

# Effetto Fotoelettrico

Simone Zuccher

10 aprile 2025

## 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 propagazione delle onde elettromagnetiche previste da Maxwell, osservò casualmente che una scintilla elettrica scoccava più facilmente tra due elettrodi metallici quando questi venivano illuminati da 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 “fotocletrico” per descrivere questo fenomeno. Wilhelm Hallwachs, allievo di Hertz, qualche mese prima aveva mostrato (indipendentemente da Righi) che dischi metallici di zinco caricati negativamente perdevano la loro carica se colpiti da radiazione ultravioletta. Siccome l'effetto non si presentava su dischi caricati positivamente, Hallwachs concluse che il fenomeno non fosse legato ad un semplice trasporto di cariche ma che fosse dovuto ad una vera e propria *produzione* di elettroni quando il metallo veniva colpito da radiazione ultravioletta.

## 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 (1916).



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 pos-

siedono, 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).

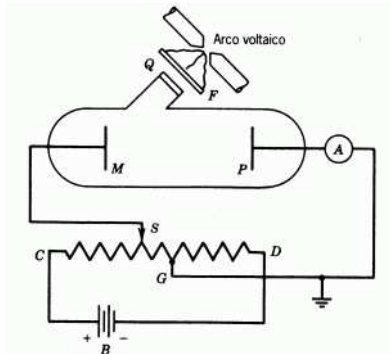


Figura 2: Esperimento di Lenard del 1902

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 un 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.

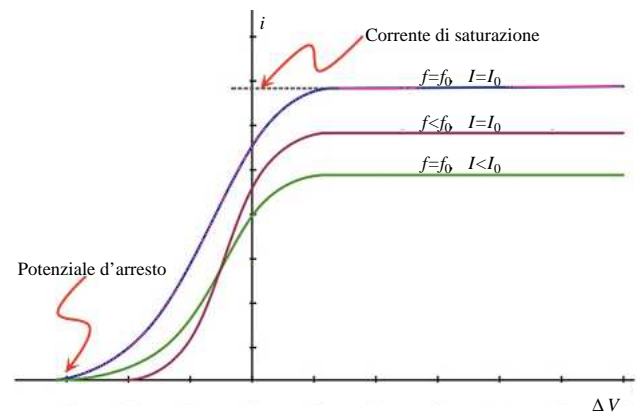


Figura 3: Riassunto grafico delle evidenze sperimentali ottenute da Lenard nel 1902 per un determinato metallo

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. Siccome il lavoro per arrestare l'elettrone con la massima velocità è pari al prodotto tra la sua carica e la differenza di potenziale  $V_a$  necessaria proprio per arrestarlo, e siccome questo

lavoro equivale all'energia cinetica inizialmente posseduta dall'elettrone, allora si ha

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

Siccome dagli esperimenti di Lenard si evince che il potenziale di arresto, a frequenza della radiazione fissata, è indipendente dall'intensità della radiazione incidente  $I$  (vedi figura 3), allora la relazione precedente implica che anche l'energia cinetica massima dei fotoelettroni emessi sia *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 non 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  $c$ .
2. 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  $\Delta V_a$  da  $f - f_{\min}$  e l'indipendenza della costante di proporzionalità dal particolare metallo, fatto osservato nel 1916 Millikan che 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.

Si osservi che, se si raddoppia l'intensità della radiazione incidente  $I$  allora raddoppia anche il numero di fotoni incidenti nella stessa unità di tempo e, di conseguenza, raddoppia anche l'intensità della corrente elettrica  $i$  a patto di non variare l'energia (e quindi la frequenza) dei singoli fotoni. Questo spiega perché l'intensità della corrente di saturazione sia direttamente proporzionale all'intensità  $I$  della radiazione incidente. Tuttavia l'energia cinetica dei fotoelettroni non dipende in alcun modo da  $I$ , questo spiega perché il potenziale d'arresto, a parità di metallo di frequenza della radiazione incidente, non dipenda dall'intensità  $I$  di quest'ultima.

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

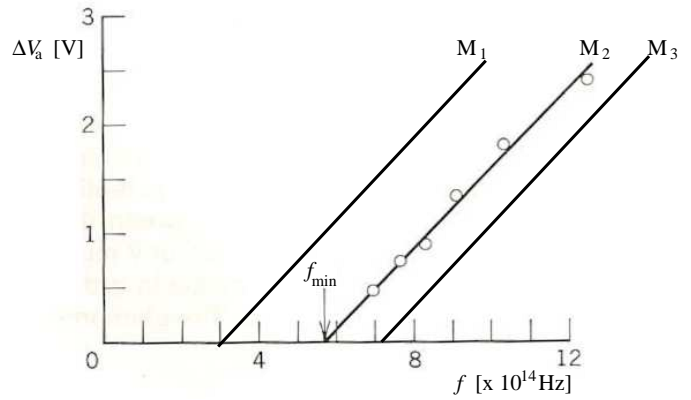


Figura 4: Dipendenza lineare del potenziale d'arresto dalla frequenza della radiazione incidente; si noti la dipendenza della frequenza di soglia  $f_{\min}$  dal particolare metallo (indicato con  $M_1$ ,  $M_2$  e  $M_3$ ) e l'indipendenza della pendenza delle rette dal particolare metallo. Questi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

## 5 Conclusioni

L'effetto fotoelettrico fu definitivamente spiegato da Einstein nel 1905 il quale intuì che l'estrazione degli elettroni dal metallo poteva essere spiegata ipotizzando che la radiazione elettromagnetica fosse composta da pacchetti di energia chiamati *fotoni*, riprendendo così il concetto di “pacchetti di energia” discreti introdotti da Planck (anche se inizialmente riluttante) per spiegare lo spettro del corpo nero.

Questa ipotesi quantistica non fu accettata per un certo periodo da una parte importante della comunità scientifica, tra cui Hendrik Lorentz, lo stesso 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, alla stregua di “corpuscoli”, fosse un'ipotesi inaccettabile, dato che nei fenomeni di interferenza le onde elettromagnetiche si comportavano come onde. Tuttavia proprio Millikan, nel 1916, dimostrò sperimentalmente la veridicità dell'ipotesi di Einstein e nel 1922 Arthur Holly Compton confermò l'aspetto corpuscolare della luce tramite i suoi esperimenti sugli urti tra fotoni ed elettroni.

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 della luce, che si propaga sotto forma di pacchetti di energia comportandosi come particelle, oggi note come *fotoni*.