

Efectul fotoelectric. Constanta lui Planck.

Obiective

Scopul acestei lucrări de laborator este determinarea experimentală a constantei lui Planck prin studiul efectului fotoelectric folosind metoda propusă de Millikan [R.A. Millikan, Phys Rev. 7,355 (1916)].

Teorie

Efectul fotoelectric constă în emisia de electroni din suprafață unui material când acesta este iluminat. Acest fenomen, care la prima vedere pare relativ simplu, este de o importanță deosebită deoarece acesta nu poate fi explicat în cadrul teoriei clasice a electromagnetismului (a lui Maxwell). Rezolvarea acestui aparent paradox a fost realizată în anul 1905 de către Einstein prin dezvoltarea unei teorii radicale la aceea vreme care presupune că energia luminii este cuantificată.

Dispozitivul experimental folosit pentru punerea în evidență a acestui fenomen este format dintr-un tub vidat, numit celulă fotoelectrică. În tub există un anod metalic (A) și un catod metalic (C) care sunt separați și între care nu există contact electric. Atât catodul cât și anodul sunt conectați la un circuit electric extern ce conține un ampermetru (A), un voltmetru (V) și un potențiomtru cu ajutorul căruia putem aplica tensiuni diferite între catod și anod.

Dacă celula fotoelectrică nu este iluminată curentul măsurat de ampermetru este zero indiferent de potențialul pe care îl aplicăm între catod și anod. Aceasta este de așteptat, deoarece nu există contact electric între catod și anod.

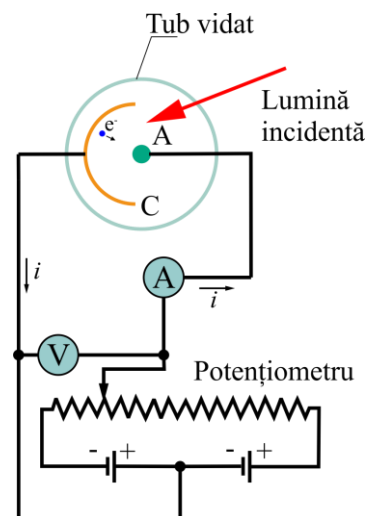


Fig. 1 Dispozitiv experimental folosit pentru studiul efectului fotoelectric.

O să iluminăm anodul și o să facem două experimente. În primul experiment o să iluminăm anodul cu lumină monocromatică, iar potențialul între A și C îl fixăm la zero $V_{AC} = 0$. Ampermetrul o să ne indice un curent electric, adică prin iluminarea catodului se obține un curent electric în circuit. Deoarece între catod și anod nu există contact electric, concluzia la care ajungem este că prin iluminarea catodului C din acesta sunt expulzați electroni iar unii dintre ei o să ajungă pe anodul A și astfel se va închide un curent electric prin circuit. În continuare o să aplicăm tensiuni diferite V_{AC} între anod și catod

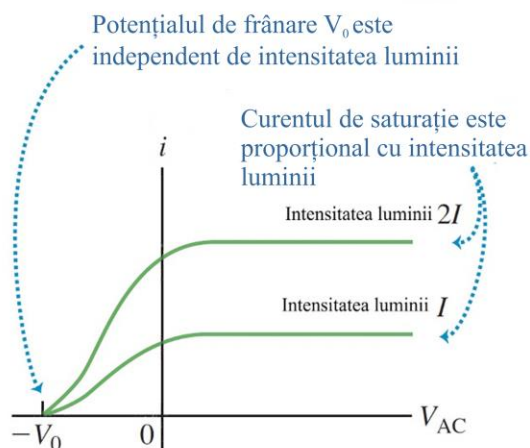


Fig. 2 Curentul prin circuit la diferite tensiuni V_{AC} și două intensități diferite ale luminii incidente.

și o să măsurăm curentul prin circuit (Fig. 2). Pentru tensiuni pozitive (adică + pe anodul A și - pe catodul C) curentul electric crește puțin și apoi ajunge la o valoare de saturație, care depinde de intensitatea luminii. Curentul de saturație se obține când toți electronii emiși de catod sunt colectați de anod. Valoarea curentului de saturație depinde de intensitatea luminii. Dacă aplicăm tensiune negativă (adică - pe anodul A și + pe catodul C), curentul scade și pentru o anumită valoare V_0 , numită potențial de frânare, acesta devine zero. *De ce devine curentul zero?* Deoarece acum catodul C este polarizat +, electronii emiși de acesta o să fie atrași înapoi. La potențialul V_0 toți electronii care sunt emiși de catod sunt atrași înapoi iar curentul în circuit o să devină 0. Aceasta înseamnă că energia cinetică maximă a electronilor emiși de catod o să fie egală cu energia asociată potențialului V_0 :

$$E_{c,max} = q_e V_0, \quad (1)$$

unde $q_e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ este sarcina fundamentală (sarcina electronului în modul).

O observație importantă este că potențialul de frânare V_0 nu depinde de intensitatea luminii. Acest rezultat experimental este inexplicabil în

contextul fizicii clasice. Din punct de vedere al teoriei lui Maxwell, lumina monocromatică este

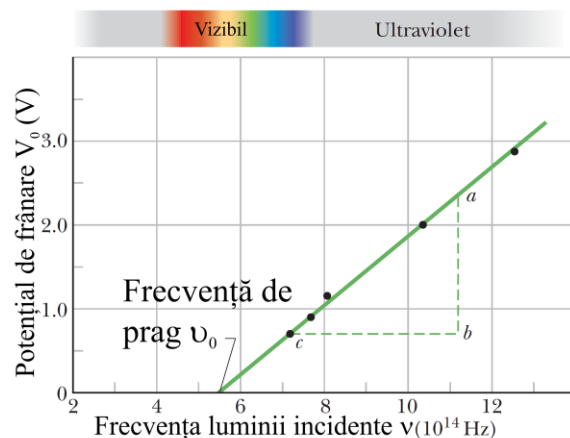


Fig. 3 Potențialul de frânare în funcție de frecvența luminii incidente.

o undă electromagnetică care oscilează sinusoidal. Un electron din catod sub influența luminii trebuie să oscileze sinusoidal grație forței electrice oscilante datorate câmpului electric al undei electromagnetice. Dacă amplitudinea oscilației electronului este suficient de mare, electronul ar trebui să se desprindă din suprafața catodului și să fie ejectat de aceasta. Astfel, dacă o să creștem intensitatea undei electromagnetice și implicit a câmpului electric oscilant a acesteia, electronul ar trebui să fie ejectat cu o energie mai mare. Adică, măbind intensitatea luminii electronii ejectați trebuie să devină mai energetici. Totuși, aceasta nu se întâmplă. Pentru lumină monocromatică (de o frecvență dată), *indiferent de intensitatea luminii, electronii ejectați sunt la fel de energetici.*

Al doilea experiment pe care o să-l realizăm constă în iluminarea fotocelulei cu lumină de frecvențe diferite (culori diferite) și determinarea potențialului de frânare. Dacă reprezentăm grafic această dependență o să obținem un grafic similar cu cel din Fig. 3 [acest grafic este reprodus după datele experimentale obținute prima dată de Millikan în R.A. Millikan, Phys.

Rev. 7,355 (1916)]. Observăm că efectul fotoelectric se produce numai pentru o valoare a

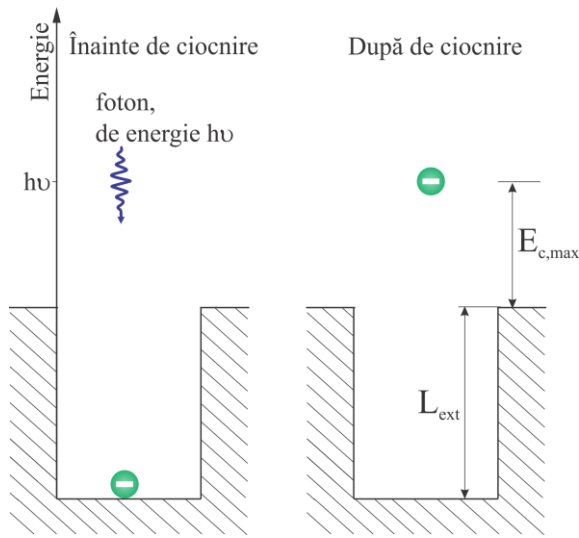


Fig. 4 Reprezentare schematică a procesului de ciocnire dintre un foton și un electron aflat la suprafața catodului. După ciocnire energia electronului crește cu $E_{c,max} + L_{ext}$.

frecvenței luminii mai mare decât o valoare numită frecvență de prag (ν_0), indiferent de intensitatea luminii. Acesta este un alt rezultat inexplicabil pentru fizica clasică. Dacă lumina este o undă electromagnetică, este de așteptat ca indiferent cât de mică este frecvența, electroni să fie oricând expulzați de lumină dacă aceasta are intensitate suficient de mare. Aceasta nu se întâmplă. *Pentru lumină sub frecvență de prag, efectul fotoelectric nu are loc*, indiferent de cât de intensă este sursa de lumină. O altă observație este că potențialul de frânare, *adică energia cinetică maximă a electronilor expulzați din suprafața catodului, depinde liniar de frecvența luminii*.

Pentru a explica aceste observații experimentale, pornind de la conceptul de cuantă de energie a lui Planck, Einstein a propus un model în care lumina nu este o undă electromagnetică ci este formată din particule (cuante), numite fotoni, fiecare având energia $\varepsilon = h\nu$, unde $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$ este constanta lui Planck. În acest

model propus de Einstein un foton ciocnește un electron din catod. În procesul de ciocnire fotonul este absorbit de electron și energia lui este transferată electronului. Energia electronului o să crească și eventual o să fie suficientă astfel încât electronul să poată să fie ejectat din suprafața catodului (Fig. 4). În acest model, legea conservării energiei, asociată procesului de ciocnire, se scrie:

$$h\nu = E_{c,max} + L_{ext}, \quad (2)$$

unde $h\nu$ este energia fotonului înainte de ciocnire iar suma $E_{c,max} + L_{ext}$ este câștigul în energie al electronului după ciocnire. $E_{c,max}$ este energia cinetică a electronului după ce părăsește suprafața catodului iar L_{ext} este energia minimă pe care trebuie să o primească electronul pentru a putea părăsi catodul (adâncimea gropi de potențial). Această energie se numește lucru mecanic de extracție și depinde de materialul din care este făcut catodul.

Putem să rescriem legea conservării energiei astfel:

$$h\nu = q_e V_0 + L_{ext}, \quad (3)$$

sau

$$V_0 = \left(\frac{h}{q_e}\right) \nu - \frac{L_{ext}}{q_e}, \quad (4)$$

Putem să observăm că relația de mai sus implică dependența liniară a potențialului de frânare în funcție de frecvența luminii incidente, în acord cu datele experimentale din Fig. 3. Panta acestei dependențe este $\left(\frac{h}{q_e}\right)$. Mai mult decât atât, putem să observăm că pentru $\nu_0 = L_{ext}/h$ energia cinetică a electronilor emiși de catod este zero. Aceasta înseamnă că ν_0 este o frecvență de prag, sub care efectul fotoelectric nu are loc, în acord cu rezultatele experimentale.

Înainte de a realiza experimentul *răspundeți la următoarele întrebări:*

- 1) Ce reprezintă efectul fotoelectric ?

- 2) De ce acest fenomen a fost considerat un paradox în cadrul teoriei electromagnetice clasice (care observații experimentale nu pot fi explicate în cadrul teoriei lui Maxwell)?

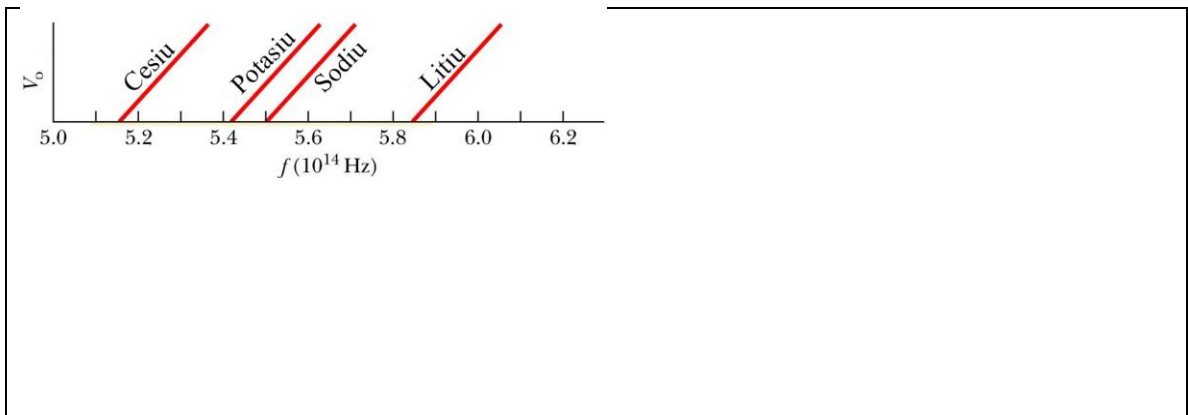
- 3) Ce reprezintă un foton ?

- 4) Dacă avem un led de culoare verde și un led de culoare roșie, care dintre cele două leduri emit fotoni de energie mai mare? De ce?

- 5) Anodul în cadrul experimentului efectuat de Millikan este făcut din sodiu (Na). Folosind datele din Fig. 3, determinați valoarea lucrului mecanic de extracție a Na.

- 6) Ce reprezintă frecvența de prag?

- 7) În imaginea de mai jos puteți observa dependența potențialului de frânare în funcție de frecvența luminii pentru celule fotoelectrice cu anodi din materiale diferite. Clasificați crescător cele 4 celule în de lucrul mecanic de extracție.



Procedura experimentală

Dispozitivul experimental folosit este reprezentat schematic în Fig. 1. Celula fotoelectrică este un tub de vid de tip 1P39 (figura de mai jos). În principiu, pentru

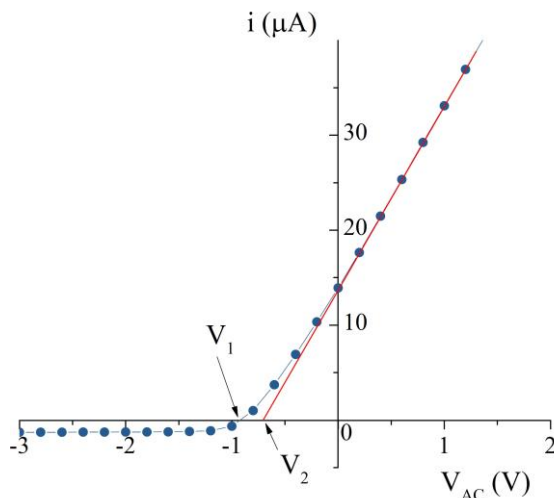


determinarea constantei lui Planck o să determinăm potențialul de frânare pentru lumină de diferite frecvențe și o să-l reprezentăm în funcție de frecvența luminii (Fig. 3). Folosind relația (3) o să determinăm raportul $\frac{h}{q_e}$ din panta graficului $V_0 = f(\nu)$.

Pentru a determina potențialul de frânare o să montăm o sursă de lumină de o anumită culoare (LED) în fața celulei fotoelectrice. O să determinăm caracteristica curent-tensiune a celulei prin modificarea tensiunii V_{AC} între -3 și +3 V în pași de 0.2 V și măsurarea curentului prin circuit. Datele se trec tabelul de date #1.

Se reprezintă grafic folosind hârtie milimetrică sau un program dedicat (Matlab) $i = f(V_{AC})$ pentru fiecare din cele 4 leduri. În principiu ar trebui să se obțină 4 grafice similare cu cel de mai jos. Este de precizat că nu se observă curentul de saturație direct deoarece acesta apare la tensiuni mult mai mari decât 3 V, de ordinul 20-30 V.

Din grafic se poate observa că punctele experimentale se așază pe o linie în regiunea potențialului V_{AC} pozitiv. În regiunea negativă



datele se abat de la linearitate. Mai mult, curentul nu devine zero, el trece prin zero și se saturează la o valoare negativă relativ mică. Motivul principal pentru comportamentul din zona potențialului negativ este că în timpul iluminării celulei, pe lângă catod și anodul este iluminat. Acesta din urmă o se emită și el electroni. Potențialul negativ, care este un potențial de frânare pentru electronii emiși de catod, o să fie un potențial de accelerare pentru electronii emiși de anod. Datorită construcției fotocelulei (geometrie și materiale folosite) acest curent invers de saturație este mult mai mic decât curentul de saturație direct. Acest comportament o să creeze imprecizie în definirea potențialului de frânare V_0 . Cel mai probabil acesta este între V_1 și V_2 . Astfel, o să definim potențialului de frânare în felul următor

$$V_0 = \frac{|V_1| + |V_2|}{2} \pm \frac{|V_1 - V_2|}{2}, \quad (5)$$

Valorile obținute pentru tensiunile de frânare se trec în tabelul de date #2 și se reprezintă grafic $V_0 = f(\nu)$, iar constanta lui Planck se calculează din panta dependenței lineare.

Efectul fotoelectric. Constanta lui Planck.

Raport de Laborator

TABELUL DE DATE #1

Scop: Determinarea tensiunii de frânare pentru fotoni de frecvențe diferite.

	LED # 1	LED #2	LED # 3	LED # 4
V_{AC} (V)	i (μA)	i (μA)	i (μA)	i (μA)
-3.0				
-2.8				
-2.6				
-2.4				
-2.2				
-2				
-1.8				
-1.6				
-1.4				
-1.2				
-1				
-0.8				
-0.6				
-0.4				
-0.2				
0				
0.2				
0.4				
0.6				
0.8				
1.0				
1.2				
1.4				
1.6				
1.8				
2				
2.2				
2.4				
2.6				
2.8				
3				

TABELUL DE DATE #2

Scop: Determinarea constantei lui Planck.

	ν (10^{14} Hz)	$\Delta\nu$ (10^{14} Hz)	V_0 (V)	ΔV_0 (V)
LED # 1				
LED # 2				
LED # 3				
LED # 4				

h = _____ **J s**

Observație. Valoarea constantei lui Planck obținută prin acest experiment simplu o să fie relativ lipsită de acuratețe (relativ diferită de valoarea acceptată ca a fi corectă - *reală*). Există în principiu două motive pentru care acesta se întâmplă. În primul rând, modelul lui Einstein pentru efectul fotoelectric este incomplet. O descriere mai completă implică noțiuni avansate, cum ar fi densitatea de stări, distribuția Fermi-Dirac, benzi de energie etc. În al doilea rând, există și o serie de dificultăți experimentale care au fost ignorate, cum ar fi tensiunile electromotoare de contact, efectele de ecranaj datorate electronilor prezenți în spațiul dintre anod și catod, puritatea spectrală limitată a luminii incidente, variația în timp a intensității luminii etc. Pentru mai multe detalii se poate vedea: A.W. Knudsen , Am. J. Phys.,51, 725 (1983).