

CARLA ROMAGNINO *, LAURA LOY **

* Gruppo Nazionale di Storia della Fisica
Sezione di Parma

** Liceo classico "G.M. Dettori" - Cagliari

STORIA DELLA FISICA

La Teoria corpuscolare della radiazione di Einstein: "Una audace ipotesi"⁽¹⁾ utile a superare la contrapposizione tra continuità e discontinuità nella descrizione della realtà fisica

(Ricevuto il 3.2.1992, approvato il 18.6.1993)

ABSTRACT

This research intended to analyse Einstein's paper on granular structure of radiation, more by the light of Einstein's later writings. The following topics will be discussed the reasons for his quantum theory's formulation and the connection between Planck's radiation theory and Einstein's ideas.

Premessa

La memoria di Einstein comunemente nota come articolo sull'effetto fotoelettrico fa parte della stupefacente produzione del 1905. Essa fu scritta nel marzo di quell'anno e fruttò ad Einstein il premio Nobel per la fisica per l'anno 1921, premio che gli venne conferito il 10 novembre 1922⁽²⁾. La motivazione del premio recita: "Ad Albert Einstein per i suoi contributi alla fisica teorica e specialmente per la scoperta della legge sull'effetto fotoelettrico".

D'accordo con Pais riconosciamo oggi che tale motivazione è un giudizio riduttivo, anche se risulta essere un'immagine fedele dell'opinione generale della comunità dell'epoca. E appare abbastanza singolare che il comitato per il premio Nobel, tanto conservatore da aver avuto timore di assegnare ad Einstein il premio per la relatività, lo abbia poi premiato per il contributo più rivoluzionario che abbia mai dato alla fisica⁽³⁾.

Il lavoro di Einstein tuttavia non è finalizzato a dare una spiegazione di alcuni fatti sperimentali e in particolare dell'effetto fotoelettrico, ma si inserisce in un programma di ricerca teorico di vasta portata: l'ipotesi del quanto di luce in esso contenuta prevede un cambiamento radicale nella fisica classica.

Basti pensare al fatto, sottolineato dallo stesso Einstein, che in esso veniva posta in discussione la teoria ondulatoria della luce, dimostratasi fino a quel momento eccellente per la descrizione dei fenomeni ottici.

Fu probabilmente lo scandalo suscitato dal sospetto di inadeguatezza della teoria ondulatoria a far sì che, per lungo tempo, l'ipotesi dei quanti di luce non venisse accettata dalla comunità dei fisici, come vedremo meglio in seguito.

L'articolo si intitola "Un punto di vista euristico relativo alla generazione e alla trasformazione della

luce" e fu ricevuto per la pubblicazione il 18 marzo 1905⁽⁴⁾.

A premessa del suo lavoro Einstein scrive:

"Esiste una differenza formale di natura essenziale tra le rappresentazioni teoriche che i fisici hanno tracciato riguardo ai gas e agli altri corpi ponderabili e la teoria di Maxwell dei processi elettromagnetici nel cosiddetto spazio vuoto. Mentre si suppone che lo stato di un corpo sia completamente determinato dalle posizioni e velocità di un numero finito, anche se molto grande, di atomi e di elettroni, per definire lo stato elettromagnetico nello spazio si usano funzioni spaziali continue, [...]. Secondo la teoria di Maxwell, l'energia deve essere considerata come una funzione che varia con continuità nello spazio per tutti i fenomeni puramente elettromagnetici, e così anche per la luce mentre secondo le idee attualmente prevalenti⁽⁵⁾ tra i fisici l'energia di un corpo ponderabile è il risultato di una somma sugli atomi e gli elettroni" [...].

Il problema di Einstein è dunque il fatto che la teoria elettromagnetica di Maxwell e la teoria dell'elettrone di Lorentz⁽⁶⁾ sono tra loro antitetiche per quanto riguarda la loro descrizione della natura: la prima infatti prevede che l'energia che si accompagna ad ogni fenomeno elettromagnetico, e quindi anche alla luce, deve pensarsi distribuita con continuità nello spazio per un volume via via crescente, la seconda invece prevede l'esistenza di un corpuscolo materiale, l'elettrone appunto, che possiede energia (cinetica) in quantità finita ma che, oscillando, può generare un'onda elettromagnetica che per sua natura deve propagarsi con continuità nello spazio e nel tempo.

D'altra parte anche la legge di Planck relativa ai processi elementari di emissione e di assorbimento della radiazione mette in discussione la continuità stessa dell'evoluzione spazio-temporale del

processo di propagazione delle onde elettromagnetiche. Ed anche altri fenomeni, tra i quali l'effetto fotoelettrico, sembrano porre dubbi sul fatto che l'energia della radiazione sia distribuita in modo continuo.

Einstein perciò, con un procedimento logico che tra breve vedremo, arriva ad affermare la possibilità di unificare le due descrizioni enunciando un principio euristico fondato sull'ipotesi quantistica di Planck.

Le idee di Einstein presentano elementi di eccezionale novità dato che vi appare delineato, per la prima volta nella storia della fisica, il concetto di particella elementare come ente individuale dotato contemporaneamente di proprietà corpuscolari e proprietà ondulatorie⁽⁷⁾.

Secondo lo storico della scienza M. Jammer, Einstein non si rese conto subito dell'importanza che il duplice aspetto del quanto di luce comportava⁽⁸⁾. Ciò parrebbe contraddetto dalle affermazioni dello stesso Einstein che, in una lettera all'amico Habicht scritta prima della pubblicazione dell'articolo sul quanto di luce, definì "altamente rivoluzionario" il contenuto dell'articolo stesso⁽⁹⁾.

Certo è che in un articolo del 1909⁽¹⁰⁾ Einstein scriverà:

"Ora non si può certo affermare che la teoria dei quanti sia una conseguenza della legge dell'irraggiamento di Planck e che altre interpretazioni siano escluse. Ma si può ben affermare che la teoria dei quanti fornisce l'interpretazione più semplice della formula di Planck".

L'ipotesi dei quanti di luce, dice ancora Einstein, deve confrontarsi con "altre teorie in modo soddisfacente sul piano sperimentale". E, a conclusione della premessa della memoria che qui stiamo prendendo in esame, egli esprime la speranza che il suo punto di vista "possa dimostrarsi utile alle ricerche di qualche studioso", evidenziando così ancora una volta il suo autentico desiderio di conoscenza e la sua umiltà di scienziato.

Il problema del corpo nero

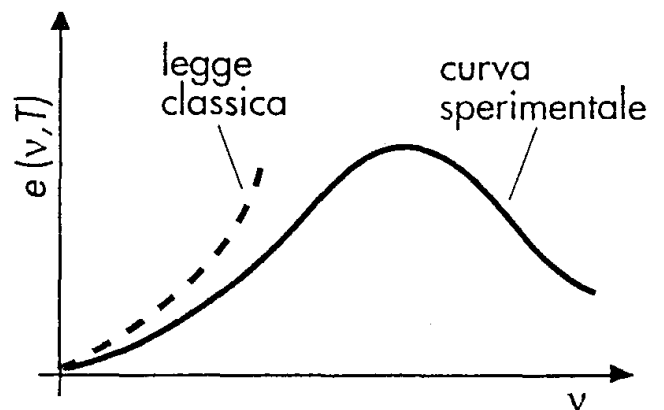
Nella seconda metà del 1800 si era fortemente sviluppata la spettroscopia. A conclusione di ripetute osservazioni e studi Gustav Kirchhoff pubblicò nel 1860 una memoria nella quale veniva dimostrato il famoso principio di inversione relativo agli spettri di emissione e di assorbimento e dava la definizione teorica di corpo nero proponendo agli scienziati di studiarne il potere emissivo che, a suo giudizio, doveva dipendere unicamente dalla temperatura e non, come in generale per gli altri corpi, dalla natura del corpo.

Il corpo nero, diceva Kirchhoff, è un corpo capace di assorbire tutte le radiazioni che arrivano su di esso e che pertanto, in base al principio di inversione, è in grado di emetterle tutte.

La definizione di Kirchhoff permise, anche se solo vent'anni più tardi, la realizzazione pratica delle prime cavità radianti e l'analisi sperimentale portò alla scoperta di alcune fondamentali leggi che regolano l'emissione: tra queste la legge di Josef Stefan che, nel 1879 propose una formula che stabiliva che l'energia totale emessa da un corpo a una certa temperatura nell'unità di tempo e per unità di superficie è proporzionale alla quarta potenza della temperatura. La legge formulata da Stefan si basava essenzialmente sui dati sperimentali ottenuti da Tyndall con fili di platino incandescenti e non con un corpo nero, ma la sua validità era postulata in generale per qualsiasi corpo con spettro di emissione continuo, e quindi anche per un corpo nero.

Questa formula fu poi inquadrata teoricamente da Boltzmann nel 1884 con considerazioni di carattere termodinamico valide esclusivamente per energia raggiante allo stato di equilibrio e quindi per la radiazione di corpo nero.

Parallelamente al problema di studiare il potere emissivo in funzione della temperatura si erano moltiplicati gli studi sulla radiazione emessa alle varie lunghezze d'onda. Intanto le tecniche sperimentali relative all'analisi spettroscopica e alla realizzazione di un corpo perfettamente nero⁽¹¹⁾ erano sufficientemente progredite da permettere di disegnare la curva corrispondente allo spettro di emissione del corpo nero: la radiazione emessa mostra uno spettro continuo la cui intensità, alle diverse temperature, presenta un massimo per una certa frequenza ν_{\max} e decresce verso zero sia per le alte che per le basse frequenze, come è nel diagramma in figura 1.



Allo studio del complesso fenomeno si era arrivati dopo un lungo cammino. Sulla base dei principi generali della termodinamica e della teoria elettromagnetica della luce, si riteneva che la radiazione emessa fosse dovuta alla agitazione termica delle cariche elettriche contenute entro la materia. Furono proposte dunque varie formule che avrebbero dovuto spiegare in termini teorici il processo

di emissione. Due di queste formule sembravano essere assai convincenti, quella di Wien del 1896 e quella di Rayleigh del giugno del 1900⁽¹²⁾, assai diverse fra loro.

La legge esponenziale di Wien, assieme ad altre formulate nel suo stesso periodo, fu sottoposta a indagine sperimentale. Gli studi di F. Paschen del 1897 sembravano confermarne la validità, ma le esperienze fatte successivamente da due gruppi distinti di ricercatori - quello di O. Lummer e E. Pringsheim e quello di H. Rubens e F. Kurlbaum entrambi operanti a Berlino nel 1900 - limitarono tale validità a un piccolo intervallo dello spettro elettromagnetico.

Nell'ottobre nel 1900 Planck trovò una interpolazione in grado di accordarsi ai fatti sperimentali per tutte le lunghezze d'onda.

A questo proposito A. Pais riferisce⁽¹³⁾ che nel pomeriggio del 7 ottobre 1900 Planck ebbe una conversazione con Rubens, durante la quale venne a conoscenza dei risultati sperimentali relativi all'emissione del corpo nero e nello stesso pomeriggio, una volta rimasto solo, elaborò la sua famosa formula.

Vista la validità della formula semiempirica da lui trovata, Planck volle cercare di dedurla dalla teoria elettromagnetica della luce e dalla termodinamica con considerazioni di carattere statistico.

I risultati conclusivi relativi agli esperimenti di Rubens e Kurlbaum furono resi noti all'Accademia Prussiana il 25 ottobre 1900: in quell'occasione vennero presentati i grafici di confronto tra le curve teoriche e quelle sperimentali.

Due mesi più tardi, il 14 dicembre 1900, Planck arrivò a un risultato sorprendente: la sua formula semiempirica poteva facilmente essere ricavata se si introduceva una nuova ipotesi, e cioè che la energia distribuita su n oscillatori di una data frequenza sia composta da un numero ben determinato di parti finite ed uguali tra loro, pari al prodotto della frequenza degli oscillatori per la costante naturale h .

Anche la legge di Rayleigh, che non influenzò i lavori di Planck, era stata sottoposta a verifica sperimentale: si trovò per essa una curva parabolica ascendente che, presso l'origine, coincide con la curva sperimentale, ma poi se ne distacca totalmente. L'intervallo di frequenze in cui tale curva è valida con una certa approssimazione cresce proporzionalmente alla temperatura.

Teoria di Einstein

Nello sviluppo del suo ragionamento Einstein mostra innanzitutto che la formula mediante la quale Planck ha introdotto il quanto d'azione, è inconsistente con la corrente teoria della radiazione del corpo nero e sottolinea che, per contro, questa teoria non si accorda con l'esperienza.

La teoria della radiazione infatti, tratta in base alla teoria statistica del calore, che prevede di poter considerare la radiazione come un gas di molecole, all'equilibrio e per frequenze di radiazione sempre crescenti, prevede una divergenza per l'energia emessa. L'andamento catastrofico alle alte frequenze è dedotto dall'equazione comunemente nota come di Rayleigh e Jeans, formulata per la prima volta da Rayleigh nel 1900 nella forma $q = c_1 \nu^2 T$ e riscritta da Einstein nella forma

$$q = \frac{R}{N} \frac{8\pi}{L^3} \nu^2 T \quad (1)$$

dove ν è la frequenza, $q_\nu d\nu$ è l'energia per unità di volume di quella parte della radiazione che ha un numero di oscillazioni compreso fra ν e $\nu + d\nu$, R è la costante assoluta dei gas, N il numero di Avogadro, L la velocità della luce, T la temperatura di equilibrio termodinamico.

Dalla (1), al limite, si ottiene

$$\int_0^\infty q_\nu d\nu = \frac{R}{N} \frac{8\pi}{L^3} T \int_0^\infty \nu^2 d\nu = \infty \quad (2)$$

In un articolo del 1909 Einstein definisce così la contraddizione insita nella (2): *"Perché i corpi solidi emettono luce visibile solo a partire da una certa temperatura individuata piuttosto nettamente? Perché non si producono dappertutto raggi ultravioletti, se alla temperatura ordinaria vengono continuamente generati proprio questi raggi? Come è possibile conservare per lungo tempo lastre fotografiche sensibilissime nelle apposite scatole, se queste generano di continuo raggi di piccola lunghezza d'onda?"*⁽¹⁴⁾

Dopo questo primo passo Einstein prende in considerazione la formula di Planck

$$q_\nu = \frac{\alpha \nu^3}{e^{\frac{\beta \nu}{T}} - 1} \quad (3)$$

che "soddisfa tutte le esperienze condotte finora" ma che, dedotta sulla base di ragionamenti a cui è inerente una certa imperfezione logica, non si accorda con la teoria della radiazione allora esistente se non al limite per grandi valori di T/ν .

La validità al limite è dimostrata perché la (3), per tali valori di T/ν , diventa identica alla (1) solo che si ponga

$$\frac{R}{N} \frac{8\pi}{L^3} = \frac{\alpha}{\beta}$$

da cui, ricavando N , si trova per questa grandezza un valore che è in ottimo accordo con i valori trovati con altri metodi.

Allora, dice Einstein, dobbiamo supporre che l'ipotesi di Planck di un'energia quantizzata sia valida, ma alla sua formula si arriva ponendosi all'interno di una teoria più corretta che non quella di Planck⁽¹⁵⁾.

Nel 1909 Einstein scriverà: *La mia critica in merito a questo punto non è da considerare una obiezione (nel senso proprio del termine) contro la teoria di Planck, bensì soltanto un tentativo di formulare il principio dell'entropia - probabilità in modo più rigoroso di quanto si sia fatto finora. Una formulazione più rigorosa di questo principio era necessaria, perché senza di essa gli sviluppi successivi della memoria, in cui si conclude che la radiazione ha struttura molecolare, sarebbero stati alquanto ingiustificati. Affinché la mia formulazione non apparisse qualcosa di arbitrario o scelto ad hoc, dovevo far vedere in che cosa la vecchia formulazione a mio giudizio era carente*⁽¹⁶⁾.

Perciò Einstein abbandona la formula di Planck e si pone all'interno di una teoria valida almeno in una regione dello spettro elettromagnetico.

Prende dunque in esame la legge di Wien che, nelle regioni in cui ν/T è grande, era stata sperimentalmente accertata. Tale legge è espressa dalla formula

$$q = \alpha \nu^3 e^{-\beta \nu/T}$$

Attraverso essa Einstein mostra che l'entropia di una radiazione monocromatica di densità abbastanza piccola varia con il volume secondo la stessa legge con cui varia l'entropia di un gas perfetto o di una soluzione diluita

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta \nu} \ln \frac{v}{v_0} \quad (4)$$

essendo v e v_0 o volumi occupati dalla radiazione in corrispondenza dei valori S e S_0 dell'entropia.

La via seguita da Einstein per arrivare a scrivere tale relazione prende le mosse da un commento al metodo statistico di Boltzmann. Scrive Einstein: *"Quando si calcola l'entropia dal punto di vista della termodinamica si utilizza spesso il termine probabilità in un'accezione che non coincide con la definizione di probabilità che viene data nel calcolo delle probabilità. Non è raro, in particolare, che i casi equiprobabili vengano postulati in casi in cui il quadro teorico impiegato è certamente sufficiente a consentire una deduzione, evitando l'introduzione di nuove ipotesi"*⁽¹⁷⁾.

Einstein vuol dire che nella termodinamica la definizione di "probabilità" non coincide con quella data dal calcolo delle probabilità, cioè dal rapporto fra numero di casi favorevoli e numero di casi possibili relativi ad un evento. Per esempio secondo Boltzmann e Planck per probabilità termodinamica si deve intendere il numero di microstati o complessioni, che realizzano uno stesso macrostato, e ogni microstato deve avere la stessa probabilità di presentarsi.

Nell'usare tale concetto di probabilità nell'ambito

della teoria del calore, Boltzmann e Planck danno per sottinteso che i microstati debbano essere ugualmente probabili ma non ne definiscono la probabilità, evitando l'introduzione della condizione di "equiprobabilità" come una nuova ipotesi.

Einstein si propone di spiegare in un lavoro successivo che per lo studio dei processi termici è sufficiente il concetto di probabilità statistica, secondo il quale lo stato più probabile è quello in cui il sistema rimane più a lungo e spera così di rimuovere la difficoltà logica che aveva riscontrato nella teoria di Planck che, nel suo lavoro, aveva fatto uso del calcolo delle complessioni.

Tale lavoro in effetti non fu mai pubblicato, ma nell'articolo del 1909⁽¹⁸⁾ Einstein spiega chiaramente in che modo debba usarsi il concetto di probabilità.

Le due definizioni di probabilità termodinamica precedentemente ricordate sono in realtà le definizioni date da Boltzmann: quella che risale al 1868, direttamente collegata all'esperienza e relativa al tempo di permanenza di un sistema in un certo stato e quella, del 1877, basata sul conteggio delle complessioni.

Non sappiamo quando Einstein venne a conoscenza dei lavori di Boltzmann, sappiamo solo che nel 1909 conosceva quello del 1877⁽¹⁹⁾ in cui è contenuta, per la probabilità, la definizione di cui si servì Planck per arrivare alla nota formula. Einstein, come si evince chiaramente dall'articolo del 1909, introduce così il concetto di probabilità: se un sistema chiuso verso l'esterno può assumere gli stati A_1, A_2, \dots, A_j , esso li assume in continuazione e ripetutamente. Se quindi si osserva il sistema per un periodo di tempo θ , molto lungo, in una frazione τ_j di tale periodo il sistema occupa lo stato A_j . Successivamente Einstein scrive la relazione

$$S = \frac{R}{N} \ln W + \text{cost}$$

e poi passa ad esaminare criticamente l'esposizione di Planck.

Se si pone, scrive Einstein, W uguale al numero delle complessioni di uno stato, come fanno Boltzmann e Planck, e si richiede inoltre che le complessioni siano ugualmente probabili, occorre definire la probabilità delle complessioni: se si segue, per fare questo, lo stesso ragionamento esposto precedentemente per definire la probabilità di uno stato, ci si accorge che avere introdotto il conteggio delle complessioni è stato *"da un punto di vista logico... un elemento superfluo"*⁽²⁰⁾. Né Boltzmann né Planck, prosegue Einstein, hanno dato una definizione della probabilità delle complessioni⁽²¹⁾: sarebbe stato invece necessario che Planck, nella sua teoria della radiazione basata sui risuonatori, scegliesse le complessioni con la condizione che fossero equiprobabili sulla base di considerazioni

statistiche e non postularla sulla base di una dimostrazione empirica. Se Plank avesse fatto in questo modo sarebbe arrivato alla formula di Jeans e forse non avrebbe fatto la sua grande scoperta. Tale considerazione induce, a posteriori, "ogni fisico a rallegrarsi che Planck abbia così felicemente trascurato questa esigenza" ma "non sarebbe giusto dimenticare che la formula di Planck è incompatibile con i fondamenti teorici dai quali Planck stesso ha preso le mosse"⁽²²⁾.

Riprendendo l'eamme dell'articolo del 1905, notiamo che Einstein, per ricavare la relazione che esprime la variazione dell'entropia, inverte il cammino logico seguito da Boltzmann. Questi aveva usato la relazione $S = K \ln W$ per esprimere l'entropia S in funzione della probabilità W , dopo averne determinato il valore attraverso "il calcolo delle possibili configurazioni degli elementi atomici dell'insieme statistico"⁽²³⁾.

Einstein invece parte dalla conoscenza della funzione S , che rappresenta l'entropia ricavata dalla legge di radiazione di Wien, per determinare la probabilità W attraverso la relazione di Boltzmann

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln W \quad (5)$$

dove W indica la probabilità relativa di uno stato di entropia S ed S_0 indica l'entropia di un certo stato iniziale del sistema considerato.

Egli introduce poi il valore della probabilità termodinamica per un sistema costituito da n punti mobili (per esempio molecole) contenuti in un volume v_0 e al quale compete una certa entropia S_0 , come probabilità che "in un istante scelto a caso"⁽²⁴⁾, tutti gli n punti si trovino nel volume v senza che avvenga alcun'altra trasformazione del sistema e scrive

$$W = \left(\frac{v}{v_0} \right)^n \quad (6)$$

Dalla (5) e dalla (6) ricava quindi:

$$S - S_0 = R \frac{n}{N} \ln \frac{v}{v_0} \quad (7)$$

Con la (7) Einstein ritrova la relazione che esprime la variazione reversibile dell'entropia a temperatura costante per un sistema di n molecole di gas che occupano un volume v , frazione del volume complessivo v_0 , ed è stata ottenuta mediante il principio di Boltzmann e le leggi della probabilità, senza introdurre il conteggio delle complessioni o fare ipotesi sulla legge delle molecole.

Einstein riscrive la (4) nel modo seguente

$$S - S_0 = R \frac{n}{N} \ln \left[\left(\frac{v}{v_0} \right)^{\frac{N E}{R \beta v}} \right] \quad (8)$$

che, confrontata con la (5) dà

$$W = \left(\frac{v}{v_0} \right)^{\frac{N E}{R \beta v}} \quad (9)$$

Se cioè una radiazione monocromatica di frequenza ν e di energia E è racchiusa (da pareti riflettenti) nel volume v_0 , allora la probabilità che in un istante arbitrario tutta l'energia di radiazione si trovi contenuta in un sottovolume v del volume v_0 è data dalla (9). Confrontando con la (8) se ne conclude che, sotto il profilo della teoria del calore, in regime di Wien, una radiazione monocromatica si comporta come se consistesse di quanti di energia, tra loro indipendenti. Infatti l'esponente di v/v_0 nella (9) può considerarsi come un numero di quanti n dato dal rapporto tra l'energia totale e l'energia di ogni quanto pari a $R\beta v/N = h$. In termini moderni, introducendo la costante di Planck, che Einstein non usa, si avrebbe $R\beta/N = h$ e quindi $h\nu$ è il quanto di energia.

È a questo punto che Einstein introduce il suo principio euristico: "se ora una radiazione monocromatica (di densità abbastanza piccola) si comporta, rispetto alla dipendenza dell'entropia dal volume, come mezzo discontinuo consistente in quanti di energia di grandezza $R\beta v/N$, allora è naturale chiedersi se anche le leggi della generazione e della trasformazione della luce siano le stesse che si avrebbero se la luce consentisse in quanti di energia del genere. In quanto segue ci occuperemo di questo problema"⁽²⁵⁾.

Cioè, dice Einstein, se Planck ha ritenuto che la radiazione potesse essere emessa e assorbita solo in quanti di energia caratterizzando in tal modo una proprietà della materia emittente o assorbente, noi invece riteniamo che l'ipotesi del quanto di luce sia una proprietà caratterizzante la radiazione elettromagnetica sia quando viaggia liberamente nello spazio vuoto, sia quando interagisce con la materia. Si riaffaccia così, per i raggi di luce, l'ipotesi di una natura corpuscolare: essi vengono pensati come costituiti non già di particelle materiali, come ai tempi di Newton, ma di grani di energia che nel 1926 furono chiamati fotoni da G.N. Lewis⁽²⁶⁾.

La modifica ora illustrata dei fondamenti della teoria planckiana "produsse inevitabilmente modifiche profondissime delle nostre teorie fisiche"⁽²⁷⁾. E l'enunciazione del principio euristico fu di una "audacia straordinaria"⁽²⁸⁾ in quanto costrinse a dimenticare i grandi successi ottenuti dalla teoria ondulatoria nello spiegare il fenomeno della diffrazione della luce e degli altri fenomeni ottici, spiegazione che, nell'Ottocento, sembrava avere definitivamente sconfitto la teoria corpuscolare.

Per rendere ragione delle sue ipotesi Einstein prende in esame alcuni fatti sperimentali che la teoria ondulatoria non era in grado di spiegare: la

fotoluminescenza, l'effetto fotoelettrico e la ionizzazione dei gas mediante luce ultravioletta. In tutti e tre i casi dà un esempio del valore euristico dell'ipotesi dei quanti di luce, poiché riesce a rendere conto dei comportamenti conosciuti ed anche a suggerire altri comportamenti verificabili con l'esperienza.

Note e indicazioni bibliografiche

- (1) R.A. Millikan, *Phys. Rev.* **7**, 355 (1916).
- (2) Nella stessa data fu conferito il premio Nobel a Bohr per l'anno 1922.
- (3) A. Pais, *'Sottile è il Signore...': la vita e la scienza di Albert Einstein*, Boringhieri, Torino (1986), 45, 358, 401, 413.
- (4) A. Einstein, "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", *Ann. der Phys.* **4**, 17, 132, 148 (1905). Trad. it. in A. Einstein, *Opere Scelte*, a cura di E. Bellone, Boringhieri, Torino (1988), 118-135.
- (5) L'articolo sul moto browniano verrà inviato per la pubblicazione nel maggio del 1905.
- (6) H. A. Lorentz (1982). Per maggiori dettagli vedi C. Tarsitani, *Il dilemma onda-corpuscolo*, Loescher, Torino (1983), 137.
- (7) v. rif. (6), 265.
- (8) M. Jammer, *The conceptual development of quantum mechanics*, Mc Graw-Hill Book Company, 38.
- (9) A. Einstein, lettera a C. Habicht, non datata, probabilmente del marzo 1905. V. rif. (3), 45.
- (10) Conferenza tenuta da Einstein nel 1909, v. rif. (6), 286.
- (11) I primi corpi neri furono realizzati da O. Lummer e W. Wien nel 1895. Sulla storia dei primi corpi neri, vedi G.P. Guidetti, "I primi 'corpi neri' utilizzati in laboratorio", *Physis*, **1-2**, 157-162 (1985).
- (12) Indicando con $q(\nu, T)$ la densità di energia alla frequenza ν e alla temperatura T per Wien $q = \alpha \nu^3 e^{-\beta \nu / T}$, per Rayleigh $q = c_1 \nu^2 T$.
- (13) A. Pais, "Einstein and the quantum theory", *Rev. Mod. Phys.* **51**, n. 4, 863-877, (1979).
- (14) A. Einstein, "Zum gegenwertigen Stand des Strahlungsproblems", *Physikalische Zeitschrift*, **X**, 185-193 (1909). Trad. it. in A. Einstein, *Opere Scelte*, cit. in (4), 201-220, 205.
- (15) v. rif. (14), 205, 207.
- (16) v. rif. (14), 220.
- (17) v. rif. (4), 126.
- (18) v. rif. (14), 205.
- (19) v. rif. (14), 206.
- (20) v. rif. (14), 206.
- (21) A. Einstein, "Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption", *Ann. der Phys.* **20**, 199-206 (1906). Trad. it. in A. Einstein, *Opere scelte*, cit. in (4), 181-188. In tale articolo, p. 184, Einstein scrive la formula della quale Planck si sarebbe dovuto servire per definire W e che lo avrebbe portato a ritrovare "la formula non corretta della radiazione".
- (22) v. rif. (14), 207. S.N. Bose nel 1924 giustificherà la formula di Planck mediante la statistica quantica nota sotto il nome di "statistica di Bose-Einstein". Vedi S. N. Bose, "La legge di Planck e l'ipotesi dei quanti di luce", *Zfs. Phys.*, **26**, 178 (1924).
- (23) M. Born, "Teorie statistiche di Einstein", in *Albert Einstein: Filosofo-Scienziato*, a cura di P.A. Schilpp, Universale Scientifica Boringhieri, Torino (Ristampa 1981), 72.
- (24) v. rif. (4), 128.
- (25) v. rif. (4), 130.
- (26) G.N. Lewis, "The Conservation of Photons", *Nature* **118**, 874 (1926).
- (27) v. rif. (14), 207.
- (28) v. rif. (3), 403.

Con questo numero Marisa Michelini lascia la direzione, ma non la redazione, della rivista. Siamo certi di interpretare il pensiero non solo della redazione, ma di tutti i soci dell'A.I.F., inviandole un sincero ringraziamento non solo per la qualità e la quantità del lavoro svolto in questi anni, ma anche per l'entusiasmo e il dinamismo che ha saputo trasmettere a tutti. E un grazie anche a tutti coloro che hanno lavorato in redazione e che ora, per vari motivi, non vi appartengono più.

IL CONSIGLIO DIRETTIVO
LA REDAZIONE