

EFFETTO FOTOELETTRICO E CONCETTO DI FOTONE

di Ezio Fornero

Introduzione: il fotone come origine della moderna teoria delle particelle e dei campi

Dal punto di vista dell'evoluzione della Fisica, la teoria di Einstein (1905) dell'effetto fotoelettrico è, insieme all'ipotesi di Planck sui quanti di luce, il punto di partenza della Meccanica Quantistica. Sia Planck che Einstein sostennero che la radiazione elettromagnetica è costituita da unità minime ("quanti") che trasportano energia, e l'interpretazione dell'effetto fotoelettrico da parte di Einstein può essere considerata come la conferma più vicina nel tempo e immediata, dal punto di vista sperimentale, dell'ipotesi di Planck. In realtà, l'ipotesi di Einstein, secondo cui la luce è costituita da entità discrete dette "fotoni", è più radicale di quella di Planck, in quanto questi non aveva affermato esplicitamente questo concetto, ma si era limitato a supporre che gli scambi di energia tra radiazione e materia avvengano mediante quantità discrete, multiple di $h\nu$, essendo " ν " la frequenza della radiazione e " h " la costante di Planck. Quindi, secondo Einstein (e secondo la Meccanica Quantistica) la radiazione è effettivamente costituita da unità minime, che però non possono essere considerate particelle da un punto di vista classico. L'ambiguità della natura della radiazione elettromagnetica (che assume quindi un carattere dualistico, corpuscolare e ondulatorio) è stata poi estesa anche alla materia, in quanto - secondo quanto proposto da De Broglie (1916) - anche le cosiddette particelle elementari (e quindi, in particolare, l'elettrone nell'atomo) manifestano la stessa natura, nello stesso tempo corpuscolare e ondulatoria. Inoltre, il carattere discreto della radiazione elettromagnetica è stato esteso a tutte le forze fondamentali (gravitazionale, interazione debole e interazione forte - quest'ultima è responsabile delle intense forze attrattive tra i nucleoni, mentre l'interazione debole regola processi come il decadimento β , le interazioni tra i neutrini e la materia, ecc.). Così esistono anche i quanti del campo nucleare forte (i cosiddetti "gluoni" - dall'inglese "glue" cioè colla) e debole (particelle W^+ , W^- , Z_0) che sono state effettivamente osservate nel 1983, e il gravitone (non ancora osservato).

La non-distinguibilità quantistica tra particelle e campi ha come conseguenza che, mentre nella fisica classica la distinzione tra particelle (cioè la materia) e le forze è molto netta, nella fisica moderna tale distinzione viene superata, dato che i campi trasportano energia sotto forma di particelle. Da questo punto di vista la teoria di Planck e il concetto di fotone di Einstein, che è una chiarificazione e un completamento dell'idea di Planck, hanno posto le basi per una sintesi molto efficace tra il concetto classico ormai superato di particella, come entità localizzabile in ogni istante con una precisione dipendente solo dagli strumenti di osservazione, e quello di campo come un continuum distribuito nello spazio. In compenso, il concetti di particella e di onda, che erano molto chiari su un piano intuitivo (perché corrispondevano bene all'esperienza sensibile del mondo macroscopico) sono stati unificati nel concetto di particella quantistica, le cui proprietà e in particolare il dualismo onda-corpuscolo non corrispondono perfettamente al modo comune di pensare.

Effetto fotoelettrico: le osservazioni sperimentali

L'effetto fotoelettrico consiste nell'emissione di elettroni dalla superficie di un metallo quando questa viene colpita da luce (visibile, ma soprattutto ultravioletta) di frequenza sufficientemente elevata. Ad ogni metallo è associata una specifica *frequenza di soglia* ν_0 della radiazione incidente tale che, se la radiazione ha frequenza $\nu < \nu_0$, l'effetto non ha luogo; si manifesta solo se $\nu > \nu_0$. In tal caso, la superficie emette degli elettroni in misura proporzionale alla intensità della radiazione incidente (quantità di energia trasmessa su unità di superficie e tempo; l'intensità si misura in Watt/m^2). Tale fenomeno è praticamente istantaneo, e cessa immediatamente se cessa la radiazione

incidente. Inoltre, l'energia cinetica con cui gli elettroni sono emessi è una funzione crescente della frequenza della radiazione incidente.

Vi sono almeno due ragioni per cui l'effetto fotoelettrico è inspiegabile dal punto di vista classico. Secondo tale punto di vista, la radiazione è un'onda elettromagnetica e l'energia viene ripartita lungo tutto il fronte d'onda; essa viene inoltre ceduta continuamente al metallo nel tempo. La quantità di energia trasferita in un tempo T dipende solo dalla intensità della radiazione e dall'area della superficie irradiata. Si può ammettere che tale energia venga trasferita agli elettroni di conduzione; se un elettrone acquista abbastanza energia, può vincere le forze di attrazione elettrostatica da parte degli ioni positivi del reticolo e può sfuggire dalla superficie del metallo. Ovviamente, parte dell'energia trasferita al singolo elettrone viene impiegata per permettergli di sottrarsi all'attrazione degli ioni positivi. Tale quantità di energia va sotto il nome di *lavoro di estrazione* dell'elettrone; tale lavoro dipende dal tipo di metallo considerato (di solito, qualche eV ; $1 \text{ eV} = 1 \text{ elettrone-Volt} =$

$1,9 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Quindi, l'energia cinetica con cui l'elettrone evapora dalla superficie del metallo sarà la differenza tra l'energia trasmessagli dalla luce incidente e il lavoro di estrazione, cioè $K = E - L$ essendo K , E , L risp. l'energia cinetica acquistata, l'energia assorbita e il lavoro di estrazione. Il fatto è che l'energia con cui gli elettroni vengono emessi dipende dalla *frequenza* della radiazione incidente; anzi, l'effetto fotoelettrico non ha luogo affatto, se la frequenza è inferiore al valore di soglia. Questa dipendenza dalla frequenza dell'onda incidente non trova giustificazione nella teoria classica, per la quale *non c'è alcuna relazione tra l'intensità della radiazione e la sua frequenza*.

Vi è un secondo aspetto del problema. L'elettrone è una particella assai piccola, mentre l'energia della radiazione incidente è trasportata su un fronte d'onda relativamente molto più esteso: perciò, ogni elettrone riceverebbe, p.es. in un secondo, una quantità di energia di gran lunga inferiore al lavoro di estrazione. Invece, l'emissione di elettroni ha luogo non appena la superficie del metallo viene investita dalla radiazione.

Poiché la teoria classica non era in grado di spiegare il fenomeno, nel 1905 *Einstein* propose di considerare la luce e, in generale, tutte le radiazioni elettromagnetiche, costituita da unità minime dette *fotoni* o *quanti di luce*. Ogni singolo fotone trasporta una ben determinata quantità di energia e di quantità di moto e si muove sempre alla velocità della luce; non esiste cioè nessun osservatore rispetto al quale un fotone possa essere fermo. L'energia di un fotone dipende dalla frequenza della radiazione di cui fa parte secondo la relazione $E = h\nu$, essendo ν la frequenza e h una costante universale detta *costante di Planck*, che vale c.ca $6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$. Quindi l'energia di un singolo fotone è proporzionale alla frequenza, e la costante h funge da costante di proporzionalità.

Il modello per cui la radiazione è un fascio di fotoni spiega molto bene l'effetto fotoelettrico. Infatti, poiché l'energia della radiazione è concentrata nei fotoni, si può pensare che essa venga trasmessa agli elettroni di conduzione del metallo mediante urti fotone-elettrone o mediante *assorbimento* del fotone da parte dell'elettrone: questo significa che *un elettrone non acquista energia a poco a poco in un tempo relativamente lungo, ma in un processo istantaneo che - a giudicare dalle misure effettuate - avviene in meno di 10^{-8} secondi*. Si spiega quindi come l'effetto fotoelettrico sia quasi istantaneo. Ma soprattutto si spiega la dipendenza del fenomeno dalla frequenza della radiazione: se ν è piccola, i fotoni della radiazione incidente trasportano poca energia; se l'energia E è minore del lavoro di estrazione la radiazione non può estrarre nessun elettrone. In base a questo ragionamento si trova che la frequenza di soglia è legata al lavoro di estrazione dalla relazione

$$h\nu_0 = L$$

equazione che è stata verificata con ottima precisione.

Ne segue che l'energia cinetica con cui un elettrone "evapora" per effetto fotoelettrico è data da

$$K = h\nu - h\nu_0$$

relazione anch'essa molto ben confermata dall'esperienza. Nella maggior parte dei casi la frequenza di soglia corrisponde alla regione dell'ultravioletto: non è quindi possibile ottenere l'effetto fotoelettrico mediante luce visibile.

Dualismo onda-corpuscolo

Non bisogna considerare il fotone come una vera e propria particella, cioè come un corpuscolo dotato in ogni istante di una posizione ben precisa, variabile lungo una traiettoria definita. Il fotone non è una particella in senso classico, ma va considerato come un *pacchetto di energia*, cioè come una unità di energia non localizzabile.

Per chiarire questo punto, bisogna considerare che il punto di vista *quantistico* della luce non è conciliabile con quello classico. Infatti una particella non è un'onda, e nell'ambito della fisica classica non vi sono oggetti che presentino dualismo onda-corpuscolo. Peraltro, i fenomeni di interferenza e diffrazione luminose ci assicurano che la luce è un fenomeno di tipo ondulatorio; sembra quindi che l'ipotesi dei quanti di luce contraddica la teoria ondulatoria della luce.

Si può interpretare e risolvere la contraddizione chiedendosi se nei fenomeni di interferenza e diffrazione, il comportamento ondulatorio sia caratteristico del fotone, o se invece si riferisca solo alla radiazione nel suo complesso. Si tratta cioè di stabilire se i fotoni sono onde elementari, la cui risultante complessiva è l'onda elettromagnetica nel senso classico del termine, oppure se non hanno carattere ondulatorio, benché l'abbia l'insieme dei fotoni.

A questo scopo, dobbiamo considerare che il singolo fotone *non è localizzabile*, fino a quando esso non interagisce con la materia. Supponiamo che un fascio luminoso venga fatto passare attraverso una stretta fenditura (di diametro paragonabile alla lunghezza d'onda); in tal caso, l'onda incidente, propagandosi al di là della fenditura, si allarga, e su uno schermo fotografico posto dopo la fenditura e di fronte ad essa appare una serie di cerchi concentrici intorno a una macchia centrale che corrisponde alla luce passata attraverso la fenditura senza essere deviata in modo significativo. Se invece la luce viene fatta passare attraverso due fenditure sufficientemente sottili e vicine, si osserva una figura di interferenza (interferenza e diffrazione sono entrambi fenomeni ondulatori specifici, e il loro verificarsi è indicativo della natura ondulatoria del fenomeno). Le zone oscure della lastra fotografica (che è un negativo) sono quelle colpite dalla luce, quelle chiare no. La luce è composta da una enorme quantità di fotoni. A questo punto, è lecito chiedersi se un singolo fotone è capace di creare una figura di diffrazione o di interferenza? Detto altrimenti: ogni singolo fotone è un'onda, o procede come se fosse un corpuscolo? Per rispondere a questa domanda, dobbiamo osservare che la figura visualizzata sulla lastra fotografica è dovuta alla reazione fotochimica delle molecole che costituiscono l'emulsione della lastra; è insomma un insieme di punti anneriti per interazione con la luce. Secondo l'ipotesi del fotone, ogni molecola della lastra ha reagito con un solo fotone: quando viene assorbito, il fotone si trova in un punto preciso dello spazio ed è, *nell'istante in cui avviene il processo di assorbimento*, una particella localizzata: quindi non si può considerarlo come un'onda, che è un sistema fisico esteso su una zona più o meno vasta dello spazio. Bisogna quindi ammettere che *nei processi di interazione con la materia*, il quanto di luce si comporta come se fosse un corpuscolo. Ciò è confermato da tutta una serie di esperienze, nelle quali un fotone che colpisce un atomo o un elettrone si comporta come un proiettile carico di energia.

Come si spiega allora la figura di diffrazione e di interferenza, che sono un insieme di punti? Evidentemente, i singoli fotoni *passando attraverso la fenditura non procedono tutti nella stessa direzione*: la maggior parte non viene deviata in modo apprezzabile; molti però finiscono ad una certa distanza dal centro della figura. Peraltro, non è possibile stabilire quale è il percorso seguito dai singoli fotoni, perché un rivelatore implica una misura di posizione che distrugge le proprietà ondulatorie della radiazione, impedendo il formarsi della figura di interferenza. L'annerirsi in misura più o meno accentuata della lastra a seconda dei punti ci dice qual è il numero dei fotoni assorbiti in questa o quella posizione: le zone che non hanno reagito alla luce non sono state colpite

da nessun fotone. *La figura di diffrazione (o di interferenza, se si usano per es. due fenditure) fornisce quindi la probabilità che un fotone cada in un certo punto della lastra: la natura ondulatoria della luce e della radiazione elettromagnetica in generale è quindi una conseguenza del comportamento di tipo probabilistico dei fotoni* allorché sono fatti passare attraverso delle fenditure.

Tuttavia, non è possibile stabilire *a priori* quale traiettoria un certo fotone seguirà prima che esso attraversi la fenditura, e in ogni caso non è possibile seguirne il movimento durante il passaggio. Per avere queste informazioni, il fotone deve essere rivelato, cioè bisogna che lo sperimentatore osservi gli effetti del suo passaggio; ma ciò è possibile solo se esso interagisce con la materia, per esempio facendo reagire chimicamente le molecole di una emulsione fotografica. Osservare la traiettoria di un fotone lungo tutto il percorso è quindi in linea di principio impossibile, e tanto vale non attribuire al fotone una traiettoria precisa e una posizione variabile in modo definito nel tempo. Perciò, è possibile solo associare al singolo fotone una probabilità, dipendente dalla posizione, di trovarsi in un certo punto dello spazio, evidenziabile per esempio attraverso l'osservazione di figure di interferenza e diffrazione luminosa.