Optika

Történeti áttekintés, mérföldkövek

- **Fénysugár, egyenes vonalú terjedés, visszaverődés törvénye, tükrök és lencsék képalkotása: Empedoklesz, Euklidesz, Arkhimedesz** (ókor, i.e. 500-200)
- **Mikroszkóp: Jansen** (1590)
- **Távcsövek: Liperhey** (1608), **Galilei** (1609), **Kepler** (1611)
- **A fénytörés törvénye: Snellius** (1621), **Descartes** (1629)
- **A legrövidebb fényút elve (Fermat-elv): Fermat** (1665)
- **A fényelhajlás első pontos kísérleti leírása: Grimaldi** (1650)
- **Kettős törés: Bartholinus** (1669)
- **Fénysebesség mérése: Römer** (1675), **Bradley** (1728), **Fizeau** (1849), **Foucault** (1862), **Michelson** (1926)
- **A fényinterferencia és fényelhajlás magyarázata: Young** (1802), **Fresnel** (1816)
- **A fény természete: Newton** (1669), **Huygens** (1678), **Young**, **Fresnel** (1821), **Maxwell** (1865)
- **Fénypolarizáció: Malus** (1808)
- **Optikai színkép, diszperzió, színképelemzés: Newton** (1666), **Fraunhoffer** (1814), **Bunsen** és **Kirchhoff** (1859)
- **Fényelhajlás, képalkotás matematikai leírása: Airy** (1835), **Abbe** (1873), **Kirchhoff** (1882), **Rayleigh** (1881), **Sommerfeld** (1896), **Kottler** (1923) és mások
- **Elektromágneses fényelmélet, anyagok optikai tulajdonságainak magyarázata: Maxwell** (1865), **Hertz** (1888), **Lorentz** (1895)
- **Kvantumelektrodinamika, kvantumoptika: Einstein, Heisenberg**, **Schrödinger**, **Born, Jordan, de Broglie, Dirac**; **Feynman**, **Schwinger**, és még sokan mások (XX. század)

Az optika felosztása

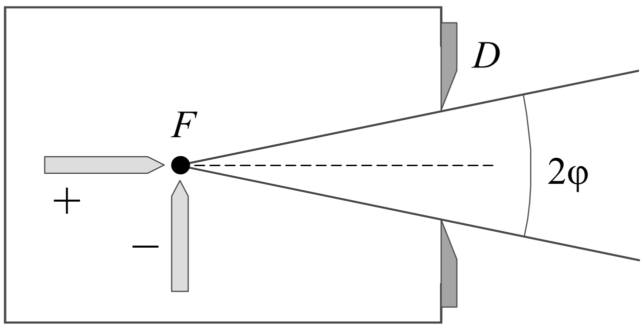
- **Geometriai optika**
- **Fizikai optika (hullámoptika)**
- Kvantumoptika

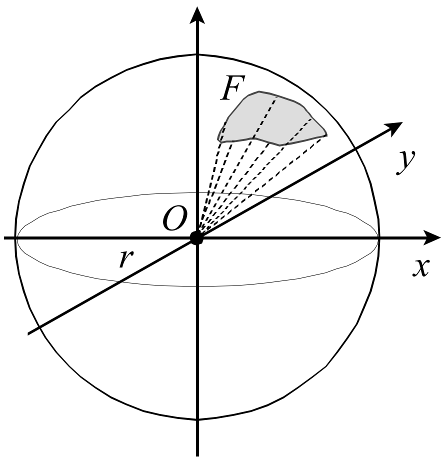
Geometriai optika

Fénytani alapfogalmak, a fény egyenes vonalú terjedése

Fénytani alapfogalmak

- fényforrás
- fénynyaláb
- fénysugár





Pontszerű fényforrásból kiinduló fénynyaláb térbeli kiterjedését a térszöggel jellemezhetjük:

$$\boxed{\omega = \frac{F}{r^2}}$$

- A teljes térszög: 4π

Energiaáram (sugárzási teljesítmény)

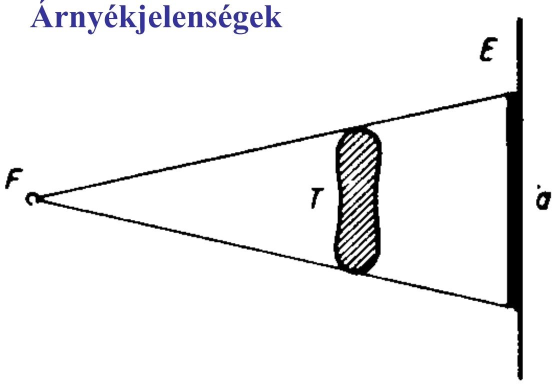
- A fénynyalábban energia áramlik. A fénysugarak az adott helyen az áramlás irányát adják.
- Ennek az áramáramlásnak erősségét jellemzi az energiaáram (vagy sugárzási teljesítmény).
- Ha a fénynyaláb valamely keresztmetszetén (kicsiny) Δt idő alatt ΔW energia áramlik át, akkor a tekintetbe vett felületre az energiaáram (sugárzási teljesítmény)

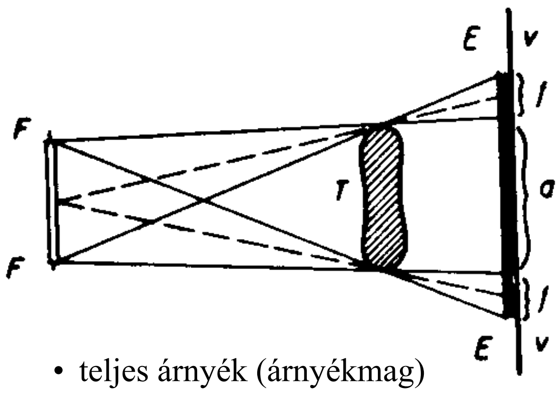
$$\boxed{\Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t}}$$

Egyenes vonalú terjedés

- A tapasztalat szerint homogén és izotróp közegben a fény egyenes vonalban terjed, azaz a fénysugarak egyenesek.

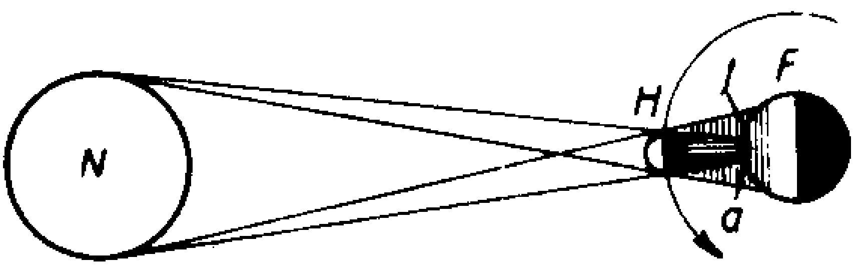
Árnyékjelenségek

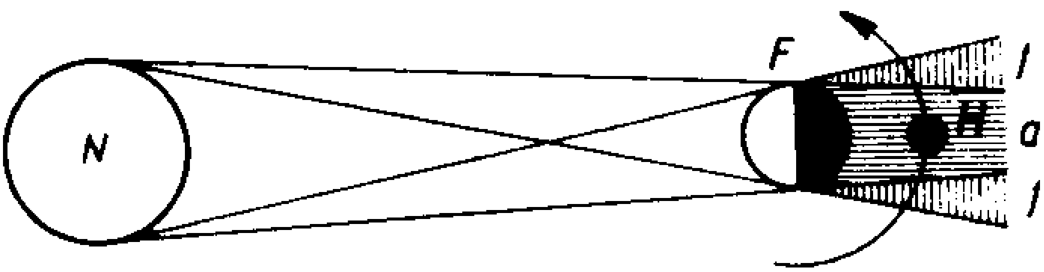




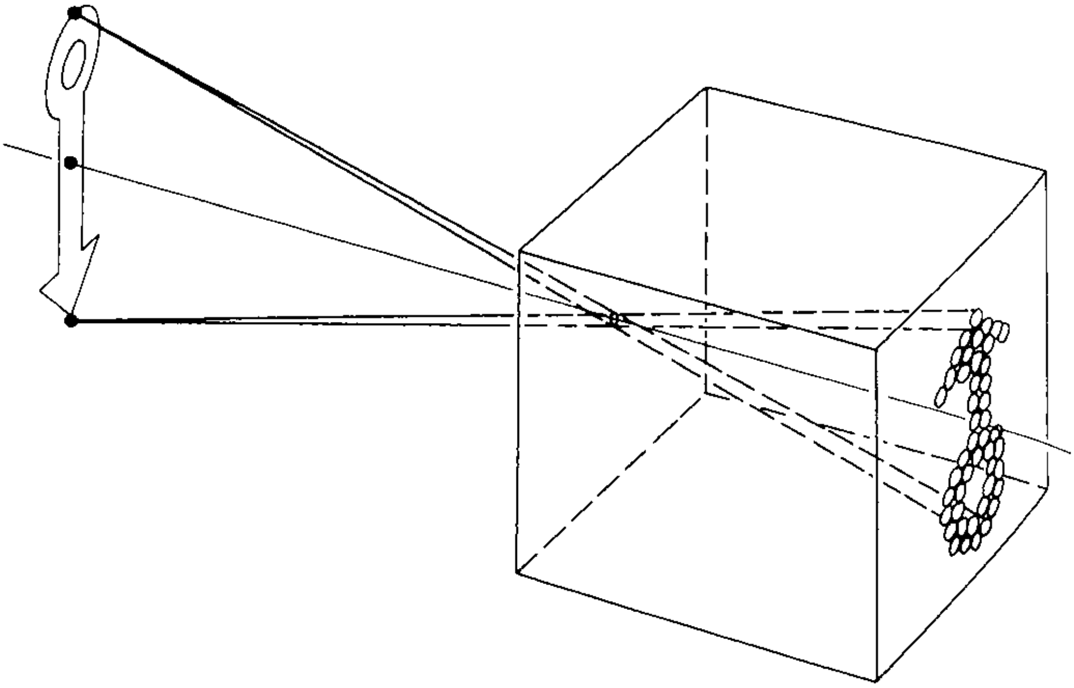
- teljes árnyék (árnyékmag)
- félárnyék

Nap- és holdfogyatkozás





Lyukkamera (Camera obscura)

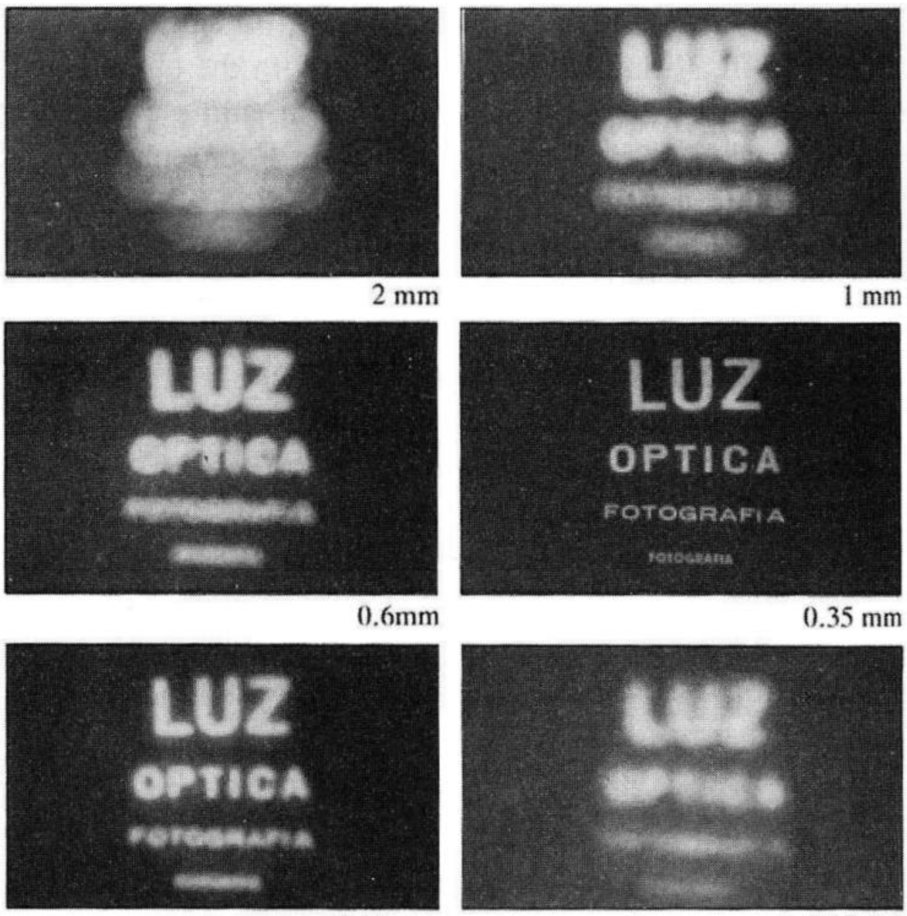


A kép intenzitása és élessége függ a nyílás átmérőjétől.

Nagyobb átmérő esetén – az egyenes vonalú terjedésből is érthetően – nagyobb folt felel meg a tárgy egy pontjának.

Azt várnánk, hogy csökkentve az átmérőt a kép élesség javul.

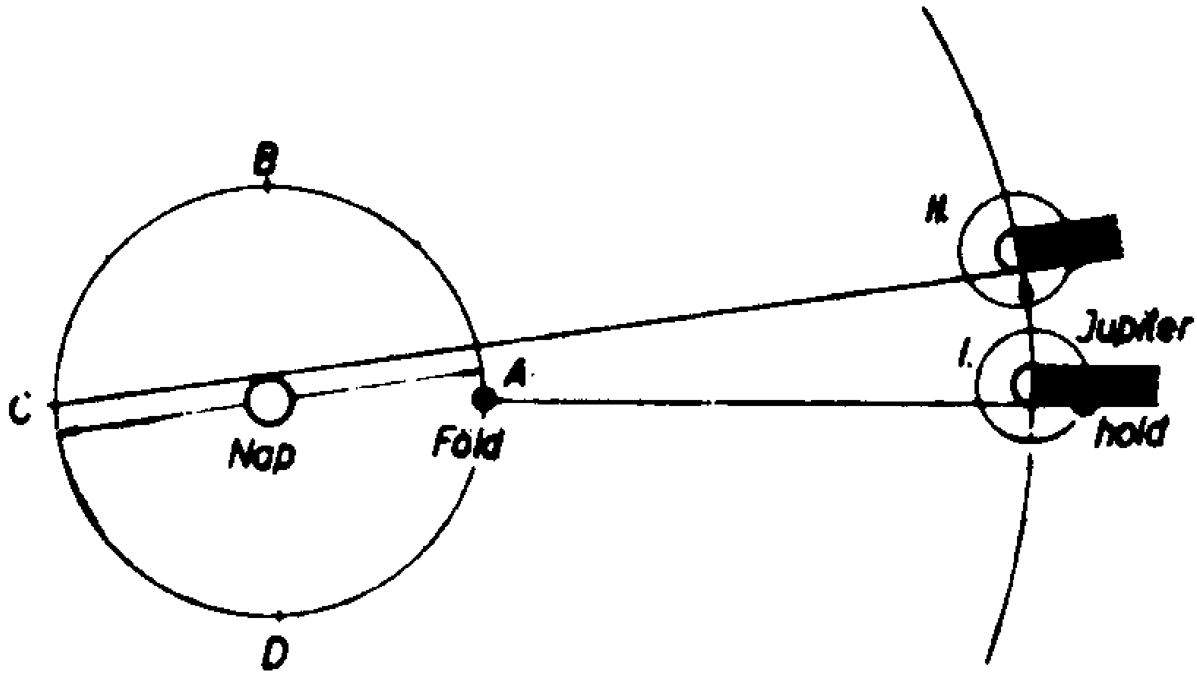
Egy ideig ez így is van. Azonban kis átmérők esetén az egyenes vonalú terjedéstől eltérések mutatkoznak (elhajlás lép fel), amely lerontja a kép élességét!



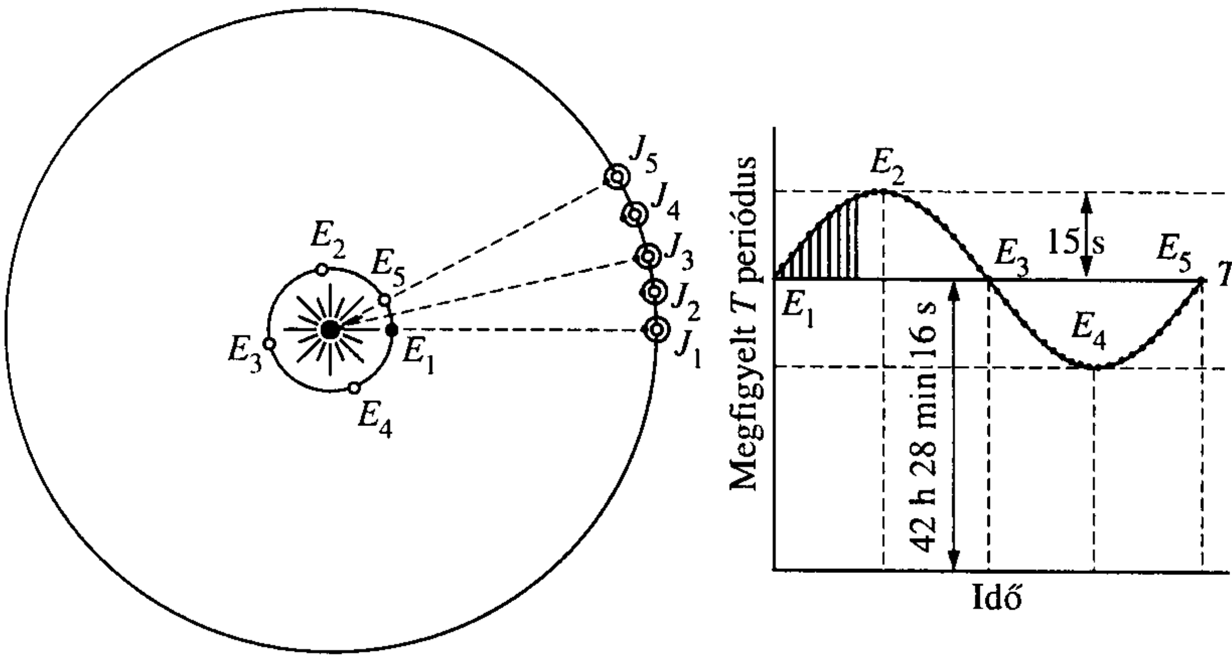
2 mm | 1 mm | 0.6mm | 0.35 mm | 0.15 mm | 0.07 mm

A fény terjedési sebességének mérése

Römer módszere, 1675.

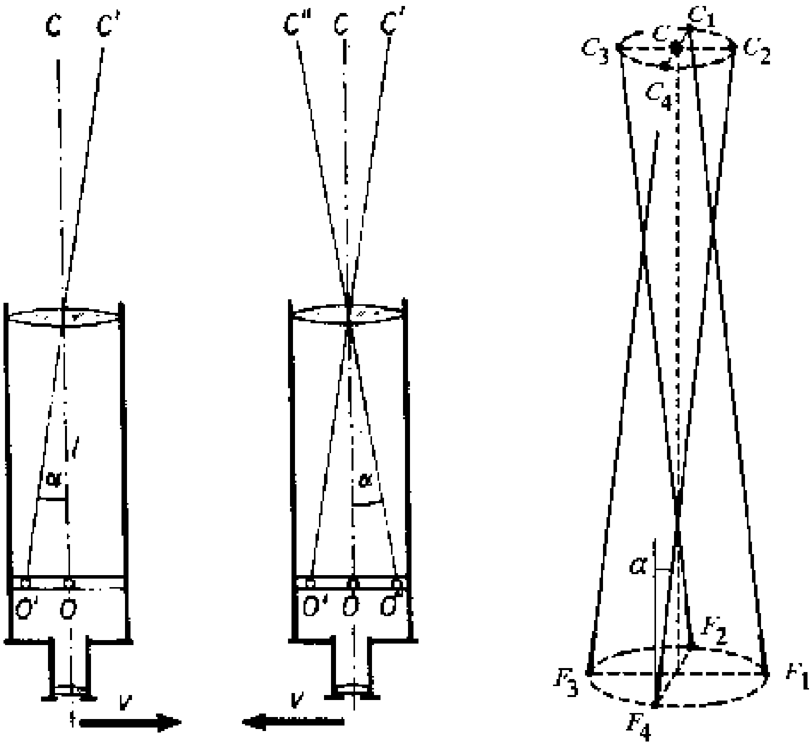


Römer módszere



(a) (b)

Bradley módszere, 1728.



$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{v}{c}$$

$2\alpha = 41''$

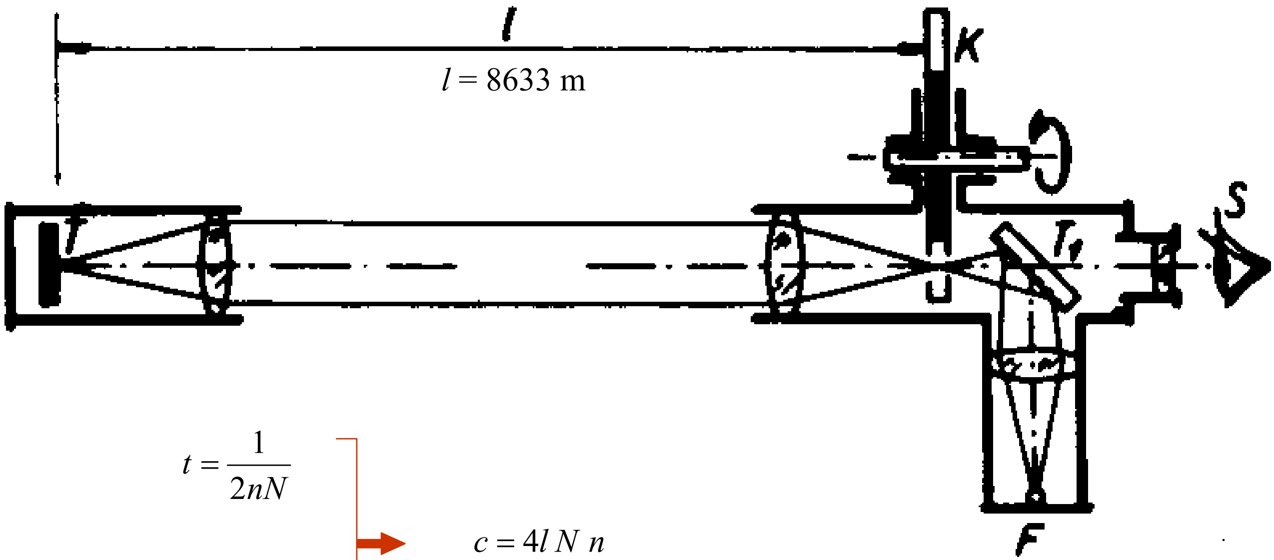
$\alpha = 99{,}4\ \mu\text{rad}$

$v = 26{,}9\ \text{km/s}$

Fizeau módszere (fogaskerék-módszer), 1849.

n a fogaskerék fordulatszáma

$N = 720$



$l = 8633$ m

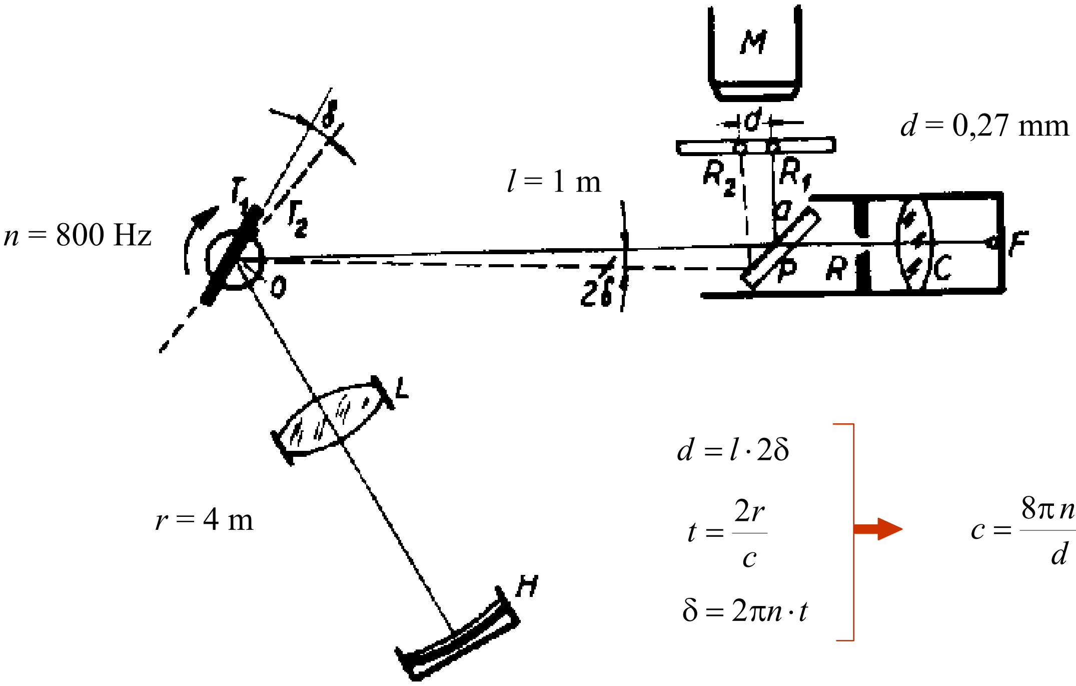
$$t = \frac{1}{2nN}$$

$$c = \frac{2l}{t}$$

$$c = 4l\,N\,n$$

A legtöbb mai „modern” módszer elve ugyanez, csak a fényszaggatás módja más (pl. Kerr-cella).

Foucault módszere (forgótükrös-módszer), 1862.



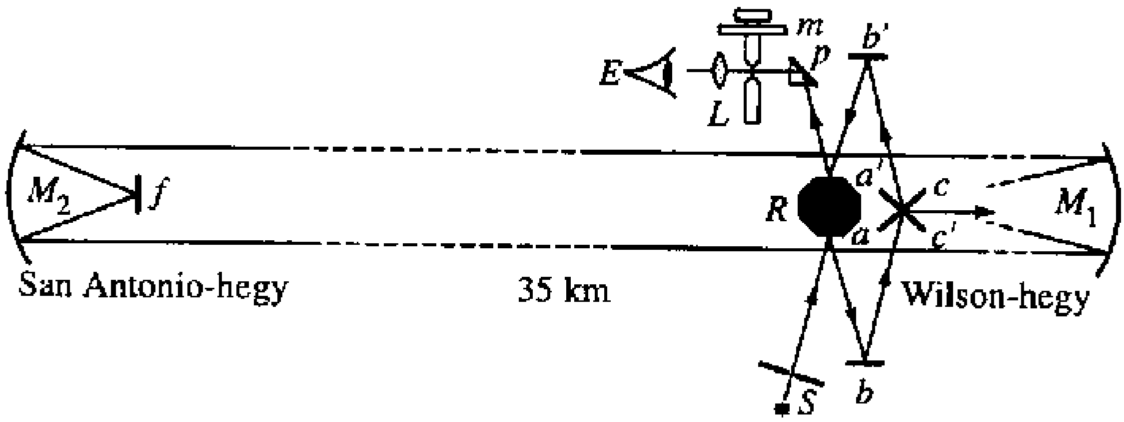
$$d = l \cdot 2\delta$$

$$t = \frac{2r}{c}$$

$$\delta = 2\pi n \cdot t$$

$$\Rightarrow \quad c = \frac{8\pi nrl}{d}$$

Michelson módszere, 1926.



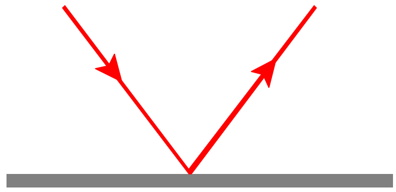
A fény visszaverődése és törése

Visszaverődés típusai

- **Szabályos visszaverődés**

  Sima felületek a fénysugarakat túlnyomó részt csak egy adott irányba verik vissza.

  A felület egyenetlenségei sokkal kisebbek a fény hullámhosszához képest.

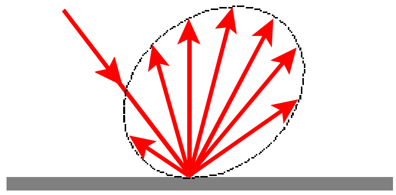


- **Szórt (diffúz) visszaverődés**

  Érdes felületről a fény – többé-kevésbé egyenletesen – mindenféle irányba visszaverődik.

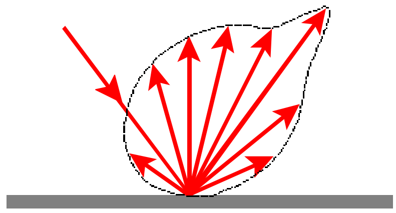
  A felület egyenetlenségei *nem* sokkal kisebbek a fény hullámhosszához képest.

  Az ilyen visszaverődést *polárdiagrammal* írhatjuk le.



- **Vegyes visszaverődés**

  Az előző két eset kombinációja.



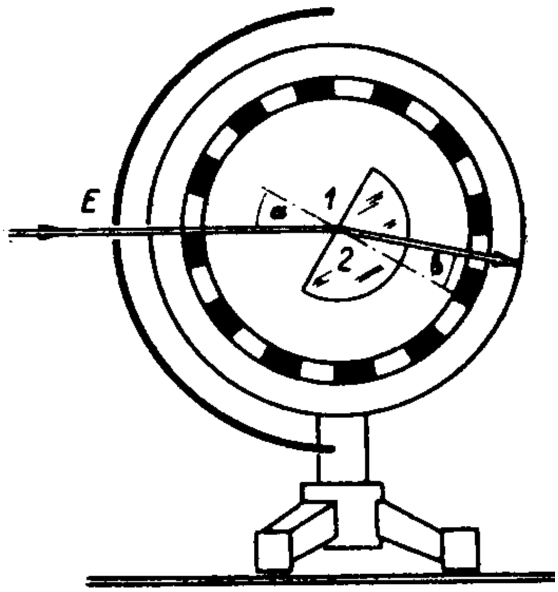
Visszaverőképesség (reflexiós tényező)
a visszavert és a beeső sugárzási teljesítmények hányadosa:

$$\boxed{\rho = \Phi_v / \Phi_b}$$

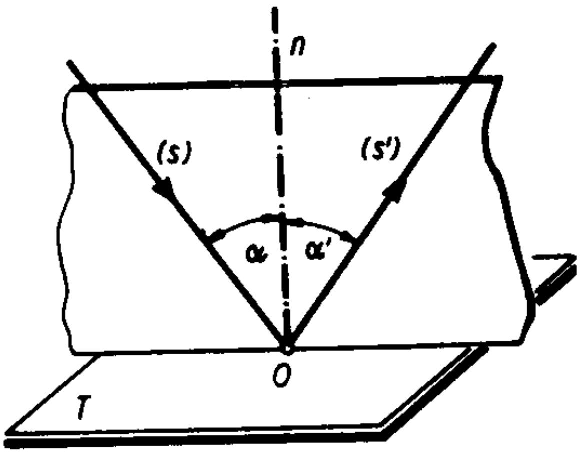
- diffúz visszaverődésnél *albedónak* nevezik.

A szabályos fényvisszaverődés törvényei

Kísérleti vizsgálata: Hartl-féle korong

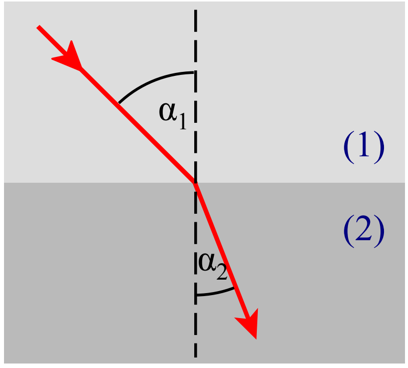


- A visszavert fénysugár a beesési síkban van. Más szavakkal: a beeső fénysugár, a beesési merőleges és visszavert fénysugár egy síkba esik.
- A visszaverődési szög egyenlő a beesési szöggel.



- Ha a fény egyik közegből egy másikba jut, akkor általában a fénysugarak iránya a határfelületen megváltozik, ez a jelenség a *fénytörés*.
- Homogén és izotróp közegek esetén a fénytörés törvényszerűségei egyszerűek.

Szabályos fénytörés törvényei



- A megtört fénysugár a beesési síkban van.
- Snellius-Descartes-törvény: a beesési szög (α_1) szinuszának és a törési szög (α_2) szinuszának hányadosa állandó,

$$\boxed{\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = n_{21}}$$

n_{21} a (2) közeg (1) közegre vonatkozó relatív törésmutatója (jellemző az anyagi minőségre).

A fénysugarak megfordíthatók ➡ $n_{12} = 1/n_{21}$

A *Fermat-elvből* levezethető: $\boxed{n_{21} = c_1/c_2}$, ahol c_1 és c_2 a közegbeli fénysebességek.

Abszolút törésmutató: a közeg vákuumra vonatkoztatott (relatív) törésmutatója, azaz

$\boxed{n = c_0/c}$, ahol c_0 vákuumbeli, és c a közegbeli fénysebesség.

$$n_{21} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{c_0}{c_2}\cdot\frac{c_1}{c_0} = \frac{c_0/c_2}{c_0/c_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

, ahol n_1 és n_2 az (1) és a (2) közegek abszolút törésmutatója.

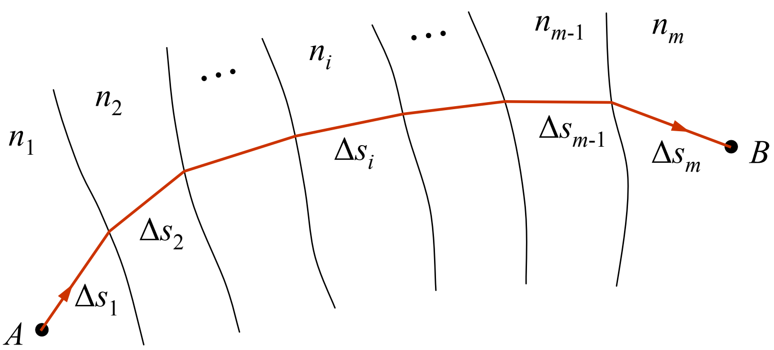
A Snellius-Descartes-törvény az abszolút törésmutatókat használva: $\boxed{n_1\cdot\sin\alpha_1 = n_2\cdot\sin\alpha_2}$

A visszaverődés és törés következményei és felhasználásai

- Visszaverődések és törések megváltoztatják a terjedési irányt, következésképpen a tárgyak más irányból látszanak.
- Tükrök (sík, gömbi, parabolikus, stb)
- Síkpárhuzamos lemez
- Optikai prizma
- Lencsék és lencserendszerek
- Optikai (fényvezető) szál
- Törésmutató meghatározás

Terjedési idő és optikai úthossz

Szakaszonként homogén közeg



***A* és *B* pontok közötti terjedési idő**

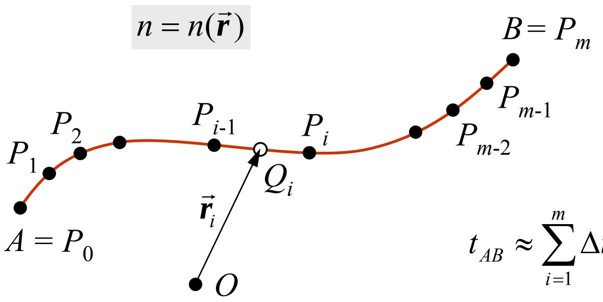
$$t_{AB} = \sum_{i=1}^{m}\Delta t_i = \sum_{i=1}^{m}\frac{\Delta s_i}{c_i}\text{, ahol } n_i = \frac{c_0}{c_i}$$

$$t_{AB} = \frac{1}{c_0}\sum_{i=1}^{m} n_i\cdot\Delta s_i = \frac{\Delta}{c_0}$$

$$\boxed{\Delta = \sum_{i=1}^{m} n_i\cdot\Delta s_i}$$ **optikai úthossz**

Folytonosan változó törésmutatójú közeg

- Inhomogén közegben a fény nem egyenes vonalban (azaz egy görbe mentén) terjed.
- Szakaszonként homogén közegben a görbe egyenes darabokból áll.
- Folytonosan változó törésmutatójú közeget úgy tekinthetjük, mint olyan szakaszonként változó törésmutatójú közeg határesetét, amelyben a rétegek száma mindenhatáron túl növekszik, úgy hogy közben a rétegek közötti távolság és a törésmutató ugrásai nullához tartanak.
- Hogyan számíthatjuk ki az A és B pontokat összekötő görbére vonatkozó terjedési időt?



$$\Delta s_i = \overline{P_{i-1}P_i}\,, \qquad Q_i \in \widehat{P_{i-1}P_i}\,, \qquad \vec{\mathbf{r}}_i = \overrightarrow{OQ_i}$$

A és B pontokat összekötő görbére a terjedési idő

$$t_{AB} \approx \sum_{i=1}^{m} \Delta t_i \approx \sum_{i=1}^{m} \frac{\Delta s_i}{c_i} = \frac{1}{c_0} \sum_{i=1}^{m} n_i \cdot \Delta s_i \quad , \quad \text{ahol} \qquad n_i = n(\vec{\mathbf{r}}_i)$$

A terjedési időt annál pontosabban kapjuk meg, minél finomabban osztjuk be a görbét.

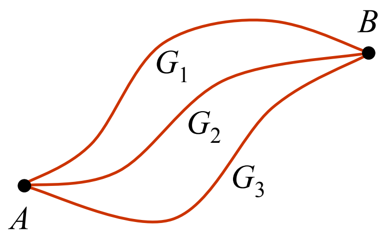
$$\boxed{t_{AB} = \frac{\Delta}{c_0}} \quad , \quad \text{ahol} \qquad \boxed{\Delta = \int_{G_{AB}} n(\vec{\mathbf{r}})\, ds} \qquad\qquad \int_{G_{AB}} n(\vec{\mathbf{r}})\, ds = \lim_{\substack{m\to\infty \\ \max \Delta s_i \to 0}} \sum_{i=1}^{m} n_i \cdot \Delta s_i$$

- Δ optikai úthossz a törésmutató görbe menti integrálja (hasonló a munkához).
- A munkához hasonlóan függ a görbe alakjától!

- A $\Delta = c_0 \cdot t_{AB}$ képletből látható, hogy az optikai úthossz azzal a geometriai hosszal egyenlő, melyet a fény vákuumban t_{AB} idő alatt tenne meg.

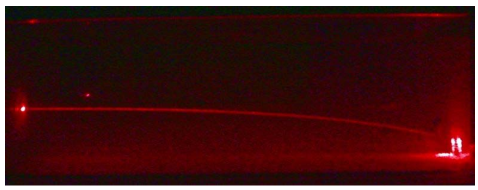
Fermat elve

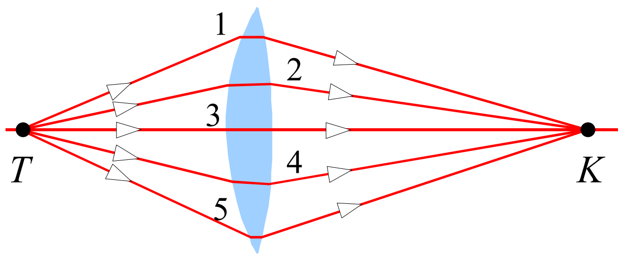
A fény két adott (A és B) pont között előírt feltételek mellett (például visszaverődés, törés, stb) azon a görbén terjed, amelyen a terjedési idő extrémális (többnyire minimális).



Következmények:

- a fény (optikailag) homogén és izotróp közegben egyenes vonalban terjed.
- a fény inhomogén közegben görbén terjed.
- a fénysugarak megfordíthatók
- visszaverődés törvénye
- törés törvénye (Snellius-Descartes törvény)
- képalkotásnál a tárgypont és a képe között az összes sugárra azonos az optikai úthossz





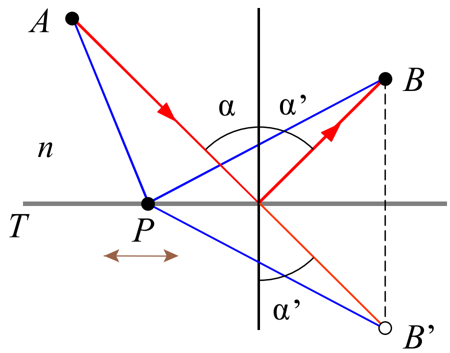
$$\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = \Delta_4 = \Delta_5$$

Fermat elve a geometria optika alaptörvénye!

- Hasonló szerepet tölt be a geometriai optikában, mint a Newton-axiómák a mechanikában:
- Fermat elvéből a geometriai optika összes törvénye levezethető.

A visszaverődés és törés törvényeinek levezetése Fermat elvéből!

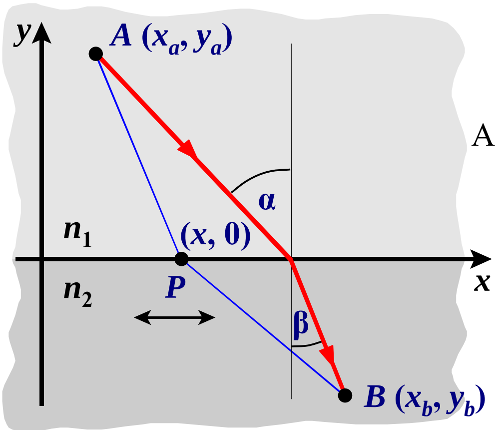
- Mellékfeltétel: a fény a tükröző felület érintésével megy A-ból B-be.
- Szakaszonként homogén és izotróp közegben a fénysugár egyenes darabokból áll.
- B' a B geometriai tükörképe, a minimális optikai hosszúságú pálya megkeresésénél segédpont.



$$\Delta = n\cdot(s_{AP}+s_{PB})$$
$$s_{PB} = s_{PB'}$$
$$\Rightarrow \Delta = n\cdot(s_{AP}+s_{PB'})$$

Δ minimális, ha A, P és B' egy egyenesbe esik. ⇒

- A visszavert fénysugár a beesési síkban van.
- $\alpha = \alpha'$.



$$\Delta = n_1\, s_{AP} + n_2\, s_{PB} = n_1\sqrt{(x-x_a)^2+y_a^2} + n_2\sqrt{(x-x_b)^2+y_b^2}$$

A minimum feltétele:

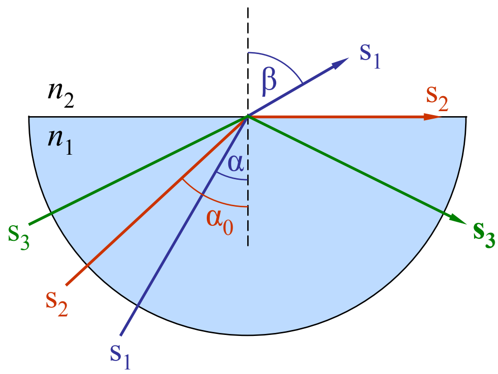
$$\Delta'(x) = 0 \quad\Rightarrow\quad \frac{n_1(x-x_a)}{\sqrt{(x-x_a)^2+y_a^2}} = \frac{n_2(x-x_b)}{\sqrt{(x-x_b)^2+y_b^2}}$$

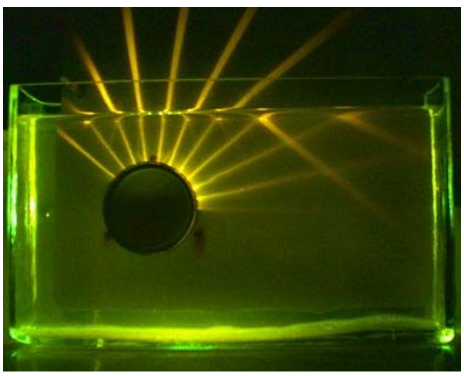
$$n_1\cdot\sin\alpha = n_2\cdot\sin\beta$$

- A beesési síkból P pontot kimozdítva az optikai úthossz növekszik.
- Ezért a megtört fénysugár a beesési síkban van.

A teljes visszaverődés és alkalmazásai

$$n_2 < n_1 \quad\Leftrightarrow\quad n_{21} < 1$$





$$n_1\cdot\sin\alpha = n_2\cdot\sin\beta$$
$$n_2 < n_1$$
$$\Rightarrow \alpha < \beta$$

- Az α beesési szöget növelve a β törési szög egy adott α_0 határszögnél (α_0 < 90º) eléri a 90º értéket!
- A beesési szöget tovább növelve fellép a teljes visszaverődés jelensége.
- A visszavert fénysugár követi a szabályos visszaverődés törvényeit, és a reflexiós tényező 100%.

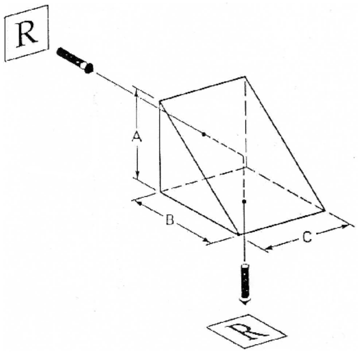
A határszög meghatározása

$$n_1\cdot\sin\alpha_0 = n_2\cdot\sin 90°$$
$$n_1\cdot\sin\alpha_0 = n_2$$
$$\boxed{\sin\alpha_0 = n_2/n_1 = n_{21}}$$

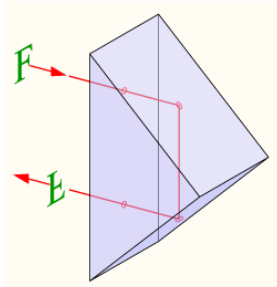
Fontosabb alkalmazások

- Képfordító prizmák
- Törésmutató mérés (refraktométerek)
- Optikai szálak

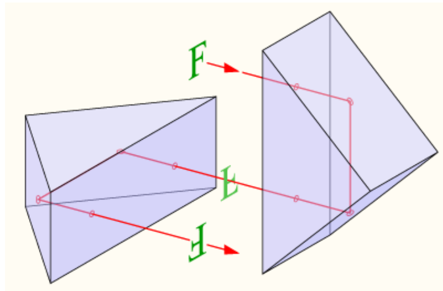
Képfordító prizmák



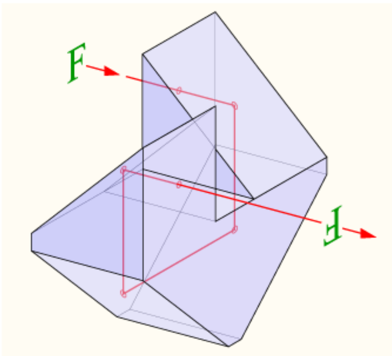
derékszögű prizma



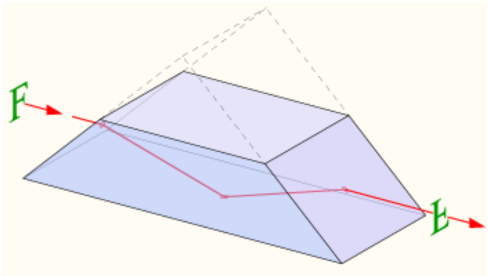
Porro-féle prizma



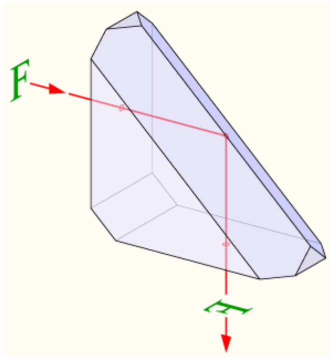
Kettős Porro-féle prizma



Porro-Abbe-féle prizma



Dove-féle prizma

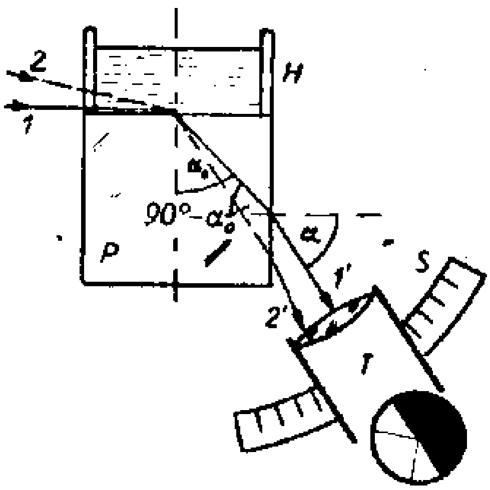


Amici-féle tetőélprizma

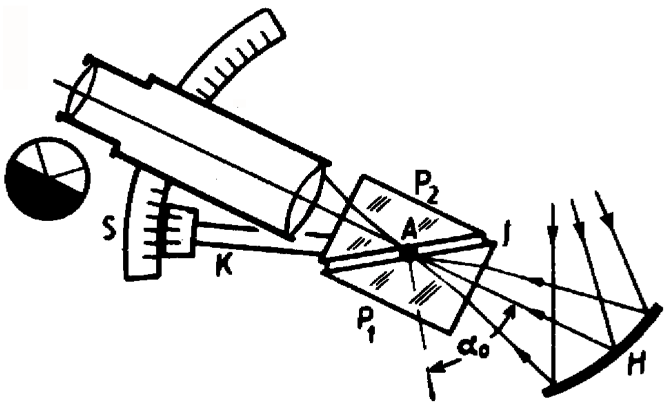
Refraktométerek

- Olyan optikai műszer, amely a teljes visszaverődés határszögének méréséből határozza meg a vizsgált anyag (leginkább folyadék) törésmutatóját.

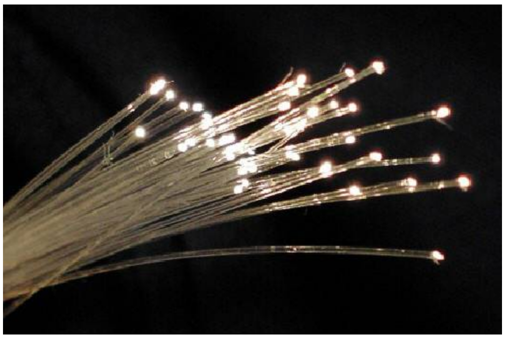
Pulfrich-féle refraktométer

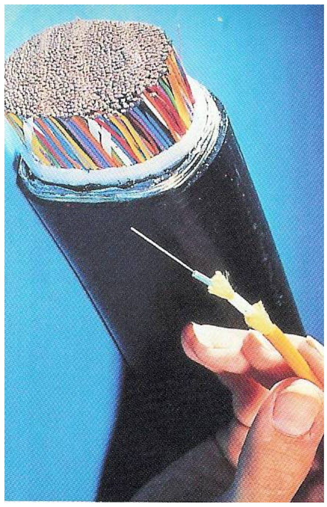


Abbe-féle refraktométer

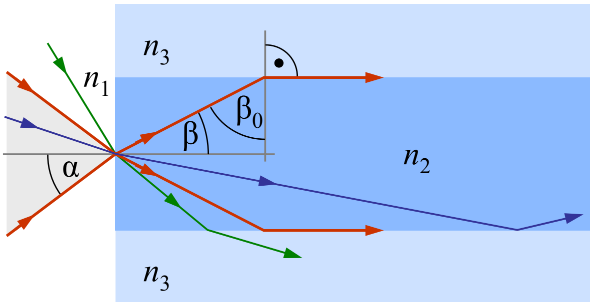


Optikai szálak





A fényvezető szál numerikus apertúrája



$$n_3 = n_2 \cdot \sin\beta_0 = n_2 \cdot \sin(90° - \beta) = n_2 \cos\beta$$

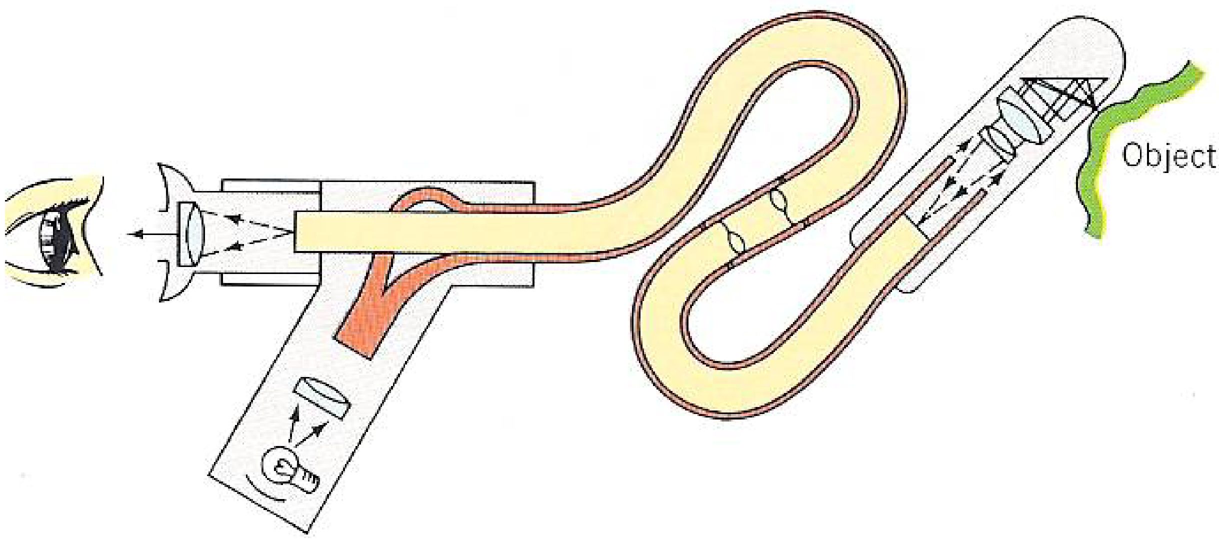
$$n_1 \cdot \sin\alpha = n_2 \cdot \sin\beta = n_2 \sqrt{1 - \cos^2\beta}$$

$$n_1 \cdot \sin\alpha = \sqrt{n_2^2 - n_2^2 \cos^2\beta} = \sqrt{n_2^2 - n_3^2}$$

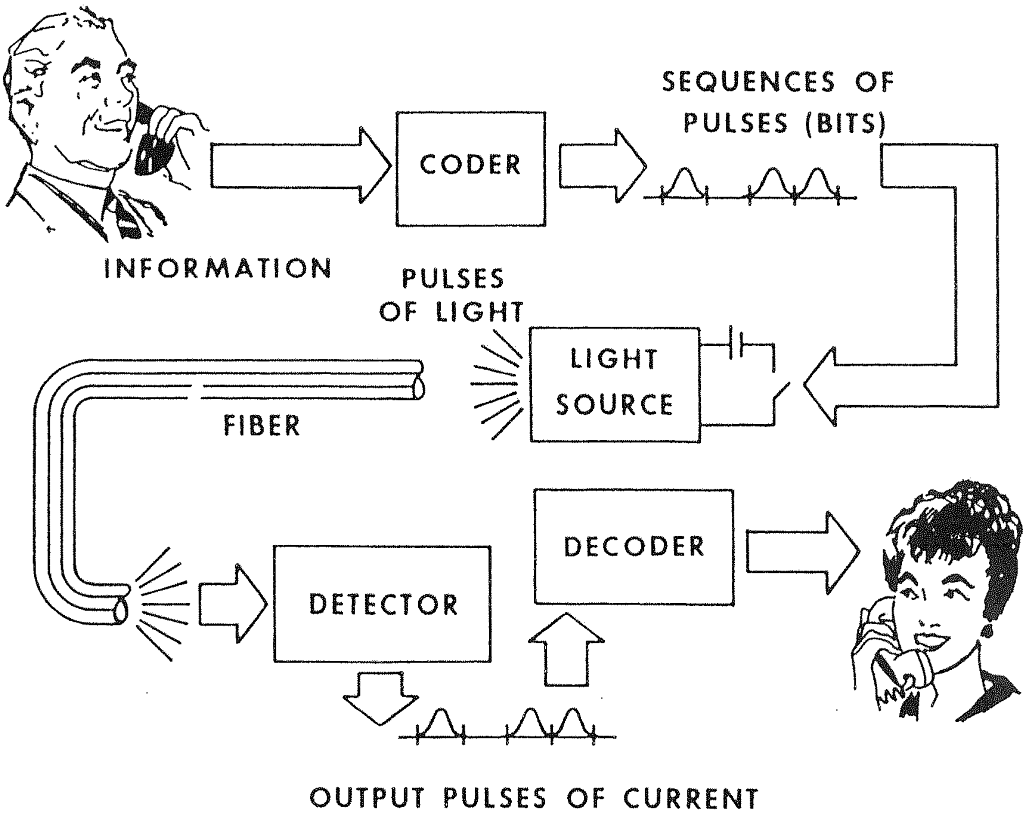
$$\boxed{\sin\alpha = \frac{\sqrt{n_2^2 - n_3^2}}{n_1}}$$

Az optikai szálak néhány alkalmazása

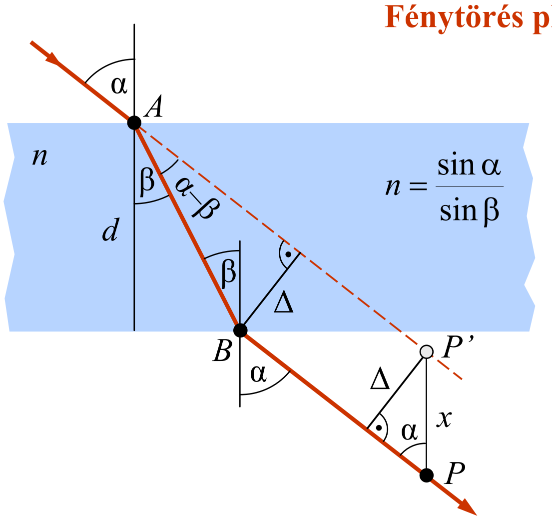
endoszkóp



optikai távközlés



Fénytörés planparalel lemezen



$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$$

$$\Delta = \frac{d}{\cos\beta}\cdot\sin(\alpha-\beta) = d\cdot\frac{\sin\alpha\cdot\cos\beta-\cos\alpha\cdot\sin\beta}{\cos\beta}$$

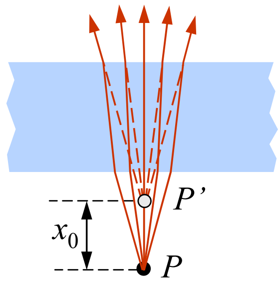
$$\Delta = d\sin\alpha - d\cos\alpha\cdot\sin\alpha\,\frac{\sin\beta}{\sin\alpha\cdot\cos\beta}$$

$$\Delta = d\sin\alpha - d\sin\alpha\cdot\frac{\cos\alpha}{n\cdot\cos\beta}$$

$$n\cdot\cos\beta = n\sqrt{1-\sin^2\beta} \;= \sqrt{n^2-\sin^2\alpha}$$

$$x = \frac{\Delta}{\sin\alpha} \quad \Rightarrow \quad \boxed{x = d\cdot\left(1-\frac{\cos\alpha}{\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}}\right)} \quad \Leftarrow \quad \boxed{\Delta = d\sin\alpha\cdot\left(1-\frac{\cos\alpha}{\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}}\right)}$$

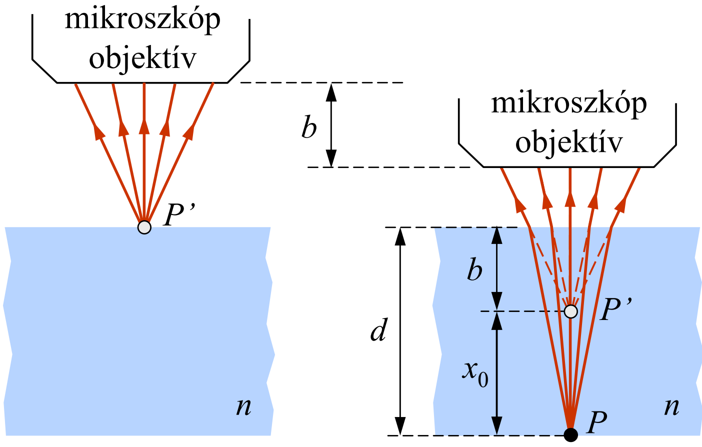
- A sugarakat megfordítva rögtön látszik, hogy a P pontból kiinduló, a függőlegessel α szöget bezáró sugarak törés utáni meghosszabbításuk a P’ pontban metszik egymást.
- Ezért a P pontot a lemezen keresztül nézve máshelyen látjuk!
- Ez még merőleges beesés (α = 0) esetén is igaz!



$$\alpha = 0$$

$$\boxed{x_0 = d\cdot\left(1-\frac{1}{n}\right)}$$

Planparalel lemez törésmutatójának meghatározása



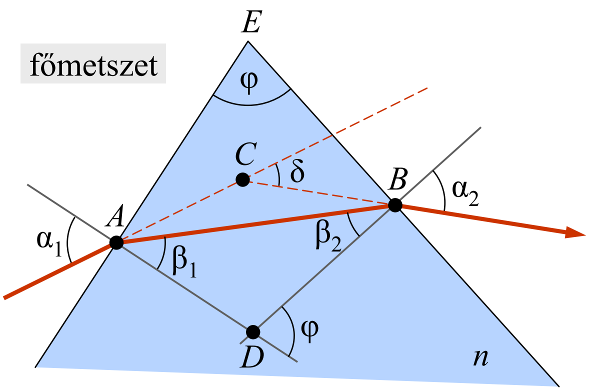
- Állítsuk az objektívet úgy, hogy a lemez tetejét lássuk élesen!
- Ahhoz, hogy a lemez alját lássuk élesen, b távolsággal el kell tolni az objektívet a lemez felé.

$$b = d - x_0$$

$$x_0 = d \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right) \Rightarrow \frac{d}{n} = d - x_0$$

$$\boxed{n = \frac{d}{d - x_0} = \frac{d}{b}}$$

Fénytörés optikai prizmában



- A prizma δ szöggel téríti el a fénysugarat.
- Milyen viszony van a szögek között?

$ADB\ \Delta \Rightarrow \varphi = \beta_1 + \beta_2$

$ACB\ \Delta \Rightarrow \delta = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2)$

$$\delta = \alpha_1 + \alpha_2 - (\beta_1 + \beta_2)$$

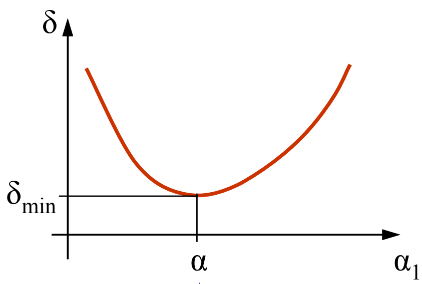
$$\boxed{\delta = \alpha_1 + \alpha_2 - \varphi}$$

- Ha a szögek kicsik, akkor a szögek szinuszai a szögekkel közelíthetők. Így ekkor

$$\alpha_1 \approx n \cdot \beta_1 \quad \text{és} \quad \alpha_2 \approx n \cdot \beta_2 \Rightarrow \delta \approx n \cdot (\beta_1 + \beta_2) - \varphi = n \cdot \varphi - \varphi = (n-1) \cdot \varphi$$

Minimális deviáció

- A kísérlet szerint, ha változtatjuk az α_1 beesési szöget, akkor a δ deviációs szögnek egy adott α szögnél minimuma van!
- A minimális eltérítés esetén a sugármenet szimmetrikus, vagyis, ha



Az a beesési szög, melyre szimmetrikus a sugármenet

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha \Rightarrow \delta_{min} = 2\alpha - \varphi \Rightarrow \alpha = \frac{\delta_{min} + \varphi}{2}$$

és

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta \Rightarrow \varphi = 2\beta \Rightarrow \beta = \frac{\varphi}{2}$$

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \Rightarrow \boxed{n = \frac{\sin[(\delta_{min} + \varphi)/2]}{\sin(\varphi/2)}}$$

- δ_{min} és φ goniométerrel megmérhető.
- Így igen pontosan határozható meg a törésmutató, mivel a szögeket pontosan tudjuk mérni!
- Folyadékok és gázok törésmutatója is meghatározható prizma alakú, átlátszó tartó edény alkalmazásával!