

Effetto fotoelettrico

Già verso la fine del secolo XIX si era scoperto che un fascio di luce monocromatica incidente su una lastra metallica provocava l'emissione di elettroni (fotoelettroni). Possiamo schematizzare un metallo come un oggetto elettricamente neutro costituito da cariche positive "pesanti" e cariche negative (elettroni) libere di muoversi dentro il metallo, ma sottoposte ad un potenziale che ne impedisce l'uscita in condizioni normali. Se il metallo viene riscaldato o sottoposto a radiazione elettromagnetica gli elettroni possono acquistare un'energia cinetica sufficientemente alta da permettere di superare il potenziale di richiamo del metallo e quindi di "saltare" fuori. L'apparato per misurare l'effetto fotoelettrico si può schematizzare come un involucro trasparente, in cui è praticato il vuoto, contenente un catodo su cui viene fatta incidere della radiazione elettromagnetica (luce visibile o radiazione di frequenza maggiore del visibile) ed un anodo che raccoglie i fotoelettroni emessi dal catodo. La corrente, misurata con un amperometro molto sensibile, è funzione del numero di fotoelettroni emessi nell'unità di tempo dal catodo. Il valore della differenza di potenziale tra anodo e catodo può essere variato da un potenziometro ed è anche possibile cambiarne il segno mediante un'invertitore di polarità. Gli aspetti fenomenologici più rilevanti di questo fenomeno, chiamato **effetto fotoelettrico**, si possono riassumere nei seguenti punti:

1. esiste una frequenza di soglia ν_0 , dipendente dal tipo di metallo, della radiazione incidente al disotto della quale non si verifica nessuno effetto;
2. esiste un potenziale d'arresto (stopping potential) V_0 , indipendente dall'intensità I della radiazione incidente, al di sotto del quale nessun elettrone emesso raggiunge il catodo, quindi l'energia cinetica massima, K_{max} , dei fotoelettroni più veloci soddisfa l'equazione

$$K_{max} = eV_0 \quad (1)$$

ed è indipendente dall'intensità I .) Il valore di V_0 cresce linearmente con la frequenza ν della radiazione incidente;

3. l'emissione dei fotoelettroni è istantanea, per ogni valore di I purché $\nu > \nu_0$.
4. la corrente fotoelettronica i , cioè il numero di elettroni emessi nell'unità di tempo, dipende dall'intensità I della radiazione incidente.

La teoria classica della radiazione può spiegare tale effetto, ma non le sue caratteristiche principali. In effetti classicamente la radiazione è costituita da un campo elettrico $\vec{E}(\vec{r}, t)$, con $I \propto E^2$. In presenza di un campo elettrico gli elettroni sono soggetti ad una forza $\vec{F} = e\vec{E}$ e quindi acquistano energia cinetica. Quindi ci si aspetta:

i) l'esistenza di una intensità di soglia, cioè di una intensità minima al di sotto della quale l'effetto non avviene, almeno in intervalli di tempo ragionevoli, in contrasto con il punto 1);

ii) che K_{max} , e di conseguenza il potenziale d'arresto V_0 , dovrebbe dipendere da I , in contrasto con il punto 2);

iii) che l'emissione dovrebbe avvenire quando un elettrone nel metallo ha assorbito abbastanza energia dalla radiazione incidente sul catodo da superare il potenziale, detto potenziale di estrazione, che, in condizioni normali, impedisce all'elettrone di uscire dal metallo; di conseguenza l'emissione dovrebbe avvenire dopo un intervallo di tempo dall'arrivo della radiazione incidente, intervallo tanto maggiore, quanto più debole è I , in contrasto con il punto 3);

iv) che il numero di elettroni emessi nell'unità di tempo dovrebbe aumentare al crescere dell'intensità I della radiazione incidente, in accordo con il punto 4).

Quindi tre delle caratteristiche principali dell'effetto fotoelettrico non sono spiegabili con la fisica classica. Nel 1905 Einstein propose una spiegazione dell'effetto fotoelettrico assumendo che la radiazione elettromagnetica fosse emessa per pacchetti, **quanti**, di energia, chiamati **fotoni**. Una radiazione di frequenza ν consiste di fotoni di energia $h\nu$, h costante di Planck, e la sua intensità dipende dal numero di fotoni. Nell'effetto fotoelettrico un fotone è completamente assorbito da un elettrone, che aumenta la sua energia di $h\nu$. Ricordiamo che Planck aveva ipotizzato un comportamento di questo tipo solo per l'energia elettromagnetica in una cavità, cioè per onde stazionarie, in quanto il comportamento ondulatorio delle onde elettromagnetiche era stato dimostrato dalle esperienze di interferenza e diffrazione. Einstein arguisce che, siccome le esperienze di interferenza coinvolgono un numero molto grande di fotoni, non esiste realmente una contraddizione tra l'ipotesi dei fotoni ed il comportamento ondulatorio dimostrato dai fenomeni di interferenza, in quanto i risultati di queste esperienze sono valori medi sul comportamento dei singoli fotoni. Per esempio una radiazione di frequenza $\nu = 10^{15} Hz$ (al limite superiore del visibile) di potenza pari a qualche milliwatt implica l'emissione di 10^{15} fotoni nell'unità di tempo. Per dare un'immagine visiva, una massa macroscopica costituita da granelli sottili di sabbia può essere descritta considerandola una distribuzione continua di massa, quindi introducendo il concetto di densità ecc. Solo esperienze che coinvolgono un numero molto piccolo di granelli non possono essere trattate con la fisica del continuo. Ovviamente le esperienze di interferenza mostrano che i fotoni non si spostano come le particelle classiche, cioè lungo traiettorie. Vediamo come l'ipotesi di Einstein spiega l'effetto fotoelettrico. Assumiamo, per semplicità che l'elettrone sia a riposo. Tale ipotesi è giustificata dall'osservazione sperimentale che l'effetto fotoelettrico avviene con luce nel visibile o nell'ultravioletto a cui corrisponde un'energia $E = h\nu \sim 1 - 10 eV$, molto maggiore dell'energia cinetica termica che, a temperatura ordinaria, è dell'ordine di $\sim 10^{-2} eV$.

1. Quando, un elettrone che ha assorbito un fotone di frequenza ν , è emesso dal catodo con energia cinetica K data da

$$K = h\nu - W \quad (2)$$

dove W è il lavoro, necessario per vincere l'attrazione degli atomi e le eventuali perdite di energia cinetica dovuta ad urti, che occorre fornire per rimuovere l'elettrone dal metallo. L'energia cinetica massima K_{max} con cui un elettrone può essere emessa quindi soddisfa un'equazione del tipo

$$K_{max} = h\nu - W_0 \geq 0 \quad (3)$$

dove W_0 , funzione lavoro o energia di estrazione, è una caratteristica del metallo. Quindi esiste una frequenza di soglia, $h\nu_0 = W_0$, tale che per $\nu < \nu_0$ l'eq.(3) non ha soluzione;

2. Si deduce immediatamente che esiste un valore V_0 del potenziale ritardante

$$V_0 = \frac{h\nu}{e} - \frac{W_0}{e} \quad (4)$$

in grado di impedire anche agli elettroni più veloci di raggiungere l'anodo;

3. Siccome un elettrone del catodo acquista, mediante l'assorbimento di un fotone, un pacchetto $h\nu$ di energia, l'emissione avviene immediatamente e non dipende dall'intensità I della radiazione.

Al crescere di I , aumenta il numero di fotoni che incidono sul catodo, quindi aumenta la probabilità per gli elettroni di assorbire un fotone e, di conseguenza, il numero di elettroni emessi.

Quindi l'effetto fotoelettrico fornisce una prova, indipendente dalla radiazione del corpo nero, che la radiazione elettromagnetica è costituita da quanti di energia $h\nu$.

NOTA - Il fotone non ha carica quindi può essere assorbito se il suo quadrimpulso è conservato. L'ipotesi che i fotoni siano assorbiti dagli elettroni implica di considerare questi ultimi legati agli atomi o al metallo in quanto un elettrone libero non può assorbire un fotone, conservando simultaneamente l'energia e l'impulso. Questo sarà discusso più in dettaglio nello studio del cosiddetto Effetto Compton. Gli atomi, essendo molto più pesanti degli elettroni, sono in grado di assorbire una grande quantità di impulso senza una variazione sensibile di energia cinetica.