

Laboratorio di Fisica 3

Effetto fotoelettrico - Misura del rapporto h/e

Materiale occorrente

- lampada a led;
- fotocella;
- filtri interferenziali (Newport);
- scatola metallica;
- AD2;
- 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 fino ad un valore V_0 tale da arrestare il flusso dei fotoelettroni ed annullarne la corrente. La misura di

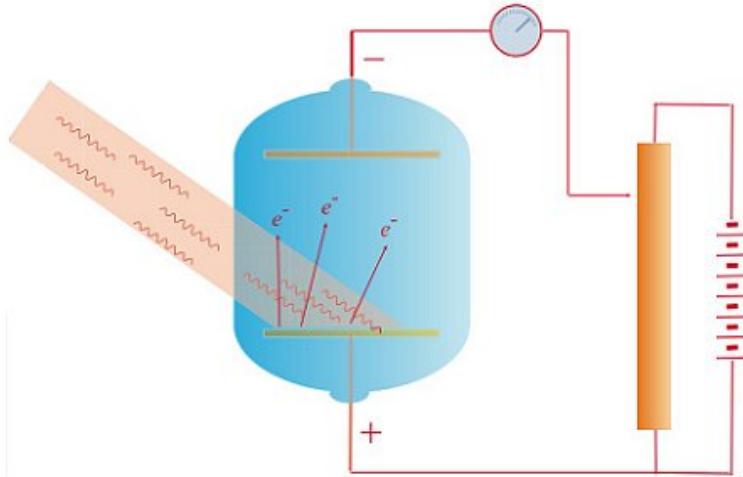


Figure 1: Schema del dispositivo usato da Millikan per la verifica dell'ipotesi di Einstein.

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 utilizza un apparato sperimentale costituito da:

- una cella photoelettrica Leybold 55877;
- una lampada a led quale sorgente di luce secondo uno spettro pressoché continuo;
- un set di filtri interferenziali Newport con sezione di 1", lunghezze d'onda centrali elencate in Tab.1, con cui variare la frequenza della luce incidente sul fotocatodo, e banda passante di pochi (~ 10) nm;
- un picoamperometro su cui chiudere la corrente dei fotoelettroni;
- un AD2 per generare e misurare sia la tensione di *bias* che quella generata del convertitore corrente-tensione all' uscita del picoamperometro.

L'apparato è montato in una scatola metallica (vedi Fig.3), in grado di schermarlo dalla luce e dal rumore elettronico ambientale. Per variare la frequenza della luce che illumina la cella photoelettrica si utilizzano i filtri di forma circolare da apporre nell'apposito supporto. Si raccomanda di schermare la cella utilizzando il cartocino a disposizione ogni volta che si apre la scatola. Completano il banco:

- una fenditura realizzata con diaframma circolare, posta immediatamente a valle della lampada;

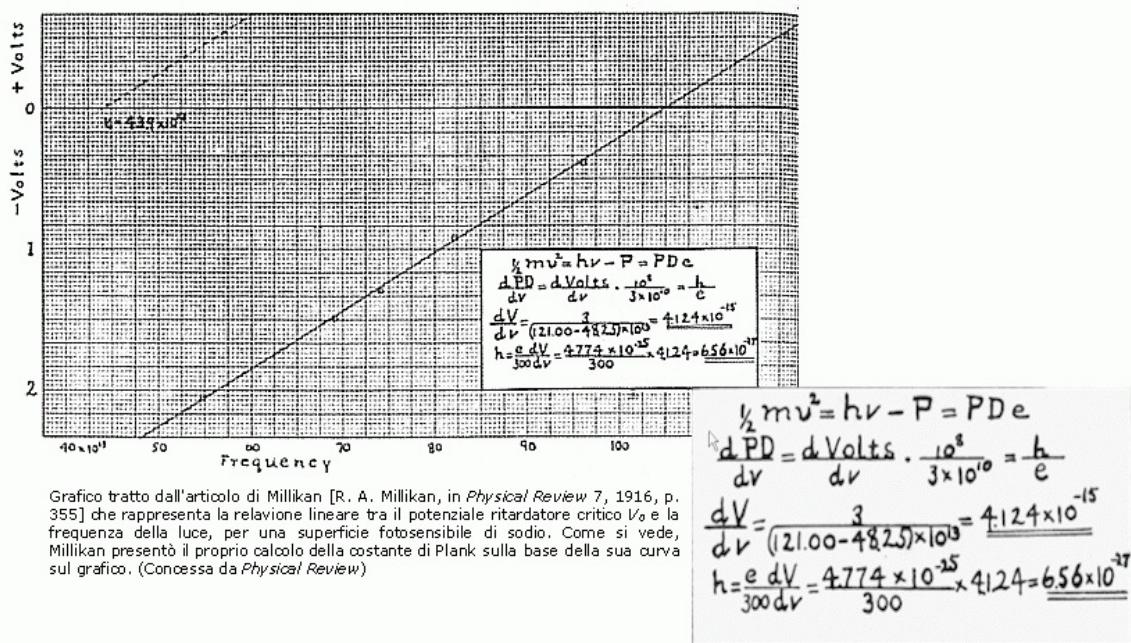


Figure 2: Grafico tratto dall'articolo di Millikan [R. A. Millikan, in *Physical Review* 7, 1916, p. 355] che rappresenta la relazione lineare tra il potenziale ritardatore critico V_0 e la frequenza della luce, per una superficie fotosensibile di sodio. Come si vede, Millikan presentò il proprio calcolo della costante di Plank sulla base della sua curva sul grafico. (Concessa da *Physical Review*)

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

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

- 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 (in parallelo al generatore di tensione WG1 ed al canale 1 dell' oscilloscopio dell' AD2) ed all'anodo (collegato all' ingresso del picoamperometro). I conduttori esterni dei connettori sono in corto con la scatola e quindi con la terra della rete.

Schema di connessione

Lo schema elettrico proposto per il circuito è mostrato in Fig.4. Essendo la photocorrente dell'ordine del nA, in assenza di bias, è opportuno stimarla inserendo un picoamperometro (errore analogico sulla corrente

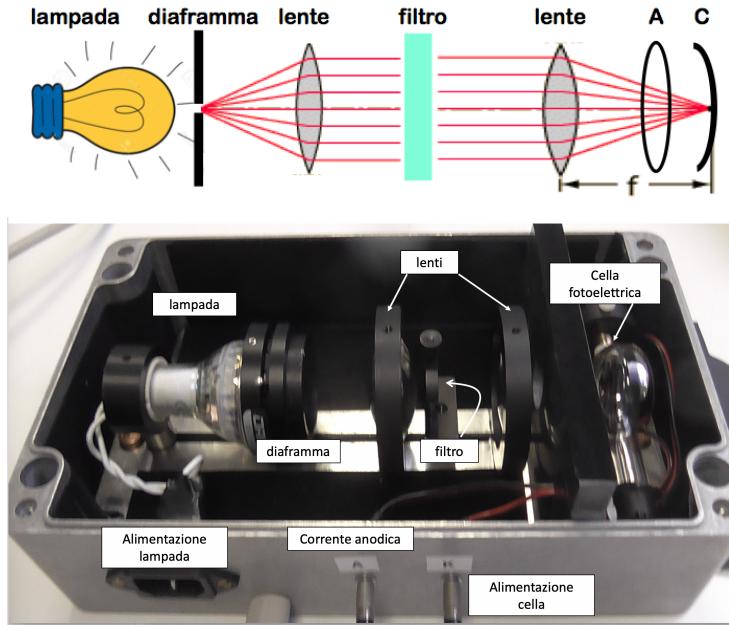


Figure 3: Schema (sotto) e foto del banco ottico (sotto); si individuano, da sinistra, la lampada, il diaframma, le lenti, il filtro, il setto separatore, la fotocellula.

pari allo 0.4% della lettura¹⁾ in serie all'anodo e verso massa e selezionando un opportuno fondoscala.

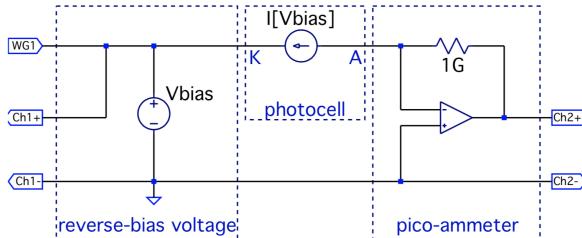


Figure 4: Circuito equivalente per la misura dell'energia cinetica dei fotoelettroni.

I due apparati sperimentali disponibili differiscono leggermente per il modello di picoamperometro utilizzato. Nel caso del KEITHLEY-595 QUASISTATIC CV METER dopo l'accensione si deve selezionare la misura di corrente, premendo il tasto "current", inoltre si deve azzerare l'apparato premendo "zero check" così che si spenga il led corrispondente. Nel caso di KEITHLEY-485 AUTORANGING PICOAMMETER è sufficiente accendere ed accertarsi che sia utilizzato il range con 2nA di fondo-scala.

Differenti sono anche gli schemi di connessione del segnale di corrente anodica all'ingresso dell'AD2 dal momento che, nel caso del secondo strumento, il guadagno della conversione corrente-tensione è 10 volte inferiore al primo ed ha un segno invertito. Per compensare questa differenza ed utilizzare i

¹⁾L'errore successivo alla conversione della fotocorrente in tensione dovrà includere anche un contributo indipendente legato alla misura di tensione su un canale dell'oscilloscopio dell'AD2, con una scala di 200 mV/div.

canali dell'AD2 nello stesso range, l' uscita di tensione del Keithley-485 passa attraverso un amplificatore invertente di guadagno di modulo, montato sulla breadboard, prima di essere inviato all' ingresso di Ch2. L' amplificatore è realizzato con un operazionale TL081, che necessita essere alimentato utilizzando le linee a ± 5 V del Supply dell' AD2.

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 uno spettro pressoché piatto in un intervallo di larghezza pari a 10 nm centrato intorno al valore nominale e pressoché nullo al di fuori. Della dispersione si tenga conto inserendo un errore sulla scala delle frequenze pari alla RMS della curva di trasmissione.

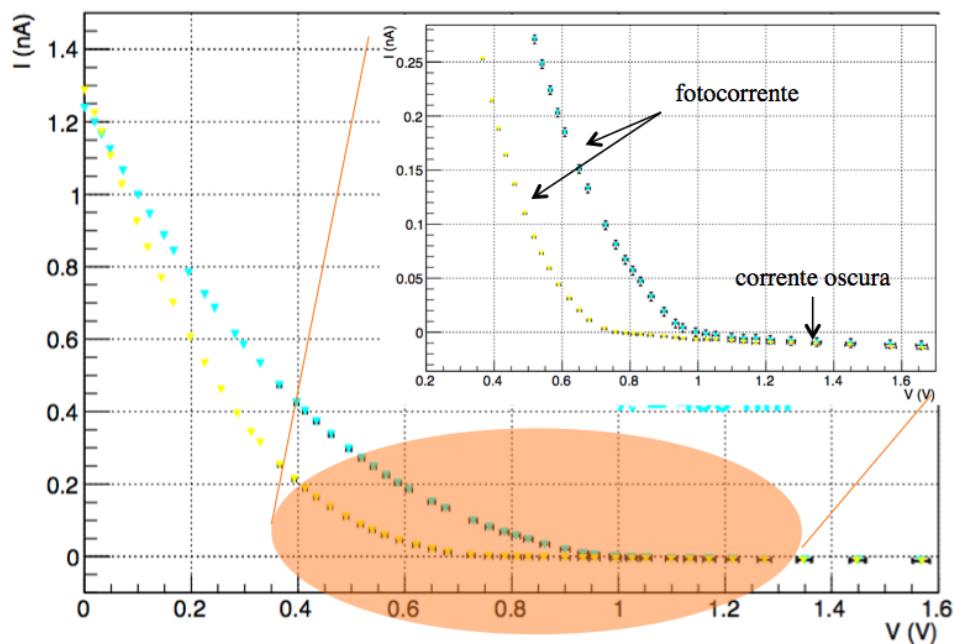


Figure 5: Curva photocorrente vs. tensione di bias ottenuta per filtri a $\lambda = 577$ e 499 nm, con zoom sul range prossimo a V_0 .

Corrente inversa

La photocorrente 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.

I primi due 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 corrente dei fotoelettroni emessi dal catodo 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.

Acquisizione delle curve fotocorrente vs. tensione di bias

Si può utilizzare l'AD2 sia per la generazione della tensione di frenamento della fotocorrente (in un intervallo tra 0 e 2V) nonché per la misura di quest'ultima attraverso la lettura del picoamperometro, che ha uno stadio di uscita di tensione proporzionale alla corrente misurata (realizzato, come mostrato nel circuito equivalente di figura 4, mediante un convertitore corrente-tensione che genera una tensione continua di 1V in corrispondenza di una corrente 1 nA).

Per tutte queste operazioni è disponibile il workspace

fotoelettrico.dwf3work

(disponibile nella cartella dell'esercitazione su *Google Drive* nonché sul disco dei PC in laboratorio connesso all'AD2) che:

- genera su WG1 una rampa di tensione tra 0 e 2V;
- misura la stessa tensione sul canale 1 dell'oscilloscopio;
- misura la tensione in uscita dal picoamperometro sul canale 2;
- converte quest'ultima nella fotocorrente (in nA) e la mostra in modalità XY in funzione della tensione di bias.

Un esempio di curve ottenute è mostrato in figura 5.

Determinazione di V_0

È possibile ottenere una stima preliminare della tensione di azzeramento della fotocorrente, per una particolare frequenza della luce, semplicemente estraendo dalle curve ottenute dall'AD2 (per il corrispondente filtro) la tensione per cui si annulla 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.

Per questo motivo proponiamo di procedere attraverso i seguenti passi.

Misura della corrente inversa

Pur con la lampada già accesa, si può oscurare il vano della fotocella interponendo un setto opaco (foglietto di cartone) ed, utilizzando lo stesso workspace, ottenere preliminarymente un andamento della corrente "oscura" in funzione della tensione di bias nello stesso intervallo di misura. Se fossero verificate le ipotesi della sezione precedente (se cioè la corrente in assenza di illuminazione fosse puramente ohmica), detto andamento dovrebbe risultare di proporzionalità diretta (ovvero lineare e con offset nullo).

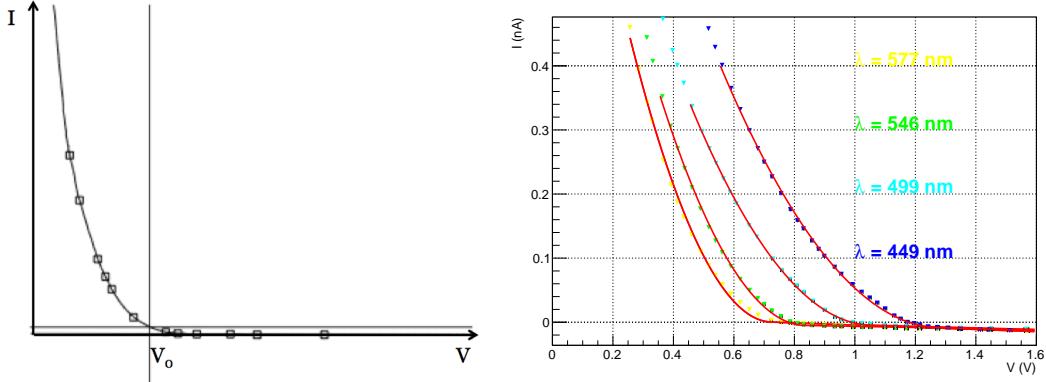


Figure 6: Illustrazione dei metodi per la determinazione di V_0 . A sinistra: metodo preliminare; a destra: interpolazione.

Interpolazione delle curve e stima di V_0

Per ogni frequenza, V_0 può essere ottenuta dall’interpolazione della curva corrente-tensione mediante una funzione del tipo

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

in un intervallo di tensioni prossime a V_0 (orientativamente a partire da tensioni $V \geq V_0 - 0.5 \text{ V}$). I parametri I_0 e b sono associati alla corrente inversa (nelle ipotesi precedenti non dovrebbero dipendere dal filtro e $I_0 \sim 0$) e possono essere fissate interpolando la corrente oscura di cui al paragrafo precedente. L’esponente α , che determina l’andamento di potenza della corrente in funzione della tensione di frenamento, dipende dalla densità degli stati elettronici del metallo nella banda di conduzione e da effetti legati alla successiva interazione dei fotoelettroni con il bulbo delle fotocella. Anche in questo caso è quindi ragionevole assumere che sia indipendente dalle caratteristiche della luce incidente (e che quindi abbia lo stesso valore per tutte le curve). È possibile che il valore di α che ottimizza l’accordo con i dati risulti perciò maggiore di 3/2.

L’ulteriore parametro a , legato alla normalizzazione della fotocorrente, dipende invece dalla lunghezza d’onda del filtro, dal momento che vi dipendono sia l’intensità spettrale della lampada nella banda di selezione del filtro, che la sezione d’urto dell’effetto fotoelettrico alla corrispondente energia.

Una possibile strategia di fit potrebbe essere allora quella di fissare i valori dei parametri comuni (I_0 e b dai fit della corrente inversa, α ad un valore tentativamente uguale a 2.5) e di lasciar variare liberamente V_0 ed a a partire da valori iniziali “sensati” (per V_0 si potrebbe utilizzare il risultato del metodo precedente, per a il valore ottenuto dalla misura della fotocorrente a tensione nulla).

Una procedura più corretta (anche se più difficile da implementare) consiste in un fit simultaneo di tutte le curve, in cui siano lasciati liberi tutti i parametri con l’ulteriore vincolo di valori comuni per tutti quelli indipendenti dal filtro.