

Materiale didactice suport
pentru examenul de bacalaureat la disciplina

OPTICĂ

Elaborat de către

Lector dr. Liliana Lighezan

Material elaborat în cadrul proiectului CNFIS-FDI-2021-0471 „UVT – Acces și echitate în învățământul superior”

Adresă poștală: Bd. Vasile Pârvan nr. 4, cod poștal 300223, Timișoara, jud. Timiș, România
Număr de telefon: +40-(0)256-592.697, Adresă de e-mail: edu@e-uvt.ro, Website: www.uvt.ro

Cuprins

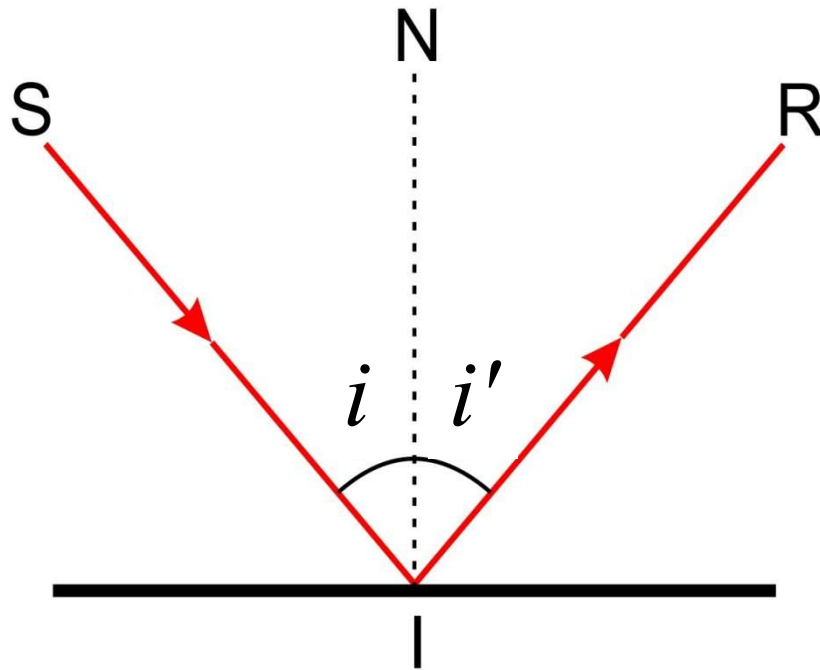
CAPITOLUL I. OPTICA GEOMETRICĂ.	3
I.1. Reflexia și refracția luminii	4
I.2. Lentile subțiri. Sisteme de lentile subțiri.	12
CAPITOLUL II. OPTICA ONDULATORIE	24
II.1. Natura luminii. Noțiuni fundamentale.	24
II.2. Interferența luminii	35
II.3. Dispozitivul Young	40
CAPITOLUL III. ELEMENTE DE FIZICĂ CUANTICĂ	48
III.1. Efectul fotoelectric extern	48

CAPITOLUL I. OPTICA GEOMETRICĂ

- Se poate aplica pentru studiul fenomenelor legate de propagarea luminii și formarea imaginilor.
- Este o aproximație a opticii ondulatorii.
- Lungimea de undă a luminii este considerată neglijabilă în raport cu dimensiunile obiectelor.
- Are la bază conceptul de *rază de lumină*.
- **Raza de lumină**
 - este traiectoria de-a lungul căreia se propagă lumina;
 - se consideră infinit de îngustă (abstracțiune matematică, analog dreptei în geometrie).

I.1. REFLEXIA ȘI REFRACTAȚIA LUMINII

REFLEXIA LUMINII. LEGILE REFLEXIEI.



Legile reflexiei:

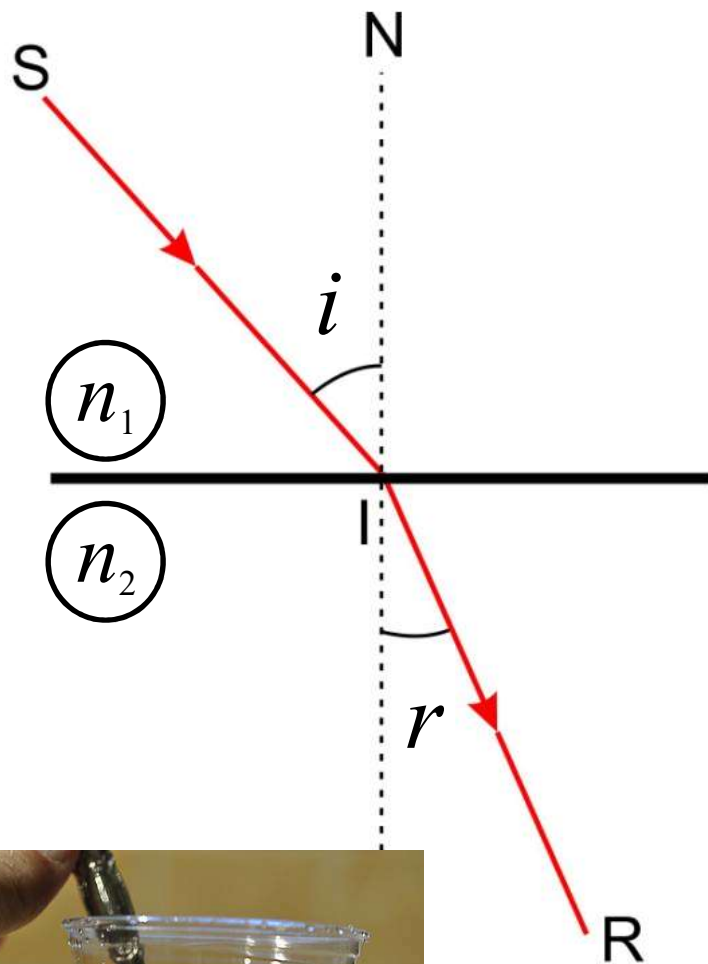
SI, NI, IR – coplanare

$$i = i'$$

SI – raza incidentă
NI – normala la suprafața de
separație dintre medii
IR – raza reflectată
 i – unghi de incidență
 i' – unghi de reflexie



REFRAȚIA LUMINII. LEGILE REFRAȚIEI.



- SI – raza incidentă
- NI – normala la suprafața de separație dintre medii
- IR – raza refractată
- i – unghi de incidență
- r – unghi de refracție

Legile refracției:

SI, NI, IR – coplanare

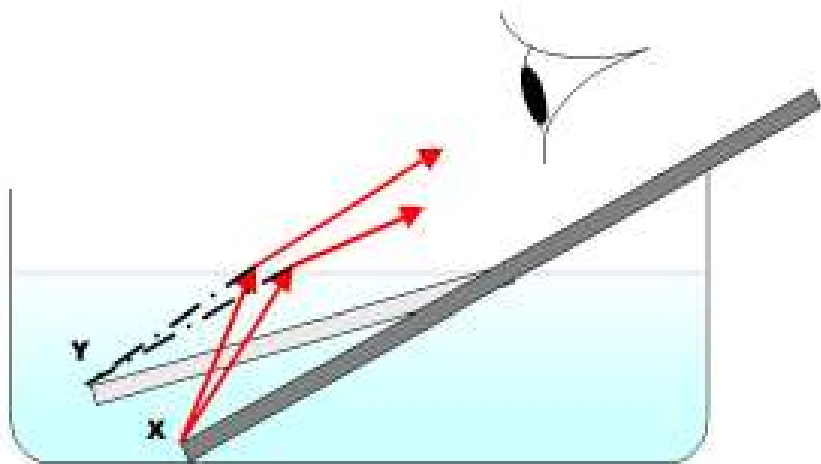
$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

(legea Snellius – Descartes)

Indici de refracție ai diferitelor medii

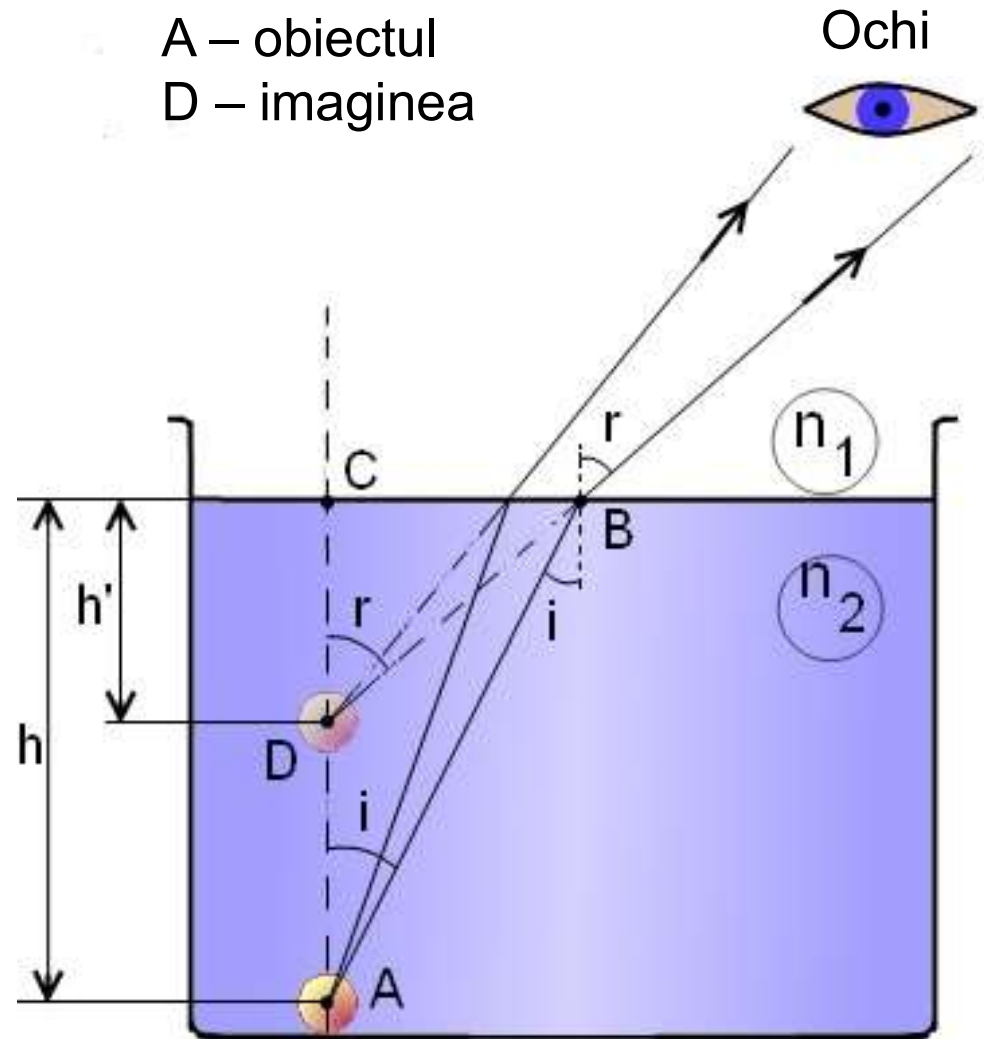
Substanța	Indicele de refracție (n)
Vid	1
Gaze la 0°C și 1 atm	
Aer	1,000293
Heliu	1,000036
Hidrogen	1,000132
Dioxid de carbon	1,00045
Lichide la 20°C	
Apă	1,333
Etanol	1,36
Ulei de măsline	1,47
Solide	
Gheață	1,309
Plexiglas	1,49
Sticlă "Crown"	1,52
Safir	1,77
Zirconiu	2,15
Diamant	2,42

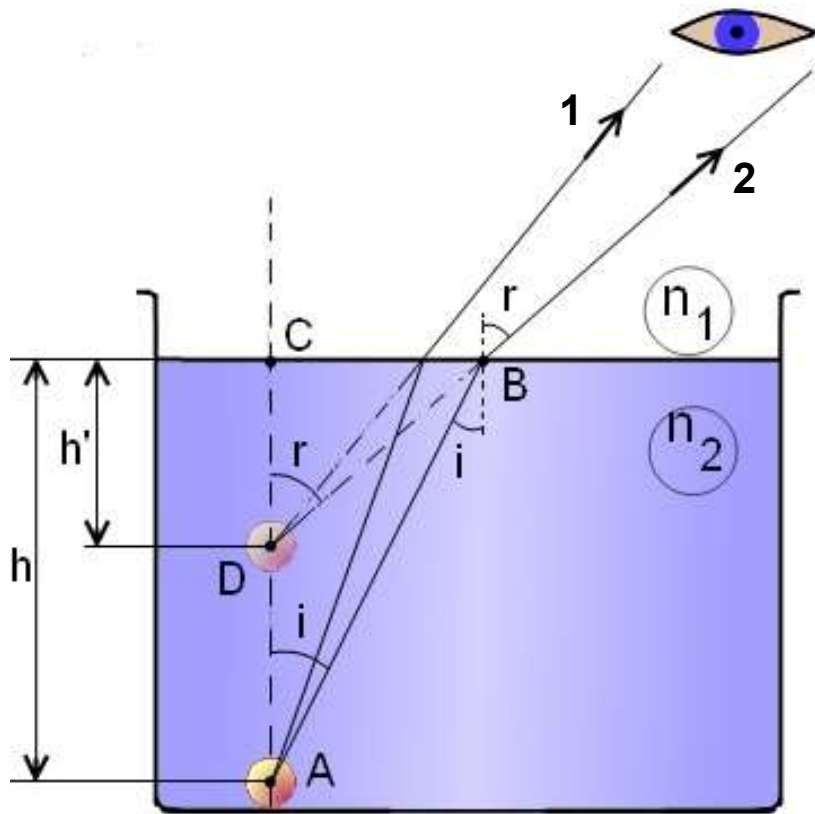
Formarea imaginilor în urma refracției luminii



A – obiectul
D – imaginea

Ochi





Imaginea obiectului (aflat în punctul A), se formează în punctul D, la intersecția prelungirilor celor două raze refractate, 1 și 2, care pornesc de la obiect și ajung la ochiul observatorului.

h – adâncimea la care se află obiectul;

h' – adâncimea la care se află imaginea;

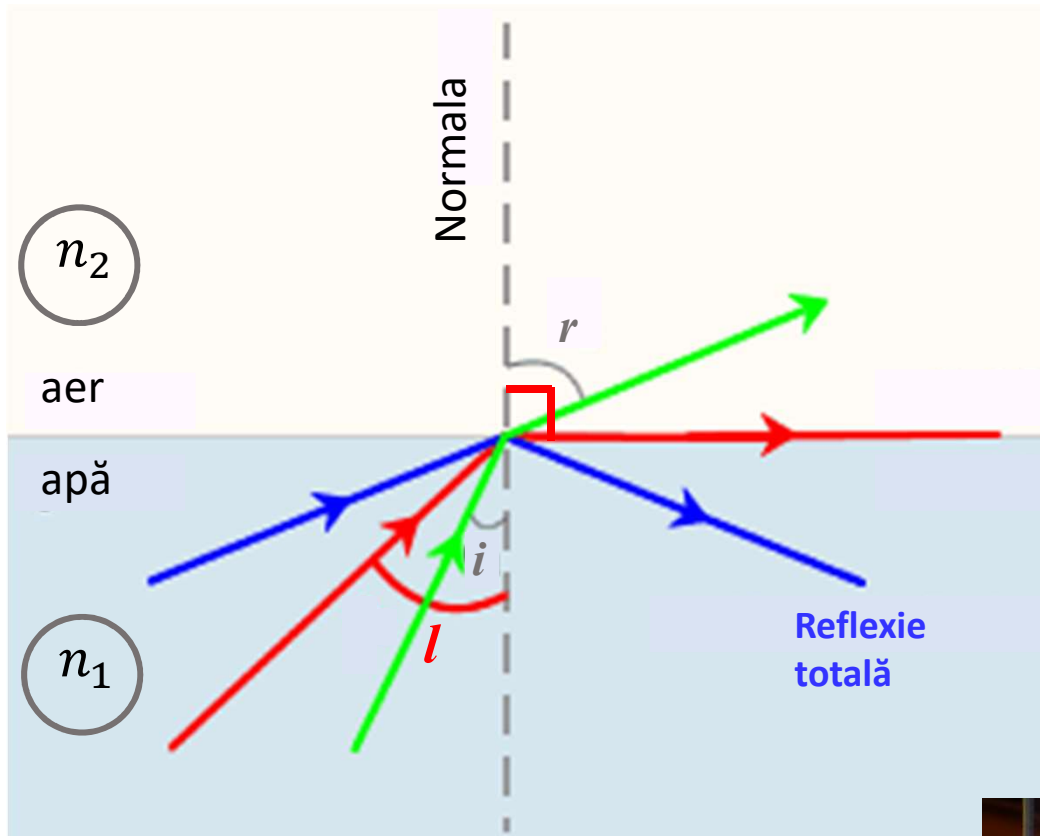
$n_r = \frac{n_2}{n_1}$ – indicele de refracție relativ al mediului.

$$h'(i) = h n_1 \sqrt{\frac{1 - \sin^2 i}{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}} = h \sqrt{\frac{1 - \sin^2 i}{n_r^2 - \sin^2 i}}$$

– La incidență normală ($i = 0$):

$$h'_0 = h \frac{n_1}{n_2} = \frac{h}{n_r}$$

Reflexia totală a luminii



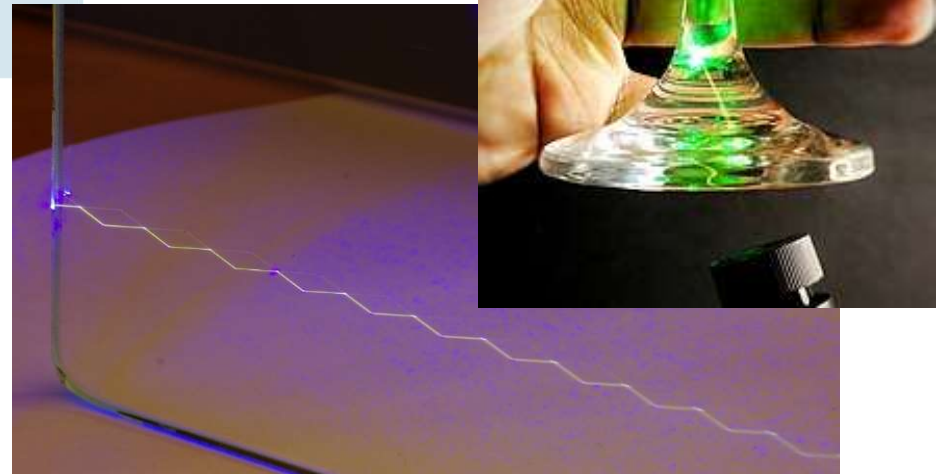
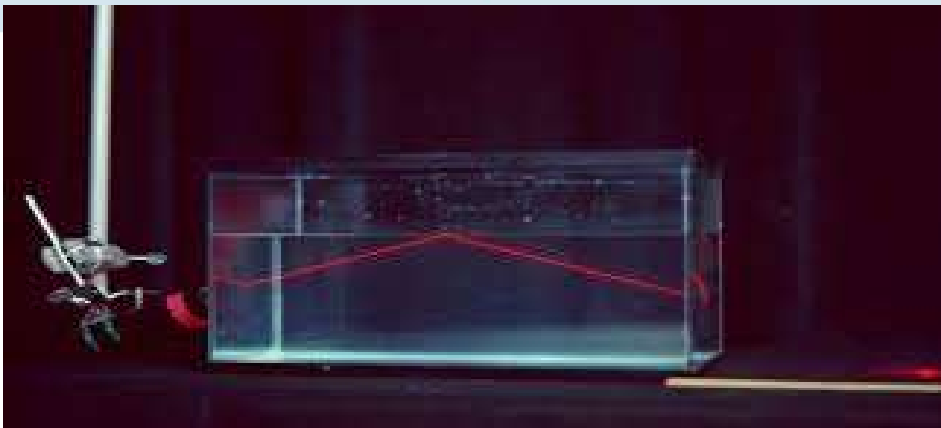
Condițiile de obținere a reflexiei totale:

1) $n_1 > n_2 ; i > l$

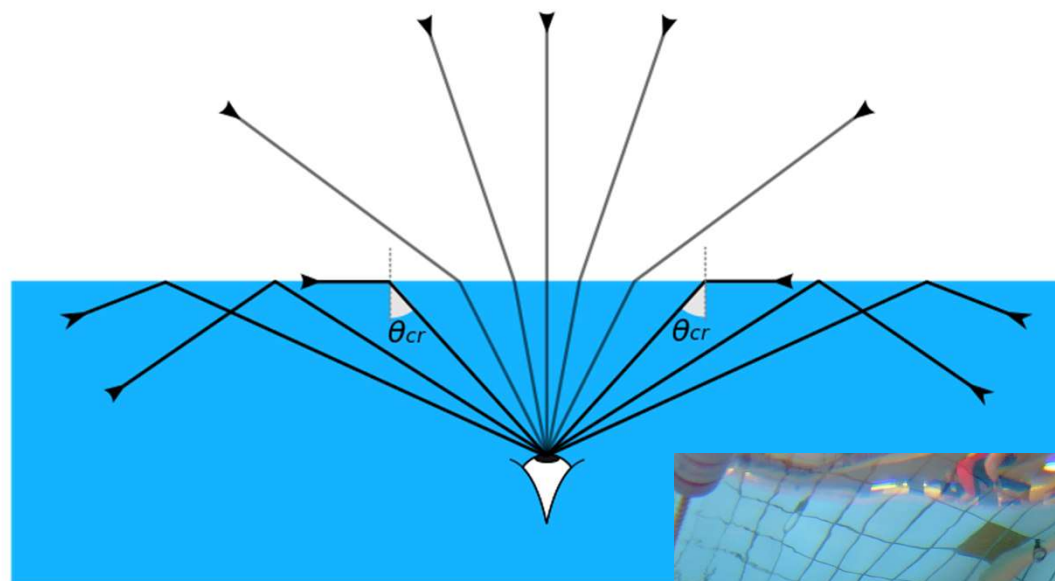
l – unghi limită, depinde de n_1 și n_2 .

2) $\sin l = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$

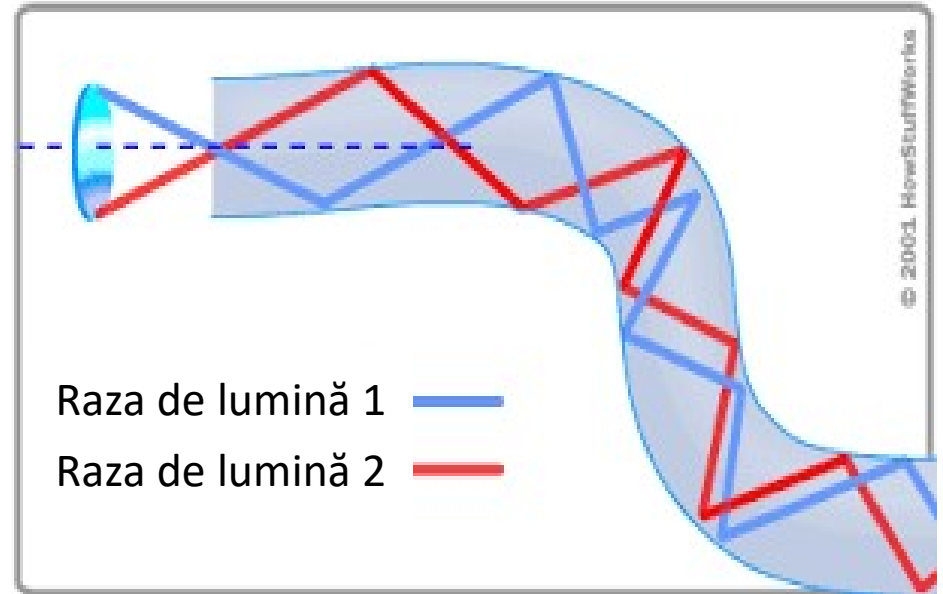
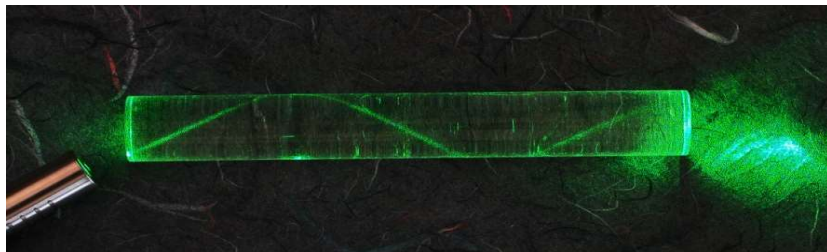
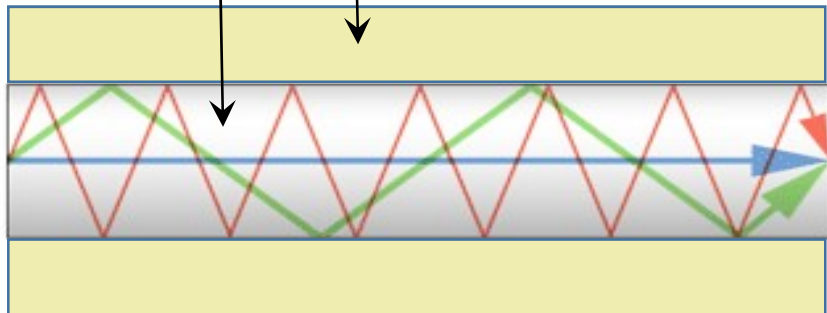
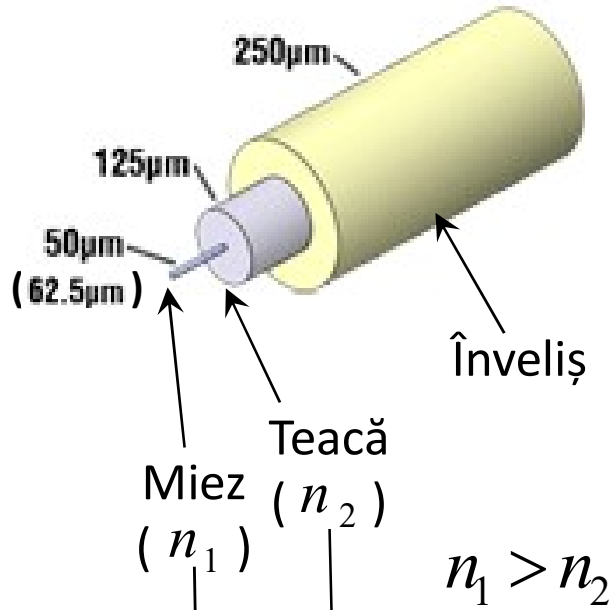
$l_{\text{apă-aer}} \approx 49^\circ$, $l_{\text{sticlă-aer}} \approx 42^\circ$



Reflexia totală. Exemple.



Aplicații ale reflexiei totale. Fibra optică.

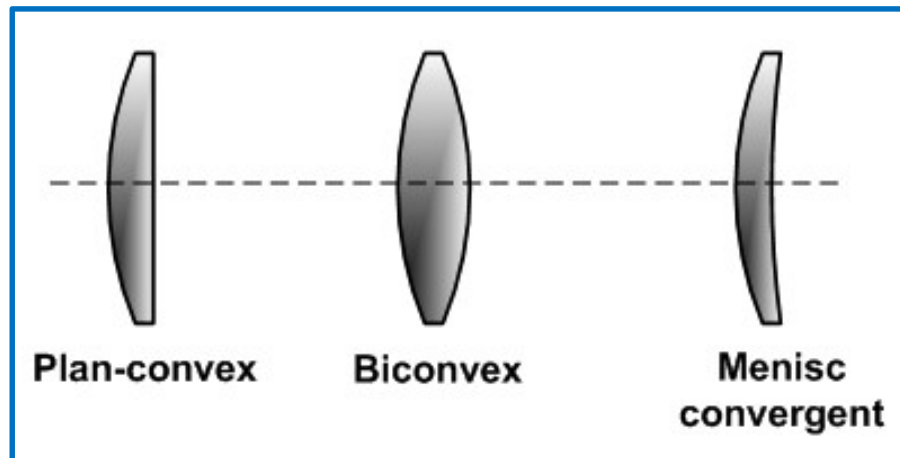


I.2. LENTILE SUBȚIRI. SISTEME DE LENTILE.

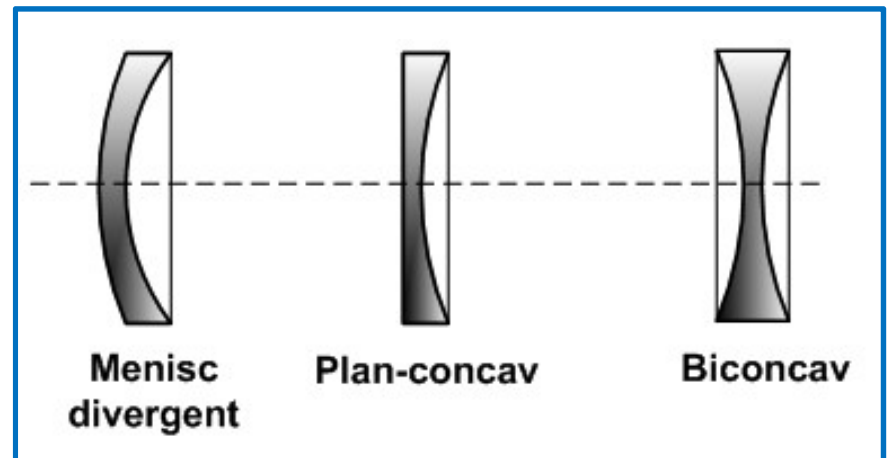
Tipuri de lentile. Aplicații.



Lentile convergente

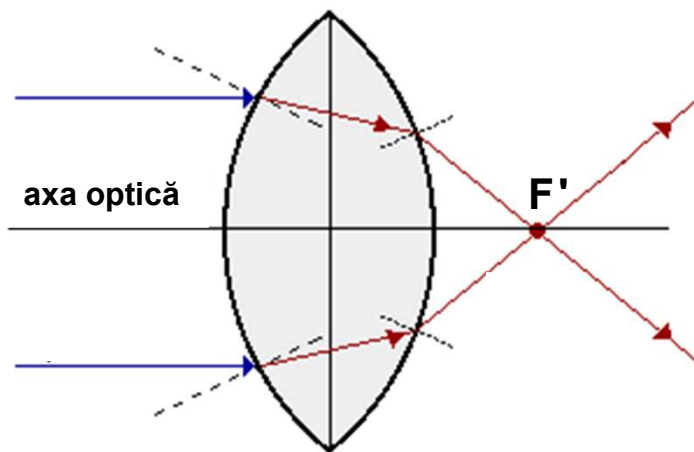


Lentile divergente

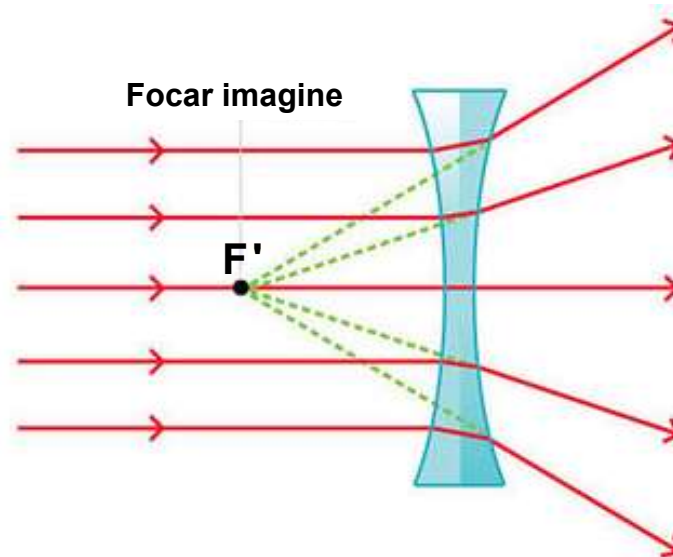
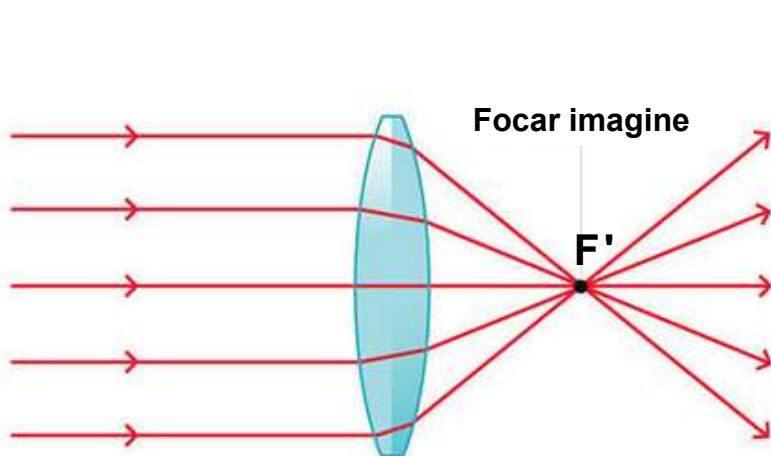
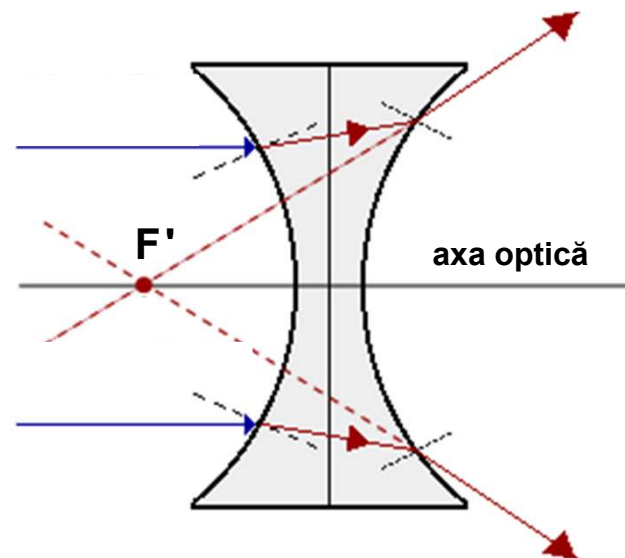


Propagarea razelor de lumină prin lentile

Lentilă convergentă

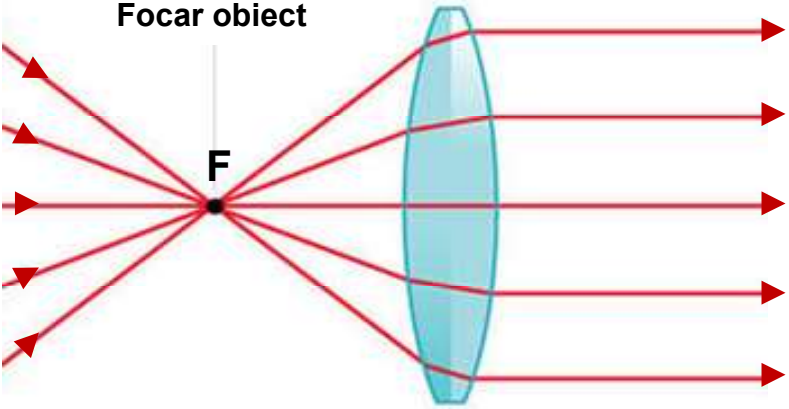
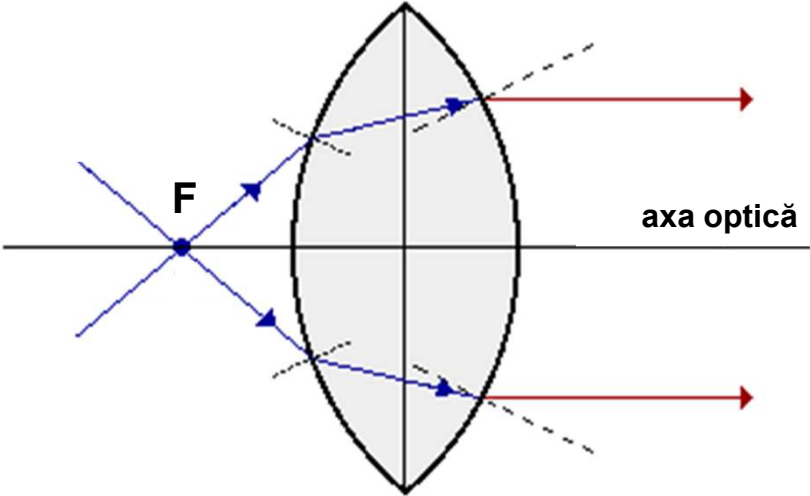


Lentilă divergentă

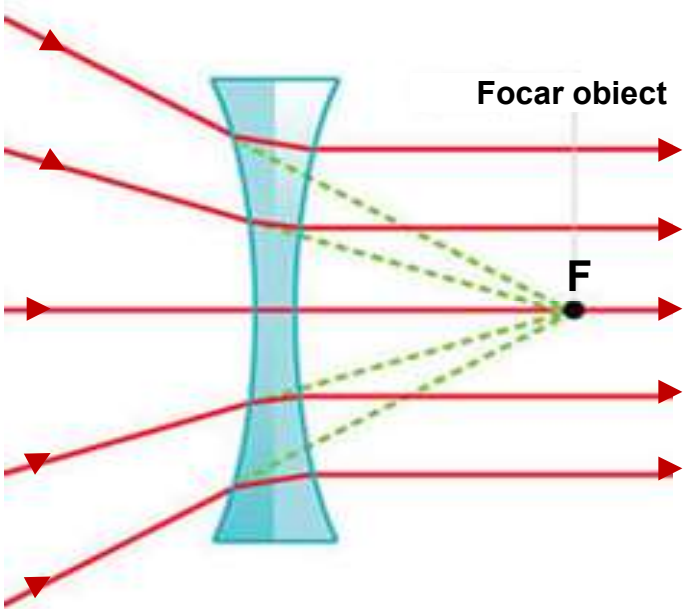
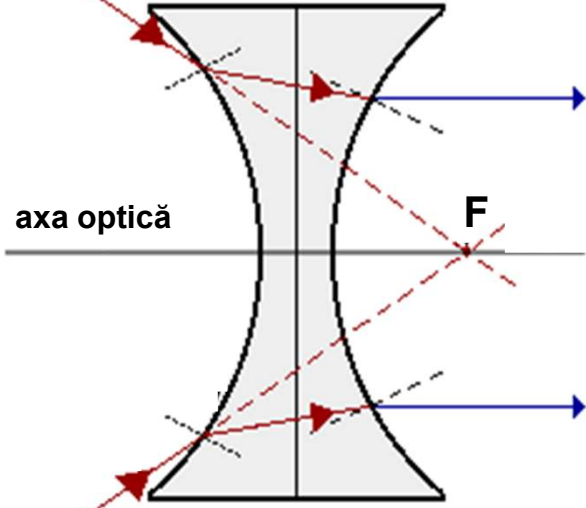


Propagarea razelor de lumină prin lentile

Lentilă convergentă



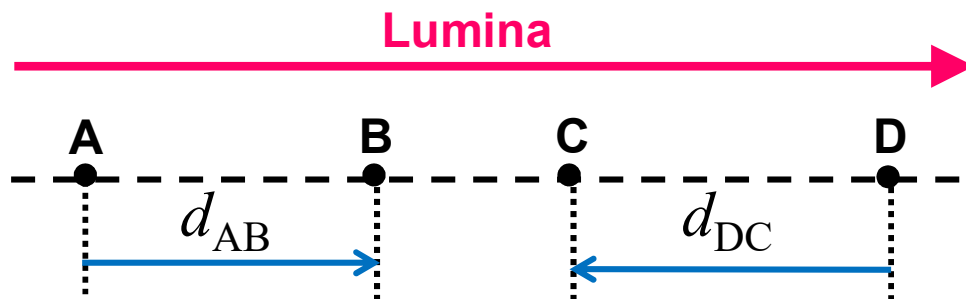
Lentilă divergentă



Convenții de semne (adoptate în cadrul acestui material)

1. Distanțele măsurate de-a lungul axei optice

- **pozitive** - dacă sunt măsurate în sensul propagării luminii;
- **negative** - dacă sunt măsurate în sens opus propagării luminii.



$$d_{AB} > 0$$

$$d_{DC} < 0$$

2. Distanțele măsurate perpendicular pe axa optică

- **pozitive** - dacă sunt măsurate de jos în sus;
- **negative** - dacă sunt măsurate de sus în jos.



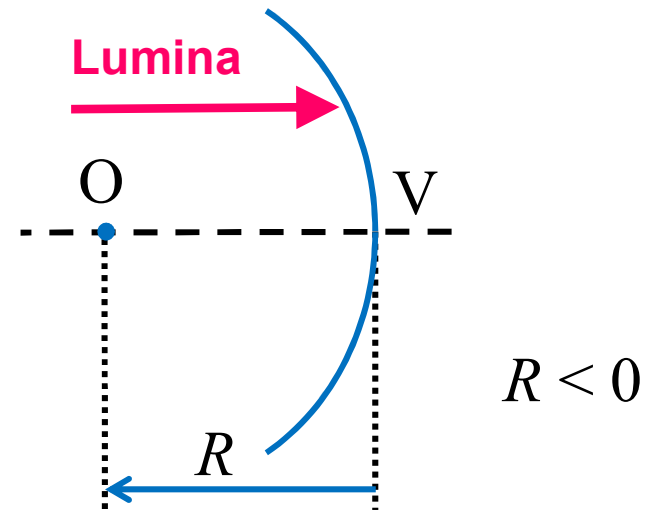
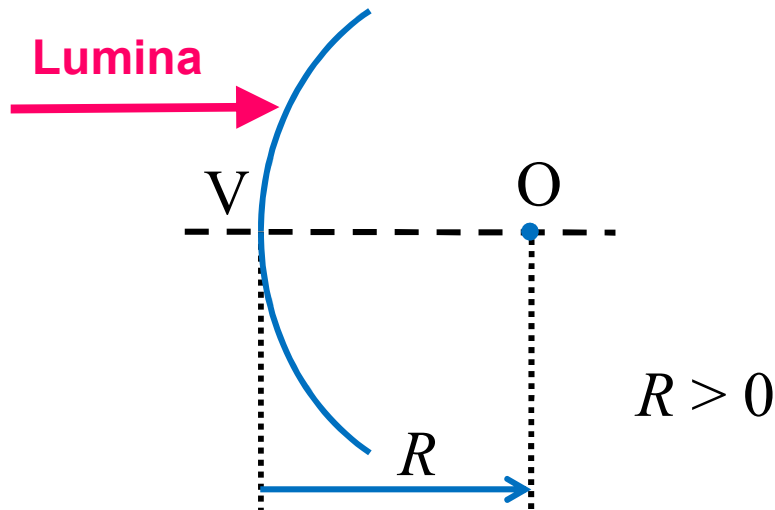
$$d_{AB} > 0$$

$$d_{DC} < 0$$

Convenții de semne (adoptate în cadrul acestui material)

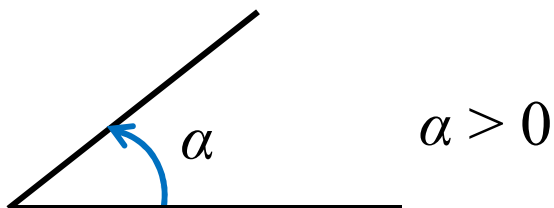
3. Razele de curbură ale suprafețelor sferice

- Se măsoară de la suprafața sferică înspre centrul de curbură.

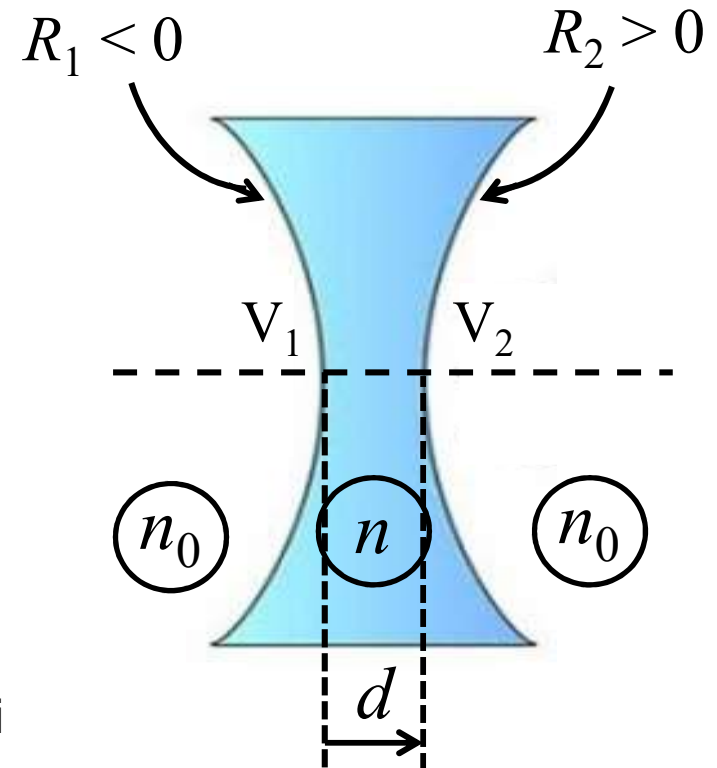
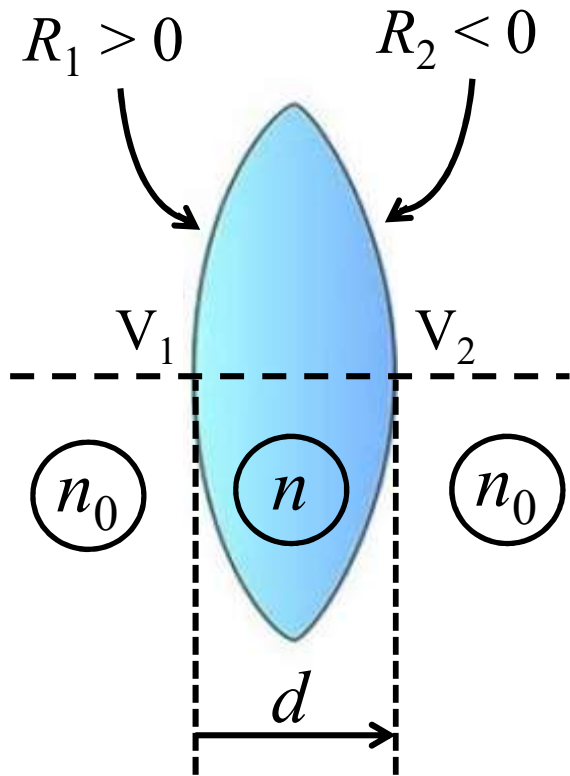


4. Unghiurile

- **pozitive** - dacă sunt măsurate în sens trigonometric;
- **negative** - dacă sunt măsurate în sensul acelor de ceasornic.



Lentila cu fețele în același mediu exterior



d – grosimea lentilei

$$C = \frac{1}{f} = (n_r - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{(n_r - 1)^2}{n_r} \cdot \frac{d}{R_1 R_2} ; \quad n_r = \frac{n}{n_0}$$

- Pentru lentile subțiri: $d = 0 \Rightarrow$

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

Construcția imaginilor în lentile subțiri. Formula lentilelor subțiri.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p'} - \frac{1}{p}$$

$$f' = -f$$

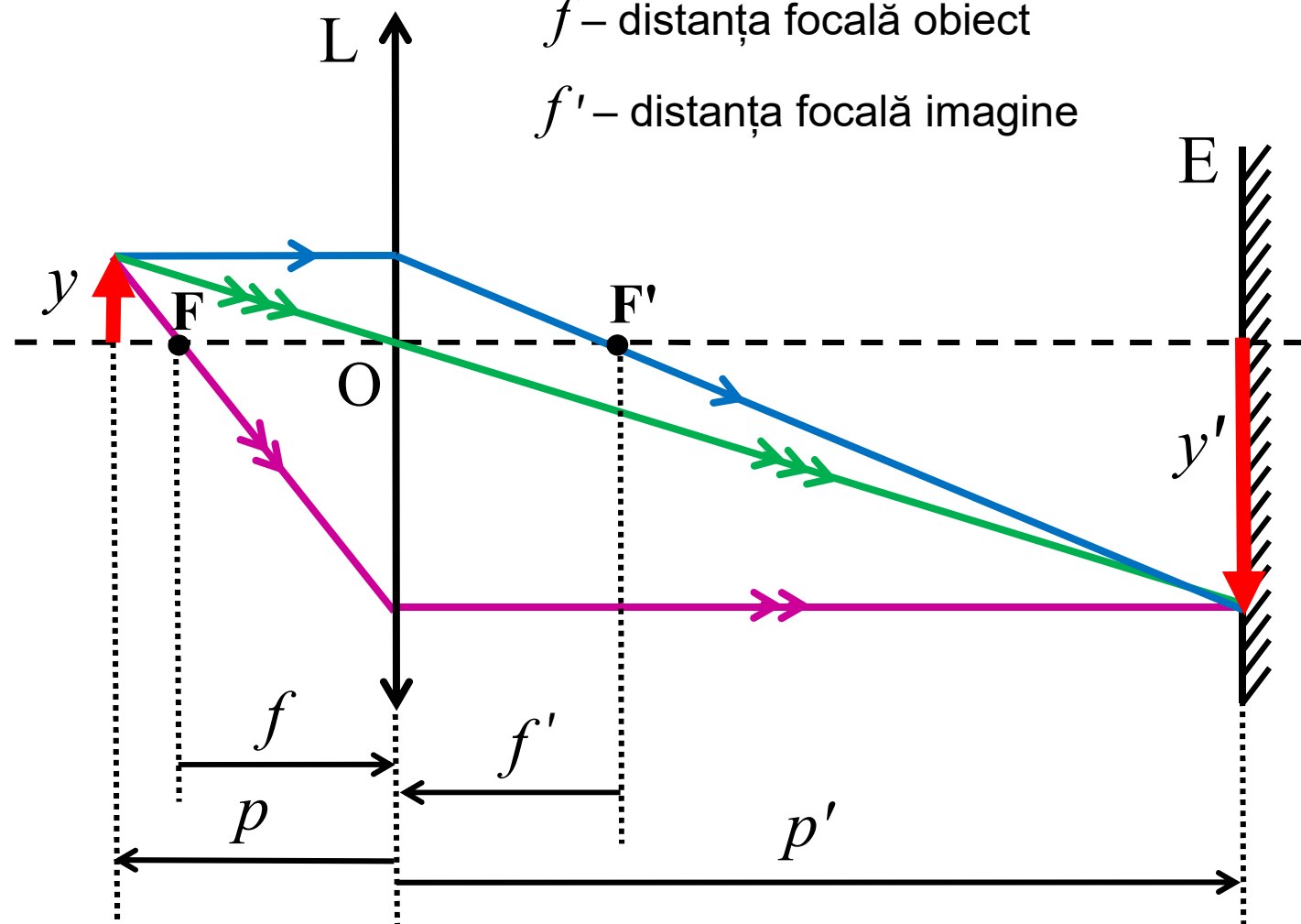
$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{p'}{p}$$

f – distanța focală obiect

f' – distanța focală imagine

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

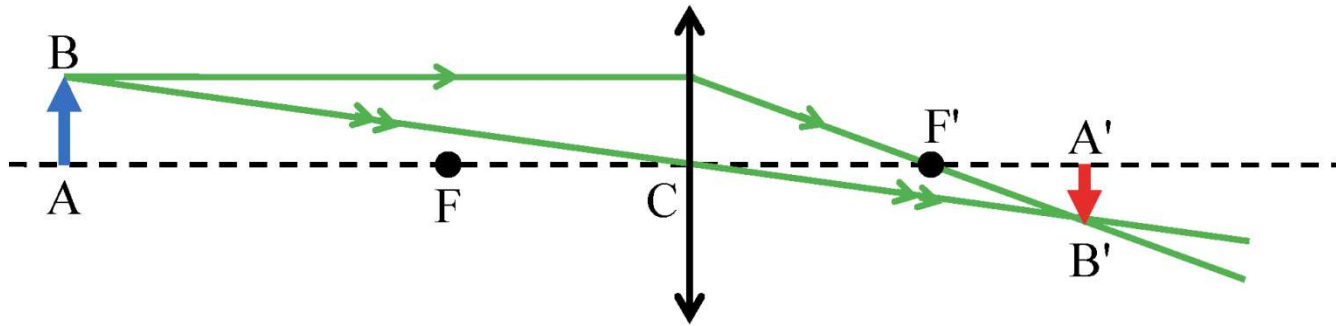
C - convergența



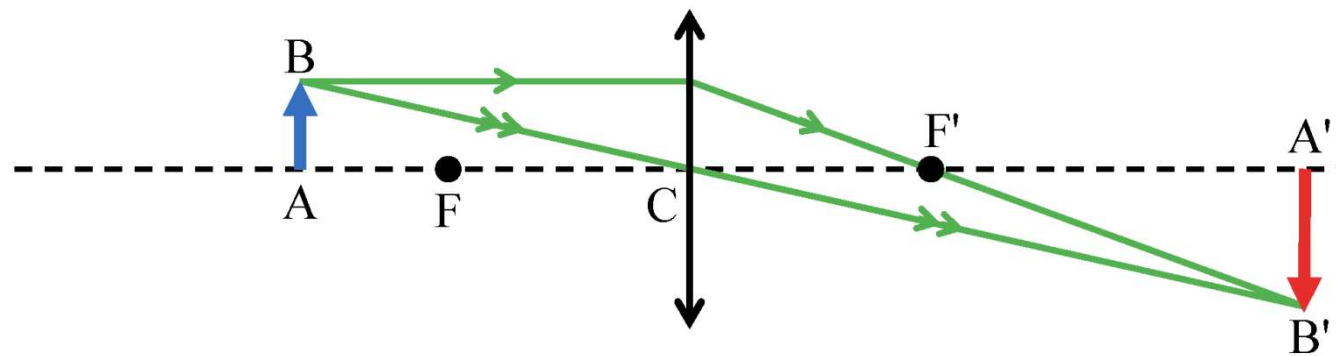
y – înălțimea obiectului

y' – înălțimea imaginii

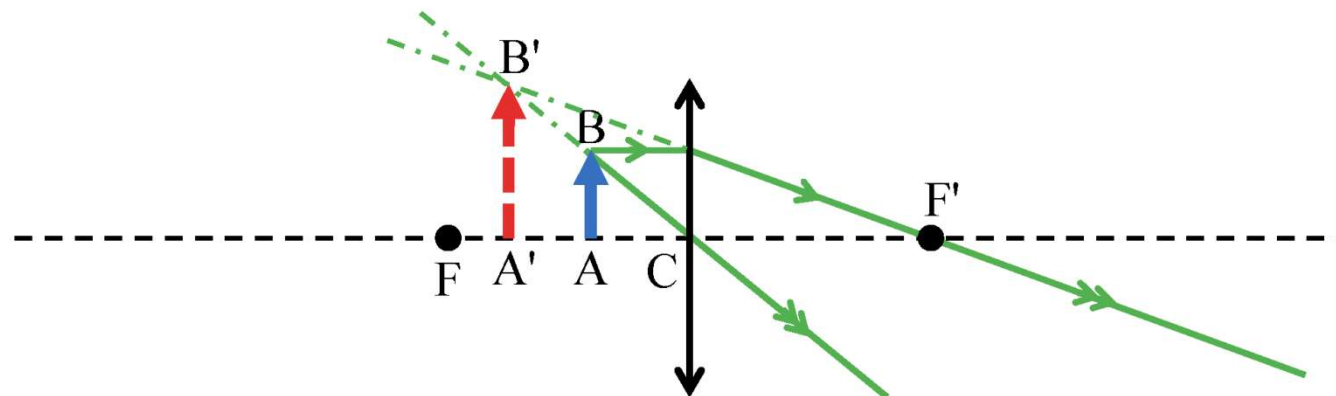
Formarea imaginilor în lentile subțiri convergente



Aparatul de fotografiat

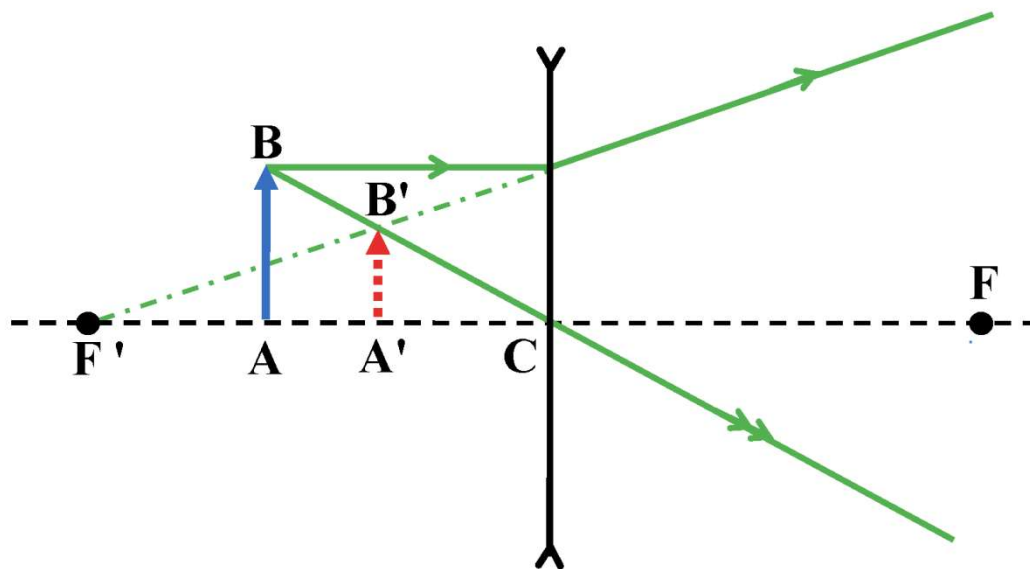
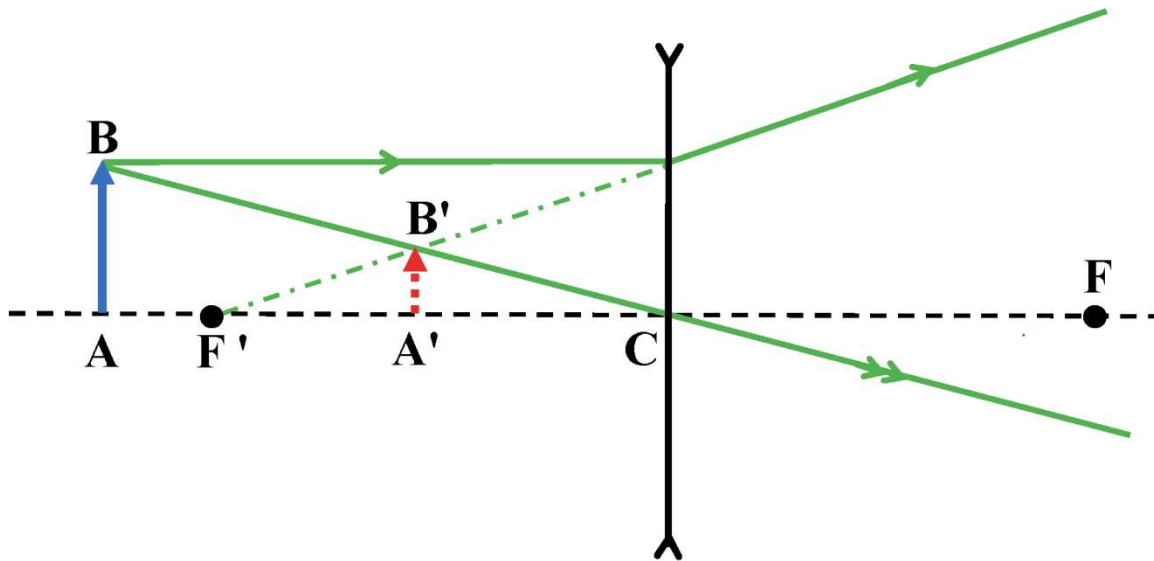


Aparatul de proiecție



Lupa

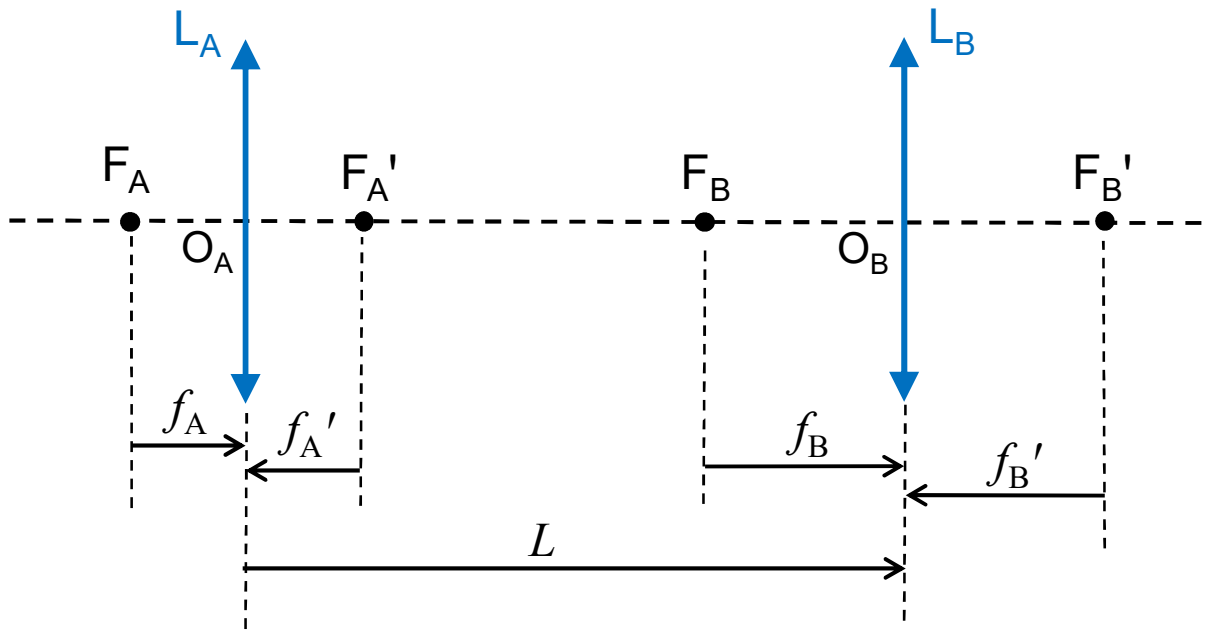
Formarea imaginilor în lentile subțiri divergente



Aplicații:
ochelari
de vedere



Sistem optic format din două lentile subțiri, aflate în aer



$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_A} + \frac{1}{f_B} - \frac{L}{f_A f_B}$$

$$C_A = \frac{1}{f_A} \quad ; \quad C_B = \frac{1}{f_B}$$

$$C = \frac{1}{f} \quad - \text{convergența}$$

$$\langle C \rangle_{SI} = \text{m}^{-1} = \delta$$

$$C = C_A + C_B - L C_A C_B$$

- Dacă lentilele sunt lipite $\Rightarrow L = 0 \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{f_A} + \frac{1}{f_B} \quad ; \quad C = C_A + C_B$

- Pentru un sistem format din **N lentile alipite**:

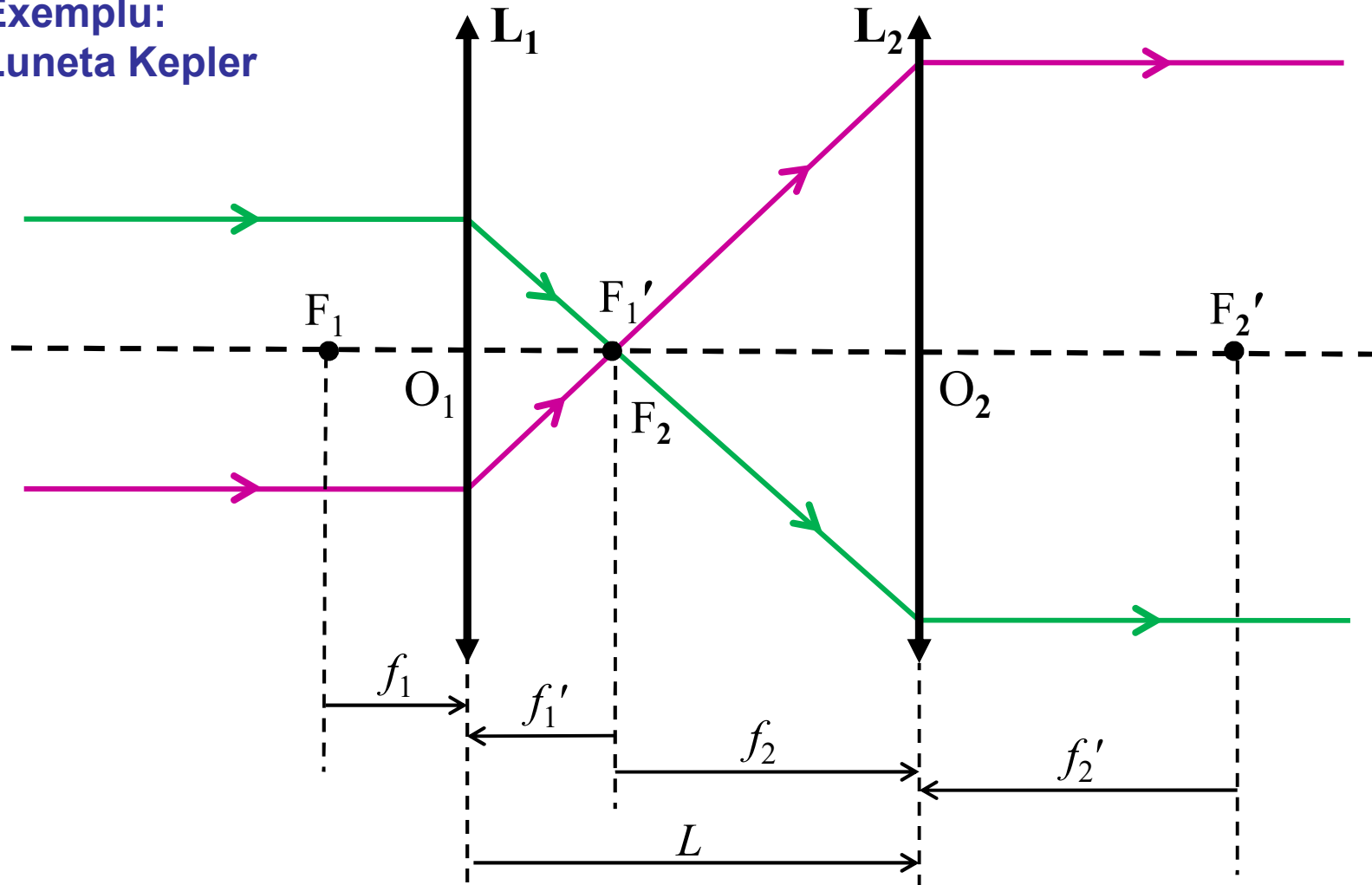
$$\frac{1}{f} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i}$$

$$C = \sum_{i=1}^N C_i$$

Sistem optic afocal (telescopic)

- Are convergența nulă ($C = 0$, $f = \infty$) $\Rightarrow F_1' \equiv F_2$
- Dacă asupra sistemului cade un fascicul de lumină paralel cu axa optică, atunci, la ieșirea din sistem, fasciculul va fi tot paralel cu axa optică.

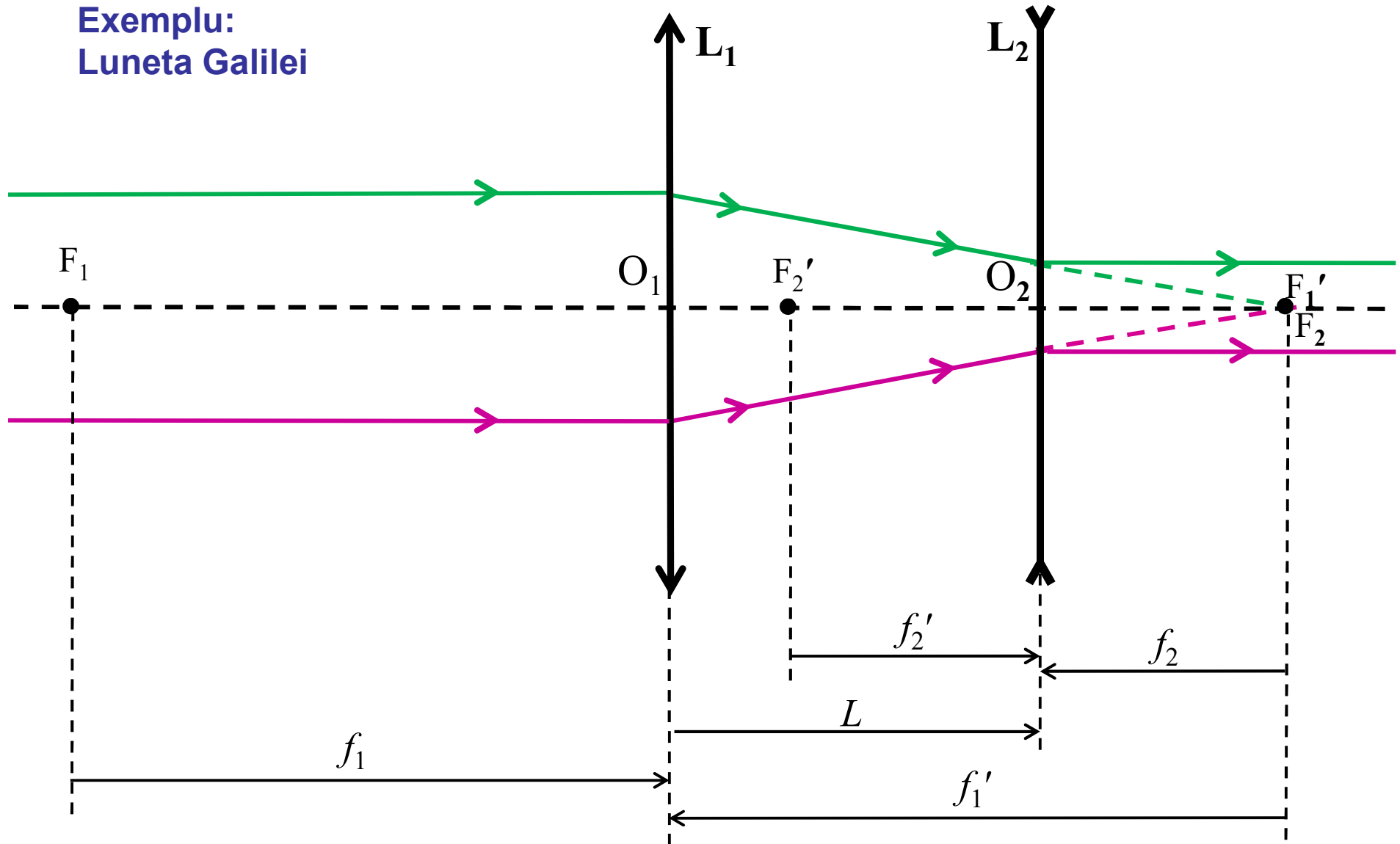
Exemplu:
Luneta Kepler



Sistem optic afocal (telescopic)

$$C = 0, f = \infty \Rightarrow F_1' \equiv F_2$$

Exemplu:
Luneta Galilei



CAPITOLUL II. OPTICA ONDULATORIE

II.1. NATURA LUMINII. NOȚIUNI FUNDAMENTALE.

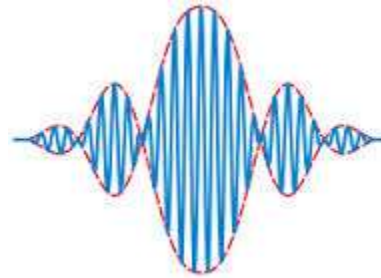


Concepția corpusculară a lui Newton

1704 – *Optica*

Lumina - fascicul de "mici particule" care se propagă în linie dreaptă.

Explică fenomenele de reflexie și refracție, dar nu poate explica interferența, difracția și polarizarea luminii.

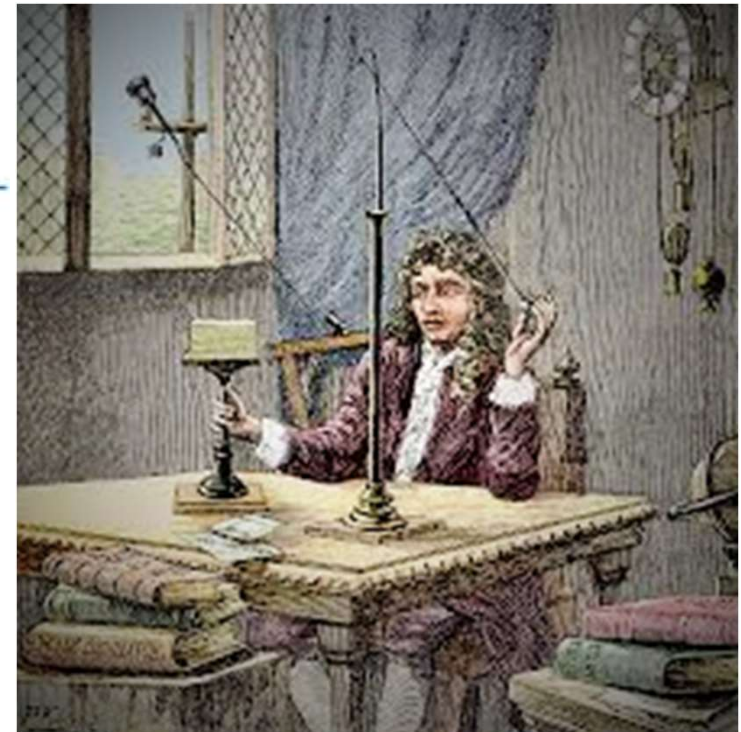


Concepția ondulatorie a lui Huygens

1690 - *Tratat despre lumină*

Lumina - „mișcare ondulatorie”.

Explică fenomenele de reflexie, refracție, interferență, difracție, polarizare.

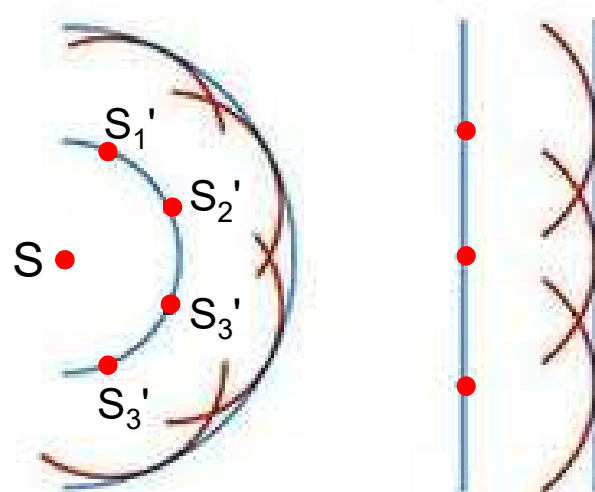


Dezvoltarea concepției ondulatorii

Principiul Huygens - Fresnel



Christian Huygens
(1629 – 1695)



Augustin Fresnel
(1788 – 1827)

- **Huygens** (1690 - *Traité de la lumière*): Orice punct atins de undă devine sursă de unde secundare, iar înfășurătoarea suprafețelor de undă ale undelor secundare este o suprafață de undă a undei primare.
- **Fresnel**: În fiecare punct al suprafeței auxiliare, amplitudinea și faza undei secundare, produse de sursa secundară din acel punct, sunt egale cu amplitudinea, respectiv, faza undei produse de sursa primară în acel punct.

Lumina – undă electromagnetică. Teoria lui Maxwell.



James Clerk
Maxwell
(1831 – 1879)

- Pentru un mediu omogen și izotrop:

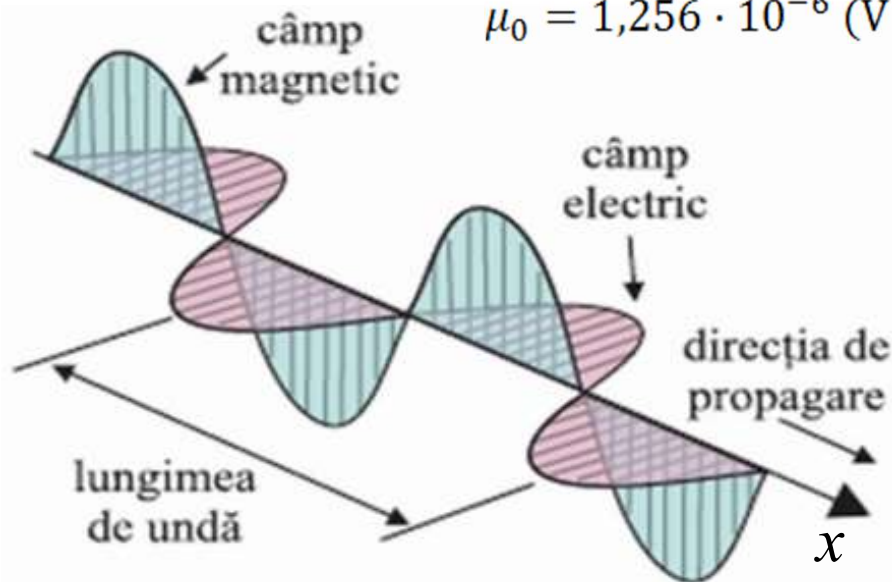
$$\mu = \text{const.}, \quad \varepsilon = \text{const.}, \quad \rho = 0, \quad \vec{j} = \mathbf{0}$$

- Pentru o undă luminoasă plană care se propagă de-a lungul axei x

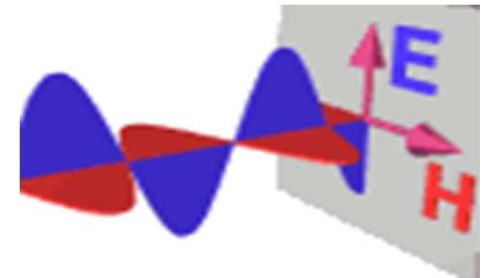
$$\begin{cases} \vec{E} = \vec{E}_0 e^{-i(\omega t - \vec{K}\vec{r})} = \vec{E}_0 e^{i\vec{K}\vec{r}} e^{-i\omega t} = \vec{E}'(\vec{r}) e^{-i\omega t} \\ \vec{B} = \vec{B}_0 e^{-i(\omega t - \vec{K}\vec{r})} = \vec{B}_0 e^{i\vec{K}\vec{r}} e^{-i\omega t} = \vec{B}'(\vec{r}) e^{-i\omega t} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \mu \vec{H} \quad ; \quad \mu = \mu_0 \mu_r \quad ; \quad v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{n} \\ \vec{D} &= \varepsilon \vec{E} \quad ; \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \end{aligned}$$

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ (V} \cdot \text{s)/(A} \cdot \text{m)} \quad ; \quad \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ (A} \cdot \text{s)/(V} \cdot \text{m)}$$



$$\vec{K} = \frac{\omega}{v} \vec{u}_K = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{u}_K$$



Concluzie:

- Lumina este o undă electromagnetică.
- Se propagă fără a necesita un mediu suport.

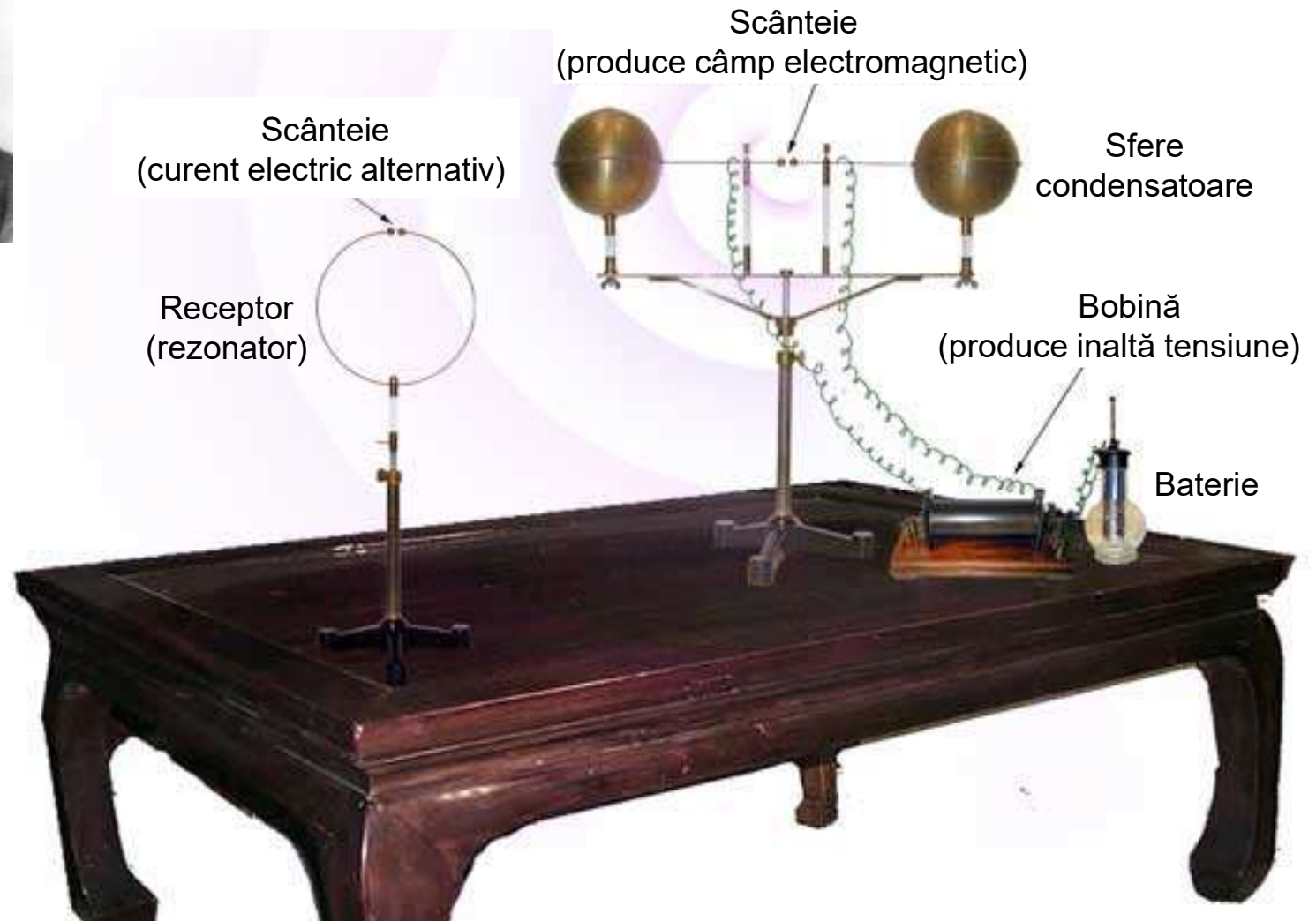
Verificarea experimentală a teoriei lui Maxwell

1887 – Heinrich Rudolf Hertz

Primul experiment de transmisie și recepție a undelor electromagnetice (folosind unde radio)



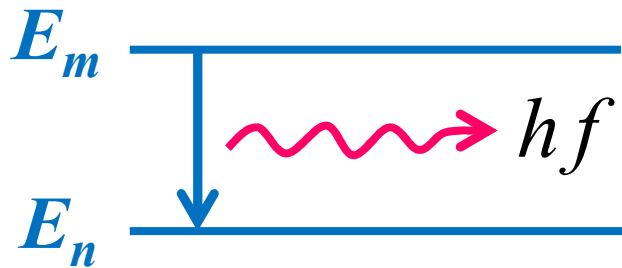
Heinrich Rudolph
Hertz
(1857 – 1894)



Noțiuni fundamentale despre lumină

1. Producerea luminii

Lumina este emisă de atomii diferitelor corpuri, ca urmare a tranzițiilor de pe nivele energetice mai înalte, pe nivele energetice mai joase.



$$hf = E_m - E_n$$

hf – energia radiației emise (fotonului emis)

f – frecvența radiației emise (fotonului emis)

h – constanta lui Planck

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

2. Indicele de refracție al unui mediu

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

n – indicele de refracție al mediului

c – viteza de propagare a luminii în vid

v – viteza de propagare a luminii în mediul respectiv.

Într-un mediu omogen și izotrop, n are aceeași valoare în orice punct al mediului.

$$n_{\text{vid}} = 1$$

$$n_{\text{aer}} = 1,0003 \cong 1$$

$$n_{\text{apă}} = 1,333$$

$$n_{\text{sticlă}} = 1,5 - 1,6$$

3. Lungimea de undă a luminii. Legătura dintre frecvență și lungimea de undă.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{\lambda_{\text{vid}}}{n}$$

λ – lungimea de undă a luminii în mediul de propagare

v – viteza luminii

f – frecvența luminii

- **În aer:** $v_{\text{aer}} = 2,997924562 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cong c$ (Michelson, 1926)

$$\lambda_{\text{aer}} \cong \lambda_{\text{vid}}$$

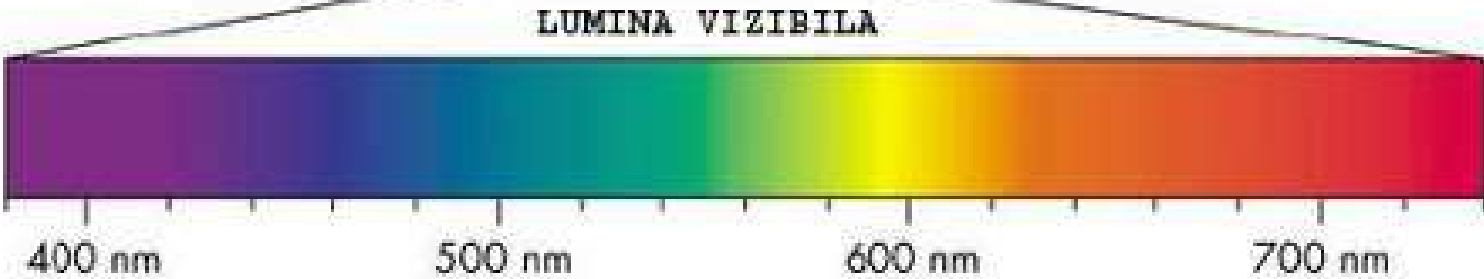
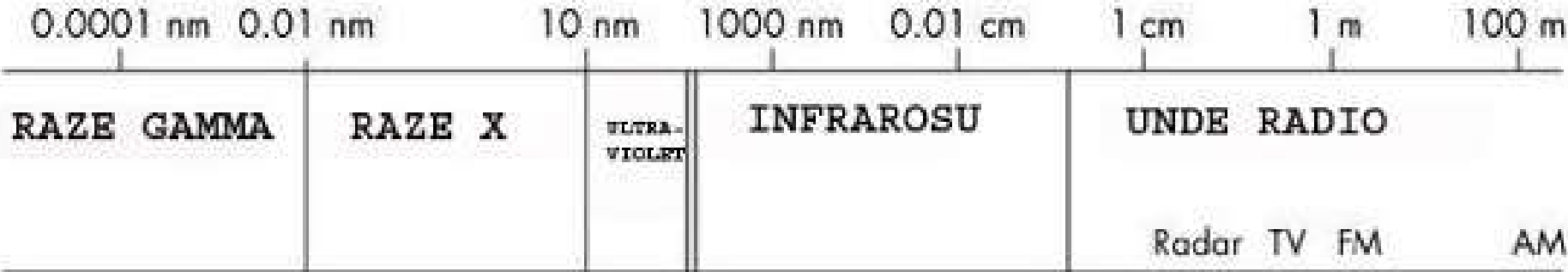
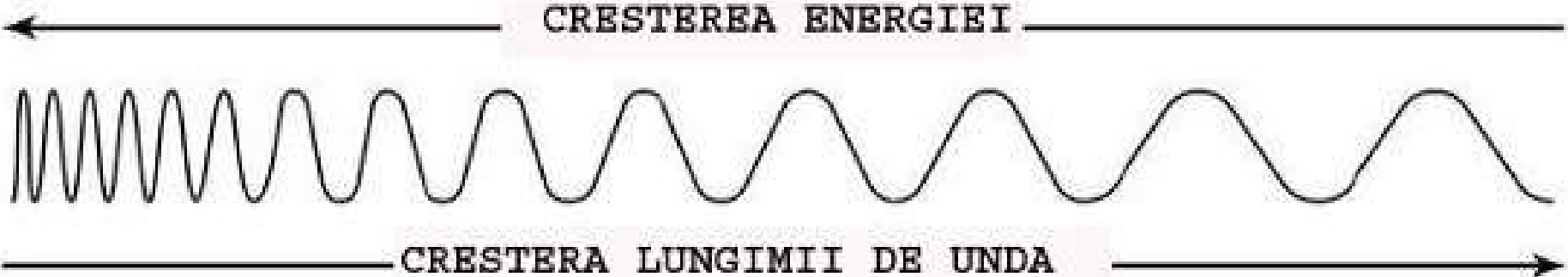
- **În vid:** $v_{\text{vid}} = c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

$$\lambda_{\text{vid}} = \frac{c}{f}$$

- **Într-un alt mediu:** $v < c$

$$\lambda < \lambda_{\text{vid}}$$

Spectrul radiației electromagnetice



Spectrul radiației luminoase vizibile

Culoare	Intervalul de lungimi de undă	Intervalul de frecvențe
Roșu	$\sim(610 - 780) \text{ nm}$	$\sim (480 - 405) \text{ THz}$
Oranj	$\sim (590 - 650) \text{ nm}$	$\sim (510 - 480) \text{ THz}$
Galben	$\sim (575 - 590) \text{ nm}$	$\sim (530 - 510) \text{ THz}$
Verde	$\sim (510 - 560) \text{ nm}$	$\sim (600 - 530) \text{ THz}$
Albastru	$\sim (485 - 500) \text{ nm}$	$\sim (620 - 600) \text{ THz}$
Indogo	$\sim (452 - 470) \text{ nm}$	$\sim (680 - 620) \text{ THz}$
Violet	$\sim (380 - 424) \text{ nm}$	$\sim (790 - 680) \text{ THz}$

4. Impulsul fotonului

(conform ipotezei lui de Broglie, 1924)

$$\vec{p} = \hbar \vec{K}$$

$$p = \hbar K = \frac{h}{\lambda}$$

\vec{p} – impulsul fotonului

\vec{K} – vectorul de undă al undei asociate fotonului

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v}$$

λ – lungimea de undă a undei asociate fotonului

ω – pulsația undei asociate fotonului

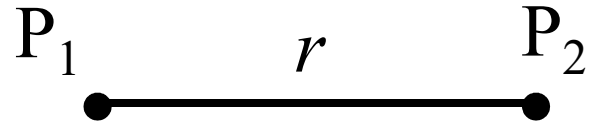
v – viteza luminii (viteza de grup a undei asociate fotonului)

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

\hbar – constanta lui Planck generalizată

h – constanta lui Planck

5. Drumul geometric și drumul optic al luminii



- **Drumul geometric:** - reprezintă distanța geometrică dintre puncte:

$$\delta_{\text{geom}} = P_1 P_2 = r$$

- **Drumul optic:**

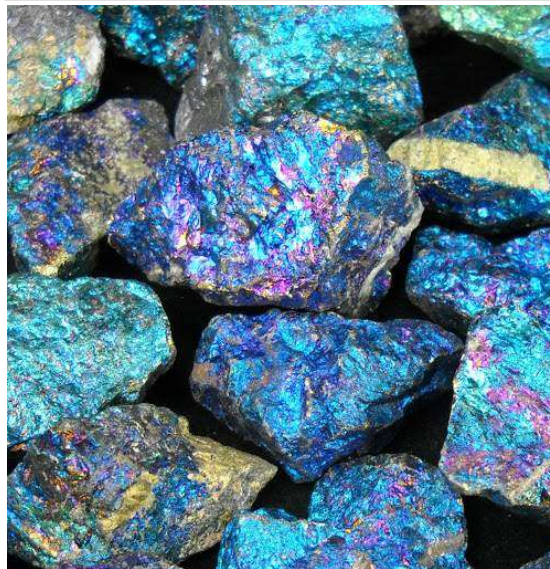
- **cazul mediului omogen** ($n =$ are aceeași valoare în tot mediul):

$$\delta_{\text{opt}} = n r$$

- **cazul mediului neomogen** ($n =$ are valori diferite în mediu):

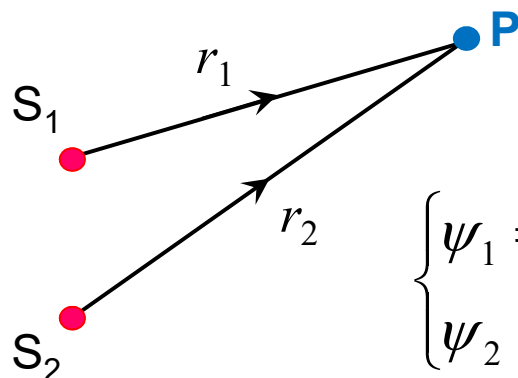
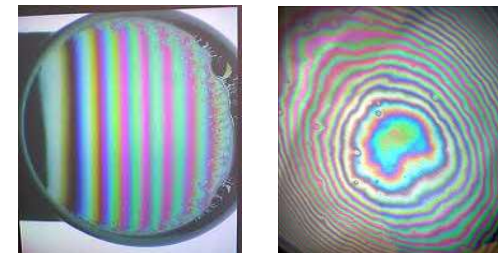
$$\delta_{\text{opt}} = \int_{P_1}^{P_2} n dr$$

II.2. INTERFERENȚA LUMINII



Interferența luminii. Condiții de producere.

Interferența luminii este procesul de suprapunere a două sau mai multe unde luminoase, cu producerea unei distribuții spațial - periodice a intensității luminii.



P la distanțe r_1 și r_2 mari față de $S_1, S_2 \rightarrow$ unde plane, paralele.

$$\begin{cases} \psi_1 = A_1(r_1)e^{-i(\omega_1 t + \varphi_{01})} = A_{01}e^{iK_1 r_1}e^{-i(\omega_1 t + \varphi_{01})} = A_{01}e^{-i(\omega_1 t - K_1 r_1 + \varphi_{01})} \\ \psi_2 = A_2(r_2)e^{-i(\omega_2 t + \varphi_{02})} = A_{02}e^{iK_2 r_2}e^{-i(\omega_2 t + \varphi_{02})} = A_{02}e^{-i(\omega_2 t - K_2 r_2 + \varphi_{02})} \end{cases}$$

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 \quad ; \quad I \approx \langle A^2 \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} A^2 dt \quad ; \quad \Delta\varphi = (K_2 r_2 - K_1 r_1) - (\omega_2 - \omega_1)t - (\varphi_{02} - \varphi_{01})$$

$$A^2 = \psi \cdot \psi^* = \left[A_{01}e^{-i(\omega_1 t - K_1 r_1 + \varphi_{01})} + A_{02}e^{-i(\omega_2 t - K_2 r_2 + \varphi_{02})} \right] \cdot \left[A_{01}e^{i(\omega_1 t - K_1 r_1 + \varphi_{01})} + A_{02}e^{i(\omega_2 t - K_2 r_2 + \varphi_{02})} \right]$$

$$A^2 = A_{01}^2 + A_{02}^2 + 2A_{01}A_{02} \cos \Delta\varphi \quad - \text{pătratul amplitudinii unei rezultante în P}$$

$$I \approx A_{01}^2 + A_{02}^2 + 2A_{01}A_{02} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} (\cos \Delta\varphi) dt \quad - \text{intensitatea unei rezultante în P}$$

τ - timpul necesar observării

$$\tau \cong 10^{-1} \text{ s} \gg \tau_0 \cong 10^{-8} \text{ s} \quad ; \quad \tau \gg T$$

Unde coerente. Condiția de coerență.

$$I \approx A_{01}^2 + A_{02}^2 + 2A_{01}A_{02} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} (\cos \Delta\varphi) dt$$

- intensitatea unei rezultante în P
 $\tau \cong 10^{-1} \text{ s} \gg \tau_0 \cong 10^{-8} \text{ s} \quad ; \quad \tau \gg T$

$$\Delta\varphi = (K_2 r_2 - K_1 r_1) - (\omega_2 - \omega_1)t - (\varphi_{02} - \varphi_{01})$$

- **Cazul 1:** $\Delta\varphi \neq \text{const. în timp} \Rightarrow \int_0^{\tau} (\cos \Delta\varphi) dt = 0 \quad ; \quad \Delta\varphi \in [0, 2\pi]$

$$I \approx A_{01}^2 + A_{02}^2 \quad ; \quad \boxed{I = I_1 + I_2} \Rightarrow \text{nu se observă interferență}$$

- **Cazul 2:** $\Delta\varphi = \text{const. în timp} \Rightarrow \boxed{\omega_2 = \omega_1 = \omega} \quad ; \quad K_2 = K_1 = K$

$$\Delta\varphi = K(r_2 - r_1) - (\varphi_{02} - \varphi_{01}) \rightarrow \text{variabil în spațiu}$$

$$I \approx A_{01}^2 + A_{02}^2 + 2A_{01}A_{02} \cos \Delta\varphi \quad ; \quad \boxed{I = I_1 + I_2 + I_{12}} \Rightarrow \text{interferență}$$

- **Cazul 2 a):** $\Delta\varphi = 2m\pi \quad ; \quad m \in Z \Rightarrow I_{\max} \approx (A_{01} + A_{02})^2$

- **Cazul 2 b):** $\Delta\varphi = (2m + 1)\pi \Rightarrow I_{\min} \approx (A_{01} - A_{02})^2$

Concluzie: Pentru ca fenomenul de interferență să fie observabil, trebuie ca:

$\Delta\varphi = \text{const. în timp și } \Delta\varphi \neq 0$ (condiția de coerență).

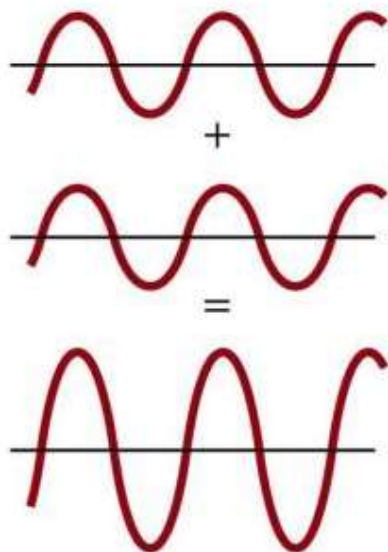
Asemenea unde se numesc **unde coerente**.

Condiții pentru minime și maxime de interferență

Exemplu: cazul interferenței a două unde cu aceeași amplitudine, $A_{01} = A_{02} = A_0$

Dacă cele două unde sunt în fază:

$$\Delta\varphi = 2m\pi ; m \in Z$$

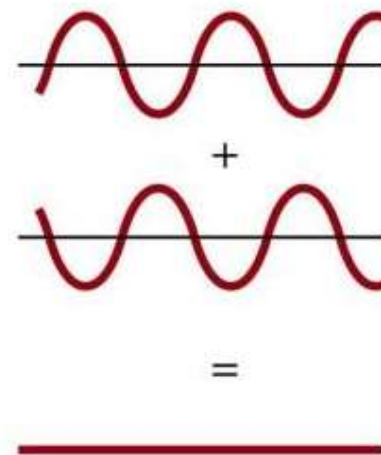


→ **Interferență constructivă**
(maxime de interferență)

$$I_{\max} \approx (2A_0)^2 = 4A_0^2$$

Dacă cele două unde sunt în opoziție de fază:

$$\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$$



→ **Interferență distructivă**
(minime de interferență)

$$I_{\min} \approx (A_0 - A_0)^2 = 0$$

Realizarea practică a coerenței

Emisia atomilor se produce în mod discontinuu, durata unei emisii fiind $\tau_0 \cong 10^{-8}$ s mult mai mică decât intervalul de timp dintre două emisii succesive.

⇒ Pentru două unde provenite de la atomi diferiți:

- 1) $\Delta\varphi_0 \neq \text{const.}$ în timp, se schimbă la fiecare proces elementar de emisie;
- 2) undele nu sunt riguros monocromatice, emisia se produce sub forma unor “trenuri de unde”, pentru care $\Delta\varphi$ variază aleatoriu în timp.

⇒ Coerența este, practic, imposibil de realizat folosind unde provenite de la două surse diferite sau de a o sursă extinsă.

⇒ **1) Sursa trebuie să fie punctiformă (condiția de coerență spațială).**

$$\boxed{d \ll \lambda} \quad \text{sau} \quad \boxed{d < \lambda ; d \sin \alpha \ll \frac{\lambda}{2}} ; \quad \begin{array}{l} d - \text{dimens. cea mai mare a sursei} \\ 2\alpha - \text{deschiderea unghiulară} \end{array}$$

⇒ **2) Trenurile de unde ale celor două unde trebuie să se suprapună pentru un timp suficient de lung.**

$$\boxed{\tau_{\text{supr}} > \tau_0} \rightarrow \text{condiția de coerență temporală}$$

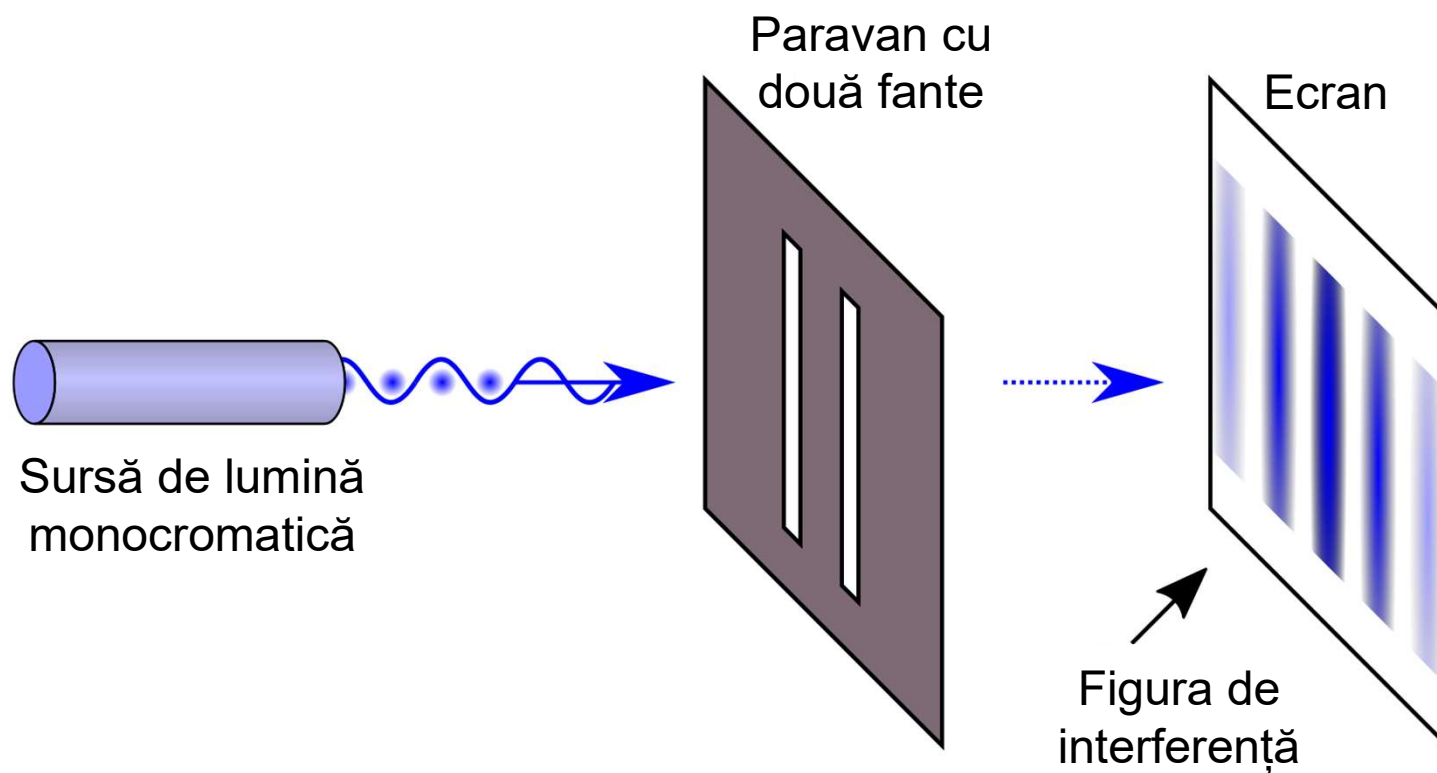
$$\boxed{\tau_0 \cong 10^{-8} \text{ s}} \rightarrow \text{timp de coerență (timpul de emisie al unui tren de unde).}$$

$$\boxed{l_0 = c \cdot \tau_0 \cong 3 \text{ m}} \rightarrow \text{lungime de coerență (lungimea unui tren de unde).}$$

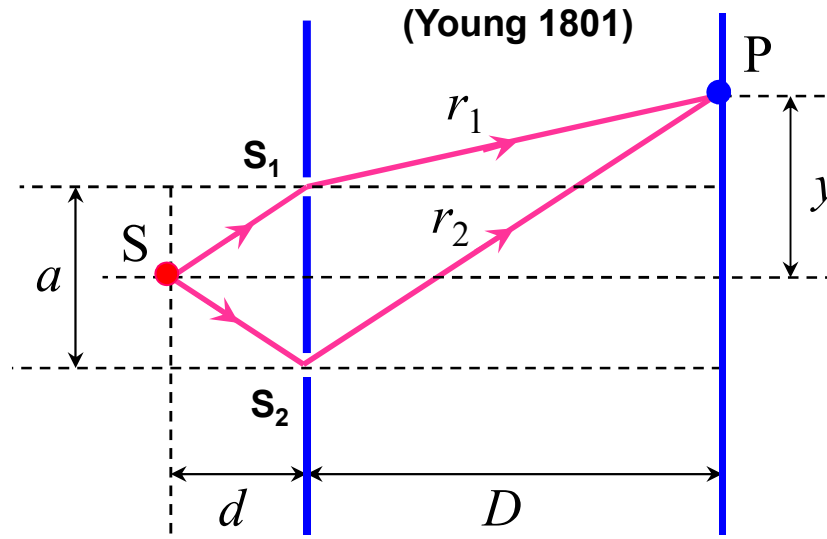
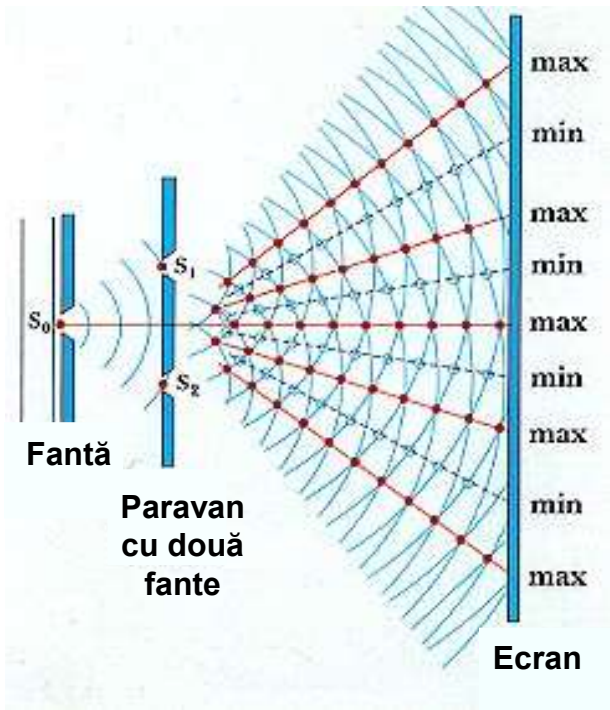
$$\boxed{\Delta r < l_0} \rightarrow \text{condiția de coerență temporală ; } \Delta r \rightarrow \text{diferența de drum dintre unde.}$$

II.3. DISPOZITIVUL LUI YOUNG

Elemente componente



Interferența luminii cu ajutorul dispozitivului Young



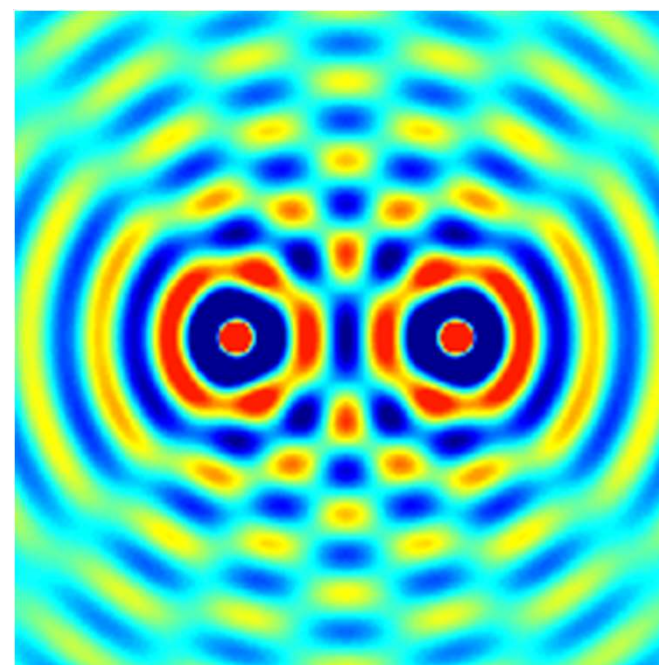
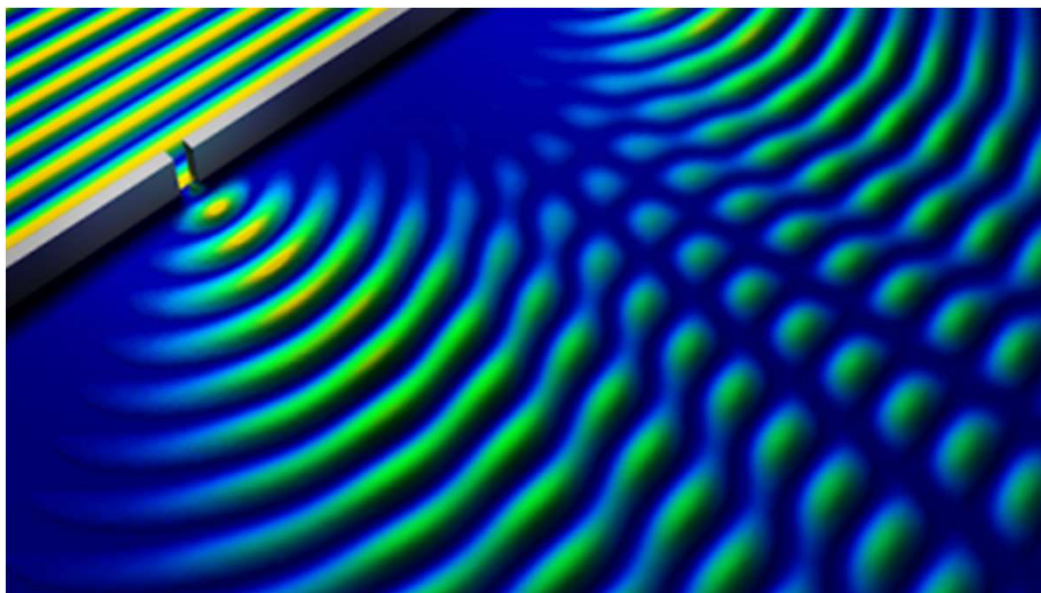
Thomas Young
(1773 – 1829)

La propagarea undelor luminoase prin vid:

$$\begin{cases} \psi_1 = A_0 \sin(Kr_1 - \omega t) \\ \psi_2 = A_0 \sin(Kr_2 - \omega t) \end{cases} ; \Delta\varphi = K(r_2 - r_1)$$

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = 2A_0 \cos\left(\frac{K(r_2 - r_1)}{2}\right) \sin\left(\frac{K(r_1 + r_2)}{2} - \omega t\right) ; \boxed{\psi = A \sin\left(\frac{K(r_1 + r_2)}{2} - \omega t\right)}$$

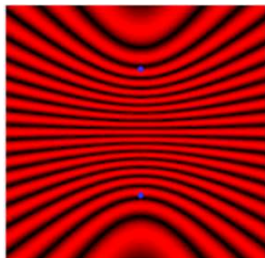
$$\boxed{A = 2A_0 \cos\left(\frac{K(r_2 - r_1)}{2}\right)} ; \boxed{I \approx A^2 = 4A_0^2 \cos^2\left(\frac{K(r_2 - r_1)}{2}\right)}$$



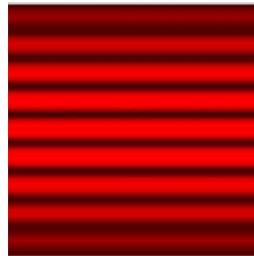
Dispozitivul lui Young. Figura de interferență.

$$\psi = A \sin\left(\frac{K(r_1 + r_2)}{2} - \omega t\right) ; \quad A = 2A_0 \cos\left(\frac{K(r_2 - r_1)}{2}\right) ; \quad I \approx A^2 = 4A_0^2 \cos^2\left(\frac{K(r_2 - r_1)}{2}\right)$$

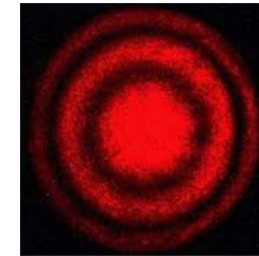
- Pe un ecran, se obțin **franje de interferență nelocalizate**.



În plan paralel
cu S_1S_2 :
hiperbole (pe
porțiuni mari)



În plan paralel
cu S_1S_2 :
drepte (pe
porțiuni mici în
jurul centrului)



În plan
perpendicular
pe S_1S_2 :
**cercuri
concentrice**

- **Condițiile pentru maxime și minime de interferență:**

1. **Obținem maxime de interferență pentru:**

$$\cos\left(\frac{K(r_2 - r_1)}{2}\right) = \pm 1 \Rightarrow A_{\max} = 2A_0 ; I_{\max} \approx 4A_0^2 ; \quad K(r_2 - r_1) = 2m\pi, m \in Z \Rightarrow r_2 - r_1 = 2m \frac{\lambda}{2}$$

2. **Obținem minime de interferență pentru:**

$$\cos\left(\frac{K(r_2 - r_1)}{2}\right) = 0 \Rightarrow A_{\min} = 0 ; I_{\min} = 0 ; \quad K(r_2 - r_1) = (2m+1)\pi, m \in Z \Rightarrow r_2 - r_1 = (2m+1) \frac{\lambda}{2}$$

Generalizarea condițiilor de maxim și minim de interferență în cazul dispozitivului Young

- Propagarea luminii printr-un mediu omogen și izotrop oarecare, cu indicele de refracție n :

$$\lambda' = \frac{v}{f} = \frac{v}{c} \lambda = \frac{\lambda}{n}$$

λ' - lungimea de undă a luminii în mediul de propagare

v - viteza undei luminoase în mediul de propagare

f - frecvența undei luminoase

c - viteza undei luminoase în mediul de propagare

λ - lungimea de undă a luminii în vid

n - indicele de refracție al mediului de propagare

→ Condițiile de maxim și minim devin:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_2 - r_1 = 2m \frac{\lambda'}{2} = 2m \frac{\lambda}{2n} \quad \rightarrow \text{pentru maxime} \\ r_2 - r_1 = (2m + 1) \frac{\lambda'}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2n} \quad \rightarrow \text{pentru minime} \end{array} \right.$$

Generalizarea condițiilor de maxim și minim de interferență în cazul dispozitivului Young

$\delta_{\text{opt}} = n(r_2 - r_1)$ - diferența de drum optic dintre cele două unde luminoase

$r_2 - r_1$ - diferența de drum geometric dintre cele două unde luminoase

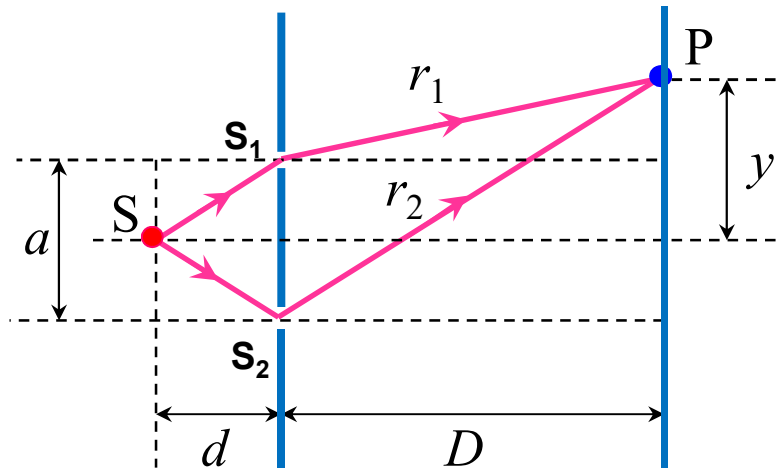
→ Condițiile de maxim și minim de interferență:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{\text{opt}} = 2m \frac{\lambda}{2} \quad \rightarrow \text{pentru maxime de interferență} \\ \delta_{\text{opt}} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad \rightarrow \text{pentru minime de interferență} \end{array} \right.$$

$m \in Z$ - ordinul franjei de interferență

$m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Dispozitivul lui Young. Interfranja.



La propagarea undelor prin vid:

$$\begin{cases} r_1^2 = D^2 + \left(y - \frac{a}{2}\right)^2 \\ r_2^2 = D^2 + \left(y + \frac{a}{2}\right)^2 \end{cases}$$

$$r_2^2 - r_1^2 = 2ay \quad ; \quad r_2 - r_1 = \frac{2ay}{r_1 + r_2}$$

$$a \ll D, \quad y \ll D \Rightarrow r_1 + r_2 \cong 2D \Rightarrow r_2 - r_1 = \frac{ay}{D} \Rightarrow y = (r_2 - r_1) \frac{D}{a}$$

- **Maxime** se obțin pentru: $r_2 - r_1 = 2m \frac{\lambda}{2} \Rightarrow (y_{\max})_m = 2m \frac{\lambda D}{2a}$

- **Minime** se obțin pentru: $r_2 - r_1 = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \Rightarrow (y_{\min})_m = (2m + 1) \frac{\lambda D}{2a}$

\Rightarrow **Maximele și minimele sunt echidistante. Interfranja este distanța dintre două maxime sau două minime consecutive:**

$$i = (y_{\max})_{m+1} - (y_{\max})_m = (y_{\min})_{m+1} - (y_{\min})_m = \frac{\lambda D}{a}$$



Generalizarea condițiilor pentru maxime și minime de interferență

În cazul propagării luminii printr-un mediu omogen cu indicele de refracție n

$$\lambda' = \frac{v}{f} ; \quad \lambda = \frac{c}{f} ; \quad n = \frac{c}{v} \Rightarrow \boxed{\lambda' = \frac{v}{c} \lambda = \frac{\lambda}{n} < \lambda}$$

$$\boxed{\delta = n \Delta r} \text{ - diferența de drum optic} ; \quad \boxed{y = \delta \frac{D}{a}} \text{ - poziția pe ecran}$$

- **Condiția de maxim la interferență:**

$$\Delta r = 2m \frac{\lambda'}{2} = 2m \frac{\lambda}{2n} ; \quad m \in Z$$

$$\Rightarrow \boxed{\delta = 2m \frac{\lambda}{2}} ; \quad \boxed{(y_{\max})_m = 2m \frac{\lambda D}{2a} = m i}$$

- **Condiția de minim la interferență:**

$$\Delta r = (2m + 1) \frac{\lambda'}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2n} ; \quad m \in Z$$

$$\Rightarrow \boxed{\delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}} ; \quad \boxed{(y_{\min})_m = (2m + 1) \frac{\lambda D}{2a} = \left(m + \frac{1}{2}\right) i}$$

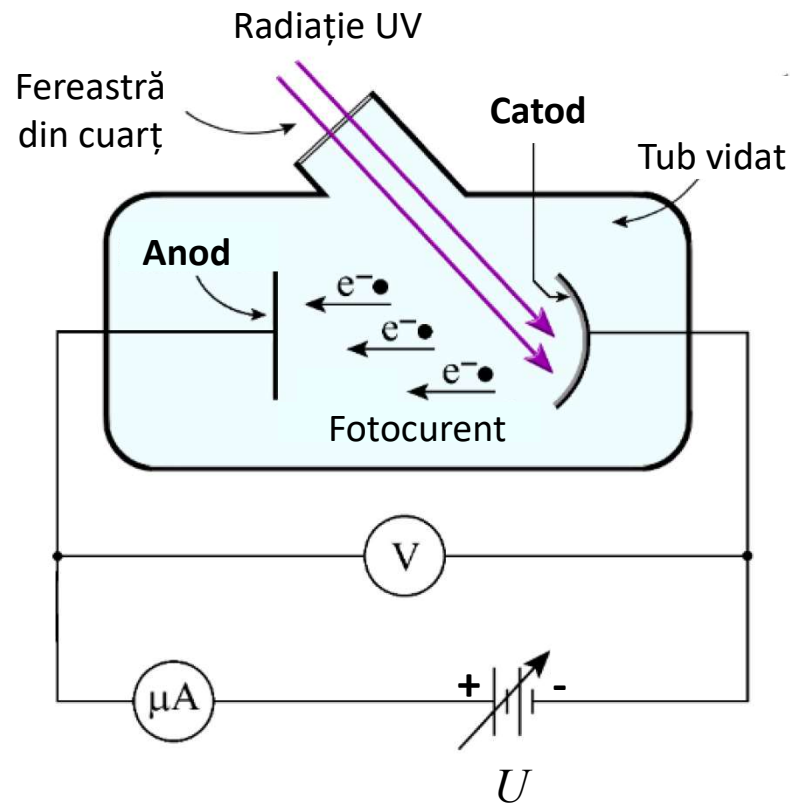
CAPITOLUL III. ELEMENTE DE FIZICĂ CUANTICĂ

III.1. EFECTUL FOTOELECTRIC EXTERN

Caracteristici ale fotonului

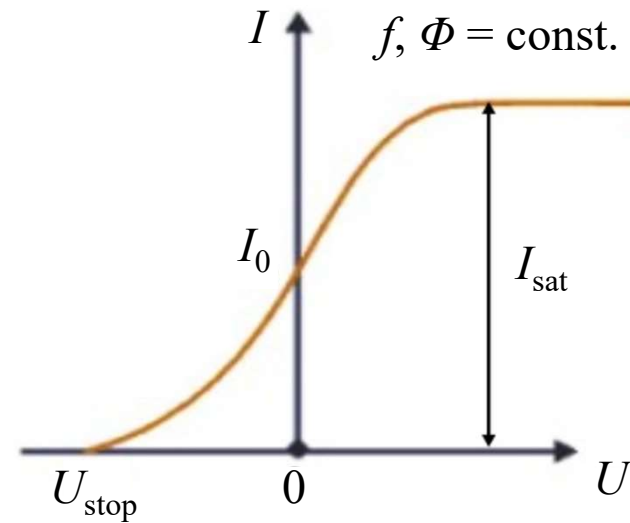
Mărimea	Formula
Energia	$E = hf$
Masa de repaus	$m_0 = 0$
Masa de mișcare	$m = \frac{hf}{c^2}$
Viteza	$v = c$
Impulsul	$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$
Sarcina electrică	$q = 0$

Efectul fotoelectric extern. Montajul experimental.

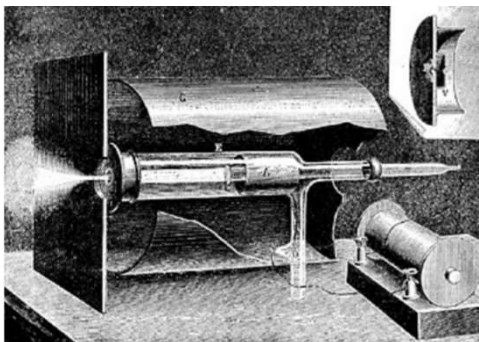


Wilhelm Hallwachs
(1859-1922)

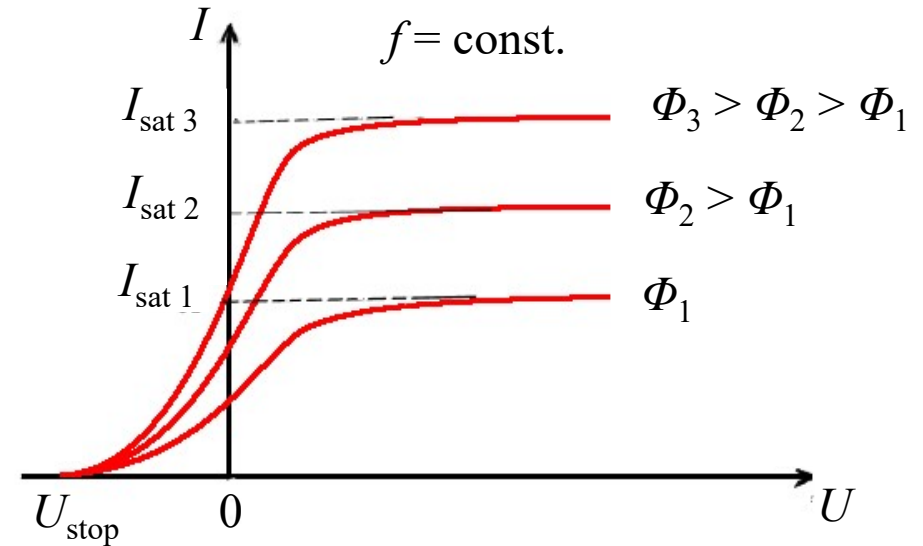
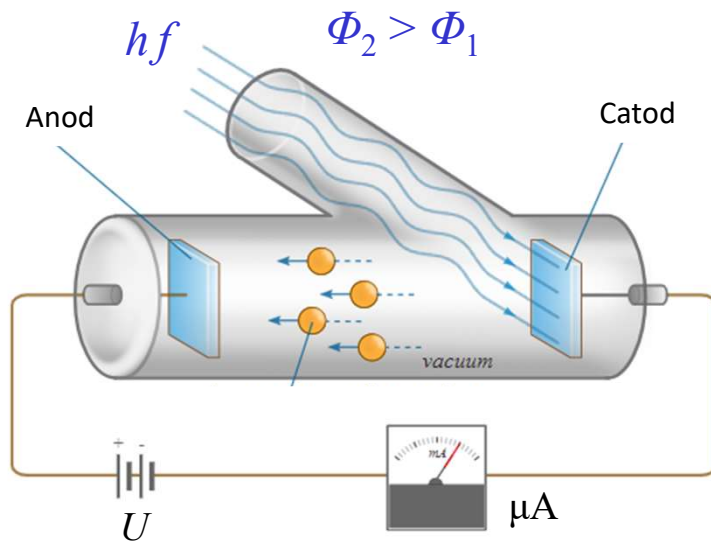
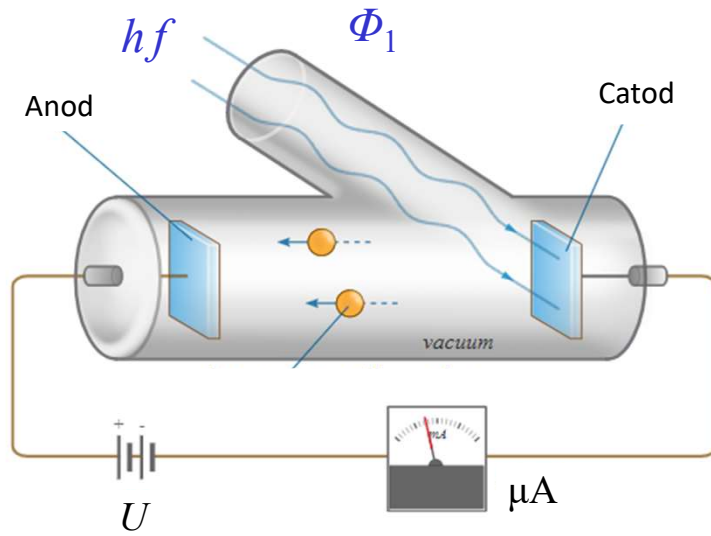
Caracteristica curent - tensiune



$$E_{c \max} = -eU_{stop}$$



Prima lege a efectului fotoelectric extern

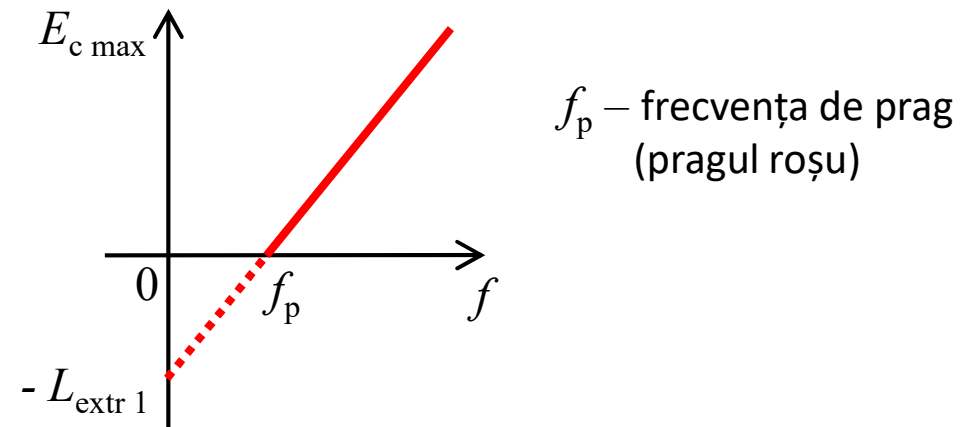
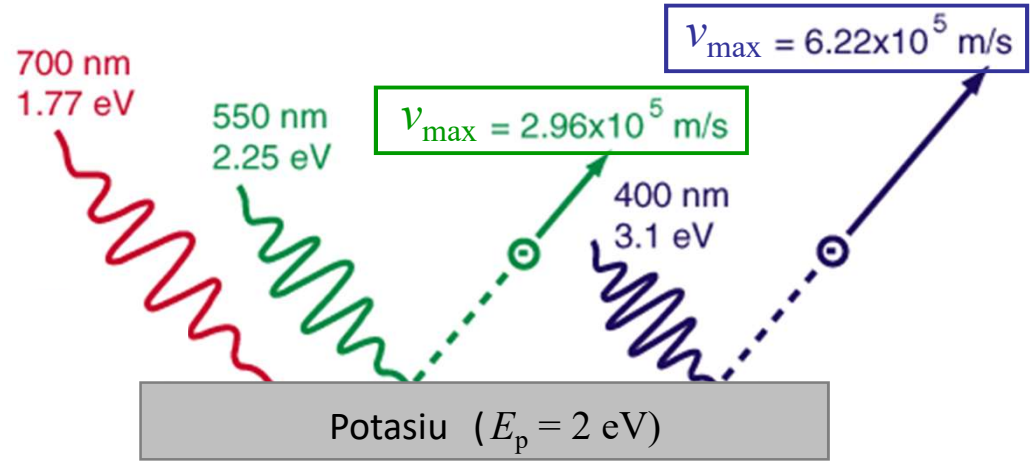
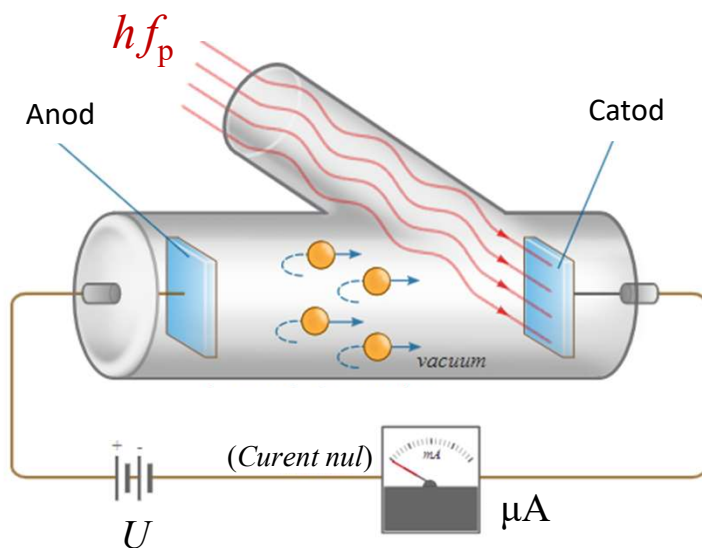
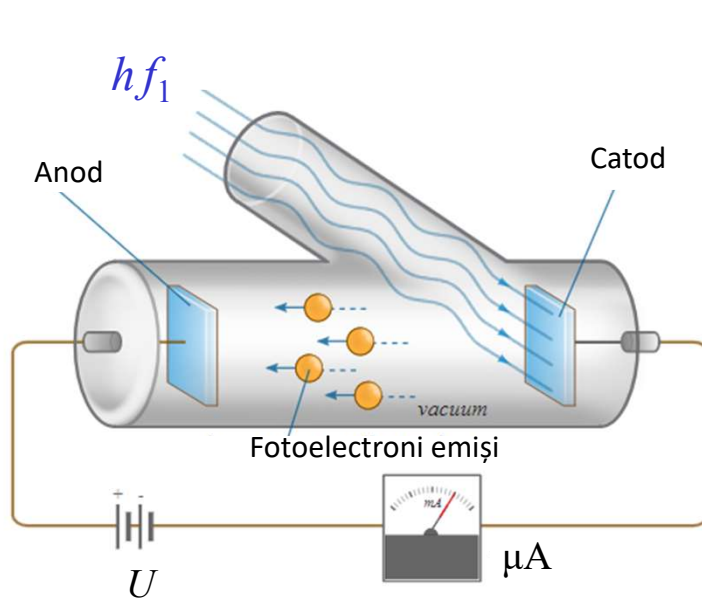


⇒ Legea I:

Intensitatea curentului fotoelectric de saturație este direct proporțională cu fluxul radiației incidente, pentru aceeași valoare a frecvenței radiației incidente.

Tensiunea electrică de stopare a fotoelectronilor emiși nu depinde de fluxul radiației incident.

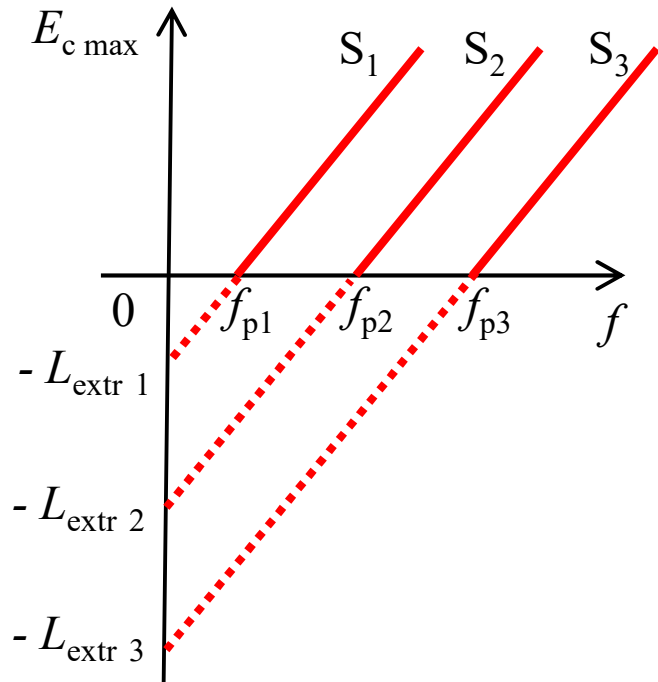
Legea a II-a a efectului fotoelectric extern



⇒ **Legea a II-a:**

Energia cinetică a fotoelectronilor emiși crește liniar cu frecvența radiației incidente și nu depinde de fluxul acesteia.

Legea a III-a. Condiția de producere a efectului fotoelectric extern.



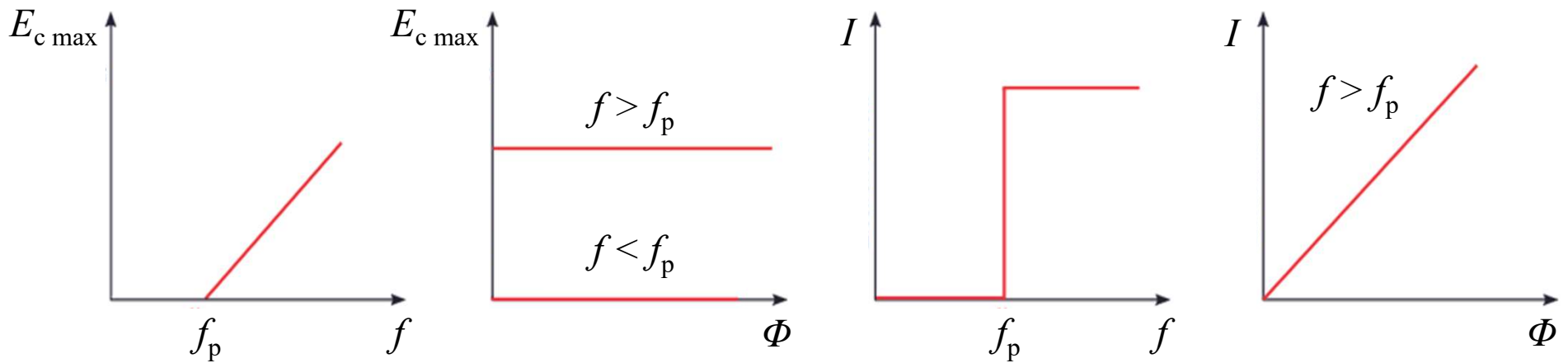
⇒ **Legea a III-a:**

Efectul fotoelectric se produce numai dacă frecvența radiației incidente depășește o valoare minimă, specifică fiecărei substanțe.

f_{p1}, f_{p2}, f_{p3} – frecvențe de prag

Elementul	Lucrul mecanic (eV)	Energia de ionizare (eV)
Copper (Cu)	4.7	7.7
Silver (Ag)	4.72	7.57
Aluminum (Al)	4.20	5.98
Gold (Au)	5.17	9.22
Boron (B)	4.45	8.298
Beryllium (Be)	4.98	9.32
Bismuth (Bi)	4.34	7.29
Carbon (C)	5.0	11.26
Cesium (Ce)	1.95	3.89
Iron (Fe)	4.67	7.87
Gallium (Ga)	4.32	5.99
(Hg) liquid	4.47	10.43
Sodium (Na)	2.36	5.13
Lithium (Li)	2.93	5.39
Potassium	2.3	4.34
Selenium (Se)	5.9	9.75
Silicon (Si)	4.85	8.15
Tin (Sn)	4.42	7.34
Germanium (Ge)	5.0	7.89
Arsenic (As)	3.75	9.81

Dependența energiei cinetice maxime a fotoelectronilor emiși și intensității fotocurentului, de frecvența și fluxul radiației incidente



Legea a IV-a a efectului fotoelectric extern

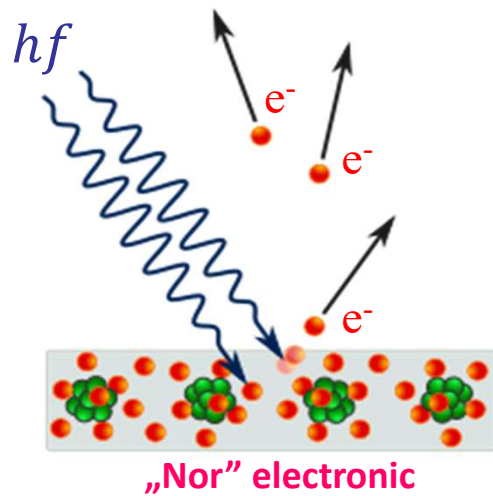
Intervalul de timp dintre momentul iluminării fotocathodului și momentul apariției efectului fotoelectric este neglijabil.

⇒ Legea aIV-a:

Efectul fotoelectric se produce, practic, instantaneu.

Explicarea legilor efectului fotoelectric extern

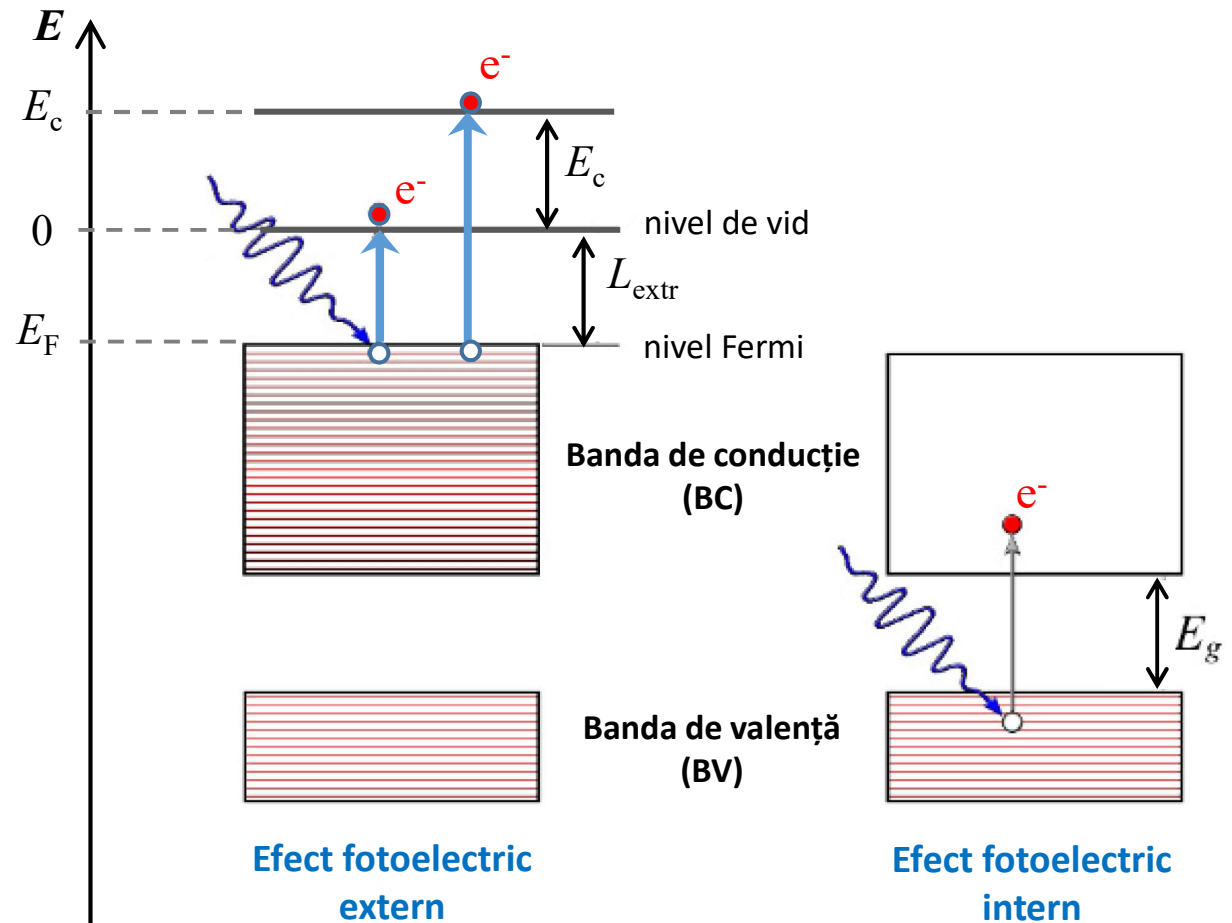
Nivele energetice ale electronilor în metale



Einstein (1905, P.N. 1921):

Un foton incident este absorbit de un atom din interiorul metalului, căruia îi cedează întreaga lui energie.

$$hf = L_{\text{extr}} + E_{\text{c max}}$$



Explicarea legilor efectului fotoelectric extern

Ecuția lui Einstein:

$$hf = L_{\text{extr}} + E_{c \text{ max}}$$

$$\Rightarrow E_{c \text{ max}} \sim \Phi \quad (\text{legea I})$$

$$\Rightarrow E_{c \text{ max}} \sim f \quad (\text{legea a II-a})$$

$$E_{c \text{ max}} = -eU_{\text{stop}}$$

- Dacă $E_{c \text{ max}} = 0 \Rightarrow hf_p = L_{\text{extr}}$

\Rightarrow Pentru $f < f_p$, $hf < L_{\text{extr}} \Rightarrow$ Nu se poate produce efectul fotoelectric.

\Rightarrow Condiția de producere a efectului fotoelectric:

$$f \geq f_p \Leftrightarrow \lambda \leq \lambda_p \quad (\text{legea a III-a})$$

- Interacțiunea dintre foton și atom se produce într-un timp $\tau \approx 10^{-10}$ s

\Rightarrow efectul fotoelectric se produce, practic, instantaneu (legea a IV-a).