Fizica cuantică
Efectul fotoelectric extern

Ipoteza lui Planck – ipoteza cuantelor de energie
Enunț: Oscilatorii microscopici au energii care formează un șir discret (discontinuu) de valori
E_1, E_2, E_3, ……E_k, ……..E_n,……
Fiecare din energiile oscilatorului din șirul de valori este dată de formula lui Planck

$$E = h \cdot \nu$$

unde h este constanta lui Planck, care este o constantă universală și are valoarea $h = 6{,}625 \cdot 10^{-34} J \cdot s$, iar ν este frecvența de oscilație a oscilatorului corespunzătoare stării cuantificate respective.
Interpretarea ipotezei lui Planck: Stările energetice (proprii) posibile ale oscilatorului microscopic sunt caracterizate numai prin anumite valori ale energiilor (proprii) și nu orice valoare, energiile au valori cuantificate. Dacă energiile oscilatorului de forma

$$E_k = h \cdot \nu_k \; cu \; k = 1,2,3, \dots \dots$$

Rezultă că și frecvențele (proprii) de oscilație ale oscilatorului iau numai anumite valori formând un șir discret (discontinuu, cuantificat) de valori.

Efectul fotoelectric extern
Efectul fotoelectric extern a fost descoperit de Hertz. Experimentul efectuat de Hertz prin care a descoperit efectul fotoelectric extern constă în iluminarea cu radiație (lumină) ultravioletă a unei sfere metalice pentru care a urmărit starea de electrizare.
Observațiile experimentale:
- dacă sfera este electrizată negativ, prin iluminare după un timp ea devine neutră electric;
- dacă sfera este neutră electric, prin iluminare devine pozitivă electric;
- dacă sfera este polarizată pozitiv, prin iluminare devine mai pozitivă.

Interpretarea experimentului:
Deoarece radiația ultravioletă nu este încărcată electric rezultă că prin iluminare corpul metalic pierde sarcini electrice negative (electroni).
Definiția efectului fotoelectric extern
Efectul fotoelectric extern constă în emisia de electroni de către un corp sub acțiunea radiațiilor electromagnetice.
Legile efectului fotoelectric extern au fost descoperite cu ajutorul dispozitivului experimental descris în lecția de la clasă.

Legile efectului fotoelectric extern
Legea I.
Intensitatea curentului fotoelectric de saturație este proporțională cu fluxul radiației electromagnetice incidente dacă frecvența radiației electromagnetice este constantă. (vezi caracteristicile efectului fotoelectric extern I =f(U) pentru ν=contant pentru diferite fluxuri ale radiației incidente).

Legea a II-a
Energia cinetică maximă a fotoelectronilor emiși de corp este funcție liniară de frecvența radiației electromagnetice incidente și nu depinde de fluxul radiației electromagnetice incidente. (vezi graficul E_c=f(ν)). Graficul corespunde unei funcții liniare de forma

$$E_c = A \cdot \nu + B \; ,$$

unde A,B sunt constante care trebuie determinate. Deoarece toate graficele pentru mai multe materiale sunt segmente de dreaptă paralele între ele înseamnă că panta graficului este aceeași indiferent de material, dar B diferă de la un material la altul. Fiecare grafic pornește de la o frecvență minimă, diferită de la un material la altul.
Legea a III-a
Efectul fotoelectric extern se produce numai dacă frecvența radiației electromagnetice incidente are o valoare mai mare decât o valoare minimă, specifică fiecărei substanțe.
Legea a IV-a
Efectul fotoelectric extern se produce practic instantaneu.
Timpul scurs între momentul iluminării cu radiație electromagnetică (atunci când efectul fotoelectric se produce) este foarte mic, de ordinul $\tau = 10^{-9} s$.

Explicarea legilor efectului fotoelectric extern

Legile efectului fotoelectric extern nu pot fi explicate în baza teoriei ondulatorii despre lumină, în care lumina este considerată undă electromagnetică (care are două componente – o componentă electrică și o componentă magnetică). În teoria ondulatorie unda electromagnetică de o anumită frecvență transportă energie dependentă de frecvența radiației și de amplitudinea de oscilație. Unda electromagnetică pune în mișcare oscilatorie forțată particulele cu sarcină electrică (de exemplu electronul) transmițând energie acestei particule. Electronul în metal se consideră particulă legată. Energia transmisă particulei ar crește cu timpul de iluminare. Atunci când electronul ar ajunge la energia necesară desprinderii din material acesta ar fi smuls din material. Pentru aceasta ar fi necesar un timp cu atât mai mare cu cât frecvența radiației este mai mică, ceea ce arată că efectul fotoelectric nu ar trebui să se producă instantaneu – ar fi contrazisă legea a IV-a. Cum nu ar exista nici o limită de frecvență la care să înceapă efectul fotoelectric este contrazisă și legea a III-a și de asemeni și legea a II-a. ***Concepția ondulatorie asupra luminii nu explică efectul fotoelectric extern.***

Explicarea corectă a efectului fotoelectric extern a fost dată de Albert Einstein în lucrarea „Teoria efectului fotoelectric extern" – teorie pentru care a primit premiul Nobel. Einstein s-a bazat și pe ipoteza lui Planck a cuantelor de energie. În teoria sa Einstein consideră că lumina este formată din particule de lumină numite ***fotoni.***

Proprietățile fotonului

Energia fotonului – este dată de relația lui Planck pentru cuanta de energie $\varepsilon = h \cdot \nu$

Sarcina fotonului – fotonul este o particulă neutră electric, deci nu are sarcină electrică $q = 0$

Viteza de deplasare a fotonului în vid este viteza luminii $v = c$

Masa de mișcare rezultă din formula lui Einstein din TRR $\varepsilon = m \cdot c^2$ *de unde rezultă* $m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h \cdot \nu}{c^2}$.

Masa de repaus $m_0 = 0$

rezultă din expresia relativistă a masei unei particule în funcție de viteză $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ scrisă sub forma $m_0 = m \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

în care punând $v = c$ rezultă $m_0 = 0$.

Impulsul fotonului este $p = m \cdot c = \frac{h \cdot \nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ unde λ este lungimea de undă a fotonului.

Efectul fotoelectric extern este considerat ciocnire între foton și electron ca particule.
În acest context putem explica efectul fotoelectric și legile efectului fotoelectric.

Explicarea efectului fotoelectric extern în baza teoriei corpusculare (fotonice) a luminii.

Explicarea legii I

Considerăm lumina monocromatică formată din fotoni de o singură frecvență. Un flux energetic incident este energia tuturor fotonilor incidenți în unitatea de timp

$\Phi = \frac{W}{t} = P$ și reprezintă puterea undei incidente. Energia celor N_f fotoni incidenți ce cad în timpul t pe sursă este $W = N_f \cdot h \cdot \nu$. Fluxul se poate scrie atunci $\Phi = \frac{W}{t} = \frac{N_f}{t} h \cdot \nu$. Cei $\frac{N_f}{t}$ fotoni incidenți în unitatea de timp vor extrage din cfotocatod un număr proporțional de electroni în unitatea de timp $\frac{N_e}{t}$ care poartă o sarcină electrică în unitatea de timp $\frac{e \cdot N_e}{t} = \frac{Q}{t}$ și reprezintă curentul total de emisie al catodului , adică intensitatea curentului de saturație pentru fluxul dat al radiației incidente.

$\Phi = \frac{W}{t} = \frac{N_f}{t} h \cdot \nu \sim \frac{N_f}{t} \sim \frac{N_e}{t} \sim \frac{e \cdot N_e}{t} = \frac{Q}{t} = I_s$. Deci intensitatea curentului fotoelectric de saturație este proporțională cu fluxul radiației electromagnetice incidente pentru frecvență constantă a radiației.

Explicarea legii a II-a

Fiind ciocnire între foton și electron se conservă energia. Legea conservării energiei pentru efectul fotoelectric (legea lui Einstein) poate fi exprimată astfel: Energia fotonului incident este folosită pentru extragerea electronului din material și diferența este folosită ca energie cinetică a electronului. Expresia matematică a legii este

$$\varepsilon = L + E_c$$

Unde $\varepsilon = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ este energia fotonului incident, $L = h \cdot \nu_0 = h \cdot \frac{c}{\lambda_0}$ este lucrul mecanic de extracție a electronului din material, $E_c = \frac{m_0 \cdot v^2}{2}$ este energia cinetică maximă a fotoelectronilor extrași din material (în condiții nerelativiste $v \ll c$).

În condiții relativiste energia cinetică are expresia $E_c = m \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2$. Pentru frecvențe ale radiației electromagnetice în domeniul vizibil sau apropiat de vizibil electronii extrași sunt nerelativiști și folosim expresia energiei cinetice din mecanica clasică.
Exprimând energia cinetică maximă a fotoelectronilor în funcție de frecvența radiației incidente

$$E_c = h \cdot \nu - L$$

rezultă dependența liniară a acesteia de frecvență.

Explicarea legii a III-a
Efectul fotoelectric se produce numai dacă electronii sunt extrași din material cu energie cinetică cel puțin nulă, ceea ce înseamnă că eneria fotonului incident trebuie să fie egală cel puțin cu lucrul mecanic de extracție pentru materialul respectiv $\varepsilon_{min} = h \cdot \nu_{min} = h \cdot \nu_0 = L = h \cdot \frac{c}{\lambda_0} = h \cdot \frac{c}{\lambda_{max}}$.
Rezultă că frecvența radiației incidente trebuie să fie cel puțin egală cu o frecvență minimă $\nu \geq \nu_{min} = \nu_0$ numită frecvență de prag, specifică fiecărei substanțe. Lungimea de undă a radiației incidente trebuie să fie mai mică sau egală cu lungimea de undă de prag.
În baza celor spuse mai sus putem defini cele trei mărimi specifice fiecărei substanțe:
Lucrul mecanic de extracție (energia de extracție sau energia de legătură a electronului în material) este numeric egal cu energia minimă a unui foton care mai extrage electroni din material (cu energie cinetică nulă);
Frecvența de prag este frecvența minimă a radiației luminoase care mai produce efect fotoelectric extern.
Lungimea de undă de prag este lungimea de undă maximă a radiației luminoase care mai poate produce efect fotoelectric extern.