto fisico e utilizzando per brevità lo stesso simbolo per denotare una proprietà e il predicato che la esprime, l'insieme  $\mathcal{E}$  può essere associato biunivocamente all'insieme di enunciati  $\mathcal{E}(a) = \{E(a) | E \in \mathcal{E}\}$ , dove  $E(a)$  esprime

## Il linguaggio di una teoria

Secondo la concezione sintattica delle teorie, o punto di vista ricevuto [4, 5, 6] (vedi anche [3], Sezione 3) si devono distinguere nel linguaggio di una teoria fisica un linguaggio osservativo  $L_O$ , interpretato tramite regole di assegnamento su un dominio empirico, e un linguaggio teorico  $L_T$  connesso con  $L_O$  tramite regole di corrispondenza. L'interpretazione empirica di  $L_T$  è allora ottenuta combinando i due tipi di regole, osservando che essa è in genere solo indiretta (perché possono esistere in  $L_T$  termini teorici primitivi che sono interpretati empiricamente solo tramite l'interpretazione empirica di termini teorici derivati) e incompleta (perché può accadere che non tutti i valori possibili delle entità teoriche abbiano interpretazione empirica). Questa concezione epistemologica è divenuta standard nella prima metà del secolo scorso, ma è stata duramente contestata nella seconda metà del secolo e molti filosofi della scienza ritengono che essa debba essere sostituita da una concezione semantica delle teorie [7]. Anche quest'ultima posizione, peraltro, è stata messa in discussione in tempi relativamente recenti [8]. Indipendentemente da questi sviluppi, vi sono distinzioni proposte dal punto di vista ricevuto che possono essere ritenute ancora utili se si fa riferimento a una ricostruzione razionale delle teorie prese in esame e non alla loro realtà storica concreta, in cui le varie distinzioni si confondono e si mischiano. Esse possono quindi essere adottate per facilitare la comprensione dei diversi livelli concettuali che intervengono nella formulazione di una teoria fisica.

In particolare, si può ritenere che ogni teoria fisica matura proponga tramite il suo linguaggio teorico  $L_T$  modelli teorici di parti del mondo da cui conseguono in genere anche ipotesi su distribuzioni di probabilità. Queste corrispondono alle ipotesi nulle degli statistici, cioè alle ipotesi iniziali sulla probabilità da cui si parte in un'analisi statistica per confrontarle con i dati sperimentali ed eventualmente modificarle di conseguenza [9]. La nozione di frequenza (introdotta nel linguaggio osservativo  $L_O$ ) specifica infatti come effettuare controlli empirici che possono confermare o falsificare tali ipotesi. Quando si ottiene una falsificazione l'intera descrizione è messa in dubbio e occorre rivedere non solo le ipotesi sulle distribuzioni di probabilità ma anche l'apparato teorico e interpretativo che le ha generate.

formalmente l'enunciato **elementare** (o **atomico**) "l'oggetto fisico  $a$  possiede la proprietà  $E$ ". Si può quindi convenire che all'enunciato  $E(a)$  sia assegnato valore di verità vero ( $V$ ) quando  $a$  possiede la proprietà  $E$ , e valore di verità falso ( $F$ ) quando non la possiede. Da un punto di vista epistemologico l'enunciato  $E(a)$  è quindi **osservativo**, nel senso che il suo valore di verità è suscettibile di controllo empirico tramite la misura dicotomica associata a  $E$ . Tenendo conto del fatto che un controllo di questo tipo può avvenire in situazioni fisiche molto diverse (**contesti di misura nel seguito**), si può scegliere una delle due opzioni seguenti.

OP1 Si può assumere che ogni proprietà possibile per un dato oggetto fisico sia o posseduta o non posseduta dall'oggetto indipendentemente da ogni misura che possa essere eseguita su di esso. In questo caso, per ogni

oggetto fisico  $a$  esiste un assegnamento di valori di verità  $\sigma_a : \mathcal{E}(a) \rightarrow \{V, F\}$  e, data una proprietà  $E$ , una sua misura su  $a$  ha il solo scopo di far conoscere allo sperimentatore se  $a$  la possiede, e quindi di informarlo sul valore di verità dell'enunciato  $E(a)$ .

OP2 Si può assumere che una proprietà possibile per un oggetto fisico  $a$  sia posseduta o non posseduta dall'oggetto solo in seguito a una sua misura effettuata in uno specifico contesto di misura, contesti diversi potendo condurre a risultati diversi e non necessariamente determinati in modo univoco dai contesti stessi. In questo caso non può esistere un'assegnazione di valori di verità a enunciati di  $\mathcal{E}(a)$  che sia indipendente da processi di misura, e questi ultimi assumono un ruolo attivo nella determinazione della

realtà fisica invece di portare a conoscenza dello sperimentatore un'informazione su una situazione fisica preesistente.

L'opzione OP1 esprime in termini fisici una concezione della realtà materiale che è radicata nell'intuizione comune e nel linguaggio naturale, che è fatta propria dalla meccanica classica (e, più in generale, dalla fisica classica) e che è coerente con la nozione della verità come corrispondenza introdotta in logica classica, secondo cui la verità di un enunciato dipende dallo stato delle cose e non dalla conoscenza che è possibile ottenerne tramite indagine empirica [12].

L'opzione OP2 esprime una concezione **globalistica** secondo cui le proprietà degli oggetti fisici dipendono dall'intera situazione fisica considerata, e quindi anche dagli apparati di misura impiegati per studiarle. Una prospettiva di questo tipo è controintuitiva, ma è logicamente consistente ed è fatta propria dall'interpretazione standard della meccanica quantistica. Essa implica in particolare che non si possa assegnare un valore di verità a un enunciato  $E(a)$  se non dopo una misura di  $E$  in un contesto opportuno, coerentemente con una identificazione della nozione di verità con la nozione di verifica su cui si ritornerà nella Sezione 6.

### 3. Stati puri e miscele.

Sia in meccanica classica sia in meccanica quantistica l'insieme  $S$  di tutti gli stati è costituito dall'unione di due sottoinsiemi disgiunti,  $\mathcal{P}$  (sottoinsieme degli **stati puri**) e  $\mathcal{M}$  (sottoinsieme degli **stati miscela** o, brevemente, delle **miscele**). Ogni stato puro è interpretato su una classe di preparazioni che, se attivate, preparano esemplari del sistema fisico fra loro identici dal punto di vista della teoria adottata. Si tratta tuttavia di una idealizzazione, che prescinde dal margine di incertezza intrinseco ad ogni procedura empirica. In genere, una preparazione reale, quando è attivata, prepara un oggetto fisico in uno stato puro, ma un'attivazione successiva della stessa procedura prepara un nuovo oggetto fisico in uno stato puro che può essere diverso dal precedente a causa di fattori casuali incontrollabili nella preparazione stessa. Per tener conto delle preparazioni di questo tipo si introducono nel-

l'apparato teorico della meccanica classica e della meccanica quantistica gli stati miscela, ognuno dei quali è associato a una distribuzione di probabilità sull'insieme degli stati puri. In particolare, se la distribuzione è tale che il valore della probabilità è diverso da zero solo su un sottoinsieme discreto  $\mathcal{Q}$  di stati puri, allora la miscela può essere descritta assegnando  $\mathcal{Q}$  e associando a ogni stato in  $\mathcal{Q}$  un peso. Una miscela di questo tipo è interpretata su una classe di preparazioni che, se attivate, preparano oggetti fisici in uno stato puro appartenente a  $\mathcal{Q}$  con probabilità pari al peso che tale stato ha nell'espressione della miscela.

### 4. La struttura dell'insieme delle proprietà in meccanica classica e in meccanica quantistica.

Ognuna delle entità teoriche introdotte nelle Sezioni 2 e 3 ha una rappresentazione matematica che ovviamente varia con la teoria che si adotta. In particolare, gli stati puri sono rappresentati in meccanica classica da punti di uno spazio delle fasi  $\mathcal{F}$  associato al sistema fisico, mentre in meccanica quantistica essi sono rappresentati da vettori di modulo uno di uno spazio di Hilbert  $\mathcal{H}$  associato al sistema (o, in presentazioni più avanzate, da operatori di proiezione ortogonale monodimensionali su  $\mathcal{H}$ ).

Si consideri ora l'insieme  $\mathcal{E}$  di tutte le proprietà di un sistema fisico in meccanica classica, dove si esercita l'opzione OP1. Ogni proprietà è rappresentata in questo caso da un sottoinsieme dello spazio  $\mathcal{F}$ . La relazione di inclusione fra i sottoinsiemi che rappresentano proprietà è ovviamente una relazione d'ordine (parziale), ed è possibile dimostrare che essa dota  $\mathcal{E}$  di una struttura d'ordine particolare, detta di **reticolo distributivo**. Poiché per ogni oggetto fisico  $a$  esiste una corrispondenza biunivoca fra  $\mathcal{E}$  ed  $\mathcal{E}(a)$  (vedi Sezione 2), anche  $\mathcal{E}(a)$  è dotato della stessa struttura, e tale struttura è identica (a meno di una relazione di equivalenza logica di cui non ci si occuperà qui per ragioni di brevità) a quella che è posseduta dall'insieme delle proposizioni di una logica classica (algebra di Boole). Questo fatto ha portato alcuni autori ad asserire che la logica classica è la logica della meccanica classica. È importante però notare

che la struttura di  $\mathcal{E}$  deriva dalle relazioni fra proprietà stabilite dalla meccanica classica. In particolare, dato un insieme di proprietà, esiste sempre in meccanica classica un insieme di misure che permette di stabilire quali proprietà sono possedute e quali sono non possedute dall'oggetto fisico considerato: tutte le proprietà sono cioè **congiuntamente misurabili**. Conseguentemente, sia la negazione di una proprietà che la congiunzione e la disgiunzione di due o più proprietà appartengono a  $\mathcal{E}$ , nel senso che esse equivalgono logicamente a proprietà (misurabili) di  $\mathcal{E}$ <sup>1</sup>. Quindi la struttura di  $\mathcal{E}$  consegue dai postulati di una teoria empirica. La struttura di reticolo distributivo della logica classica dipende invece solo dal senso attribuito ai connettivi fondamentali (negazione, congiunzione, disgiunzione), e non dall'interpretazione di predicati e costanti elementari. Per questo motivo la logica classica può essere intesa come formalizzazione di una modalità fondamentale di ragionamento indipendente dal contenuto dei temi trattati. I rapporti fra logica e meccanica classica non sono quindi ovvi, e sono stati studiati in particolare dal gruppo di Lecce [13].

Si consideri poi l'insieme  $\mathcal{E}$  di tutte le proprietà in meccanica quantistica. Ogni proprietà è rappresentata in questo caso da un sottospazio (chiuso) di  $\mathcal{H}$  (equivalentemente, da un operatore di proiezione ortogonale su  $\mathcal{H}$ ). La relazione di inclusione fra sottospazi che rappresentano proprietà è una relazione d'ordine (parziale), ed è possibile dimostrare che essa dota  $\mathcal{E}$  di una struttura d'ordine particolare, detta di **reticolo ortomodulare** (più debole di quella di **reticolo distributivo**). Come in meccanica classica, la corrispondenza biunivoca esistente fra  $\mathcal{E}$  e  $\mathcal{E}(a)$  implica che  $\mathcal{E}(a)$  sia dotata della stessa struttura. Inoltre, anche in questo caso tale struttura deriva dalle relazioni fra proprietà stabilite dalla teoria fisica. In particolare, esistono in meccanica quantistica coppie di proprietà che non sono congiuntamente misurabili perché le misure necessarie per determinare se una di esse è posseduta o non

<sup>1</sup>Ad esempio, una scatola nera entro cui avvengono congiuntamente una misura di una proprietà  $E = (A, \Delta)$  e quella di una proprietà  $F = (B, \Gamma)$ , producendo in uscita risultato 1 se entrambe le misure hanno dato risultato 1 e risultato 0 negli altri casi, rappresenta un apparato che misura una proprietà logicamente equivalente alla congiunzione di  $E$  e di  $F$ .

posseduta dall'oggetto fisico considerato non sono compatibili con le misure necessarie per effettuare la stessa indagine sull'altra. Per tener conto di questo fatto si introduce una relazione binaria di **compatibilità** su  $\mathcal{E}$  che raccoglie tutte e sole le coppie formate da proprietà congiuntamente misurabili. Poiché alle proprietà in  $\mathcal{E}$  è richiesto di essere misurabili, possono esistere proprietà logicamente equivalenti alla congiunzione e alla disgiunzione classiche di più proprietà solo se queste ultime sono a due a due compatibili. Per questo la struttura di  $\mathcal{E}$  in meccanica quantistica è diversa dalla struttura di  $\mathcal{E}$  in meccanica classica: tuttavia anch'essa consegue dai postulati di una teoria empirica e non da un senso attribuito ai connettivi fondamentali indipendentemente dall'interpretazione dei predicati e delle costanti elementari [13].

Conviene rilevare, comunque, che le proprietà in  $\mathcal{E}$  sono anche chiamate in meccanica quantistica **proposizioni** [14], e il reticolo non Booleano delle proposizioni è chiamato da alcuni autori **logica quantistica** [15, 16]. Conseguentemente le operazioni che vi compaiono sono interpretate come connettivi logici non classici, esprimenti le proprietà di una nozione tipicamente quantistica di verità che non coincide né con la nozione classica né con la nozione della verità come verifica-zione. A tale posizione possono essere mosse alcune obiezioni. In particolare, si è visto sopra che in meccanica quantistica la struttura di **reticolo ortomodulare** dell'insieme  $\mathcal{E}$  ha natura empirica e non caratterizza quindi una ipotetica modalità di ragionamento alternativo che sarebbe tipica della meccanica quantistica. Inoltre, se si accetta l'interpretazione *standard*, non sembra possibile definire una nozione di verità adeguata in base alle sole caratteristiche algebriche del reticolo, poiché tali caratteristiche, essendo stabilite una volta per tutte, non possono tener conto delle variazioni dei valori di verità al variare dei contesti di misura.

## 5. Verità e probabilità in meccanica classica e in meccanica quantistica.

Le nozioni di verità e di probabilità in meccanica quantistica hanno interpretazione e caratteristi-

che formali diverse da quelle che esse hanno in meccanica classica.

In meccanica classica, dato un oggetto fisico  $a$  preparato in uno stato puro  $S$ , si assume che lo stato determini univocamente quali proprietà siano possedute da  $a$ , indipendentemente da ogni processo di misura, coerentemente con la scelta dell'opzione OP1. Lo stato  $S$  determina quindi univocamente un'assegnazione di verità su  $\mathcal{E}(a)$ , che è la stessa per ogni oggetto fisico in  $S$ . Non compare invece in meccanica classica alcun riferimento esplicito alla probabilità quando si considerano solo preparazioni ideali associate a stati puri. Da un punto di vista fisico, comunque, l'assunzione fatta equivale a supporre che  $S$  assegni un valore della probabilità uguale a 0 oppure a 1 a ogni enunciato di  $\mathcal{E}(a)$  (equivalentemente, a ogni proprietà di  $\mathcal{E}$ ). Se poi si considera una miscela  $M$ , a ogni proprietà  $E$  sarà associata una probabilità data dalla somma dei pesi di tutti gli stati puri che compaiono in  $M$  e in cui la probabilità di  $E$  è pari a 1. Poiché  $\mathcal{E}(a)$  ha una struttura di reticolo distributivo, è possibile dimostrare che entrambe queste assegnazioni di probabilità soddisfano gli assiomi della teoria classica della probabilità.

In meccanica quantistica, invece, se si adotta l'interpretazione standard si può assegnare un valore di verità a un enunciato  $E(a)$  di  $\mathcal{E}(a)$ , dove  $a$  denota un oggetto fisico qualsiasi, solo dopo una misura, e tale valore dipende non solo da  $E$  e da  $a$  ma anche dal contesto di misura, coerentemente con la scelta dell'opzione OP2. Inoltre, se  $a'$  denota un oggetto fisico diverso da  $a$ , il valore di verità di  $E(a')$  dopo una misura può essere diverso dal valore di verità di  $E(a)$  anche se  $a$  e  $a'$  sono nello stesso stato e se si adotta per entrambi lo stesso contesto di misura. Se poi si considera una proprietà  $F$  diversa da  $E$ , si potrà assegnare un valore di verità anche a  $F(a)$  solo se  $F$  è compatibile con  $E$  (vedi Sezione 4): pertanto, solo assegnazioni parziali di verità su  $\mathcal{E}(a)$  sono possibili in meccanica quantistica secondo l'interpretazione standard. Ciò nonostante, dato uno stato puro  $S$ , si assume che  $S$  assegni a ogni proprietà  $E$  un valore  $P_S(E)$  appartenente all'intervallo  $[0, 1]$  che rappresenta la probabilità che  $E$  risulti posseduta da un qualsiasi oggetto fisico nello stato  $S$  quando se ne esegue una misura, indipendentemente dal contesto di misura

adottato e dall'oggetto fisico considerato (tecnicamente tale probabilità è assegnata dalla legge di Born, che fa parte dello schema teorico della meccanica quantistica). Poiché  $\mathcal{E}$  ha ora una struttura di reticolo ortomodulare, questa assegnazione di probabilità non soddisfa gli assiomi della probabilità classica. La meccanica quantistica introduce così un nuovo tipo di probabilità, la probabilità quantistica, la cui struttura matematica e la cui interpretazione richiedono uno studio specifico (vedi Sezione 7). Per quanto riguarda poi le miscele, è evidente che anch'esse introducono un'assegnazione di probabilità non classica su  $\mathcal{E}$ , e quindi su  $\mathcal{E}(a)$ , e che in tale assegnazione le probabilità descritte dai pesi e quelle assegnate dagli stati puri che compongono la miscela compaiono congiuntamente.

Da un punto di vista statistico, infine, per ogni stato  $S$  (puro o miscela) la misura di probabilità su  $\mathcal{E}$  può essere considerata (per generalizzazione) l'ipotesi nulla associata a  $S$  (vedi l'inserito). In meccanica quantistica, in particolare, i controlli empirici sulle distribuzioni di frequenza delle proprietà nelle popolazioni di oggetti fisici, effettuati su un numero enorme di stati e di oggetti fisici, hanno sempre mostrato la correttezza delle ipotesi nulle associate agli stati. Le previsioni della meccanica quantistica sono così state confermate e le ipotesi nulle in questione accettate come predittive delle frequenze che si otterrebbero se si effettuassero ulteriori esperimenti.

## 6. La contestualità della meccanica quantistica.

Si è osservato nella Sezione 2 che la scelta dell'opzione OP2 per quanto riguarda l'assegnazione di valori di verità a enunciati elementari della forma  $E(a)$  effettuata dall'interpretazione standard della meccanica quantistica è controintuitiva. Pertanto, molti fisici si sono chiesti se esistano interpretazioni alternative della teoria che permettano di evitarla. Infatti, se la meccanica quantistica, essendo una teoria probabilistica, fosse in realtà una teoria incompleta [17], un suo completamento potrebbe permettere di ritornare all'opzione OP1 evitando numerose difficoltà concettuali e paradossi (nascono da questa idea, in particolare, i tentativi di completare la meccanica quantistica

introducendo variabili nascoste). La maggioranza dei fisici ritiene tuttavia che l'opzione OP1 sia inconsistente con le altre assunzioni della meccanica quantistica. Come si è già visto in [3], esistono infatti alcuni teoremi risalenti alla seconda metà del secolo scorso (in particolare i teoremi di Bell [18] e di Bell-Kochen-Specker [19, 20]) i quali, opportunamente riformulati in tempi successivi [21, 22] dimostrano, secondo l'opinione corrente, che il formalismo matematico della meccanica quantistica implica che si possa assegnare una proprietà  $E$  a un oggetto fisico  $a$  (equivalentemente, un valore di verità a un enunciato della forma  $E(a)$ ) solo in seguito a una misura di  $E$  effettuata in un contesto in cui si misurano unicamente proprietà compatibili fra loro e con  $E$ , e che tale assegnazione (equivalentemente, il valore di verità di  $E(a)$ ) dipende dall'insieme di tali proprietà, cioè, brevemente, dal contesto di misura scelto. Questi teoremi costituirebbero quindi una prova del fatto che in meccanica quantistica la scelta dell'opzione OP2 è inevitabile. Si riassume usualmente questo risultato affermando che la meccanica quantistica è una teoria secondo cui una possibile proprietà di un oggetto fisico non può essere né posseduta né non posseduta dall'oggetto prima di una misura che stabilisca il contesto entro cui la proprietà è considerata. Questa **contestualità** implica quindi che le proprietà di un oggetto fisico siano **non-oggettive**: esse cioè non sono indipendenti dall'osservazione. Inoltre, il teorema di Bell mostra che in un sistema fisico composto da più parti una misura su una parte del sistema può influenzare l'esito di una misura su un'altra parte che si trova a distanza arbitraria dalla prima. La dipendenza dal contesto di misura delle proprietà possedute da un oggetto fisico, quindi, non ha solo carattere locale, e questo fatto la rende particolarmente difficile da accettare da un punto di vista intuitivo.

I teoremi di Bell e Bell-Kochen-Specker, comunque, sono molto posteriori alla data di nascita della meccanica quantistica. È opportuno ricordare, pertanto, che la contestualità e la conseguente non-oggettività delle proprietà hanno fatto parte dell'interpretazione della meccanica quantistica fin dalle origini, ben prima che esse fossero supportate in modo analitico dai teoremi in questione. Una ragione profonda di questo

fatto risiede nell'adozione implicita di una nozione della verità come verifica, di stampo neopositivistico, secondo la quale un enunciato ha significato, e quindi valore di verità, se e solo se è "verificabile in linea di principio tramite l'esperienza" [23]. Una concezione del significato e della verità di questo tipo non comporta modifiche rilevanti del linguaggio della meccanica classica poiché in questa teoria sia gli enunciati atomici che gli enunciati molecolari (gli enunciati, cioè, composti mediante enunciati atomici e connettivi come non, e, o, ecc.) sono suscettibili di controllo empirico (osservativi), almeno in linea di principio.

In meccanica quantistica, invece, esistono proprietà incompatibili, come si è visto al termine della Sezione 4. Secondo la concezione della verità come verifica questo fatto impedisce di attribuire simultaneamente valori di verità a tutti gli enunciati atomici della forma  $E(a)$ , ed esistono in meccanica quantistica enunciati molecolari che non hanno valore di verità e che i fisici hanno spesso classificato come "privi di senso" (ad esempio la nota asserzione "la particella che si considera ha coordinata  $q$  e momento  $p$  all'istante  $t$ "). Quindi solo assegnazioni parziali di verità su  $\mathcal{E}(a)$  sono possibili, l'opzione OP1 non è accettabile, ed è necessario scegliere l'opzione OP2, come fa l'interpretazione standard, da cui derivano la contestualità della teoria e la non-oggettività delle proprietà. Heisenberg sintetizzò questa posizione sostenendo che ogni proprietà di un oggetto fisico dovesse essere considerata potenziale prima di una sua misura, e che essa potesse diventare attuale solo in seguito alla misura stessa [24]. Questa terminologia è stata a volte criticata come metafisica perché sembra far riferimento a una realtà che trascende ogni controllo empirico diretto o indiretto, ma può anche essere intesa semplicemente come espressione sintetica di quanto dimostrato dai teoremi di Bell e di Kochen e Specker.

Esiste infine un famoso esperimento ideale, detto esperimento delle due fenditure, la cui versione concreta è stata più volte realizzata in laboratorio, e che è ancor oggi utilizzato a scopi didattici in alcuni manuali di meccanica quantistica, il quale sembra dimostrare che la non-oggettività delle proprietà nel caso di sistemi fisici microscopici è inevitabile, anche in-

dipendentemente dalla descrizione del mondo fornita dalla meccanica quantistica. Se questo fosse vero, si tratterebbe di un risultato molto importante perché proverebbe che la scelta dell'opzione OP2 è una condizione che deve essere imposta a priori a ogni teoria del mondo microscopico. L'esperimento delle due fenditure sarà perciò descritto e analizzato nella Sezione 9.1.

## 7. Contestualità e probabilità.

La scelta fra le opzioni OP1 e OP2 in Sezione 2 è rilevante anche agli effetti della comprensione del ruolo della probabilità nella teoria che si considera. Se ci si pone in una prospettiva di **realismo scientifico** secondo cui le entità teoriche e le leggi delle teorie descrivono entità e relazioni realmente esistenti in un mondo esterno a noi e si sceglie l'opzione OP1, come in meccanica classica, la probabilità è introdotta per tener conto della mancanza di conoscenza di alcuni aspetti del mondo ed è interpretata come misura indiretta di tale carenza. Per questo motivo essa è usualmente detta **epistemica**.

Se invece ci si pone nella stessa prospettiva ma si sceglie l'opzione OP2, come accade in meccanica quantistica quando si adotta l'interpretazione standard, la probabilità assume un ruolo di entità primaria, costitutiva del mondo stesso, poiché la contestualità implica che non vi siano proprietà oggettive di cui non si ha conoscenza antecedentemente alla loro misura, ma solo probabilità di oggettivazione di proprietà quando si effettuano misure. In questo caso la probabilità è usualmente detta **ontica**.

Questa terminologia può anche essere intesa in senso puramente semantico, evitando di accettare una posizione di realismo scientifico, se si tiene conto di quanto detto nella Sezione 2. Una distribuzione di probabilità può infatti essere detta epistemica quando si riferisce a un insieme di enunciati su cui è definibile un'assegnazione di verità indipendente da ogni processo di misura, ontica nel caso contrario. Comunque essa sia intesa, la distinzione fra i due tipi di probabilità è importante in meccanica quantistica quando si considerano miscele, poiché in una miscela la probabilità descritta dai pesi deve essere considerata epistemica (essa esprime la mancanza di

conoscenza dello stato effettivo di un dato oggetto fisico, vedi Sezione 3) mentre le probabilità associate agli stati puri debbono essere considerate ontiche (vedi sezione 5). Il fatto che nelle formule questi due tipi di probabilità compaiano congiuntamente crea seri problemi interpretativi quando si considerano le diverse espressioni matematiche che descrivono la stessa miscela [25].

In lavori recenti, comunque, è stato proposto di accettare la contestualità della meccanica quantistica incorporandola nel linguaggio di base della teoria [26, 27]. Su questo linguaggio è allora possibile definire assegnazioni di verità consistenti con la meccanica quantistica e ottenere la probabilità quantistica come media pesata di probabilità classiche. Si può recuperare in questo modo un'interpretazione epistemica (misura indiretta di ignoranza) della probabilità quantistica, e così dimostrare che la contestualità della meccanica quantistica non implica che la probabilità quantistica debba necessariamente essere considerata ontica.

## 8. Contestualità e non-oggettività: problemi e paradossi.

Nonostante i risultati esposti al termine della sezione precedente, la contestualità resta una caratteristica controintuitiva della meccanica quantistica. Si è visto infatti in Sezione 2 che l'opzione OP2 è incompatibile con l'opzione OP1 che è implicitamente (e di solito inconsapevolmente) adottata quando ci si riferisce alle proprietà di oggetti macroscopici della vita quotidiana nel linguaggio naturale. Una prima conseguenza della contestualità, in particolare, è l'impossibilità di costruire un modello geometrico-intuitivo del mondo simile a quello proposto dalla meccanica classica e dalla relatività generale, perché in un modello di questo tipo tutte le possibili proprietà di un sistema fisico sono o possedute o non possedute dal sistema indipendentemente da ogni processo di misura: il modello non è cioè contestuale.

Fin dalla nascita della meccanica quantistica questa impossibilità ha problematizzato scienziati e filosofi, specialmente quelli che tendevano a

interpretare i modelli come descrittivi di entità e relazioni realmente esistenti nel mondo, coerentemente con una prospettiva di realismo scientifico (vedi Sezione 7), dando origine al tradizionale dilemma riguardante la natura dei sistemi fisici microscopici: onde o particelle? Ed è forse per questa stessa impossibilità che Feynman asseriva di non capire la meccanica quantistica (vedi Sezione 1). Se così fosse, tuttavia, l'affermazione di Feynman confonderebbe la comprensione di una teoria con la costruzione di un modello intuitivamente soddisfacente della teoria stessa.

Un secondo problema tradizionale della meccanica quantistica, derivante anch'esso dalla contestualità, è il problema della **macrooggettivazione**, che sorge se si assume che la meccanica quantistica sia una teoria generale, applicabile all'intero universo fisico [28]. Infatti, quando si introduce questa assunzione epistemologica e si considera un processo di misura su un oggetto fisico microscopico, anche l'apparato di misura che interagisce con l'oggetto deve essere descritto come un sistema quantistico e la non-oggettività delle proprietà si estende dalle proprietà dell'oggetto microscopico a quelle dell'apparato macroscopico. Non si comprende allora come possa avvenire un processo di attualizzazione che permetta di osservare proprietà oggettive dell'apparato di misura da cui risalire a proprietà dell'oggetto fisico, anch'esse attualizzate. L'eventuale introduzione di un ulteriore apparato che osservi il sistema formato dall'oggetto microscopico e dall'apparato di misura non risolve il problema ma lo ripropone per quanto riguarda il nuovo apparato, e la ripetizione di questa procedura produce una successione di apparati (la "catena di von Neumann") che può procedere all'infinito se non interviene un processo di attualizzazione che la interrompe. Secondo alcuni autori, l'interruzione avverrebbe quando nella catena si inserisce un osservatore cosciente [29, 30] al posto di un apparato di misura: un osservatore di questo tipo si sottrarrebbe quindi alla descrizione del mondo fornita dalla meccanica quantistica e la coscienza contribuirebbe in modo sostanziale all'attualizzazione del mondo fisico. Questa posizione è ben illustrata dai paradossi del gatto di Schrödinger e dell'amico di Wigner citati in Sezione 1. In tempi più recenti sono stati fatti numerosi tentativi di risolvere

il problema della macrooggettivazione evitando l'intervento della coscienza, come la teoria della riduzione spontanea [31], la teoria della decoerenza [32], ecc. Tuttavia nessuno di essi ha ricevuto finora un consenso generalizzato.

Non tutti gli autori, comunque, hanno accettato l'idea che la meccanica quantistica costituisca una teoria universalmente applicabile a tutto il mondo fisico. Fin dalle origini della meccanica quantistica molti fisici hanno ritenuto che il mondo microscopico e il mondo macroscopico richiedessero descrizioni diverse, il primo essendo descritto dalla meccanica quantistica, il secondo dalla fisica classica [24, 33]. Tuttavia anche questa prospettiva è problematica. Non è chiaro infatti se esista una linea di confine fra i due mondi e, se non esiste, come debbano essere trattati i fenomeni fisici che, secondo i punti di vista, possono appartenere sia all'uno che all'altro. L'esistenza, poi, di fenomeni macroscopici che ammettono solamente una spiegazione in termini quantistici mette ulteriormente in discussione posizioni di questo tipo.

Infine, la contestualità della meccanica quantistica (che si ritrova nei suoi sviluppi più evoluti, come la teoria quantistica dei campi) costituisce almeno una delle ragioni profonde delle difficoltà incontrate nella costruzione di una teoria più ampia che comprenda sia la relatività generale che la meccanica quantistica. Essa implica infatti che una unificazione delle due teorie deve comportare modifiche rilevanti dall'apparato teorico e/o dell'interpretazione di almeno una di esse.

## 9. Un'analisi critica della contestualità.

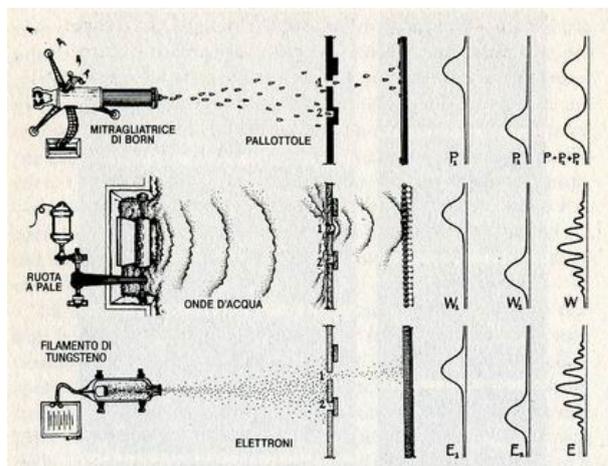
Le difficoltà causate dalla contestualità e illustrate nella sezione precedente suggeriscono che sia opportuno effettuare un'analisi critica dei modi in cui essa è dimostrata, per verificare se essa sia, come comunemente si crede, una conseguenza ineludibile del formalismo della meccanica quantistica, o se non sia invece possibile, almeno in linea di principio, evitarla, reinterpretando la meccanica quantistica ed eventualmente immergendo la meccanica quantistica stessa in una teoria più generale e non-contestuale.

## 9.1. L'esperimento delle due fenditure.

Come anticipato nella Sezione 6, l'esperimento delle due fenditure ha un ruolo importante nella storia e nella didattica della meccanica quantistica, poiché sembra fornire a questa teoria sia un supporto empirico preliminare, sia una corroborazione empirica a posteriori. In particolare, secondo un punto di vista diffuso esso mostra che la non-oggettività delle proprietà fisiche è deducibile da risultati sperimentali che sono indipendenti dalla meccanica quantistica e che giustificano la sua introduzione nell'apparato interpretativo di questa teoria anche prescindendo dai teoremi di Bell e di Bell-Kochen-Specker (vedi Sezione 6). Tuttavia le argomentazioni che conducono a questa conclusione sono problematiche. Per individuarne correttamente le criticità è allora opportuno discuterle brevemente.

Nell'esperimento delle due fenditure si considera un flusso di oggetti fisici microscopici (nel seguito, per semplicità, elettroni), su cui per il momento non si fanno ipotesi. Gli elettroni sono tutti preparati in uno stato  $S_0$  (essi formano quindi una popolazione associata allo stato  $S_0$ ) e incidono su uno schermo con due fenditure, 1 e 2, che li riprepara in un nuovo stato. Quando 1(2) è aperta e 2(1) è chiusa gli elettroni incidenti che superano lo schermo hanno la proprietà di passare da 1(2) e sono ripreparati nello stato  $S_1(S_2)$ . Quando 1 e 2 sono entrambe aperte gli elettroni hanno la proprietà di passare da 1, o da 2, o da entrambe, e sono ripreparati nello stato  $S_{1&2}$ .

Esiste poi un secondo schermo che funge da osservabile evidenziando le zone di impatto degli elettroni passati attraverso il primo schermo. Se si effettuano esperimenti sulla popolazione di elettroni negli stati  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_{1&2}$  si ottengono tre diverse distribuzioni di frequenze sullo spazio campionario costituito dalle coordinate dei punti del secondo schermo (che è lo stesso nei tre casi; si noti che l'insieme dei valori delle coordinate ha formalmente la potenza del continuo, e che tuttavia a livello empirico esso può essere discretizzato suddividendo il secondo schermo in areole sufficientemente piccole, in ognuna delle quali è posto un rivelatore). Effettuando gli esperimenti con elettroni che giungono sugli schermi in successione e fortemente distanziati fra loro,



**Figura 1:** L'esperimento delle due fenditure può essere effettuato su sistemi fisici di tipo diverso: nella figura, dall'alto, particelle classiche, onde in un liquido ed elettroni. Schematicamente esso è composto, in sequenza, da una sorgente, da uno schermo piano in cui sono praticate due fenditure rettilinee parallele, ognuna delle quali può essere chiusa o aperta, e da un insieme di rivelatori, posti in un piano parallelo allo schermo, che misurano in ogni punto del piano il numero di particelle che giungono in quel punto o l'intensità dell'onda incidente. I tre diagrammi che seguono il piano dei rivelatori nella figura rappresentano, nell'ordine, i risultati ottenuti, in un dato intervallo di tempo e lungo una retta ortogonale alle due fenditure, con la sola fenditura superiore aperta, con la sola fenditura inferiore aperta e con entrambe le fenditure aperte. Nel caso in cui la sorgente emette particelle classiche ogni particella fa scattare un singolo rivelatore, ma se il numero di particelle è molto grande il terzo diagramma è semplicemente la somma dei due diagrammi precedenti. Nel caso in cui la sorgente emette onde in un liquido compare nel terzo diagramma una figura di diffrazione. Nel caso in cui la sorgente emette elettroni ogni elettrone fa scattare un singolo rivelatore, come nel primo caso, ma se il numero di particelle è molto grande il terzo diagramma mostra una figura di diffrazione, come nel secondo caso.

in modo da escludere perturbazioni nel moto dovute a interazioni reciproche, si ottiene per ogni elettrone un punto di impatto, almeno da un punto di vista macroscopico, e non un'area estesa. Ciò suggerisce che ogni elettrone debba essere descritto come una particella puntiforme e non come una carica distribuita in modo continuo

nello spazio.

Si considera allora la popolazione di elettroni nello stato  $S_{1\&2}$ , e si introduce l'ipotesi che segue, apparentemente ovvia.

HP. Ogni elettrone che arriva sul primo schermo deve passare dalla fenditura 1 oppure dalla fenditura 2, e gli elettroni che hanno la proprietà di passare dalla fenditura 1(2) costituiscono una sottopopolazione nello stato  $S_1(S_2)$  della popolazione nello stato  $S_{1\&2}$ .

Sinteticamente, l'ipotesi HP equivale a supporre che lo stato  $S_{1\&2}$  sia una miscela degli stati  $S_1$  e  $S_2$  (vedi Sezione 3). In genere si suppone anche, per motivi di simmetria, che i pesi relativi  $p_1$  e  $p_2$  dei due stati siano identici e uguali a  $1/2$ , ma questa condizione non è rilevante ai fini delle conclusioni finali ed è sufficiente supporre che  $p_1$  e  $p_2$  siano entrambi diversi da zero e tali che  $p_1 + p_2 = 1$ <sup>2</sup>.

Segue da HP che la popolazione nello stato  $S_{1\&2}$  costituisce una mescolanza delle due sottopopolazioni, e che quindi la distribuzione di frequenze sullo spazio campionario deve essere una semplice sovrapposizione, con pesi  $p_1$  e  $p_2$ , delle distribuzioni ottenute effettuando esperimenti sulle popolazioni negli stati  $S_1$  e  $S_2$ . I dati sperimentali mostrano invece una figura di interferenza, cioè una distribuzione completamente diversa e coerente con una descrizione di ogni singolo elettrone come onda. Questa descrizione, d'altronde, è inaccettabile, perché contrasta con il fatto che gli elettroni appaiono sullo schermo come particelle puntiformi. Pertanto si ritiene usualmente che l'ipotesi HP debba essere respinta e che non sia possibile assumere che ogni elettrone abbia la proprietà di passare dalla fenditura 1 oppure la proprietà di passare dalla fenditura 2 quando entrambe le fenditure sono aperte. A sua volta però questa conclusione sembra in conflitto con i risultati che si ottengono quando si

<sup>2</sup>La trattazione dell'esperimento delle due fenditure esposta qui è simile a quella proposta da Feynman nelle sue famose lezioni [34], spesso citata e utilizzata a livello didattico. Nella sua lezione Feynman omette però i pesi  $p_1$  e  $p_2$ , sommando direttamente le distribuzioni di frequenza (probabilità) ottenute effettuando esperimenti sulle popolazioni di elettroni negli stati  $S_1$  e  $S_2$  e creando un possibile paradosso (in alcuni punti la frequenza totale potrebbe risultare maggiore di uno). Le conclusioni di Feynman, comunque, sono indipendenti da tale omissione, e non risultano modificate se si inseriscono nelle formule pesi  $p_1$  e  $p_2$  non nulli.

effettuano misure sul passaggio degli elettroni attraverso le fenditure, poiché tali misure mostrano che per ogni elettrone si realizza sempre una e una sola delle due possibili alternative. Tenendo conto del fatto che le misure producono un effetto sulla figura di interferenza, che scompare per essere sostituita dalla semplice sovrapposizione prevista dall'ipotesi HP, l'unico modo per non entrare in conflitto con i dati sperimentali sembra essere quello di concludere che la proprietà di passare dalla fenditura 1 e la proprietà di passare dalla fenditura 2 sono non-oggettive nell'esperimento con le due fenditure aperte, e che per ogni elettrone una misura che determina la fenditura attraversata attualizza una di esse, ripreparando l'elettrone e modificando irreversibilmente il suo stato. L'esperimento sembra perciò corroborare la tesi della non-oggettività delle proprietà dei sistemi fisici microscopici indipendentemente da ogni teoria sulla costituzione della materia a livello microscopico.

La conclusione esposta sopra appare paradossale dal punto di vista della fisica classica, specialmente se si mantiene l'ingenua alternativa corpuscolo/onda per quanto riguarda le particelle elementari. Anche se non si rivendica una qualche forma di descrizione classica per i sistemi fisici microscopici, comunque, essa è criticabile, come accennato all'inizio di questa sezione. L'ipotesi HP è infatti la congiunzione delle due ipotesi che seguono.

- HP1. Ogni elettrone che arriva sul primo schermo deve passare dalla fenditura 1 oppure dalla fenditura 2.
- HP2. Gli elettroni che hanno la proprietà di passare dalla fenditura 1(2) costituiscono una sottopopolazione nello stato  $S_1(S_2)$  della popolazione nello stato  $S_{1\&2}$ .

Il fatto che i risultati empirici siano incompatibili con HP non chiarisce se tale incompatibilità sia da attribuire a HP1, o a HP2 o a entrambe.

Nelle argomentazioni riportate sopra si assume, senza rilevarlo esplicitamente, che il conflitto con i risultati ottenuti sia dovuto ad HP1: tuttavia tale assunzione deriva da una scelta arbitraria fra le alternative che sono logicamente possibili. Inoltre HP1 è supportata dai risultati che si ottengono quando si collocano apparati che misurino il passaggio di elettroni attraverso le fenditure 1

e 2 (si è visto sopra che la scomparsa delle figure di interferenza in questo caso può essere spiegato come dovuto a cambiamenti di stato prodotti dalle misure stesse).

Se si considera invece l'ipotesi HP2 si vede che essa è discutibile, perché identifica la proprietà "passare dalla fessura 1(2)" nel caso in cui entrambe le fenditure sono aperte con "essere nello stato  $S_1(S_2)$ ": identificazione legittima, data la differenza fra l'interpretazione della nozione di stato e quella della nozione di proprietà, solo in un modello elementare di tipo classico con traiettorie definite e rettilinee degli elettroni.

Da un punto di vista statistico, poi, l'ipotesi che una popolazione di oggetti fisici nello stato  $S_{1\&2}$  sia costituita da una semplice mescolanza di sottopopolazioni di oggetti fisici negli altri due stati, e quindi che  $S_{1\&2}$  sia una miscela di  $S_1$  e  $S_2$ , è arbitraria, poiché le preparazioni associate ai tre stati sono fisicamente diverse. È quindi logicamente possibile che HP sia incompatibile con i risultati empirici a causa dell'inattendibilità di HP2, e che HP1 sia invece accettabile. Tuttavia in questo caso l'esperimento perde la sua rilevanza concettuale, perché non fornisce più un supporto alla non-oggettività delle proprietà fisiche [35].

## 9.2. Le teorie della verità come verificaazione.

Una nozione di verità che identifichi la verità con la verificaazione è discutibile e controversa [5, 36, 37]. Vi sono almeno due argomenti intuitivi che suggeriscono di evitare tale identificazione [23]. Il primo consiste nell'osservare che la nozione (pragmatica) di verificaazione presuppone la nozione (semantica) di verità, poiché la verifica di un enunciato consiste nel provare che il suo valore di verità è vero. Il secondo può essere sintetizzato notando che è ragionevole richiedere che un enunciato possa essere vero (o falso) indipendentemente dalla nostra capacità di riconoscerlo come tale: infatti è ben noto che, secondo la nozione classica di verità, esistono enunciati, sia fattuali che logico-matematici, che sono dotati di valore di verità ma sono indecidibili, cioè non passibili di verificaazione (un esempio di enunciato fattuale indecidibile è fornito dal famoso enunciato di Poincaré, il quale asserisce che nel corso di una notte tutte le dimensioni

dell'universo diventano mille volte più grandi: infatti questo enunciato è dotato di significato e di valore di verità da un punto di vista classico ma è impossibile da controllare empiricamente a causa della crescita simultanea degli oggetti fisici e delle unità di misura delle lunghezze [23]). Pertanto, non sembra convincente concludere che le proprietà fisiche sono non-oggettive in meccanica quantistica se questa conclusione è basata su una teoria della verità come verificaazione.

## 9.3. I teoremi di Bell e Bell-Kochen-Specker.

Il gruppo di Lecce ha proposto a suo tempo un'analisi dei teoremi di Bell e di Bell-Kochen-Specker (vedi Sezione 6) in diversi lavori, mostrando che le dimostrazioni di questi teoremi, pur essendo corrette da un punto di vista formale, si basano su un'ipotesi implicita di tipo epistemologico che può essere messa in discussione [38, 39]. Per chiarire questo punto evitando una trattazione tecnica conviene osservare preliminarmente che esistono in ogni teoria fisica **leggi teoriche** e **leggi empiriche**. Le leggi teoriche contengono termini teorici interpretati empiricamente in modo indiretto (vedi l'inserto), e sono suscettibili di controllo solo tramite le leggi empiriche da esse deducibili. Le leggi empiriche stabiliscono invece relazioni fra proprietà di un dato sistema fisico e sono espresse da enunciati complessi nei quali compaiono soltanto enunciati atomici osservativi, cioè associati a procedure di controllo empirico. Queste leggi possono essere di due tipi diversi. Un primo tipo è quello delle **leggi empiriche (direttamente) controllabili** che stabiliscono relazioni suscettibili di controllo empirico diretto tramite gli apparati di misura associati alle proprietà che in esse compaiono (vedi Sezione 2). Un secondo tipo è quello delle **leggi empiriche (solo) indirettamente controllabili**, che stabiliscono relazioni che non possono essere controllate direttamente a causa di incompatibilità esistenti fra i contesti di misura richiesti per effettuare il controllo<sup>3</sup>, e che quindi sono su-

<sup>3</sup>Un esempio di legge empirica indirettamente controllabile è costituito in fisica classica da leggi che correlano proprietà **disposizionali**, il cui controllo implica la distruzione o la trasformazione dell'oggetto fisico considerato (come combustibilità, tossicità, fragilità, ecc.).

scettibili solo di un controllo empirico indiretto tramite leggi controllabili da esse deducibili.

Si considerino ora le teorie della fisica classica. In queste teorie la scelta dell'opzione OP1 (vedi Sezione 2) implica che le relazioni stabilite da leggi empiriche debbano sussistere indipendentemente dal contesto di misura che si sceglie al fine di acquisire conoscenza dei valori di verità degli enunciati atomici che compaiono nelle leggi. In altre parole, in queste teorie vale il seguente Principio Metateorico Classico [38, 39].

MCP. Una legge empirica controllabile della fisica è valida in ogni possibile contesto di misura.

Il principio MCP è un principio epistemologico che stabilisce l'ambito e i limiti di validità di leggi della fisica. Esso è talmente radicato nella concezione epistemologica tradizionale da essere applicato in ogni argomentazione fisica, e quindi anche nel caso di teorie non classiche, senza enunciarlo esplicitamente. Questo è quanto accade, in particolare, nel caso dei teoremi di Bell e di Bell-Kochen-Specker. Per comprenderlo conviene esaminare alcune riformulazioni più recenti di tali teoremi (vedi Sezione 6), in cui le ipotesi implicite possono essere individuate con maggior chiarezza (analisi simili possono essere effettuate, comunque, anche nel caso delle versioni originarie). L'esame mostra allora che nelle dimostrazioni di queste riformulazioni si considerano innanzitutto leggi teoriche della meccanica quantistica relative a un sistema di più particelle (ad esempio la conservazione dello spin totale) e se ne deducono alcune leggi empiriche controllabili, ognuna delle quali stabilisce correlazioni tra i valori di osservabili dicotomiche fra loro compatibili. Si ipotizza poi che, quando si considera un particolare sistema, tutte le osservabili dicotomiche in questione abbiano valore definito indipendentemente da ogni contesto di misura (scegliendo così l'opzione OP1), e si prova che questa ipotesi conduce a contraddizioni con le correlazioni previste. Se ne conclude che l'ipotesi fatta (e quindi l'opzione OP1) è stata confutata, e che la scelta dell'opzione OP2 effettuata dall'interpretazione standard è giustificata.

Nell'argomentazione riportata sopra, che è quasi universalmente accettata, non compare alcun riferimento al principio MCP. Un'analisi più accurata prova invece che esso è utilizzato nelle

dimostrazioni dei teoremi, che dovrebbero essere schematicamente rappresentate come segue.

- (i) Adozione del principio MCP in meccanica quantistica.
- (ii) Scelta dell'opzione OP1.
- (iii) Prova (tramite individuazione di un insieme opportuno di leggi empiriche controllabili) che da (i) e (ii) conseguono contraddizioni con le previsioni della meccanica quantistica.
- (iv) Attribuzione delle contraddizioni alla scelta dell'opzione OP1.
- (v) Conclusione che la meccanica quantistica impone la scelta dell'opzione OP2.

Lo schema che precede mostra tuttavia che è inevitabile attribuire le contraddizioni rilevate alla scelta dell'opzione OP1 solo se si ignora l'uso implicito del principio MCP nel corso delle dimostrazioni. Quando invece tale uso è reso esplicito si presenta un'alternativa logica: quella di considerare il principio MCP inadeguato alla meccanica quantistica e di attribuire le contraddizioni a tale principio piuttosto che alla scelta dell'opzione OP1.

Se si sceglie questa alternativa occorre individuare un nuovo principio che sostituisca il principio MCP nello stabilire l'ambito e i limiti di validità delle leggi empiriche controllabili. Per quanto precede, il nuovo principio dovrà soddisfare due condizioni. In primo luogo esso dovrà risultare equivalente al principio MCP quando si considera la fisica classica, in cui la validità del principio MCP non è contestabile. In secondo luogo essa non dovrà generare contraddizioni quando si sceglie l'opzione OP1 e si considerano leggi empiriche controllabili della meccanica quantistica.

## 10. Un nuovo principio epistemologico.

Anche tralasciando la critica ai teoremi di Bell e di Bell-Kochen-Specker avanzata nella sezione precedente, esistono ragioni che suggeriscono che in meccanica quantistica il principio MCP

debba essere messo in discussione e che forniscono utili indicazioni sul modo in cui esso dovrebbe essere modificato. Si è visto infatti nella Sezione 4 che la meccanica quantistica introduce una relazione binaria di compatibilità sull'insieme  $\mathcal{E}$  di tutte le proprietà, tale che proprietà incompatibili non possono essere misurate congiuntamente. Una legge empirica, pertanto, sarà controllabile solo se stabilisce relazioni fra proprietà a due a due compatibili. Inoltre, dato un oggetto fisico  $a$  e un contesto in cui si misura una proprietà  $E$  su  $a$ , non è possibile controllare su  $a$  la validità di una legge empirica controllabile quando nella legge compaiono proprietà incompatibili con  $E$ .

Se si considera quindi una legge empirica controllabile, i contesti di misura possibili si dividono in contesti di misura in cui si può effettuare un controllo della legge (brevemente, contesti di misura in cui la legge è **epistemicamente accessibile**) e in contesti di misura in cui il controllo della legge è impossibile. Inoltre, se si considerano leggi empiriche controllabili diverse fra loro, in alcune delle quali compaiono proprietà che non sono compatibili con proprietà che compaiono in alcune delle altre, non esiste alcun contesto di misura in cui tutte le leggi considerate possano essere controllate congiuntamente (la congiunzione di tutte le leggi empiriche controllabili in questione sarà quindi una legge empirica indirettamente controllabile, che ovviamente non è epistemicamente accessibile in alcun contesto di misura).

Sembra pertanto opportuno evitare di impegnarsi sulla validità di leggi empiriche controllabili in contesti di misura in cui esse non sono epistemicamente accessibili (in termini Popperiani queste leggi non sono né verificabili né falsificabili), come vorrebbe il principio MCP. Occorre quindi individuare un nuovo principio epistemologico che generalizzi il principio MCP tenendo conto dell'esistenza di teorie in cui sussiste una relazione non banale di compatibilità. Questa condizione suggerisce di sostituire il principio MCP con il seguente **principio metateorico generalizzato** [38, 39].

MGP. Una legge empirica controllabile è valida in ogni contesto di misura in cui la legge è epistemicamente accessibile.

Il principio MGP asserisce la validità delle leggi

empiriche controllabili della fisica nei soli contesti di misura in cui tali leggi possono effettivamente essere controllate, senza impegnarsi sulla loro validità in contesti di misura in cui il controllo non è possibile. Tuttavia esso è equivalente al principio MCP in fisica classica, poiché in questo caso tutte le proprietà sono fra loro compatibili e ogni legge empirica controllabile è epistemicamente accessibile in ogni contesto di misura (esso soddisfa quindi la prima delle condizioni enunciate al termine della sezione precedente).

In meccanica quantistica, invece, l'adozione del principio MGP, pur non pregiudicando la correttezza delle previsioni della teoria, conduce a considerare gli enunciati delle leggi empiriche come non necessariamente dotati di valore di verità vero in ogni contesto di misura.

Se in particolare si sostituisce il principio MCP con il principio MGP nello schema presentato nella sezione precedente, è facile provare che la contraddizione che compare nel punto (iii) non può più essere dimostrata (il principio MGP soddisfa quindi anche la seconda delle condizioni enunciate al termine della stessa sezione). Pertanto l'opzione OP1 non risulta più incompatibile con la meccanica quantistica, anche se nessun assegnamento di valori di verità a tutti gli enunciati di  $\mathcal{E}(a)$  è empiricamente controllabile, poiché un controllo richiederebbe l'effettuazione di procedure di misura fra loro incompatibili. Conseguentemente, la non-oggettività delle proprietà non appare più come una caratteristica inevitabile della teoria e il problema della macrooggettivazione discusso nella Sezione 8 può essere evitato, insieme con i paradossi che lo illustrano<sup>4</sup>.

È importante notare, comunque, che il recupero dell'opzione OP1 in meccanica quantistica non costituisce un ritorno a una concezione classica delle teorie fisiche, poiché il principio MGP introduce un nuovo tipo di contestualità, la contestualità della validità delle leggi empiriche controllabili. In altre parole, un contesto di misura stabilisce, secondo il principio MGP, qua-

<sup>4</sup>È interessante osservare che, se si sostituisce il principio MGP al principio MCP, i teoremi di Bell e di Bell-Kochen-Specker, opportunamente riformulati, dimostrano che vi sono effettivamente, in meccanica quantistica, leggi empiriche indirettamente controllabili da cui sono deducibili leggi empiriche controllabili, quindi valide, ma che non sono esse stesse valide in alcun contesto di misura.

li leggi empiriche controllabili siano valide nel contesto stesso, in una prospettiva globalistica (vedi Sezione 2) che vede le relazioni fra le proprietà degli oggetti fisici dipendere dall'intera situazione fisica considerata.

Da un punto di vista intuitivo questa caratterizzazione epistemologica delle leggi può essere compresa ricordando che esistono in fisica classica casi ben noti in cui le misure perturbano necessariamente i valori delle grandezze fisiche misurate (un esempio elementare è costituito dalle misure di corrente e di differenza di potenziale mediante amperometri e voltmetri, rispettivamente). Si può infatti ritenere, per analogia, che le leggi della meccanica quantistica stabiliscano le relazioni fra i valori perturbati delle osservabili che in esse compaiono in un contesto in cui se ne effettua una misura, non le relazioni che valgono quando non si effettua alcuna misura.

La differenza fondamentale fra le due meccaniche sarebbe allora costituita dal fatto che nel caso della meccanica classica è possibile risalire ai valori non perturbati mediante calcoli opportuni, mentre nel caso della meccanica quantistica non esiste alcuna procedura che permetta di effettuare tale operazione. Tuttavia il recupero di OP1 permetterebbe di non escludere, almeno da un punto di vista logico, la possibilità che esistano interpretazioni non standard della meccanica quantistica compatibili con una teoria più ampia in cui tutte le leggi empiriche siano valide in ogni contesto fisico, e che riproduca le leggi della meccanica quantistica tramite un'opportuna teoria della misura. Un primo passo in questa direzione è stato fatto dal gruppo di Lecce, il quale ha suggerito una reinterpretazione della probabilità quantistica che ripristina, sotto certe condizioni, l'oggettività delle proprietà [40, 41].

### Ringraziamenti.

L'autore ringrazia Giampaolo Co', Domenico Costantini, Antonio Negro, Carlo Penco e Jochen Rau per la pazienza dimostrata nel leggere il manoscritto originale e per i suggerimenti che hanno contribuito a migliorarne la qualità e la comprensibilità.

## APPENDICE

Due esempi semplici possono servire a illustrare alcuni dei concetti di base discussi nelle Sezioni 2 e 3, mettendo in evidenza, in particolare, il ruolo fondamentale degli stati miscela quando lo stato degli oggetti fisici considerati è noto solo in modo approssimato.

### A1. Caso classico: il lancio di un dado.

Per semplicità, si considera qui uno spazio degli stati iniziali finito. La trattazione è quindi puramente indicativa, poiché una discussione più precisa richiederebbe un passaggio al continuo, con ovvie complicazioni matematiche.

1. Spazio campionario:  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ .
2. Stato del dado dopo un lancio: miscela  $S$  di tutti gli stati puri iniziali possibili.
3.  $N$ : numero totale degli stati puri iniziali possibili.  
 $n(j)$ : numero degli stati puri iniziali che producono esito  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, 6$ ).  
 $S_k(j)$ : stato puro iniziale che produce esito  $j$  ( $k = 1, 2, \dots, n(j)$ ).  
 $p_k(j)$ : peso dello stato puro iniziale  $S_k(j)$  nell'espressione dello stato miscela  $S$ .
4. Espressione dello stato miscela  $S$ , ottenuta raggruppando gli stati puri che producono lo stesso esito:

$$S = \{(p_1(1), S_1(1)); (p_2(1), S_2(1)); \dots, (p_{n(1)}(1), S_{n(1)}(1))\} \cup \dots \cup \{(p_1(6), S_1(6)); (p_2(6), S_2(6)); \dots; (p_{n(6)}(6), S_{n(6)}(6))\}$$

$$\text{con } n(1) + n(2) + \dots + n(6) = N.$$

5. Popolazione: insieme di tutti i lanci (stesso dado in sequenza, o lancio simultaneo di un gran numero di dadi identici; il secondo esperimento è più costoso ...).
6. Probabilità  $P(j)$  di ottenere esito  $j$ :

$$P(j) = p_1(j) + p_2(j) + \dots + p_{n(j)}(j).$$

7. Caso particolare:

- a) tutti gli stati iniziali possibili sono equiprobabili (lancio ideale);
- b) il numero di stati iniziali che producono un dato esito è identico per tutti gli esiti (dado ideale).



Si ha, per a),

$$p_1(1) = p_2(1) = \dots = p_{n(1)}(1) = \dots = p_1(6) = p_2(6) = \dots = p_{n(6)}(6) = \frac{1}{N}.$$

Si ha poi, per b),

$$n(1) = n(2) = \dots = n(6) = \frac{N}{6}.$$

Ne segue

$$P(1) = \dots = P(6) = \frac{1}{N} \frac{N}{6} = \frac{1}{6}.$$

Si ritrova così la probabilità matematica con un metodo che pone in evidenza le astrazioni che essa comporta da un punto di vista fisico.

## A2. Caso quantistico: particella di spin 1/2.

Esperimento di Stern-Gerlach lungo l'asse  $z$ , successiva riunione dei due fasci e misura di spin lungo una direzione  $u$ .

1. Spazio campionario:  $\{+1/2, -1/2\}$ .
2. Stato  $S$  di una particella del fascio: miscela dei due stati puri possibili. Con ovvio significato dei simboli si ha:

$$S = \{(p_+, |+\rangle_z); (p_-, |-\rangle_z)\}$$

e  $S$  è descritto dall'operatore densità

$$\rho_S = p_+ |+\rangle_z \langle +| + p_- |-\rangle_z \langle -|.$$

3. Popolazione: insieme di tutte le particelle del fascio.
4. Probabilità dei valori dello spazio campionario:

$$P(1/2) = p_+ |u \langle +|+\rangle_z|^2 + p_- |u \langle +|-\rangle_z|^2,$$

$$P(-1/2) = p_+ |u \langle -|+\rangle_z|^2 + p_- |u \langle -|-\rangle_z|^2.$$

- [1] R. P. Feynman: *The Character of Physical Laws*, The MIT Press, Cambridge (MA) (1965).
- [2] S. Hossenfelder: *Lost in Math*, Basic Books, New York (2018).
- [3] C. Garola: *Problemi epistemologici in meccanica quantistica*, Ithaca: Viaggio nella Scienza, XIII (2019) 21.
- [4] R. B. Braithwaite: *Scientific Explanation*, Cambridge University Press, Cambridge (1953).
- [5] C. G. Hempel: *Aspects of Scientific Explanation*, Free Press, New York (1965).
- [6] R. Carnap: *Philosophical Foundations of Physics*, Basic Books Inc., New York (1966).
- [7] F. Suppe: *Understanding scientific theories: an assessment of developments. 1969-1998*, Philosophy of Science, 67, supplement (2000) S102.
- [8] H. Halvorson: *What scientific theories could not be*, Philosophy of Science, 79 (2012) 183.
- [9] D. Costantini: *Verso una rappresentazione probabilistica del mondo*, EMMEBI, Firenze (2011).
- [10] E. Beltrametti, G. Cassinelli: *The Logic of Quantum Mechanics*, Addison-Wesley, Reading (MA) (1981).
- [11] G. Ludwig: *Foundations of Quantum Mechanics I*, Springer, New York (1983).
- [12] A. Tarski: *The concept of truth in formalized languages*. In *Logic, Semantics, Metamathematics*, J. M. Woodger ed., Oxford University Press, Oxford (1956).
- [13] C. Garola, S. Sozzo: *Recovering quantum logic within an extended classical framework*, Erkenntnis, 78 (2013) 399.
- [14] G. Birkhoff, J. von Neumann: *The logic of quantum mechanics*, Ann. Math., 37 (1936) 823.
- [15] N. Redei: *Quantum Logic in Algebraic Approach*, Kluwer, Dordrecht (1998).
- [16] M. L. Dalla Chiara, R. Giuntini, R. Greechie: *Reasoning in Quantum Theory*, Kluwer, Dordrecht (2004).
- [17] A. Einstein, B. Podolski e N. Rosen: *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, Phys. Rev., 47 (1935) 777.
- [18] J. S. Bell: *On the Einstein-Podolski-Rosen paradox*, Physics, 1 (1964) 195.
- [19] J. S. Bell: *On the problem of hidden variables in quantum mechanics*, Rev. Mod. Phys., 38 (1966) 447.
- [20] S. Kochen, E. P. Specker: *The problem of hidden variables in quantum mechanics*, J. Math. Mech., 17 (1967) 59.
- [21] D. M. Greenberger, M. A. Horne, A. Shimony, A. Zeilinger: *Bell's theorem without inequalities*, Am. J. Phys., 58 (1990) 1131.
- [22] N. D. Mermin: *Hidden variables and the two theorems of John Bell*, Rev. Mod. Phys., 65 (1993) 803.

- [23] C. Dalla Pozza, A. Negro: *Come Distinguere Scienza e Non-Scienza*, Carocci, Roma (2017).
- [24] W. Heisenberg: *Physics and Philosophy: the Revolution in Modern Science*, Harper, New York (1958).
- [25] C. Garola, S. Sozzo: *The physical interpretation of partial traces: two non standard views*, *Theoretical and Mathematical Physics*, 152 (2007) 1087.
- [26] C. Garola: *An epistemic interpretation of quantum probability via contextuality*, *Found. Sci.*, 19 (2020) 105.
- [27] C. Garola: *Kolmogorovian versus non-Kolmogorovian probabilities in quantum theories*, *Entropy*, 23 (2021) 121.
- [28] S. Weinberg: *Einstein's mistakes*, *Phys. Today*, 58 (2005) 11.
- [29] J. von Neumann: *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton (1955).
- [30] E. P. Wigner: *Remarks on the mind-body question*. In *Symmetries and Reflections*, Indiana University Press, Bloomington and London (1967).
- [31] G. C. Ghirardi: *I fondamenti concettuali e le implicazioni epistemologiche della meccanica quantistica*. In *Filosofia della Fisica*, G. Boniolo ed., Bruno Mondadori, Milano (1997).
- [32] M. Schlosshauer: *Decoherence: And The Quantum-To-Classical Transition*, Springer Nature, Berlin (2007).
- [33] N. Bohr: *On the notion of causality and complementarity*, *Dialectica*, 2 (1948) 312.
- [34] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands *The Feynman Lectures on Physics* California Institute of Technology (1964) <https://www.feynmanlectures.caltech.edu/>
- [35] C. Garola, S. Sozzo: *Realistic aspects in the standard interpretation of quantum mechanics*, *Humana.Mente-Journal of Philosophical Studies*, 13 (2010) 81.
- [36] B. Russell: *An Inquiry into Meaning and Truth*, Allen & Unwin, London (1940).
- [37] K. Popper: *Conjectures and Refutation*, Routledge and Kegan Paul, London (1969).
- [38] C. Garola: *Against paradoxes: a new quantum philosophy for quantum mechanics* In *Quantum Structures and the Nature of Reality*, D. Aerts and J. Pykacz ed., Kluwer, Dordrecht (1999).
- [39] C. Garola, M. Persano: *Embedding quantum mechanics into a broader noncontextual theory*, *Found. Sci.*, 19 (2014) 217.
- [40] C. Garola: *A survey of the ESR model for an objective interpretation of quantum mechanics*, *Int. J. Theor. Phys.*, 54 (2015) 4410.
- [41] C. Garola, S. Sozzo, J. Wu: *Outline of a generalization and a reinterpretation of quantum mechanics recovering objectivity*, *Int. J. Theor. Phys.*, 55 (2016) 2500.

**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, sotto certe condizioni, noti paradossi.

