La teoria quantistica della radiazione[1]

N. Bohr, H.A. Kramers e J.C. Slater a Copenaghen

(Ricevuto il 22 febbraio 1924.)

Senza discostarci dalla legge classica della propagazione della radiazione nel vuoto, in questo lavoro si cerca di ottenere una descrizione sensata dei fenomeni ottici in stretta connessione con il significato degli spettri secondo la teoria dei quanti. Si connettono i fenomeni di radiazione continui con i processi atomici discreti mediante leggi probabilistiche secondo il procedimento di Einstein. Con l'introduzione di oscillatori virtuali, che secondo il principio di corrispondenza possono essere associati ai processi discontinui, queste leggi vengono tuttavia interpretate in un modo alquanto diverso da come accade di solito.

Introduzione

Nei tentativi di interpretare teoricamente i processi di interazione tra radiazione e materia si introducono due punti di vista distinti, in apparenza mutuamente contraddittori. Da un lato i fenomeni di interferenza, dai quali il funzionamento di tutti gli strumenti ottici dipende essenzialmente, richiedono un punto di vista continuo dello stesso tipo di quello che è contenuto nella teoria ondulatoria della luce, in particolare nella forma nella quale questa teoria è stata sviluppata sulla base dell'elettrodinamica classica. Dall'altro lato i fenomeni di scambio d'energia e di quantità di moto tra radiazione e materia, ai quali l'osservazione dei fenomeni ottici in conclusione si riconduce, richiedono un punto di vista che contiene processi essenzialmente discontinui. Così i suddetti fenomeni hanno portato alla proposta della teoria dei quanti di luce, che nella sua forma più paradossale nega addirittura la costituzione ondulatoria della luce. Allo stato attuale della conoscenza non appare molto possibile liberarsi del carattere formale dell'interpretazione dei processi atomici. Impressiona particolarmente il fatto che si rinunci provvisoriamente a descrivere più da vicino il meccanismo dei processi discontinui, nella teoria quantistica degli spettri indicati come transizioni tra stati stazionari. Invece appare possibile, come mostreremo nella presente dissertazione, delineare in connessione con il principio di corrispondenza un'immagine sensata dei fenomeni ottici, quando si connettano i processi discontinui nell'atomo con il campo di radiazione continuo in un modo alquanto diverso dal consueto. L'ipotesi essenzialmente nuova introdotta nel §2, che l'atomo ben prima della comparsa di un processo di transizione sia in grado di comunicare con gli altri atomi mediante un campo di radiazione virtuale, deriva da Slater[2]. Originariamente il suo proposito era di raggiungere in questo modo una migliore armonia tra la struttura fisica della teoria elettrodinamica della luce e la teoria dei quanti di luce, secondo la quale i processi di emissione e di assorbimento in atomi comunicanti dovrebbero apparire associati a coppie. È stato anche notato da Kramers, che la suddetta idea, invece di portare alla rappresentazione di un accoppiamento stretto di questi processi, costringe piuttosto ad assumere che i processi di transizione in atomi lontani siano mutuamente indipendenti in grado assai più alto di quanto finora assunto. Il lavoro presente costituisce il risultato

[1] Über die Quantentheorie der Strahlung, Zeitschr. f. Phys. **24**, 69-87 (1924).
[2] J.C. Slater, Nature **113**, 307 (1924).

di una discussione collettiva degli autori sul significato che queste ipotesi possono avere eventualmente per la prosecuzione della teoria dei quanti; esso può sotto diversi aspetti essere considerato come un supplemento della prima parte apparsa di recente di un lavoro di Bohr sui principi della teoria dei quanti, nel quale la maggior parte dei problemi qui toccati sono considerati ulteriormente[3].

§1. I principî della teoria dei quanti

La teoria elettrodinamica della luce non dà solo un'immagine meravigliosamente appropriata della propagazione della radiazione nello spazio vuoto, ma essa si è anche rivelata adatta in molte circostanze all'interpretazione dei fenomeni che dipendono dall'interazione della radiazione con la materia. Si può così raggiungere una descrizione generale dei fenomeni di emissione, assorbimento, rifrazione, diffusione e dispersione in base all'ipotesi che gli atomi contengano particelle elettricamente cariche, che possano eseguire oscillazioni armoniche attorno a posizioni di equilibrio stabile, e che scambino energia ed impulso con il campo di radiazione secondo le leggi elettrodinamiche classiche. D'altro canto i suddetti fenomeni rivelano notoriamente un gran numero di aspetti che contraddicono le conseguenze dell'elettrodinamica classica. Una tale contraddizione si è manifestata senza dubbio per la prima volta nel caso delle leggi della radiazione termica. Partendo dalla rappresentazione classica dell'emissione e dell'assorbimento di radiazione da parte di un oscillatore armonico, Planck ha trovato che l'accordo con gli esperimenti sulla radiazione termica si poteva ottenere solo con l'introduzione di un'ipotesi di tipo nuovo, che implica che nella distribuzione statistica di equilibrio debbano contare solo certi stati delle particelle oscillanti. L'energia in questi stati deve trovarsi uguale ad un multiplo intero del quanto $h\omega$, dove ω è la frequenza naturale dell'oscillatore, ed h è una costante universale. Indipendentemente dai fenomeni della radiazione questo risultato, come Einstein ha potuto dimostrare, riceve un sostegno immediato negli esperimenti sul calore specifico dei corpi solidi. Contemporaneamente questo autore propose la sua ben nota "teoria dei quanti di luce", secondo la quale la radiazione non dovrebbe propagarsi come i treni d'onda continui della teoria ondulatoria classica, ma piuttosto come unità discrete, che contengono in una piccola regione spaziale l'energia $h\nu$, dove h indica la costante di Planck, e ν è la quantità che nell'immagine classica significa il numero di onde transitate nell'unità di tempo. Sebbene il grande valore euristico di questa ipotesi appaia chiaro nella conferma dell'interpretazione di Einstein relativamente all'effetto fotoelettrico, tuttavia la teoria dei quanti di luce non si può considerare una soluzione soddisfacente del problema della propagazione della luce, come ben risulta chiaro dalla circostanza, che la "frequenza" ν della radiazione che compare in questa teoria è definita con esperimenti sui fenomeni d'interferenza; ma questi fenomeni richiedono evidentemente per la loro interpretazione una costituzione ondulatoria della luce.

Nonostante le difficoltà fondamentali delle idee della teoria dei quanti è risultato possibile sviluppare queste idee in connessione con risultati di origine diversa, riguardanti la struttura dell'atomo, per un'interpretazione degli esperimenti sugli spettri di emissione e di assorbimento degli elementi. Questa interpretazione si basa sul postulato fondamentale: che un atomo è capace di esistere in un numero di stati

[3]N. Bohr, Über die Anwendung der Quantentheorie auf den Atombau. I. Die Grundpostulate der Quantentheorie, Zeitschr. f. Phys. **13**, 117 (1923). Questo lavoro, che contiene anche ulteriori riferimenti alla letteratura, si citerà sempre nel seguito come G. d. Q..

assegnati, i cosidetti “stati stazionari”, ai quali si attribuisce una vera stabilità, della quale le idee dell’elettrodinamica classica non sono capaci di render conto. Questa stabilità si manifesta nella circostanza che una variazione di stato dell’atomo consiste sempre in un processo completo di transizione da uno stato stazionario ad un altro. Nei fenomeni ottici questo postulato è accoppiato all’ulteriore ipotesi che, nel caso che una transizione tra due stati stazionari sia accompagnata dall’emissione di radiazione, questa radiazione consista di un treno di onde armoniche, la cui frequenza è determinata dalla relazione

$$h\nu = E_1 - E_2, \tag{1}$$

dove E_1 ed E_2 indicano i valori dell’energia dell’atomo nello stato iniziale e finale. Si assume inoltre che il processo di transizione inverso può aver luogo in conseguenza dell’irraggiamento con luce proprio della stessa frequenza. Per l’applicabilità di queste ipotesi all’interpretazione degli spettri degli elementi si deve ringraziare la circostanza che in qualche caso è risultato possibile calcolare per mezzo di regole semplici i valori delle energie per gli stati stazionari di un atomo isolato, assumendo dei moti che con grande approssimazione sono descritti dalle consuete leggi elettrodinamiche (G. d. Q., Cap. I, §1). Le idee dell’elettrodinamica non consentono però di descrivere i dettagli del meccanismo della transizione.

Per quanto riguarda l’esistenza del processo di transizione, appare necessario allo stato attuale della conoscenza accontentarsi di considerazioni probabilistiche. Tali considerazioni sono state introdotte da Einstein[4]; con esse si perviene a dare una derivazione particolarmente semplice della legge di Planck della radiazione termica sotto l’ipotesi che un atomo in un dato stato stazionario possieda una certa probabilità di passare “spontaneamente” nell’unità di tempo ad uno stato stazionario di minore energia, e che un atomo, sotto l’azione di radiazione esterna di frequenza opportuna, possieda una certa probabilità per una transizione “indotta” ad un altro stato stazionario di maggiore o minore contenuto energetico. In connessione con la richiesta dell’equilibrio termico tra campo di radiazione e materia Einstein arrivò inoltre alla conclusione che lo scambio d’energia in un processo di transizione è sempre associato ad uno scambio di quantità di moto per l’ammontare $h\nu/c$, esattamente come avverrebbe se la transizione fosse accompagnata dal lancio o dalla frenata di una piccola entità, che possiede la velocità della luce e il contenuto d’energia $h\nu$. Egli potè concludere che la direzione di questa quantità di moto per le transizioni indotte è la stessa della direzione di propagazione delle onde luminose irraggianti, ma che per le transizioni spontanee la direzione della quantità di moto è distribuita secondo leggi probabilistiche. Questi risultati, che si assumono come un argomento per la realtà fisica dei quanti di luce, hanno di recente trovato un’importante applicazione nella spiegazione del notevole effetto di una variazione della lunghezza d’onda della radiazione diffusa da elettroni liberi, che è stato prodotto con la ricerca di A.H. Compton[5] sulla diffusione dei raggi Röntgen come luce. L’applicazione di considerazioni probabilistiche al problema dell’equilibrio tra elettroni liberi e radiazione, alla quale questa scoperta ha portato, è stata da poco trattata con successo da Pauli[6], e l’analogia formale dei suoi

[4] A. Einstein, Phys. Zeitschr. **18**, 121 (1917).

[5] A.H. Compton, Phys. Rev. **21**, 207 (1923). Vedi anche P. Debye, Phys. Zeitschr. **24**, 161 (1923).

[6] W. Pauli, Zeitschr. f. Phys. **18**, 272 (1923).

risultati con le leggi che governano le transizioni tra stati stazionari degli atomi è stata notata da Ehrenfest e Einstein[7]. Nonostante la fondamentale differenza tra l'immagine dei processi atomici della teoria dei quanti e l'immagine fondata sulle idee consuete dell'elettrodinamica, la prima deve in fin dei conti apparire in un certo senso come una naturale generalizzazione della seconda. Ciò appare particolarmente chiaro dalla richiesta che nel limite, quando trattiamo fenomeni che dipendano dall'azione complessiva statistica di un gran numero di atomi, e nei quali si abbia a che fare con stati stazionari nei quali la separazione tra stati adiacenti è relativamente piccola, la teoria classica porti all'accordo con le osservazioni. Per il caso dell'emissione e dell'assorbimento delle righe spettrali questa connessione tra le due teorie ha portato all'enunciazione del "principio di corrispondenza", che richiede una generale associazione di ognuna delle transizioni possibili tra due stati stazionari con una certa componente oscillatoria armonica nel momento elettrico dell'atomo (G. d. Q., Cap. II, §2). Questo principio ha reso possibile un fondamento per la valutazione delle probabilità di transizione ed ha in tal modo portato il problema dell'intensità e della polarizzazione delle righe spettrali in stretta connessione con il moto degli elettroni nell'atomo.

Il principio di corrispondenza ha consentito di paragonare la reazione di un atomo ad un campo di radiazione con la reazione ad un tale campo che secondo l'elettrodinamica classica ci si deve aspettare da un gran numero di oscillatori armonici "virtuali", le cui frequenze siano secondo l'equazione (1) uguali alle frequenze assegnate per le diverse transizioni possibili agli altri stati stazionari (G. d. Q., Cap. II, §3). Una tale immagine è stata utilizzata da Ladenburg nel suo tentativo di porre quantitativamente in relazione i risultati sperimentali sulla dispersione con considerazioni sulle probabilità di transizione. Anche nel caso dell'interazione tra elettroni liberi e radiazione si sottolinea la possibilità di utilizzare tali considerazioni mediante l'analogia notata da Compton tra le variazioni di lunghezza d'onda della radiazione diffusa e l'effetto Doppler classico della radiazione.

Sebbene il principio di corrispondenza mediante la valutazione delle probabilità di transizione consenta delle conclusioni sul tempo medio di permanenza di un atomo in un dato stato stazionario, il problema dell'intervallo temporale, durante il quale ha luogo l'emissione di radiazione associata ad una transizione, ha d'altra parte dato luogo a grande difficoltà. Questa difficoltà, assieme ad altri noti paradossi della teoria dei quanti, rafforza il dubbio, espresso da varie parti[8], che l'interazione tra materia e radiazione possa essere espressa in linea di principio per mezzo di una descrizione causale spaziotemporale del tipo che è stato utilizzato finora per l'interpretazione dei fenomeni naturali (G. d. Q., Cap. III, §1). Senza in qualche modo abbandonare il carattere formale della teoria, appare ora possibile, come accennato nell'introduzione, che si possa realizzare un progresso più accentuato nell'interpretazione dei fenomeni radiativi osservabili, quando si associno questi fenomeni con gli stati stazionari e con le transizioni tra essi in un modo che alquanto si differenzia da quello consueto.

§2. Radiazione e processi di transizione

Assumeremo che un dato atomo in un certo stato stazionario sia impegnato

[7] P. Ehrenfest e A. Einstein, Zeitschr. f. Phys. **19**, 301 (1924).

[8] Vedi O. W. Richardson, The Electron Theory of Matter, 2^a ed., p. 507 (Cambridge 1916), dove una tale posizione viene espressa chiaramente forse per la prima volta.

in una comunicazione costante con altri atomi, e ciò mediante un meccanismo spaziotemporale, che è virtualmente equivalente ad un campo di radiazione, che corrisponderebbe alla presenza, secondo la teoria della radiazione classica, di oscillatori armonici virtuali, associati alle diverse possibili transizioni ad altri stati stazionari. Assumiamo inoltre che la realizzazione dei processi di transizione, sia per l'atomo dato che per gli altri atomi, con i quali esso comunica, sia associata a questo meccanismo mediante leggi probabilistiche, che siano analoghe alle leggi della teoria di Einstein per le transizioni tra stati stazionari indotte da radiazione esterna. Le transizioni indicate in quella teoria come spontanee noi dal nostro punto di vista le trattiamo come indotte dal campo di radiazione virtuale, accoppiato al moto degli oscillatori virtuali associati all'atomo stesso. D'altra parte le transizioni indotte della teoria di Einstein hanno luogo a causa della radiazione virtuale emessa nello spazio circostante dagli altri atomi.

Mentre queste ipotesi da un lato non portano con sè alcuna modifica che riguardi il legame stabilito mediante la condizione (1) ed il principio di corrispondenza tra la struttura atomica e la frequenza come pure l'intensità e la polarizzazione delle righe spettrali, esse portano d'altro canto ad un'immagine di tipo nuovo della realizzazione spaziotemporale dei diversi processi di transizione, alla quale l'osservazione dei fenomeni ottici in definitiva si riduce. Il realizzarsi di una data transizione in un dato atomo dipenderà dallo stato originario di questo atomo e dagli stati di quegli atomi, con i quali esso è impegnato in una comunicazione per mezzo di un campo di radiazione virtuale, ma non dal realizzarsi di processi di transizione nei restanti atomi.

Da un lato si vedrà che il nostro punto di vista, nel caso limite in cui stati stazionari successivi sono separati solo di poco, porta ad una connessione tra la radiazione virtuale ed il moto delle particelle nell'atomo, che gradualmente diventa quella prescritta nella teoria della radiazione classica. Infatti sia il moto che la costituzione del campo di radiazione in questo caso limite subiranno a motivo della transizione tra gli stati stazionari delle modifiche sostanziali. Per quanto riguarda la comparsa di processi di transizione, che costituisce la mossa essenziale della teoria dei quanti, noi rinunciamo d'altro canto ad un accoppiamento in qualche modo causale tra le transizioni in atomi lontani, ed in particolare all'applicazione diretta del principio così caratteristico per la teoria classica della conservazione dell'energia e dell'impulso. L'applicabilità di questo principio all'interazione tra singoli sistemi atomici è nella nostra concezione ristretta a quelle interazioni nelle quali gli atomi siano così vicini, che la forza associata secondo la teoria classica con il campo di radiazione sia piccola, in confronto alla parte conservativa della forza, che deriva dalle cariche elettriche degli atomi. Interazioni di questo tipo, che noi possiamo indicare come "collisioni", forniscono notoriamente un esempio tipico per la postulata stabilità degli stati stazionari, dal momento che proprio i risultati sperimentali, quando sono interpretati in base alla legge di conservazione dell'energia e dell'impulso, sono in accordo con l'assunzione che gli atomi collidenti si trovino in stati stazionari sia prima che dopo il processo (G. d. Q., Cap. I, §4)[9]. Nelle interazioni tra atomi a

[9]Queste considerazioni valgono evidentemente solo se si può prescindere dalla radiazione associata con l'urto. Sebbene in molti casi l'energia di questa radiazione sia assai poca, la sua comparsa potrebbe essere di significato fondamentale. Ciò è stato notato da Franck in relazione alla spiegazione degli importanti risultati di Ramsauer (Ann. d. Phys. **64**, 513; **66**, 546 (1922)) riguardanti le collisioni tra atomi ed elettroni lenti, dai quali appare risultare che in certi casi l'elettrone può volare libero attraverso l'edificio atomico, senza essere influenzato dalla sua pre-

grande distanza reciproca, per le quali secondo la teoria classica non si può parlare di azione mutua simultanea, assumeremo invece un'indipendenza dei singoli processi di transizione, che contraddice in modo determinato l'ingiunzione classica della conservazione dell'energia e dell'impulso. Assumiamo quindi che una transizione indotta non ha la sua causa diretta in una transizione in un atomo lontano, per il quale la separazione di energia tra stato iniziale e stato finale sia la stessa. Infatti, quando un atomo ha contribuito all'induzione di una transizione in un atomo lontano, e ciò mediante il campo di radiazione virtuale, che origina dall'oscillatore virtuale associato ad una delle transizioni possibili agli altri stati stazionari, l'atomo può invece eseguire un'altra di queste transizioni. Invero le esperienze disponibili a prima vista non danno alcuna prova di questa ipotesi; è possibile tuttavia sperare che il grado di indipendenza del processo di transizione qui assunto possa offrire qualche possibilità di ottenere una descrizione dell'interazione tra radiazione ed atomi esente da contraddizioni, nella quale intervengano le leggi di probabilità in modo essenziale. Questa indipendenza non solo riduce ad una legge statistica la conservazione dell'energia, ma anche la conservazione dell'impulso, poichè proprio come assumiamo che ogni processo di transizione indotto dalla radiazione sia accompagnato da una variazione dell'energia dell'atomo dell'ammontare $h\nu$, assumiamo seguendo Einstein, che ogni siffatto processo sia accompagnato da una variazione della quantità di moto dell'atomo dell'ammontare $h\nu/c$. Se la transizione è indotta dal campo di radiazione virtuale di un atomo lontano, la direzione di questa quantità di moto coincide con la direzione di propagazione dell'onda nel campo. Se invece la transizione è indotta dalla radiazione virtuale propria, facciamo naturalmente l'ipotesi che la variazione della quantità di moto sia assegnata secondo leggi probabilistiche, e ciò in modo tale che le variazioni di quantità di moto, che accompagnano le transizioni indotte in altri atomi da quella radiazione, risultino compensate statisticamente per ogni direzione dello spazio.

Il fondamento dell'osservata conservazione statistica dell'energia e dell'impulso non lo cerchiamo quindi in una qualche deviazione dalla teoria elettrodinamica della luce relativamente alle leggi della propagazione della radiazione nello spazio vuoto, ma nelle particolari proprietà dell'interazione tra il campo di radiazione virtuale e gli atomi irraggiati. Assumeremo che questi atomi agiscano come sorgenti di una radiazione virtuale secondaria, che possiede la stessa frequenza della radiazione incidente e che interferisce con le onde originarie. Nel caso che la frequenza della radiazione incidente coincida approssimativamente con la frequenza di uno degli oscillatori virtuali associati alle diverse transizioni possibili, le ampiezze delle onde sferiche secondarie sono molto grandi e queste onde mostrano rispetto alle onde incidenti tali relazioni di fase, che per interferenza l'intensità del campo di radiazione virtuale sarà accresciuta o diminuita e con ciò la capacità di questo campo di indurre transizioni negli altri atomi sarà rinforzata o indebolita. Che si realizzi

senza. In questi casi infatti, quando per "collisione" avesse luogo davvero una modifica del moto dell'elettrone, secondo la teoria classica dovrebbe apparire una radiazione così grande, che una associazione significativa della radiazione con processi di transizione possibili, com'è richiesto dal principio di corrispondenza, potrebbe difficilmente essere ottenuta (vedi F. Hund, Zeitschr. f. Phys. **13**, 241 (1923)). Secondo la concezione considerata in questo lavoro una tale associazione potrebbe da un lato apparire in modo più naturale, se si cercasse l'origine della radiazione direttamente nel moto dell'elettrone, e non in primo luogo nel verificarsi del processo di transizione. D'altro canto si deve notare che qui abbiamo a che fare con un caso nel quale, a seguito della rilevante grandezza della reazione di radiazione classica, una distinzione netta tra moto stazionario e processi di transizione allo stato attuale della teoria non è realizzabile.

un indebolimento o un rafforzamento dipende dal fatto che l'oscillatore virtuale corrispondente sia associato ad una transizione dell'atomo ad uno stato stazionario di contenuto energetico più alto o ad uno di contenuto energetico più basso. Questa concezione è evidentemente in stretto rapporto con le idee che hanno consentito ad Einstein di introdurre probabilità per transizioni indotte di due tipi, quelle in cui l'energia dell'atomo si accresce, e quelle in cui diminuisce. Nonostante la separazione spaziotemporale per la teoria dei quanti così caratteristica dei processi di assorbimento e di emissione, possiamo aspettarci nella nostra rappresentazione un'ampia analogia formale con l'elettrodinamica classica, che riguarda l'interazione tra il campo di radiazione virtuale e il moto degli oscillatori armonici virtuali associati all'atomo. Appare infatti possibile, guidati da questa analogia, pervenire ad una descrizione coerente e abbastanza completa dei fenomeni ottici che accompagnano la propagazione della luce in un mezzo materiale, nella quale allo stesso tempo risulti chiara la stretta connessione di questi fenomeni con gli spettri degli atomi del mezzo.

§3. Capacità di interferenza delle righe spettrali

Prima di inoltrarci nel problema generale dell'interazione tra gli atomi e un campo di radiazione virtuale, tratteremo brevemente in questo paragrafo le proprietà del campo che deriva da un solo atomo, in quanto esse sono collegate con la capacità di interferenza della luce emessa da una e una sola sorgente. La costituzione di questo campo non ha evidentemente niente a che fare con le particolarità del processo di transizione, la cui durata noi assumeremo in ogni caso non grande rispetto a un periodo della radiazione o del moto delle particelle nell'atomo. Questi processi contrassegnano secondo la nostra interpretazione soltanto la conclusione dell'intervallo temporale durante il quale l'atomo è in grado di comunicare con altri atomi mediante i corrispondenti oscillatori virtuali. Un limite superiore per la capacità di interferenza sarà dato evidentemente dal tempo medio durante il quale l'atomo permane nello stato iniziale corrispondente alla transizione considerata. La valutazione di questo tempo di vita medio degli stati stazionari fondata sul principio di corrispondenza ha ottenuto una conferma generale mediante i ben noti esperimenti sulla durata della luce dei raggi canale in alto vuoto (vedi G. d. Q., Cap. II, §4). L'interpretazione di questi esperimenti risulta assai semplice alla luce della nostra nuova concezione. Si vede infatti che secondo questa concezione l'andamento dell'intensità della luce non deriva dalle particolarità della transizione, ma solo dal numero relativo di atomi nei diversi stati stazionari nelle diverse parti del raggio. Quando per esempio tutti gli atomi possiedono la stessa velocità e si trovano originalmente nello stesso stato, possiamo aspettarci che per tutte le righe spettrali, le cui transizioni sono associate a questo stato, l'intensità della luce decresca esponenzialmente in ugual misura lungo il raggio. Il materiale sperimentale oggi disponibile è a malapena sufficiente a confermare queste considerazioni.

Quando ci interroghiamo sulla capacità di interferenza delle righe spettrali, come è misurata dagli strumenti ottici, il tempo di vita medio dello stato stazionario determinerà certamente per questa capacità un limite superiore. Dobbiamo tener presente che la nettezza osservabile di una data riga spettrale, che deriva dal risultato statistico delle azioni di un gran numero di atomi, non dipende soltanto dalla lunghezza dei singoli treni d'onda troncati dalle transizioni, ma anche da una eventuale incertezza nella determinazione della frequenza di queste onde. Tenendo conto del modo in cui la frequenza delle righe spettrali è collegata mediante la relazione (1) con l'energia degli stati stazionari, è d'interesse notare che il suddetto limite superiore per la nettezza delle righe spettrali si pone in stretto rapporto con i limiti di precisione per la definizione del moto e dell'energia negli stati stazionari. Infatti il postulato della stabilità degli stati stazionari pone un limite a priori alla precisione con cui il moto in questi stati si può descrivere secondo l'elettrodinamica classica, che compare anche direttamente nella nostra idea che l'azione del campo di radiazione virtuale non consiste in una variazione continua del moto dell'atomo, ma nell'induzione di transizioni, per le quali l'energia e la quantità di moto subiscono una variazione finita (G. d. Q., Cap. II, §4). Nell'intorno del limite in cui i moti nei due stati stazionari differiscono tra loro di poco il limite superiore della capacità di interferenza del singolo treno d'onda tende a coincidere con il limite di precisione con cui la frequenza della radiazione è determinata mediante la (1), quando si tenga conto dell'effetto dell'imprecisione nella definizione dei due stati con il metodo degli errori indipendenti. Nel caso generale, in cui i moti nei due stati possono essere assai diversi tra loro, il limite superiore della capacità di interferenza del treno d'onde è strettamente connesso con la definizione del moto in quello stato stazionario che costituisce lo stato iniziale della transizione. Anche qui possiamo tuttavia notare che la nettezza osservabile delle righe spettrali si può determinare mediante l'equazione (1), purchè si componga l'effetto di una qualche imprecisione nella definizione dello stato finale con l'effetto dell'imprecisione nella definizione dello stato iniziale in modo analogo che per la composizione di errori indipendenti.

Proprio questo effetto dell'imprecisione nella definizione nei due stati stazionari sulla nettezza di una riga spettrale rende possibile l'esistenza di una reciprocità tra la struttura di una riga quando appare in emissione e quando appare in assorbimento, come anche richiede il postulato espresso dalla legge di Kirchhoff per l'equilibrio termico. In connessione a questo si ricordi, che l'apparente deviazione da questa legge, che, relativamente al numero ed al rapporto tra le righe, si manifesta nella spesso osservata differenza tra lo spettro di emissione e di assorbimento, trova nella teoria dei quanti la sua spiegazione diretta, quando si tenga conto della differenza nella distribuzione statistica degli atomi nei loro stati stazionari in circostanze esterne diverse.

Strettamente collegata con il problema su trattato, della nettezza delle righe spettrali che derivano dagli atomi sotto condizioni esterne costanti, è la questione dello spettro derivante da un atomo, quando le forze esterne si modificano considerevolmente durante un intervallo temporale dello stesso ordine di grandezza del tempo di vita medio degli stati stazionari. Un tale problema si incontra in certi esperimenti di Stark sull'effetto di un campo elettrico sulle righe spettrali. In questi esperimenti gli atomi si muovono con grande velocità, e gli intervalli di tempo durante i quali vanno da un punto ad un altro, nel quale l'intensità del campo è del tutto diversa, sono solo una piccola frazione del tempo di vita degli stati stazionari associati alla riga studiata. Malgrado ciò Stark ha trovato che, a prescindere dall'effetto Doppler del tipo solito, la radiazione emessa dagli atomi in ogni punto è influenzata dal campo elettrico nello stesso modo, come sarebbe influenzata la radiazione di atomi in quiete dall'azione costante della forza del campo in questo punto. Mentre l'interpretazione di questi risultati, come è stato notato da vari autori[10], dà luogo a difficoltà quando ci si attenga alla descrizione secondo

[10]vedi K. Försterling, Zeitschr. f. Phys. **10**, 387 (1922) e A.J. Dempster, Astrophys. Journ.

la teoria dei quanti usata finora del legame tra radiazione e processi di transizione, i risultati di Stark sono evidentemente in accordo con l'idea messa a fondamento in questa dissertazione. Infatti il moto negli stati stazionari, mentre gli atomi attraversano il campo, muterà continuamente, e lo stesso accadrà con gli oscillatori armonici virtuali, che sono associati alle transizioni possibili. Il campo di radiazione virtuale derivante dagli atomi che si muovono sarà quindi lo stesso di quando l'atomo durante il suo intero cammino si fosse mosso in un campo di intensità costante, almeno quando - come accadeva negli esperimenti di Stark - alla radiazione proveniente da altre parti del suo cammino fosse impedito di raggiungere quella parte dell'apparato dove ha luogo l'osservazione del fenomeno. Si vedrà che in un problema di questo tipo è anche assicurata una ulteriore reciprocità tra i fenomeni osservati di emissione e di assorbimento, e ciò grazie ad una simmetria propria della nostra idea riguardo all'accoppiamento tra processi di transizione in un senso o nell'altro da una parte, e campo di radiazione dall'altra parte.

§4. Teoria quantistica degli spettri e fenomeni ottici

Sebbene secondo la teoria dei quanti l'osservazione dei fenomeni ottici sia alla fine determinata da processi di transizione, l'interpretazione sensata di queste manifestazioni deve contenere, come notato nell'introduzione, quei processi continui che sono caratteristici per la teoria elettrodinamica classica della propagazione della luce attraverso mezzi materiali. Secondo questa teoria i fenomeni della riflessione, della rifrazione e della dispersione si devono attribuire ad una diffusione della luce, che ha luogo in seguito alle oscillazioni forzate delle particelle elettriche nei singoli atomi, causate dalle forze elettromagnetiche del campo di radiazione. Il postulato della stabilità degli stati stazionari porta a prima vista con sè, per quanto riguarda questo punto, una difficoltà fondamentale. Il contrasto sarebbe tuttavia alleviato in una certa misura, come notato, mediante il principio di corrispondenza, che porterebbe a confrontare la reazione di un atomo ad un campo di radiazione con la diffusione che secondo la teoria classica deriverebbe da un certo numero di oscillatori armonici virtuali, che sono associati alle diverse transizioni possibili. Si deve tuttavia pensare che l'analogia tra la teoria classica e la teoria dei quanti, com'è formulata mediante il principio di corrispondenza, è di natura essenzialmente formale, come è particolarmente sottolineato dalla circostanza, che secondo la teoria dei quanti l'assorbimento e l'emissione di radiazione sono collegati a processi di transizione diversi e quindi ad oscillatori armonici diversi. Ma è proprio questo punto così essenziale per l'interpretazione dei risultati sperimentali sugli spettri di emissione e di assorbimento, che sembra mostrare che i fenomeni di diffusione sono associati con l'azione degli oscillatori virtuali relativi all'emissione e all'assorbimento di radiazione. È intenzione mostrare in una dissertazione successiva come con la concezione attuale si possa costruire[11] una teoria quantitativa della dispersione, che è analoga a quella di Ladenburg. Qui ci accontenteremo perciò di sottolineare di nuovo il carattere continuo dei fenomeni ottici, che non pare consentire alcuna interpretazione nel senso di un collegamento causale con processi di transizione nel mezzo di propagazione.

57, 193 (1923).

[11] Nota aggiunta alla correzione. Le linee principali di una tale teoria sono descritte brevemente da Kramers in una comunicazione che apparirà tra poco su "Nature".

Incontriamo un esempio istruttivo di queste considerazioni negli esperimenti sugli spettri di assorbimento. Infatti a rigore non si può sostenere, come si fa spesso per brevità, che l'assorbimento in un vapore monoatomico per luce la cui frequenza coincida con certe righe dello spettro di emissione ha la sua origine in processi di transizione, che si verificano negli atomi del vapore, e che sono indotti da quei treni d'onda della radiazione incidente, che possiedono la frequenza delle righe di assorbimento. Della visibilità di queste righe nello spettroscopio si deve ringraziare la diminuzione dell'intensità della radiazione incidente, che ha luogo a causa delle particolarità delle onde sferiche secondarie emesse da ciascuno degli atomi illuminati; le transizioni indotte giocano soltanto il ruolo di un effetto concomitante, mediante il quale è assicurata la conservazione statistica dell'energia. La presenza dei treni d'onda secondari coerenti è parimenti responsabile della dispersione anomala associata alle righe di assorbimento e si manifesta inoltre particolarmente nel fenomeno scoperto da Wood[12] della riflessione selettiva sulla parete del contenitore di un vapore metallico a pressione abbastanza alta. La comparsa di transizioni indotte tra stati stazionari nell'assorbimento selettivo è allo stesso tempo osservata direttamente nella radiazione di fluorescenza, che per una parte importante deriva dalla presenza di un piccolo numero di atomi, che sono stati portati dall'irraggiamento in uno stato stazionario di energia più alta. È noto che la radiazione di fluorescenza si può sopprimere con il miscelamento con un gas estraneo. Per quanto riguarda la parte di radiazione derivante dagli atomi in stati stazionari più alti, questo fenomeno si spiega con collisioni, che provocano un considerevole aumento della probabilità degli atomi a tornare nel loro stato fondamentale. Allo stesso tempo la parte della radiazione di fluorescenza consistente di radiazione diffusa coerente, come i fenomeni dell'assorbimento, della dispersione e dalla riflessione subiranno per miscelamento con gas estraneo quelle variazioni, che possono essere poste in relazione con l'allargamento delle righe spettrali prodotto dagli urti[13]. Si vede che un'interpretazione dei fenomeni di assorbimento, che si discosti essenzialmente da quella su descritta, è difficilmente sostenibile, almeno quando si può dimostrare che l'assorbimento delle righe spettrali è qualitativamente indipendente dall'intensità della sorgente di radiazione, analogamente a come si può dimostrare per i consueti fenomeni della riflessione e della rifrazione, per i quali le transizioni nel mezzo non intervengono in quel modo (vedi G. d. Q., Cap. III, §3).

Un altro esempio interessante fornisce il problema della diffusione della luce da elettroni liberi. Come ha mostrato Compton con la riflessione dei raggi Röntgen da parte di cristalli, questa diffusione è accompagnata da una variazione di frequenza, che è diversa in direzioni diverse, e che è in accordo con la costituzione della radiazione emessa da una sorgente immaginaria in moto secondo la teoria classica. Compton ha raggiunto, come ricordato, un'interpretazione formale di questo fenomeno sulla base della teoria dei quanti di luce, assumendo che un elettrone assorba un quanto della luce incidente, e allo stesso tempo possa riemettere un quanto di luce in un'altra direzione. In questo processo l'elettrone acquista in una certa direzione una certa velocità, che come la frequenza della luce riemessa è determinata dalle leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto, nelle quali si attribuisce ad ogni quanto di luce un'energia $h\nu$ ed una quantità di moto $h\nu/c$. In contrasto con questa idea noi vediamo la diffusione della radiazione da

[12] R.W. Wood, Phil. Mag. **23**, 689 (1915).

[13] vedi per esempio Chr. Füchtbauer e G. Joos, Phys. Zeitschr. **23**, 73 (1922).

parte degli elettroni come un fenomeno continuo, al quale ogni elettrone partecipa con l'emissione di onde secondarie coerenti; la radiazione virtuale incidente dà luogo in ogni elettrone ad una reazione, analoga alla diffusione che ci si aspetterebbe nella teoria classica da un elettrone, che possedesse la velocità della sorgente di radiazione immaginaria su menzionata, e che sotto l'influenza del campo di radiazione eseguisse oscillazioni forzate. Che in questo caso l'oscillatore virtuale si muova con una velocità che è diversa da quella dell'elettrone irraggiato stesso significa certamente un passo che si contrappone alle idee classiche in modo particolarmente strano. In considerazione dei fondamentali scostamenti dalla descrizione spaziotemporale classica, insiti nell'idea degli oscillatori virtuali, non appare tuttavia corretto allo stato attuale della teoria voler condannare una interpretazione formale come quella considerata. Una tale interpretazione appare al contrario necessaria quando si voglia tener conto dei fenomeni osservati, per la descrizione dei quali la concezione ondulatoria della radiazione gioca proprio un ruolo essenziale. Proprio come nella teoria di Compton, assumiamo allo stesso tempo che l'elettrone irraggiato possieda una certa probabilità di subire in ogni direzione data una certa variazione finita della sua quantità di moto. Mediante questo effetto, che nella teoria dei quanti prende il posto del trasferimento continuo di quantità di moto, che secondo la teoria classica accompagnerebbe una diffusione del tipo descritto, viene assicurata la conservazione statistica della quantità di moto, analoga alla conservazione statistica dell'energia prima considerata nel fenomeno degli spettri di assorbimento. Di fatto le leggi probabilistiche derivate da Pauli per lo scambio di quantità di moto nell'interazione tra elettroni liberi e radiazione mostrano una analogia essenziale con le leggi di Einstein, che hanno valore per le transizioni tra stati stazionari ben definiti di un sistema atomico. Le considerazioni di Einstein e Ehrenfest ricordate nel §2 sono particolarmente idonee a far risaltare questa analogia.

Un problema analogo alla diffusione della luce da elettroni liberi lo incontriamo nella diffusione di luce da un atomo, indipendentemente dal fatto che la frequenza della radiazione sia abbastanza grande da indurre transizioni per le quali un elettrone sia completamente allontanato dall'atomo. Per assicurare la conservazione statistica della quantità di moto dobbiamo infatti assumere, come hanno notato Pauli e di nuovo Smekal[14], che possano avvenire processi di transizione nei quali la quantità di moto dell'atomo diffuso subisce una variazione finita senza che per questo, come nei soliti processi di transizione considerati nella teoria degli spettri, il moto relativo delle particelle nell'atomo cambi. Si vede che nella nostra concezione processi di transizione del tipo anzidetto sono strettamente associati ai fenomeni di diffusione ottica in un modo che è analogo all'associazione dei fenomeni spettrali con i processi di transizione, nei quali il moto interno dell'atomo cambia. A motivo della grande massa del nucleo atomico la variazione di velocità dell'atomo per tali transizioni è tuttavia così piccola, che non avrà alcun effetto osservabile sull'energia dell'atomo e sulla frequenza della radiazione diffusa. Malgrado ciò è di significato essenziale che il trasferimento di quantità di moto sia un processo discontinuo, mentre la diffusione stessa è un fenomeno essenzialmente continuo nel quale hanno parte tutti gli atomi irraggiati, indipendentemente dall'intensità della radiazione incidente. Le variazioni discontinue nella quantità di moto dell'atomo sono la causa delle azioni osservate sugli atomi, che si descrivono come pressione di radiazione. Questa interpretazione soddisfa evidentemente le condizioni per l'equilibrio

[14] A. Smekal, Naturwissenschaften **11**, 875 (1923).

termico tra un campo di radiazione (virtuale) ed una superficie riflettente, che sono state ricavate da Einstein[15] e nelle quali egli ha visto un sostegno per la teoria dei quanti di luce. Allo stesso tempo risulta quasi superfluo rilevare che essa è anche in accordo con l'apparente continuità nelle osservazioni reali sulla pressione di radiazione. Quanto infatti consideriamo un corpo solido, una variazione di $h\nu/c$ nella quantità di moto totale di questo sarà completamente inosservabile, e per luce visibile trascurabilmente piccola, rispetto alle variazioni irregolari della quantità di moto di un corpo in equilibrio termico con il suo ambiente. Nella discussione degli esperimenti reali dobbiamo tuttavia tener presente allo stesso tempo che la frequenza di tali processi è spesso così grande, che incontriamo la domanda se possiamo trascurare la durata stessa delle transizioni o, in altre parole, se è superato il limite entro il quale vale la formulazione dei principî della teoria dei quanti (vedi G. d. Q., Cap. II, §5).

Le ultime considerazioni danno un esempio di come la nostra interpretazione dei fenomeni ottici consenta una connessione naturale con la consueta descrizione continua dei fenomeni macroscopici, per l'interpretazione dei quali la teoria di Maxwell è così meravigliosamente adatta. La preferenza che sotto questo riguardo la nostra formulazione dei principî della teoria dei quanti consegue rispetto alla consueta formulazione della teoria si illustra assai significativamente nel caso del fenomeno dell'emissione di onde elettromagnetiche, cioè mediante un'antenna, come in radiotelegrafia. In questo caso una descrizione sensata dei fenomeni è possibile nel senso di un'emissione di radiazione, mentre è impossibile nel senso di processi di transizione separati successivi tra stati stazionari immaginari dell'antenna. Tenendo conto infatti della piccolezza delle variazioni di energia nelle transizioni, e anche della grandezza della radiazione di energia nell'unità di tempo, si vede che la durata dei singoli processi di transizione può essere solo una frazione straordinariamente piccola del periodo di oscillazione dell'elettricità nell'antenna, e che di conseguenza non è corretto descrivere il risultato di tali processi come l'emissione di un treno d'onde di questo periodo. Nella nostra interpretazione attuale invece descriviamo la realtà delle oscillazioni di elettricità nell'antenna come il realizzarsi di un campo di radiazione (virtuale), che secondo leggi di probabilità induce inoltre modifiche nel moto degli elettroni. Queste modifiche possiamo considerarle in questo caso come praticamente di tipo continuo, perché anche se fosse possibile mantenere una distinzione dei singoli contributi d'energia $h\nu$, la grandezza di questi contributi sarebbe del tutto trascurabile rispetto all'energia dell'antenna. In connessione a questo va osservato che la comparsa del carattere "virtuale" del campo di radiazione, che allo stato attuale dalla conoscenza appare così necessario per la descrizione sensata dei fenomeni atomici, automaticamente perde il suo significato in un caso come quello qui trattato, in cui il campo, per quanto riguarda la sua interazione osservabile con la materia, esibisce tutte quelle proprietà che nell'elettrodinamica classica si attribuiscono ad un campo elettromagnetico.

Kopenhagen, Universitetets Institut for teoretisk Fysik.

[15] A. Einstein, Phys. Zeitschr. **10**, 875 (1923).