

# Effetto Fotoelettrico

Simone Zuccher

12 agosto 2023

## Indice

1	Un po' di storia	1
2	Le evidenze sperimentali di Lenard	1
3	La crisi del modello ondulatorio classico	3
4	L'interpretazione quantistica di Einstein	3
5	Conclusioni	4

---

L'effetto fotoelettrico è un fenomeno fisico in cui degli elettroni vengono emessi da una superficie metallica quando viene colpita da una radiazione elettromagnetica di frequenza superiore ad un certo valore, detto "di soglia", che varia a seconda del metallo.

Questo fenomeno ha sollevato interrogativi profondi riguardo alla natura ondulatoria o corpuscolare della luce e fu definitivamente spiegato da Albert Einstein nel 1905, che per questo ricevette il Premio Nobel nel 1921.

## 1 Un po' di storia

Nel 1887, il fisico tedesco Heinrich Rudolf Hertz, mentre studiava la scarica dei conduttori elettrizzati stimolata da una scintilla elettrica per generare e rivelare le onde elettromagnetiche, notò che questo fenomeno era più marcato quando gli elettrodi venivano illuminati con luce *ultravioletta*.

All'inizio del 1888, il fisico italiano Augusto Righi scoprì che una lastra metallica conduttrice esposta a radiazione ultravioletta si caricava positivamente. Righi fu il primo a coniare il termine "fotoelettrico" per descrivere questo fenomeno. Hallwachs, che aveva sospettato ma non dimostrato il fenomeno qualche mese prima di Righi, dimostrò, indipendentemente dall'italiano, che non si trattava di trasporto, bensì di una vera e propria produzione di elettricità.

A seguito di una disputa sulla priorità della scoperta tra i due scienziati, la comunità scientifica risolse la controversia chiamando il fenomeno effetto Hertz-Hallwachs. Successivamente, nel 1905, intuì che l'estrazione degli elettroni dal metallo poteva essere spiegata più coerentemente ipotizzando che la radiazione elettromagnetica fosse composta da pacchetti di energia chiamati *fotoni*.

L'ipotesi quantistica di Einstein non fu accettata per un certo periodo da una parte importante della comunità scientifica, tra cui Hendrik Lorentz, Max Planck e Robert Millikan, vincitori del Premio Nobel per la fisica rispettivamente nel 1902, 1918 e 1923. Essi ritenevano che l'esistenza dei fotoni fosse un'ipotesi inaccettabile, dato che nelle interferenze

le radiazioni elettromagnetiche si comportavano come onde. Nel 1916 Robert Millikan dimostrò sperimentalmente l'ipotesi di Einstein e nel 1921, Arthur Holly Compton confermò l'aspetto corpuscolare della luce tramite i suoi esperimenti sugli urti tra fotoni ed elettroni.

## 2 Le evidenze sperimentali di Lenard

L'effetto fotoelettrico fu studiato da diversi fisici, tra cui Hertz (1857 e 1880), Righi e Hallwachs (1888), Thomson (1899), Lenard (1902) e Millikan (1914).



Figura 1: Philipp Eduard Anton Lenard, nato il 7 giugno 1862 a Pressburg, Ungheria (oggi Bratislava, Slovacchia), morto il 20 maggio 1947 (all'età di 55 anni) a Messelhausen, Germania.

Tuttavia fu il fisico tedesco Philipp Lenard (figura 1), allievo di Hertz, ad intraprendere nel 1902 una metodica serie di esperimenti con l'obiettivo di approfondire la relazione tra l'energia cinetica  $K$  dei fotoelettroni emessi e l'intensità  $I$

della luce incidente. Egli utilizzò una lampada ad arco di notevole potenza come fonte luminosa, cosa che gli consentì di variare l'intensità in un range molto ampio, di circa mille volte.

In riferimento alla figura 2, la luce prodotta dall'arco voltaico attraversa un filtro  $F$  che lascia passare solo luce monocromatica, ossia caratterizzata da una sola lunghezza d'onda  $\lambda$  e relativa frequenza  $f$ . Successivamente la luce monocromatica entra attraverso una finestra di quarzo  $Q$  in una camera a vuoto. Quando la luce monocromatica impatta sulla superficie metallica  $M$  può verificarsi o meno l'emissione di elettroni a seconda della frequenza incidente. Se la frequenza è superiore ad un valore minimo, detto di soglia, vengono effettivamente emessi elettroni che possiedono, mediamente, un certa energia cinetica  $K = \frac{1}{2}mv^2$ , essendo  $m$  la massa dell'elettrone e  $v$  la sua velocità. Questi vengono anche chiamati *fotoelettroni* in quanto emessi tramite effetto fotoelettrico. Essi, pur muovendosi a velocità  $v$ , non lo fanno in modo ordinato. Se invece tra gli elettrodi  $M$  e  $P$  del tubo a vuoto viene applicata una differenza di potenziale, e quindi un campo elettrico in grado di far muovere gli elettroni verso  $P$ , l'amperometro  $A$  rileva un passaggio di corrente  $i$  nel circuito esterno (vedi figura 2).

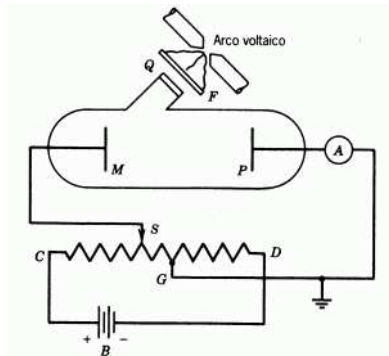


Figura 2: Esperimento di Lenard del 1902

La quantità di elettroni emessi da  $M$  che raggiungono l'elettrodo  $P$  può essere regolata variando la polarità dell'elettrodo  $M$ , collegato alla lastrina di metallo, rispetto all'elettrodo  $P$ , connesso al punto di mezzo  $G$  della resistenza  $CD$ . La differenza di potenziale  $\Delta V = V_P - V_M$  può essere manipolata a piacimento spostando il contatto strisciante  $S$  della resistenza variabile  $CD$  collegata alla batteria  $B$ . In particolare, siccome  $M$  è connesso ad  $S$ , quando  $S$  si trova a sinistra di  $G$  allora  $V_M > V_P$  e  $\Delta V < 0$ , quando  $S$  coincide con  $G$  si ha  $V_M = V_P$  e  $\Delta V = 0$ , mentre se  $S$  si trova a destra di  $G$  allora  $V_M < V_P$  e  $\Delta V > 0$ .

Se  $\Delta V > 0$  è chiaro che i fotoelettroni viaggiano in modo ordinato da  $M$  a  $P$  in quanto sono "respinti" dall'elettrodo negativo  $M$  e attratti da quello positivo  $P$  e l'amperometro  $A$  rileva una corrente  $i$ . Tuttavia se si aumenta progressivamente  $\Delta V$ , ad un certo punto l'intensità di corrente raggiunge un valore "asintotico" massimo  $i_{\max}$  detto corrente di saturazione (vedi figura 3).

Viceversa, se  $\Delta V < 0$ , ossia se  $M$  è l'elettrodo effettivamente "positivo" e  $P$  quello "negativo", allora i fotoelettroni risultano rallentati nel loro moto da  $M$  a  $P$  in quanto "attratti" da  $M$  e "respinti" da  $P$ . Spostando sempre più a sinistra il cursore  $S$ , ossia rendendo sempre più negativa la differenza di potenziale  $\Delta V$ , ad certo punto si osserva che l'amperometro segna corrente nulla. Questo accade perché

la differenza di potenziale è in grado di *arrestare* i fotoelettroni, nonostante essi possiedano un'energia cinetica non nulla. Indicando con  $\Delta V_a$  questo *potenziale di arresto*, ossia la differenza di potenziale che impedisce il passaggio di corrente nel circuito esterno, possiamo osservare che solamente per  $\Delta V > \Delta V_a$  la corrente inizia a fluire, aumentando progressivamente fino a raggiungere un valore massimo che rimane costante.

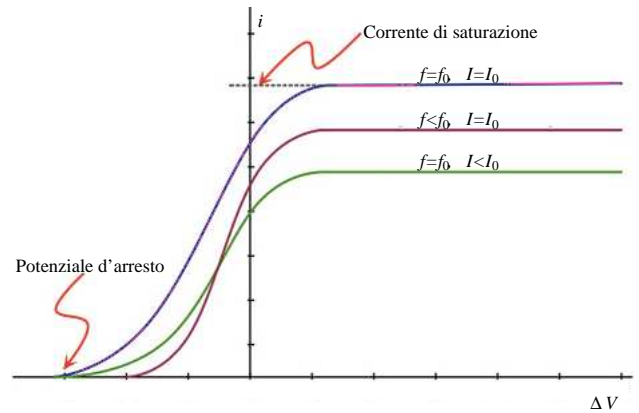


Figura 3: Riassunto grafico delle evidenze sperimentali ottenute da Lenard nel 1902 per un determinato metallo

Lenard osservò che al variare dell'intensità della radiazione incidente il potenziale di arresto non cambiava, mentre cambiava il valore della corrente di saturazione. Un'altra osservazione importante riguarda la frequenza della radiazione incidente: a parità di metallo e di intensità della radiazione incidente, al diminuire della frequenza della radiazione incidente variano sia la corrente di saturazione che il potenziale di arresto.

In figura 3 sono riassunte graficamente le evidenze sperimentali raccolte da Lenard per un determinato metallo, che possiamo riassumere per punti:

- il valore del potenziale di arresto  $\Delta V_a$  è *indipendente* dall'intensità della radiazione incidente;
- il valore della corrente di saturazione  $i_{\max}$  è *direttamente proporzionale* all'intensità della luce incidente;
- i valori del potenziale di arresto  $\Delta V_a$  e della corrente di saturazione  $i_{\max}$  dipendono *entrambi* dalla frequenza della radiazione incidente, in particolare  $\Delta V_a$  varia *linearmente con  $f$  come una retta crescente*, e  $i_{\max}$  è crescente con  $f$ ;
- come conseguenza, esiste una frequenza minima  $f_{\min}$  della radiazione incidente detta *frequenza di soglia*, al di sotto della quale non si osserva alcuna emissione di fotoelettroni, indipendentemente dall'intensità della radiazione incidente o dalla differenza di potenziale  $\Delta V$ .

Lenard si spinse oltre e provò anche a variare il metallo colpito dalla radiazione elettromagnetica. Egli notò che per ogni metallo si ripetevano le evidenze già riscontrate, ma la cosa più sorprendente fu scoprire che la frequenza di soglia  $f_{\min}$  variava a seconda del metallo. Inoltre, egli verificò che l'emissione di fotoelettroni era pressoché istantanea (tempi inferiori al nanosecondo).

Osserviamo che non tutti i fotoelettroni sono emessi con la stessa velocità, per questo la corrente  $i$  misurata diminuisce man mano che  $\Delta V$  diminuisce. Questo implica che in corrispondenza del potenziale d'arresto, *tutti* i fotoelettroni (quindi anche quelli di velocità massima) sono arrestati e la corrente misurata è necessariamente nulla. Ricordando che ad una variazione energia cinetica deve corrispondere una variazione di energia potenziale, si ha

$$K_{\max} = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = e\Delta V_a.$$

La relazione precedente implica che l'energia cinetica massima degli elettroni emessi sia *indipendente* dall'intensità della radiazione incidente, fatto confermato dalla figura 3, dove si nota che il potenziale di arresto a frequenza fissata è indipendente da  $I$ .

### 3 La crisi del modello ondulatorio classico

Pur non essendo estremamente precise dal punto di vista quantitativo, le misure di Lenard consentirono di stabilire alcune caratteristiche fondamentali dell'emissione fotoelettrica:

1. il fenomeno non avviene se la radiazione incidente ha una frequenza inferiore a  $f_{\min}$ , detta frequenza di soglia, che varia a seconda del metallo utilizzato;
2. l'energia cinetica degli elettroni emessi, essendo  $K_{\max} = e\Delta V_a$ , è indipendente dall'intensità della radiazione incidente in quanto il potenziale di arresto con varia al variare di  $I$ ;
3. il numero di elettroni emessi è proporzionale all'intensità della radiazione incidente  $I$ , in quanto lo è anche la corrente di saturazione  $i_{\max}$ , tuttavia (per il punto 2) la loro energia cinetica non dipende da  $I$ ;
4. l'energia cinetica degli elettroni emessi cresce con la frequenza  $f$  della radiazione incidente, in particolare  $K_{\max}$  è direttamente proporzionale alla differenza  $f - f_{\min}$  e la costante di proporzionalità è indipendente dal metallo utilizzato;
5. gli elettroni sono emessi dalla superficie del metallo quasi istantaneamente, anche quando la luce ha intensità molto bassa.

Queste evidenze non erano completamente spiegabili attraverso il modello ondulatorio delle equazioni di Maxwell che a fine '800 aveva visto proprio il suo culmine.

Classicamente, l'emissione di fotoelettroni può essere spiegata in termini di interazione fra l'onda elettromagnetica incidente e gli elettroni nello strato superficiale del materiale. Gli elettroni vengono sollecitati dall'onda esterna ed assorbendo l'energia del campo elettromagnetico trasportato dall'onda, acquisiscono via via energie cinetiche sempre crescenti. Prima o poi, la loro energia cinetica è sufficiente per superare la barriera di potenziale offerta dal materiale (il lavoro di estrazione di un elettrone da un metallo,

$W_e$ ) e possono essere liberati. Essendo l'intensità del campo elettromagnetico pari a

$$I = \frac{1}{2}\epsilon c E_{\text{eff}}^2,$$

due radiazioni elettromagnetiche di pari ampiezza (e quindi di pari valore efficace) ma diversa frequenza trasportano necessariamente la stessa intensità di radiazione, ossia la stessa energia per unità di tempo e di superficie.

In base alla teoria ondulatoria delle equazioni di Maxwell, ci si dovrebbero aspettare i seguenti risultati.

- La corrente misurata dal galvanometro dovrebbe essere proporzionale all'intensità della radiazione incidente. Si noti che questa previsione è l'unica verificata sperimentalmente.
- L'energia cinetica, in particolare quella massima e quindi anche il potenziale d'arresto ( $K_{\max} = e\Delta V_a$ ), dovrebbe dipendere dall'intensità della luce in quanto per intensità maggiori il campo elettrico è maggiore, l'energia trasferita al materiale è maggiore e una volta sottratto da essa il lavoro di estrazione dal metallo (che è costante a parità di metallo) l'energia rimanente dovrebbe essere l'energia cinetica con cui vengono emessi i fotoelettroni, che dovrebbe aumentare con  $I$ .
- L'energia trasferita dall'onda all'elettrone dipende dal modulo del valore efficace del campo elettrico dell'onda (e quindi dalla sua intensità), mentre non dovrebbe in alcun modo dipendere frequenza della luce incidente, fatto che invece Lenard osservò. Se la descrizione classica fosse corretta, un'onda elettromagnetica dovrebbe essere in grado di fornire agli elettroni superficiali del metallo una quantità arbitraria di energia a patto che l'intensità della radiazione sia sufficiente e duri abbastanza a lungo.
- Per due diverse intensità di radiazione incidente si dovrebbero osservare tempi di emissione diversi e quindi ritardi diversi della corrente elettrica in quanto al diminuire dell'intensità occorrerebbe più tempo per trasferire agli elettroni sufficiente energia per essere liberati dal metallo. Utilizzando la teoria ondulatoria delle equazioni di Maxwell si può stimare il tempo di emissione dell'ordine delle ore.

### 4 L'interpretazione quantistica di Einstein

Fu chiaro, nei primi anni del '900, che l'effetto fotoelettrico non fosse in alcun modo spiegabile con la teoria ondulatoria classica delle equazioni di Maxwell. La corretta spiegazione fu data nel 1905 da Einstein, il quale utilizzò il concetto di *quanto di energia* introdotto pochissimi anni prima da Planck, nel 1900, mentre studiava la radiazione di corpo nero, in base al quale  $E = hf$  dove  $h$  è la costante di Planck e  $f$  la frequenza della radiazione.

Einstein basò la sua derivazione su due semplici ipotesi:

1. la radiazione elettromagnetica è composta da singoli pacchetti o *quanti* di energia, detti *fotoni*, localizzati in un piccolo volume spaziale e la loro energia  $E = hf$

resta localizzata in questi pacchetti mentre l'onda si propaga a velocità costante  $c$ .

- Il processo di cessione di energia fra luce ed elettroni del materiale non è continuo (come prevederebbe la visione classica), ma avviene secondo eventi discreti. In particolare, Einstein ipotizzò che nell'interazione tra radiazione elettromagnetica e materia un singolo elettrone potesse assorbire l'energia di *un solo fotone*. Pertanto il processo prevede un'interazione "uno ad uno" tra fotone incidente e fotoelettrone emesso dal metallo.

In base a queste ipotesi, assumendo che il quanto di energia posseduto da un fotone  $E = hf$  sia maggiore del lavoro di estrazione  $W_e$  di un elettrone dal metallo, l'energia rimanente è l'energia cinetica massima del fotoelettrone emesso. In formule:

$$K_{\max} = hf - W_e.$$

È evidente che se  $hf < W_e$  il fotone incidente non possiede abbastanza energia per vincere il lavoro di estrazione dal metallo e non c'è emissione di fotoelettroni. Al contrario, affinché vi sia emissione di fotoelettroni, deve essere

$$hf - W_e \geq 0 \implies f \geq \frac{W_e}{h} = f_{\min},$$

che spiega l'evidenza sperimentale della presenza di una frequenza di soglia. Si osservi che, di conseguenza,  $W_e = hf_{\min}$

Essendo  $K_{\max} = e\Delta V_a$ , si ottiene immediatamente

$$K_{\max} = hf - W_e \iff e\Delta V_a = hf - hf_{\min}$$

da cui

$$\Delta V_a = \frac{h}{e} (f - f_{\min}),$$

che spiega la dipendenza lineare di  $K_{\max}$  da  $f - f_{\min}$  e l'indipendenza della costante di proporzionalità dal particolare metallo. In realtà nel 1916 Millikan pubblicò i dati riportati in figura 4 e fu in grado di ottenere, proprio da dalla pendenza di queste rette, una buona stima della costante di Plank.

Per quanto riguarda l'indipendenza dell'energia cinetica dall'intensità della radiazione incidente, se si raddoppia l'intensità raddoppia anche il numero di fotoni incidenti nella stessa unità di tempo, e di conseguenza raddoppia anche la corrente elettrica a patto di non variare l'energia (e quindi la frequenza) dei singoli fotoni, tuttavia l'energia cinetica dei fotoelettroni dipende unicamente dal potenziale d'arresto, che a parità di metallo non varia con  $I$ .

Infine, per quanto riguarda l'eventuale ritardo nell'emissione di fotoelettroni, se l'energia trasportata dal fotone è sufficiente per estrarre l'elettrone, non c'è motivo perché l'emissione non avvenga istantaneamente.

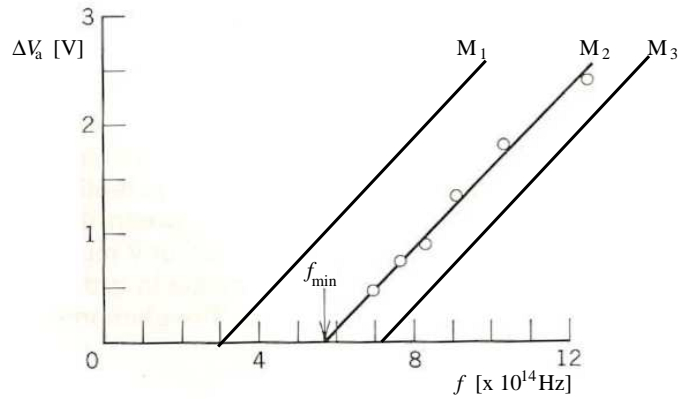


Figura 4: Dipendenza lineare del potenziale d'arresto dalla frequenza della radiazione incidente; si noti la dipendenza della frequenza di soglia  $f_{\min}$  dal particolare metallo (indicato con  $M_1$ ,  $M_2$  e  $M_3$ ) e l'indipendenza della pendenza delle rette dal particolare metallo. Questi dati furono ottenuti da Millikan in una serie di esperimenti pubblicati nel 1916

## 5 Conclusioni

L'effetto fotoelettrico fu definitivamente spiegato da Einstein che riprese il concetto di "pacchetti di energia" discreti introdotti da Planck (anche se inizialmente riluttante) per spiegare lo spettro del corpo nero.

Ma esiste qualche differenza tra il concetto di energia di Planck e quello di Einstein?

Per comprendere meglio il contributo di Einstein alla definizione del concetto di quanto di radiazione, è importante ricordare che la quantizzazione degli scambi di energia, come concepita da Planck per il corpo nero, era una descrizione degli scambi di energia tra materia e radiazione quando queste erano in equilibrio. In pratica, Planck pensava che all'equilibrio i fatti avvenissero come se gli scambi di energia fossero granulari, senza con ciò implicare che questa fosse sempre la vera natura della radiazione luminosa. È grazie ad Einstein e alla sua spiegazione dell'effetto fotoelettrico che il concetto di quanto di energia si affermò come una caratteristica intrinseca della luce stessa.

Nel 1921, Einstein ricevette il Premio Nobel non per la teoria della relatività, ma per la sua spiegazione dell'effetto fotoelettrico. Einstein dimostrò in modo convincente che la quantizzazione dell'energia è una caratteristica intrinseca della struttura stessa della luce, che si propaga sotto forma di pacchetti di energia comportandosi come particelle, oggi note come *fotoni*.