

1. OPTICA GEOMETRICĂ

1.1. Considerații despre lumină

Lumina este o undă de natură electromagnetică caracterizată de:

- **perioada T**: intervalul de timp în care se efectuează o oscilație completă

$$[T]_{SI} = s$$

- **frecvența de oscilație ν** : numărul de oscilații efectuate în unitatea de timp

$$\nu = \frac{1}{T} \Rightarrow [\nu]_{SI} = \frac{1}{s} = s^{-1} = Hz \text{ (Hertz)}$$

- **lungimea de undă λ** : distanța parcursă de undă în timp de o perioadă

$$\lambda = \nu T \quad \text{sau} \quad \lambda = \frac{v}{\nu}$$

Observații:

- frecvența undei nu poate fi modificată de fenomenele de propagare, reflexie, refracție, interferență etc., ea fiind o caracteristică imprimată de sursa emițătoare;

- lungimea de undă a unei radiații luminoase este dependentă de mediul de propagare, prin viteza sa.

1.2. Indicele de refracție

Este definit de proprietățile electrice și magnetice ale mediului în care se propagă lumina.

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

Indicele de refracție al unui mediu reprezintă raportul dintre viteza de propagare a luminii în vid și viteza de propagare a luminii în mediul respectiv.

$$n = \frac{c}{v}$$

Este adimensional (nu are unitate de măsură)

Ex: - pentru apă: $n = \frac{4}{3} (= 1,33)$

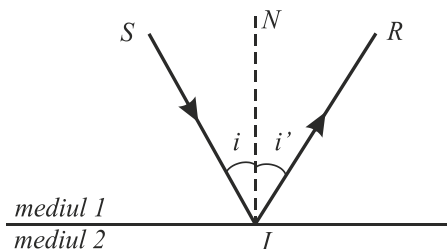
- pentru diamant: $n=2,42$

Pentru două medii diferite, se poate defini indicele de refracție relativ al mediului 2 față de mediul 1.

$$\left. \begin{array}{l} n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \\ n = \frac{c}{v} \\ \lambda = \nu T \end{array} \right| \Rightarrow n_{21} = \frac{v_1}{v_2} \left| \Rightarrow n_{21} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right.$$

1.3. Reflexia și refracția luminii

Reflexia luminii este fenomenul optic care constă în întoarcerea parțială a razei de lumină în mediul din care a venit atunci când întâlnește suprafața de separație dintre două medii optice diferite.



Legile reflexiei:

1. Raza incidentă (SI), raza reflectată (IR) și normala dusă în punctul de incidență (NI) sunt coplanare.

2. Unghiul de incidență este egal cu unghiul de reflexie.

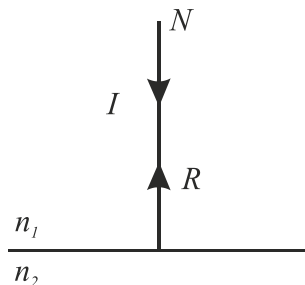
$$i = i'$$

Precizare:

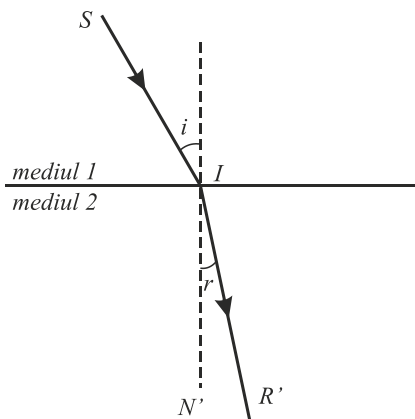
- i este unghiul format de raza incidentă cu normala dusă în punctul de incidență;

- i' este unghiul format de raza reflectată cu normala dusă în punctul de incidență.

Observație: la incidența normală ($i = 0$) $\Rightarrow i' = 0$, adică raza de lumină se întoarce pe același drum.



Refracția luminii este fenomenul optic care constă în schimbarea bruscă a direcției de propagare a razei de lumină atunci când aceasta traversează suprafața de separație dintre două medii optice diferite.



r este unghiul format de raza refractată cu normala dusă în punctul de incidență.

Legile refracției:

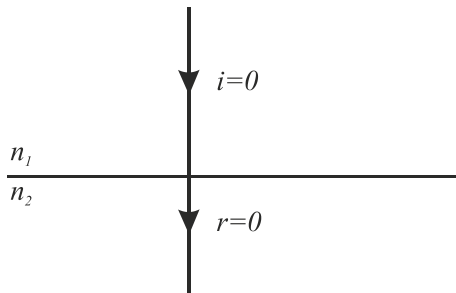
1. Raza incidentă (SI), raza refractată (IR) și normala dusă la suprafață în punctul de incidență (N'I) sunt coplanare.

2. Raportul dintre sinusul unghiului de incidență și sinusul unghiului de refracție este egal cu o constantă caracteristică celor două medii numită indice de refracție relativ al mediului doi față de primul mediu.

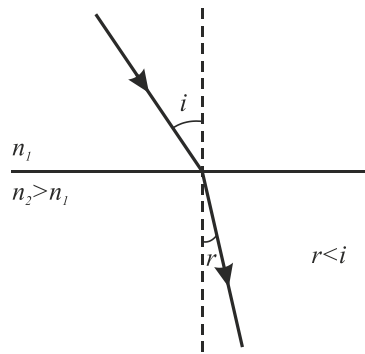
$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad \text{sau} \quad n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

Cazuri:

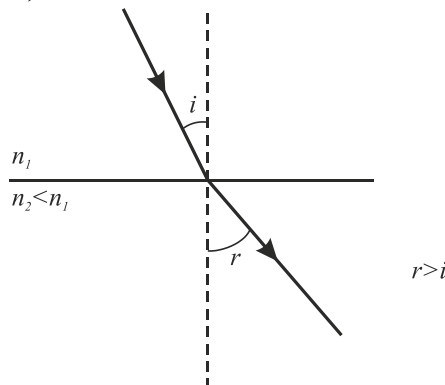
- la incidență normală $i=0 \Rightarrow r=0$, adică raza de lumină trece prin suprafața de separație nedeviată;



- atunci când lumina trece într-un mediu mai refringent ($n_2 > n_1$), raza de lumină se apropie de normală ($r < i$);

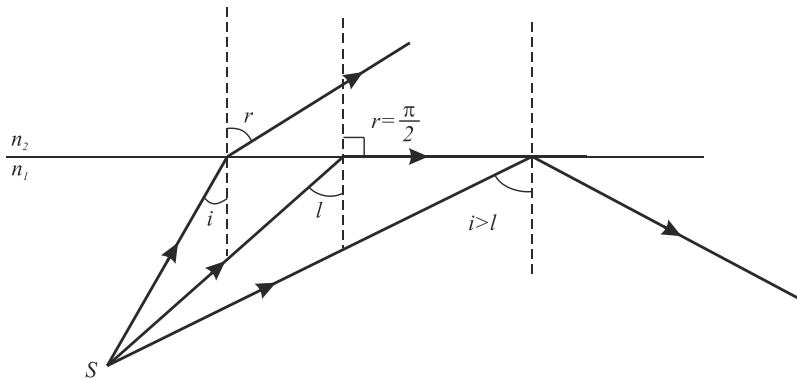


- atunci când lumina trece într-un mediu mai puțin refringent ($n_2 < n_1$), raza refractată se depărtează de normală ($r > i$).



Reflexia și refracția luminii sunt două fenomene care se produc simultan: o parte din energia transportată de unda incidentă se întoarce în primul mediu, iar cealaltă parte pătrunde în mediul al doilea.

Excepție face **reflexia totală** când lumina nu mai pătrunde în cel de-al doilea mediu.



Pentru $i \leq l$, sunt posibile ambele fenomene.

Pentru $i > l$, singurul fenomen posibil este reflexia totală.

Unghiul limită (l) este unghiul minim de incidență în mediul mai dens, corespunzător căruia apare fenomenul de reflexie totală.

$$\left. \begin{array}{l} r = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin \frac{\pi}{2} = 1 \\ \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} \\ i \rightarrow l \end{array} \right\} \Rightarrow \sin l = \frac{n_2}{n_1}$$

În cazul în care lumina trece din sticlă ($n_1 = 1,5$) în aer ($n_2 = 1$),

$$\sin l = \frac{1}{1,5} = 0,66 \Rightarrow l = 41^{\circ}50'$$

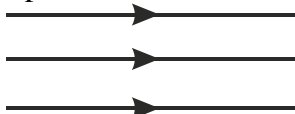
1.4. Punctele conjugate

Raza de lumină este direcția de-a lungul căreia se propagă lumina.

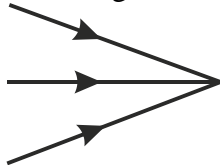
Fasciculul de lumină este un ansamblu de raze de lumină.

Fasciculele de lumină pot fi:

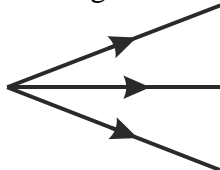
- paralele



- convergente



- divergente



Punctul obiect este vârful fasciculului conic de intrare în sistemul optic.

Punctul imagine este vârful fasciculului conic de ieșire din sistemul optic.

Imaginea unui obiect reprezintă mulțimea punctelor imagine corespunzătoare punctelor obiect.

Funcția ideală a unui sistem optic sau a instrumentelor optice care formează imagini este ca fiecărui punct obiect I să-i corespundă un singur punct imagine I' .

Punctele I și I' se numesc **puncte conjugate** ale sistemului optic considerat.

1.5. Fascicule paraxiale

Fasciculele paraxiale sunt fascicule înguste, învecinate axului optic și foarte puțin înclinate față de acesta. ($\alpha < 6^\circ$).

Datorită acestor restricții, fasciculele incidente pot fi confundate cu axul optic și de aceea se mai numesc paraxiale.

1.6. Imagini reale. Imagini virtuale.

Imaginea reală se formează la intersecția razelor reale de lumină.

Imaginile reale pot fi „prinse” pe un ecran, deoarece energia luminoasă trece de fapt prin punctul imagine.

Imaginea virtuală se formează la intersecția prelungirilor razelor reale de lumină.

Imaginile virtuale nu pot fi „prinse” pe ecran, deoarece nu constau dintr-o „acumulare” efectivă de energie luminoasă.

De asemenea, se consideră imaginea din dreapta – imagine reală (spațiul imagine) și imaginea virtuală în stânga (spațiul obiect).

1.7. Lentila optică

Suprafața de separare dintre două medii optice transparente, cu indicii de refracție diferiți, se numește **dioptru**.

Lentila este un mediu transparent, limitat de doi dioptri sferici sau de un dioptru sferic și unul plan.

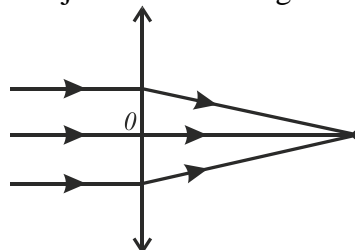
Lentila este considerată subțire atunci când:

- are grosimea mult mai mică decât razele de curbură ale suprafețelor sale;
- vârfurile celor doi dioptri practic coincid cu centrul optic al lentilei (O).

Tipuri de lentile:

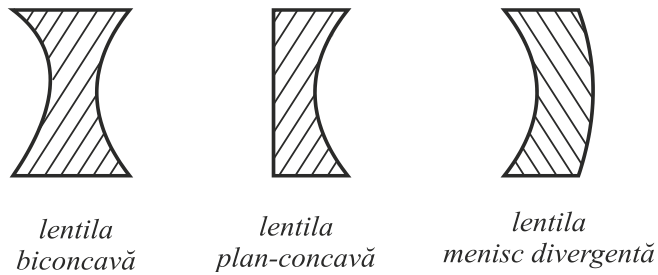
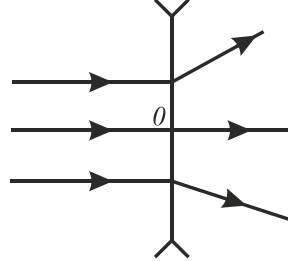
Există două tipuri de lentile:

- **lentile convergente**, care transformă un fascicul de raze paralele într-un fascicul convergent. Ele sunt mai groase la mijloc decât la margini.





- **lentile divergente**, care transformă un fascicul de raze paralele într-un fascicul divergent. Ele sunt mai subțiri la mijloc decât la margini.

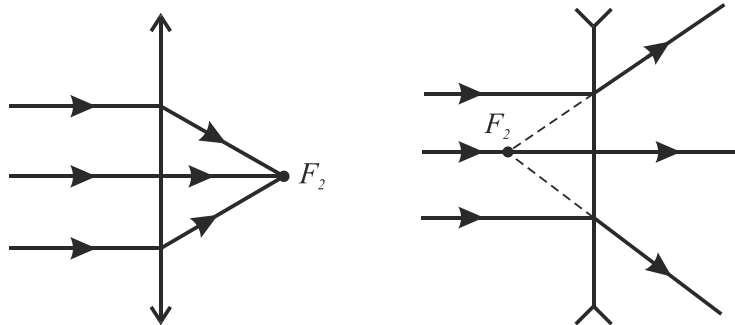


Observație:

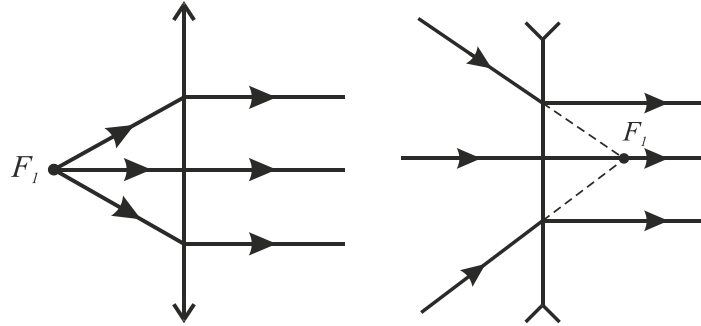
Plasate într-un mediu cu indicele de refracție mai mare decât al materialului lentilei ($n_M > n_L$), lentilele cu margini subțiri/groase sunt divergente, respectiv convergente.

Focarele lentilei

- **Focarul imagine** F_2 este punctul în care se strâng razele paralele cu axa optică principală după ce au fost refractate de lentilă.



- **Focarul obiect** F_1 este punctul de pe axa optică a cărei imagine se formează la infinit.



În cazul lentilelor convergente, focarele sunt reale deoarece se găsesc la intersecția razelor reale de lumină, iar în cazul lentilelor divergente focarele sunt virtuale deoarece se găsesc la intersecția prelungirilor razelor reale de lumină.

Formula fundamentală a lentilelor subțiri

$$\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

x_1 – coordonata obiectului, originea fiind pe lentilă

$x_1 < 0$ în cazul obiectelor reale, deoarece sensul pozitiv al axelor de coordonate este sensul de propagare a luminii

x_2 – coordonata imaginii.

$$n = \frac{n_L}{n_M}$$

n_L – indicele de refracție al materialului din care este confecționată lentila.

n_M – indicele de refracție al mediului în care este plasată lentila.

R_1, R_2 – coordonatele centrilor de curbură ale celor doi dioptrii, valoarea lor absolută fiind razele de curbură.

$$\text{Pentru dioptrul plan } R \rightarrow \infty \rightarrow \frac{1}{R} \rightarrow 0$$

Focarul obiect și focarul imagine sunt situate simetric, de o parte și de alta a lentilei.

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Folosind această relație, formula fundamentală a lentilelor subțiri poate fi scrisă sub forma:

$$\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} = \frac{1}{f}$$

Lentila biconvexă ale cărei fețe au aceeași rază de curbură R (lentila simetrică):

$$\frac{1}{f} = (n-1) \frac{2}{R}$$

Lentila plan-convexă:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \frac{1}{R}$$

Lentila biconcavă:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(-\frac{2}{R} \right)$$

Lentila plan-concavă:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(-\frac{1}{R} \right)$$

Convergența lentilei:

$$C = \frac{1}{f}$$

$$[C]_{SI} = \frac{1}{[f]_{SI}} \Rightarrow [C]_{SI} = \frac{1}{m} = m^{-1} = \delta \text{ (dioptrie)}$$

Observații:

- pentru lentilele convergente: $f > 0 \Rightarrow C > 0$

- pentru lentilele divergente: $f < 0 \Rightarrow C < 0$

Mărirea liniară transversală:

$$\beta = \frac{y_2}{y_1} = \frac{x_2}{x_1}$$

y_1 – dimensiunea liniară a obiectului

y_2 – dimensiunea liniară a imaginii

Imaginile formate de lentile pot fi:

- **imagini reale**, se formează de cealaltă parte a lentilei ($x_2 > 0$ și $x_1 < 0$) și sunt răsturnate

$\beta < 0$

- **imagini virtuale**, se formează de aceeași parte cu obiectul ($x_2 < 0$ și $x_1 < 0$) și sunt drepte

$\beta < 0$

1.8. Sisteme de lentile

Sunt asociații de lentile cu ax optic comun. Imaginea formată de prima lentilă devine obiect pentru lentila următoare și așa mai departe până la ultima lentilă care formează imaginea finală.

Cel mai utilizat sistem este sistemul lentilelor alipite (alocate), când distanța dintre lentilele componente este practic nulă ($d=0$) iar centrele lor optice sunt practic confundate.

Pentru un sistem format din K lentile:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \dots + \frac{1}{f_K}$$

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_K$$

Adică, suma convergențelor lentilelor care alcătuiesc sistemul este egală cu convergența sistemului.

$$\beta = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_K$$

Adică, mărirea liniară transversală a sistemului este egală cu produsul măririlor transversale ale componentelor.

Sistemul telescopic este un sistem afocal, adică fasciculul de ieșire, provenit dintr-un fascicul paralel, este paralel.

În cazul sistemului format din două lentile, focarul imagine al primei lentile coincide cu focarul obiect al celei de-a doua lentilă.

$$\text{Distanța dintre lentile este } d = f_1 + f_2. \quad \beta_{\text{telescopic}} = -\frac{f_2}{f_1}$$

Nu poate avea în componență doar lentile divergente, iar imaginea este răsturnată numai atunci când are în componență doar lentile convergente.

3. ELEMENTE DE FIZICĂ CUANTICĂ

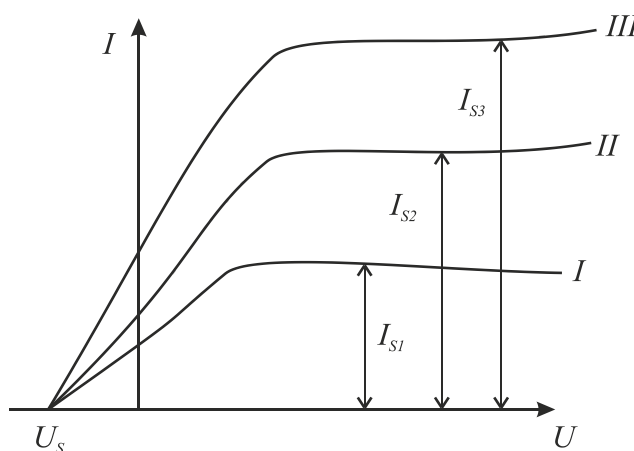
3.1. Efectul fotoelectric extern

Efectul fotoelectric extern este fenomenul care constă în emisia de electroni de către unele metale aflate sub acțiunea radiațiilor electromagnetice de anumite frecvențe.

Efectul fotoelectric a fost descoperit experimental de către H. Hertz în anul 1887 și se produce cu respectarea a patru legi:

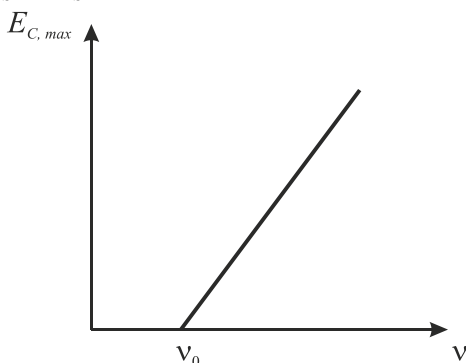
Legea I: Intensitatea curentului fotoelectric de saturație este direct proporțională cu fluxul radiațiilor electromagnetice incidente, când frecvența se păstrează constantă.

Legea II: Energia cinetică a fotoelectronilor emiși crește liniar cu frecvența radiațiilor electromagnetice și nu depinde de fluxul acestora.



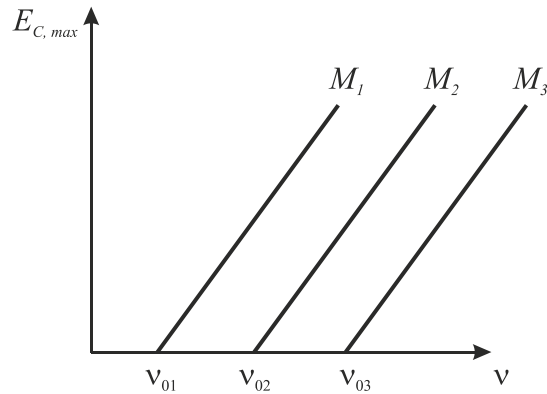
Ilustrarea primei legi a efectului fotoelectric extern:

$$\Phi_3 > \Phi_2 > \Phi_1 \Rightarrow I_{S3} > I_{S2} > I_{S1}$$



Dependența liniară a energiei cinetice a electronilor de frecvența radiației incidente

Legea a III-a: Efectul fotoelectric extern se produce numai dacă frecvența radiației incidente este mai mare sau cel puțin egală cu o valoare minimă ν_0 , numită frecvență de prag (pragul roșu al efectului fotoelectric), specifică fiecărei substanțe.



Legea a IV-a: Efectul fotoelectric extern se produce practic instantaneu. ($t < 10^{-9} s$)

3.2. Ipoteza lui Planck. Ipoteza lui Einstein. Ecuația lui Einstein.

În anul 1900, M. Planck a emis următoarea ipoteză cu privire la atomii care emit sau absorb radiații: emisia sau absorbția de energie nu este continuă, ci se face sub formă de pachete (cuante) de energie.

Energia unui atom sau a unei molecule poate să crească în cazul absorbției sau să scadă în cazul emisie numai cu cantitatea.

$$\varepsilon = h\nu = E_k - E_i$$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ - constanta lui Planck
(constantă universală)

ν - frecvența fotonului emis sau absorbit

E_k, E_i - energiile stărilor între care are loc tranziția oscilatorului

În anul **1905**, **A. Einstein** aplica teoria lui Planck și în cazul luminii, considerând că lumina poate fi emisă sau absorbită numai în cantități bine determinate numite cuante de energie. Particula care posedă energia unei cuante a primit numele de **foton**. Fotonul are următoarele mărimi caracteristice:

- energia: $\varepsilon = h\nu$

- masa de repaus: $m_0 = 0$

- masa de mișcare: $m = \frac{h\nu}{c^2}$

- viteza: $v = c$

- impulsul: $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$

- sarcina electrică: $q = 0$

Aplicând legea conservării energiei, în cazul efectului fotoelectric putem scrie:

$$E_{\text{foton}} = E_{\text{extracție}} + E_{c \text{ max}}$$

Această ecuație se mai numește **ecuația lui Einstein**.

$h\nu$ - energia absorbită de electron de la foton

$\frac{mv^2}{2}$ - energia cinetică a fotoelectronului extras

L - lucrul mecanic de extracție, adică lucrul mecanic minim necesar extragerii electronului din metal.

3.3. Explicarea legilor efectului fotoelectric extern

Teoria cuantelor permite explicarea legilor efectului fotoelectric extern.

Legea I: Fiecare foton extrage un electron din metal, deci numărul de fotoelectroni emiși de metal este proporțional cu numărul de fotoni, deci cu fluxul radiațiilor.

Legea a II-a: Viteza electronilor emiși depinde de energia fotonilor și nu de numărul acestora.

Legea a III-a: Cu cât energia comunicată electronului de către foton este mai mare, cu atât viteza maximă, și deci și energia cinetică maximă a lui, va fi mai mare.

Pentru ν_0 (frecvență de prag) energia fotoelectronului este nulă, iar pentru $\nu < \nu_0$ nu apare efectul fotoelectric extern.

Legea a IV-a: Interacțiunea foton-electron fiind foarte scurtă, efectul fotoelectric extern se produce practic instantaneu.