

Questa rubrica si propone di stimolare la riflessione sul tipo di conoscenza prodotta dalla fisica e di porre in evidenza termini e concetti che costituiscono punti nodali per l'apprendimento della disciplina. L'approccio storico - critico, così come quello didattico, non hanno alcuna pretesa di essere esaustivi.

Scienza, fisica, filosofia e senso comune ⁽¹⁾.

Però in fisica, come in ogni altra scienza, non regna solo l'intelletto, ma anche la ragione. Non tutto ciò che è esente da contraddizioni logiche è ragionevole. E la ragione ci dice che quando voltiamo le spalle ad un oggetto e ce ne allontaniamo, dell'oggetto rimane pur qualcosa... Sono queste considerazioni, e non deduzioni logiche, quelle che ci costringono ad ammettere, dietro il Mondo sensibile, un Mondo reale che esiste di per sé indipendente dall'uomo, un Mondo che non possiamo percepire direttamente ma esclusivamente attraverso il Mondo dei sensi, per mezzo dei segni che questo ci trasmette... [1]

Max Planck

1. I presupposti filosofici della Scienza

Oggi la Scienza è il prodotto di un processo sociale assai complesso la cui caratteristica più rilevante è costituita dal suo stretto intreccio con la Tecnologia. Questo intreccio è tale da suggerire il termine Tecno-Scienza come descrittivo dell'insieme dei contesti e delle procedure usate per produrre nuove conoscenze e nuovi strumenti. In questo scritto useremo il termine Scienza, come sinonimo di "Conoscenza Scientifica", in riferimento a quelle proprietà della "Scienza", della "Tecnica" o della "Tecno-Scienza" — comunque si intendano — connesse alla produzione di conoscenze sulla struttura e il funzionamento del Mondo.

L'analisi storica mostra che la Conoscenza prodotta dalle discipline sperimentali si è sviluppata sulla base di tre presupposti filosofici:

P1—Esiste un Mondo, indipendente dall'osservatore, di cui l'osservatore fa parte.

⁽¹⁾ Ancor più delle "voci" sinora pubblicate in questo *Glossario*, questa è ben lungi dall'essere esaustiva; anzi, in più punti, sarà forse giudicata come provocatoriamente succinta. Inoltre, il punto di vista dell'autore ne caratterizza l'intero svolgimento.

P2—Ogni evento ha una causa (principio di causalità).

P3—Il funzionamento del Mondo è costante nel tempo (riproducibilità dei fenomeni).

Questi tre postulati sono, dal punto di vista filosofico, diversi. Il primo può essere sostenuto con argomenti razionali; e, sebbene sia stato posto in discussione con argomentazioni di vario genere, sovente al limite del paradosso, costituisce il fondamento della Scienza e del senso comune razionalmente orientato. La ricerca di connessioni causali è stata una caratteristica fondamentale della Scienza ed uno dei principali motori del suo sviluppo: il principio di causalità va quindi inteso come impegno metodologico teso alla ricerca delle cause. Infine, il terzo postulato è stato, *sinora*, ragionevolmente corroborato sia dalla pratica scientifica sia — più in generale — dall'esperienza umana.

L'accettazione del postulato (*P1*), fa sorgere immediatamente il problema di quale sia il rapporto tra descrizioni del Mondo (o di una sua parte) e il Mondo ⁽²⁾. Cercare di rispondere a questa domanda equivale a delineare una "teoria della Conoscenza Scientifica": qualunque essa sia, deve essere indipendente dalle varie discipline sperimentali, dalle loro teorie e dai loro risultati sperimentali. Se questa asserzione è ragionevole, allora è possibile delineare gli elementi costitutivi di una "teoria della Conoscenza Scientifica" facendo riferimento ad una disciplina specifica; nel nostro caso, alla fisica.

2. Scoperta e giustificazione

Lo sviluppo storico della meccanica quantistica illustra, pertanto, la distinzione fra contesto di scoperta e contesto di giustificazione; distinzione che deve venir fatta per tutti i generi di ricerca scientifica. La strada della scoperta corre attraverso una "serie di inferenze che sono profondamente avvolte nell'oscurità dell'indovinare istintivo", se mi è permesso applicare qui una frase che Schrödinger mi rivolse in una sua lettera, scritta alcuni anni prima delle sue grandi scoperte nel campo della meccanica quantistica. Una volta poi che una teoria è stata costruita, essa va giudicata entro il contesto di giustificazione, vale a dire mediante l'evidenza induttiva a essa conferita dal successo empirico [2].

Hans Reichenbach

E' opportuno distinguere il *contesto della scoperta* dal *contesto della giustificazione*. Il contesto della scoperta è caratterizzato dal fatto che, in generale, lo scienziato non si preoccupa di rispettare regole metodologiche comunemente condivise.

Con le parole di Bridgman:

⁽²⁾ Questo problema si pone anche per le "descrizioni" usate nella vita quotidiana.

Una lunga esperienza ha mostrato allo scienziato che diverse cose ostacolano la via verso una risposta corretta. Ha scoperto che non è sufficiente credere alle parole del suo vicino, ma che, se vuole essere sicuro, deve essere in grado di verificare un risultato egli stesso. Pertanto, lo scienziato è nemico di ogni autoritarismo. Inoltre, egli scopre che spesso fa degli errori e che deve imparare come evitarli. Non può permettersi alcun pregiudizio circa il tipo di risultato che otterrà, né di farsi influenzare da presunzioni favorevoli o preferenze personali.

[...]

Nell'attacco al suo problema specifico egli non soffre di alcuna inibizione dovuta a casi precedenti o autorità, ma è completamente libero di adottare qualunque percorso il suo ingegno sia in grado di suggerirgli. Nessuno può predire ciò che il singolo scienziato farà o che metodo seguirà. In breve, la scienza è ciò che gli scienziati fanno e ci sono tanti metodi scientifici quanti scienziati [3].

Il contesto della scoperta rimanda alla necessità di un'indagine storica per cercare di comprendere come osservazioni, concetti, ipotesi, esperimenti e teorie sono emersi e sono stati correlati nel corso dello sviluppo della scienza. Questa indagine deve essere sorretta da una epistemologia, senza la quale la ricostruzione storica rischia di essere cieca.

Nel contesto della giustificazione, il rapporto tra teoria ed esperimento deve essere considerato alla luce di regole metodologiche comunemente condivise: questo insieme di regole non scritte è, a sua volta, oggetto di indagine storica (oggi anche sociologica) perché il “metodo della scienza”, o meglio, i “metodi delle scienze” intesi come insieme di regole metodologiche largamente condivise dalle comunità scientifiche disciplinari variano nel tempo.

3. La Fisica

Le descrizioni della Fisica, nella loro fase matura, tendono ad assumere la forma di teorie matematizzate in cui sono usati, tra l'altro, due tipi di concetti: le *entità teoriche* e le *grandezze fisiche*. Esempi di entità teoriche sono i concetti di onda elettromagnetica, di atomo, protone, elettrone, ecc... Le grandezze fisiche sono concetti che permettono di descrivere *proprietà* delle entità teoriche o *interazioni* o *relazioni* tra esse e sono caratterizzate dal fatto di *poter essere*, in generale, *sottoposte a misura*. Per esempio i concetti di massa, carica, spin, momento magnetico sono grandezze fisiche che descrivono proprietà dell'elettrone o di altre particelle; il concetto di forza permette di descrivere l'interazione, per esempio, di due elettroni; quello di velocità descrive invece una relazione tra due entità teoriche: il corpo considerato in moto e il sistema di riferimento rispetto al quale il corpo è in moto.

3.1. Il ruolo della misura

La *misura* è un insieme di procedure sperimentali che permettono di attribuire ad una grandezza fisica — dopo averne fissata l'unità di misura — un valore definito, esprimibile mediante un numero accompagnato da un margine di errore.

Nell'ambito di una determinata teoria o di una descrizione basata sulla conoscenza acquisita, l'esito della misura dipende dall'interazione tra l'entità teorica e lo strumento di misura ⁽³⁾ (considerato anch'esso come un'entità teorica) e non può, *in nessun caso*, essere interamente attribuito allo strumento di misura: lo stato dello strumento è modificato dal processo di misura e la modifica del suo stato è, per esempio, indicata dallo spostamento di un indice o dalla variazione di un numero. Come esempio, consideriamo la misura della massa di uno ione mediante uno spettrometro di massa: il risultato della misura dipende, tra l'altro, da una proprietà (che chiamiamo "massa") degli ioni che stiamo usando. In questo caso, la conoscenza acquisita ci suggerisce che l'apparato di misura non influenza il risultato della misura. Tuttavia, in generale, ciò non è vero. Per esempio: l'inserimento di un amperometro in un circuito modifica la sua resistenza elettrica e, quindi, altera il risultato della misura della corrente.

Sulla base del postulato *P1*, l'esito della misura di una grandezza fisica G che, secondo la teoria, descrive una proprietà dell'entità teorica E , riflette una proprietà del Mondo che deve essere attribuita, come P_{Q_E} , ad un *quid* (Q_E) che, nel Mondo, corrisponde all'entità teorica E considerata. Il *quid* può essere molto diverso dall'entità teorica E cui corrisponde; analogamente, la proprietà P_{Q_E} del *quid* può essere molto diversa da quella descritta dalla grandezza fisica G_E . Ciò significa che la misura di una grandezza fisica non assicura la sua *realtà*, né quella dell'entità teorica cui è associata. Il processo di misura ci permette solo di stabilire una *corrispondenza* tra entità teorica e *quid*, tra grandezze fisiche e proprietà del *quid*. Per esempio possiamo affermare che, nel Mondo *esiste* un *quid* che corrisponde all'entità teorica "elettrone": questo *quid* ha proprietà che corrispondono alle grandezze fisiche attribuite dalla teoria all'entità teorica "elettrone"; questo *quid* si comporta in accordo alle leggi della teoria con proprietà che sono quantitativamente descritte dai valori misurati delle grandezze fisiche attribuite all'entità teorica "elettrone". Possiamo allora convenire che l'affermazione *l'elettrone esiste* è un'abbreviazione dell'asserzione precedente.

Asserzioni ontologiche, come quella precedente relativa all'esistenza dell'elettrone, possono essere fatte solo *a posteriori* sulla base dell'intera conoscenza considerata acquisita (teorica e sperimentale) ⁽⁴⁾. Esse non possono essere dedotte logicamente dall'insieme della conoscenza acquisita, ma debbono essere con essa compatibili: le asserzioni ontologiche possono essere solo plausibili. Per esempio: mentre l'asserzione "l'elettrone esiste" (come abbreviazione dell'asserzione filosoficamente più accorta sopra enunciata) è oggi plausibile (perché compatibile con la conoscenza acquisita), non altrettanto possiamo dire dell'asserzione "esiste l'etere". Questa asserzione, tuttavia, era plausibile ai tempi di Maxwell e di Hertz ⁽⁵⁾.

⁽³⁾ Non sempre, una misura — descritta all'interno di una teoria o della conoscenza acquisita — richiede un'interazione tra l'entità teorica e lo strumento di misura. Si pensi, ad esempio, alla misura della velocità di un corpo.

⁽⁴⁾ Asserzioni ontologiche plausibili richiedono una sedimentazione temporalmente significativa della conoscenza acquisita. Più lunga la sedimentazione, maggiormente plausibili sono le asserzioni ontologiche.

⁽⁵⁾ Nella voce *Etere* scritta da Maxwell per la IX edizione dell'Enciclopedia Britannica, Maxwell

4. Immagini del Mondo

Oltre al Mondo sensibile ed al Mondo reale c'è ancora, ed occorre tenerlo ben distinto dagli altri due, il Mondo quale ce lo presenta la Scienza fisica: l'immagine fisica del Mondo. Questo terzo Mondo, contrariamente agli altri due, è stato creato coscientemente per un determinato scopo dallo spirito umano, e perciò varia e va soggetto ad un certo sviluppo [5].

Max Planck

Definiamo *Immagine del Mondo* una descrizione del Mondo, o di parte di esso, contenente asserzioni ontologiche. Sulla base delle considerazioni svolte, una Immagine del Mondo non discende logicamente dall'insieme delle conoscenze considerate acquisite, ma deve essere compatibile con esse. Sebbene le Immagini del Mondo non siano costruzioni mentali *logicamente* necessarie, esse svolgono un ruolo euristico fondamentale. Le Immagini del Mondo hanno, come la conoscenza acquisita da cui derivano, carattere storico, e quindi variano nel tempo (si veda la sezione 6.1); tuttavia l'attendibilità delle loro componenti più antiche cresce con il tempo e queste tendono a divenire più stabili della conoscenza acquisita da cui derivano. Per esempio, le teorie che descrivono il comportamento dell'elettrone sono cambiate nel tempo e non possiamo escludere che mutino ancora; confidiamo tuttavia che l'elettrone continuerà a far parte delle Immagini del Mondo che verranno.

Le Immagini del Mondo guidano lo scienziato in laboratorio e lo orientano nella riflessione teorica ⁽⁶⁾ ⁽⁷⁾; nella vita quotidiana, costituiscono uno strumento di interpretazione e organizzazione dell'esperienza e di guida comportamentale.

Le Immagini del Mondo, contenendo asserzioni ontologiche che, sebbene plausibili, non possono essere provate, appartengono al dominio della *Metafisica*.

5. Il problema del realismo (scientifico)

Le posizioni realiste possono essere suddivise in tre classi: realismo delle teorie, realismo delle entità teoriche, realismo delle grandezze fisiche ⁽⁸⁾. Il realismo delle teorie è

misura, in modo indiretto, la rigidità dell'Etere, partendo dalla misura dell'energia proveniente dal Sole sulla superficie della Terra [4]. A mia conoscenza, questo scritto di Maxwell non è più reperibile in rete. Chi fosse interessato, può chiedermene una copia.

⁽⁶⁾ Nel contesto della scoperta, gli scienziati esplorano o usano nuove Immagini del Mondo. Si possono richiamare due casi assai noti: la "eliminazione" dell'Etere e l'invenzione dei quanti di luce da parte di Einstein (1905).

⁽⁷⁾ Siccome le Immagini del Mondo non discendono logicamente dalla conoscenza acquisita, esse sono sovente costruite sulla base di un ingenuo realismo delle teorie (si veda la prossima sezione). Queste Immagini del Mondo, rischiano di alimentare suggestioni irrazionali e contribuiscono ad accrescere il disorientamento del cittadino nei confronti delle acquisizioni della Scienza.

⁽⁸⁾ La letteratura riguardante questi argomenti è assai ampia. Come base di partenza, si può proficuamente visitare il sito della *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [6], dove si possono trovare saggi su gran parte degli argomenti trattati in questa voce.

caratterizzato dalla convinzione che le teorie descrivano ciò che effettivamente accade nel Mondo e implica il realismo degli altri due tipi. Il realismo delle entità teoriche ritiene che alcune o tutte le entità teoriche usate dalle teorie esistano nel Mondo ⁽⁹⁾; quindi risponde, non sempre negativamente, a domande del tipo: esiste l'elettrone, esiste l'onda elettromagnetica...? Infine, il realismo delle grandezze fisiche, che presuppone il realismo delle entità teoriche, è caratterizzato dalla credenza che alcune o tutte le grandezze fisiche usate da una teoria siano proprietà reali delle entità teoriche (considerate esistenti) cui sono associate ⁽¹⁰⁾.

Al realismo delle teorie sono state mosse obiezioni di vario tipo. Innanzitutto: per affermare che una teoria descrive esattamente “ciò che accade nel Mondo” dovremmo conoscere “ciò che accade nel Mondo” indipendentemente dalla teoria in questione. Una seconda obiezione nasce dalla constatazione che uno *stesso* gruppo di fenomeni può essere (e, di fatto, è stato) descritto da teorie *diverse*. A queste obiezioni se ne aggiunge una terza: il realismo delle teorie implica il realismo degli altri due tipi, perché deve necessariamente asserire che *tutte* le entità teoriche usate dalle teorie esistono e *tutte* le grandezze fisiche sono proprietà reali delle entità teoriche cui sono associate. Tuttavia, come abbiamo visto, le asserzioni ontologiche non discendono logicamente dalla conoscenza acquisita, ma sono solo rese plausibili da essa. Il realismo delle teorie è quindi intrinsecamente insostenibile.

Insostenibili sono anche le trasposizioni di alcune caratteristiche generali delle teorie al Mondo. Per esempio, il fatto che la meccanica quantica sia una teoria probabilistica non implica che il Mondo, a livello atomico sia indeterministico. La trasposizione di caratteristiche generali delle teorie al Mondo costituisce una versione estrema del realismo delle teorie; è sorprendente che ciò avvenga anche nel caso della meccanica quantica, che è solitamente (ed erroneamente) intesa come una teoria non realista.

6. Che cosa è una teoria

Scriva Hertz:

Alla domanda, “Che cosa è la teoria di Maxwell?” io non so rispondere in modo più conciso o più preciso che dicendo: “la teoria di Maxwell è il sistema di equazioni di Maxwell”. Ogni teoria che conduce allo stesso sistema di equazioni, e pertanto include gli stessi possibili fenomeni, verrà da me considerata come una forma od un caso particolare della teoria di Maxwell; ogni teoria che conduce ad equazioni diverse, e pertanto a possibili fenomeni diversi, è una teoria diversa [7] ⁽¹¹⁾.

⁽⁹⁾ Le affermazioni di esistenza delle entità teoriche debbono essere formulate come quella relativa all'elettrone nella sezione 3.1.

⁽¹⁰⁾ Si rammenti che è possibile solo affermare corrispondenze tra le proprietà delle entità teoriche (grandezze fisiche) e proprietà dei *quid* che corrispondono, nel Mondo, alle entità teoriche.

⁽¹¹⁾ Hertz ha delineato una essenziale “teoria della conoscenza scientifica” (sovente ignorata) nella prefazione alla *Meccanica* [8] e nell'introduzione teorica a *Electric Waves* [7]. Riflessioni su questi contributi di Hertz si trovano in [9] e nei lavori ivi citati.

Naturalmente, le equazioni di Maxwell, per costituire una teoria fisica, debbono essere *interpretate*. Useremo la seguente definizione: interpretare un sistema di equazioni significa specificare le procedure per misurare almeno alcune delle grandezze fisiche che compaiono in esse ⁽¹²⁾. Questo tipo di interpretazione, “di primo livello”, è l’unico necessario; interpretazioni di “livello superiore” sono, in realtà, impropriamente mescolate con Immagini del Mondo e sono, quindi, descrizioni metafisiche.

6.1. Un esempio

E quando ai Fisici, già sopraffatti dalla complicazione del meccanismo ideato, si chiede se i nuovi enti, ch’essi maneggiano come cose vive, abbiano un’esistenza obbiettiva o rappresentino solo un mezzo economico e provvisorio d’indagine, la immensità del problema li sgomenta e li dissuade dalla elaborazione scientifica di una risposta qualsiasi. E rinunciando alla qualità d’uomini di scienza, ma ubbidendo solo alle proprie tendenze sentimentali, precipitano la loro opinione così come se giudicassero di un problema di religione o di politica o di estetica [10].

Orso Mario Corbino

È essenziale verificare se i lineamenti di una teoria della conoscenza fisica sviluppati nelle sezioni precedenti possono essere usati per descrivere (almeno) parti della fisica, della loro evoluzione storica e per confrontarsi con altre riflessioni filosofiche su di esse. Proponiamo qui solo un esempio, peraltro piuttosto significativo.

Il fatto che si misuri la lunghezza d’onda della luce non significa che, nel Mondo, esista un *quid* che chiamiamo “onda elettromagnetica” esattamente con le proprietà che a tale entità teorica sono attribuite dalla teoria. Osserviamo, innanzitutto, che le caratteristiche di questo *quid* che dovrebbe corrispondere, nel Mondo, all’onda elettromagnetica, sono mutate nel corso del tempo in funzione dell’Immagine del Mondo. I tempi di Maxwell erano caratterizzati dalla credenza, plausibile, dell’esistenza dell’Etere. Pertanto, l’“onda elettromagnetica” era concepita come una “vibrazione dell’Etere”. Il rapporto tra teoria, esperimento e Immagine del Mondo è, nel contesto della scoperta, dinamico. Questo fatto è ben illustrato dalle difficoltà incontrate da Maxwell nell’interpretazione, anche di “primo livello”, della sua teoria. Queste difficoltà erano essenzialmente dovute alle carenze dell’Immagine del Mondo di allora. Oggi noi affermiamo che la grandezza fisica “carica elettrica” è una proprietà di entità teoriche quali l’elettrone cui nel Mondo... (si riveda l’asserzione sull’esistenza dell’elettrone enunciata sopra). Invece, nell’immagine del Mondo di Maxwell, come

⁽¹²⁾ Nel caso delle equazioni di Maxwell, l’interpretazione è mediata dall’espressione della forza di Lorentz $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ che fornisce la forza esercitata da un campo elettromagnetico su una carica puntiforme.

sottolineato da Hertz [11], non era chiaro cosa fosse l'“elettricità”. Non deve quindi sorprendere che, a proposito della corrente elettrica Maxwell scrivesse nel Trattato:

La corrente elettrica non può essere concepita se non come un fenomeno cinetico. [...] Gli effetti della corrente, come l'elettrolisi e il trasferimento di elettricità da un corpo ad un altro, sono tutte azioni progressive che richiedono tempo per essere compiute, e sono pertanto della natura dei moti. Per quanto riguarda la velocità della corrente, essa potrebbe essere dell'ordine di un decimo di pollice all'ora o di un centinaio di miglia al secondo (qui Maxwell cita il paragrafo 1648 delle *Experimental Researches* di Faraday). Siamo così lontani dal conoscere il suo valore assoluto che non sappiamo neppure se ciò che chiamiamo direzione positiva è la vera direzione del moto o la direzione contraria [12].

La caratteristica fondamentale della transizione della fisica tra Ottocento e Novecento è data dalla progressiva acquisizione della consapevolezza della struttura discreta della Natura a livello microscopico. Ciò ha comportato da un lato, una ridefinizione di alcune delle grandezze fisiche fondamentali che compaiono nelle equazioni di Maxwell ⁽¹³⁾; e, dall'altro, il lento riadattamento dell'Immagine del Mondo, riadattamento che è tuttora in corso. La progressiva scoperta della natura discreta della luce, emblematicamente rappresentata dagli esperimenti di interferenza a basse intensità luminose o usando un fotone alla volta ⁽¹⁴⁾, esige una reinterpretazione di primo livello della teoria di Maxwell ed una modifica sostanziale dell'Immagine del Mondo. Per quanto concerne l'interpretazione di primo livello della teoria di Maxwell, è necessario innanzitutto affermare che, in relazione, per esempio, ai fenomeni di interferenza, le sue predizioni valgono solo quando l'energia depositata sullo schermo è sufficientemente elevata. Quando questa energia è molto bassa, è possibile conservare il valore predittivo della teoria introducendo una ipotesi *ad hoc*: la probabilità che un fotone arrivi in un punto dello schermo è proporzionale all'intensità classica in quel punto. Per quanto concerne il *quid* che, nel Mondo, dovrebbe corrispondere all'entità teorica “onda elettromagnetica”, la situazione è delicata. Potremmo incominciare a dire che, se l'intensità dell'onda è sufficientemente elevata, allora, nel Mondo c'è un *quid* che corrisponde all'entità teorica “onda elettromagnetica”; ma che, tuttavia, ciò non è più vero, quando l'intensità dell'onda è troppo bassa. Dovremmo subito riconoscere che, come asserzione di esistenza, non è molto soddisfacente. Siamo quindi indotti a supporre che, nel Mondo, esistono dei *quid* corrispondenti all'entità teorica “fotone” e che la descrizione teorica data da Maxwell funziona quando questi *quid* sono presenti in un numero statisticamente significativo ⁽¹⁵⁾.

⁽¹³⁾ La densità di carica si scrive oggi, con notazioni ovvie, $\rho = nq$ e la densità di corrente $\vec{J} = nq\vec{v}$. Dietro queste semplici formule si nasconde un'Immagine del Mondo completamente nuova.

⁽¹⁴⁾ Si veda, a questo proposito, (\rightarrow **Interferenza**) ed i lavori ivi citati.

⁽¹⁵⁾ Questo “esercizio” ha posto in rilievo la complessità del rapporto teoria - misura - Immagine del Mondo sia nel contesto della scoperta sia in quello della giustificazione. Le Immagini del Mondo tendono a sopravvivere all'evoluzione della conoscenza acquisita e a sovrapporsi in modo contraddittorio a quelle emergenti. Per esempio, si pensi a come, nel corso del Novecento e sino ad

7. Un caso singolare: la meccanica quantica ⁽¹⁶⁾

La nascita della meccanica quantica, rappresenta, dal punto di vista del rapporto tra Fisica e Filosofia, un caso singolare: per la sterminata letteratura cui ha dato origine; per il guazzabuglio di idee e di approcci che ha caratterizzato questa letteratura; per l'improprio intreccio tra Fisica e Filosofia. Il dibattito filosofico che ha caratterizzato la nascita della meccanica quantica è emblematicamente rappresentato dal confronto tra Einstein e i "padri fondatori" della nuova meccanica. Questo confronto è stato più volte ripercorso nei decenni successivi, sovente inferendo sulle posizioni sostenute da Einstein. I temi dibattuti andavano dallo stato epistemologico della meccanica quantica, alla sua (in)completezza, ai problemi della causalità. Dopo il lavoro di John Bell del 1964 [14], il dibattito si è concentrato sul cosiddetto paradosso di Einstein, Podolsky e Rosen [15] e sugli esperimenti che, a partire dagli anni Ottanta del secolo scorso, sono stati eseguiti in connessione a queste problematiche.

7.1. La meccanica quantica è un algoritmo predittivo

Fuchs e Peres, all'interno di un dibattito svoltosi sulle pagine di *Physics Today*, in un articolo provocatoriamente intitolato *Quantum Mechanics needs no "interpretation"*, scrivono [16]:

... la meccanica quantica non descrive la realtà fisica. Quello che fa è fornire un algoritmo per calcolare le probabilità di eventi macroscopici ("clicks di rivelatori") che sono le conseguenze dei nostri interventi sperimentali. Questa stringente definizione dello scopo della teoria quantica è la sola interpretazione di cui abbiamo bisogno sperimentatori o teorici.

Condividiamo questa affermazione. Per vedere come si applica ad un caso concreto, svolgeremo qualche riflessione sulla versione di Schrödinger della meccanica quantica; riflessioni ulteriori saranno svolte nelle sezioni 7.3 e 7.5.2. Osserviamo innanzitutto come le regole che stanno alla base dell'algoritmo quantico, nella versione di Schrödinger, si basino su concetti e formule della fisica classica. Inoltre, le applicazioni di questo algoritmo a sistemi fisici richiede sempre l'uso di concetti e formule tratte dalla fisica classica. Per esempio, l'equazione di Schrödinger degli stati stazionari

$$(1) \quad \hat{H}\psi = E\psi$$

permette di determinare i livelli di energia permessi e le corrispondenti funzioni d'onda ψ solo se, facendo ricorso alla trattazione classica, inseriamo nell'operatore hamiltoniano \hat{H} l'espressione dell'energia potenziale del sistema in esame.

oggi, diffuse Immagini del Mondo hanno descritto l'apparente contraddizione tra descrizione continua (maxwelliana) del campo elettromagnetico e la natura discreta della luce.

⁽¹⁶⁾ In questa sezione, si riprendono i temi e le tesi sviluppate in [13].

Come secondo esempio, consideriamo il valore medio (o di aspettazione) della grandezza fisica G , cui è associato l'operatore \hat{G} , quando il sistema è descritto dalla funzione d'onda ψ

$$(2) \quad \langle G \rangle = \int_{\tau} \psi^* (\hat{G}\psi) d\tau.$$

In entrambi i casi, non è necessaria alcuna “interpretazione” della ψ di livello superiore a quello del formalismo che specifica come si deve calcolare la ψ e come si deve usarla per effettuare predizioni sull'esito di una misura.

Il dibattito intorno alla meccanica quantica deriva, in gran parte, da “interpretazioni di secondo livello” impropriamente mescolate con Immagini del Mondo: esse *non sono logicamente necessarie* ai fini dell'uso della meccanica quantica stessa. Si è certamente smarrito l'insegnamento di Hertz quando scriveva:

Mi sono inoltre sforzato di limitare il più possibile quelle concezioni che sono introdotte arbitrariamente da noi, e ammettere solo quegli elementi che non possono essere rimossi o cambiati senza alterare contemporaneamente possibili risultati sperimentali. È vero che, in conseguenza di questi sforzi, la teoria acquisisce un aspetto molto astratto e incolore... [17]

7.2. La meccanica quantica è una teoria realista

Come tutte le teorie scientifiche, la meccanica quantica, interpretata al “primo livello”, non può non essere una teoria realista per due fondamentali ragioni:

- i) essa presuppone il postulato $P1$: “esiste un Mondo indipendente dall'osservatore di cui l'osservatore fa parte”;
- ii) essa descrive esperimenti ed usa rapporti su esperimenti; in entrambi i casi si tratta di “discorsi” realisti.

A maggior ragione sono realiste le interpretazioni di “secondo livello” della meccanica quantica in quanto contengono asserzioni su come “è fatto e funziona il Mondo”. Le interpretazioni di “secondo livello” della meccanica quantica sono, in realtà, Immagini del Mondo; esse, inoltre, estendono al Mondo proprietà generali della teoria quale, per esempio, la sua natura probabilistica: queste “estensioni” costituiscono un caso estremo del “realismo delle teorie” che, come abbiamo visto, è insostenibile. È pertanto sorprendente — e causa di molta confusione — che interpretazioni di secondo livello della meccanica quantica (Immagini del Mondo) siano contrapposte a posizioni filosofiche realiste (sezioni 7.3, 7.4, 9).

7.3. Lo stato di sovrapposizione

Si consideri il caso di una funzione d'onda data dalla sovrapposizione di due autofunzioni

$$(3) \quad \psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_1 + \psi_2).$$

Supponiamo inoltre che l'autovalore della grandezza fisica A sia a_1 quando il sistema è descritto da ψ_1 ed a_2 quando il sistema è descritto da ψ_2 . L'interpretazione di “primo livello” della (3) è: il sistema è descritto dalla (3); se si effettua una misura della grandezza fisica A l'esito della misura sarà, con probabilità $(1/2)$, a_1 o a_2 .

L'interpretazione di "primo livello" parla solo di funzioni d'onda e di esiti di misura; usa quindi un linguaggio appropriato alla meccanica quantica.

Tuttavia, è assai diffusa un'interpretazione di "secondo livello": il sistema è descritto dalla (3); prima della misura, il sistema si trova in uno stato in cui la grandezza fisica A non ha un valore definito (né a_1 , né a_2); durante la misura il sistema passa, con probabilità $(1/2)$, dallo stato descritto dalla ψ allo stato ψ_1 o ψ_2 con le relative proprietà (valori a_1 o a_2 della grandezza fisica A).

Nel linguaggio adottato nella sezione 3.1, l'interpretazione di secondo livello recita: prima della misura, all'entità teorica E (il sistema fisico in esame) corrisponde nel Mondo un *quid* le cui proprietà che dovrebbero corrispondere alla grandezza fisica A non sono definite; solo il processo di misura fa sì che le proprietà del *quid* corrispondano alla grandezza fisica A . L'asserzione secondo cui "*le proprietà del quid non sono definite prima della misura*" è implicitamente considerata come non verificabile sperimentalmente in modo diretto; d'altra parte, siccome tale asserzione non è necessaria per ottenere le predizioni della teoria (che utilizza solo la (3)), essa non può essere verificata sperimentalmente neppure in modo indiretto. Essa è, quindi, un'asserzione *metafisica*. L'intrusione della metafisica nelle descrizioni *formali* della fisica produce gravi distorsioni nell'interpretazione delle teorie fisiche; di converso, una fisica le cui descrizioni formali siano "inquinata" dalla metafisica distorce la riflessione filosofica sul tipo di conoscenza prodotta dalla fisica ⁽¹⁷⁾.

Per approfondire ulteriormente la questione, si consideri un fascio di luce che è passato attraverso un polaroid il cui asse privilegiato è diretto lungo l'asse x . Il fascio di luce, polarizzato linearmente lungo la direzione x dal polaroid, incide su un secondo polaroid il cui asse privilegiato x' forma un angolo θ con l'asse x . La meccanica quantica prevede che ogni fotone ha probabilità $\cos^2 \theta$ di attraversare il secondo polaroid. Questa previsione è basata sulla descrizione del fotone che incide sul secondo polaroid mediante una sovrapposizione di due polarizzazioni lineari tra di loro perpendicolari

$$(4) \quad |x\rangle = |x'\rangle \cos \theta + |y'\rangle \sin \theta.$$

Ciò significa che il fotone può essere descritto mediante uno stato di sovrapposizione non ostante che, prima dell'impatto con il secondo polaroid, esso possieda un valore definito della polarizzazione: esso è, infatti, linearmente polarizzato lungo x . La meccanica quantica non fa altro che "riprodurre" la trattazione classica basata sulla scomposizione del campo elettrico incidente sul secondo polaroid lungo la direzione x' e la direzione y' ad essa perpendicolare. Entrambe le trattazioni, classica e quantica, "adeguano" la descrizione del sistema (onda, fotone) prima dell'impatto con il secondo polaroid alle caratteristiche di questo.

⁽¹⁷⁾ Come abbiamo visto, le Immagini del Mondo, che svolgono un ruolo euristico fondamentale, sono costruzioni metafisiche; qui si critica l'intrusione di asserzioni metafisiche nelle descrizioni formali, matematizzate, della fisica.

7.4. Questioni EPR

Il dibattito che si è sviluppato a partire dal lavoro di Einstein, Podolsky e Rosen, riguardante il cosiddetto paradosso *EPR* [15], ha affrontato (almeno) quattro questioni: realismo, località, causalità e completezza della meccanica quantica. Se si legge un tipico lavoro contemporaneo riguardante argomenti *EPR*, ci si trova di fronte la seguente situazione: la usuale “interpretazione” della meccanica quantica (di “secondo livello” secondo l’autore di questa “voce”) è presentata come “non realista”; d’altra parte, le posizioni filosofiche realiste sono *tradotte* in teorie fisiche le cui predizioni sono necessariamente differenti, almeno in alcuni casi, rispetto a quelle della meccanica quantica; fatalmente, le teorie “realiste” sono smentite dagli esperimenti. In questi lavori, le posizioni filosofiche realiste sono caratterizzate, tra l’altro, dall’asserzione (*RE*) secondo cui “è possibile attribuire un valore definito ad una grandezza fisica prima della misura”. Questa caratterizzazione delle posizioni filosofiche realiste è insostenibile: come vedremo nella prossima sezione, (*RE*) non è un’asserzione filosofica, ma fisica e, come tale, può essere sottoposta a verifica sperimentale.

7.5. Esperimenti con coppie di fotoni con polarizzazione correlata

Oggi giorno, questi esperimenti sono condotti usando coppie di fotoni prodotte mediante *conversione parametrica* ⁽¹⁸⁾. Tuttavia, per la sua maggiore trasparenza concettuale, discuteremo l’esperimento condotto con coppie prodotte da atomi in un processo a cascata ⁽¹⁹⁾.

7.5.1. La sorgente di fotoni e le loro proprietà

La sorgente è costituita da un fascio di atomi di calcio eccitati da due raggi laser: transizioni a due fotoni portano elettroni dallo stato fondamentale $4s^2$ ($J = 0$) allo stato eccitato $4p^2$ ($J = 0$); da qui, gli elettroni ritornano allo stato fondamentale passando per lo stato intermedio $4s4p$ ($J = 1$) emettendo due fotoni corrispondenti a $\lambda_1 = 553.1$ nm e $\lambda_2 = 422.7$ nm, rispettivamente (fig. 1) ⁽²⁰⁾.

Si considerino due fotoni di una coppia emessi da un singolo atomo e propagantesi in direzioni opposte ($\pm z$).

La conoscenza acquisita suggerisce che le leggi di conservazione sono valide in ogni singolo evento atomico. Poiché i due fotoni sono emessi, mediante due transizioni consecutive, da uno stato iniziale con $J = 0$, attraverso uno stato intermedio con $J = 1$, ad uno stato finale con $J = 0$, i due fotoni gemelli dovrebbero essere entrambi polarizzati circolarmente in senso destrorso (*R*) o in senso sinistrorso (*L*) (per la conservazione del momento angolare). Pertanto

- a) i fasci di luce che viaggiano lungo le direzioni $\pm z$ dovrebbero essere costituiti da un numero statisticamente eguale di fotoni *R* e *L*: i fasci dovrebbero quindi essere non polarizzati;

⁽¹⁸⁾ Si veda, per esempio, [18] e i lavori ivi citati.

⁽¹⁹⁾ Il primo esperimento *EPR* con coppie di fotoni prodotte in un processo a cascata è stato realizzato da Kocher e Commins [19].

⁽²⁰⁾ Questa disposizione sperimentale è quella usata da Aspect *et al.* nel 1981 [20].

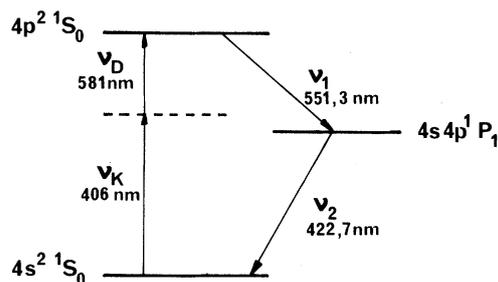


Fig. 1. – I livelli energetici del calcio coinvolti nell'emissione di due fotoni in cascata. Figura riprodotta con licenza da Aspect A., Grangier P., Roger G., *Phys. Rev. Lett.* **47** 460 (1981). Copyright (1981) dell'American Physical Society.

b) tuttavia, ogni singolo fotone dovrebbe avere una polarizzazione definita: R o L . Come suggerito dall'ottica classica, i punti a) e b) possono essere sottoposti a verifica sperimentale mediante l'uso congiunto di una lamina a quarto d'onda e di un polaroid ⁽²¹⁾. Si noti come questo tipo di esperimenti fornisca lo stato di polarizzazione dei fotoni o dei fasci di luce *prima* del loro ingresso nell'apparato di misura (lamina+polaroid).

a) Considerato uno dei due fasci, ogni fotone sarà R o L con probabilità $1/2$. Se è R , esso sarà, dopo la lamina, polarizzato linearmente lungo la direzione a ruotata di $\pi/4$ rispetto all'asse ottico della lamina ⁽²²⁾. Pertanto, il fotone avrà una probabilità $\cos^2 \theta$ di attraversare un polaroid il cui asse formi un angolo θ con \mathbf{a} . Allora, il fotone avrà una probabilità $(1/2) \cos^2 \theta$ di attraversare il sistema (lamina+polaroid).

Se il fotone è L , esso sarà, dopo la lamina, polarizzato linearmente lungo la direzione \mathbf{b} ruotata di un angolo $-\pi/4$ rispetto all'asse ottico della lamina. Pertanto, esso avrà una probabilità $\sin^2 \theta$ di attraversare un polaroid il cui asse formi un angolo θ con \mathbf{a} . Pertanto, la probabilità di attraversare il sistema (lamina+polaroid) sarà $(1/2) \sin^2 \theta$.

Poiché ogni fotone è R o L , la probabilità di attraversare il sistema (lamina+polaroid) sarà $1/2$, indipendente dall'angolo θ . Pertanto, l'intensità del fascio di luce non varia ruotando il polaroid: esso non è polarizzato.

b) Una lamina a quarto d'onda e un polaroid — con il suo asse ruotato di $\pi/4$ rispetto all'asse ottico della lamina in modo tale da lasciar passare, per esempio, fotoni R — sono inseriti nei cammini $(\pm z)$ dei fotoni. Dovremmo osservare che, quando un fotone è rivelato lungo (z) , un fotone sarà rivelato anche lungo $(-z)$; dovremo allora concludere che i fotoni gemelli erano polarizzati R *prima* del loro

⁽²¹⁾ Si veda, per esempio, [21].

⁽²²⁾ In letteratura, sono usate due diverse definizioni di R e L : quello che è R per una, è L per l'altra; e viceversa. Naturalmente, la nostra argomentazione è valida, qualunque definizione sia scelta.

ingresso nell'apparato di misura (lamina+polaroid). Ruotando entrambi i polaroid di $\pi/2$, i fotomoltiplicatori riveleranno in coincidenza solo fotoni L . Infine, ponendo i due polaroid in una configurazione tale che i due apparati di misura (lamina+polaroid+fotomoltiplicatore) rivelano, rispettivamente, fotoni R (lungo z) e fotoni L (lungo $-z$), dovremmo avere un "click" solo lungo (z) o ($-z$) per ogni coppia di fotoni.

Abbiamo quindi visto che l'asserzione "i fotoni della coppia hanno una polarizzazione definita prima della misura" è un'asserzione fisica, cioè verificabile sperimentalmente. Essa non ha nulla a che fare con posizioni filosofiche realiste o meno. Queste considerazioni, suggerite da semplici conoscenze di "fisica classica", sono state completamente ignorate nella discussione degli esperimenti *EPR*.

7.5.2. Un esperimento EPR

Discuteremo ora un tipico esperimento *EPR* con coppie di fotoni prodotte mediante un processo di emissione a cascata, come quello illustrato in fig. 1. Si considerino due fotoni di una coppia emessi da un singolo atomo e propagantesi in direzioni opposte ($\pm z$). Il fotone ν_1 che viaggia lungo la direzione ($+z$) è analizzato dal polaroid A , mentre il fotone ν_2 che viaggia lungo la direzione ($-z$) è analizzato dal polaroid B ; dietro ogni polaroid è collocato un fotomoltiplicatore (un filtro posto sul percorso ($+z$) blocca i fotoni ν_2 , mentre un filtro posto sul percorso ($-z$) blocca i fotoni ν_1)⁽²³⁾. A e B effettuano molte misure: vogliamo conoscere la correlazione tra le misure di A e quelle di B in funzione dell'angolo θ tra i loro assi. La coppia di fotoni è descritta dal vettore di stato

$$(5) \quad |\psi(\nu_1, \nu_2)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|R_1, R_2\rangle + |L_1, L_2\rangle),$$

dove ($|R\rangle$, $|L\rangle$) sono stati di polarizzazione circolare, destrorsa e sinistrorsa, rispettivamente. Tuttavia, siccome un fotone polarizzato circolarmente può essere descritto come una combinazione di due polarizzazioni lineari, la (5) può essere scritta come

$$(6) \quad |\psi(\nu_1, \nu_2)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|x_1, x_2\rangle + |y_1, y_2\rangle),$$

dove ($|x\rangle$, $|y\rangle$) rappresentano polarizzazioni lineari.

Supponiamo che la misura di A sia effettuata prima della misura di B ⁽²⁴⁾. Se la coppia di fotoni è descritta dalla (5), allora la probabilità che il fotone ν_1 passi

⁽²³⁾ A partire dall'esperimento di Aspect *et al.* [20], i polaroid sono stati sostituiti da analizzatori birifrangenti. Tuttavia, essendo interessati agli aspetti concettuali della questione, eviteremo questa complicazione suggerita da disuguaglianze "alla Bell" note sotto il nome di disuguaglianze *BCSH* e significative per mettere alla prova teorie a variabili nascoste.

⁽²⁴⁾ Stiamo seguendo la trattazione di Aspect [22].

attraverso A è pari a $(1/2)$; se \mathbf{a} è la direzione dell'asse di A , allora la coppia di fotoni, dopo la misura fatta da A , è descritta dal vettore di stato

$$(7) \quad |\psi'(\nu_1, \nu_2)\rangle = |\mathbf{a}, \mathbf{a}\rangle.$$

Pertanto, se il polaroid B è orientato come il polaroid A , il fotone ν_2 passa attraverso B ; se, invece, B è ruotato di un angolo θ rispetto ad A , il fotone ν_2 passerà attraverso B con probabilità $\cos^2 \theta$ (legge di Malus). Pertanto, la probabilità che ν_1 passi attraverso A e ν_2 passi attraverso B è data da

$$(8) \quad P(A, B) = \frac{1}{2} \cos^2 \theta.$$

Si osservi come nella descrizione che parte dall'eq. (5) e giunge all'eq. (8) si parli solo di vettori di stato e di predizioni (esiti di misure). Tuttavia, l'interpretazione usuale — di secondo livello — è:

$(QM_1) A$ – Prima della misura, i fotoni di ciascuna coppia non posseggono un valore definito della polarizzazione ⁽²⁵⁾.

$(QM_1) B$ – Di conseguenza, le coppie prodotte dalla sorgente sono descritte dal vettore di stato (5).

$(QM_1) C$ – La probabilità che ν_1 passi attraverso A è $1/2$. Se ν_1 passa attraverso A , allora ν_1 è linearmente polarizzato lungo la direzione dell'asse di A . Contemporaneamente, ν_2 assume la medesima polarizzazione.

$(QM_1) D$ – Se ν_1 passa attraverso A , allora ν_2 passerà attraverso B con probabilità $\cos^2 \theta$, dove θ è l'angolo tra gli assi dei due polaroid (Legge di Malus). Pertanto, la probabilità che ν_1 attraversi A e ν_2 attraversi B è $(1/2) \cos^2 \theta$.

I punti focali sono costituiti dalle asserzioni $[(QM_1) A]$ e $[(QM_1) C]$. L'asserzione $[(QM_1) A]$ è giustificata sulla base dell'assunzione che, per rappresentare una coppia di fotoni mediante uno “stato puro” (come la (5)), sia necessario assumere che, prima della misura, i fotoni non abbiano una polarizzazione definita; diversamente, la coppia di fotoni, andrebbe descritta mediante una “miscela” ⁽²⁶⁾.

⁽²⁵⁾ Si noti come questa assunzione sia in contrasto con il fatto che le leggi di conservazione sono, sulla base della conoscenza sinora acquisita, verificate in ogni evento microscopico. Inoltre, alla luce della discussione svolta nella sezione 7.5.1, sarebbe interessante porre la domanda: come interagisce un fotone la cui polarizzazione non è definita con un polaroid? Si osservi come questa sia una domanda “fisica”, basata sul fatto che la polarizzazione di un fotone è R o L o lineare. La risposta sarebbe verosimilmente elusa affermando che, descrivendo la coppia di fotoni con il vettore di stato (5), si è comunque in grado di predire l'esito dell'impatto del fotone con il polaroid. Ciò metterebbe in luce ancora una volta il fatto che la meccanica quantica è, essenzialmente, un algoritmo predittivo che tende ad ignorare i problemi fisici sottostanti alla sua descrizione.

⁽²⁶⁾ Un approccio formale abbastanza semplice a queste tematiche si trova in [23].

La $[(QM_1)C]$ incorpora un'azione a distanza istantanea, laddove afferma che “contemporaneamente, ν_2 assume la medesima polarizzazione”. Si sostiene che la relatività speciale non è violata perché le correlazioni tra le misure di A e quelle di B sono osservate solo mettendo insieme i loro dati. Tuttavia, il processo sotto accusa non è la lettura dei dati da parte di un osservatore, bensì il presunto processo secondo cui la polarizzazione misurata da A sul fotone ν_1 è istantaneamente trasmessa al fotone ν_2 : senza questa “trasmissione”, l'osservatore che raccoglie i dati di A e di B non vedrebbe mai le correlazioni che, in realtà, egli osserva ⁽²⁷⁾. Tuttavia, siccome parlare di azione a distanza istantanea non è popolare, si preferisce parlare di non-località. Questo stato di cose è conseguenza diretta dell'asserzione $[(QM_1)A]$; se si elimina la $[(QM_1)A]$, si ritrova la precedente descrizione, in cui, tuttavia, la scelta del vettore di stato iniziale sembrerebbe non giustificata.

È stato mostrato che è possibile definire in modo operativo la correlazione tra le polarizzazioni dei fotoni di una coppia; e ciò è possibile per ognuno dei quattro “stati di Bell” [13]. Illustriamo qui solo il caso delle coppie descritte dalla (5). Si dispongano i due polaroid con i loro assi paralleli. Se, per ogni coppia, il fotone ν_1 attraversa A e il fotone ν_2 attraversa B , allora la polarizzazione dei fotoni gemelli è correlata (secondo la (5)). Questa definizione, basata sul vettore di stato (5), correla una proprietà empirica della coppia al vettore di stato che la descrive. Siccome questo tipo di definizione operativa può essere estesa a tutti gli stati di Bell, si dimostra che c'è una corrispondenza biunivoca tra vettori di stato e polarizzazione correlata, empiricamente definita, dei fotoni della coppia: la correlazione tra le polarizzazioni dei fotoni della coppia è una proprietà della coppia così come essa è prodotta dalla sorgente. Possiamo quindi affermare che la scelta del vettore di stato iniziale è connessa al tipo di correlazione tra le polarizzazioni dei fotoni della coppia; essa quindi non avrebbe nulla a che fare con il valore definito o meno della polarizzazione di ciascun fotone prima della misura.

La definizione operativa di polarizzazione correlata basata sulla (5), permette la seguente descrizione dell'esperimento *EPR* sopra discusso:

$(QM_0)A''$ – La polarizzazione dei fotoni della coppia è correlata (secondo la definizione operativa data sopra).

$(QM_0)B''$ – Ogni fotone della coppia possiede una polarizzazione definita: R o L .

$(QM_0)C''$ – Poiché il fotone ν_1 è R o L , esso ha probabilità $1/2$ di attraversare A .

$(QM_0)D''$ – Se ν_1 attraversa A , poiché la polarizzazione dei fotoni è correlata, allora il fotone ν_2 attraversa B se esso è orientato come A ; altrimenti, attraverserà B

⁽²⁷⁾ In molte interpretazioni di secondo livello della meccanica quantica, all'osservatore sono attribuite capacità prodigiose. In questo caso, quello di mascherare un'azione a distanza istantanea; in alcune versioni del “gatto di Schrödinger” di “decidere” se il gatto è vivo o morto; oppure, in alcune interpretazioni, di contribuire, con la sua mente, al “collasso” della funzione d'onda.

con probabilità $\cos^2 \theta$, se θ è l'angolo tra gli assi dei due polaroid (legge di Malus). Pertanto, la probabilità che ν_1 attraversi A e ν_2 attraversi B è $(1/2) \cos^2 \theta$.

Questa descrizione è basata su due caratteristiche usualmente considerate incompatibili; stati puri e valore definito della polarizzazione dei fotoni prima della misura. Tuttavia, il fatto che

- 1) è possibile verificare sperimentalmente $[(QM_0) B'']$,
- 2) essa conduce alla predizione corretta,

costituisce una solida base per ritenere che questa incompatibilità potrebbe non sussistere. La questione può essere considerata anche da un altro punto di vista. Le tre descrizioni sopra discusse conducono, tutte, a predizioni corrette. Tuttavia, le descrizioni usuali condizionano l'uso della (5) all'assunto secondo cui, prima della misura, "la polarizzazione dei fotoni gemelli non è definita". Abbiamo invece visto che, di fatto, la scelta del vettore di stato iniziale è legata al tipo di correlazione esistente tra la polarizzazione dei fotoni gemelli. Cadrebbe quindi la motivazione della descrizione usuale per la scelta del vettore di stato iniziale. In ogni caso, la realizzazione dell'esperimento b) proposto nella sezione 7.5.1 risolverebbe definitivamente la questione.

8. Fisica classica e meccanica quantica

Il dibattito filosofico che ha visto come protagonisti Einstein e i "padri fondatori" della meccanica quantica, sebbene assai complesso, può essere schematizzato dicendo che mentre la visione einsteiniana era caratterizzata da una concezione unitaria della fisica, i suoi interlocutori ponevano drammaticamente l'accento sulle novità concettuali, di metodo, filosofiche, reali o presunte, introdotte dalla meccanica quantica. Sfortunatamente, il dibattito è stato distorto dal ruolo esorbitante svolto da opzioni filosofiche assai discutibili, certamente non dovute ad Einstein. Questa distorsione si è propagata e ingigantita nei decenni successivi: non si può sfuggire alla sgradevole sensazione che le risorse intellettuali dedicate a questo dibattito siano state di gran lunga eccessive rispetto alla rilevanza reale dei temi trattati.

La concezione filosofica di fondo che sta alla base dell'impresa scientifica, riassunta nei postulati iniziali e articolata sull'analisi del processo di misura, non può mutare con l'avvicinarsi delle teorie scientifiche, anche perché essa, per quanto riguarda le assunzioni di fondo, coincide con quella del senso comune razionalmente orientato che ha accompagnato e sorretto l'Umanità nel lungo cammino della sua storia. Pertanto, per quanto concerne il rapporto tra fisica classica e meccanica quantica, il quadro filosofico di riferimento non è mutato; le novità della meccanica quantica riguardano solo la sua struttura formale (sezione 7.1), i suoi fondamenti fisici classici (sezione 7.1) e il carattere probabilistico di alcune delle sue predizioni.

9. Causalità

Il principio di causalità riguarda le Immagini del Mondo: pertanto la sua validità è solo plausibile. Esso è un criterio organizzatore dell'esperienza; sulla base della

conoscenza acquisita (teorica e sperimentale), esso permette di effettuare previsioni attendibili; costituisce infine un impegno metodologico teso alla ricerca delle cause.

Esso è stato frequentemente posto in discussione dopo la nascita della meccanica quantica. Si sostiene che, mentre le teorie probabilistiche della fisica classica riflettono la nostra ignoranza dei fenomeni, la natura probabilistica della meccanica quantica riflette la natura indeterministica dei fenomeni quantici.

L'attribuzione di una caratteristica generale di una teoria (in questo caso la sua natura probabilistica) al Mondo è una asserzione *realista* forte: pertanto, siamo chiamati a valutare attentamente la sua plausibilità.

Una disciplina che, in assenza di evidenze conclusive, abbandoni veramente “la ricerca delle cause”, è destinata ad inaridire le sue sorgenti vitali.

10. Fisica e filosofia

Lo sviluppo storico della Scienza mostra che le teorie scientifiche possono essere ispirate da posizioni filosofiche; oppure che nuove acquisizioni scientifiche possono contribuire a modificare visioni filosofiche. Questo intreccio può essere fecondo, ma solo se i campi di indagine sono mantenuti rigorosamente distinti. Ciò non è sicuramente avvenuto per quanto concerne la meccanica quantica. Asserzioni del tipo “prima della misura i fotoni della coppia non hanno polarizzazione definita” se non suscettibili di verifica sperimentale diretta o indiretta (e, quindi, metafisiche), non possono avere cittadinanza all'interno delle descrizioni formali (matematizzate) della fisica. Il loro uso (sezione 7.5.2) ha condotto, da un lato, alla presunta non-località della meccanica quantica; dall'altro ha ridato alimento a posizioni filosofiche secondo cui l'osservatore contribuisce a costruire la “realtà” [24].

A partire dal lavoro di Bell [14], si è diffuso un gioco bizzarro: costruire teorie chiamate “realiste” e inventare esperimenti sempre più sofisticati per confutare quelle teorie ⁽²⁸⁾. Se ci piace, possiamo continuare in questo gioco (un po' perverso, per la verità); tuttavia, siccome i postulati di una teoria non possono essere logicamente dedotti da una filosofia, dobbiamo essere consapevoli che *gli esperimenti confutano talora una teoria, ma mai una filosofia*.

11. Senso comune razionalmente orientato

Come già argomentato, le opzioni filosofiche di fondo che stanno alla base dell'impresa scientifica costituiscono anche il fondamento del senso comune razionalmente orientato. Questo fatto ha implicazioni profonde. Da un lato, il senso comune razionalmente orientato condivide alcuni fondamentali valori che stanno alla base della pratica scientifica. In particolare, rifiuta le posizioni dogmatiche: di conseguenza, valuta le idee sulla base della loro consistenza logica rispetto al contesto in cui sono inserite e del loro

⁽²⁸⁾ Tuttavia, questi esperimenti hanno migliorato la nostra abilità nella produzione e manipolazione di coppie di fotoni con polarizzazione correlata.

fondamento empirico ed elabora Immagini del Mondo basate su conoscenze considerate ragionevolmente acquisite; considera il dissenso come una naturale manifestazione di punti di vista differenti e ritiene che le divergenze di opinione possano essere razionalmente ricomposte. È tuttavia consapevole che, su materie quali l'etica individuale e la politica, una ricomposizione razionale delle divergenze è ostacolata da scelte di valore, da credenze religiose, da interessi economici e da componenti affettive. Dall'altro, gli scienziati dovrebbero accuratamente evitare di diffondere le acquisizioni della Scienza come se fossero in contrasto con il "senso comune" o circondandole di aloni "magici"; dovrebbero invece costantemente impegnarsi in una accurata opera di divulgazione che solleci le componenti razionali del cittadino.

12. La filosofia della Scienza nell'insegnamento della scuola secondaria: less is more

Questo motto andrebbe applicato sistematicamente ogni qualvolta si ponga il problema di cosa e come insegnare nella scuola. Vale anche, e forse a maggior ragione, per quanto concerne la questione, pur fondamentale, di quale tipo di conoscenza siano portatrici le discipline scientifiche sperimentali. Elementi di riflessione filosofica sulla scienza e sulla tecnologia dovrebbero *sottendere* l'insegnamento delle discipline sperimentali. Tali elementi non dovrebbero ignorare i valori — anche di natura etica — che stanno (o dovrebbero stare) alla base della pratica scientifica [25]. E' un compito impegnativo e delicato che presuppone un solido ancoraggio dell'insegnante su poche ma fondamentali questioni e la capacità di sottrarsi al relativismo delle usuali presentazioni, come semplici giustapposizioni, del pensiero dei filosofi e dei filosofi della scienza. In un contesto in cui credenze irrazionali e fanatismi religiosi di vario tipo e intensità paiono aumentare invece di diminuire, è di fondamentale rilevanza abituare le nuove generazioni alla riflessione critica sul contributo che la Scienza ha dato al patrimonio di conoscenze dell'Umanità e sul suo vitale ruolo nei secoli a venire. (g.g.)

Le nostre prospettive scientifiche sono ormai agli antipodi tra loro. Tu ritieni che Dio giochi ai dadi col Mondo; io credo invece che tutto obbedisca a una legge, in un Mondo di realtà obiettive che cerco di cogliere per via furiosamente speculativa. Lo credo fortemente, ma spero che qualcuno scopra una strada più realistica — o meglio un fondamento più tangibile — di quanto non abbia saputo fare io. Nemmeno il più grande successo iniziale della teoria dei quanti riesce a convincermi che alla base di tutto vi sia la casualità, anche se so bene che i colleghi più giovani considerano quest'atteggiamento come un effetto di sclerosi. Un giorno si saprà quale di questi due atteggiamenti istintivi sarà stato quello giusto [26].

Albert Einstein

Bibliografia

- [1] PLANCK M., *La conoscenza del Mondo fisico* (Einaudi, Torino) 1942, pp. 205-206.
- [2] REICHENBACH H., *I fondamenti filosofici della meccanica quantistica* (Boringhieri, Torino) 1954, p. 121.
- [3] BRIDGMAN P., *Reflections of a physicist* (Philosophical Library, New York) 1955, pp. 82-83.
- [4] MAXWELL J.C., 'Ether' in: *Encyclopaedia Britannica*, IX edition (1875-1879).
- [5] Rif. [1], p. 206.
- [6] <http://plato.stanford.edu/>
- [7] HERTZ H., *Electric Waves* (Dover) 1962. Traduzione inglese (1893) dell'edizione originale tedesca del 1892, p. 21. Traduzione italiana parziale in rete alla pagina:
<http://fiscavolta.unipv.it/percorsi/pdf/ew.pdf>
- [8] HERTZ H., *I principi della meccanica presentati in una nuova forma*, traduzione a cura di Giovanni Gottardi, Collana di Storia della Scienza (La Goliardica Pavese) 1996.
- [9] MILANI R., *Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894): modelli, fisica e filosofia*, Tesi di laurea, Pavia, 2000; GIULIANI G., *Heinrich Hertz: fisica, metodo e filosofia* in: GUIDONE M., MUZZARELLI FORMENTINI C., *Roberto Clemens Galletti di Cadillac, pioniere della telegrafia senza fili* (Fermo) 2001, pp. 111-119. In rete alla pagina: <http://fiscavolta.unipv.it/percorsi/hertz.asp>
GIULIANI G., *Il Nuovo Cimento - Novant'anni di fisica in Italia: 1855 - 1944, Collana Percorsi della Fisica* (La Goliardica Pavese, Pavia) 1996, pp. 42-54. In rete alla pagina:
<http://fiscavolta.unipv.it/percorsi/filosofia.it.asp>
- [10] CORBINO O. M., *I fondamenti sperimentali delle nuove teorie fisiche*, in *Conferenze e discorsi*, Roma (1938), p. 22.
- [11] Rif. [7], p. 27.
- [12] MAXWELL J. C., *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Third edition, vol. II (Dover Publications) 1954, pp. 210-211, par. 569. La prima edizione del Trattato è in rete all'interno del sito: <http://gallica.bnf.fr>
- [13] GIULIANI G., *Nuovo Cimento B*, **122** (2007) 267.
- [14] BELL J., *Phys.*, **1** (1964) 195.
- [15] EINSTEIN A., PODOLSKY B. ROSEN N., *Phys. Rev.*, **47** (1935) 777.
- [16] FUCHS C. A., PERES A., *Phys. Today* **53**, no. 3 (2000) 70.
- [17] Rif. [7], p. 28.
- [18] ALTEPETER J. B., JEFFERY E. R., KWIAT P. G., *Opt. Exp.*, **13** (2005) 8951.
- [19] KOCHER C. A., COMMINS E. D., *Phys. Rev. Lett.*, **18** (1967) 575.
- [20] ASPECT A., GRANGIER P., ROGER G., *Phys. Rev. Lett.*, **47** (1981) 460. in rete alla pagina:
<http://prola.aps.org/abstract/PRL/v47/i7/p460.1>
- [21] FLEURY P., MATHIEU J.P., *Fisica generale e sperimentale*, vol. V (Zanichelli, Bologna) 1966, cap. VII; GIULIANI G., BONIZZONI I., *Lineamenti di elettromagnetismo* (La Goliardica Pavese) 2004, pp. 335-370.
- [22] ASPECT A., in *Quantum [Un]speakables—From Bell to quantum information*, a cura di BERLMANN A., ZEILINGER A. (Springer, Berlin) 2002. In rete alla pagina:
<http://arxiv.org/abs/quant-ph/0402001>
- [23] NICROSINI O., *Paradosso EPR e teorema di Bell, Quaderni di Fisica Teorica, Pavia (1991)*. In rete all'indirizzo: <http://www.pv.infn.it/~nicosi/paradosso/home.htm>
- [24] MERMIN N. D., *Phys. Today* **38**, no. 4 (1985) 38. WEIHS G., JENNEWAIN T., SIMON C., WEINFURTER H., ZEILINGER A., *Phys. Rev. Lett.*, **81** (1988) 5039.
- [25] GIULIANI G., SPERANDEO R. M., *G. Fis.*, **47** (2006) 1.
- [26] EINSTEIN A. BORN M., *Einstein - Born, Scienza e vita, Lettere 1916 - 1955* (Einaudi, Torino) 1973, p. 176 (lettera di Einstein a Born del 7 settembre 1944).