

Angelina De Luca  
Università di Urbino  
[angelinadl@yahoo.it](mailto:angelinadl@yahoo.it)

LA TEORIA DELLA DOPPIA SOLUZIONE:  
UN PUNTO DI VISTA REALISTA  
SULLA FISICA DEI QUANTI

*SOMMARIO*

1. LA DUALITÀ ONDA-PARTICELLA.....	5
2. LA TEORIA DELLA DOPPIA SOLUZIONE.....	8
3. IL V CONGRESSO SOLVAY .....	11
4. IL RITORNO ALL'ERESIA .....	12
5. DE BROGLIE COME SIMPLICIO?.....	15
6. CONCLUSIONE .....	18

*ABSTRACT*

Louis de Broglie is one of the founders of quantum mechanics. Rather than ascribing to the physical world some supposed new paradoxical features, he admits the practical success of quantum mechanics, but he considers it just a statistically exact theory; in addition to that, de Broglie purports to recover a causal and spatio-temporal description of phenomena. Unlike others detractors of the orthodox paradigm, he elaborates his own *pars costruens*, which is a not ambiguous alternative to standard quantum physics. The theory of double solution, in fact, attributes reality both to particles and waves, and it represents an attempt to overcome the conceptual difficulties of the prevailing interpretation. Moreover, apart from its limits, de Broglie's theory is able to restrict the importance of formal prohibitions, set from orthodox physicists, toward "heretical" explanations of empirical facts.

La questione del realismo è sicuramente uno dei temi più vecchi, articolati e controversi della filosofia occidentale. Essa rappresenta forse un “classico” della riflessione epistemologica e il dibattito che l’ha accompagnata nei secoli – ammesso che lo si possa avere presente per intero – non potrebbe essere riassunto in un numero ristretto di pagine. Limitando la nostra attenzione ad un solo ambito della conoscenza umana, quello costituito dalle teorie della fisica, si può semmai tentare di vedere come la nozione di ‘realtà esterna’ (intesa quale riferimento extra-teorico) sia stata per certi versi un presupposto di tale *corpus* di conoscenze, esplicitato però solo quando un certo modo di fare fisica ha preteso di metterlo in discussione. Il paradigma di Copenaghen cui si sta alludendo, infatti, reintroduce nella fisica delle istanze soggettivistiche, risentendo per certi versi del clima culturale europeo tra le due guerre mondiali. D’altra parte, un potente formalismo matematico (Schrödinger, Heisenberg, Von Neumann, Dirac) ha portato ad enormi successi sul piano delle predizioni empiriche, nonostante fosse accompagnato, il più delle volte, da interpretazioni concettuali stravaganti e irrazionalistiche. De Broglie appartiene a quella minoranza di ‘grandi’ che ha creato la meccanica quantistica e tuttavia, dopo averne sostenuto per qualche tempo la versione ufficiale, si è attestato su una posizione realista, molto vicina a quella di Einstein, Planck e Schrödinger: «Contrariamente alle affermazioni estreme di certe filosofie idealistiche, ho la convinzione profonda che esista una realtà fisica a noi esterna che è indipendente dal nostro pensiero e dai nostri mezzi imperfetti di conoscerla»<sup>1</sup>.

Questa istanza realista, tuttavia, prima ancora di essere ‘filosofica’, è scientifica nel senso che ricalca bene la *forma mentis* di coloro che la scienza la vivono, per così dire, dall’interno, coloro che, come direbbe Einstein<sup>2</sup>, sanno più di chiunque altro dov’è che la scarpa fa più male. Caratteristiche di questo *realismo-operante-nella-scienza* sono l’idea che ci sia un mondo esterno prima e indipendentemente dall’intervento di un osservatore o di un apparato di misura; il requisito per cui tale mondo deve poter essere descrivibile causalmente e all’interno di coordinate spazio-temporali; la convinzione che l’effettivo valore di una teoria fisica si misuri dalla non-ambiguità con cui essa pone alla propria base una qualche ontologia, cioè dal suo sbilanciarsi, seppure in forma congetturale, su ciò che esiste nel mondo. Quindi, una sorta di realismo improntato al buon senso caratterizza le concezioni di quei fisici che prendono sul serio l’ontologia: che si tratti di punti materiali in movimento, di campi, di stringhe, etc., ogni teoria fisica deve indicare sin dalle proprie premesse ciò

---

<sup>1</sup> de Broglie (1976, 49).

<sup>2</sup> Einstein (1965, 37).

di cui essa intende parlare, le entità cioè che nel mondo essa reputa possano esistere (*beables*)<sup>3</sup> e non solo essere immediatamente rivelate (*observables*). Quanto detto non equivale ovviamente ad asserire che le affermazioni circa l'esistenza o la non esistenza di un mondo esterno si possano dirimere in modo razionalmente cogente e conclusivo. Probabilmente, su questo punto, aveva ragione Carnap<sup>4</sup>, che reputava vana la controversia dei due geografi circa la realtà o l'irrealtà di una certa montagna africana.

Tuttavia, attraverso l'interpretazione di de Broglie, si vorrebbe quantomeno sostenere che un realismo di fondo costituisce *l'atteggiamento più naturale* da parte di chi 'interroga' la natura senza pregiudizi ideologici: il fisico, in questo senso minimale, non può non essere realista, e le scienze della natura sembrano avere quasi per definizione un carattere 'intenzionale'<sup>5</sup>. Questa concezione dell'impresa scientifica, che ci sembra essere anche la più convincente, è riassunta con chiarezza dalle seguenti affermazioni di Einstein:

[...] Le teorie fisiche tentano di costruire una rappresentazione della realtà e di determinarne i legami con il vasto mondo delle impressioni sensibili. Pertanto, le nostre costruzioni mentali si giustificano soltanto se le teorie costituiscono realmente un legame di tal fatta e secondo come lo costituiscono. [...] La realtà creata dalla fisica moderna è invero assai lontana dalla realtà dei primi giorni. Ma gli scopi di ogni teoria fisica rimangono sempre gli stessi. Con l'aiuto delle teorie fisiche cerchiamo di aprirci un varco attraverso il groviglio dei fatti osservati, di ordinare e d'intendere il mondo delle nostre impressioni sensibili. Aneliamo a che i fatti osservati discendano logicamente dalla nostra concezione della realtà. Senza la convinzione che con le nostre costruzioni teoriche è possibile raggiungere la realtà, senza convinzione nell'intima armonia del nostro mondo, non potrebbe esserci scienza. Questa convinzione è, e sempre sarà, il motivo essenziale della ricerca scientifica<sup>6</sup>.

*Doxa* piuttosto che *epistēmē*<sup>7</sup>, la scienza di Einstein e di de Broglie è un'impresa umana e, pertanto, fallibile che tuttavia, grazie alla sua forte vocazione esplicativa, è rivolta sempre verso la comprensione di qualcosa, non nasconde i propri vuoti concettuali dietro vorticosi algoritmi formali, ed è in grado di realizzare quei *punti-fermi-in-movimento* che costituiscono anche le acquisizioni fondamentali del patrimonio conoscitivo dell'umanità.

---

<sup>3</sup> Bell (1987, 174). L'autore presenta il termine 'beable' quale abbreviazione di 'maybe able', così da tenere conto, da un lato, del carattere fallibile di ogni affermazione scientifica, senza tuttavia rinnegare, dall'altro, l'esigenza di chiarezza ontologica della scienza stessa.

<sup>4</sup> Carnap (1967, 300-3).

<sup>5</sup> Nel senso aristotelico-brentaniano del termine.

<sup>6</sup> Einstein e Infeld (1960, 301-3).

<sup>7</sup> Popper (1994, 272).

### 1. La dualità onda-particella

Dopo la Grande Guerra, la fisica, oltre ad essere divisa in due<sup>8</sup>, presentava anche delle strane anomalie, per nulla esorcizzabili nel quadro delle conoscenze del tempo. La teoria quantistica della luce definiva l'energia di un fotone con la relazione  $W = h\nu$ , contenente una frequenza, non giustificabile dal punto di vista di una teoria puramente corpuscolare.

Da questa semplice ma fondamentale considerazione era partito anche Einstein e ne aveva dedotto l'idea che fosse necessario, parlando della luce, introdurre contemporaneamente la nozione di corpuscolo e quella di fenomeno periodico. D'altra parte, il subentrare di numeri interi<sup>9</sup> nella determinazione degli stati stabili degli elettroni nell'atomo, portò de Broglie ad estendere la dualità di onde e corpuscoli anche agli elettroni. Insomma, la natura in tutte le sue forme fondamentali poteva essere ricondotta ad un'immagine fisica concreta, quella, appunto, di corpuscoli che viaggiano in seno a delle onde. Entrambi, corpuscoli ed onde, costituiscono elementi veri della realtà ed esistono prima e indipendentemente da ogni osservazione, anche se da questa possono essere modificati. La loro comprensione e rappresentazione deve avvenire all'interno dello spazio e del tempo e, in qualche modo, precedere logicamente e metodologicamente, il formalismo matematico impiegato per la loro analisi.

A questa rivoluzionaria ipotesi teorica de Broglie dedica la sua tesi di dottorato<sup>10</sup> in fisica, sostenuta nel novembre del 1924. Il punto più fecondo di questo lavoro è senz'altro costituito dall'argomentazione con cui l'autore chiarisce la corrispondenza tra il moto della particella e la propagazione della sua onda associata. Da un lato, egli prende le mosse da un'equazione tra le due formule enunciate in precedenza da Einstein, rispettivamente, per l'energia propria di una particella di massa  $m_0$  e per il quanto di luce di frequenza  $\nu_0$ :

$$(1) \quad m_0 c^2 = h \nu_0 \quad h \nu_0$$

<sup>8</sup> Si avevano, da un lato, la meccanica del punto materiale (*la discontinuità della materia*), dall'altro l'elettromagnetismo di Maxwell (*l'azione continua del campo*).

<sup>9</sup> La teoria di Bohr-Sommerfeld prevedeva, per la quantizzazione del moto degli elettroni, l'uso di numeri interi, i quali erano stati ritenuti tipici, fino a quel momento dei fenomeni prettamente ondulatori. Le orbite di Bohr sembrano, allora, contenere un numero intero di onde materiali, e il prodotto della lunghezza delle orbite per la quantità di moto dell'elettrone mobile deve essere uguale ad  $h$  o a multipli di  $h$ : gli elementi materiali in moto esibiscono, quindi, anche un comportamento ondulatorio e hanno, come le radiazioni, uno spettro, che è discontinuo in quanto vi sono consentite solo alcune lunghezze piuttosto che altre.

<sup>10</sup> de Broglie, «Recherches sur la théorie des quanta», in *Annales de Physique*, X serie, vol. III, gennaio-febbraio 1925, pp. 22-128; II ed.: Paris, Masson, 1962; III ed.: Paris, FLdB, 1992; trad. ted.: Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, 1927.

Tale equazione deve essere invariante rispetto al gruppo di trasformazioni di Lorentz.

Ora, poiché la velocità della luce  $c$  e il quanto d'azione  $h$  costituiscono delle costanti, la (1) può rimanere valida solo a condizione che la massa  $m_0$  e la frequenza  $\nu_0$  si trasformino allo stesso modo al variare del sistema di riferimento.

È nota la legge di trasformazione relativistica per quanto concerne la massa di un mobile:

$$(2) \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad \text{dove } \beta = \frac{v}{c}$$

La stessa legge deve essere ammessa per la trasformazione della frequenza:

$$(3) \quad \nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Come si vede, tale frequenza aumenta relativisticamente quando è in movimento (appare, cioè, più elevata per un osservatore fermo).

La prima conseguenza che de Broglie trae da tali considerazioni è, quindi, che il fenomeno periodico associato al quanto di luce (e, nella sua ottica, a ogni altro mobile) deve essere un'onda avente, appunto, frequenza data dalla (3) e velocità di propagazione  $V = \frac{c}{\beta}$  nella direzione del mobile.

D'altra parte, però, de Broglie constata che tutti i tipi di energia sono riconducibili al movimento e che anche la particella deve avere una sua intrinseca vibrazione interna, assimilabile piuttosto a quella di un orologio, e soggetta, quindi, a dilatazione temporale. Infatti, per la relatività ristretta, la frequenza di un orologio che viaggia ad una certa velocità  $v$  sarà inferiore a quella di un orologio fermo ed obbedirà alla legge di trasformazione:

$$(4) \quad \nu_1 = \nu_0 \sqrt{1-\beta^2}$$

Queste due frequenze, quella associata (in moto con velocità  $V = \frac{c}{\beta}$ ) e quella interna (in moto con velocità  $v = c \cdot \beta$ ), sono visibilmente diverse e le loro differenti velocità stanno tra loro nella relazione  $Vv = c^2$ .

Il “ponte “ tra onda e corpuscolo viene creato, sin da questo stadio dei lavori di de Broglie, dalla *fase dell’onda*<sup>11</sup>, per cui è come se «un osservatore che fosse fermo e guardasse l’onda nel punto in cui si trova il mobile, constatasse un accordo di fase tra l’onda e la fase di un orologio che ha frequenza  $\nu_0$  nel sistema legato alla particella»<sup>12</sup>. Le due oscillazioni hanno in quel punto la stessa configurazione istantanea. La costanza di tale accordo è suggellata dal cosiddetto *teorema dell’armonia di fase*, secondo cui se inizialmente la vibrazione interna della particella in movimento è in fase con l’onda che la trasporta, allora questa armonia di fase si manterrà per sempre.

Ora, de Broglie tiene conto anche del fatto che tra  $\nu$ ,  $\lambda$  e  $V$  vale la seguente relazione:

$$(5) \quad V = \nu\lambda$$

Infatti, per ogni oscillazione intera c’è un’intera onda che passa, e la velocità  $V$  dell’onda esprime di quanto è avanzato il primo massimo dell’onda in quell’intervallo di tempo in cui si ha un’oscillazione completa. Ricavando  $\lambda$ , si ha:

$$(6) \quad \lambda = \frac{V}{\nu}$$

Se nella (6) si pongono  $\nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ ,  $\nu_0 = \frac{m_0c^2}{h}$ ,  $V = \frac{c}{\beta}$ , si ha:

$$(7) \quad \lambda = \frac{\frac{c}{\beta}}{\frac{\nu_0}{\sqrt{1-\beta^2}}} = \frac{c}{\beta} \cdot \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\nu_0} = \frac{c}{\beta} \cdot \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\frac{m_0c^2}{h}} = \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\frac{m_0\nu}{h}} = \frac{h}{\frac{m_0\nu}{\sqrt{1-\beta^2}}} = \frac{h}{p}$$

<sup>11</sup> La sola entità fisica conosciuta contenente una frequenza che si trasforma come un’energia è, infatti, la fase di un’onda piana.

<sup>12</sup> Kubli in AA.VV. (1973, 20).

Ancora una volta, de Broglie, mettendo in relazione grandezze periodiche e grandezze meccaniche, riesce a cogliere, come aveva fatto Einstein, aspetti prima impensabili del mondo fisico.

L'equivalenza tra fotoni e particelle massive è, quindi, la base fondamentale su cui egli edifica la meccanica ondulatoria. Infatti, già nel 1924, de Broglie era consapevole che la dinamica, anche dopo la formulazione della relatività, era rimasta indietro nei confronti dell'ottica fisica ed era grosso modo allo stadio dell'ottica geometrica, la quale nulla diceva sulla natura della luce e toccava i suoi limiti di validità al subentrare di interferenze e diffrazioni. D'altra parte, a de Broglie sembrava molto plausibile che, così come un'onda trasportava delle concentrazioni "granulari" di energia, anche la dinamica del punto materiale dovesse comportare la propagazione di un fenomeno ondulatorio: la nuova dinamica del punto materiale libero doveva stare alla vecchia dinamica come l'ottica ondulatoria sta all'ottica geometrica. È questo il fulcro della cosiddetta *analogia ottico-meccanica* di cui Schrödinger, nel 1926, darà la formulazione matematica, scrivendo la legge fondamentale di evoluzione temporale della meccanica ondulatoria.

## 2. La teoria della doppia soluzione

Nel 1927 de Broglie elabora la sua controproposta realista al paradigma ortodosso della meccanica quantistica. La teoria della doppia soluzione, infatti, per il solo fatto di essere stata concepita (indipendentemente, quindi, dalla sua effettiva affermazione) mette seriamente in difficoltà le interdizioni poste dai teorici di Copenaghen circa la possibilità di realizzare una meccanica ondulatoria causale e realistica<sup>13</sup>.

De Broglie arriva al fulcro della sua personale interpretazione partendo dalla principale evidenza sperimentale della fisica teorica contemporanea, cioè l'esperimento della doppia fenditura. In esso si vede che le particelle che arrivano su una lastra fotografica vi producono degli annerimenti puntuali; tuttavia, quando, dopo un tempo sufficientemente lungo, saranno stati emessi moltissimi corpuscoli, si potrà riscontrare che essi si sono ripartiti sulla placca così da delineare delle frange di interferenza (tipiche, queste ultime, di un comportamento ondulatorio).

Ora, se per qualcuno questo fenomeno costituisce il prototipo dei 'misteri' di una natura intrinsecamente paradossale<sup>14</sup>, per de Broglie esso funge piuttosto da punto di partenza per far luce su tutta una serie di questioni.

Intanto, esso è suscettibile di essere spiegato in modo ragionevole solo nell'ambito di una prospettiva realista sulla compresenza di onde e

---

<sup>13</sup> de Broglie (1956, 136).

<sup>14</sup> Feynman (1971, 163).



particelle: ogni elettrone (o fotone) arriva sul dispositivo sperimentale – ad es., su un interferometro – con la sua onda associata, che vi subisce dei fenomeni di interferenza, in accordo con le leggi della meccanica ondulatoria. Dopo un tempo abbastanza lungo, si vedrà che le moltissime particelle arrivate si sono distribuite in proporzione all'intensità dell'onda. In questo senso, l'intensità del fenomeno ondulatorio (il quadrato della sua ampiezza) rappresenta la probabilità che la particella impressioni la lastra fotografica in un dato punto, ossia la probabilità che essa subisca, in quel punto dello spazio, una localizzazione osservabile. Sulla placca ci saranno, allora, frange brillanti (ad alta intensità ondulatoria) e frange oscure (di intensità ondulatoria bassa o nulla), tracciate però dagli impatti discreti di tantissimi corpuscoli<sup>15</sup>. Sulla stessa placca sono presenti, quindi, sia l'aspetto corpuscolare sia quello ondulatorio: solo che il primo, dovuto ad effetti individuali, si manifesta in modo discontinuo, mentre il secondo, che dà una parvenza di continuità, è frutto di un effetto statistico. In altre parole, nel fenomeno statistico osservabile che emerge alla fine, l'onda  $\Psi$  dà l'idea di esprimere, in qualche modo, la realtà fisica, laddove invece essa non è altro che un campo di probabilità che regola, nell'arco di un certo intervallo di tempo, gli impatti discontinui di un insieme abbastanza grande di corpuscoli. Queste considerazioni, oltre a mettere in discussione una certa versione della complementarità<sup>16</sup>, entrano direttamente nel merito di un altro tra i tanti punti in cui la meccanica quantistica *standard* mostra tutto il suo gusto per il *chiaro-scuro*, ossia il problema del carattere ibrido<sup>17</sup> e dialettico dell'onda  $\Psi$  (così come essa è stata presa in considerazione da Schrödinger in poi). Essa, infatti, si trova a dover essere pensata, da un lato, come un ente matematico e soggettivo, in quanto è riconosciuta dai fisici teorici quale mera rappresentazione di probabilità e cambia in funzione delle informazioni di chi la manipola; dall'altro lato, però, è in qualche modo oggettiva in quanto sembra essere in grado di produrre fenomeni fisici, quali il propagarsi nello spazio, il riflettersi, il diffrangersi, l'interferire e, soprattutto, l'assegnare certe posizioni piuttosto che altre a corpuscoli materiali. Con la sua teoria del '27, de Broglie, tentando proprio di sciogliere questo nodo problematico, postula l'esistenza di *due* onde di natura differente: la prima è l'onda *u*, comportante una singolarità, che deve essere oggettiva e, in quanto tale, deve avere un'ampiezza sempre ben determinata, così da essere intimamente legata alla particella, determinarne il comportamento (e la posizione) e rispecchiare la vera realtà microfisica.

---

<sup>15</sup> de Broglie (1951, 63-5).

<sup>16</sup> Si sta alludendo alla complementarità intesa alla maniera di Jordan, che è anche quella che viene banalmente smentita dalle placche fotografiche dell'esperimento della doppia fenditura. La concezione di Bohr è forse un po' più sottile e insidiosa: aspetto corpuscolare e aspetto ondulatorio *si manifestano solo uno a spese dell'altro* (se si segue la traiettoria corpuscolare, si perde la figura d'interferenza, e viceversa).

<sup>17</sup> de Broglie (1959, 964).

La seconda è l'onda  $\Psi$  che essendo, invece, solo uno strumento matematico calcolabile in base all'onda reale e avendo un'ampiezza continua e poco concreta, è semplicemente una rappresentazione delle probabilità inerenti alla particella. La correttezza di tali informazioni statistiche è assicurata dalla *coincidenza di fase*, postulata da de Broglie, tra la  $u$  e la  $\Psi$ . Il "vantaggio" di concepire il corpuscolo così incorporato in un campo ondulatorio e solidale all'evoluzione di questo, consiste per de Broglie nella possibilità – ai suoi occhi, imprescindibile – di recuperare una localizzazione per le particelle, tenendo comunque conto dell'esistenza di fenomeni di diffrazione e interferenza, in grado di influire sulla traiettoria degli oggetti microscopici<sup>18</sup>. Sulla base di tali idee generali, de Broglie introdusse il cosiddetto 'postulato della doppia soluzione'<sup>19</sup>: « a ogni soluzione regolare  $\Psi = ae^{\frac{2\pi i}{h}\varphi}$  dell'equazione d'onde della meccanica quantistica deve corrispondere una soluzione a singolarità del tipo  $u = fe^{\frac{2\pi i}{h}\varphi}$ , avente la stessa fase  $\varphi$ , ma con un'ampiezza  $f$  comportante una singolarità puntuale, in generale mobile».

De Broglie ricava così la formula di guida, che stabilisce la velocità istantanea del corpuscolo nello spazio e che, nel caso in cui si possano ignorare le correzioni relativistiche e supporre nullo il campo elettromagnetico, assume la seguente semplice forma:

$$(8) \quad \vec{v} = -\frac{1}{m} \overrightarrow{\text{grad } \varphi}$$

deducibile dall'equazione di Schrödinger<sup>20</sup>.

Secondo questa legge di de Broglie, il corpuscolo – considerato come un piccolo orologio – si sposta restando sempre in fase con l'onda che lo trasporta: esso «va nella direzione in cui la fase cresce più velocemente, con una velocità proporzionale a questo incremento»<sup>21</sup>.

Oltre alle forze classiche, la particella è sottoposta ad una forza di tipo nuovo, uguale a  $-\text{grad}Q$ , dove  $Q$  è il *potenziale quantico*, che esprime l'effetto del fenomeno ondulatorio sulla particella e che, per il caso non relativistico, si scrive:

<sup>18</sup> Lochak (1992, 213).

<sup>19</sup> de Broglie (1963, 38).

<sup>20</sup> Se la propagazione dell'onda si effettua all'approssimazione dell'ottica geometrica, si potrà porre  $\varphi \approx S$ , dove  $S$  è la funzione di Jacobi, cosicché la formula di guida ricavata da de Broglie, ricadendo nel caso classico, sarà equivalente alla forma  $\vec{mv} = -\overrightarrow{\text{grad}S}$  della teoria di Hamilton-Jacobi.

<sup>21</sup> Lochak (1992, 127).

$$(9) \quad Q = -\frac{h^2}{8\pi^2 m} \left( \frac{\Delta f}{f} \right) = -\frac{h^2}{8\pi^2 m} \left( \frac{\Delta a}{a} \right)$$

(le quantità tra parentesi si riferiscono al punto in cui si trova la particella all'istante  $t$ ).

### 3. Il V Congresso Solvay

Tuttavia, il 1927 segnerà la storia della fisica non solo per l'elaborazione della teoria della doppia soluzione e per la prima ratifica sperimentale dell'ipotesi della diffrazione degli elettroni ad opera di Davisson e Germer. È alla fine di quest'anno, infatti, che si tiene a Bruxelles il V Congresso Solvay, atto di nascita secondo i più (e vero e proprio 'colpo di stato', secondo altri<sup>22</sup>) della meccanica quantistica enunciata secondo il paradigma di Copenaghen, destinato a diventare quello *standard*. Invitato a partecipare, de Broglie non ritiene opportuno presentare una teoria, quale quella della doppia soluzione, ancora per certi versi aperta e problematica, quindi espone una versione alquanto schematica di essa, la cosiddetta 'teoria dell'onda-pilota'. In essa, si assume a priori l'esistenza del corpuscolo e si sostiene che esso sia guidato, nel suo movimento con una velocità proporzionale al gradiente della fase, dall'onda  $\Psi$ . A Bruxelles, de Broglie viene duramente criticato, specie da W.Pauli. Il carattere meramente statistico di puro strumento matematico della  $\Psi$  era, in effetti, riconosciuto pressoché unanimemente dai fisici teorici e, di conseguenza, doveva risultare alquanto inaccettabile che la particella potesse essere guidata da una grandezza che non aveva significato fisico e che era suscettibile di modificarsi repentinamente in funzione delle conoscenze dello sperimentatore. De Broglie era cosciente di ciò, e la sua teoria della doppia soluzione costituiva anche una spiegazione della ragione per cui, almeno in apparenza, sembra che il corpuscolo sia guidato da un'onda di tipo  $\Psi$ . Per questo egli stesso ammise che la versione dell'onda-pilota, seppure derivante in un certo qual senso dalla doppia soluzione, rappresentava uno schema sicuramente 'impoverito' ed effettivamente non sostenibile di essa: «Se mai, un giorno, le mie concezioni del '27 resusciteranno dalle ceneri, ciò avverrà nei sottili termini della doppia soluzione e non di certo nella mutila e insostenibile formula dell'onda-pilota»<sup>23</sup>.

<sup>22</sup> Lochak (1992, 123).

<sup>23</sup> de Broglie (1953, 12).

Alla fine del congresso, tornando a Parigi, de Broglie decide di accantonare le sue idee originarie, e pare che motivazioni di varia natura abbiano influito su questa scelta.

In primo luogo, la teoria della doppia soluzione era difficile da giustificare matematicamente mentre quella dell'onda-pilota appariva improponibile.

Inoltre, la nuova generazione di fisici, portavoce di un'interpretazione puramente probabilistica, raccoglieva sempre più consensi e la 'minoranza realista' presente a Bruxelles non appoggiò più di tanto de Broglie: Schrödinger portava avanti una versione puramente ondulatoria della meccanica quantistica e non riconosceva come reale l'esistenza dei corpuscoli; Lorentz, che presiedeva la manifestazione, era ancora troppo ancorato all'idea classica e pura di particella; Einstein, seppure dissenti per tutta la vita dalla prospettiva probabilistica, fu alquanto 'tiepido' verso de Broglie, e si limitò ad offrirgli un generico incoraggiamento a perseverare nella direzione nella quale stava già lavorando.

Infine, ebbe un certo peso anche la cattedra di fisica che gli fu assegnata nel 1928 presso l'Istituto Poincaré. In un certo senso, de Broglie si sente obbligato a prendere una posizione, che deve anche essere la meno problematica e la più organica possibile, in quanto è quella che avrebbe dovuto insegnare agli studenti.

Così, per oltre vent'anni, de Broglie insegnerà e scriverà meccanica quantistica secondo l'impostazione di Copenaghen, anche se probabilmente si può sostenere che ne sposò più il *ricettario* che non *l'abito mentale*.

#### 4. Il ritorno all'eresia

Tra la fine degli anni '40 e i primi anni '50 de Broglie si muove nella direzione di un'emancipazione ideologica dal paradigma di Copenaghen, nonché verso un recupero delle sue concezioni giovanili sulla fisica quantistica. Da un lato, egli è consapevole che le difficoltà cui andava incontro la teoria dell'onda pilota dovevano valere *a fortiori* per un'interpretazione probabilistica della meccanica quantistica; dall'altro, alcune delle idee originarie di de Broglie vengono raggiunte in modo autonomo da D. Bohm, allora giovane fisico di Princeton, e accostate da J.P. Vigièr ad alcuni spunti teorici già lanciati da Einstein con la relatività generale.

De Broglie ritorna, quindi, all'idea che una più adeguata comprensione dei fenomeni microfisici potrebbe derivare da un parziale recupero di concezioni più classiche, in base a cui i corpuscoli possono essere pensati come singolarità di fenomeni estesi, suscettibili di localizzazioni e di spiegazioni causali. Oltre ad attribuire ai micro-oggetti un moto aleatorio (sulla cui effettiva opportunità si potrebbero avanzare non poche

perplessità), in questi anni, de Broglie precisa alcuni punti cruciali della teoria della doppia soluzione, soprattutto in merito alla reale struttura dell'onda  $u$  e al suo rapporto con l'onda  $\Psi$ .

Einstein aveva già sostenuto che ogni descrizione fisica dovesse basarsi su grandezze di campo, e che i corpuscoli fossero picchi altissimi, disomogeneità locali, intrinsecamente inerenti a campi che, qua e là, presentano delle increspature (*bunched fields*). Similmente, l'idea di corpuscolo come 'bernoccolo' o 'gobba' di un campo esteso sta alla base anche delle concezioni di de Broglie (*champs à bosse*). La guida di una regione singolare tramite un'onda continua implica che le equazioni del campo siano non lineari. E, poiché de Broglie non contesta ma intende piuttosto spiegare l'esattezza delle previsioni che la meccanica quantistica fornisce tramite l'equazione  $\Psi$ , egli ne conclude che la non linearità deve essere estremamente localizzata, deve cioè intervenire in modo non indifferente solo dove l'ampiezza dell'onda diventa molto grande, ossia in corrispondenza del corpuscolo. Al di fuori di tale regione singolare la non linearità diviene trascurabile e l'equazione di  $u$  si sovrappone a quella di  $\Psi$ . Questa coincidenza pressoché totale tra le due soluzioni, dovuta all'estrema localizzazione della non linearità, garantisce e spiega la correttezza delle previsioni che la  $\Psi$  consente di fare.

Affinché la  $\Psi$  possa rappresentare, seppure solo statisticamente, l'onda oggettiva, quest'ultima deve avere un'articolata struttura tale che:

$$(10) \quad u = u_0 + v$$

L'onda  $u$  obbedisce ad un'equazione non lineare nella regione singolare, e qui si deve poter trovare una soluzione  $u_0$  avente valori altissimi. Questi valori diventano molto deboli man mano che ci si allontana dalla regione corpuscolare cosicché, al di fuori di questa, nel dominio lineare, la soluzione reale  $u$  si riduce, approssimativamente, alla  $v$ , cioè all'equazione lineare usuale in meccanica quantistica. In realtà, come dirà de Broglie<sup>24</sup>, la scomposizione data dalla (10) è fittizia, c'è una sola funzione  $u$  reale e oggettiva. In tutta la regione esterna – e cioè quasi in tutta l'onda –  $u_0 \ll v$  è trascurabile e  $u \approx v$ .

La  $u_0$  e la  $v$  sono legate e solidali tra loro grazie alla non linearità, che le fa essere due componenti analitiche di un'unica soluzione e non due soluzioni diverse e indipendenti; la singolarità  $u_0$  si muove secondo una traiettoria che, usando un'immagine idrodinamica, coincide con una linea di corrente

---

<sup>24</sup> de Broglie (1960, 241).

dell'onda  $v$  e, se assimilata ad un piccolo orologio, si trova che sta in un costante accordo di fase con essa. Detto ciò, si hanno ormai tutti gli elementi per precisare il rapporto tra l'onda reale  $u$  e l'onda statistica  $\Psi$ , ossia il senso della controproposta realista avanzata da de Broglie. L'onda  $v$  (componente regolare di  $u$ , a carattere oggettivo) e l'onda  $\Psi$  (semplice rappresentazione soggettiva di probabilità) sono due soluzioni *sostanzialmente* differenti – seppure intimamente legate – dell'equazione d'onda lineare usuale. Questa distinzione, che dà il nome all'interpretazione debroglieana della meccanica quantistica, avrebbe, tra l'altro, il vantaggio di fare chiarezza sul carattere ibrido, al tempo stesso soggettivo e oggettivo, che la versione *standard* era costretta ad attribuire alla  $\Psi$ . Quest'ultima, infatti, essendo una rappresentazione di probabilità, viene costruita in funzione delle nostre informazioni sullo stato del corpuscolo e può essere posta come ovunque proporzionale all'onda  $v$ :

$$(11) \quad \Psi = Cv$$

dove  $C$  è una costante di normalizzazione.

Da un lato, infatti, si suppone che l'onda  $u$ , nonché la sua parte esterna  $v$ , siano realtà oggettive in grado di provocare fenomeni fisici e, in quanto tali, sempre ben determinate. Dall'altro lato, la  $\Psi$  è soggettiva nonché, di volta in volta, rinormalizzabile in un modo quasi del tutto arbitrario, vincolato solo dalla “convenienza” della scelta della  $C$ , che deve essere tale che  $\int_V |\Psi|^2 d\tau = 1$ , dove  $V$  è il volume occupato dall'onda che trasporta un solo corpuscolo e  $d\tau$  è la porzione di volume in cui la particella può manifestarsi secondo la probabilità espressa, in valore assoluto, dal modulo quadro di  $\Psi$ . Stando il rapporto tra la  $u$  e la  $\Psi$  come si è appena detto, si capisce perché la meccanica quantistica *standard* (che fa uso esclusivo dell'onda  $\Psi$ ) sia riuscita ad avere un notevole successo sperimentale.

La prospettiva di de Broglie, tuttavia, mette in luce che il potere predittivo della meccanica quantistica ortodossa non comporta affatto la sua capacità esplicativa. Le ‘onde di Copenaghen’ sono complicate costruzioni mentali, si evolvono in spazi non fisici e, a volte, si mascherano da corpuscoli: questi non hanno né una storia passata né uno spessore ontologico, ma in compenso pare abbiano una sorta di natura ‘mistica’, in base alla quale si manifestano con improvvise apparizioni (sulle quali è meglio non chiedersi troppo) e sembrano godere di un'ubiquità *sui generis* ma pur sempre prodigiosa, che li fa essere potenzialmente onnipresenti quando nessuno li vede.

Ebbene, nel pensiero di de Broglie trapela una forte tendenza a tenere distinte la vocazione esplicativa della fisica (che non viene mai messa in

discussione) dall'utilità e dall'esattezza dei suoi strumenti pratici. La meccanica quantistica è esatta come teoria probabilistica, ma per un realista come de Broglie è sicuramente mal interpretata, nel senso che essa travisa in modo fondamentale gli enunciati statistici che adopera. In una prospettiva alla de Broglie o alla Einstein, invece, si ritiene ragionevole che il corpuscolo sia sempre localizzato e si interpretano le leggi di probabilità in chiave epistemica: il carattere statistico delle leggi quantistiche sembra allora dovuto ad una complessità dei fenomeni fisici e non affatto ad una loro intrinseca e generalizzata irrazionalità. Il 'buon senso realista' riesce a spiegare senza misteri anche un altro punto problematico per la concezione *standard*, ossia la riduzione del pacchetto d'onda. Quando l'azione di un dispositivo sperimentale spezza l'onda associata in porzioni separate (con la rottura delle relazioni di fase) e il corpuscolo viene localizzato in una di queste regioni, questa informazione si traduce ponendo  $C = 0$  in tutte le altre porzioni in cui si sa che il corpuscolo non può più trovarsi, e rinormalizzando la rappresentazione di probabilità nel punto in cui, invece, si è trovata la particella. Così, la possibilità di assegnare un diverso (e anche nullo) valore al fattore  $C$  per le regioni in cui l'onda  $u$  si scompone, consente di interpretare il collasso del pacchetto d'onde in modo fisicamente adeguato, senza compromettere l'oggettività dei fenomeni in gioco.

### 5. De Broglie come Simplicio?

Le onde di materia di de Broglie, la cui rivoluzionaria portata teorica rimane fuori discussione, sono state ovviamente bersaglio di varie critiche. La teoria della doppia soluzione, soprattutto nelle rivisitazioni più recenti da parte del suo autore, attribuisce un ruolo determinante alla non linearità delle equazioni della meccanica quantistica: solo laddove i termini non lineari diventano non trascurabili il formalismo matematico può dirsi davvero in grado di rappresentare fisicamente i picchi di energia del fenomeno esteso, ossia l'elemento corpuscolare da esso trascinato. Alcune ricerche sperimentali condotte da Shimony<sup>25</sup> e altri si sono basate sull'idea che tali termini fossero dei 'pezzi' di hamiltoniana (cioè, della componenti energetiche) dipendenti dall'onda: dove l'onda diventava più grande, lì ci sarebbe dovuta essere anche più energia. Tuttavia, pare che non siano stati ancora riscontrati tali effetti sull'energia.

Obiezioni di altro tipo sono riassumibili in quella che Jauch<sup>26</sup> muove a de Broglie. Parlando di onda associata realmente esistente, quest'ultimo postulerebbe, alquanto *semplisticamente*<sup>27</sup>, l'esistenza di enti metafisici,

<sup>25</sup> Shimony (1979, 394).

<sup>26</sup> Jauch (1996, 32)

<sup>27</sup> *Ibidem.* de Broglie prende parte al dialogo nelle vesti dell'ingenuo Simplicio.

nel senso di non osservabili concretamente. Trattando la sua concezione duale della materia, infatti, egli aveva affermato che «la quasi totalità dell'energia dell'onda luminosa è concentrata nel fotone stesso (parte  $u_0$  dell'onda  $u$  della doppia soluzione), anche se una *frazione infinitesima* di questa energia rimane distribuita nell'onda  $v$  che lo circonda (parte esterna dell'onda  $u$ )»<sup>28</sup>. E ancora:

Sin dalla comparsa dei quanti di luce di Einstein, diventa certo che l'energia di un'onda elettromagnetica è veicolata dai fotoni; per questo si inizia a parlare di tale onda nei termini di 'onda fantasma' (*gespenst welle*). Nella teoria della doppia soluzione, l'onda  $v$  non è un'onda fantasma, ma è una realtà fisica; tuttavia, poiché essa ha un'energia *infinitamente debole* e può solo orientare piuttosto che spiegare certi fenomeni, essa finisce col dare l'impressione di essere un'onda fantasma<sup>29</sup>.

Ora, benché sia noto il fatto che de Broglie concepì il connubio tra discreto e continuo ben prima e indipendentemente da qualsiasi possibile riscontro sperimentale, ci sembra importante sottolineare come l'ontologia duale su cui poggia tutta la sua teoria costituisca un'ipotesi di grande ragionevolezza e plausibilità fisica.

Da un alto, è ormai certo che l'energia e la materia hanno delle componenti granulari e discrete: il più famoso tentativo di una teoria fisica contemporanea che fosse esclusivamente ondulatoria, quella delle "onde virtuali" di Bohr, Kramers e Slater, è stato definitivamente confutato (1925) dagli esperimenti di Compton-Simon e Bothe-Geiger. Similmente, anche le idee di Schrödinger che andavano in questa direzione si sono rivelate insostenibili alla luce delle evidenze empiriche. D'altra parte, il permanere delle frange d'interferenza anche in esperimenti fatti a bassissima intensità (con sorgenti che emettono un solo fotone per volta) costituisce un altro dato sperimentale (sancito nel 1958 da Janossy e Naray) imprescindibile, nonché un forte deterrente verso qualsiasi tentativo di parlare dei fenomeni fisici in termini puramente corpuscolari: assieme alla particella, che agisce come un blocco indivisibile e che segue sempre un cammino piuttosto che un altro, ci deve essere un qualcos'altro in grado di aggirare gli ostacoli e di essere diviso da un beamsplitter su cui viene fatto incidere.

Come si vede, l'idea di un'ontologia duale ha una sua forte ragion d'essere nella spiegazione dei dati empirici. E, da questo punto di vista, il paradigma di Copenaghen, dietro un formalismo altamente astratto e geniale, nasconde un volto interpretativo sicuramente meno soddisfacente:

La teoria ortodossa si limita a dire che l'onda è una semplice rappresentazione della probabilità che il corpuscolo sia presente in un certo punto, e che non è problematico che essa diventi infinitamente piccola al crescere della distanza dalla sorgente; questo, però, equivale solo a sorvolare

<sup>28</sup> de Broglie (1962, 428; cors. mio).

<sup>29</sup> de Broglie (1962, 436; cors. mio).



sulla difficoltà, poiché non si capisce come una probabilità infinitamente tenue possa guidare il fotone in un campo d'interferenze...<sup>30</sup>.

A differenza dell'approccio dualistico di Bohr, poi, de Broglie sostiene che l'oggetto quantistico sia, *al tempo stesso*, particella e onda. Quindi, sembra chiaro che l'onda associata di de Broglie risponde a tutta una serie di esigenze: in primo luogo, quelle concettuali di chiarezza e ragionevolezza; in secondo luogo, quelle legate alla giustificazione delle frange di interferenza registrate in certe condizioni sperimentali. Tuttavia, essa appare problematica da trattare empiricamente in modo diretto (cioè, al di là del ricorso agli effetti statistici sulle particelle) nella misura in cui viene concepita come priva (del tutto o quasi) di quelle caratteristiche classicamente inerenti a qualsiasi oggetto fisico: l'energia e la capacità di esercitare una pressione sugli altri oggetti con cui entra in interazione. De Broglie, infatti, ribadisce spesso che il corpuscolo trascinato dall'onda costituisce anche il suo picco di concentrazione energetica; tuttavia, egli non arriva mai a privare del tutto di energia il fenomeno esteso. Sulla base di quest'ultima sua convinzione, anzi, avanza una proposta sperimentale ( il metodo di apodizzazione<sup>31</sup>) volta a rivelare in modo diretto l'esistenza di quest'onda reale ma debolissima. In questo caso, la possibilità di rivelare in modo diretto l'onda associata sarebbe dovuta dipendere unicamente dal grado di precisione (in linea di principio, sempre perfettibile) dell'apparecchiatura sperimentale. Le principali indagini empiriche a noi note<sup>32</sup> basate sull'assorbimento dell'onda associata, tuttavia, mostrano che l'energia presumibilmente inerente all'onda è pur sempre inferiore a  $10^{-14}$ , quindi non risulta registrabile nessun apprezzabile scambio energetico tra essa e l'apparato di misura. Tali constatazioni empiriche sembrano, quindi, lasciare poco spazio all'idea che sia una difficoltà solo pratica a impedire la rivelazione dell'onda debolissima postulata da de Broglie.

Nel 1969 F. Selleri<sup>33</sup> avanza un'altra ipotesi circa la realtà empirica dell'onda associata. Essa sarebbe un'onda quantistica *vuota*, ossia del tutto priva di energia e impulso e, purtuttavia, reale e oggettiva, in quanto capace di modificare in maniera empiricamente rilevante sia la probabilità di emissione di un fotone da parte di un amplificatore laser, sia la probabilità che il fotone abbia una certa posizione in esperimenti del tipo doppia (e tripla) fenditura. Tale ipotesi comporta per certi versi l'idea di un'asimmetria ontologica<sup>34</sup> tra onda e corpuscolo, e ha dato luogo, specie negli anni Ottanta e Novanta, a una vasta letteratura sperimentale. Tuttavia, questa è già un'altra storia. La storia di un'ipotesi teorica che, pur affondando le proprie radici nel realismo della doppia soluzione, non è più

---

<sup>30</sup> de Broglie (1962, 425).

<sup>31</sup> de Broglie (1976a, 120).

<sup>32</sup> Cfr. *supra*, nota 25

<sup>33</sup> Selleri (1969, 908).

<sup>34</sup> E. Agazzi, in Tarozzi e van der Merwe A. (1988, 73).

la teoria di de Broglie, e merita una considerazione più ampia di quanto non si possa fare in questa sede.

## 6. Conclusione

Nell'aprile del 1974, de Broglie inaugura i seminari della *Fondation Louis de Broglie* esponendo il suo modo di concepire la fisica teorica:

La fisica è una scienza portante verso certi fenomeni osservabili in natura. Essa riposa essenzialmente sull'osservazione e sull'esperienza, e il suo ruolo consiste nel rendere conto della vera natura dei fenomeni osservati. Insistere su una questione così evidente potrebbe sembrare strano, tuttavia pare che certi fisici teorici di oggi abbiano un po' dimenticato questo punto. Credo, pertanto, che nello studio di certi fenomeni fisici sia necessario prendere come punto di partenza un'immagine concreta di questi fenomeni. È questo quello cui alludeva Planck quando affermava che tutte le teorie fisiche dovessero fare riferimento ad una qualche 'immagine del mondo' (*Weltbild*)<sup>35</sup>.

Questa ricerca di immagini chiare e ragionevoli, metodologicamente precedenti rispetto al formalismo matematico, rimane il tratto distintivo delle concezioni dei fisici realisti rispetto ai teorici ortodossi. Questi ultimi si ispirano più o meno tacitamente all'epistemologia senz'altro meno consona all'impresa scientifica, quella di stampo positivistico-machiano, che identifica la scienza con una fonte di profezie, un ricettario in grado di dosare adeguatamente espedienti matematici collaudati e osservazioni passate. Tutto ciò che ha a che fare con immagini intuitive peccherebbe ovviamente di metafisica.

Parlando della complementarità di Bohr, il realista Schrödinger attribuisce il *tumulto iconoclastico* che da essa deriva unicamente all'incapacità del paradigma di Copenaghen di mettere assieme in modo non ambiguo l'immagine corpuscolare e quella ondulatoria, e a tal proposito puntualizza che

[...] una volta, settanta o più anni fa, quando si verificava tale fatto, si concludeva che la teoria non era ancora finita [...]. Si è inventata ora la parola 'complementarità', e ciò mi sembra voler giustificare questo uso di due concetti differenti, come se non fosse necessario trovare finalmente un concetto unico, un'immagine completa che si possa comprendere<sup>36</sup>.

Anche de Broglie, nella teoria della doppia soluzione, fa uso di coppie di concetti, senza tuttavia scivolare mai nell'irrazionalismo o nella "compiacente concezione per cui l'ambiguità e il soggettivismo della fisica

---

<sup>35</sup> de Broglie (1978, 4).

<sup>36</sup> Schrödinger (1963, 134 s.).

teorica contemporanea derivano direttamente dai fatti sperimentali”<sup>37</sup>. La parte  $u_0$  e la parte  $v$  dell’onda  $u$ , da un lato, l’onda  $v$  e l’onda  $\Psi$  dall’altro, non costituiscono affatto delle dicotomie, ma sono, in un caso, componenti analitiche di un’unica immagine coerente, nell’altro, concetti esplicitati in modo ragionevole e messi in relazione in modo non ambiguo. In questo stile, de Broglie ha probabilmente i suoi precursori nella tradizione razionalista francese (Cartesio), laddove invece è la cultura delle lacerazioni insolite e insolubili (l’esistenzialismo danese alla Kierkegaard o alla Höffding) che, qua e là, fa capolino dietro il gusto per il paradosso e per l’irrazionalità tipico del paradigma di Copenaghen.

---

<sup>37</sup> Bell in AA. VV. (1988, 27).

*Bibliografia*

AA. VV., 1973, *Louis de Broglie, sa conception du monde physique*, Paris, Gauthier Villars

AA. VV., 1988, *Louis de Broglie que nous avons connu*, Paris, Bibliothèque AFLdB

Bell J. S., 1987, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press

Carnap R., 1967, *The logical structure of the world: pseudoproblems in philosophy*, Berkeley, University of California Press

de Broglie L., 1951, *Onde, corpuscoli e meccanica ondulatoria*, trad. it. di G. Crescenzi, Milano, Bompiani (ed. orig. francese 1945)

de Broglie L., 1953, *La physique quantique restera-t-elle indéterministe?*, Paris, Gauthier Villars

de Broglie L., 1956, *Perspectives nouvelles en microphysique*, Paris, Albin Michel

de Broglie L., 1959, «L'interprétation de la mécanique ondulatorie», in *Journal de Physique et le Radium*, vol. 20, pp. 963-979

de Broglie L., 1960, *Non linear wave mechanics: a causal interpretation*, Amsterdam, Elsevier (ed. orig. francese 1956)

de Broglie L., 1962, «Remarques sur l'interprétation de la dualité des ondes et des corpuscules», in *Cahiers de Physique*, n. 147

de Broglie L., 1963, *Étude critique des bases de l'interprétation actuelle de la mécanique ondulatorie*, Paris, Gauthier Villars

de Broglie L., 1976, *Recherches d'un demi-siècle*, Paris, Albin Michel

de Broglie L., 1976a, *13 remarques sur divers sujets de la physique théorique*, Paris, AFLdB

de Broglie L., 1978, *Jalons pour une nouvelle microphysique*, Paris, Gauthier Villars

Einstein A., 1965, *Pensieri degli anni difficili*, trad. it. di L. Bianchi, Torino, Bollati Boringhieri (ed. orig. inglese 1950)

Einstein A., Infeld L., 1960, *L'evoluzione della fisica*, trad. it. di A. Graziadei, Torino, Paolo Boringhieri (ed. orig. inglese 1938)

Feynman R., 1971, *La legge fisica*, trad. it. di L. Radicati di Brozolo, Torino, Bollati Boringhieri (ediz. orig. inglese 1965)  
Giuliani G., 1995, *Ancora sul realismo*, Pavia, La goliardica pavese

Jauch J. M., 1996, *Sulla realtà dei quanti*, trad. it. di G. Longo, Milano, Adelphi (ediz. orig. inglese 1973)

Lochak G., 1992, *Louis de Broglie, un prince de la science*, Paris, Flammarion

Popper K.R., 1994, *Poscritto alla Logica della scoperta scientifica I. Il realismo e lo scopo della scienza*, trad. it. di M. Benzi e S. Mancini, Milano, Il Saggiatore (ediz. orig. inglese 1956)

Schrödinger E., 1963, *L'immagine del mondo*, trad. it. di A. Verson, Torino, Boringhieri

Selleri F., 1969. Lettera a *Nuovo Cimento*, n. 1, p. 908

Shimony A., 1979, in *Physical Review*, XX, p. 394

Tarozzi G. e van der Merwe A., 1988, *The nature of quantum paradoxes*, Dordrecht, Kluwer