

GIANLUCA INTROZZI (\*)

## IL DUALISMO ONDA/PARTICELLA: ANALISI STORICA E RECENTI INTERPRETAZIONI

ABSTRACT - INTROZZI G., 2010 - Wave/particle duality: Historical analysis and recent interpretations.

Atti Acc. Rov. Agiati, a. 260, 2010, ser. VIII, vol. X, B: 5-18.

Wave/particle duality was introduced by Einstein in 1909 to justify Planck formula for the energy distribution of the black-body radiation. Since Einstein's seminal papers [1] [2], different ideas have been suggested about the meaning and interpretation of wave/particle duality. This paper presents eight different alternatives, and discusses the evolution of the duality concept from the origin of quantum mechanics to the present days.

KEY WORDS - Duality, Wave, Particle, Quanton, Fermion, Boson.

RIASSUNTO - INTROZZI G., 2010 - Il dualismo onda/particella: analisi storica e recenti interpretazioni.

Sin dai due articoli di Einstein del 1909 sulle fluttuazioni d'energia del corpo nero [1] [2], che introdussero il dualismo onda/particella nella fisica moderna, filosofi e fisici si sono interrogati sul significato e la portata di tale problematico concetto. Questo articolo ne presenta otto interpretazioni differenti, e discute l'evoluzione del dualismo in meccanica quantistica dalle origini ad oggi.

PAROLE CHIAVE - Dualismo, Dualità, Onda, Particella, Quantone, Fermione, Bosone.

SCHRÖDINGER: SOLO ONDE, SENZA PARTICELLE

In due articoli pubblicati nel marzo [3] e aprile [4] del 1926 Erwin Schrödinger introdusse l'equazione d'onda – che prenderà il suo nome – per elettroni non relativistici, descritti mediante la funzione d'onda  $\psi$ .

---

(\*) Dipartimento di Fisica Nucleare e Teorica - Università di Pavia.

A maggio [5] dimostrò l'equivalenza tra la formulazione matriciale della meccanica quantistica (proposta da Heisenberg, Born e Jordan nel 1925) e la meccanica ondulatoria da lui elaborata nei mesi precedenti.

Tuttavia egli continuò a pensare che lo studio dei processi microfisici in termini ondulatori fornisse un modello più realistico di quello matriciale, per transizioni discontinue come i salti quantici di un elettrone atomico. Pur consapevole delle difficoltà connesse ad una interpretazione realista della funzione d'onda – quali la dispersione del pacchetto d'onde – Schrödinger sperava di poter dimostrare che i fenomeni microfisici sono essenzialmente ondulatori.

Tale idea venne ripresa in alcuni suoi lavori [6] degli anni '50 del Novecento, mediante un tentativo di descrizione fisica esclusivamente in termini di campo (le teorie di campo comunemente accettate prevedono, invece, la coesistenza di campi e particelle, come gli elettroni nella teoria di Maxwell, considerati sorgenti del campo elettromagnetico). Per Schrödinger le particelle sono mera apparenza, manifestazioni illusorie della realtà essenziale dei fenomeni ondulatori: «Quello che osserviamo come forze e corpi materiali non sono altro che forme e variazioni nella struttura dello spazio. Le particelle sono semplici apparenze» (Erwin Schrödinger) [7].

Questa proposta non venne mai presa seriamente in considerazione dalla comunità scientifica, e diede luogo a polemiche e controversie tra Schrödinger e altri fisici.

#### BORN: SOLO PARTICELLE, SENZA ONDE

Secondo l'interpretazione probabilistica – proposta da Max Born [8] [9] nel 1926 – la funzione d'onda  $\psi$  non è un'onda fisica dotata d'energia e impulso, che si propaga nello spazio. È invece un'onda di probabilità, il cui modulo quadrato  $|\psi|^2$  corrisponde alla densità di probabilità  $\rho$  di trovare una particella in una data regione spaziale. Si tratta quindi di uno strumento matematico, definito nello spazio di Hilbert associato al sistema quantistico.

Le *particelle* sarebbero quindi gli unici *enti fisici* della meccanica quantistica, come sottolineato in occasione della conferenza tenuta da Born durante la cerimonia d'attribuzione del premio Nobel nel 1954: «Schrödinger credeva ancora che la sua teoria ondulatoria permettesse un ritorno alla fisica classica deterministica; egli propose (e ha recentemente rinnovato questa proposta con vigore) di abbandonare completamente la rappresentazione particellare, e di parlare, invece di elettroni

come particelle, di una distribuzione continua di densità  $|\psi|^2$  (o di una densità elettrica  $e|\psi|^2$ ). Alla luce dei fatti sperimentali, a noi di Gottinga questa interpretazione sembrava inaccettabile. A quel tempo era infatti già possibile contare le particelle mediante scintillazione o col contatore di Geiger, e fotografare le loro tracce con l'aiuto della camera a nebbia di Wilson» (Max Born) [10] p. 261.

Questa interpretazione si presta ad una specifica obiezione per quanto riguarda il problema del dualismo onda/particella: come spiegare gli effetti d'interferenza dovuti a elettroni inviati uno alla volta in un apparato a doppia fenditura? Il singolo elettrone che attraversa l'apparato impatterà sullo schermo rivelatore in un punto specifico. Combinando i segnali di molti elettroni, che hanno attraversato la doppia fenditura in tempi diversi, si ottiene una figura d'interferenza. Se invece fosse stata aperta un'unica fenditura, la figura collettiva ottenuta sarebbe stata quella di diffrazione. Il comportamento di ogni elettrone risulta quindi differente a seconda che, al momento in cui ha attraversato l'apparato, fossero aperte due o una sola fenditura. Se le particelle costituiscono gli unici enti fisici reali, cosa fa sì che l'unico elettrone presente in un dato istante nell'apparato si comporti in modo da contribuire ad una figura d'interferenza, piuttosto che a quella di diffrazione da fenditura singola?

#### HEISENBERG E JORDAN: NÉ ONDE, NÉ PARTICELLE

Questa posizione radicalmente antirealista fu sostenuta, nel 1925/26, da Werner Heisenberg e Pascual Jordan. La meccanica quantistica richiederebbe la rinuncia ad ogni tentativo di visualizzazione del mondo microfisico, ed una «ritirata» nel formalismo matematico.

Secondo tale interpretazione, la definizione ontologica degli enti della teoria quantistica sarebbe un pseudo problema, legato alle obsolete categorie (*oggetti, particelle, onde*) della fisica classica: «Heisenberg [...] tagliò il nodo gordiano con un principio filosofico e sostituì il procedimento per congetture con una regola matematica. Il principio afferma che concetti e rappresentazioni che non corrispondono ad alcuna situazione osservabile non debbano essere utilizzati nella descrizione teorica. [...] Heisenberg bandì l'idea di orbita di un elettrone con raggio e periodo di rivoluzione determinati, perchè queste quantità non sono osservabili, e cercò di costruire la teoria con l'aiuto di schemi quadrati del tipo menzionato sopra» (Max Born) [10] p. 258.

Non è casuale che questi fisici siano tra gli autori della *meccanica delle matrici*, che utilizza il formalismo matriciale per calcolare quantità

fisiche misurabili (*frequenze, intensità*) senza l'ausilio di alcun modello, e con strumenti matematici diversi dalle equazioni differenziali comuni alla fisica classica e alla meccanica ondulatoria di Schrödinger.

Questa interpretazione minimale riprende posizioni e tesi sul rapporto tra teoria scientifica e realtà tipiche del Positivismo ottocentesco. Essendo «minimale» per scelta, le virtù di questa interpretazione coincidono coi suoi limiti: non è legittimo null'altro che il mero confronto tra predizioni teoriche e risultati sperimentali. È quindi proibito elaborare una visione del mondo fisico («*Weltanschauung*»), inferire dalla teoria fisica un'ontologia, una spiegazione o un modello descrittivo della realtà. Epistemologia e metodologia sono i soli esiti filosofici possibili di un'interpretazione così limitativa della teoria quantistica.

Vala la pena di notare che Heisenberg cambiò più volte in seguito il proprio punto di vista filosofico: dall'iniziale Positivismo del 1925/26 all'Operazionalismo (sostenendo che è la teoria a determinare cosa possa essere osservato sperimentalmente) con l'articolo [11] del 1927 sull'indeterminazione; poi una sorta di «complementarità strutturale» (di cui parleremo in seguito) nel 1927/28. Quindi un'interpretazione neo-kantiana negli anni '30, ed infine un approccio linguistico negli anni '40 e '50 del Novecento [12].

#### BOHM: ONDE E PARTICELLE

Nel 1927 Louis de Broglie propose la teoria dell'*onda pilota* [13] in cui postulava che ad ogni particella fosse associata anche un'onda fisica (dotata d'energia e impulso), che «guidasse» la particella. Tale teoria fu stroncata da W. Pauli durante il quinto Congresso Solvay dello stesso anno, e venne abbandonata perfino da de Broglie.

L'idea verrà ripresa e sviluppata a partire dagli anni '50 del Novecento da David Bohm [14] e da Jean-Pierre Vigièr, allievo di de Broglie. L'oggettiva coesistenza di un'*onda fisica* e della *particella* da essa guidata è l'assunzione fondamentale su cui si basa tale formulazione, nota come *interpretazione causale* [15] della meccanica quantistica.

Nel modello di Bohm vi è un'asimmetria tra onde e particelle: mentre l'onda influenza la particella cui è associata (*onda pilota*), la particella non ha alcun effetto sull'onda (non può modificarne l'energia o il momento). Ciò dipende, secondo Bohm, dal ruolo nomologico svolto dall'onda: essa determina sia la traiettoria della particella associata, sia la probabilità di trovare tale particella in una determinata regione dello spazio.

La funzione d'onda di particella singola, scritta in forma polare, è

$$\psi(\vec{r}, t) = R(\vec{r}, t) e^{iS(\vec{r}, t)/\hbar} \quad (1)$$

dove sia l'ampiezza  $R$  che la fase  $S$  sono funzioni di variabili reali. La velocità, e di conseguenza la traiettoria della particella, dipendono dalla fase  $S$  secondo condizione di guida di de Broglie:

$$\vec{v}(\vec{r}, t) = \frac{1}{m} \nabla S(\vec{r}, t) \quad (2)$$

La densità di probabilità  $\rho$  è data dall'ampiezza  $R$  della funzione d'onda:

$$\rho(\vec{r}, t) = \psi^* \psi = |\psi|^2 = R^2(\vec{r}, t) \quad (3)$$

Il carattere quantistico di un sistema fisico è anch'esso descritto per mezzo dell'ampiezza  $R$ : la presenza del *potenziale quantico*

$$Q(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R(\vec{r}, t)}{R(\vec{r}, t)} \quad (4)$$

differenzia i sistemi quantistici da quelli classici. Secondo l'interpretazione di Bohm, gli aspetti non-locali della meccanica quantistica sono conseguenza diretta del carattere non-locale del potenziale quantico  $Q$ .

Inoltre, mentre ad ogni particella è sempre associata un'onda pilota, non si verifica la situazione opposta: esistono infatti onde definite «vuote». Le onde vuote sono dotate d'energia e momento, ma non sono associate ad alcuna particella. In numerose situazioni d'interesse fisico, l'onda associata alla particella si divide in più parti aventi sovrapposizione spaziale trascurabile. Di queste, un'onda funge da guida alla particella e resta associata ad essa, mentre le altre sono onde vuote. Un'onda vuota, dal punto di vista fisico, è un'onda a tutti gli effetti e se rientrasse in contatto con la particella ne influenzerebbe nuovamente il moto. Tuttavia i tentativi sperimentali di rivelare l'esistenza di onde vuote con metodi ottici non hanno dato esito. Le onde pilota, se esistono, sono dotate d'energia e momento non misurabili con le tecniche d'interferometria ottica disponibili. Questo risultato – benché non definitivo – rende difficile considerare l'onda pilota come un'entità fisica.

La formulazione di Bohm è radicalmente alternativa all'interpretazione ortodossa della meccanica quantistica (nota come *interpretazione di Copenhagen*) da un punto di vista epistemologico, pur essendone equi-

valente per le previsioni teoriche. Risulta quindi difficile comprendere le ragioni che hanno determinato tra i fisici il quasi incontrastato successo dell'interpretazione di Copenaghen [16], che pur presenta aspetti concettuali problematici ed oscuri. La sostanziale continuità con la meccanica classica rende invece diretta ed intuitiva, da un punto di vista logico e fondazionale, la spiegazione della realtà fisica fornita da Bohm.

L'analisi delle caratteristiche del modello bohmiano [17] permette d'apprezzarne gli aspetti di continuità con la descrizione classica del mondo fisico (causalità, determinismo, realismo). Ma mette anche in evidenza le profonde novità (non-località, olismo, contestualità) introdotte dalla meccanica quantistica – a prescindere dalle sue possibili interpretazioni – nella nostra rappresentazione della realtà fisica.

Un ulteriore sviluppo dell'interpretazione causale, noto come *meccanica bohmiana*, è stato proposto [18] negli anni '90 del Novecento. Invece del potenziale quantico  $Q$  introdotto da Bohm, la condizione di guida di Madelung

$$\vec{v}(\vec{r}, t) = \frac{1}{m} \nabla S(\vec{r}, t) = \frac{\hbar}{m} \operatorname{Im} \frac{\nabla \psi(\vec{r}, t)}{\psi(\vec{r}, t)} \quad (5)$$

è richiesta in meccanica bohmiana, oltre all'equazione di Schrödinger, per descrivere un sistema quantistico di particella singola. Per un sistema composto da  $N$  particelle identiche, vi sono  $N$  equazioni di guida di Madelung, ciascuna necessaria a descrivere la dipendenza della velocità della  $k$ -esima particella ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) dalle posizioni istantanee di *tutte* le  $N$  particelle del sistema. Il carattere *non locale* della formulazione bohmiana emerge dalla correlazione tra la  $k$ -esima velocità e le coordinate collettive delle  $N$  particelle del sistema quantistico.

Poiché la (5) è un'equazione differenziale del primo ordine, in meccanica bohmiana le posizioni e le velocità *non* sono indipendenti: basterebbe conoscere le posizioni iniziali di tutte le  $N$  particelle di un sistema quantistico per determinarne completamente l'evoluzione dinamica. Invece la meccanica classica si basa sull'equazione di Newton, che è un'equazione differenziale del secondo ordine. È quindi necessario conoscere sia le posizioni sia le velocità iniziali di tutte le particelle, per determinare le traiettorie di un sistema classico di  $N$  particelle identiche. Questo esempio mostra la radicale differenza tra la meccanica bohmiana e la dinamica newtoniana nel descrivere un sistema fisico. Anche se l'interpretazione bohmiana conserva molte caratteristiche tipiche della descrizione classica del mondo (realismo, causalità, determinismo), la sua ontologia è profondamente differente.

In definitiva, la meccanica bohmiana è caratterizzata sia da un'ontologia diversa da quella classica, sia da un'epistemologia alternativa a quella dell'interpretazione ortodossa (di Copenaghen) della meccanica quantistica.

#### BOHR E PAULI; HEISENBERG: ONDE O PARTICELLE

Il cosiddetto «*principio di complementarità*» – formulato da Niels Bohr [19] nel 1927 – afferma che qualunque sistema quantistico possiede almeno una coppia di proprietà necessarie a descrivere il sistema, che non possono essere conosciute simultaneamente. Sono mutuamente esclusive, nel senso che l'osservazione di una proprietà preclude l'osservazione dell'altra. La coppia inevitabilmente presente è quella onda/particella: un sistema quantistico manifesta a volte proprietà ondulatorie, a volte particellari.

Una formulazione molto frequente della complementarità onda/particella, dovuta a Wolfgang Pauli [20], attribuisce all'apparato sperimentale la determinazione del sistema quantistico come onda o come particella. Se si osserva il sistema quantico con uno strumento (come un contatore) che rivela particelle, si registrerà un comportamento corpuscolare. Se invece lo si analizza con un apparato che rivela delle onde (un interferometro, ad esempio), lo stesso sistema mostrerà proprietà ondulatorie. Nell'interpretazione di Pauli, i sistemi quantistici non avrebbero quindi uno statuto ontologico proprio, ma esso sarebbe determinato dall'interazione con l'apparato sperimentale.

Va anche menzionata una proposta di Heisenberg degli anni 1927/28, nota come «*equivalenza onda/particella*» [21]. Si tratta di una sorta di «complementarità strutturale»: da una parte l'equazione di Schrödinger, interpretata secondo la concezione probabilistica di Born, che descrive *particelle* (anche se prive di traiettorie definite); dall'altra il formalismo della quantizzazione di *onde materiali* (pur se prive di un'ampiezza ben definita) nello spazio tridimensionale, proposto da P.A.M. Dirac, P. Jordan, E. Wigner ed O. Klein tra il 1926 e il 1928. I due approcci risultarono matematicamente equivalenti e produssero identici risultati, convincendo Heisenberg che le rappresentazioni particellare (Schrödinger, Born) e ondulatoria (Dirac, Jordan, Wigner e Klein) dell'elettrone sono semplicemente modi formalmente diversi di descrivere lo stesso ente fisico. Si tratterebbe quindi non di una *complementarità* onda/particella dovuta agli *apparati sperimentali* (Pauli), quanto di una *equivalenza* onda/particella derivante da *strutture teoriche* diverse ma predittivamen-

te equivalenti, che descrivono la stessa entità (Heisenberg). Questa proposta non ha suscitato l'interesse dei fisici del tempo ed è stata di fatto dimenticata, in favore della complementarità attribuita – in accordo con la formulazione di Pauli – all'apparato sperimentale.

Per ogni apparato in cui si abbiano due cammini alternativi  $A$  o  $B$  (come ad esempio una doppia fenditura, un interferometro di Michelson o di Mach-Zehnder), la complementarità onda/particella può essere espressa mediante l'introduzione di due grandezze: la *visibilità*  $V$  legata alle caratteristiche ondulatorie, e la *predicibilità*  $P$  correlata a quelle corpuscolari. La *visibilità*  $V$  è il contrasto relativo delle frange d'interferenza, definibile mediante le intensità minime e massime delle frange:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (6)$$

La *predicibilità*  $P$  si riferisce ad una previsione della traiettoria *prima* che la particella abbia attraversato l'apparato, espressa mediante le probabilità  $p(A)$  e  $p(B)$  relative ai due possibili cammini alternativi ( $A$  o  $B$ ) e determinate dalla funzione d'onda totale:

$$\psi_T = c_A \psi_A + c_B \psi_B \quad (7)$$

$$P = |p(A) - p(B)| = \left| \frac{|c_A|^2 - |c_B|^2}{|c_A|^2 + |c_B|^2} \right| \quad (8)$$

Entrambe hanno valori compresi tra zero ed uno:

$$0 \leq V \leq 1 \quad (9)$$

$$0 \leq P \leq 1 \quad (10)$$

La formulazione quantitativa della complementarità onda/particella è quindi espressa da una delle due condizioni, che si escludono vicendevolmente:

$$V = 1 \quad P = 0 \quad (11)$$

$$V = 0 \quad P = 1 \quad (12)$$

GREENBERGER, ENGLERT: NÉ ONDE, NÉ PARTICELLE

Una miglior comprensione del dualismo onda/particella è stata fornita nel 1988 da D.M. Greenberger e A. Yasin [22], che hanno introdotto una generalizzazione della complementarità di Bohr, espressa dalla disuguaglianza

$$V^2 + P^2 \leq 1 \quad (13)$$

che diventa un'uguaglianza per uno *stato* quantistico *puro*:

$$V^2 + P^2 = 1 \quad (14)$$

La *dualità* (termine con cui si indica una generalizzazione del dualismo onda/particella) di Greenberger e Yasin afferma che un sistema quantistico può esibire simultaneamente comportamenti sia ondulatori ( $V \neq 0$ ) sia particellari ( $P \neq 0$ ), ma che una maggior manifestazione del carattere ondulatorio implica una minor evidenza di quello particellare, e viceversa. Questo concetto è espresso quantitativamente dall'uguaglianza (14), che rappresenta una generalizzazione della complementarità onda/particella – (11) o (12) – anche per valori di  $V$  e  $P$  diversi da zero o uno.

B.-G. Englert ha introdotto [23] nel 1996 una disuguaglianza formalmente molto simile, ma concettualmente assai differente da quella di Greenberger e Yasin. Mentre la disuguaglianza (13) si riferisce allo stato iniziale del *sistema quantistico* in esame, quella di Englert deriva dalla descrizione quantistica del *rivelatore*, e concerne le proprietà del sistema che si manifestano *dopo* che esso ha attraversato l'apparato di misura.

Egli definisce una *visibilità a posteriori*  $V_o$  e la *distinguibilità*  $D$  che misura la probabilità d'identificare correttamente il cammino percorso (A o B), valutata *a posteriori* dopo l'interazione tra il sistema quantistico e il rivelatore.

La disuguaglianza di Englert

$$V_o^2 + D^2 \leq 1 \quad (15)$$

diventa l'uguaglianza

$$V_o^2 + D^2 = 1 \quad (16)$$

se il *rivelatore* è preparato in uno *stato* quantistico *puro*.

Gli specifici valori misurati per  $V_0^2$  e  $D^2$  (ad esempio,  $V_0^2 = 0.4$  e  $D^2 = 0.6$ ) *non* sono proprietà *a priori* del sistema quantistico, ma riflettono le particolari condizioni dell'interazione tra il sistema e l'apparato di misura, come sostenuto da W. Pauli. In un esperimento svolto nel 1999 utilizzando un interferometro di Mach-Zehnder con singoli fotoni polarizzati [24], P. Kwiat ha variato la distinguibilità  $D$  tra 0 e 1 mediante un polarimetro, verificando con alta precisione la validità della (16) per stati puri e della (15) per miscele di stati puri. È quindi chiaro che l'esito delle misure (ad esempio  $V_0^2 = 0.4$  e  $D^2 = 0.6$  oppure  $V_0^2 = 0.7$  e  $D^2 = 0.3$ ) non si riferisce ad una proprietà intrinseca del sistema quantistico (si trattava sempre di fotoni polarizzati, identici l'uno all'altro), ma dipende solo dall'impostazione scelta dallo sperimentatore dello strumento di misura. Possiamo decidere, agendo sul polarimetro, di ottimizzare l'informazione sulla visibilità oppure quella relativa alla distinguibilità. Ma in ogni caso la relazione di Englert stabilisce un limite superiore all'informazione totale ricavabile, mediante l'interferometro, dal sistema quantistico.

La dualità di Greenberger/Yasin e quella di Englert segnano un definitivo distacco dai concetti classici di onda e di particella, cui ancora necessariamente si riferisce invece la complementarità di Bohr. Un sistema quantistico caratterizzato da proprietà *parzialmente* ondulatorie e *parzialmente* particellari non è descrivibile né come onda, né come particella. Si tratta di un sistema *intrinsecamente* non classico.

#### LÉVY-LEBLOND: QUANTONI

Un ulteriore allontanamento dai concetti classici consiste nell'attribuire valenza ontologica agli stati non classici descritti dalle disuguaglianze di Greenberger/Yasin o di Englert: «I comportamenti ondulatorio e corpuscolare delle microentità sono due forme d'esistenza estreme della stessa entità ontologica, che risulta governata dalla disuguaglianza di Greenberger/Yasin» (Gennaro Auletta) [25] p. 526.

Jean-Marc Lévy-Leblond è stato un deciso sostenitore di tale tesi [26]. Secondo lui, occorre identificare in modo diverso gli enti della teoria quantistica: né onde né particelle, che sarebbero esclusivamente enti della fisica classica. Un simile punto di vista, privo però d'implicazioni ontologiche, era del resto già stato espresso molto prima da Bohr: «concetti quali quello di corpuscolo o onda risultano ben definiti solo entro i limiti della fisica classica in cui, naturalmente, luce ed elettroni sono rispettivamente onde elettromagnetiche e corpuscoli materiali» (Niels Bohr) [27] p. 370.

E Richard P. Feynman scrive nella prima pagina del terzo volume, dedicato alla meccanica quantistica, delle sue *Lectures*: «una volta si pensava che l'elettrone si comportasse come una particella e si scoprì poi che, sotto molti aspetti, si comporta come un'onda. Cioè in realtà non si comporta in nessuno dei due modi. Ora abbiamo lasciato perdere. Diciamo: *'non è né l'una né l'altra cosa'*. Fortunatamente c'è uno spiraglio: gli elettroni si comportano esattamente come la luce. Il comportamento quantistico degli oggetti atomici (elettroni, protoni, neutroni e così via) è lo stesso per tutti, sono tutti 'onde-particelle', o qualunque altro nome vi piaccia dar loro» (Richard P. Feynman) [28] p. I-1.

Gli enti della meccanica quantistica sarebbero – adottando un termine coniato [29] [30] dall'epistemologo Mario Bunge nel 1967 – *quantoni*: «Dobbiamo, quindi, abbandonare l'idea che ogni oggetto fisico sia o un'onda o una particella. Non è nemmeno possibile affermare, come viene talvolta fatto, che le particelle 'diventano' onde nel dominio quantistico e, viceversa, che le onde vengono 'trasformate' in particelle. [...] Quindi è necessario riconoscere che si ha in questo caso un tipo differente d'entità, che è specificatamente quantico. Perciò chiamiamo questi enti *quantoni*, anche se questa nomenclatura non è ancora universalmente adottata. Questi quantoni si comportano in modi peculiari» (Jean-Marc Lévy-Leblond) [31] p. 69.

Tuttavia si può osservare che quella proposta da Lévy-Leblond potrebbe essere una «soluzione» puramente semantica. Anche senza sposare tesi nominaliste o concettualiste, si potrebbe obiettare che l'aver coniato un nuovo nome («*quantone*») non corrisponde necessariamente all'esistenza di un nuovo ente fisico ad esso associato. Per fare un paragone semplice, potrebbe essere che il termine «*quantone*» identifichi una nuova realtà (rispetto alla fisica classica), così come il termine «*ornitorinco*» identifica una specie (nuova ai primi dell'800) che ha caratteristiche in parte dell'anatra e in parte del castoreo, senza essere né anatra né castoreo. Ma come escludere che il termine «*quantone*» abbia come analogo zoologico non l'ornitorinco ma l'unicorno, creatura fantastica che esiste solo nei miti e nelle leggende?

#### LÉVY-LEBLOND: FERMIONI E BOSONI

I sistemi quantistici formati da molti quantoni non obbediscono alle leggi della meccanica statistica classica (distribuzione di Maxwell-Boltzmann). Il loro comportamento statistico è invece definito – ovviamente-

te in presenza di un numero consistente di quantoni – dalle distribuzioni di Bose-Einstein oppure di Fermi-Dirac.

La caratterizzazione come *bosone* (quantone con numero quantico di *spin* intero:  $s = 0, 1, 2, \dots$ ) o *fermione* (quantone con numero quantico di *spin* semi-dispari:  $s = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$ ) è invece applicabile al singolo quantone, e confermata da numerosissime evidenze sperimentali. Anche se bosoni e fermioni sono entrambi identificabili come quantoni, secondo J.-M. Lévy-Leblond sarebbe proprio il dualismo bosone/fermione (che sancisce l'esistenza di due classi disgiunte di quantoni: i bosoni e i fermioni) a connotare i sistemi quantistici: «la dicotomia fermione-bosone è d'importanza enorme [...] e porta a due tipi di comportamento quantistico profondamente differenti» [31] p. 491, mentre quella onda/particella caratterizzerebbe i sistemi classici.

La struttura ontologica della realtà quantistica sarebbe quindi data da *bosoni* e da *fermioni* che, nel limite classico, si manifesterebbero come *onde* (bosoni privi di massa) o come *particelle* (bosoni massivi e fermioni) [31] p. 490. Lévy-Leblond scrive esplicitamente: «Quindi, anche dopo aver insistito sull'universalità del concetto di quantone, [...] vediamo apparire a livello quantico un nuovo dualismo [*bosone/fermione* – *N.d.A.*] – certamente correlato, in qualche maniera complicata, al dualismo classico [*onda/particella* – *N.d.A.*], [...] ma tuttavia più profondo di questo. Lasciamo volentieri aperta la questione se questa dialettica di singolarità [*del quantone* – *N.d.A.*] e dualità [*ovvero: dualismo bosone/fermione* – *N.d.A.*], e le sue successive incarnazioni nella teoria fisica, abbiano a che fare con l'oggetto o con il soggetto della scienza – assumendo comunque che questa dicotomia [*bosone/fermione* – *N.d.A.*] ha senso» (Jean-Marc Lévy-Leblond) [31] p. 493.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. EINSTEIN, Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems [Sullo stato attuale del problema della radiazione], *Physikalische Zeitschrift*, 10, 1909, pp. 185-193.
- [2] A. EINSTEIN, Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung [Sullo sviluppo dei nostri punti di vista circa la natura e costituzione della radiazione], *Physikalische Zeitschrift*, 10, 1909, pp. 817-825.
- [3] E. SCHRÖDINGER, Quantisierung als Eigenwertproblem (Erste Mitteilung) [Quantizzazione come problema agli autovalori (prima comunicazione)], *Annalen der Physik*, 79, 1926, pp. 361-376.
- [4] E. SCHRÖDINGER, Quantisierung als Eigenwertproblem (Zweite Mitteilung) [Quantizzazione come problema agli autovalori (seconda comunicazione)], *Annalen der Physik*, 79, 1926, pp. 489-527.

- [5] E. SCHRÖDINGER, Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen [Sulla relazione tra la meccanica quantistica di Heisenberg-Born-Jordan e la mia], *Annalen der Physik*, 79, 1926, pp. 734-756 .
- [6] E. SCHRÖDINGER, Are there quantum jumps?, *The British Journal for the Philosophy of Science*, 3, 1952, pp.109-123, pp. 233-242.
- [7] E. SCHRÖDINGER, *The Interpretation of Quantum Mechanics*, Ox Bow Press, Woodbridge 1995.
- [8] M. BORN, Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge (Vorläufige Mitteilung) [Sulla meccanica quantistica dei processi d'urto (comunicazione preliminare)], *Zeitschrift für Physik*, 36, 1926, pp. 863-867.
- [9] M. BORN, Quantenmechanik der Stossvorgänge [Meccanica quantistica dei processi d'urto], *Zeitschrift für Physik*, 38, 1926, pp. 803-827.
- [10] M. BORN, The statistical interpretation of quantum mechanics - Nobel Lecture, December 11, 1954. In *Nobel Lectures in Physics 1942-1962*, Elsevier, Amsterdam 1964.
- [11] H. HEISENBERG, Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik [Sul contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica nella teoria quantistica], *Zeitschrift für Physik*, 43, 1927, pp. 172-198.
- [12] K. CAMILLERI, *Heisenberg and the Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge 2009.
- [13] L. DE BROGLIE, Nouvelle dynamique des quanta, In *Electrons et Photons*, Eds. Gauthier-Villars et c.ie, Paris 1928.
- [14] D. BOHM, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of «hidden variables», *Physical Review*, 85, 1952, pp. 166-179, pp. 180-193.
- [15] P.R. HOLLAND, *The Quantum Theory of Motion*, Cambridge University Press, Cambridge 1993.
- [16] J.T. CUSHING, *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*, University of Chicago Press, Chicago 1994.
- [17] A. FINE, On the Interpretation of Bohmian Mechanics, In J.T. CUSHING, A. FINE, S. GOLDSTEIN, eds., *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal*, Kluwer, Dordrecht 1996.
- [18] D. DÜRR, S. Goldstein, N. Zanghi, On a realistic Theory of Quantum Physics, In S. ALBEVERIO, G. CASATI, U. CATTANEO, D. MERLINI, eds., *Stochastic Processes, Physics and Geometry*, World Scientific, Singapore 1990.
- [19] N. BOHR, The quantum postulate and the recent development of atomic theory, In *Atti del Convegno Internazionale dei Fisici, Zanichelli*, Bologna 1928.
- [20] W. PAULI, Die philosophische Bedeutung der Idee der Komplementarität [Il significato filosofico dell'idea di complementarità], *Experientia*, 6, 1950, pp. 72-76.
- [21] K. CAMILLERI, Heisenberg and the wave-particle duality, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 37, 2006, pp. 298-315.
- [22] D.M. GREENBERGER, A. Yasin, Simultaneous wave and particle knowledge in a neutron interferometer, *Physics Letters*, A 128, 1988, pp. 391-394.
- [23] G.-B. ENGLERT, Fringe visibility and which-way information: An inequality, *Physical Review Letters*, 77, 1996, pp. 2154-2157.

- [24] P.D.D. SCHWINDT, P.G. KWIAT, B.-G. ENGLERT, Quantitative wave-particle duality and non-erasing quantum erasure, *Physical Review*, A 60, 1999, pp. 4285-4290.
- [25] G. AULETTA, Foundations and Interpretation of Quantum Mechanics, *World Scientific*, Singapore 2000.
- [26] J.-M. LÉVY-LEBLOND, On the nature of quantons, *Science and Education*, 12, 2003, pp. 495-502.
- [27] N. BOHR, Chemistry and the quantum theory of atomic constitution, *Journal of Chemical Society*, 1932.
- [28] R.P. FEYNMAN, R.B. LEIGHTON, M. SANDS, The Feynman Lectures on Physics - Vol.III Quantum Mechanics, Addison Wesley, New York 1965<sup>1</sup>, 1989<sup>2</sup>, 2006<sup>3</sup>; traduzione italiana: La Fisica di Feynman - 3. Meccanica quantistica, Zanichelli, Bologna 2001<sup>1</sup>, 2007<sup>2</sup>.
- [29] M. BUNGE, Foundations of Physics, *Springer*, New York 1967.
- [30] M. BUNGE, Quantum Theory and Reality, *Springer*, New York 1967.
- [31] J.-M. LÉVY-LEBLOND, Quantics. Rudiments of Quantum Physics, *North Holland*, Amsterdam 1990.

---

Indirizzo dell'autore:

Prof. Gianluca Introzzi - Dipartimento di Fisica Nucleare e Teorica - Via Bassi, 6 -  
I-27100 Pavia, Italia

---