

Fisica classica e fisica quantica: una descrizione unitaria della ‘realtà’

Giuseppe Giuliani

Dipartimento di Fisica ‘Volta’, Pavia

giuliani@fisicavolta.unipv.it

<http://fisicavolta.unipv.it/percorsi>

Quando una concezione si diffonde all'interno di un collettivo di pensiero e lo permea abbastanza fortemente, fino a penetrare nella vita quotidiana e nelle locuzioni linguistiche, quando diventa un modo di vedere nel senso letterale del termine, una contraddizione sembra impensabile e inimmaginabile.

Ludvik Fleck, *Genesi e sviluppo di un fatto scientifico*, Il Mulino, 1983, Bologna, p. 85.

Riassunto. In questo scritto sono discusse alcune questioni relative alla natura delle teorie fisiche alla luce di una posizione filosofica che potremmo definire di *realismo temperato*. La strumentazione concettuale così acquisita, è poi applicata ad alcuni aspetti della Meccanica Quantica. Si mostra così che l'interpretazione ‘ortodossa’ della Meccanica Quantica introduce, accanto ai postulati formali della teoria, asserzioni ontologiche quali quelle relative all'*esistenza* dello stato di sovrapposizione o dello stato entangled. Tali asserzioni non sono usate nella deduzione delle predizioni della teoria che dipendono unicamente dal suo formalismo: esse, tuttavia, condizionano l'interpretazione dei dati sperimentali implicando, negli esperimenti di tipo *EPR*, una specie di azione a distanza istantanea. Si mostra infine che la trattazione usuale delle posizioni filosofiche ‘realiste’ si traduce nella costruzione di teorie fisiche il cui ruolo principale è quello di essere confutate dall'esperimento. Queste confutazioni provano semplicemente che le teorie sono sbagliate: nessuna conclusione può essere ricavata per quanto concerne il realismo (od altre posizioni filosofiche), perché gli esperimenti confutano, talvolta, le teorie; ma queste non sono mai logiche conseguenze di posizioni filosofiche.

Abstract. Some basic issues concerning physical theories are handled from a viewpoint of a (defined) ‘tempered’ realism. On these basis, the ‘orthodox’ interpretation of Quantum Mechanics is shown to be realist at a level much more deeper than required and, in my view, untenable. In particular, it is shown that the ‘orthodox’ interpretation of Quantum Mechanics inserts ontological assertions, like those about the existence of the superposition state or the entangled state, in the postulates of the theory. These ontological assertions are never used in the deduction chain that ends in the experimentally testable predictions (that are logical products of the mathematical machinery); on the other hand, these assertions heavily influence the

interpretations of the experimental results to the extent of implying, in the case of *EPR* experiments, a kind of instantaneous action at a distance. Finally, it is argued that the usual treatment of realist philosophical positions ends up in the construction of theories whose major role is that of being disproved by experiment. These confutations show simply that the theories are wrong: no conclusion can be drawn about realism (or other philosophical positions) because experiment disproves, sometime, theories; but these are never logical consequences of a philosophy.

Indice

1	Scienza e realtà	2
1.1	Quale realismo?	3
1.2	Grandezze fisiche, misure, immagini del Mondo	4
2	Che cosa è una teoria fisica	6
2.1	Quando una teoria fisica è causale?	8
3	La Meccanica Quantica	11
3.1	La Meccanica Quantica si fonda sulla Fisica classica	11
3.2	La Meccanica Quantica è una teoria realista	12
3.3	Questioni <i>EPR</i>	15
3.3.1	Coppie correlate di fotoni	15
3.3.2	Appendice: le disuguaglianze <i>BCHSH</i>	20
4	Causalità	22
5	Fisica e Filosofia	22

1 Scienza e realtà

La Scienza, intesa come l'insieme delle discipline sperimentali, si è sviluppata sulla base di tre presupposti:¹

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

Su questo presupposto si sono radicati altri due postulati:

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

¹Questa sezione riprende argomenti sviluppati nel primo capitolo del volume: G. Giuliani, I. Bonizzoni, *Lineamenti di elettromagnetismo*, La Goliardica Pavese, 2004. D'ora in avanti: *LEM*.

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

Il primo postulato 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. Il principio di causalità è certamente più problematico; tuttavia, inteso come *principio metodologico* teso alla ‘ricerca delle cause’, è stato uno dei principali motori dello sviluppo scientifico. Infine il terzo postulato è stato, *sinora*, corroborato sia dalla pratica scientifica sia – più in generale – dall’esperienza umana.

1.1 Quale realismo?

L’accettazione del postulato fondamentale del realismo (*P1*), fa sorgere immediatamente il problema del rapporto tra Mondo, descrizioni (teorie) e immagine del Mondo. Per immagine del Mondo intendiamo una descrizione del Mondo o di sue parti che utilizza *asserzioni ontologiche*, cioè affermazioni sull’esistenza di qualcosa.

Le descrizioni della Fisica 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*.

Le entità teoriche fondamentali della Fisica del Novecento sono quelle di particella, onda e campo. Altre entità teoriche sono, per esempio, quella 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.

Una diffusa forma di realismo è costituita dal *realismo delle teorie*: è caratterizzato dalla convinzione che le teorie descrivano ciò che effettivamente accade nel Mondo. Il *realismo delle entità teoriche* ritiene che alcune o tutte le entità teoriche usate dalle teorie esistano nel Mondo; quindi risponde, non sempre negativamente, a domande del tipo: esiste l’elettrone, esiste l’onda elettromagnetica...? Il realismo delle teorie implica, naturalmente, quello delle entità teoriche.

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*. Anche a questa obiezione non si può rispondere se si richiede che le teorie siano 'copie' del Mondo. A queste obiezioni se ne aggiunge una terza: il realismo delle teorie implica il realismo delle entità teoriche, perché deve necessariamente asserire che *tutte* le entità teoriche usate dalle teorie esistono. Tuttavia, come vedremo, le asserzioni ontologiche non discendono logicamente dalla conoscenza acquisita, ma sono solo rese plausibili da essa. Il realismo delle teorie è quindi intrinsecamente insostenibile.

1.2 Grandezze fisiche, misure, immagini del Mondo

Da un punto di vista matematico, l'aspetto più importante di ogni fenomeno è quello di una grandezza misurabile.

J.C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, Dover Publications, New York, 1954. Prefazione alla prima edizione, p. VI.

E' un luogo comune affermare che la diffusione dell'esperimento sia stato alla base dello sviluppo della Scienza. Se questa affermazione è corretta, essa implica che l'analisi filosofica del procedimento di *misura*, deve permetterci, da un lato, di comprendere il ruolo propulsivo dell'esperimento e, dall'altro, di delineare una 'teoria della conoscenza' prodotta dalle discipline sperimentali.

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 più o meno definito, esprimibile mediante un numero accompagnato da un margine di errore.

Consideriamo la misura di una grandezza fisica G_E associata ad una entità teorica E effettuata mediante un apparato A (parte superiore della figura 1). Nell'ambito di una determinata teoria o di una descrizione basata sulla conoscenza acquisita, l'esito della misura dipende dal rapporto o dall'interazione tra l'entità teorica e lo strumento di misura (considerato anch'esso come un'entità teorica) e *non può*, in nessun caso, *essere interamente attribuito allo strumento*. Se la misura consiste nell'interazione tra l'entità teorica e lo strumento di misura, lo stato dello strumento è modificato dal processo di misura e la modifica dello stato è, per esempio, indicata dallo spostamento di un indice o dalla variazione di un numero. Anche il valore della grandezza fisica misurata è, in generale, modificato dal processo di misura.

ANALISI DELLA MISURA

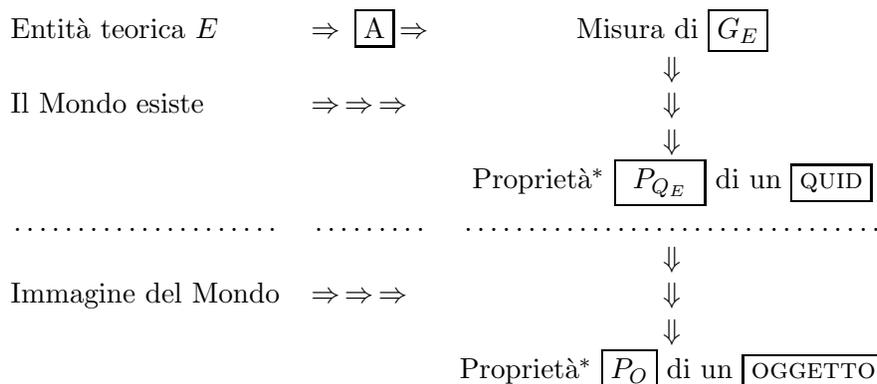


Figura 1: i punti che separano la parte inferiore della figura da quella superiore ricordano che l'immagine del Mondo non discende logicamente dalla conoscenza acquisita, anche se deve essere compatibile con essa; l'asterisco ricorda che le proprietà del *quid* o dell'oggetto possono essere diverse da quelle descritte dalla teoria.

Esempio: nella misura della corrente di un circuito mediante un amperometro, l'inserimento dell'amperometro nel circuito ne aumenta la resistenza e, quindi, ne diminuisce la corrente.

L'esito della misura 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.

Per procedere oltre, è necessario costruire una *immagine del Mondo* mediante asserzioni sull'esistenza delle entità teoriche usate dalle teorie. Tali asserzioni, pur non derivando logicamente dall'insieme della conoscenza acquisita, debbono essere con essa compatibili. E', per esempio, compatibile con l'intera conoscenza acquisita l'asserzione che esiste l'elettrone: ciò significa che nel Mondo c'è un *quid* che possiede proprietà che corrispondono alle proprietà attribuite dalla nostra teoria all'elettrone e che questo *quid* si comporta in accordo con le leggi della nostra teoria e con proprietà che sono descritte dai valori misurati delle grandezze fisiche che la nostra teoria attribuisce all'elettrone. Possiamo convenire che l'asserzione 'l'elettrone esiste' è semplicemente

e *solo* una comoda abbreviazione dell'asserzione precedente.² Un'entità teorica descritta come esistente in una immagine del Mondo può essere considerata un *oggetto*, per sottolineare il fatto che essa non differisce sostanzialmente dagli oggetti della vita quotidiana (parte inferiore della figura 1).

Le asserzioni ontologiche si fondano sulla conoscenza acquisita e sono solo plausibili; esse svolgono un ruolo solo all'interno di una *immagine del Mondo*. Un'immagine del Mondo – nei limiti di attendibilità della conoscenza acquisita e della plausibilità delle asserzioni ontologiche compatibili con essa – mostra come è fatto il Mondo e come funziona.³ L'immagine del Mondo ha, come la conoscenza acquisita da cui deriva, carattere storico, e quindi varia nel tempo; tuttavia l'attendibilità delle sue componenti più antiche cresce con il tempo e queste tendono a divenire più stabili della stessa 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. L'immagine del Mondo costituisce inoltre il fondamento di ogni pratica scientifica: guida lo sperimentatore in laboratorio e svolge un ruolo euristico nella riflessione teorica; nella versione socializzata, costituisce uno strumento di interpretazione e organizzazione dell'esperienza e di guida comportamentale.

2 Che cosa è una teoria fisica

A proposito della teoria di Maxwell, Hertz scriveva:

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.⁴

²Come contro - esempio, si pensi all'Etere, entità teorica largamente usata nell'Ottocento: asserire la sua esistenza non è oggi compatibile con la conoscenza acquisita.

³L'attendibilità della conoscenza acquisita si valuta sulla base dell'accordo tra predizioni teoriche ed osservazioni sperimentali; la plausibilità delle asserzioni ontologiche sulla base della loro compatibilità con la conoscenza acquisita.

⁴Hertz, *Electric waves*, Dover Publications, New York, 1962, p. 21. Ristampa della prima traduzione inglese (1893) dell'edizione originale tedesca del 1892. Alla pagina <http://fisicavolta.unipv.it/percorsi/pdf/ew.pdf> si trova una traduzione italiana di alcune pagine di Hertz.

Potremmo precisare che la teoria di Maxwell è il sistema di equazioni di Maxwell ‘interpretato’: il problema dunque si sposta sul significato del termine ‘interpretato’. Dei vari possibili significati, ci soffermiamo su quello necessario affinché un sistema di equazioni, come quello di Maxwell, possa essere definito una ‘teoria fisica’:

- ◇ *Interpretare un sistema di equazioni significa indicare quali sono le procedure necessarie per misurare almeno alcune grandezze fisiche che compaiono nelle equazioni e, quindi, permettere il confronto tra le predizioni ricavabili dal sistema di equazioni e l’esperimento.*

Esiste, tuttavia, almeno un livello di interpretazione distinto da quello ‘minimo’ sopra indicato. Esso si avvale di una immagine del Mondo e svolge una funzione euristica fondamentale. Per rimanere nell’ambito della teoria di Maxwell, Ferraris osservava che, da un punto di vista matematico, date le ‘sorgenti’ ρ (densità di carica) e \vec{J} (densità di corrente), si ricavano i campi \vec{E} e \vec{B} ; oppure, dati i campi, si ricavano le ‘sorgenti’.⁵ Da un punto di vista fisico le due alternative sono, tuttavia, profondamente diverse. Hertz e Ferraris, nel loro contesto di conoscenze, pensavano che le entità teoriche (ontologicamente) fondamentali fossero i campi mentre le cariche e le correnti fossero entità teoriche secondarie. Nel descrivere la fisica del condensatore, Hertz scriveva infatti:

Piuttosto, *concepriamo ora le polarizzazioni come le sole cose che sono realmente presenti;*⁶ esse sono la causa dei movimenti dei corpi ponderabili, e di tutti i fenomeni che permettono la nostra percezione dei cambiamenti di questi corpi. La spiegazione della natura delle polarizzazioni, delle loro relazioni e dei loro effetti, noi le attribuiamo a, o cerchiamo di trovarle sulla base di, ipotesi meccaniche; ma ci rifiutiamo di riconoscere nelle elettricità e nelle forze - a - distanza una spiegazione soddisfacente di queste relazioni e di questi effetti. Le espressioni elettricità, magnetismo, ecc., hanno, d’ora innanzi, solo il valore di una abbreviazione.⁷

Naturalmente, questa interpretazione delle equazioni di Maxwell si basa su scelte ontologiche. Nel caso di Hertz, sono considerate come esistenti nel Mondo le *polarizzazioni* del mezzo materiale (o dell’Etere). Secondo questa concezione, le cariche delle armature del condensatore sono ‘prodotte’ dalle

⁵G. Ferraris, ‘Teoria geometrica dei campi vettoriali’, in *Opere di Galileo Ferraris*, Volume I, (Milano, 1902), 389 - 492. Il titolo, completato dalla locuzione ‘Come introduzione allo studio della elettricità, del magnetismo, ecc.’, è dovuto a Riccardo Segre, curatore dell’articolo, pubblicato postumo. Secondo Segre, la stesura definitiva di questo lavoro è del biennio 1894 - 95.

⁶Corsivo mio.

⁷Nota 4, p. 25.

polarizzazioni del mezzo (od Etere) contenuto tra le armature. La nostra concezione dell'elettromagnetismo classico, dovuta a Lorentz, prevede invece che i campi siano 'prodotti' dalle cariche elettriche. Peraltro, il fatto che siano le cariche a 'produrre' i campi e non viceversa, ha assunto con i potenziali ritardati di Liénard e Wiechert, la caratteristica di una teoria fisica con predizioni osservative verificabili sperimentalmente.⁸

2.1 Quando una teoria fisica è causale?

La risposta a questa domanda presuppone una precisazione relativa al rapporto tra il principio di causalità e la causalità delle teorie fisiche. Il principio di causalità (pagina 3 e sezione 4) è un principio metodologico che ispira il lavoro dello scienziato. Una teoria non è, intrinsecamente, 'causale': lo *diventa* in specifici contesti interpretativi. Il ruolo principale svolto dalle teorie è quello di fornire predizioni circa il risultato di possibili misure. Se ci limitiamo a questo ambito, usando formule e procedure sperimentali, riusciamo a mettere a confronto le predizioni della teoria con i risultati dell'esperimento: non è necessario, a questo livello, introdurre alcuna asserzione di tipo causale. E' peraltro possibile, in molti casi, interpretare la teoria con categorie causali. Tuttavia, il fatto che, così operando, la teoria *diventi* causale, non implica che, nel Mondo, siano riprodotte le sequenze causali previste dalla teoria: possiamo solo ritenere più o meno *plausibile* che questa 'corrispondenza' tra teoria e Mondo si verifichi. Analogamente, il fatto che una teoria sia probabilistica, non implica che, nel Mondo, i fenomeni descritti dalla teoria non possano seguire sequenze causali.

Cerchiamo ora di specificare alcune condizioni sotto le quali una teoria *diventa* causale.

1. Quando le sue equazioni connettono il valore di una grandezza fisica nel punto \vec{r} all'istante t a quello di un'altra grandezza fisica nello stesso punto allo stesso istante. Per esempio l'equazione $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ è di questo tipo: *in un determinato contesto interpretativo* essa ci permette di affermare che (A) il campo elettrico \vec{E} è la 'causa' della densità di corrente \vec{J} . Si noti come la locuzione "in un determinato contesto interpretativo" sia essenziale: l'equazione citata può infatti anche essere letta dicendo che (B) la densità di corrente \vec{J} è la 'causa' del campo elettrico \vec{E} . Ovviamente, le due interpretazioni non sono equivalenti all'interno di una *plausibile* immagine del Mondo che sia compatibile con la conoscenza acquisita: ragionevolmente, la scelta cade su (A).

⁸Si veda, per esempio: *LEM*, pp. 120 - 132.

2. Quando le sue equazioni connettono il valore di una grandezza fisica nel punto \vec{r} all'istante t a quello di un'altra grandezza fisica nel punto \vec{r}^* all'istante precedente t^* e la distanza d tra i due punti considerati è tale per cui $c(t - t^*) < d$. Per esempio, sono equazioni di questo tipo quelle che legano il campo elettromagnetico prodotto da una carica puntiforme alla carica medesima. Nell'usuale contesto interpretativo dell'elettromagnetismo di Lorentz queste equazioni ci permettono di affermare che la carica in questione è la 'causa' del campo elettromagnetico.

Sembrano risposte ragionevoli. Tuttavia, non sono del tutto soddisfacenti. Per rendercene conto, consideriamo l'esperimento interferenziale con due fenditure condotto con onde luminose (nella configurazione di Fraunhofer). Anche in questo caso, sulla base delle equazioni che usiamo, possiamo affermare (sempre all'interno di un contesto interpretativo) che la sorgente luminosa è la 'causa' delle macchie di luce sullo schermo; che le due fenditure sono la 'causa' della particolare configurazione di queste macchie (essa dipende infatti dalla larghezza b delle due fenditure e dalla loro distanza d). Inoltre, la teoria pone in evidenza il contributo interferenziale delle due fenditure e quello diffrattivo di ogni singola fenditura (equazione 1 e figura 2).

$$I = 4I_0 \left[\frac{\sin(\pi b \sin \theta / \lambda)}{\pi b \sin \theta / \lambda} \right]^2 \cos^2 \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \quad (1)$$

Proviamo ora a porci la domanda: qual'è il percorso dell'energia tra lo schermo contenente le due fenditure e lo schermo di osservazione? Ci accorgiamo che la teoria non sa rispondere. Vediamo perché:

- a) La predizione della distribuzione dell'energia sullo schermo di osservazione è una conseguenza diretta della regola di sovrapposizione vettoriale dei campi, implicita nelle equazioni di Maxwell. In un generico punto R dello schermo, si sommano i campi elettrici delle porzioni d'onda provenienti dalle due fenditure A e B : l'energia depositata nel punto R risulta proporzionale al quadrato del campo elettrico risultante.
- b) Supponiamo che R sia un punto di buio, cioè un punto in cui i campi elettrici si sommano in modo tale per cui il loro risultante è nullo. I campi, provenienti da A e da B si incontrano in R , interferiscono e si annullano. Dove è finita l'energia associata alle due porzioni d'onda (ai due campi)?
- c) Supponiamo che R sia un punto di massima luce: i campi si sommano in modo tale da dare $\vec{E}_T = \vec{E}_A + \vec{E}_B = 2\vec{E}_0$, se si assume che l'ampiezza

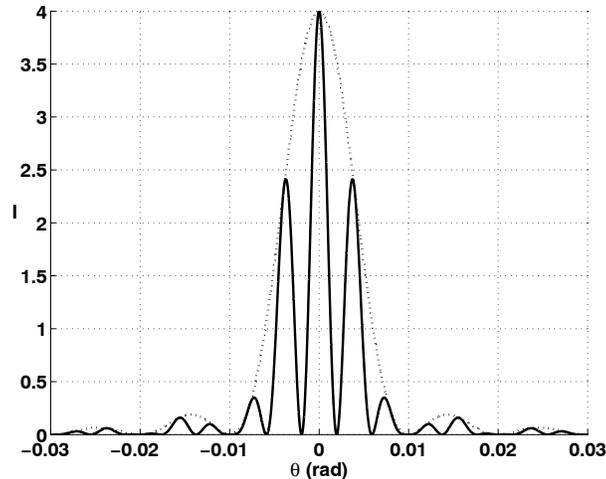


Figura 2: figura di interferenza prodotta da due fenditure secondo l'equazione (1 in cui si è posto $I_0 = 1$). I valori dei parametri usati sono: $b/\lambda = 100$; $d/b = 8$. La curva piena rappresenta l'intensità predetta dalla teoria; la curva tratteggiata il termine diffrattivo in (\sin^2) : sarebbe la curva osservata con una sola fenditura la cui intensità fosse quadrupla di quella considerata.

delle due onde in R sia la stessa ed uguale ad E_0 . L'energia depositata in R è in questo caso proporzionale a $4E_0^2$, mentre l'energia associata a ciascuno dei due campi interferenti è proporzionale a E_0^2 : da dove proviene l'eccesso di energia proporzionale a $2E_0^2$?

La teoria prevede correttamente quale è il valore dei campi in un generico punto dello schermo di osservazione e quale è la distribuzione di energia sullo schermo: non è invece in grado di descrivere quale sia il percorso dell'energia tra le due fenditure e lo schermo e, quindi, quale sia il percorso dell'energia tra la sorgente e lo schermo. Dobbiamo concludere che, a questo livello descrittivo, la *teoria è predittiva ma non causale*. Pertanto: il fatto che si possa o non si possa considerare causale una teoria dipende dal livello descrittivo scelto. Naturalmente, queste sono caratteristiche della teoria e non (necessariamente) del Mondo che la teoria cerca di descrivere.

La situazione è ancora più complessa. Infatti, l'elettromagnetismo classico prevede correttamente la distribuzione di energia sullo schermo indipendentemente dal fatto che si usi una sorgente di luce intensa o talmente debole che, (dal punto di vista corpuscolare) ci sia in media un solo quanto di luce in volo tra la sorgente e lo schermo di osservazione. (L'energia erogata dalla sorgente deve essere la stessa nei due casi). Non solo: introducendo l'ipotesi aggiuntiva secondo cui la probabilità che un quanto di luce arrivi nel punto generico R

dello schermo è proporzionale all'intensità nel punto R , la teoria di Maxwell acquista le stesse capacità predittive della descrizione quantica, nel senso che descrive anche il comportamento probabilistico di un singolo fotone.

Se, in riferimento alla figura 2, si pone:

$$P(\theta)d\theta = aI(\theta)d\theta$$

dove a è una costante, e $P(\theta)d\theta$ rappresenta la probabilità che un fotone arrivi tra θ e $\theta + d\theta$, deve essere:

$$\int P(\theta)d\theta = a \int I(\theta)d\theta = 1$$

da cui:

$$a = \frac{1}{\int I(\theta)d\theta}$$

e:

$$P(\theta) = \frac{I(\theta)}{\int I(\theta)d\theta}$$

Naturalmente, questa ipotesi *aggiuntiva* è un'ipotesi *ad hoc*. Tuttavia, essa è concettualmente significativa perché trasforma l'elettromagnetismo classico in una teoria probabilistica. Abbiamo così visto come una medesima teoria sia, a seconda del livello descrittivo richiesto, predittiva e causale, solo predittiva, predittiva e probabilistica.

3 La Meccanica Quantica

3.1 La Meccanica Quantica si fonda sulla Fisica classica

La Meccanica Quantica si fonda sulla fisica classica per diversi ordini di ragioni. Innanzitutto, la definizione degli operatori quantici si basa su regole postulative che trasformano grandezze fisiche 'classiche' in operatori. In secondo luogo, le misure sono effettuate con strumenti che, come in Fisica classica, effettuano conteggi o misurano, in ultima analisi, lunghezze, intervalli di tempo, o forze.⁹ Infine, 'frammenti' di elettromagnetismo classico sono assorbiti nella Meccanica Quantica. Si pensi, ad esempio, alla trattazione non relativistica dell'atomo di idrogeno mediante l'equazione di Schrödinger degli stati stazionari: in essa compare l'energia potenziale dell'elettrone nel campo coulombiano del protone; oppure alla trattazione relativistica dell'elettrone in un campo esterno ed al ruolo svolto in essa dal quadripotenziale dell'elettromagnetismo classico. La Meccanica Quantica appare pertanto come un edificio teorico costruito su basi

⁹Si veda, per esempio: *LEM*, capitolo 13.

classiche. Le sue capacità predittive si estendono, tuttavia, su ampi domini fenomenologici che si sottraggono alle capacità descrittive della Fisica classica.

La discussione svolta nella sezione 2.1 ci ha insegnato che una teoria può essere causale o probabilistica a seconda del livello descrittivo ad essa richiesto. Questo vale anche per la Meccanica Quantica. Si consideri, per esempio l'equazione:

$$\hat{H}\psi = i\hbar \frac{\partial\psi}{\partial t} \quad (2)$$

che *determina* l'evoluzione temporale della ψ .

La funzione d'onda ψ non ha significato fisico diretto: essa *non* è una grandezza fisica, se richiediamo che una grandezza fisica sia misurabile. D'altra parte essa, come le grandezze fisiche, descrive proprietà del sistema fisico da essa rappresentato. Infatti:

$$\psi\psi^* d\tau \quad (3)$$

fornisce la probabilità che la particella descritta dalla ψ si trovi nell'elemento di volume $d\tau$ (se la ψ è 'normalizzata'). Oppure:

$$\int \psi^*(\hat{A}\psi) d\tau \quad (4)$$

fornisce il valore di aspettazione (o il valore medio) della grandezza fisica A nello stato descritto dalla ψ (\hat{A} è l'operatore corrispondente alla grandezza fisica A). A questo livello descrittivo, la teoria è probabilistica.

3.2 La Meccanica Quantica è una teoria realista

La Meccanica Quantica è una teoria realista perché si basa sul postulato dell'esistenza del Mondo e perché utilizza descrizioni di esperimenti e rapporti sulle misure: queste descrizioni e questi rapporti sono discorsi realisti.¹⁰ Ma essa, nella interpretazione 'ortodossa', è realista ad un livello più profondo - e non condivisibile - perché inserisce asserzioni ontologiche nei postulati della teoria.

Come primo esempio, consideriamo un sistema fisico S che si presenti in due stati ugualmente probabili. La sua funzione d'onda è:

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_1 + \psi_2) \quad (5)$$

¹⁰Questa parte dello scritto riprende argomentazioni svolte in: G. Giuliani, 'On realism and Quantum Mechanics', pubblicato in Physics e - Print - Archive: <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0507028>.

dove i suffissi 1 e 2 si riferiscono ai due stati. Si supponga inoltre che gli autovalori della grandezza fisica A sia a_1 nello stato descritto dalla autofunzione ψ_1 ed a_2 in quello descritto dalla autofunzione ψ_2 . Ecco due possibili interpretazioni dell'equazione (5):

S1 Il sistema S è descritto dalla funzione d'onda (5). Se una misura della grandezza fisica A è effettuata sul sistema S , la probabilità che l'esito della misura sia a_1 o a_2 è pari a $1/2$.

S2 Il sistema S è in uno 'stato di sovrapposizione'; prima di una misura, il sistema non possiede né le proprietà associate allo stato 1, né quelle associate allo stato 2; la misura *determina* il passaggio del sistema dallo 'stato di sovrapposizione' allo stato 1 o allo stato 2 con probabilità $1/2$.

Chiameremo le descrizioni come *S1* descrizioni del tipo (QM_0) perché esse si basano solo sul postulato dell'esistenza del Mondo e contengono solo asserzioni su funzioni d'onda e su risultati di misure. Chiameremo invece le descrizioni come *S2* del tipo (QM_1) perché esse contengono anche l'asserzione ontologica che afferma l'esistenza dello 'stato di sovrapposizione'. Senza questa asserzione ontologica, non è possibile affermare che 'prima di una misura, il sistema non possiede né le proprietà associate allo stato 1, né quelle associate allo stato 2': questa asserzione discende logicamente da quella relativa all'esistenza dello 'stato di sovrapposizione'.

Le predizioni della Meccanica Quantica dipendono *solo* dalla forma della funzione d'onda (5). L'asserzione ontologica riguardante l'esistenza dello 'stato di sovrapposizione' non è usata nella catena deduttiva che conduce alle predizioni della Meccanica Quantica. La presenza di asserzioni ontologiche nei postulati di una teoria conduce a conclusioni fallaci: dall'accordo tra la teoria e l'esperimento si conclude, erroneamente, che il postulato ontologico - non utilizzato nella catena deduttiva - è vero. Da un punto di vista metodologico, le asserzioni ontologiche possono essere fatte solo a posteriori e, come abbiamo visto, esse sono solo plausibili. L'inserzione di asserzioni ontologiche nei postulati di una teoria costituisce una violazione di un principio metodologico fondamentale secondo cui è necessario tenere separate le teorie dalle immagini del Mondo che, per loro natura, si basano su assunzioni ontologiche. Nel caso specifico della (5), l'interpretazione *S2* conduce immediatamente al paradosso del 'gatto di Schrödinger' con tutte le sue varianti e stravaganti implicazioni. Invece, se utilizziamo *S1* non incontreremo alcun problema.

L'assunzione dell'esistenza dello 'stato di sovrapposizione' tra i postulati della Meccanica Quantica è da un lato la conseguenza di un realismo 'ingenuo' che, automaticamente, attribuisce al Mondo una caratteristica della teoria, cioè l'essere la funzione d'onda una sovrapposizione lineare

di altre due funzioni d'onda; dall'altro, con il corollario secondo cui 'prima di una misura, il sistema non possiede né le proprietà associate allo stato 1, né quelle associate allo stato 2' essa segnala una impropria ingerenza di una concezione particolare della *realtà* nella teoria fisica intesa come 'sistema di equazioni'.

Come secondo esempio consideriamo un fascio di fotoni che ha attraversato un polaroid il cui asse sia diretto lungo x . Il fascio incida su un secondo polaroid il cui asse x' formi un angolo θ con la direzione x . La Meccanica Quantica predice che ogni fotone del fascio ha probabilità $(\cos^2 \theta)$ di attraversare il secondo polaroid. Per far ciò, essa descrive il fotone incidente sul secondo polaroid come una combinazione lineare di due *opportune* polarizzazioni lineari:¹¹

$$|x \rangle = |x' \rangle \cos \theta + |y' \rangle \sin \theta \quad (6)$$

Ecco due modi diversi di descrivere l'esperimento:

- A Il fotone che incide sul secondo polaroid è linearmente polarizzato lungo x perché ha attraversato il primo polaroid (definizione operativa). Tenendo conto del tipo di esperimento, *descriviamo* il fotone mediante la (6); il fotone che esce dal primo polaroid ha probabilità $(\cos^2 \theta)$ di attraversare il secondo polaroid. L'interazione tra fotone e polaroid cambia la polarizzazione del fotone. Questa è una descrizione del tipo (QM_0).
- B Il fotone che incide sul secondo polaroid è nello stato di sovrapposizione descritto dalla (6); il secondo polaroid provoca la caduta del fotone dallo stato di sovrapposizione allo stato $|x' \rangle$ con probabilità $(\cos^2 \theta)$. Questa è una descrizione del tipo (QM_1).

Nessuno, ragionevolmente, sosterebbe la descrizione (B).

Il fotone incidente sul secondo polaroid può essere descritto anche come una combinazione lineare di due polarizzazioni circolari. Sosterremo quindi che questo fotone è in uno stato di sovrapposizione di due polarizzazioni circolari, senza possedere alcuna polarizzazione definita? E, coerentemente, che è contemporaneamente in uno stato di sovrapposizione di due polarizzazioni lineari, senza possedere alcuna polarizzazione definita? Infine che, avendo attraversato un polaroid, esso è - operativamente - in uno stato definito di polarizzazione lineare?

¹¹Naturalmente, anche l'elettromagnetismo classico fa una cosa simile con il vettore campo elettrico. Inoltre, come nel caso dell'esperimento delle due fenditure, con l'aggiunta di una ipotesi *ad hoc*, l'elettromagnetismo classico predice qual'è la probabilità per un fotone di attraversare il secondo polaroid.

3.3 Questioni *EPR*

Il dibattito riguarda almeno quattro temi: realismo, località, causalità e completezza della Meccanica Quantica. Storicamente, il punto di partenza è stato il problema della completezza della Meccanica Quantica posto dal lavoro di Einstein, Podolsky e Rosen.¹² In anni recenti, a partire dal lavoro di Bell,¹³ l'attenzione si è concentrata su esperimenti (ideali o reali) di tipo *EPR*.

Se prendiamo a caso un tipico lavoro contemporaneo riguardante questioni legate al cosiddetto paradosso *EPR*, ci troviamo di fronte alla seguente situazione: l'interpretazione 'ortodossa' della Meccanica Quantica è presentata come non - realista; posizioni filosofiche realiste sono *tradotte* in teorie fisiche le cui equazioni sono necessariamente differenti, almeno in alcuni casi, da quelle della Meccanica Quantica; fatalmente, la teoria 'realista' è confutata dagli esperimenti. In questi lavori, le posizioni filosofiche realiste sono caratterizzate, fra l'altro, dall'asserzione (*SR*) secondo cui 'è possibile attribuire un valore definito ad una grandezza fisica di un sistema fisico prima della misura'. Questa caratterizzazione è impropria perché è basata sull'assunzione che (*SR*) sia un'asserzione filosofica. Come vedremo tra poco, essa è un'asserzione fisica e, quindi, verificabile sperimentalmente.

3.3.1 Coppie correlate di fotoni

Come caso esemplare, consideriamo quello ben noto di una coppia di fotoni prodotte da un singolo atomo in un processo detto 'a cascata'.¹⁴ Una tipica transizione usata è la $4p^2(^1S_0) \rightarrow 4s4p(^1P_1) \rightarrow 4s^2(^1S_0)$ del calcio: la prima di queste produce un fotone $\nu_1 = 551.3 \text{ nm}$, la seconda un fotone $\nu_2 = 422.7 \text{ nm}$. I fotoni della coppia viaggiano in direzioni opposte; il fotone ν_1 che viaggia, per esempio, lungo z è analizzato dal polaroid *A*, mentre l'altro fotone ν_2 (che viaggia lungo $-z$) è analizzato dal polaroid *B*; dietro a ciascun polaroid, è posto un rivelatore. Inoltre due filtri, uno per ciascun ramo, bloccano i fotoni 'sbagliati' in modo tale che, per esempio, il rivelatore posto sul ramo z rivela solo fotoni ν_1 , mentre l'altro, posto sul ramo $-z$ rivela solo fotoni ν_2 .¹⁵ *A* e *B*

¹² A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, 'Can Quantum - Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?', *Phys. Rev.*, **47**, 777 - 780, (1935).

¹³ J. Bell, 'On the Einstein Podolsky Rosen Paradox', *Physics*, **1**, 195 - 200, (1964).

¹⁴ Il primo esperimento *EPR* utilizzando fotoni di questo tipo è dovuto a Kocher e Commins: C.A. Kocher and E.D. Commins, 'Polarization Correlation of Photons emitted in an Atomic Cascade', *Phys. Rev. Lett.*, **18**, 575 - 577, (1967).

¹⁵ A partire dall'esperimento di Aspect (A. Aspect, P. Grangier and G. Roger, 'Experimental Realization of Einstein - Podolski - Rosen - Bohm *Gedankenexperiment*: a New Violation of Bell's Inequalities', *Phys. Rev. Lett.*, **49**, 91 - 94, (1982)), i polaroid sono stati sostituiti da analizzatori birifrangenti; noi eviteremo questa complicazione, (suggerita da disuguaglianze note con l'acronimo *BCHSH*: J.F. Clauser, M.A. Horne, A. Shimony and

effettuano molte misure: vogliamo sapere quale correlazione c'è tra le misure di A e quelle di B in funzione dell'angolo θ tra i loro assi (ricordiamo che A e B sono due polaroid).

La nostra conoscenza acquisita dice che le leggi di conservazione sono valide in ogni singolo evento atomico. Pertanto, siccome i fotoni gemelli sono emessi mediante due transizioni successive da un livello iniziale $J = 0$ (1S_0) ad uno intermedio $J = 1$ (1P_1) e ad uno finale $J = 0$ (1S_0), i due fotoni sono entrambi polarizzati circolarmente in senso destrorso (R) o sinistrorso (L) (per la conservazione del momento angolare durante le due transizioni atomiche).¹⁶

Come è ben noto dall'elettromagnetismo classico,¹⁷ è possibile stabilire qual'è la polarizzazione di un fascio di luce. Il fascio di luce incide perpendicolarmente su un polaroid: se, ruotando il polaroid nel suo piano troviamo che l'intensità luminosa dopo il polaroid non varia, concludiamo che il fascio incidente non è polarizzato o è polarizzato circolarmente. La scelta tra queste due possibilità è effettuata mediante un secondo esperimento. Il fascio incide ora su una lamina a quarto d'onda, perpendicolarmente rispetto al suo asse ottico: se il fascio non è polarizzato, sarà non polarizzato anche dopo la lamina e, usando di nuovo il polaroid, vedremo che l'intensità della luce che attraversa il polaroid non varia ruotando il polaroid. Invece, se il fascio è R o L esso sarà trasformato dalla lamina in un fascio polarizzato linearmente lungo direzioni ruotate di $\pm\pi/4$ rispetto all'asse ottico della lamina (i segni (+) e (-) si riferiscono alla polarizzazione R ed L , rispettivamente). Pertanto, l'intensità luminosa dopo il polaroid presenterà due massimi e due minimi nulli ruotando il polaroid di 360 gradi (i minimi sono nulli solo se il polaroid è ideale). Nel nostro caso, i fasci di fotoni che viaggiano lungo $\pm z$ sono costituiti da un numero (statisticamente) uguale di fotoni R o L . Pertanto, i due fasci di fotoni sono non polarizzati, come si può verificare usando una lamina a quarto d'onda e un polaroid.¹⁸

R.A. Holt, 'Proposed Experiment to Test Local Hidden - Variable Theories', *Phys. Rev. Lett.*, **23**, 880 - 884, (1969)) perché siamo interessati solo alle questioni concettuali fondamentali e non alle teorie a variabili nascoste. Per un commento su queste disuguaglianze si veda la sezione 3.3.2.

¹⁶Non c'è una convenzione accettata per quanto concerne la definizione di polarizzazione circolare destra e sinistra; pertanto, quella che è 'destra' per me, potrebbe essere 'sinistra' per voi: e viceversa. Il lettore deve quindi fare attenzione alle equazioni e/o ai risultati sperimentali.

¹⁷Si veda, per esempio: *LEM*, pp. 360 - 361.

¹⁸Un fotone è R o L con probabilità $1/2$. Se è R , esso sarà, dopo la lamina, polarizzato linearmente lungo una direzione \mathbf{a} che forma un angolo di $\pi/4$ rispetto all'asse ottico della lamina. Pertanto, esso avrà una probabilità ($\cos^2 \theta$) di passare attraverso un polaroid il cui asse formi un angolo θ con \mathbf{a} . Pertanto la probabilità di passare attraverso il sistema (lamina + polaroid) sarà $(1/2) \cos^2 \theta$. Se invece il fotone è L , la probabilità che esso passi attraverso

Ogni singolo fotone possiede quindi una polarizzazione definita: R o L , come potrebbe essere verificato con il seguente esperimento. 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 da rivelare, diciamo, fotoni R) sono inseriti nei rami $\pm z$ (insieme con i rispettivi filtri di blocco). Dovremmo osservare che quando un fotone è rivelato lungo z , un fotone è rivelato anche lungo $-z$ (in coincidenza, se i due rami hanno la stessa lunghezza): dobbiamo quindi concludere che i fotoni gemelli erano polarizzati R prima di entrare nell'apparato di misura (lamina + polaroid). Ruotando entrambi i polaroid di $\pi/2$, i fotomoltiplicatori riveleranno solo fotoni L . Abbiamo così mostrato che l'asserzione SR può essere sottoposta a verifica sperimentale: essa è quindi un'asserzione fisica e non filosofica.

La coppia di fotoni è descritta dal vettore di stato:

$$|\psi(\nu_1, \nu_2)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|R_1, R_2\rangle + |L_1, L_2\rangle) \quad (7)$$

dove ($|R\rangle$, $|L\rangle$) sono vettori di stato di polarizzazione circolare. Tuttavia, siccome un fotone polarizzato circolarmente può essere descritto da una combinazione di due polarizzazioni lineari, la precedente equazione può essere scritta nella forma:

$$|\psi(\nu_1, \nu_2)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|x_1, x_2\rangle + |y_1, y_2\rangle) \quad (8)$$

dove ($|x\rangle$, $|y\rangle$) sono vettori di stato di polarizzazioni lineari.

Non sappiamo, a priori, se la coppia è costituita da fotoni R o L : sappiamo solo che entrambi i fotoni della coppia sono R o L con la stessa probabilità.

Supponiamo ora che la misura di A sia eseguita prima di quella di B .¹⁹ Se la coppia di fotoni è descritta dalla (7), allora la probabilità che il fotone ν_1 attraversi il polaroid A è $(1/2)$; se \mathbf{a} è la direzione dell'asse di A , la coppia di fotoni, dopo la misura di A , è descritta dal vettore di stato:²⁰

$$|\psi'(\nu_1, \nu_2)\rangle = |\mathbf{a}, \mathbf{a}\rangle \quad (9)$$

il sistema (lamina + polaroid) sarà $(1/2) \sin^2 \theta$. Siccome il fotone è R o L , la probabilità che esso passi attraverso il sistema (lamina + polaroid) sarà $(1/2) \cos^2 \theta + (1/2) \sin^2 \theta = 1/2$, indipendente da θ : di conseguenza, l'intensità del fascio luminoso non varia ruotando il polaroid.

¹⁹Seguiamo qui la trattazione di Aspect: A. Aspect, 'Bell's theorem: the naive view of an experimentalist' in *Quantum [Un]speakables - From Bell to quantum information*. A. Bertlmann and A. Zeilinger eds. (Springer, 2002). In rete alla pagina:

<http://arxiv.org/abs/quant-ph/0402001>

²⁰Nota 19, versione in rete, p. 5.

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

$$P(A, B) = \frac{1}{2} \cos^2 \theta \quad (10)$$

Questa equazione può essere derivata direttamente dalla (8) calcolando la probabilità che il fotone ν_1 attraversi A e che il fotone ν_2 attraversi B senza considerare i dettagli dell'esperimento.

Consideriamo ora la seguente descrizione:

$(QM_0) A'$ La coppia di fotoni prodotta dalla sorgente è *descritta* dal vettore di stato (7).

$(QM_0) B'$ La probabilità che ν_1 attraversi A è $1/2$. Se il fotone ν_1 attraversa il polaroid A , allora la coppia di fotoni è *descritta* dal vettore di stato (9); pertanto, il fotone ν_2 passerà attraverso il polaroid B se esso è orientato come A .

$(QM_0) C'$ Se il fotone ν_1 attraversa A , allora il fotone ν_2 passerà attraverso B con probabilità $(\cos^2 \theta)$, dove θ è l'angolo tra gli assi dei due polaroid (legge di Malus).

Questa descrizione usa solo asserzioni su vettori di stato e risultati di misure: pertanto, è una descrizione del tipo (QM_0) ; essa suggerisce la seguente definizione operativa di *polarizzazione correlata* della coppia di fotoni:

◇ Si dispongano i due polaroid con gli assi paralleli. Diciamo che la polarizzazione dei fotoni gemelli è *correlata se*, per ogni coppia di fotoni, il fotone ν_1 attraversa il polaroid A e il fotone ν_2 attraversa il polaroid B .

Con questa definizione, possiamo costruire una descrizione che considera la coppia di fotoni come un sistema separabile:

$(QM_0) A''$ La polarizzazione della coppia di fotoni prodotta dalla sorgente è *correlata*.

$(QM_0) B''$ Prima della misura, ogni coppia possiede una polarizzazione definita: R o L .

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

$(QM_0) D''$ Se il fotone ν_1 attraversa A , poiché la polarizzazione della coppia di fotoni è correlata, allora il fotone ν_2 attraversa B , se B è orientato come a ; altrimenti, ν_2 passerà attraverso B con probabilità $(\cos^2 \theta)$, dove θ è l'angolo tra gli assi dei due polaroid (legge di Malus).

Anche questa descrizione è del tipo (QM_0) perché contiene solo asserzioni su predizioni di risultati sperimentali, risultati sperimentali e la definizione operativa di 'polarizzazione correlata'. (Come mostrato sopra, l'asserzione $(QM_0) B''$ è verificabile sperimentalmente).

La descrizione 'ortodossa' è invece la seguente:

$(QM_1) A$ La coppia di fotoni prodotta dalla sorgente è in uno stato *entangled* il cui vettore di stato è dato dalla (7).

$(QM_1) B$ Prima della misura, ogni fotone non possiede una polarizzazione definita.

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

$(QM_1) D$ Se ν_1 attraversa A , allora ν_2 attraverserà B con probabilità $(\cos^2 \theta)$, dove θ è l'angolo tra gli assi dei due polaroid (legge di Malus).

Le descrizione 'ortodossa' è del tipo (QM_1) perché contiene l'asserzione ontologica $[(QM_1) A]$ relativa all'*esistenza* dello stato 'entangled'.

Alcuni commenti:

C1 La descrizione accentata e quella non accentata usano le stesse equazioni e le stesse regole di calcolo.

C2 La descrizione 'ortodossa' (non accentata) è caratterizzata dall'asserzione ontologica relativa all'*esistenza* dello stato 'entangled'. Questa asserzione, come tutte le asserzioni ontologiche, non è usata nella catena deduttiva che, partendo dalla (7), perviene alle predizioni dei risultati sperimentali. Inoltre, l'asserzione $[(QM_1) B]$ deriva dalla $[(QM_1) A]$. Come sopra mostrato, è possibile verificare sperimentalmente se la coppia di fotoni gemelli ha una polarizzazione definita prima di ogni misura. Pertanto l'asserzione 'prima di ogni misura, la coppia di fotoni non possiede una polarizzazione definita' è verificabile sperimentalmente e non è quindi, come nella interpretazione 'ortodossa', un'asserzione non sottoponibile a verifica sperimentale.

C3 L'ultima asserzione contenuta in $[(QM_1) C]$ 'contemporaneamente, il fotone ν_2 assume la stessa polarizzazione' implica quella che è chiamata

non - località: è una conseguenza di $[(QM_1) A]$ e $[(QM_1) B]$. Questa asserzione incorpora una specie di ‘azione a distanza istantanea’. Si sostiene che la relatività ristretta non è violata perché ‘non c’è trasporto di informazione’ tra A e B : le correlazioni tra le misure di A e B possono essere valutate solo raccogliendo insieme i loro dati’. Tuttavia, il processo in discussione non è la lettura dei dati da parte di un osservatore, ma il presunto fenomeno fisico attraverso cui la polarizzazione misurata da A sul fotone ν_1 è istantaneamente ‘trasmessa’ al fotone ν_2 : senza questa ‘trasmissione’, all’interno della descrizione ‘ortodossa’, l’osservatore non vedrebbe mai le correlazioni osservate. Siccome, tuttavia, il concetto di azione a distanza istantanea non è molto popolare, si preferisce parlare di *effetti non - locali*.²¹

C4 Siccome l’asserzione relativa all’esistenza dello stato *entangled* è un’asserzione ontologica, essa potrebbe essere effettuata a posteriori: in questo caso, essa deve essere compatibile con la conoscenza acquisita. Come mostrato in (C3), questa asserzione implica un’azione a distanza istantanea che è incompatibile con la nostra conoscenza acquisita: essa deve pertanto essere lasciata cadere.

C5 La descrizione doppiamente accentata è concettualmente interessante perché, basandosi sulla definizione operativa di ‘polarizzazione correlata’, tratta i due fotoni come entità separate.

3.3.2 Appendice: le disuguaglianze *BCHSH*

Queste disuguaglianze appaiono in un lavoro intitolato: ‘Proposed experiment to test local hidden - variable theories’:²² debbono essere verificate da teorie cosiddette a ‘variabili nascoste’, deterministiche e ‘locali’. Esse sono derivate sulla base delle ipotesi seguenti:

1. ‘Si consideri un insieme di coppie correlate di particelle che si muovono in modo tale che una particella della coppia entra nell’apparato di misura I_a e l’altra nell’apparato di misura II_b , dove a e b sono parametri variabili dei due apparati. In ogni apparato, una particella entra in uno dei due canali dell’apparato che indichiamo con $+1$ e -1 . Rappresentiamo il risultato di

²¹Hertz, parlando dell’azione a distanza, scriveva: “...ancora guardiamo all’attrazione tra due corpi come ad una specie di influenza spirituale di un corpo sull’altro”. H. Hertz, *Electric waves*, Dover Publications, 1962, p. 22. Ristampa dell’edizione originale pubblicata da MacMillan and Company nel 1893.

²²J.F. Clauser, M.A. Horne, A. Shimony and R.A. Holt, ‘Proposed Experiment to Test Local Hidden - Variable Theories’, *Phys. Rev. Lett.*, **23**, 880 - 884, (1969).

queste selezioni con $A(a)$ e $B(b)$, ognuno dei quali è uguale a ± 1 a seconda del canale scelto'.²³

2. 'Si supponga ora che una correlazione statistica tra $A(a)$ e $B(b)$ sia dovuta ad un'informazione trasportata da e localizzata in ciascuna particella e che, in qualche istante nel passato le particelle costituenti una coppia fossero in contatto e in comunicazione per quanto concerne questa informazione. Questa informazione, *che enfaticamente non è quantomeccanica*, fa parte del contenuto di un insieme di variabili nascoste, denotate collettivamente con λ . I risultati delle due selezioni sono allora *funzioni deterministiche* $A(a, \lambda)$ e $B(b, \lambda)$. [Il principio di] *località richiede ragionevolmente che $A(a, \lambda)$ sia indipendente dal parametro b e che $B(b, \lambda)$ sia analogamente indipendente da a* , poiché le due selezioni possono avvenire a distanze arbitrariamente grandi l'una dall'altra'.²⁴

Le condizioni (1) sono realizzate da esperimenti come quello considerato nella sezione 3.3.1 in cui i polaroid siano sostituiti da lamine birifrangenti.²⁵ Dal punto di vista sostenuto in questo scritto, sono interessanti le ipotesi formulate al punto (2) e poste in evidenza dal carattere in corsivo.

i 'Questa informazione, *che enfaticamente non è quantomeccanica...*'. Come mostrato nella sezione 3.3.1, questa informazione è contenuta nel vettore di stato (7).

1. 'Questa informazione... fa parte del contenuto di un insieme di variabili nascoste...'. Si costruisce qui, *ad hoc*, una teoria a variabili nascoste deterministica.
2. '[Il principio di] *località richiede ragionevolmente che $A(a, \lambda)$ sia indipendente dal parametro b e che $B(b, \lambda)$ sia analogamente indipendente da a* , poiché le due selezioni possono avvenire a distanze arbitrariamente grandi l'una dall'altra.' Il principio di località assume, ragionevolmente, che la misura effettuata da I_a non possa influenzare quella effettuata da II_b e viceversa. Ciò non significa che non si debba tenere conto di una possibile correlazione tra le misure di I_a e II_b dovute alla correlazione esistente tra le due particelle. Escludendo questa possibilità si costruisce una teoria a variabili nascoste che esclude a priori possibili correlazioni statistiche tra le misure dei due apparati.

Le disuguaglianze *BCHSH* riguardano solo particolari teorie a variabili nascoste e non dicono nulla circa posizioni filosofiche realiste o non.

²³Ivi, p. 881.

²⁴Ivi; corsivo aggiunto.

²⁵A. Aspect, P. Grangier and G. Roger, 'Experimental Realization of Einstein - Podolski - Rosen - Bohm *Gedankenexperiment*: a New Violation of Bell's Inequalities', *Phys. Rev. Lett.*, **49**, 91 - 94, (1982).

4 Causalità

Uno dei principali fattori che hanno contribuito allo sviluppo della Scienza sperimentale è stato, ed è tuttora, la ricerca delle cause. Una disciplina che pensi *realmente* di abbandonare il principio di causalità - inteso come principio *metodologico* di ‘ricerca delle cause’ - è fatalmente destinata alla decadenza. La Fisica, da questo punto di vista, non costituisce un’eccezione. Si sostiene che mentre le teorie probabilistiche classiche sono uno specchio della nostra ignoranza dei dettagli microscopici dei fenomeni, la natura probabilistica della Meccanica Quantica riflette invece la natura indeterministica del Mondo atomico e sub - atomico. Contro questa tesi ci sono due argomenti. Il primo è di natura epistemologica. Per sapere se il Mondo è indeterministico dovremmo saperlo indipendentemente dalla teoria che descrive questo Mondo: ciò non è, naturalmente, possibile; inoltre, il fatto che le predizioni della teoria siano in accordo con l’esperienza non implica che le cose si svolgano nel Mondo esattamente come descritto dalla teoria. Il secondo è di natura metodologica: anche se avessimo il sospetto che ‘Dio gioca ai dadi’, noi dovremmo continuare a ricercare le cause, pena l’inaridirsi delle fonti della conoscenza.

5 Fisica e Filosofia

La discussione sullo stato epistemologico della Meccanica Quantica è stato caratterizzato, sin dall’inizio, dal confronto tra posizioni filosofiche assai differenti. Questa discussione si è progressivamente allargata dentro e fuori la comunità scientifica producendo un numero impressionante di articoli e libri: è difficile non essere colti dalla spiacevole sensazione che questa discussione abbia assorbito più risorse intellettuali di quanto necessario.

La Meccanica Quantica è usualmente presentata come una teoria non - realista. Abbiamo invece visto come essa non possa - in alcun senso - essere considerata tale. Inoltre, la sua interpretazione ‘ortodossa’, inserisce in modo esplicito o implicito, asserzioni ontologiche a fianco dei postulati formali della teoria: tali sono i postulati circa l’esistenza dello ‘stato di sovrapposizione’ o dello ‘stato entangled’. Abbiamo visto come l’uso improprio di asserzioni ontologiche conduca a conclusioni fallaci e/o a descrizioni incompatibili con l’intera conoscenza acquisita. Se tali conclusioni sono, ciononostante, largamente condivise dalla comunità scientifica, questa apre le sue porte a flussi irrazionali.

A partire dal lavoro di Bell,²⁶ si è diffuso uno strano ‘gioco’: costruire teorie denominate realiste e realizzare esperimenti sempre più sofisticati per

²⁶Nota 13.

confutare queste teorie. Se ci piace, possiamo continuare in questo ‘gioco’; tuttavia, siccome i postulati di una teoria non sono mai logiche conseguenze di una filosofia, dobbiamo essere consapevoli che gli esperimenti confutano talvolta una teoria ma mai una filosofia.

Mi piace concludere questo scritto richiamando un principio metodologico di Hertz:

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.²⁷

Nel nostro caso, le concezioni che possono essere rimosse sono quelle relative all'*esistenza* dello ‘stato di sovrapposizione’ o dello ‘stato entangled’: se le abbandoniamo, ‘i possibili risultati sperimentali’ non sono alterati.

Ringraziamenti. Grazie a Giancarlo Campagnoli e Peppino Sapia che hanno accompagnato la stesura di questo lavoro, relativamente alla parte riguardante la Meccanica Quantica, con le loro osservazioni critiche; ad Alfio Briguglia e Riccardo Ruganti che hanno animato con Peppino Sapia una lunga e vivace discussione sugli stessi temi.

²⁷Nota 4, p. 28.