



### paperbacks

Una collana di volumi che con prezzo economico, ma in una veste puntigliosamente curata nel testo e nel corredo documentario, propone autori classici e moderni, quali recuperi focali della varia radice motivazionale delle nostre scelte in quanto uomini di oggi, vale a dire uomini-problema.

### paperbacks saggi

Materiale vivente dalle scienze pure ed applicate, testi chiave dalla Psicologia alla Politica, per una migliore registrazione intenzionale degli strumenti più acuti del conoscere che nell'uomo, come uomo, si contondono già con l'azione, si identificano con la responsabilità dell'azione.

## Albert Einstein LA TEORIA DEI QUANTI DI LUCE

All'inizio del nostro secolo, e all'interno dell'ampio processo di revisione delle scienze fisiche e naturali che animava la cultura europea, Max Planck si era proposto il compito di scoprire la legge della distribuzione spettrale di energia della radiazione di corpo nero: dalle sue ricerche avrebbe preso corpo, attraverso un serrato confronto tra le diverse scuole, la moderna **teoria dei quanti**.  
Intervenendo nel dibattito, il giovanissimo Albert Einstein — aveva allora, nel 1905, appena ventisei anni — tentò di dimostrare come «... una radiazione monocromatica di densità ridotta... si comporta per quanto riguarda la termodinamica, come se fosse composta da quanti di energia indipendenti l'uno dall'altro». In altre parole, nel caso limite di basse temperature e piccole lunghezze d'onda, la teoria ondulatoria della luce, tradizionalmente accettata e riconosciuta dai fisici, sembrava sostituita di fondamento, e si faceva strada l'ipotesi che la radiazione viaggi «a pacchetti». L'introduzione del concetto di **fotoni, o quanti di luce**, suscitò molte perplessità, e ancora nel 1913 Max Planck riteneva che Einstein «si fosse spinto troppo in là» nella formulazione della sua ipotesi. Tuttavia, lo sviluppo successivo del pensiero di Einstein — e segnatamente della teoria della relatività, ristretta e generale — trasse il suo punto di partenza proprio dagli studi giovanili sulla radiazione luminosa: così che questi ultimi si possono qualificare come i primi, audaci passi di quella che è stata un'autentica rivoluzione nella storia delle idee.

I PRESUPPOSTI DELLA TEORIA DELLA RELATIVITÀ NEL  
PENSIERO DEL GIOVANE EINSTEIN. UN'INTUZIONE STORICA  
LIMPIDA E PENETRANTE CONSEGNATA AL LETTORE IN  
FORMA CHIARA ED ESSENZIALE.

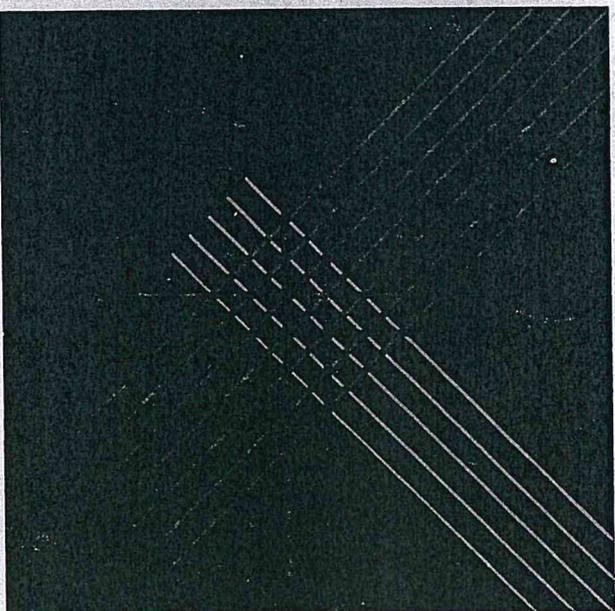
Lire mille  
(943)

EINSTEIN

la teoria  
dei quanti di luce

# la teoria dei quanti di luce

Introduzione e cura di Armin Hermann



669

paperbacks saggi/69  
NEWTON COMPTON EDITORI

l'ambito di un lungo ragionamento; Einstein, invece, mostrò come la legge quantistica spieghi direttamente molti fenomeni fisici: « Adesso mi sembra che le osservazioni compiutesi sulla radiazione di corpo nero, la fotoluminescenza, l'emissione di raggi catodici tramite luce ultravioletta ed altri tipi di fenomeni relativi all'emissione o alla trasformazione della luce risultino molto più comprensibili se vengono considerati in base all'ipotesi che l'energia della luce sia distribuita nello spazio in modo discontinuo ».

Einstein portò come esempi la regola di Stokes sulla fotoluminescenza, l'effetto fotoelettrico nei metalli, la ionizzazione tramite luce ultravioletta (effetto fotoelettrico sulla molecola) ed il rapporto fra l'effetto Hall e l'effetto Volta.

Per quel che riguarda l'effetto fotoelettrico, Einstein derivò una formula assai semplice, per cui la velocità massima degli elettroni liberati  $v$  dipende soltanto dalla frequenza  $\nu$  della luce con cui viene irradiata la lastra metallica

$$\frac{m v^2}{2} = h \cdot \nu - P$$

Si osserva, in particolare, che l'intensità della luce non influisce sulla velocità (massima) degli elettroni, come invece sarebbe da aspettarsi partendo dalla teoria classica.

In: « Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft », vol. 15, 1913, pagg. 1123-1129 e 1215-1218.

G. Krutikov, *Aus der Annahme unabhängiger Lichtquanten folgt die Wensche Strahlungsformel* (La formula di radiazione di Wien è derivata dall'ipotesi di « quanti di luce » indipendenti). In: « Physikalisches Zeitschrift », 1914, pagg. 133-136.

Si veda anche: Edmund Whittaker, *A History of the theories of Aether and Electricity* (Storia delle teorie sull'etere e l'elettricità), vol. 2, Londra 1953, pag. 89.

L'effetto fotoelettrico fu anche studiato sperimentalmente (18); poiché le difficoltà d'ordine tecnico erano tante, la validità della relazione di Einstein trovò assoluta conferma (19) in epoca così tardiva, che il fatto influi poco sulle discussioni riguardanti la teoria quantistica.

Nel 1907 un nuovo impulso fu dato da Einstein; offrì una spiegazione quantistica al fenomeno dell'annullarsi del calore specifico vicino allo zero assoluto. Anche questo studio di Einstein (20) rivestì grande importanza sullo sviluppo ulteriore della ricerca.

Il ricondurre la teoria a fenomeni fisici semplici costituisce un vero tratto caratteristico di Einstein, o, più precisamente, del giovane Einstein. Fondò la sua

(18) Wilhelm Hallwachs, *Ueber den Einfluss des Lichtes auf elektrostatisch geladene Körper* (L'influenza della luce sui corpi carichi elettrostaticamente). In: « Annalen der Physik », vol. 33, 1888, pagg. 301-312.

Wilhelm Hallwachs, *Ueber den Zusammenhang des Elektrizitätsverlustes durch Beleuchtung mit der Lichtabsorption* (Il rapporto fra assorbimento di luce e perdita di elettricità tramite illuminazione). In: « Annalen der Physik », vol. 37, 1889, pagg. 666-675.

Philipp Lenard, *Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht* (Emissione di raggi catodici tramite luce ultravioletta). In: « Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften Wien », vol. 108, 1899, pagg. 1649-1666, ed in: « Annalen der Physik », vol. 2, 1900, pagg. 359-375.

(19) Owen W. Richardson e Charles T. Compton, *The photoelectric effect* (L'effetto fotoelettrico). In: « Philosophical Magazine », vol. 24, 1912, pagg. 575-594.

Arthur Llewelyn Hughes, *On the emission velocities of photoelectrons* (Le velocità di emissione dei « foto-elettroni »). In: « Philosophical Transactions of the Royal Society of London », 1913, vol. 212, pagg. 205-226.

Robert Andrews Millikan, *A direct photoelectric determination of Planck's "h"* (Determinazione fotoelettrica diretta della « h » di Planck). In: « Physical Review », vol. 7, 1916, pagg. 355-388.

(20) Albert Einstein, *Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme* (La teoria di Planck sulla radiazione e la teoria del calore specifico). In: « Annalen der Physik », vol. 22, 1907, pagg. 180-190.

fino a raggiungere un culmine nel 1913 con la teoria atomica di Bohr.

### *L'ipotesi dei fotoni di Einstein*

Come sottolineato dal titolo stesso, l'ipotesi dei fotoni contenuta nel lavoro di Einstein (14) sembra idonea per descrivere il processo di « emissione e trasformazione » della luce. Dal punto di vista teorico la conclusione essenziale sta nella constatazione che: « una radiazione monocromatica di densità ridotta (nei limiti di validità della formula di Wien sulla radiazione) si comporta, per quanto riguarda la termodinamica, come se fosse composta da quanti di energia indipendenti l'uno dall'altro di grandezza  $R \beta \nu / N [ = h \cdot \nu ]$  ».

Con questa formula Einstein ha espresso chiaramente la constatazione che, nel caso-limite di bassa temperatura e piccole lunghezze d'onda (sempre nel caso di validità della legge di Wien), non vale più la teoria convenzionale della propagazione ondulatoria della luce, bensì il concetto di « quanti di luce » indipendenti. Max Born ha sottolineato che il lavoro di Einstein, pubblicato nel 1905, contiene già implicitamente il principio di dualità onda-corpuscolo. (15)

L'ipotesi dei fotoni fu vista dai colleghi di Einstein come il tentativo più radicale fin lì fatto per cercare di dedurre le leggi della radiazione di corpo nero; perciò, fu accolta con molto scetticismo. Lo stesso Max Planck

(14) Albert Einstein, *op. cit.*

(15) Per lo studio dei lavori di Einstein pubblicati in questo volume, ci si può utilmente riferire al testo di Max Born: *Albert Einstein und das Lichtquantum* (Albert Einstein e il « quanto di luce »), pubblicato in: « Die Naturwissenschaften », vol. 42, 1955, pagg. 425-431, ed in: Max Born, « Physik im Wandel meiner Zeit » (La fisica nella mia epoca). Braunschweig, 1957, pagg. 217-231.

riconobbe dapprima soltanto che l'interazione radiazione-materia veniva regolata dalla legge quantistica: in seguito poi tese ad indebolire sempre più anche questa ipotesi. (16) In ogni caso nel 1913 Planck negava ancora l'ipotesi dei fotoni. In occasione della proposta d'ammissione di Einstein alla Preussischen Akademie der Wissenschaften, istituzione che riuniva l'élite scientifica della Germania, Planck espresse un unico dubbio nei suoi riguardi, cioè « che le sue speculazioni l'avevano spinto troppo in là talvolta, ad esempio per quanto riguarda la sua ipotesi dei fotoni; tuttavia, non si doveva dare troppa importanza a questo fatto. Infatti, le scienze esatte progredirebbero ben poco, se nessuno osasse correre rischi ».

Ancora più importante delle speculazioni di Einstein (17) furono le applicazioni dell'ipotesi quantistica nel campo dei fenomeni fisici semplici. Planck introdusse l'ipotesi quantistica in un unico punto nel-

(16) Si confronti la relazione fatta da Planck in occasione del Primo Congresso Solvay tenutosi a Bruxelles: Max Planck, *Die Gesetze der Wärmestrahlung und die Hypothese der elementaren Wirkungsquanten* (Le leggi della radiazione termica e l'ipotesi dei quanti elementari). Relazione in lingua tedesca, in: *Die Theorie der Strahlung und der Quanten* (La teoria della radiazione e i quanti), Halle, 1913, pagg. 77-94, ed in: *Physikalischen Abhandlungen und Vorträge* (Memorie e Relazioni di Fisica), vol. 2, pagg. 269-286.

(17) La ricerca teorica sull'ipotesi dei fotoni fu proseguita da molti altri. Cfr. Paul Ehrenfest, *Welche Züge der Lichtquanten-hypothese spielen in der Theorie der Wärmestrahlung eine wesentliche Rolle?* (Quali elementi dell'ipotesi dei fotoni hanno una parte essenziale nella teoria della radiazione termica?). In: « Annalen der Physik », vol. 36, 1911, pagg. 91-118.

Abraham Fedorovic Joffé, *Zur Theorie der Strahlungsgescheinungen* (Considerazioni sulla teoria dei fenomeni di radiazione). In: « Annalen der Physik », vol. 36, 1911, pagg. 534-552.

Ladislav Natanson, *Ueber die statistische Theorie der Strahlung* (Teoria statistica della radiazione). In: « Physikalische Zeitschrift », 1911, pagg. 659-666.  
Mieczyslaw Wolfke, *Zur Quantentheorie* (La teoria quantistica).

Gun = Mitragliatrice  
 Movable detector = Rivelatore mobile  
 Wall = Parete  
 Backstop = Tabellone

Fig. 1-1. Esperimento di interferenza con proiettili.

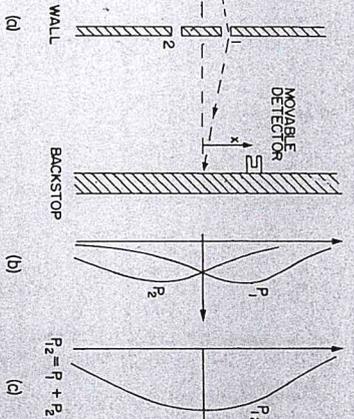


Fig. 1-1. Interference experiment with bullets.

misure, la probabilità che cerchiamo è semplicemente proporzionale al numero di proiettili che arrivano al rivelatore in un certo intervallo di tempo prefissato.

Per quel che ora ci interessa possiamo immaginare un'esperienza leggermente più idealizzata, in cui i proiettili non siano delle pallottole reali, ma siano *indistruttibili* — che non possano cioè spezzarsi in due. Nel nostro esperimento verifichiamo che ogni pallottole che arriva è un blocco indivisibile, e che quando c'è qualcosa nel rivelatore, si tratta sempre di una pallottole intera. Se il ritmo con cui spara la mitragliatrice viene molto diminuito, troviamo che ad ogni dato istante al tabellone o non arriva nulla, oppure vi arriva una pallottole, una soltanto ed esattamente una. Inoltre le dimensioni dei blocchi non dipendono certamente dal ritmo con cui la mitragliatrice spara. Diciamo quindi: "I proiettili arrivano *sempre* a blocchi identici e distinti." Ciò che misuriamo con il nostro rivelatore è la probabilità di arrivo di uno di tali blocchi. E questa probabilità la misuriamo in funzione di  $x$ . Il risultato di queste misure con il nostro apparecchio (l'esperimento non l'abbiamo ancora fatto, cosicché noi stiamo in realtà immaginandoci il risultato) è riportato in grafico nella parte (c) della Fig. 1-1. Nel grafico la probabilità viene riportata alla destra di  $x$ , verticalmente, cosicché l'asse  $x$  è in corrispondenza con la sezione dell'apparecchio. Indichiamo la probabilità con  $P_{12}$  perché i proiettili possono provenire sia dal foro 1 che dal foro 2. Non c'è da meravigliarsi che  $P_{12}$  sia grande vicino al centro del grafico, ma che diventi piccola quando  $x$  è molto grande. Può tuttavia sorprendere che  $P_{12}$  abbia il suo valor massimo in  $x = 0$ . Possiamo capire questo fatto riproducendo il nostro esperimento dopo aver chiuso il foro 2, ed un'altra volta ancora chiudendo invece il foro 1. Quando il foro 2 è tappato i proiettili possono passare solo attraverso il foro 1, e si ottiene la curva segnata con  $P_1$  nella parte (b) della figura. Com'era prevedibile il massimo di  $P_1$  si ha per quel valore di  $x$  che giace sulla retta congiungente la mitragliatrice ed il foro 1. Quando è il foro 1 ad essere chiuso, otteniamo la curva  $P_2$ , simmetrica alla precedente, disegnata in figura.  $P_2$  è la distribuzione di probabilità per i proiettili che passano attraverso il foro 2. Dal confronto delle parti (b) e (c), si deduce l'importante risultato. Le probabilità vanno semplicemente sommate. L'effetto con entrambi i fori aperti è la somma degli effetti che si hanno quando è aperto ciascuno dei fori da solo. Indicheremo questo risultato dicendo che "*non si osserva interferenza*," per ragioni che appariranno chiare in seguito. E ciò basti per i proiettili. Arrivano interi e la loro probabilità di arrivo non presenta interferenza.

measurements, the probability we want is just proportional to the number that reach the detector in some standard time interval.

For our present purposes we would like to imagine a somewhat idealized experiment in which the bullets are not real bullets, but are *indestructible* bullets—they cannot break in half. In our experiment we find that bullets always arrive in lumps, and when we find something in the detector, it is always one whole bullet. If the rate at which the machine gun fires is made very low, we find that at any given moment either nothing arrives, or one and only one—exactly one—bullet arrives at the backstop. Also, the size of the lump certainly does not depend on the rate of firing of the gun. We shall say: "Bullets *always* arrive in identical lumps." What we measure with our detector is the probability of arrival of a lump. And we measure the probability as a function of  $x$ . The result of such measurements with this apparatus (we have not yet done the experiment, so we are really imagining the result) are plotted in the graph drawn in part (c) of Fig. 1-1. In the graph we plot the probability to the right and  $x$  vertically, so that the  $x$ -scale fits the diagram of the apparatus. We call the probability  $P_{12}$  because the bullets may have come either through hole 1 or through hole 2. You will not be surprised that  $P_{12}$  is large near the middle of the graph but gets small if  $x$  is very large. You may wonder, however, why  $P_{12}$  has its maximum value at  $x = 0$ . We can understand this fact if we do our experiment again after covering up hole 2, and once more while covering up hole 1. When hole 2 is covered, bullets can pass only through hole 1, and we get the curve marked  $P_1$  in part (b) of the figure. As you would expect, the maximum of  $P_1$  occurs at the value of  $x$  which is on a straight line with the gun and hole 1. When hole 1 is closed, we get the symmetric curve  $P_2$  drawn in the figure.  $P_2$  is the probability distribution for bullets that pass through hole 2. Comparing parts (b) and (c) of Fig. 1-1, we find the important result that

$$P_{12} = P_1 + P_2. \quad (1.1)$$

The probabilities just add together. The effect with both holes open is the sum of the effects with each hole open alone. We shall call this result an observation of "*no interference*," for a reason that you will see later. So much for bullets. They come in lumps, and their probability of arrival shows no interference.

### 1-3 Un esperimento con onde

Ora vogliamo considerare un esperimento con onde prodotte nell'acqua. L'apparecchio è mostrato schematicamente in Fig. 1-2. C'è un contenitore d'acqua, poco profondo. Un piccolo oggetto, indicato come "sorgente di onde" vien fatto muovere su e giù da un motore e produce onde circolari. Alla destra della sorgente abbiamo ancora una parete con due fori, e dietro c'è una seconda parete che, per semplificare le cose, si considera un perfetto "assorbitore," di modo che non si produce la riflessione delle onde che vi incidono. Si può ottenere questo risultato costruendo una "spiaggia" di sabbia in leggero declivio. Davanti alla spiaggia mettiamo un rivelatore che può essere spostato avanti e indietro in direzione  $x$ , come prima. In questo caso il rivelatore è un congegno che misura l'"intensità" del moto ondoso. Si può pensare ad un apparecchio che misuri l'altezza del moto ondoso, con una scala calibrata con i *quadrati* dell'altezza effettiva, cosicché la lettura risulti proporzionale all'intensità dell'onda. Il nostro rivelatore registra quindi un qualcosa proporzionale all'*energia* portata dall'onda o piuttosto all'energia che giunge al rivelatore per unità di tempo.

Wave source = Sorgente di onde  
 Detector = Rivelatore  
 Wall = Parete  
 Absorber = Assorbitore

Fig. 1-2. Esperimento di interferenza con onde nell'acqua.

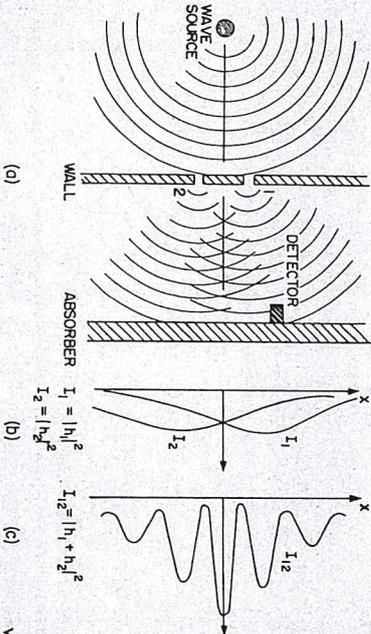


Fig. 1-2. Interference experiment with water waves.

Quel che si può notare per prima cosa con il nostro apparecchio per le onde, è che l'intensità può avere *qualsiasi* valore. Se la sorgente si muove molto poco, c'è appena un leggero moto ondoso al rivelatore; quando aumenta il moto della sorgente, viene rivelata una maggiore intensità di onde. L'intensità dell'onda può assumere qualsiasi valore. *Non* si può certo dire che l'intensità dell'onda abbia una struttura in qualche modo "a blocchi."

Misuriamo ora l'intensità dell'onda per vari valori di  $x$  (mantenendo costante il moto della sorgente delle onde). Otteniamo allora la curva di aspetto assai interessante segnata con  $I_2$  nella parte (c) della figura.

Noi abbiamo già stabilito come abbiamo origine simili curve studiando l'interferenza di onde elettriche nel Volume I. In questo caso osserviamo che l'onda originale viene diffratta attraverso i fori, e che nuove onde circolari si diffondono da ciascun foro. Se chiudiamo un foro alla volta e misuriamo la distribuzione d'intensità sull'assorbitore troviamo le curve d'intensità, piuttosto semplici, che sono riportate nella parte (b) della figura.  $I_1$  è l'intensità dell'onda proveniente dal foro 1 (intensità che determiniamo effettuando le misure quando il foro 2 è tappato) e  $I_2$  è l'intensità proveniente dal foro 2 (quando il foro 1 è chiuso).

### 1-3 An experiment with waves

Now we wish to consider an experiment with water waves. The apparatus is shown diagrammatically in Fig. 1-2. We have a shallow trough of water. A small object labeled the "wave source" is jiggled up and down by a motor and makes circular waves. To the right of the source we have again a wall with two holes, and beyond that is a second wall, which, to keep things simple, is an "absorber," so that there is no reflection of the waves that arrive there. This can be done by building a gradual sand "beach." In front of the beach we place a detector which can be moved back and forth in the  $x$ -direction, as before. The detector is now a device which measures the "intensity" of the wave motion. You can imagine a gadget which measures the height of the wave motion, but whose scale is calibrated in proportion to the *square* of the actual height, so that the reading is proportional to the intensity of the wave. Our detector reads, then, in proportion to the *energy* being carried by the wave—or rather, the rate at which energy is carried to the detector.

With our wave apparatus, the first thing to notice is that the intensity can have *any* size. If the source just moves a very small amount, then there is just a little bit of wave motion at the detector. When there is more motion at the source, there is more intensity at the detector. The intensity of the wave can have any value at all. We would *not* say that there was any "lumpiness" in the wave intensity.

Now let us measure the wave intensity for various values of  $x$  (keeping the wave source operating always in the same way). We get the interesting-looking curve marked  $I_{12}$  in part (c) of the figure.

We have already worked out how such patterns can come about when we studied the interference of electric waves in Volume I. In this case we would observe that the original wave is diffracted at the holes, and new circular waves spread out from each hole. If we cover one hole at a time and measure the intensity distribution at the absorber we find the rather simple intensity curves shown in part (b) of the figure.  $I_1$  is the intensity of the wave from hole 1 (which we find by measuring when hole 2 is blocked off) and  $I_2$  is the intensity of the wave from hole 2 (seen when hole 1 is blocked).

Electron gun = Cannoncino elettronico  
 Wall = Parete  
 Detector = Rivelatore  
 Backstop = Tabellone

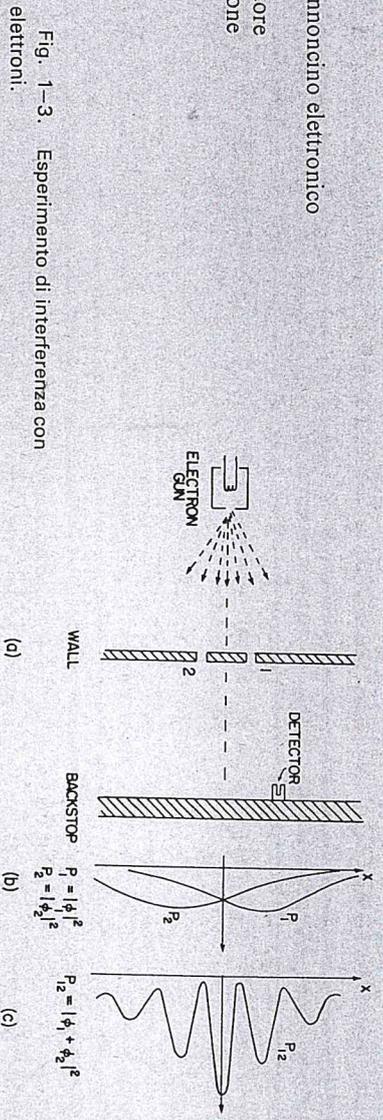


Fig. 1-3. Esperimento di interferenza con elettroni.

Fig. 1-3. Interference experiment with electrons.

Tutti gli elettroni che escono dal cannone avranno (all'incirca) la stessa energia. Di fronte al cannone vi è di nuovo una parete (per esempio una sottile placca metallica) in cui sono praticati due fori. Dietro la parete vi è un'altra placca che ha la funzione di arrestare gli elettroni. Davanti a quest'ultima collochiamo un rivelatore mobile. Quest'ultimo potrebbe essere un contatore geiger o, forse meglio, un moltiplicatore di elettroni connesso con un altoparlante.

Vi avvertiamo subito di non cercare di montare questo esperimento (come invece avreste potuto fare con i due che abbiamo già descritti). Questo esperimento non è mai stato fatto in questo modo. Il guaio sta nel fatto che, per rivelare gli effetti che ci interessano, l'apparato dovrebbe essere costruito su una scala talmente piccola da rendere impossibile la cosa. Noi stiamo quindi compiendo un "esperimento concettuale" e lo abbiamo scelto così perché è facile ragionarci su. Noi sappiamo quali sono i risultati che *si otterrebbero*, perché *sono stati fatti* molti esperimenti, in cui la scala e le proporzioni erano state scelte in modo da mettere in luce gli effetti che ora descriveremo.

La prima cosa che notiamo nel nostro esperimento con elettroni è che si sentono dei "click" ben staccati nel rivelatore (cioè nell'altoparlante). E che tutti i "click" sono uguali: *non* ci sono "mezzi click."

Ci accorgiamo anche che i "click" arrivano in modo irregolare. Qualcosa come: clic . . . clic-clic . . . clic . . . clic-clic . . . clic . . . clic-clic . . . clic . . . ecc., così come avrete certamente udito fare da un contatore geiger in funzione. Se contiamo i clic che arrivano in un tempo sufficientemente lungo — diciamo per parecchi minuti — e poi li ricontiamo per un altro periodo di tempo uguale, troviamo che i due numeri ottenuti sono assai vicini. Possiamo dunque parlare di una *frequenza media* con cui i clic sono uditi (tanti clic per minuto, in media).

Se muoviamo il rivelatore, il *rimo* con cui arrivano i clic risulta più veloce o più lento, ma la grandezza (intensità) di ciascun clic è sempre la stessa. Se abbassiamo la temperatura del filo nel cannone elettronico, il ritmo dei clic diminuisce, ma il suono di ciascun clic rimane lo stesso. Infine, ponendo due diversi rivelatori sullo schermo in fondo, notiamo che il solito clic viene emesso da uno *oppure* dall'altro dei due, ma mai contemporaneamente. (Eccetto che una volta tanto, quando due clic sono emessi in tempi assai vicini, cosicché il nostro orecchio non ne avverte la separazione.) Concludiamo, perciò, che quel che arriva al rivelatore, qualunque cosa sia, arriva in "granuli." Tutti i "granuli" hanno le stesse dimensioni: i "granuli" arrivano tutti interi

All the electrons which come out of the gun will have (nearly) the same energy. In front of the gun is again a wall (just a thin metal plate) with two holes in it. Beyond the wall is another plate which will serve as a "backstop." In front of the backstop we place a movable detector. The detector might be a geiger counter or, perhaps better, an electron multiplier, which is connected to a loudspeaker.

We should say right away that you should not try to set up this experiment (as you could have done with the two we have already described). This experiment has never been done in just this way. The trouble is that the apparatus would have to be made on an impossibly small scale to show the effects we are interested in. We are doing a "thought experiment," which we have chosen because it is easy to think about. We know the results that *would* be obtained because there *are* many experiments that have been done, in which the scale and the proportions have been chosen to show the effects we shall describe.

The first thing we notice with our electron experiment is that we hear sharp "clicks" from the detector (that is, from the loudspeaker). And all "clicks" are the same. There are *no* "half-clicks."

We would also notice that the "clicks" come very erratically. Something like: click . . . click-click . . . click . . . click . . . click-click . . . click . . . etc., just as you have, no doubt, heard a geiger counter operating. If we count the clicks which arrive in a sufficiently long time—say for many minutes—and then count again for another equal period, we find that the two numbers are very nearly the same. So we can speak of the *average rate* at which the clicks are heard (so-and-so-many clicks per minute on the average).

As we move the detector around, the *rate* at which the clicks appear is faster or slower, but the size (loudness) of each click is always the same. If we lower the temperature of the wire in the gun, the rate of clicking slows down, but still each click sounds the same. We would notice also that if we put two separate detectors at the backstop, one *or* the other would click, but never both at once. (Except that once in a while, if there were two clicks very close together in time, our ear might not sense the separation.) We conclude, therefore, that whatever arrives at the backstop arrives in "lumps." All the "lumps" are the same size: only whole

ed uno alla volta  
 identici tra loro  
 Così come  
 rispondere sper  
 un granulo elet  
 Come prima, c  
 elettronico a rit  
 valore di  $x$  è pr  
 posizione  $x$ .

Il risultato c  
 $P_{12}$  nella parte (

1-5 Interfer

Cerchiamo c

capire il compor  
 poiché quel che  
 anche chiamare  
 2. Scriviamo tut  
 Proposizione

Ammettendo  
 fondo possono  
 sando per il foro  
 deve essere la so  
 venuti dal foro  
 faremo una mis  
 e contiamo i cli  
 mostrato dalla c  
 assai ragionevol  
 per gli elettroni  
 riportato in figur

Il risultato  $P$   
 $P_1$  e  $P_2$ , le probal  
 mento con le onc

Ma di dove vien  
 probabilmente si  
 l'altro dei fori l  
 vanno in modo p  
 farlo, arrivano s  
 oro 1, e poi ancl  
 lualche altra str  
 a probabilità di  
 . . . ." Ma attent  
 ono aperti tutti e

one hole, so *closing* one never, that at the center 2. It is as though closing through the other hole. t the electrons travel in

it it the more mysterious claim the curve for  $P_{12}$  in 1 ways through the holes. the right curve for  $P_{12}$  in

ing  $P_1$  and  $P_2$  to  $P_{12}$  is if Fig. 1-2, and *that* was l by two complex numbers rse). The absolute square  $= |\phi_1|^2$ . The effect with  $= |\phi_2|^2$ . And the  $-\phi_2|^2$ . The *mathematics* hard to see how one could rons going back and forth

lumps, like particles, and d like the distribution of behaves "sometimes like a waves we defined the in-  $e$  amplitude, and we used ; analysis. But in quantum ; resented by complex num- cal point, for the moment,

s given so simply, although ) say. But there are a large does work this way. We now. First, since the num- number that arrives through ould have concluded from *Proposition A is false*. It is hole 2. But that conclusion

our electron apparatus we and between the two holes, ; scatter light. So when an

Electron gun = Cannoncino elettronico  
Light source = Sorgente luminosa

Fig. 1-4. Un diverso esperimento con elettroni.

elettrone riesce in un modo qualsiasi ad oltrepassare lo schermo, prima di rag- giungere il rivelatore devierà verso il nostro occhio della luce e potremo vedere il cammino dell'elettrone stesso. Per esempio, se l'elettrone passa attraverso il foro 2, seguendo la traiettoria disegnata in Fig. 1-4, dovremmo vedere un lampo di luce proveniente dalle vicinanze del punto A in figura. Se l'elettrone passa attraverso il foro 1, ci aspetteremo di vedere invece un lampo nelle vicinanze del foro di sopra. Se dovesse accadere di osservare luce da tutte e due le parti allo stesso tempo, perché l'elettrone si divide a metà... Ma facciamo l'esperimento! Ecco ciò che si vede: *ogni volta* che udiamo un "click" dal nostro rivelatore di elettroni (sulla parete di fondo), *vediamo anche* un lampo di luce o vicino al foro 1 *oppure* al foro 2, ma *mai* tutti e due insieme! E otteniamo questo stesso risultato indipendentemente dalla posizione del rivelatore. Da questa esperienza concludiamo che quando osserviamo gli elettroni troviamo che essi passano attraverso o l'uno o l'altro dei fori. Sperimentalmente la *Proposizione A* è necessariamente vera.

Ma allora cosa c'è di sbagliato nel nostro ragionamento *contro* la *Proposizione A*? Perché  $P_{12}$  non è uguale proprio a  $P_1 + P_2$ ? Ritorniamo all'esperienza! Ricostruiamo il cammino degli elettroni e scopriamo ciò che fanno. Per ogni posizione (sull'asse  $x$ ) del rivelatore contiamo gli elettroni che arrivano e registriamo *anche* il foro attraverso il quale sono passati, osservando di lampi di luce. Possiamo fare le cose in questo modo: ogni volta che udiamo un "click" faremo un segno in Colonna 1 se vediamo il lampo vicino al foro 1, mentre se questo appare in prossimità del foro 2, lo annotiamo in Colonna 2. Tutti gli elettroni che arrivano sono registrati in due classi: quelli che sono giunti attraverso 1 e quelli che sono giunti attraverso 2. Dal numero riportato in Colonna 1 ricaviamo la probabilità  $P_1$ , che un elettrone arrivi al rivelatore via il foro 1; dal numero riportato in Colonna 2 ricaviamo la probabilità  $P_2$ , che un elettrone arrivi al rivelatore via il foro 2. Se ora ripetiamo queste misure per molti valori di  $x$ , otteniamo per  $P_1$  e per  $P_2$  le curve mostrate nella parte (b) di Fig. 1-4.

Orbene, ciò non è molto sorprendente! Otteniamo per  $P_1$  qualcosa di molto simile a ciò che si era ottenuto prima per  $P_1$  chiudendo il foro 2; mentre  $P_2$  è molto simile a quello che si era ottenuto chiudendo il foro 1. Dunque *non c'è* niente di complicato come il passare attraverso tutti e due i fori. Quando li osserviamo, gli elettroni arrivano proprio come ci aspettavamo che arrivassero. Sia che i fori siano aperti o chiusi, quelli che

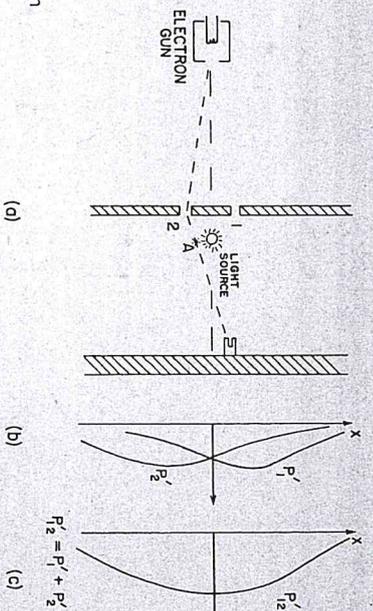


Fig. 1-4. A different electron experiment.

electron passes, however it does pass, on its way to the detector, it will scatter some light to our eye, and we can see where the electron goes. If, for instance, an electron were to take the path via hole 2 that is sketched in Fig. 1-4, we should see a flash of light coming from the vicinity of the place marked A in the figure. If an electron passes through hole 1, we would expect to see a flash from the vicinity of the upper hole. If it should happen that we get light from both places at the same time, because the electron divides in half... Let us just do the experiment!

Here is what we see: *every* time that we hear a "click" from our electron detector (at the backstop), we *also* see a flash of light *either* near hole 1 *or* near hole 2, but *never* both at once! And we observe the same result no matter where we put the detector. From this observation we conclude that when we look at the electrons we find that the electrons go either through one hole or the other. Experimentally, *Proposition A* is necessarily true.

What, then, is wrong with our argument *against* *Proposition A*? Why isn't  $P_{12}$  just equal to  $P_1 + P_2$ ? Back to experiment! Let us keep track of the electrons and find out what they are doing. For each position ( $x$ -location) of the detector we will count the electrons that arrive and *also* keep track of which hole they went through, by watching for the flashes. We can keep track of things this way: whenever we hear a "click" we will put a count in Column 1 if we see the flash near hole 1, and if we see the flash near hole 2, we will record a count in Column 2. Every electron which arrives is recorded in one of two classes: those which come through 1 and those which come through 2. From the number recorded in Column 1 we get the probability  $P_1$  that an electron will arrive at the detector via hole 1; and from the number recorded in Column 2 we get  $P_2$ , the probability that an electron will arrive at the detector via hole 2. If we now repeat such a measurement for many values of  $x$ , we get the curves for  $P_1$  and  $P_2$  shown in part (b) of Fig. 1-4. Well, that is not too surprising! We get for  $P_1$  something quite similar to what we got before for  $P_1$  by blocking off hole 2; and  $P_2$  is similar to what we got by blocking hole 1. So there is *not* any complicated business like going through both holes. When we watch them, the electrons come through just as we would expect them to come through. Whether the holes are closed or open, those which

autore

Werner Heisenberg (München, 1901), premio Nobel 1932 per la Fisica, professore a Lipsia e a Berlino dal 1927, direttore dal 1941 del Max Planck Institut, è stato uno dei fondatori della Meccanica Quantistica, alla quale ha contribuito sia per la formulazione matematica che per i fondamentali aspetti interpretativi. Tra questi va ricordato il Principio di Indeterminazione che, insieme al Principio di Complementarità dovuto a Bohr, sta alla base di una nuova impostazione dei rapporti tra l'osservatore e il mondo osservato.

GAB 45

titolo

«È compito non secondario» afferma Heisenberg «tentare di discutere le idee della fisica moderna, non secondo un linguaggio tecnico, ma in rapporto alle loro conseguenze nel campo filosofico.» E quest'opera mostra appunto come l'attuale inoltarsi della Fisica verso gli ultimi costituenti della materia porti a modificare fondamentali concetti scientifici con inaspettate, grandiose implicazioni anche sul piano del pensiero speculativo. Le scoperte della Fisica atomica sono qui limpidamente prospettate, mentre ne vengono messe in luce le ragioni e i valori, soprattutto per quanto concerne il problema della conoscenza.

argomento

**il linguaggio umano  
della scienza**

collezione

*I Gabbiani*, per un immediato orientamento del libraio e al servizio degli interessi culturali del lettore, sono suddivisi in cinque sezioni, ciascuna distinta da un colore: storia, filosofia, scienze dell'uomo (giallo); biografie, documenti, attualità (rosso); letteratura (blu); scienze della natura (verde); opere varie (nero).

prezzo

lire  2500 (1321)

editore

**IL SAGGIATORE**

seconda edizione

autore

  
**WERNER  
HEISENBERG**

titolo

**FISICA  
E FILOSOFIA**

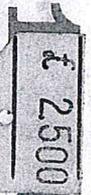
argomento

**il linguaggio umano  
della scienza**

collezione

**i gabbiani**

prezzo

lire  2500 (1321)

editore

**IL SAGGIATORE**

seconda edizione

nesso con il resto del mondo, esso contiene di fatto le incertezze della struttura microscopica del mondo intero. Queste incertezze possono esser dette obbiettive in quanto sono semplicemente una conseguenza della definizione nei termini della fisica classica e non dipendono dall'osservatore. Possono essere chiamate soggettive in quanto si riferiscono alla nostra incompleta conoscenza del mondo.

Dopo che questa interazione ha avuto luogo, la funzione di probabilità contiene l'elemento oggettivo della tendenza e l'elemento soggettivo della conoscenza incompleta, anche se sia prima trattato di un «caso puro». Per questa ragione il risultato dell'osservazione non può essere generalmente preveduto con certezza; ciò che può essere preveduto è la probabilità di un certo risultato dell'osservazione, e questa affermazione sulla probabilità può essere controllata ripetendo l'esperimento molte volte. La funzione di probabilità non deve, come fa il procedimento normale nella meccanica newtoniana, descrivere un certo evento ma, almeno durante il processo d'osservazione, un complesso di eventi possibili.

L'osservazione stessa cambia la funzione di probabilità in modo discontinuo; essa sceglie fra tutti gli eventi possibili quello che realmente ha avuto luogo. Poiché seguendo l'osservazione, la nostra conoscenza del sistema è andata trasformandosi in modo discontinuo, anche la sua rappresentazione matematica ha subito un continuo mutamento e giungiamo così alla definizione di «salto quantico». Quando si usa il vecchio adagio «Natura non facit saltus» come base per una critica della teoria dei quanta, noi possiamo rispondere che è certo che la nostra conoscenza può cambiare improvvisamente e che questo fatto giustifica l'uso del termine «salto quantico».

Perciò, il passaggio dal «possibile» al «reale» ha luogo durante l'atto d'osservazione. Se desideriamo descrivere ciò che accade in un evento atomico, dobbiamo aver ben presente che la parola «accade» può essere applicata soltanto all'osservazione e non a ciò che accade fra due osservazioni. Essa si applica all'atto fisico e non a quello psichico dell'osservazione, e noi possiamo dire che il passaggio dal «possibile» al «reale» si verifica non appena l'interazione dell'oggetto e del dispositivo di misurazione, e quindi del resto del mondo, è entrata in gioco; ciò non è connesso con l'atto di registrazione del risultato ad opera della mente dell'osservatore. Il mutamento discontinuo della funzione di probabilità ha luogo, tuttavia, con l'atto di registrazione, poiché è il mutamento discontinuo del nostro conoscere all'istante della registrazione che si rispecchia nel mutamento discontinuo della funzione di probabilità.

Entro quali limiti, allora, siamo pervenuti ad una descrizione oggettiva del mondo, in special modo del mondo atomico? La fisica classica partiva dalla convinzione — o si direbbe meglio dall'illusione? — che noi potessimo descrivere il mondo, o almeno delle parti di esso, senza alcun riferimento a noi stessi. Questo entro ampi limiti è realmente possibile. Noi sappiamo che la città di Roma esiste sia che la vediamo sia che non la vediamo. Si potrebbe anzi affermare che la fisica classica è proprio quella idealizzazione in cui noi parliamo delle varie parti del mondo senza far riferimento a noi stessi. I successi da essa ottenuti han condotto all'idea generale d'una descrizione oggettiva del mondo. L'oggettività è divenuta il primo criterio di valutazione di qualsiasi risultato scientifico. L'interpretazione di Copenaghen della teoria dei quanta è ancora d'accordo con questo ideale? Si può forse dire che la teoria dei

*Critiche e controproposte  
all'interpretazione di Copenhagen  
della teoria dei quanta*

L'interpretazione di Copenhagen della teoria dei quanta ha condotto i fisici lontano dalle semplici concezioni materialistiche che prevalsero nelle scienze naturali del diciannovesimo secolo. Giacché queste concezioni erano state non solo intrinsecamente connesse con la scienza della natura di quel periodo ma avevano anche trovato un'analisi sistematica in più d'un sistema filosofico ed erano profondamente penetrate anche nelle menti degli uomini comuni, si può ben comprendere come siano stati operati molti tentativi per criticare l'interpretazione di Copenhagen e di sostituirla con una più in linea con i concetti della fisica classica o della filosofia materialistica.

Questi tentativi possono essere divisi in tre gruppi diversi. Il primo gruppo non vuole cambiare l'interpretazione di Copenhagen per quel che si riferisce alle previsioni dei risultati sperimentali, ma si adopera per cambiare il linguaggio di questa interpretazione in modo da ottenere una più stretta rasso-

miglianza alla fisica classica. In altre parole, esso cerca di cambiarne la filosofia senza attaccarne la fisica. Alcuni scritti di questo primo gruppo restringono il loro accordo con le previsioni sperimentali dell'interpretazione di Copenhagen a quegli esperimenti che sono stati fin qui eseguiti o che appartengono alla normale fisica elettronica.

Il secondo gruppo accetta l'interpretazione di Copenhagen come l'unica adeguata, se i risultati sperimentali concordano ovunque con le previsioni. Perciò gli scritti degli autori di questo gruppo cercano di modificare alquanto la teoria dei quanta in alcuni punti critici.

Il terzo gruppo, infine, si limita ad esprimere la sua insoddisfazione generale nei riguardi dell'interpretazione di Copenhagen e soprattutto delle sue conclusioni filosofiche, senza avanzare controproposte ben definite. Scritti di Einstein, von Laue e Schrödinger appartengono a questo terzo gruppo che è stato in ordine di tempo il primo dei tre.

Tuttavia, tutti gli oppositori dell'interpretazione di Copenhagen concordano in un punto. Sarebbe desiderabile, secondo loro, ritornare al concetto di realtà della fisica classica o, per usare un termine filosofico generale, all'ontologia del materialismo. Essi preferirebbero ritornare all'idea d'un mondo reale oggettivo le cui particelle minime esistono oggettivamente nello stesso senso in cui esistono pietre e alberi, indipendentemente dal fatto che noi le osserviamo o no.

Ciò è tuttavia impossibile o almeno non interamente possibile a causa della natura dei fenomeni atomici, come è stato detto in qualcuno dei capitoli precedenti. Il nostro compito non può essere quello di formulare voti su come dovrebbero essere i fenomeni atomici ma soltanto quello d'intenderli.