

Laboratorio di Fisica 3

Effetto fotoelettrico - Misura del rapporto h/e

Materiale occorrente

- una lampada a led;
- una fotocella Leybold 55877;
- filtri interferenziali (Newport);
- scatola metallica;
- 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 cui era stato depositato a vuoto un catodo alcalino, 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 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

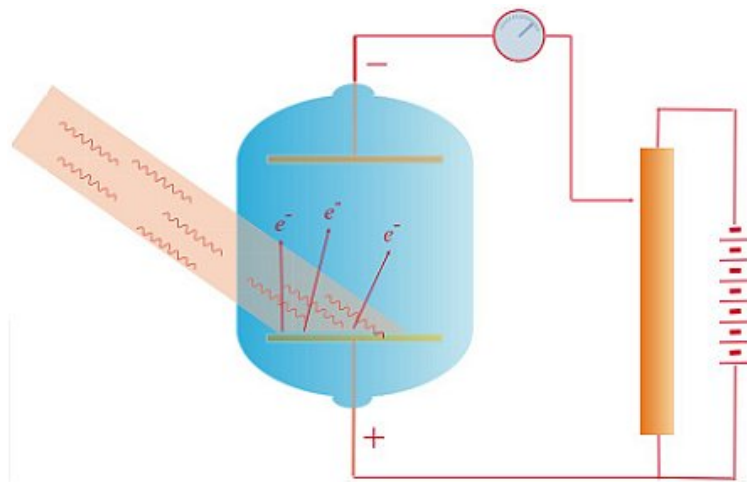


Figure 1: Schema del dispositivo usato da Millikan per la verifica dell' ipotesi di Einstein.

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.

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.

L' apparato è montato in una scatola metallica (vedi Fig.4), in grado di schermarlo dalla luce e dal rumore elettronico ambientale, da aprire ogni volta che si desidera variare la frequenza collocando un filtro (di forma circolare con diametro di 1") nell' apposito supporto. Completano il banco:

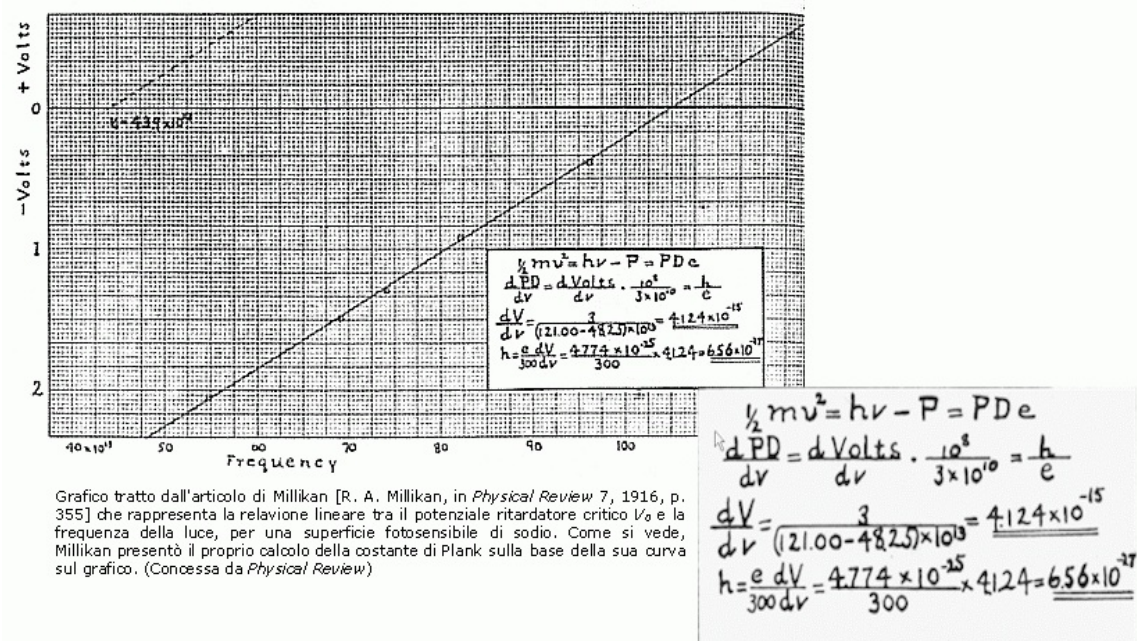


Figure 2: Grafico tratto dall' articolo di Millikan del potenziale frenante in funzione della frequenza della luce incidente su un catodo di Sodio.

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

colore	λ (nm)	$\nu(10^{14}$ Hz)
giallo	577	5.20
verde	546	5.49
verde-azzurro	499	6.01
azzurro	449	6.68
blu	405	7.41

- una fenditura realizzata con diaframma circolare, posta immediatamente a valle della lampada;
- due lenti convergenti, rispettivamente con fuochi fissati rispettivamente nel foro del diaframma e nel centro del fotocatodo;
- un setto oscuro che separi la sorgente di luce dalla fotocella.

Sulla scatola sono montati due connettori coassiali LEMO (etichettati come K ed A) per realizzare le connessioni rispettivamente al catodo (parallelo di generatore di tensione e multimetro) ed all' anodo (picoamperometro). I conduttori esterni dei connettori sono in corto con la scatola e quindi con la terra del generatore.

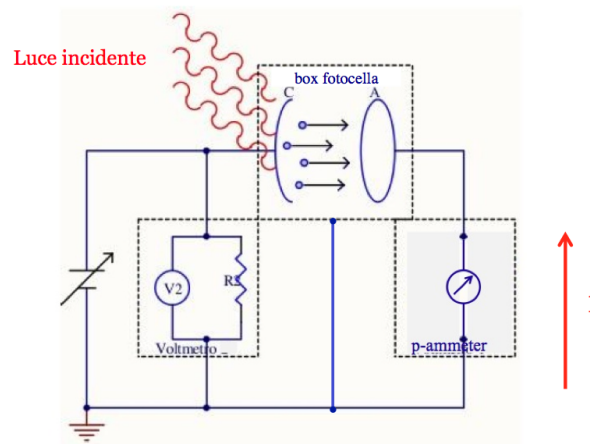


Figure 3: Circuito equivalente per la misura dell' energia cinetica dei fotoelettroni.

Effetti sistematici

Dispersione dello spettro incidente

I filtri che selezionano la frequenza della luce incidente sono di tipo interferenziale. La luce trasmessa è dispersa intorno al valore nominale centrale secondo lo spettro mostrato nel foglietto allegato. Di questa dispersione si tenga conto inserendo un errore sulla scala delle frequenze pari alla semi-larghezza a metà altezza della curva di trasmissione.

Si consideri inoltre che lo spettro della luce trasmessa coincide con quella nominale per incidenza normale. Cambiando l' angolo, varierebbe apprezzabilmente il colore della luce trasmessa (lo si osservi, ad esempio, guardando attraverso il filtro la luce della lampada a neon della stanza). Occorre pertanto fare attenzione durante il posizionamento del filtro, assicurandosi della sua battuta al supporto .

Corrente inversa

La fotocorrente catodica risulta in realtà sovrapposta ad altre correnti, che diremo “inverse” poiché associate alla migrazione di elettroni dall' anodo verso il catodo e probabilmente dovute alla sovrapposizione di vari effetti distinti, tra i quali:

- emissione di fotoelettroni dall' anodo, eventualmente investito dagli aloni del fascio di luce incidente;
- estrazione di elettroni dall' anodo per effetto termoionico (corrente oscura);
- connessione ohmica tra gli elettrodi dovuta al non perfetto isolamento ($R \sim 10^{11} \div 10^{12} \Omega$) delle guaine di rivestimento dei cavi.

Questi contributi, benché di gran lunga minoritari rispetto alla fotocorrente in assenza di bias tra gli elettrodi, crescono con la tensione di frenamento (per questi elettroni il campo elettrico è accelerante) e diventano più significativi per valori prossimi a V_0 , laddove la prima si estingue. È allora necessario minimizzarli o comunque tenerli sotto controllo. In particolare, nel primo caso, occorre ridurre l' apertura del diaframma sicché la sua immagine, messa a fuoco al centro del catodo, abbia dimensioni molto inferiori al raggio dell' anodo. Gli altri contributi non possono evidentemente essere soppressi, ma potrebbero essere misurati direttamente a lampada spenta al termine dell' esperienza (o più semplicemente estrapolati dalla regione in cui $V > V_0$) ed infine sottratti.

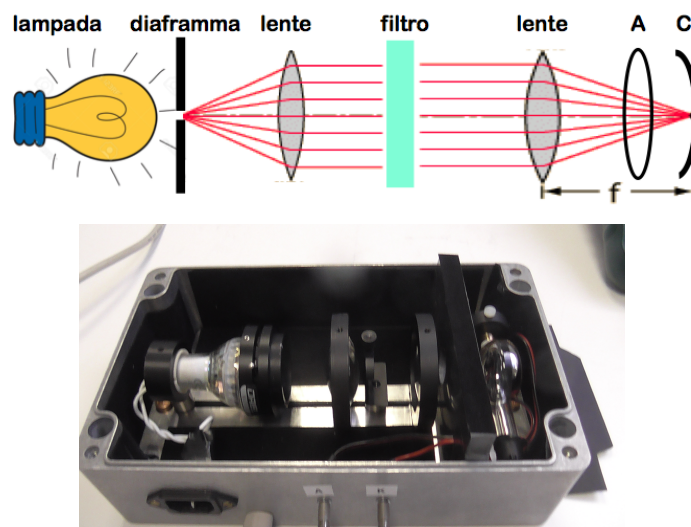


Figure 4: Schema (sotto) e foto del banco ottico (sotto); si individuano, da sinistra, la lampada, il diaframma, le lenti, il filtro, il setto separatore, la fotocella.

Determinazione di V_0

Una stima preliminare potrebbe essere semplicemente ottenuta regolando la tensione di *bias* finché non si annulli la corrente. Questa stima fornisce correttamente l'ordine di grandezza di V_0 ma è affetta da contaminazioni (associate alle correnti inverse) e dunque da errori sistematici da correggere opportunamente.

Si consiglia allora di seguirne con regolarità l'andamento in un intervallo della tensione da $\approx V_0 - 0.5$ V fino a $1.5 \div 2$ V (a seconda della frequenza considerata), addensando in particolare le misure nella zona del ginocchio e di utilizzare una o entrambe le procedure empiriche sotto descritte, come mostrato in figura 5. 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)

L'approccio più semplice consiste nel determinare la fotocorrente al netto della corrente inversa, il cui andamento (pressoché lineare) può essere ottenuto separatamente mediante interpolazione lineare delle misure di corrente per valori della tensione frenante superiori a quella di annullamento. Sul grafico così ottenuto si tracci una linea orizzontale che, come mostrato in figura 6, differisca dal valore asintotico precedente dell'errore stimato della corrente δI , quale risulti sia dall'accuratezza strumentale del picoamperometro che dalla stabilità delle misure. Dall'intersezione si ottenga quindi una stima di V_0 per quella frequenza. In altri termini, V_0 coincide con il valore della tensione frenante al di sopra della quale la corrente fotocatodica sia compatibile con 0.

Il risultato finale non dovrebbe dipendere criticamente dalla stima di δI . Da un lato è vero che la determinazione di V_0 vi dipende, l'intersezione cambiando al variare dell'altezza di quella linea. Dall'altro lato, è altresì vero che, purché si utilizzi uno stesso valore di δI per tutte le misure, la variazione di V_0 sarebbe pressoché costante per ogni frequenza. L'effetto sulla linearità tra v_0 e la frequenza e sulla misura finale di h/e non dovrebbe essere apprezzabile.

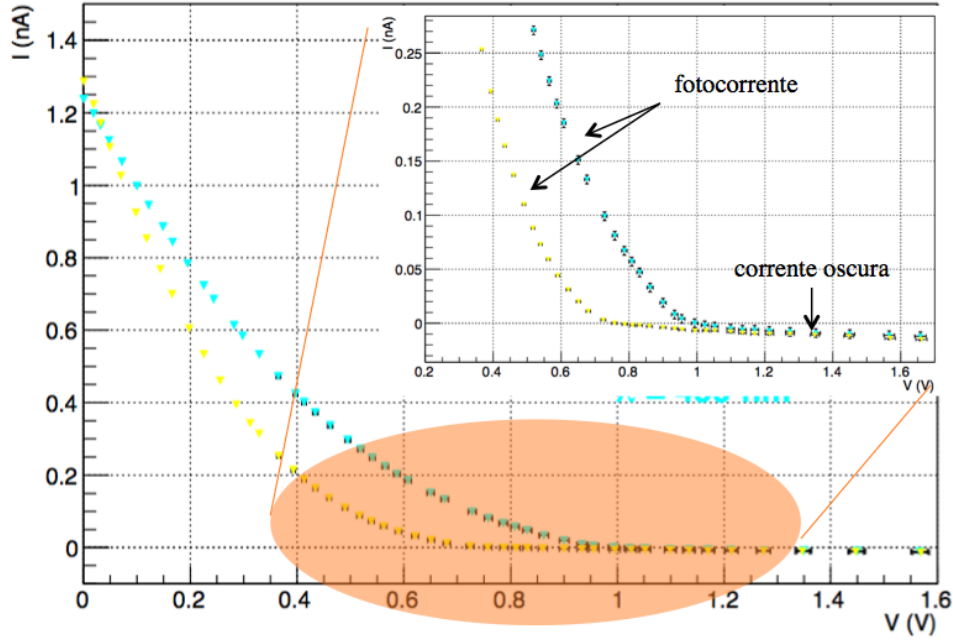


Figure 5: Curva fotocorrente vs. tensione di bias ottenuta per filtri a $\lambda = 577$ e 499 nm, con zoom sul range prossimo a V_0 .

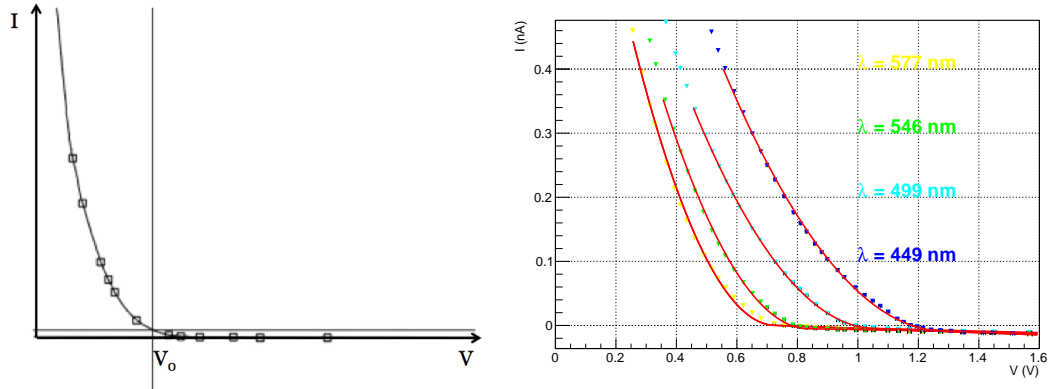


Figure 6: Illustrazione dei metodi per la determinazione di V_0 . A sinistra: metodo a); a destra: metodo b).

Metodo b)

Per ogni frequenza, si stimi V_0 dall' interpolazione della curva corrente-tensione mediante una funzione del tipo

$$I(V) = a(V_0 - V)^2\theta(V_0 - V) + bV + I_0$$

in cui l' andamento di potenza della corrente in funzione della tensione di frenamento è circa quello atteso in prossimità di V_0 in base alla densità degli stati elettronici del metallo nella banda di conduzione ($\theta(V_0 - V)$ è la funzione gradino). I parametri del fit - I_0 e b associati alla corrente inversa, a legato ai parametri del metallo oltre che all' intensità della lampada in quella banda di frequenza - possono essere inizializzati interpolando separatamente le regioni con $I > 0$ e con $I < 0$ rispettivamente con una parabola e con una retta (come nel caso del metodo precedente). Una volta ottenuti i valori iniziali dei parametri, si esegua quindi il fit complessivo sull' intervallo di misura.

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; essendo a basso consumo, potrebbe richiedere una decina di minuti per stabilizzarsi. **ATTENZIONE!** La lampada è alimentata direttamente dalla tensione di rete. I connettori sono protetti, ma il contatto deve essere **ASSOLUTAMENTE** evitato.
- Cautela nell' inserimento dei filtri: sono fragili e piuttosto costosi. Possono essere maneggiati tenendoli tra le dita per le superfici laterali, una volta calzato l' apposito guanto. Prima di iniziare le misure, si familiarizzi con l' inserimento ed il sistema di bloccaggio del filtro sul supporto. In caso di difficoltà di inserimento, si chieda aiuto agli assistenti.
Si eviti inoltre di toccare gli altri elementi del banco ottico.
- È opportuno che la fotocella sia esposta il meno possibile alla luce ambientale, anche durante l' apertura della scatola per la sostituzione del filtro, ciò che potrebbe generare effetti di persistenza della fotocorrente anche per alcuni minuti successivamente alla chiusura. In questo caso si copra il vano della fotocella con un cartoncino scuro.
- Minime (ma apprezzabili in base alla sensibilità strumentale) variazioni nelle letture di corrente potrebbero verificarsi in relazione al moto di ogni operatore nei pressi del circuito, quale effetto di una variazione del flusso del campo magnetico concatenato. Si faccia attenzione allora ad effettuare la lettura in condizioni stazionarie.