

FRANCESCO DE MARTINI
IL PARADOSSO EPR

ABSTRACT. — *The Einstein-Podolsky-Rosen Paradox.* The Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) Paradox is considered briefly within an historical and philosophical perspective that focuses on the early contribution of Albert Einstein to the foundations of quantum theory. It is also shown how, in spite of the quantum-theoretical «incompleteness» claim by Einstein expressed in a famous *Physical Review* paper in 1935, in recent decades the recourse to the experiment has contributed to replace the EPR Paradox by a striking, even more intriguing property of the physical world: the quantum Non-locality and the Entanglement of the quantum states.

KEY WORDS: EPR paradox; Non-locality; Quantum Entanglement; Quantum-Theory.

RIASSUNTO. — Il Paradosso di Einstein-Podolsky-Rosen è considerato per sommi capi in una prospettiva storica e filosofica basata sui primi contributi di Alberto Einstein ai fondamenti della teoria quantistica. Viene anche mostrato come, contraddicendo la proprietà di incompletezza della teoria quantistica espressa da Einstein in un famoso lavoro pubblicato su *Physical Review* nel 1935, in anni recenti il ricorso alla verifica sperimentale ha contribuito a sostituire il Paradosso EPR con una proprietà del mondo fisico ancora più sconcertante: la Nonlocalità quantistica e l'Entanglement degli stati quantici.

Ringrazio Giorgio Salvini per avermi permesso di leggere la lettera a lui spedita da Oreste Piccioni il 16 luglio 1997 da La Jolla, California. È l'ultima lettera personale di un amico e l'atto di condividerla con me è sicuramente un atto di amicizia. Questo il breve testo:

«Caro Giorgio, spero che questa ti arrivi presto. Mi piacerebbe tanto di parlare con te dell'EPR ed altre cose. Non puoi trovare un po' di tempo? L'EPR è bello, e promette tanto. Abbracci, Oreste».

Il messaggio è quindi molto urgente, deve arrivare presto. Infatti c'è da condividere una «cosa» molto importante e per attrarre l'attenzione del distratto Salvini bisogna dire che quella cosa è bella e densa di promesse: quasi una seduzione quindi.

Ma che cosa è l'oggetto di una tale *avance*, l'intrigante, *bello* e paradossale EPR?

Il paradosso EPR, l'acronimo costruito con la prima lettera dei cognomi degli Autori (Albert Einstein, Boris Podolsky, Nathan Rosen) di un famoso articolo pubblicato, con un titolo interrogativo, nel maggio del 1935 su *Physical Review*, è di fatto l'ultimo importante lascito testamentario di Einstein al mondo della Cultura e della Scienza moderna [8]. Einstein che nel '35 aveva già consegnato, con la Relatività Ristretta (1905) e quella Generale (1916), i suoi colossali contributi alla fisica «classica» era da molti anni, più che travagliato, addirittura sconvolto dagli enigmi posti continuamente

al suo pensiero dalla «meccanica quantistica». Questa nuovissima teoria fisica, nata nei primi anni del '900 proprio tra le sue mani, e tra quelle di Max Planck, era stata imposta dal comportamento anomalo della radiazione elettromagnetica in equilibrio statistico con un insieme di oscillatori materiali ad una certa temperatura. Era quello il problema della «distribuzione di corpo nero» la cui soluzione, offerta dalla, per altri versi trionfante, meccanica statistica classica dell'ultimo '800, consisteva in una inaccettabile «divergenza» matematica: la famosa «divergenza ultravioletta». Come è ben noto allo scadere del XIX secolo, esattamente negli ultimi giorni del dicembre 1899, il giovane fisico teorico Planck risolse formalmente il problema introducendo per la prima volta, e «come un atto di disperazione», parole di Planck, nei calcoli della energia media irradiata la *quantizzazione* di tutti gli interscambi di energia tra sistemi fisici. Ecco l'inizio della più grande rivoluzione scientifica moderna in cui Einstein si inserì, sulla scia di Planck, antesignano creativamente appassionato. Einstein a quella rivoluzione contribuì nel primo decennio del '900 con la prima teoria quantistica della generazione ed assorbimento della luce (1906, 1909) e poi con quella del calore specifico dei corpi solidi (1907, 1911). Negli stessi anni il giovanissimo danese Niels Bohr introdusse i livelli quantizzati di energia nella sua teoria dell'atomo offrendo così una spiegazione plausibile, ed anche in qualche caso quantitativamente molto bene approssimata, a risultati sperimentali precedenti strani e inesplicabili, gli spettri a «righe» e a «bande» della prima spettroscopia ottica fine '800. In breve, i risultati fino ad allora incomprensibili di moltissime osservazioni precedentemente condotte in campi diversi trovarono una via di attuale o possibile soluzione. Alla fine rivoluzione fu, che rapidamente divenne inarrestabile. Come ben si sa, tutte le grandi rivoluzioni si cristallizzano in breve attorno ad un «direttorio» egemone, retto da un capo carismatico che stabilisce le linee di pensiero e di azione atte ad arricchire il patrimonio strutturale «offensivo», a rinforzare la fede dei proseliti e a resistere allo scetticismo critico dei renitenti e dei dubbiosi. Eventualmente allontanando questi ultimi o riducendoli al silenzio. In questo caso Bohr fu da subito il capo carismatico per acclamazione e il «direttorio» fu la famosa «Scuola di Copenhagen», pienamente e trionfalmente operante per circa due decenni a partire dagli anni attorno al 1925.

EINSTEIN E L'INTERPRETAZIONE DI COPENHAGEN

Il dettato di quella Scuola acquisì presto, ed ancora lo conserva, il carattere incontrovertibile di un paradigma. Anzi dell'unico paradigma scientifico finora accettato in Fisica perché a distanza di circa ottant'anni, non è stato *mai* contraddetto dalla prova dei fatti. Tra i più fedeli adepti Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Leo Rosenfeld, Pascual Jordan, Max Born. In posizione più defilata, impegnata ed ironica, il grandissimo matematico e fisico Erwin Schroedinger, a Dublino. Certamente si trattò di una rivoluzione senza spargimento di sangue. Ma, come ben sanno i cultori della Storia della Scienza del '900 che di quella anche conoscono gli autentici drammi, fede, carisma, ostracismo non rappresentano affatto attributi esagerati od impropri di quel lontano clima culturale, oggi fortunatamente superato. Molti conoscono per esempio il

dramma umano, fatto di solitudine e di ostracismo da parte dello stesso maestro, ed anche di pericolo fisico (si era negli anni più minacciosi del maccartismo) di David Bohm, allievo di Einstein. Il quale, dopo anni di ortodossa attività culminata con la pubblicazione del trattato *Quantum Theory* nel 1951, osò proporre una brillante alternativa al dettato di Copenhagen, la famosa teoria non-locale «*De Broglie-Bohm*». Una molto promettente «*hidden variable theory*» che, nata con troppo ritardo in un tempo «sbagliato», non ha potuto dare vera prova del suo potere dimostrativo [5, 6].

In quegli anni Einstein, il grande inventore di due decenni prima, era considerato dai più giovani esponenti di quella Scuola con ironica e blandamente ammirata condiscendenza, alla stregua di un fastidioso obiettore di coscienza, il creatore di un verbo da lui stesso tradito. In particolare, l'offensiva dialettica di Bohr nei suoi confronti, quale appare ad esempio nei ben documentati dibattiti ai Congressi di Como [2, 9] e di Solvay [20, p. 180], assumeva anche, e non a caso, un sorprendente ed interessante connotato linguistico [18, 19]. Precisamente, la formulazione di certe innocenti e ragionevoli espressioni verbali concernenti lo stato della realtà era violentemente rifiutata da Bohr in quanto assolutamente inaccettabile su basi logiche. Naturalmente questa contrapposizione semantica non rispondeva ad un capriccio dialettico ma rifletteva il profondo mutamento delle basi fondanti lo status ontologico della stessa realtà del mondo fisico che si era venuto instaurando nell'ambito della *Interpretazione di Copenhagen* (IdC) della teoria quantistica. Per chiarire, qui in breve, il nocciolo della questione potrebbe essere ricondotto alla domanda cruciale sempre emergente nel dominio della moderna teoria della misurazione. La domanda è la seguente: «che cosa si può dire della “*proprietà oggettiva*” di un sistema quantistico che *non si trovi* in un autostato dell'operatore corrispondente a quella stessa proprietà [18, p. 160]?» Ad esempio, che cosa si può dire della componente dello spin σ_x di un elettrone che sia in un autostato di σ_y (e quindi non di σ_x , poiché i corrispondenti operatori non commutano: $[\sigma_x, \sigma_y] \neq 0$)?

La «ragionevole» risposta del fisico «classico», cioè quella data da Einstein in conformità alla sua prospettiva concettuale chiamata «*realismo locale*», è la seguente: quella *proprietà oggettiva* esiste perché è una caratteristica costante del sistema e preesistente la misurazione. Tuttavia quest'ultima potrebbe eventualmente essere disturbata e quindi non dare un risultato *sharp*, distinto.

La risposta conforme al dettato IdC è ben diversa, allo stesso tempo drastica e sorprendente: quella domanda è assolutamente priva di senso, e quindi non può e non deve essere proposta. La ragione è che la *proprietà oggettiva* del sistema, ossia la componente σ_y dello spin elettronico in un autostato di σ_y , semplicemente *non esiste*. È quindi come un fantasma che non deve essere evocato in un rigoroso ambito scientifico [18].

Siamo quindi al vero nocciolo della perplessità di Einstein circa la correttezza della IdC. Basilare ingrediente di quella teoria era, ed è anche oggi, il concetto di «funzione d'onda» $\psi(t)$, la «*funzione di Schroedinger*» del tempo, un ente puramente matematico a cui viene attribuito uno status «ontologico» capitale. Perché *tutto e solo* quello che si sa o si può sapere o dire di un qualsiasi sistema fisico, di un qualsiasi «pezzo di realtà»,

di una particella o di un insieme di particelle, è espresso *esclusivamente* da una corrispondente $\psi(t)$, senza alternative possibili.

Ecco dove sta l'*hard core* della cosiddetta *incomprensibilità* ancora oggi percepita della IdC. Ma quest'ultima ancora oggi non potremmo rifiutare a meno di non ricadere in un medioevo di oscurità e di caos scientifico, perché rappresenta l'unica strada che sappia condurci, attraverso calcoli e trasformazioni matematiche di $\psi(t)$, a risultati esatti di previsione ed ad analisi corrette di fenomeni reali comunque complessi, e molto frequentemente contro-intuitivi. Risultati che, ripetiamo, quasi inesplicabilmente finora non hanno *mai* fallito. Il problema tipico, che nei primi decenni del '900 principalmente affaticava il pensiero dei nuovi fisici, consisteva nella celebre questione «*welcher weg*» che ha poi rapidamente assunto i connotati di un vero paradigma scientifico. Ci si chiedeva «quale cammino» sia percorso da una particella singola, ad esempio un elettrone, il cui moto sia obbligato in uno strumento chiamato «interferometro» a due percorsi alternativi, 1 e 2, che convergano infine su uno schermo di rivelazione, costituito ad esempio da una lastra fotografica oppure da un array di rivelatori elettronici. Lo strumento separatore potrebbe consistere semplicemente da una parete con due fori, dando così origine all'*Interferometro di Young*, l'antesignano della specie (1799). La risposta data dalla fisica «classica», ossia quella precedente l'avvento della teoria quantistica, è elementare: un solo cammino viene percorso e la presenza del cammino non utilizzato non lascia alcuna traccia sullo schermo di rivelazione. Per maggiore chiarezza, se la rivelazione finale di una particella singola consiste in un punto nero sulla lastra fotografica, l'esperimento condotto con moltissime particelle (un «ensemble» di queste egualmente «preparate», secondo la terminologia quantistica) conduce ad un annerimento medio dello schermo raccolto attorno ad un punto centrale, rappresentato dal massimo di una normale funzione statistica *gaussiana*. La Natura, indagata sperimentalmente, si comporta invece in modo assolutamente sorprendente e intuitivamente inesplicabile: sullo schermo appare una caratteristica immagine a *frange di interferenza*, con massimi e minimi disposti secondo una distribuzione periodica. Quest'ultima scompare, e il banale risultato *classico* compare, se interdicendo uno dei due cammini possibili la particella è *costretta* a percorrerne uno solo. Si può quindi affermare, in modo vagamente incorretto, che la particella «sente» o «percorre simultaneamente» i due cammini. Secondo Richard Feynman l'interferometro «... *ha in sé il cuore della meccanica quantistica. In realtà contiene il solo mistero di quella ...*» [16, vol. 3, Ch. 1], trascurando allora, nell'anno 1965 l'altro più grande *mistero*, l'EPR. Il quale è comunque una forma più complessa di interferenza, come vedremo. L'EPR era allora confinato allo stato di inesplicabile paradosso nel mondo delle astratte speculazioni della filosofia per l'assenza di ogni concepibile verifica. Ma proprio nel 1965 John S. Bell avanzava la sua prima geniale proposta di un concreto test sperimentale. In virtù del quale, nel giro di due decenni, l'EPR avrebbe finalmente perduto per sempre il suo «paradossale» attributo, come si vedrà [3].

L'unica soluzione offerta dalla IdC al *mistero* dell'interferometria consiste nella interpretazione di $\psi_i(t)$ come «*ampiezza di probabilità*» per la particella di appartenere a uno dei due cammini: $i = 1, 2$, e l'*immagine di interferenza* come matematica sovrappo-

posizione lineare: $\psi(t) = (\psi_1(t) + \psi_2(t))$. L'interpretazione dovuta a Max Born della *densità di probabilità* $P = |\psi(t)|^2$, risolve in modo definitivo ed elegante il problema. Il concetto di funzione d'onda implica nell'ambito quantico il concetto di *ampiezza di probabilità*, e più generalmente di *Feynman path*: concetti del tutto ignoti alla teoria statistica *classica*. Tutti i problemi quantistici, anche i più complessi, vengono risolti in modo simile, nell'ambito di una struttura matematica basata sul *principio di sovrapposizione* lineare. Da questa anche discendono i grandi enigmi concettuali della fisica moderna, fra cui la sua concezione *indeterministica*. O più precisamente, accanto ad una evoluzione temporale di $\psi(t)$ deterministicamente imposta dalla *Equazione di Schroedinger*, la natura probabilistica di $\psi(t)$ introduce una indeterminazione essenziale in *ogni* connessione conoscitiva tra il *mondo quantistico* ed ogni *osservatore*, ogni *apparato di misura* che, in quanto tale, appartiene al mondo *classico*. In virtù di ciò il mondo reale non sarà mai più il mondo *oggettivo* di Kant completamente conoscibile ad ogni esterno osservatore, ma solo un «reale velato» (D'Espagnat) privo di *proprietà oggettive* e solo percepito attraverso imperfette misurazioni ottenute tramite opportuni apparati strumentali pre-definiti. Inoltre, l'imperfezione delle misure non è solo dovuta agli apparati ma generalmente dettata da precisi confini conoscitivi imposti dalla stessa teoria.

Si comprende quindi, come coinvolto in un quadro concettuale essenzialmente scettico, Einstein non potesse cessare di chiedere: l'Universo reale è quindi soltanto una funzione matematica $\psi(t)$ e la dinamica della Realtà, la Storia insomma, soltanto un algoritmo, una matematica *trasformazione* di $\psi(t)$? Questa ai tempi di Einstein, così come oggi, è la *croce e delizia* della meccanica quantistica secondo IdC, una gigantesca cattedrale ammirevolmente costruita dall'ingegno umano, di imprescindibile utilità computazionale pratica, cui alcuni grandissimi fisici e matematici hanno negli anni cercato di dare una struttura logica e fondazioni concettuali soddisfacenti. Tra i primi: il fisico Adrien Paul Dirac [13] e il matematico John Von Neumann [24]. Ma che per molti, ieri come oggi, non cessa di costituire un dilemma conoscitivo senza alternative da cui non sapremmo come e verso quale direzione fuggire. Le molte celebrate frasi di Einstein tramandate dalla letteratura, quali «Il Signore è sottile, ma non malizioso», «Dio non gioca a dadi», o la domanda posta all'allievo Peter Bergmann durante una passeggiata serale a Princeton: «Esiste la luna in cielo se io non la guardo?» valgono a mostrare, anche tramite l'insistito e non casuale riferimento alle presunte intenzioni del Creatore, la natura profonda delle sue perplessità [20].

Per comprendere con precisione il punto di attacco a IdC scelto da Einstein, leggiamo un breve passo di un suo scritto del 1936, *Physik und Realität* [14]. «... *Probabilmente mai prima d'allora si era sviluppata una teoria capace di fornire un mezzo per interpretare e calcolare un complesso così eterogeneo di fenomeni dell'esperienza, come la meccanica quantica. Ciò nonostante, io credo che quella teoria possa ingannarci nella nostra ricerca di una base omogenea per la fisica, poiché secondo me essa è una rappresentazione incompleta degli oggetti reali, anche se è l'unica che può essere edificata facendo a meno dei concetti fondamentali di forza e di punto materiale (correzioni quantiche alla meccanica classica). L'incompletezza della rappresentazione è il prodotto della*

natura statistica (quindi della incompletezza) delle leggi». E ancora, riassumendo più oltre: «... Io cerco di spiegare come mai la meccanica quantica non appare in grado di dare un fondamento pratico alla fisica: ci si trova implicati in contraddizioni, se si tenta di considerare la descrizione teorica quantica come descrizione completa del singolo sistema o evento fisico». Quest'ultima frase ci porta al cuore della critica di Einstein. La funzione d'onda $\psi(t)$ è un valido strumento teorico in quanto esprime il comportamento statistico di un «assembly», una molteplicità di sistemi fisici. Tuttavia non può esprimere le proprietà di un singolo sistema, perché in tal caso ne scaturirebbe una grave contraddizione teorica: un paradosso.

Ci dedicheremo nel seguito a quest'ultimo, evitando per ragioni di spazio di analizzare la prima parte del lavoro EPR e il suo meticoloso impianto logico-filosofico. Nell'ambito di quest'ultimo, un attributo strutturale necessario della realtà fisica oggettiva viene associato alla esistenza di opportuni «*elements of physical reality*», ossia di apposite proprietà oggettive. La completezza strutturale di ogni teoria è quindi espressa dalla corrispondenza tra quelli e gli elementi teorici formali. Può essere interessante qui notare che, su un ben diverso versante scientifico-culturale, proprio negli stessi anni, dal 1930 al 1940, il logico austriaco Kurt Gödel mostrava logicamente le limitazioni della matematica con due teoremi di incompletezza in base ai quali nessun sistema formale può descrivere in modo completo una realtà matematica sufficientemente complessa [17].

EPR E LA NONLOCALITÀ QUANTISTICA

Secondo il racconto lasciato dal fisico Leo Rosenfeld, allora occupato con Bohr alla prima formulazione quantistica del campo elettromagnetico (e.m.), la pubblicazione del lavoro EPR fu un vero «bolt from the blue», un assordante fulmine a ciel sereno nei cieli di Copenhagen [22]. Per ordine di Bohr tutti i lavori della Scuola furono interrotti e gli sforzi rivolti alla risposta da dare nella forma più rapida e convincente. Quest'ultima si articola in due lavori in cui Bohr denuncia l'ambiguità intrinseca del criterio einsteiniano di realtà [7, 8].

Quest'ultimo infatti non deve essere dedotto da «concezioni filosofiche a priori» ma solo da misurazioni risultate da esperimenti. Il paradosso EPR era quindi solo apparente e metteva in luce «l'inadeguatezza di fondo della concezione tradizionale della filosofia naturale». La reazione freddamente apodittica di Bohr ha un immediato riscontro (1935) nell'apprezzamento addirittura sgomento di Schroedinger il quale coglie la potenza rivoluzionaria del nuovo paradigma affermando «... questo non è uno ma bensì il tratto caratteristico della meccanica quantistica. Quello che distingue questa dalle linee classiche del pensiero ...» [23]. Questo autore, per il quale l'EPR consiste in una perfino fantasmatica «*spooky action-at-a-distance*», per primo formula l'«*entanglement*», la proprietà caratteristica del particolare stato quantistico $\psi^{AB}(t)$ di un sistema correlato di 2 particelle, A e B. Questo stato è descritto dalla sovrapposizione lineare, ossia dalla interferenza di stati-prodotto: $\psi^{AB}(t) = \sum_i \eta_i^A(t) \otimes \eta_i^B(t)$. Il simbolo \otimes esprime qui il prodotto tensoriale di 2 spazi di Hilbert con dimensione D definiti ri-

spettivamente dai sets completi di autostati $\eta_i(t)$ di un qualsiasi operatore hermitiano applicato ad A e B. L'indice di insieme assume i valori: $i = 1, 2, 3, \dots D$. Assumiamo qui per semplicità spazi hilbertiani con D finita, in particolare $D=2$, ossia gli spazi propri delle autofunzioni dello spin- $\frac{1}{2}$. Quest'ultima formulazione dovuta a Bohm equivale, ai nostri fini, a quella originale EPR che prevedeva un processo a «*variabili continue*» \mathbf{p} e \mathbf{q} con $D = \infty$. Formuliamo ora l'argomento EPR secondo l'esatta analisi di Schroedinger.

Un singolo sistema costituito di 2 particelle A, B dotate di spin- $\frac{1}{2}$ venga «preparato» in uno stato *entangled* $\psi^{AB}(t)$ da una breve interazione. Le due particelle siano poi lasciate libere di propagare verso due lontane stazioni di misura: diciamo, A raggiunge la stazione **A** mentre B si dirige verso **B**, lontano da **A**. A e B potrebbero essere 2 elettroni, ma in virtù di un noto isomorfismo matematico tra la dinamica dello spin- $\frac{1}{2}$ σ e quella del vettore *polarizzazione* e.m. \mathbf{p} , questi sono solitamente sostituiti da due *fotoni* generati da una «cascata atomica» o da un «processo ottico nonlineare parametrico». In quest'ultimo caso, mantenendo la terminologia propria dello spin, le stazioni di misura **A**, **B** saranno costituite da *analizzatori* di \mathbf{p} le cui misurazioni locali daranno come risultato alternativo le coppie di auto-valori di due operatori non-commutanti, ad esempio: σ_x e σ_y . Le rispettive auto-funzioni per ciascuna particella siano η_i e ξ_i . In virtù del *principio di sovrapposizione* lineare, lo stato del sistema è esprimibile in modo *assolutamente equivalente* da due diverse relazioni di interferenza: $\psi^{AB} = \sum_i \eta_i^A \otimes \eta_i^B = \sum_i \xi_i^A \otimes \xi_i^B$, con $i = 1, 2$.

Qui avviene qualcosa di assolutamente straordinario. Se ad esempio la stazione **A** rivelasse un autovalore proprio della autofunzione di σ_x , diciamo b_1^A , la funzione d'onda subirebbe la *riduzione*: $\psi^{AB} \Rightarrow \eta_1^A \otimes \eta_1^B$ con velocità \mathbf{c} superiore a quella della luce (*superluminale*) e conseguentemente la particella B in viaggio verso **B** verrebbe immediatamente posta nell'autostato η_1^B . Se invece la stazione **A** rivelasse l'autovalore di σ_y proprio di ξ_2^A , attuando la riduzione $\psi^{AB} \Rightarrow \xi_2^A \otimes \xi_2^B$ la particella B sarebbe immediatamente posta nello stato ξ_2^B , eccetera. La teoria quantistica prevede quindi un risultato assolutamente inedito. Le due particelle, pur distanti migliaia di chilometri e in assenza di ogni mutua interazione, rimangono connesse dall'*entanglement* mantenendo intatta la loro iniziale correlazione.

Questo fenomeno sconcertante, sconosciuto al mondo *classico*, si chiama *Nonlocalità Quantistica*. Appare naturale chiedersi se questo processo possa essere utilizzato per la comunicazione super-luminale. La risposta è No. Perché nel caso fosse adottata come codificazione (binaria) della informazione da trasmettere la proiezione di ψ^{AB} sulla coppia di autostati di un operatore comune ad **A** e **B**, ad esempio σ_x , ciò implicherebbe un intervento da parte della stazione «trasmittente» che *forzasse* il risultato della misurazione *locale* onde ottenere la trasmissione del segnale voluto. Ma a un tale intervento, *esterno* al mondo quantico e quindi disruptivo di ogni quantica interferenza, seguirebbe un immediato scioglimento dell'*entanglement*. Alternativamente, la codificazione ottenuta tramite la scelta di due diversi sets di vettori-base, ad esempio gli autostati di σ_x e di σ_y , ancora non darebbe risultati perché il processo di *amplificazio-*

ne, necessario in questo schema, sarebbe affetto, in virtù di un ben noto *no-cloning theorem* da un *rumore quantistico* che cancellerebbe *esattamente* l'informazione trasmessa [11]. La trasmissione di informazione tramite la nonlocalità quantistica è tuttavia resa possibile dal Protocollo di «Teletrasporto Quantistico» (*Quantum State Teleportation*: QST) [4]. Elemento *necessario* del Protocollo QST è, in aggiunta al canale EPR *nonlocale e superluminale*, un canale *classico* con trasferimento tra le stazioni **A** e **B** di 2 bits di informazione per ogni *quantum-bit* (qubit) trasmesso. Quest'ultimo processo instaura nell'ambito della teoria il *principio di causalità* che sancisce l'impossibilità di ogni comunicazione superluminale (Einstein). La prima verifica sperimentale del protocollo QST, attuata nel 1997 dal Laboratorio di Informazione e Ottica Quantistica dell'Università di Roma «La Sapienza», è stato un contributo importante alla moderna *Quantum Information and Computation* (QIC), QST essendo il protocollo QIC più complesso finora realizzato [10]. Ma è importante anche perché, proprio in virtù di questa complessità, quel risultato è valso a dimostrare con grande evidenza la correttezza della teoria quantistica secondo l'interpretazione di Copenhagen.

LE DISEGUAGLIANZE DI BELL E LE VERIFICHE DELLA NONLOCALITÀ QUANTISTICA

La prima proposta per la verifica della esistenza della nonlocalità quantistica è contenuta in alcuni fondamentali lavori di J.S. Bell pubblicati attorno al 1965, dieci anni dopo la scomparsa di Einstein [3]. Lo schema dell'esperimento è quello già qui riportato. Una coppia EPR di fotoni A, B sia preparata in uno stato *entangled* di «singoletto» ψ^{AB} e codificata per semplicità in «polarizzazione (**p**) lineare». Ciascun fotone A (o B) della coppia sia quindi inviato verso un lontano apparato di misura **A** (o **B**), costituito da un «analizzatore di **p**», ad esempio un *polaroid* caratterizzato dall'angolo θ^A (o θ^B) di massima trasmissione ottica, seguito da un fotorivelatore D^A (o D^B). La misurazione, ossia la riduzione quantistica di ψ^{AB} , è rivelata da un «click» elettronico di quest'ultimo. La condizione dicotomica «click»-«no-click» in seguito all'emissione di ogni coppia, e il carattere statistico dell'accumulazione dei dati in seguito alla registrazione di più coppie, sono caratteristiche di ogni «misurazione di Bell». I due rivelatori ($D^A + D^B$), connessi elettronicamente in coincidenza, rivelano direttamente la correlazione delle coppie di fotoni tramite la determinazione sperimentale di una «*probabilità congiunta*» di rivelazione: $C(q^A, q^B)$. Diversi tipi di misurazioni possono essere attuate con questo apparato, generalmente tutte equivalenti. La più semplice consiste nella determinazione sperimentale di $C(\theta^A - \theta^B)$. Ciò conduce ad una tipica figura a *frange di interferenza* espressa da una funzione sinusoidale. La «visibilità» **V** di quest'ultima, ossia il «contrasto» delle frange, è indice del grado di correlazione. Tramite alcune note disuguaglianze algebriche (*Bell inequalities*) è stata valutato il valore massimo di visibilità ottenibile dalla totale assenza di correlazione quantistica nonlocale: \mathbf{V}_L . Si noti che tale valore *classico* $\mathbf{V} = \mathbf{V}_L$ è ottenuto invariabilmente per qualsiasi processo coinvolgente «principi di conservazione» meccanici, ad esempio di *momento angolare* **J**. La teoria *pseudo-EPR* di due volani pesanti A, B con $\mathbf{J} = \mathbf{J}_A + \mathbf{J}_B = 0$ è riportata in [21, Ch. 6].

La prima misura sperimentale della correlazione nonlocale di coppie *entangled* di fotoni, ottenuta nel 1982 a Orsay da Alain Aspect e collaboratori, ha ottenuto valori di $V \gg V_L$ per diverse decine di deviazioni standard [1]. In questi ultimi due decenni simili verifiche della nonlocalità si sono moltiplicate con metodi sempre più raffinati, nelle più diverse condizioni sperimentali e su distanze dell'ordine di decine di km. Tutte hanno ottenuto un concorde risultato positivo. La *nonlocalità*, un *monstrum* scientifico secondo l'esperienza e l'intuizione umana, è ormai una proprietà generalmente accettata del *mondo quantistico*. Si pone però a questo punto la grande questione della Scienza moderna: dove sta il confine tra quel *mondo quantistico* raggiungibile dai nostri più raffinati strumenti, e il mondo in cui viviamo, della vita di ogni giorno, quello che non conosce alcuna forma di nonlocalità? La Scienza non dovrebbe forse descrivere *il mondo*, senza attributi? La discussione in chiave moderna di questo cruciale problema, assimilabile al noto apologo del *Gatto di Schroedinger* [18], ci porterebbe da qui troppo lontano.

In conclusione, potremmo chiedere quale sia stata la sorte delle idee di Einstein espresse nel lavoro originale EPR [8], e costituenti la struttura della corrente di pensiero ancora oggi chiamata «Realismo locale». Negli ultimi decenni quelle idee sono passate al vaglio di moltissimi esperimenti, attuati in molti Laboratori con metodi e strumentazione sempre più sofisticati. L'impianto complessivo dell'EPR è stato sostanzialmente contraddetto. È stata dimostrata l'inesistenza degli einsteiniani «*elements of physical reality*», le cardinali *proprietà oggettive* della ontologia classica. Inoltre, come si è detto, è stata dimostrata la nonlocalità quantistica che, genialmente scoperta da EPR ma rifiutata a priori come una totale assurdità, era stata portata a prova della incompletezza della teoria. Molto ironicamente, la verifica sperimentale della nonlocalità ha invece mostrato la interna consistenza della stessa IdC che EPR voleva confutare. Il «paradosso» è quindi scomparso. Tuttavia la, per molti aspetti, «stranezza» della meccanica quantistica, le sue «difficoltà concettuali», e soprattutto il suo aspetto più distintivo, la nonlocalità, un ben «duro osso da digerire», stimolano ancora gli sforzi intellettuali di un notevole numero di filosofi-scienziati, molti dei quali sono raccolti in consorterie impegnate su diversi versanti di una generale *Hidden-variable Interpretation* iniziata negli anni '60 dai lavori di David Bohm.

Anche Oreste Piccioni, in tarda età, è stato attratto da questo coacervo di enigmi e problemi. Una sua proposta sperimentale, avanzata qualche anno fa presso l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e che ho esaminato recentemente, è stata superata dai risultati di recenti lavori sperimentali, anche del nostro gruppo di Ricerca [12], che hanno ancora una volta riconfermato la teoria IdC *standard*.

Ho riletto l'ultima lettera di Piccioni a Giorgio Salvini, ed ho anche riflettuto per vaga associazione di idee sulla sorte malinconica dell'ultimo, grandissimo Einstein.

Ho pensato che questi non sono fallimenti. Perché credo che la grandezza di un uomo non consista soltanto nella qualità delle idee possedute e realizzate ma piuttosto di quelle che, pur non realizzate, sono state da lui profondamente amate.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. ASPECT - D. GRANGIER - G. ROGER, *Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities*. Phys. Rev. Lett., 49, 1982, 91-94.
- [2] *Atti del Congresso Internazionale dei Fisici* (Como, 11-20 settembre 1927). Zanichelli, Bologna 1928.
- [3] J.S. BELL, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*. Cambridge 1987.
- [4] C.H. BENNETT *et al.*, *Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels*. Phys. Rev. Lett., 70, 1993, 1895-1899.
- [5] D. BOHM, *Quantum Theory*. Prentice-Hall, New York 1951.
- [6] D. BOHM, *Causality and Chance in Modern Physics*. Routledge and Kegan, London 1957.
- [7] N. BOHR, *Quantum Mechanics and Physical Reality*. Nature, 136, 1935, 65.
- [8] N. BOHR, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?* Phys. Rev., 48, 1935, 696-702.
- [9] N. BOHR, *Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics*. In: P.A. SCHILPP (ed.), *Albert Einstein: philosopher-scientist*. The Library of Living Philosophers, Evanston, 1949, 200-241.
- [10] D. BOSCHI - S. BRANCA - F. DE MARTINI - L. HARDY - S. POPESCU, *Experimental Realization of Teleporting an Unknown Pure Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels*. Phys. Rev. Lett., 80, 1998, 1121-1125.
- [11] F. DE MARTINI - D. PELLICCIA - F. SCIARRINO, *Contextual, Optimal and Universal Realization of the Quantum Cloning Machine and of the NOT Gate*. Phys. Rev. Lett., 92, 2004, 067901.
- [12] G. DI GIUSEPPE - F. DE MARTINI - D. BOSCHI, *Experimental test of the violation of local realism in quantum mechanics without Bell inequalities*. Phys. Rev. A, 56, 1977, 176-181.
- [13] P.A. DIRAC, *The principles of quantum mechanics*. Oxford University Press, 1947.
- [14] A. EINSTEIN, *Physik und realität*. Journal of the Franklin Institute, 221, 1936, 313-347 (Ed. Borinighieri, Torino 1988).
- [15] A. EINSTEIN - B. PODOLSKY - N. ROSEN, *Can quantum-mechanical description of Physical Reality be considered complete?* Phys. Rev., 47, 1935, 777-780.
- [16] R. FEYNMAN *et al.*, *The Feynman Lectures on Physics*. Wesley, Reading 1965.
- [17] K. GÖDEL, *The Consistency of the Axiom of Choice and the Generalized Continuum Hypothesis*. Proceedings of the National Academy of Science, 24, 1938, 556-557.
- [18] M. JAMMER, *The Philosophy of Quantum Mechanics*. Wiley, New York 1974, 536 pp.
- [19] D. MURDOCH, *Niels Bohr's Philosophy of Physics*. Cambridge University Press, Cambridge 1987.
- [20] A. PAIS, *Subtle is the Lord*. Oxford University Press, New York 1982, 552 pp.
- [21] M. REDHEAD, *Incompleteness, Nonlocality and Realism*. Clarendon Press, Oxford 1987.
- [22] L. ROSENFELD, *Commentary to EPR (1967)*. In: J.A. WHEELER - W.H. ZUREK (eds.), *Quantum Theory and Measurement*. Princeton University Press, 1983.
- [23] E. SCHROEDINGER, *Discussion of Probability Relations Between Separated Systems*. Proc. of the Cambridge Philosophical Society, 31, 1935, 555-563.
- [24] J. VON NEUMANN, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton University Press, Princeton 1955.

Dipartimento di Fisica
Università degli Studi di Roma «La Sapienza»
Piazzale Aldo Moro, 2 - 00185 ROMA