

Laboratorio di Fisica 3

Effetto fotoelettrico - Misura del rapporto h/e

Materiale occorrente

- una lampada a led;
- un tubo fotomoltiplicatore Philips XP2412 B;
- filtri interferenziali (Balzers e Newport);
- scatola nera;
- generatore di tensione continua;
- un multimetro digitale;
- un picoamperometro digitale.

Obiettivo

Obiettivo di questa esperienza è la verifica dell' effetto fotoelettrico e dell' ipotesi, formulata nel 1905 da Einstein e verificata da Millikan circa dieci anni dopo, secondo cui:

- un' onda elettromagnetica è costituita da quanti di luce, denominati fotoni, ciascuno dei quali trasporta un' energia E_γ proporzionale alla sua frequenza ν tramite la formula

$$E_\gamma = h\nu \quad (1)$$

h essendo la costante introdotta da Planck nel 1900 per descrivere lo spettro della radiazione di corpo nero;

- ogni elettrone può essere estratto dal metallo assorbendo un fotone di energia superiore al lavoro W_0 di estrazione dal metallo (dipendente dal metallo stesso); conseguentemente l' energia cinetica di un fotoelettrone è pari all' energia del fotone assorbito privato di W_0 ;

$$E_e = h\nu - W_0 \quad (2)$$

- l' intensità della corrente dei fotoelettroni è proporzionale al numero di fotoni incidenti sulla lamina nell' unità di tempo.

Verifica dell' ipotesi di Einstein mediante il metodo del potenziale frenante

Tra il 1914 e il 1916 Robert Millikan effettuò accurate misure per la verifica sperimentale dell'equazione fotoelettrica (2) utilizzando cellule fotoelettriche costituite da un bulbo di vetro su era stato depositato a vuoto un catodo di metalli alcalini, come mostrato in Fig.1. La frequenza ν della luce incidente poteva essere variata mediante un monocromatore; un sistema di lenti convergenti provvedeva a focalizzarla sul catodo.

La corrente dei fotoelettroni poteva essere misurata mediante un milliamperometro chiuso su un generatore di tensione continua in grado di generare una d.d.p. continua tra il catodo e l' anodo, il polo positivo essendo connesso al primo, così da generare un campo elettrico nel bulbo tale da opporsi al flusso

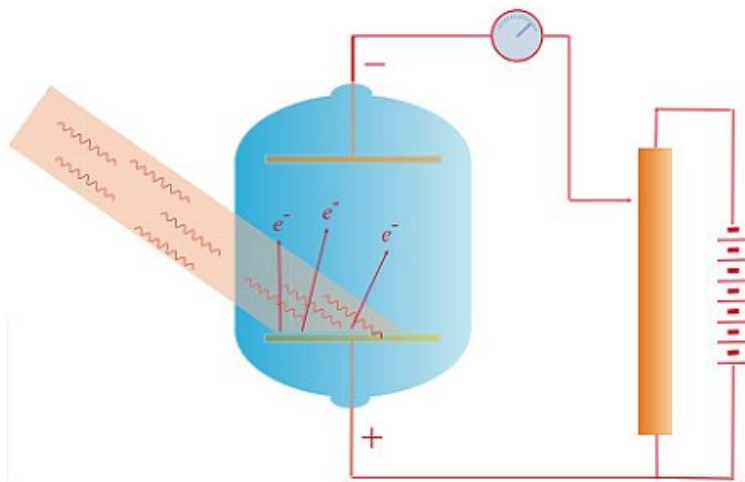


Figure 1: Schema del dispositivo usato da Millikan per la verifica dell' ipotesi di Einstein.

di fotoelettroni verso l' anodo, con il risultato di una riduzione della corrente nel circuito. Per ciascun valore della frequenza della luce incidente, la d.d.p. poteva essere regolata in un intervallo di alcuni V fino ad un valore V_0 tale da arrestare il flusso dei fotoelettroni ed annullarne la corrente. La misura di V_0 forniva pertanto una stima dell' energia cinetica massima dei fotoelettroni da mettere in relazione alla frequenza della luce.

Rappresentando graficamente V_0 in funzione di ν (vedi Fig.2), egli potè verificare la linearità della relazione energia-frequenza prevista dalla 2 e, dalla pendenza della retta di best-fit, ottenere una stima del rapporto h/e in sorprendente accordo (scarto inferiore al 5%) rispetto al valore predetto.

Parte prima: relazione energia-frequenza e misura del rapporto h/e

Metodo ed apparato sperimentale

Per la verifica dell' equazione (2) viene proposto un metodo simile a quello adottato da Millikan. A tale scopo si utilizzino:

- una cella fotoelettrica costituita da un tubo fotomoltiplicatore;
- una lampada a led quale sorgente di luce secondo uno spettro pressoché continuo;
- un set di filtri interferenziali con banda passante di pochi nm, con lunghezze d'onda centrali elencate in Tab.1, con cui variare la frequenza della luce incidente sul fotocatodo;
- un generatore di tensione continua da banco per stabilire la tensione di bias tra catodo ed anodo;
- un voltmetro digitale per la misurare la tensione di bias all' uscita del generatore;
- un picoamperometro su cui chiudere la corrente dei fotoelettroni.

Lo schema elettrico proposto per il circuito in è mostrato in Fig.3. Essendo la fotocorrente dell' ordine del nA, in assenza di bias, è opportuno stimarla inserendo un picoamperometro (errore pari allo $0.4\% + 4$ digits) in serie all' anodo e verso massa e selezionando un opportuno fondoscala.

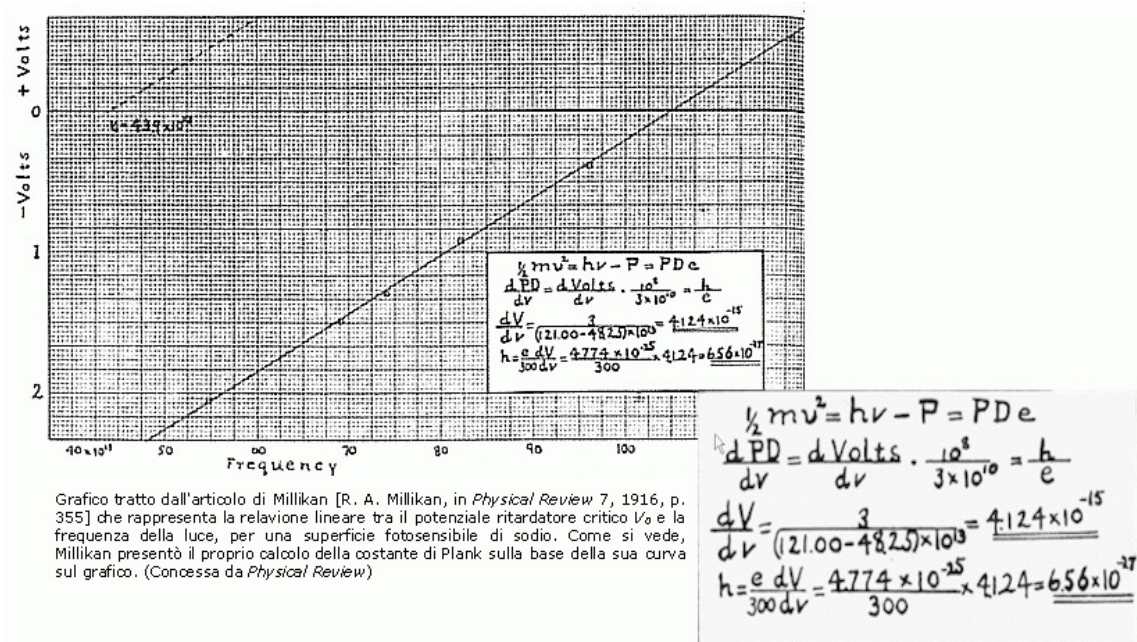


Figure 2: Grafico tratto dall' articolo di Millikan del potenziale frenante in funzione della frequenza della luce incidente su un catodo di Sodio.

L' apparato è montato in una scatola nera (vedi Fig.4), in grado di schermarlo dalla luce ambientale, da aprire ogni volta che si desidera variare la frequenza collocando il filtro nell' apposito supporto. Per posizionare i filtri Balzers (di forma quadrata) si utilizzino le alette metalliche poste in corrispondenza del setto; i filtri Newport (di forma circolare con diametro di 1") devono essere invece inseriti nel foro avendo cura che siano verticali.

Dal lato del vano fotomoltiplicatore, tre boccole sono applicate per realizzare le connessioni rispettivamente al catodo (boccola rossa) ed all' anodo (boccola verde). La boccola nera è flottante ma può essere convenientemente utilizzata come riferimento di terra per il generatore e gli strumenti di misura. Si suggerisce inoltre di completare il circuito, seguendo la convenzione dei colori, collegando il polo positivo del generatore mediante cavo rosso sia al catodo che al voltmetro; si usi invece il cavo verde per chiudere il circuito, collegando l' anodo al picoamperometro.

Table 1: Caratteristiche dei filtri di banda da utilizzare per la selezione delle frequenze della luce.

colore	λ (nm)	tipo
arancione	602	Balzers
giallo	577	Newport
verde	546	Balzers
verde-azzurro	499	Newport
azzurro	449	Balzers
blu	405	Newport

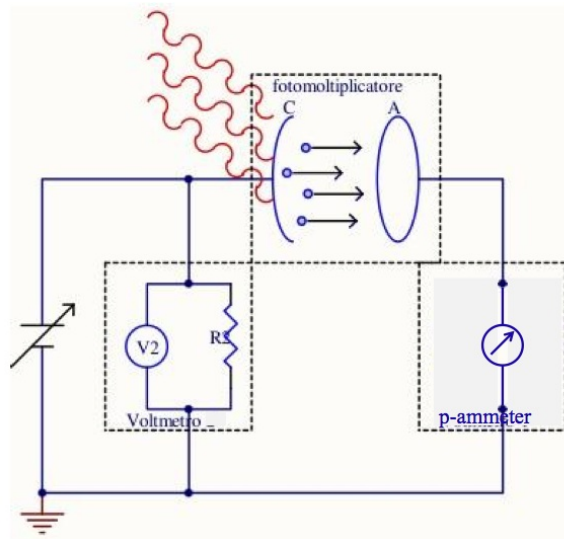


Figure 3: Circuito equivalente per la misura dell' energia cinetica dei fotoelettroni.

Effetti sistematici

Dispersione dell' energia cinetica dei fotoelettroni

Applicando una tensione frenante V tra catodo ed anodo, solo i fotoelettroni con energia cinetica $E_e > eV$ sono in grado di raggiungere l' anodo ed esiste un potenziale V_0 per cui la corrente dei fotoelettroni si annulla. Il prodotto eV_0 dovrebbe fornire l' energia cinetica massima dei fotoelettroni emessi per una determinata frequenza della luce incidente. In realtà, l' effetto di dispersione al livello di Fermi degli elettroni nella banda di conduzione del metallo è tale da rendere meno netta la soglia di estrazione. Riportando in un grafico le misure della corrente in funzione della tensione frenante (come in Fig.5), si può osservare, per valori prossimi a V_0 , una diminuzione in valore assoluto della derivata; i punti formano un ginocchio (il cui andamento è meglio approssimabile con una dipendenza con la radice della tensione piuttosto che lineare) fino ad assestarsi asintoticamente a valori della corrente negativi (vedi prossima sezione) per valori superiori all' altezza minima della barriera di potenziale.

Fotoemissione dall' anodo

Lo spessore del catodo depositato all' interno del bulbo obbedisce alla necessità di ottimizzare la corrente dei fotoelettroni a parità di flusso luminoso incidente. Nel caso del fotomoltiplicatore in questione, l' efficienza fotocatodica (ovvero il rapporto tra il numero di fotoelettroni rispetto al numero di fotoni incidenti) mediata sullo spettro della sorgente si aggira intorno al $15 \div 20\%$ ¹. Non è quindi trascurabile la probabilità che un fotone attraversi la parete del bulbo ed il catodo e, raggiungendo l' anodo, induca l' emissione di un fotoelettrone. La corrente misurata in serie al fotomoltiplicatore risulta pertanto dalla somma algebrica delle correnti di fotoelettroni generati rispettivamente sul catodo e sull' anodo. In particolare, per valori crescenti della tensione frenante, la componente anodica della corrente cresce fino a tendere ad un valore asintotico da sottrarre alla corrente totale misurata per ottenere la sola componente

¹Uno spessore maggiore di metallo aumenterebbe l' efficienza di conversione, ma avrebbe al contempo l' effetto di aumentare la probabilità di interazione dei fotoelettroni all' interno dello stesso metallo, con il risultato di ridurre la frazione di fotoelettroni in grado di raggiungere l' anodo.



Figure 4: Foto della scatola nera; si vedono, da destra, la lampada, il filtro, il setto collimatore, il fotomoltiplicatore.

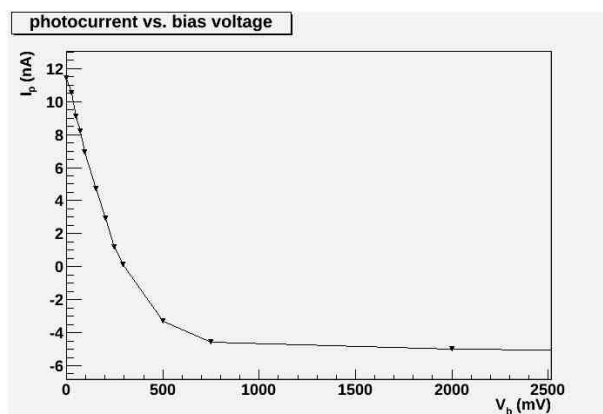


Figure 5: Grafico fotocorrente vs. tensione di bias per il filtro verde a 546 nm.

catodica. Si osservi come la corrente anodica dipenda dalla frequenza e si provi a darne una spiegazione qualitativa.

Procedura operativa

In virtù degli effetti di cui sopra, per ottenere una stima corretta della tensione V_0 non è sufficiente determinare la tensione di annullamento della corrente. Si consiglia di seguirne l'andamento in un intervallo della tensione da 0 fino ad alcuni Volts, addensando in particolare le misure nella zona del ginocchio e nel limite asintotico della corrente anodica e di utilizzare una o entrambe le procedure empiriche sotto descritte. Infine si verifichi la linearità della tensione di azzeramento in funzione della frequenza della luce incidente e si determini il rapporto h/e dal coefficiente della retta di best-fit.

Metodo a)

Si determini il valore asintotico della corrente anodica mediando (o interpolando) le misure effettuate in quel regime e lo si utilizzi per ottenere, dalla corrente totale, il solo contributo della corrente dei fotoelet-

troni dal catodo. Si calcoli quindi la tensione di azzeramento dalla stima dei parametri dall' interpolazione lineare della radice della corrente fotocatodica in funzione della tensione di reverse bias:

$$\sqrt{I_c} = aV + b \rightarrow V_0 = -\frac{b}{a}$$

Metodo b)

Si stimi V_0 dalla tensione di reverse bias corrispondentemente alla quale la corrente fotocatodica è compatibile con zero entro l' errore δI di misura della corrente. Equivalentemente, si determini il valore della tensione per cui la corrente totale differisce dal valore asintotico entro quell' errore. A questo scopo, si interpoli l' intero set di misure (corrispondenti ad una data frequenza della luce incidente) mediante una funzione esponenziale (tipo diodo)

$$I(V) = \bar{I}(e^{a(\bar{V}-V)} - 1)$$

dove \bar{I} costituisce il valore assoluto della corrente nel limite asintotico e \bar{V} la tensione di azzeramento della corrente totale. Dai parametri di best-fit, si calcoli V_0 come la tensione per cui

$$I(V_0) = -I_0 + \delta I \Rightarrow V_0 = \bar{V} + \frac{1}{a} \ln \frac{\bar{I}}{\delta I}$$

La stima di V_0 così ottenuta non dovrebbe dipendere criticamente dal valore utilizzato per l' errore δI (da determinarsi in base all' errore strumentale, alla stabilità ed alla riproducibilità di ciascuna misura). Se da un lato è vero che l' ultima espressione ottenuta di V_0 vi dipende (seppur logicamente), è altresì vero che l' utilizzo di differenti valori di δI modificherebbero coerentemente la determinazione di V_0 per ogni frequenza di una quantità pressoché costante, tale cioè da non incidere apprezzabilmente sulla misura finale di h/e .

Avvertenze

- Si accenda la lampada all' inizio dell' esperienza inserendo la spina in una presa di corrente alla parete. Se non necessario, si eviti di spegnerla se non alla fine delle misure; richiede alcuni minuti per stabilizzarsi.
- Cautela nell' inserimento dei filtri; sono fragili e piuttosto costosi. Possono essere maneggiati tenendoli tra le dita per le superfici laterali. In caso di difficoltà di inserimento, si chiedi aiuto agli assistenti.
- Durante le misure di corrente allontanatevi dal tavolo finché la lettura del picoamperometro non si stabilizza. È facile verificare come il moto di ogni operatore nei pressi del circuito provochi una variazione significativa del flusso del campo magnetico concatenato e, di conseguenza, della lettura di corrente.