

**A hullámoptika mint modell. Huygens–Fresnel-elv.
A legegyszerűbb fényinterferencia-kísérlet és
következményei. Felbontóképesség. Fénypolarizáció.
Színkeverés, színlátás.**

Kiss Balázs

kissb3@gmail.com



Miofilamentum Mechanobiofizika Laboratórium

Semmelweis Egyetem,

Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet

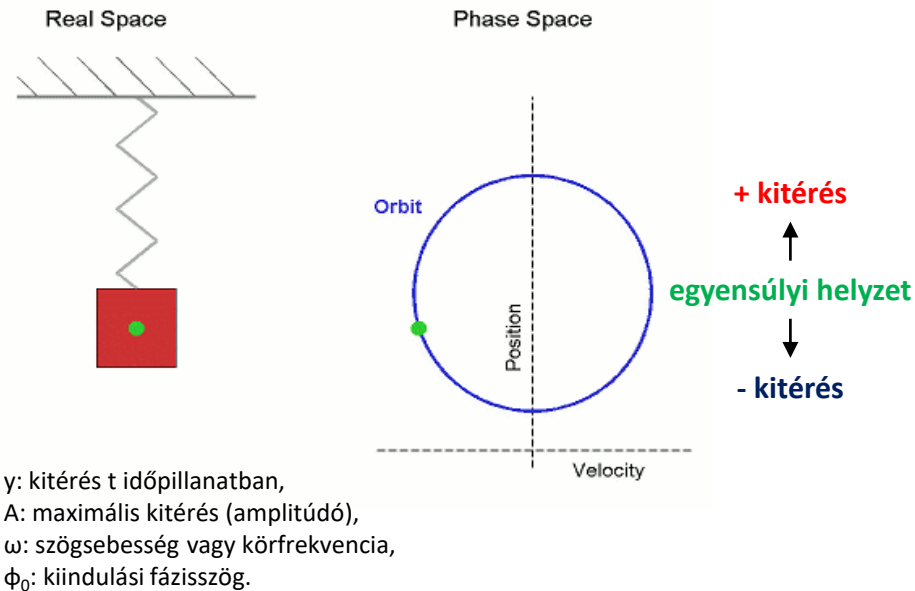
2025. szeptember 23.

A hullámok keletkezése és főbb típusai

Hullám: térben tovaterjedő rezgési állapot

A hullám forrása: rezgőmozgás

- speciális eset: **harmonikus rezgőmozgás:**
Ha az egyensúlyi helyzetéből kitérített rendszerre ható visszatérítő erő arányos a kitéréssel.
pl. rugóra felfüggesztett tömeg



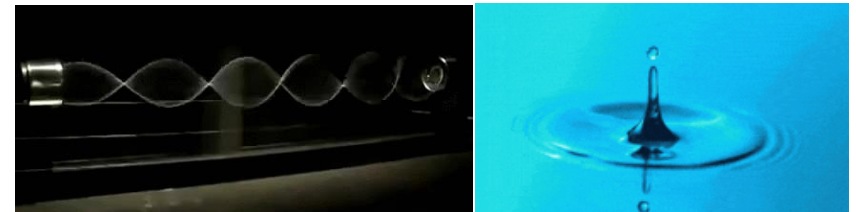
kitérés(idő) függvény: $y = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$
 y : kitérés t időpillanatban,
 A : maximális kitérés (amplitúdó),
 ω : szögsebesség vagy körfrekvencia,
 φ_0 : kiindulási fázisszög.

A keletkezés mechanizmusa szerint:

- **mechanikai:** rugalmas deformáció; terjedéséhez rugalmas közegre van szükség (pl. hang),
- **elektromágneses:** elektromos zavar; vákuumban is terjed (pl. fény).

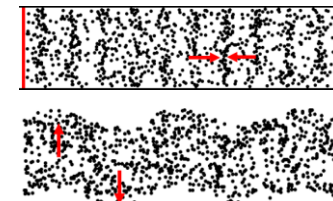
A terjedés dimenziója szerint:

- **egydimenziós** (pl. megpendített húr),
- **felületi** hullám (pl. síkhullám vízfelületen),
- **térbeli** hullám (pl. hang).



A rezgés és a terjedés egymáshoz viszonyított irányja szerint:

- **longitudinális** (pl. hang terjedése gázokban vagy folyadékokban),
- **transzverzális** (pl. fény).



A fény, mint hullám

A fény, mint hullám fontos paramétereit:

- periódusidő (T),
- frekvencia (f), $f = \frac{1}{T}$
- hullámhossz (λ),
- terjedési sebesség (c):

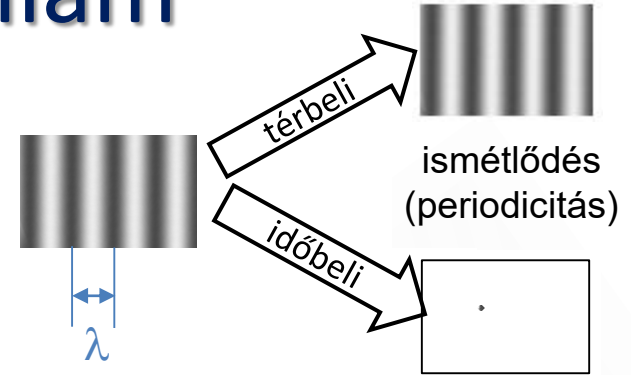
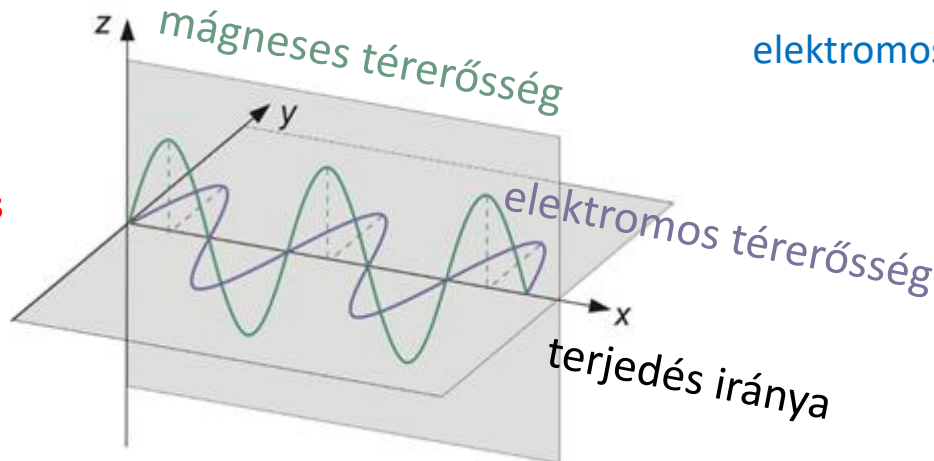
$$c = \lambda \cdot f$$

A fény sebessége vákuumban: $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

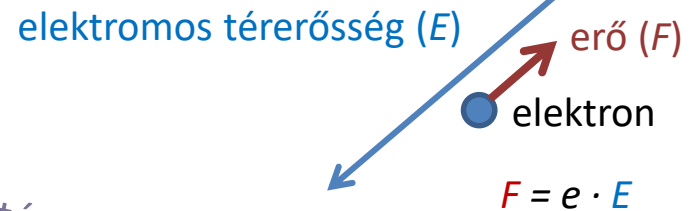
A fény, mint hullám:

- transzverzális
- elektromágneses



Hullámhossz: a hullám két azonos fázisban levő pontja közötti legkisebb távolság

Fény és anyag kölcsönhatása: (Maxwell)



Emiatt a kölcsönhatás miatt minden anyagban lassabban terjed a fény, mint vákuumban.

A Huygens-Fresnel elv

Ha a fény a hullámhossznál kisebb vagy azzal összemérhető résen halad át, a hullámtermészetet figyelembe kell venni. Bizonyos jelenségek nem magyarázhatók a geometriai optikával!



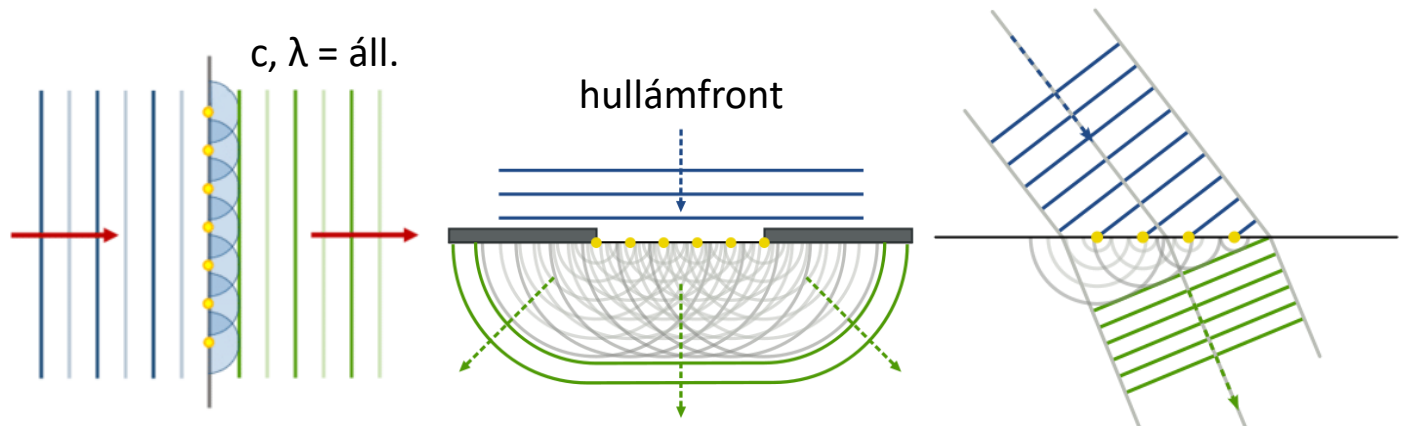
Huygens-Fresnel elv: Egy hullámfront bármely pontja további, elemi gömbhullámok forrása lehet. A hullámtérben az új hullámfelület ezen elemi gömbhullámok közös burkolója lesz.



Christiaan Huygens
(1629-1695)



Augustin-Jean Fresnel
(1788-1827)

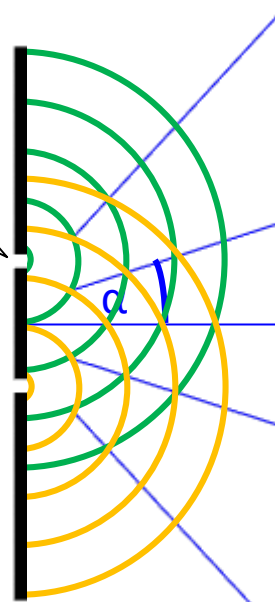
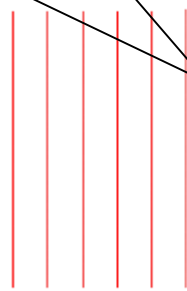
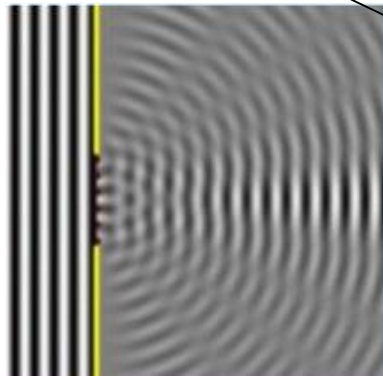


A hullám megjelenik az „árnyékos” területen is.

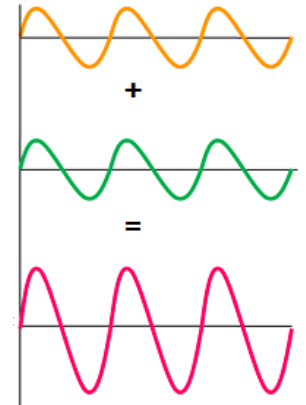
A hullámok interferenciája

Huygens-Fresnel elv:

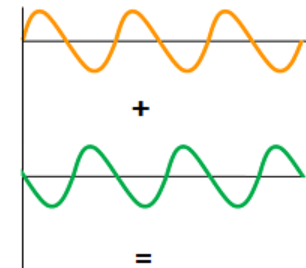
A hullámfront úgy terjed, hogy egy adott hullámfelület minden pontjából elemi gömbhullámok indulnak ki.



max
min
max
min
max
min
max
min
max
min
max



**konstruktív
interferencia:
erősítés
(azonos fázis)**



**destruktív
interferencia:
kioltás**

($\Delta\phi = \text{fél hullámhossz}$)₅

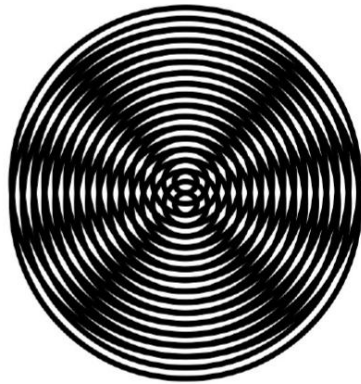
Thomas Young: kettős rés kísérlete:

A kettős résen áthaladó síkhullám jellegzetes interferenciamintázatot alakít ki a távolabb elhelyezkedő ernyőn. Monokromatikus és koherens fényforrás esetén ez a mintázat váltakozó **világos (maximumok)** és **sötét csíkokból (minimumok)** áll.

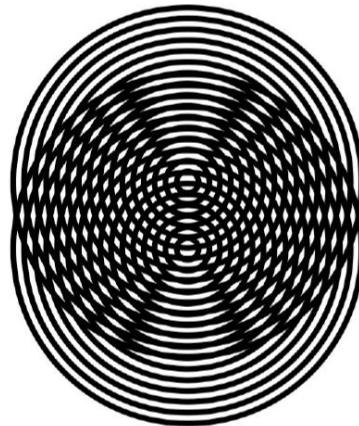
Interferencia:

két vagy több hullám szuperpozíciója eredményeként létrejövő új hullámmintázat.

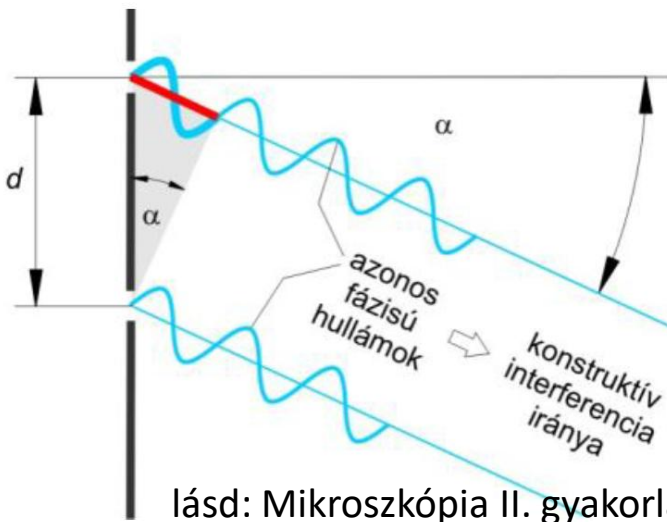
A hullámok elhajlása, diffrakciója



kis $d \sim$ nagy
távolság a
maximumhelyek
között



nagy $d \sim$ kis
távolság a
maximumhelyek
között



lásd: Mikroszkópia II. gyakorlat

$$d \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda$$

ahol $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

d : rácsállandó
 α : elhajlás szöge
 λ : hullámhossz

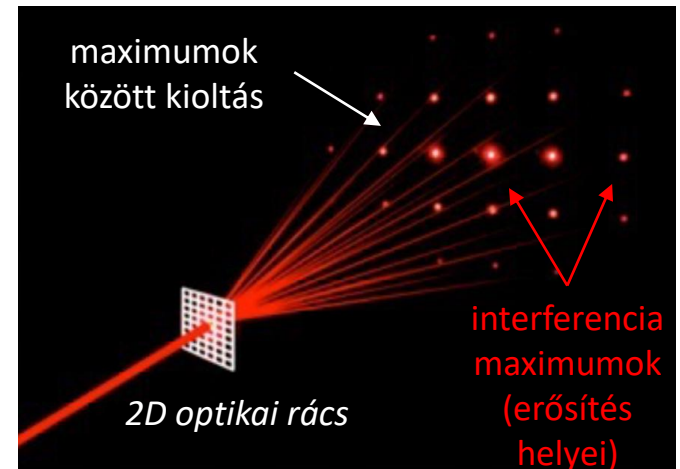
d : szerkezet

anyag



λ : hullámhossz

fény



Orvosi alkalmazás: szerkezetvizsgálat

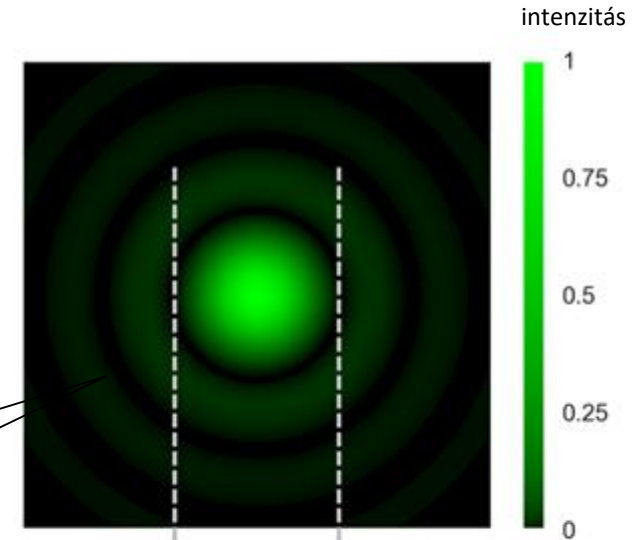
- fénymikroszkóp
- röntgendiffrakció

Optikai leképezés fényhullámokkal

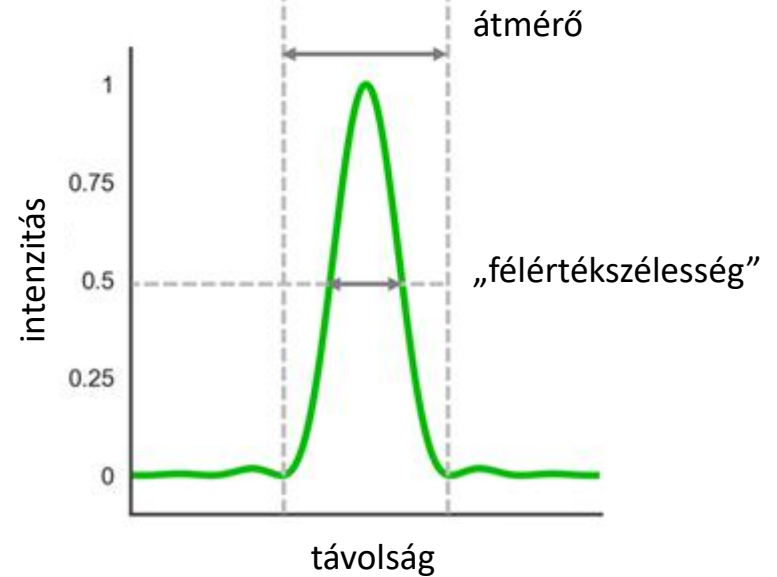
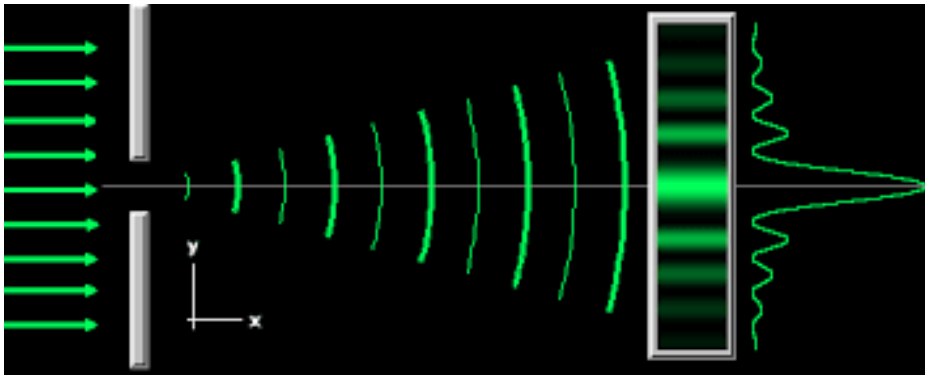


Airy-korongok:

központi maximum, csökkenő intenzitású koncentrikus gyűrűkkel körülvéve



Az elhajlási korongok kialakulása:



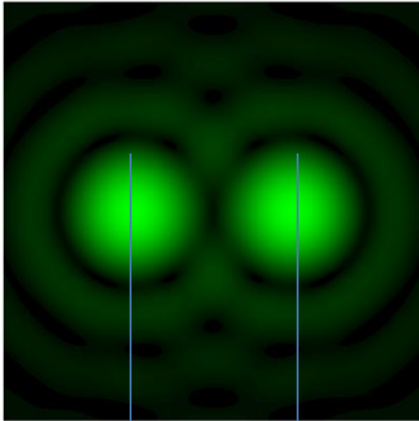
Feloldási határ, felbontókéesség

Rayleigh-határhelyzet, Abbe-képlet

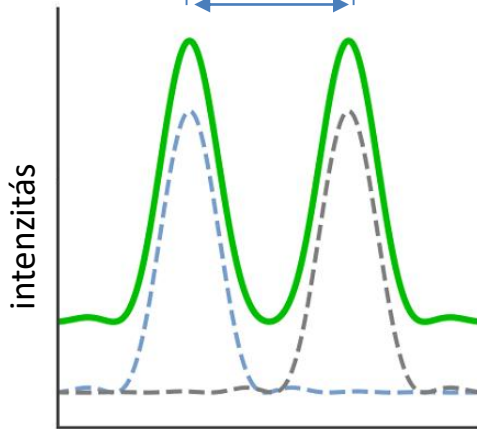
$$d = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{n \cdot \sin(\alpha)}$$

d: feloldási határ
 α : elhajlás szöge (objektív félnyílásszöge)
 λ : hullámhossz
n: közeg törésmutatója

optikailag felbontható

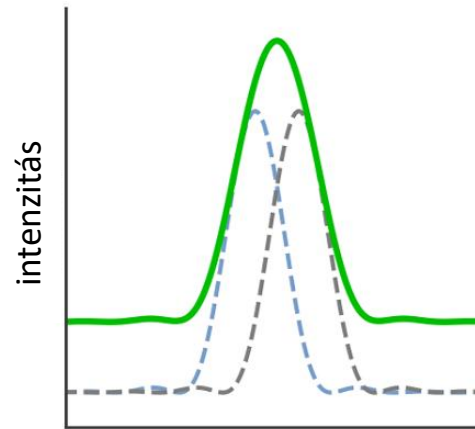
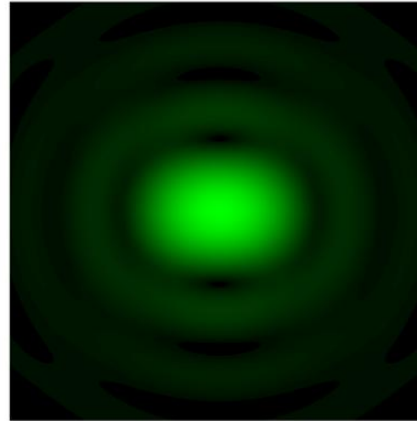


d

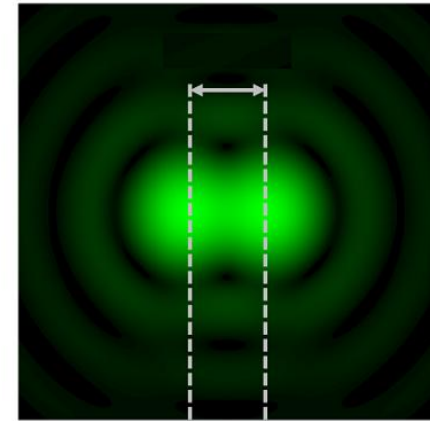


távolság

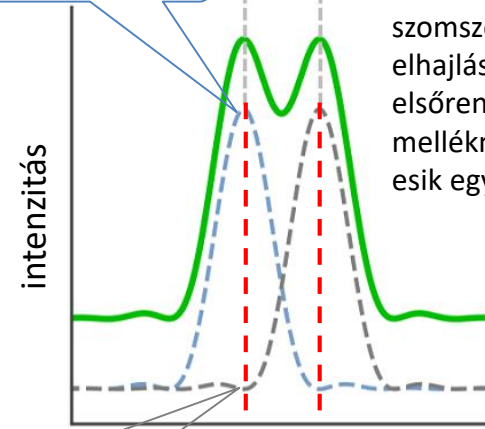
nem felbontható



távolság



főmaximum

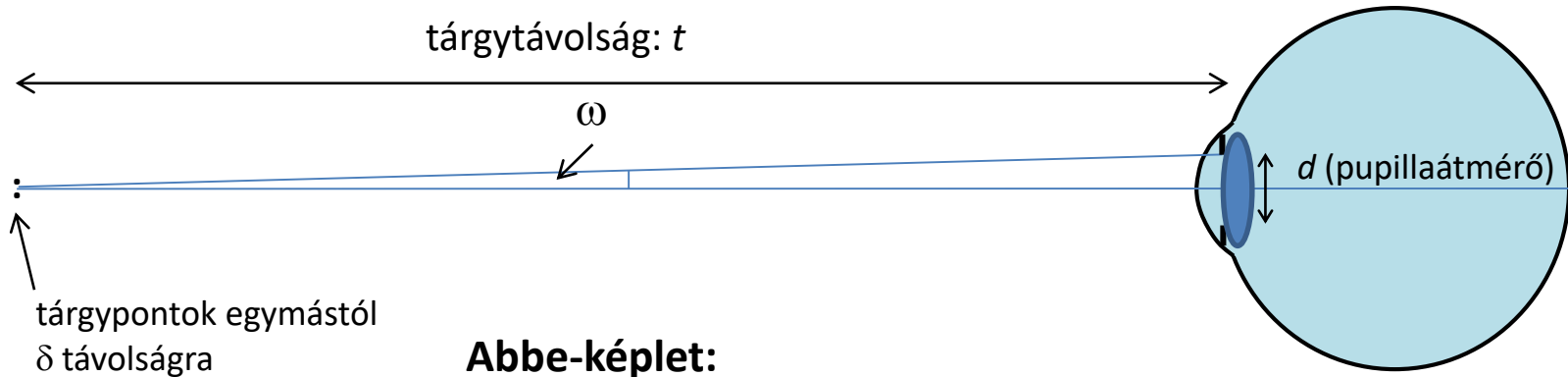


A főmaximum a szomszédos elhajlási korong elsőrendű mellékminimumával esik egybe.

távolság

elsőrendű mellékminimum

A szem felbontóképessége I.



Abbe-képlet:

$$\delta = 0,61 \frac{\lambda}{\sin \omega} \approx 0,61 \frac{\lambda}{\frac{d/2}{t}} = 1,22 \frac{\lambda \cdot t}{d}$$

Kis szögekre: $\sin(x) = \tan(x) = x$ (rad)

tárgypontok egymástól δ távolságra

látószöghatár: $\Theta = \frac{\delta}{t} = 1,22 \frac{\lambda}{d}$

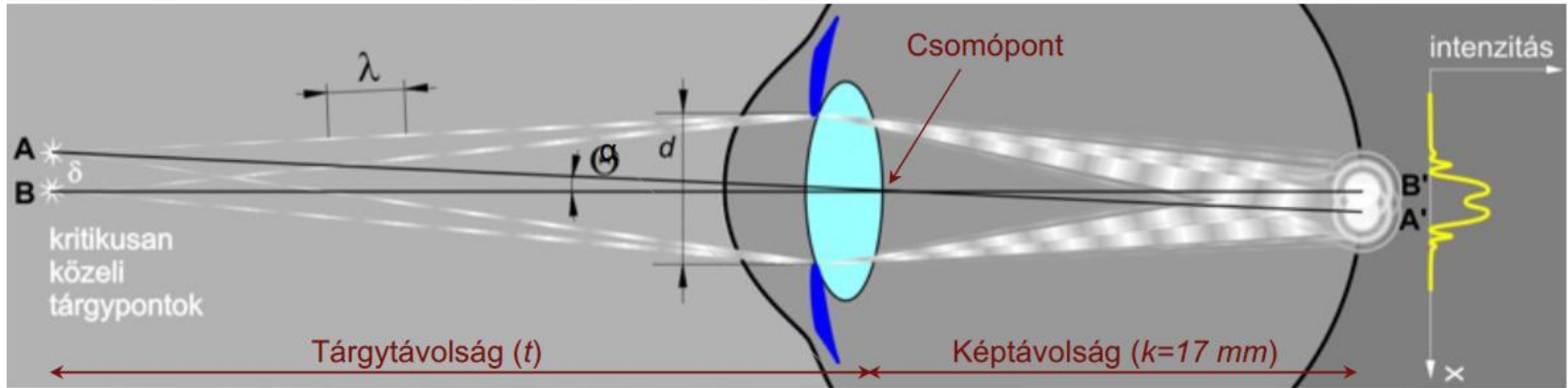


látószöghatár:

$$\Theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

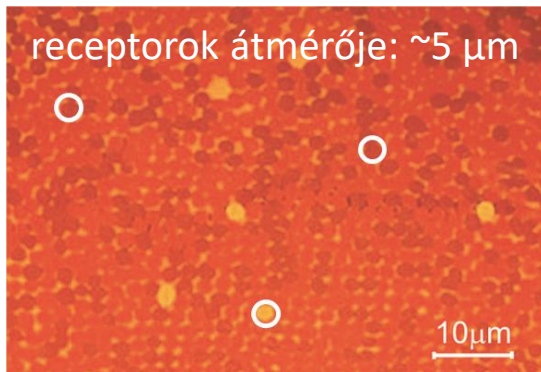
A szem feloldóképessége II.

Az emberi szem hullámoptikai feloldóképessége:



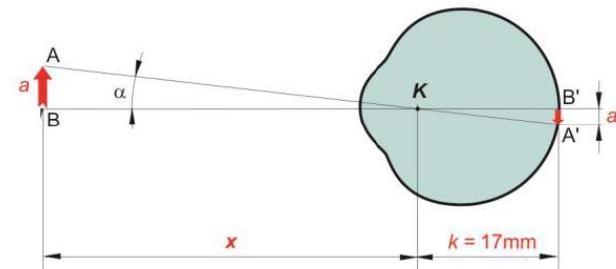
látószöghatár: $\Theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$ Az a legkisebb látószög, amelynél két különálló pontot meg tudunk különböztetni egymástól. Közepes hullámhossz (550 nm) és pupilla átmérő (4 mm) értékekre: **0,6' (szögperc)**.

Az emberi szem feloldóképességének biológiai korlátja: **receptorsűrűség a retinán.**



tárgypontok	képpontok a retinán	látás-érzet
••		•
••		—
••		••

„redukált szem” modell



látószöghatár:
 $\alpha =$

látásélesség:
 $\text{visus} = 1/\alpha$
(·100%)

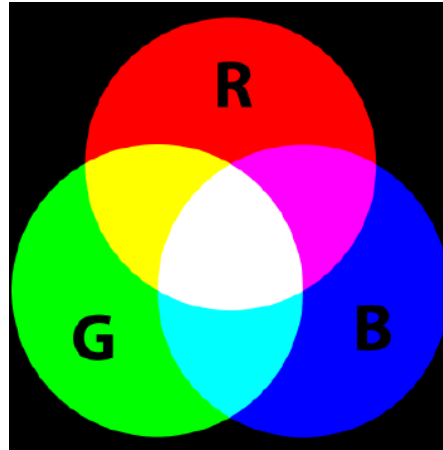
Feloldás feltétele: legalább egy inaktív receptorsejt legyen két aktív receptorsejt között.

Színkeverés, színlátás

Additív (összeadó) színképzés:

Bármely szín kikeverhető a három alapszín (R=vörös, G=zöld, B=kék) megfelelő súlyozású összekeverésével.

$$X = rR + gG + bB$$



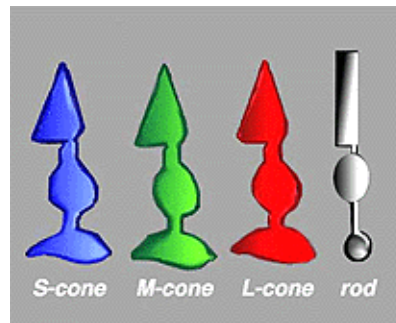
Az emberi szemben:

- 3 különböző színérzékeny fotoreceptor (ún. csap).
- Mindegyik receptor más-más színtartományban érzékeny, azaz más színeket nyel el.
- Számarányuk: R=64%, G=32%, B=2%.
- A fény intenzitását („fényerősség”) érzékelik ($J \sim A^2$).

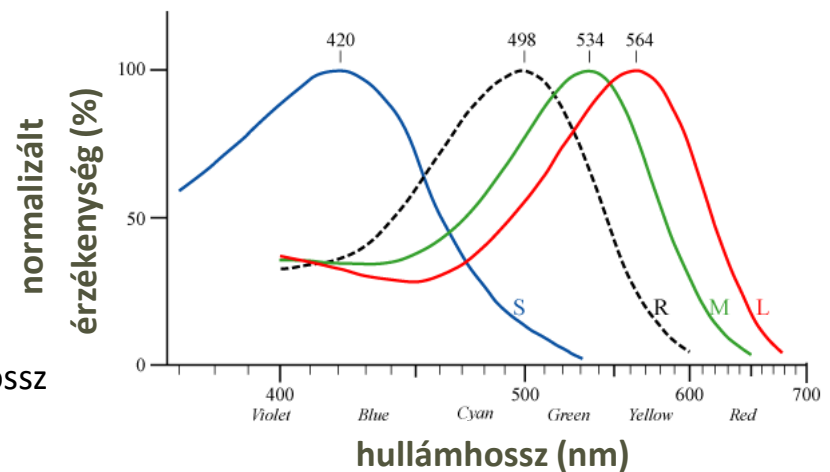
Az emberi szem spektrális színérzékenysége:



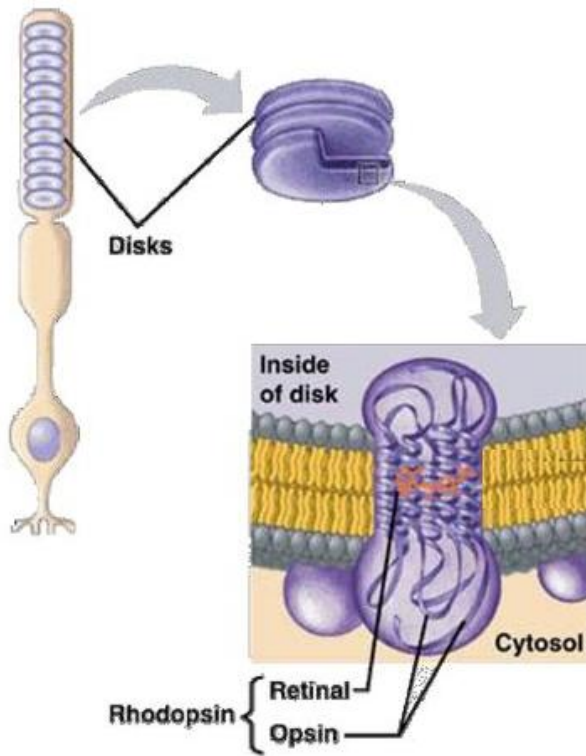
különböző típusú fotoreceptorok a retinán



S: „short”
M: „middle”
L: „long” } hullámhossz



Színvaktság



Fényérzékelő fehérje: rodopszin

- **opszin**
- **retinal** (A-vitamin származék)
- a retinal cisz/transz konformációváltása ionáramot hoz létre a receptorban

A színvaktság lehetséges oka:

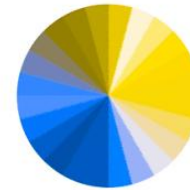
- **mutáció az opszin fehérjében**
- **rodopszin szerkezetének és fényelnyelésének megváltozása**
- **receptorsejt funkciózavara**



normál
színlátás



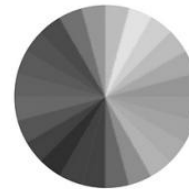
Deuteranopia



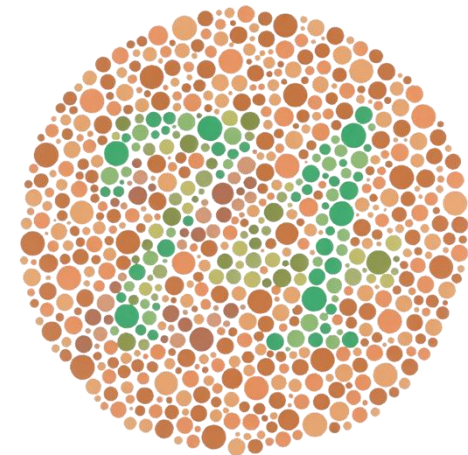
Protanopia



Tritanopia

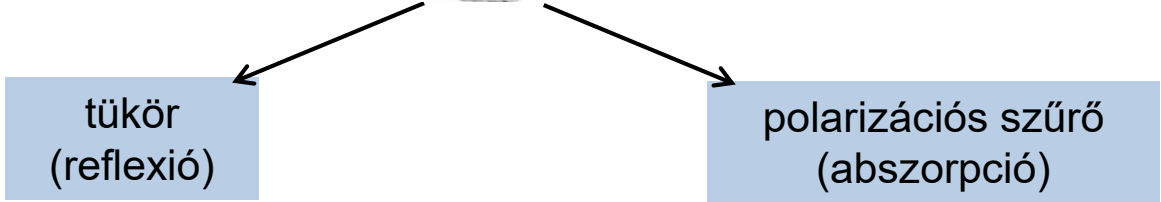
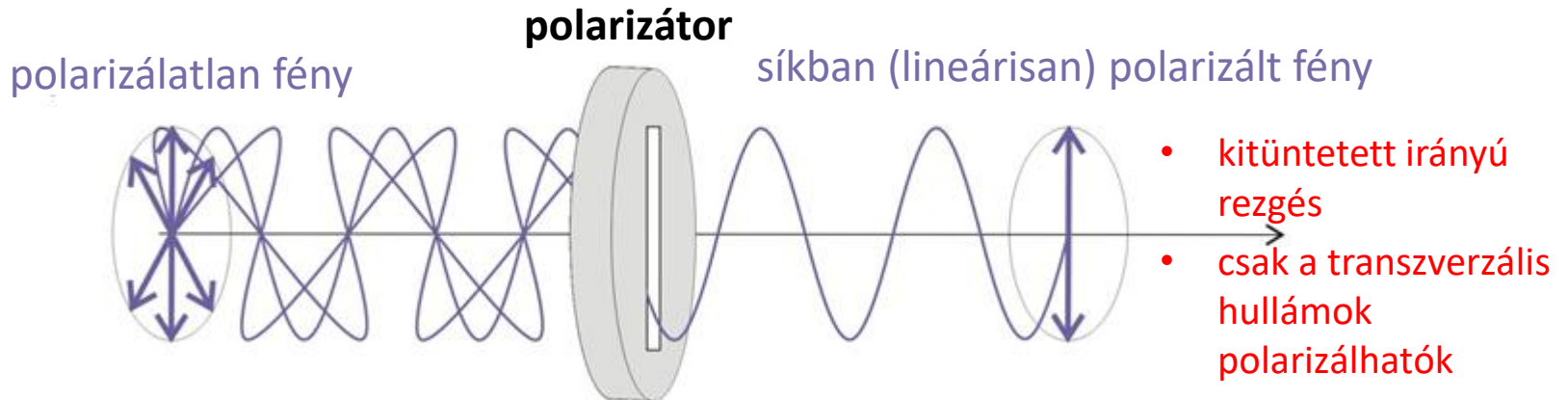


Monokromácia

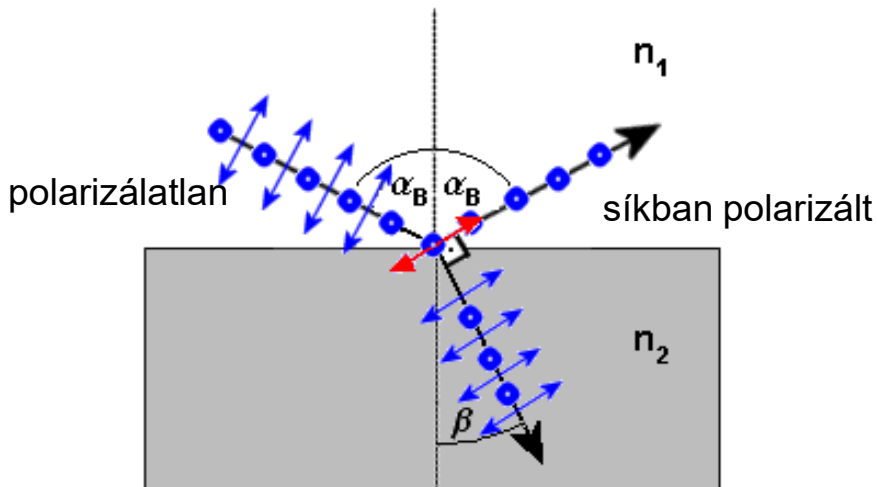


Ishihara-tesztábra a szintévesztés kiszűrésére

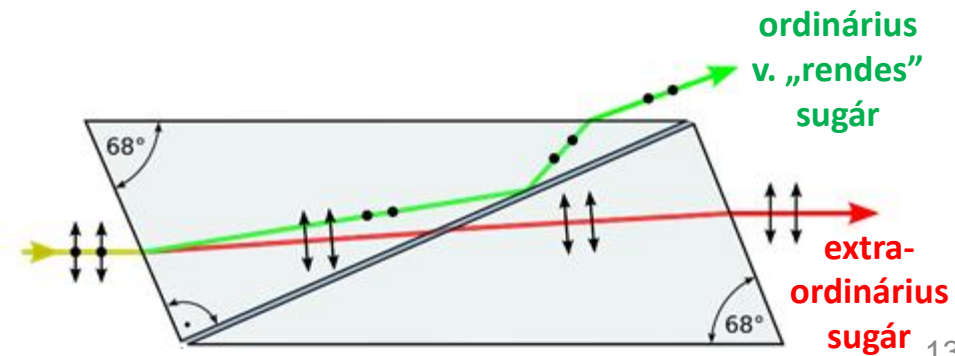
A fény lineáris polarizációja



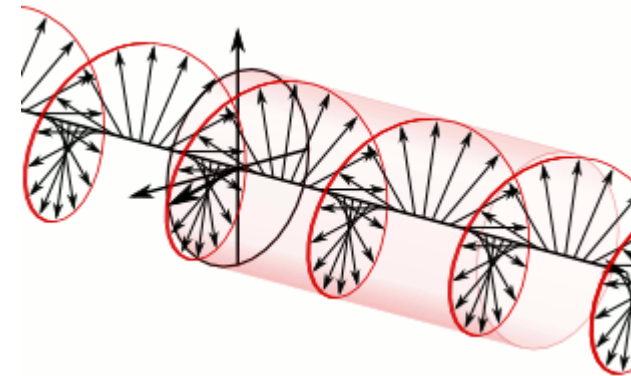
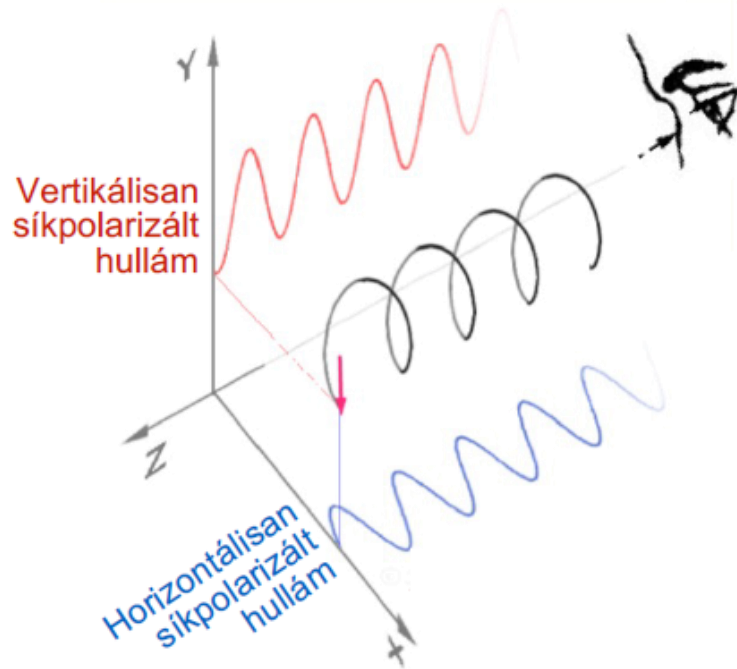
$\alpha_B = \text{Brewster-szög: } \text{tg}(\alpha_B) = n_2/n_1$



- kettőtörő kristályok
- Nicol-prizma
- polimerek

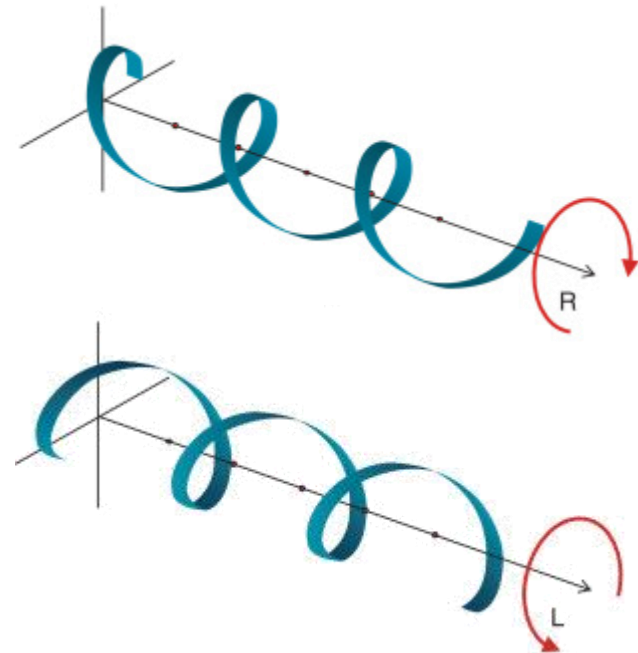


A fény cirkuláris polarizációja



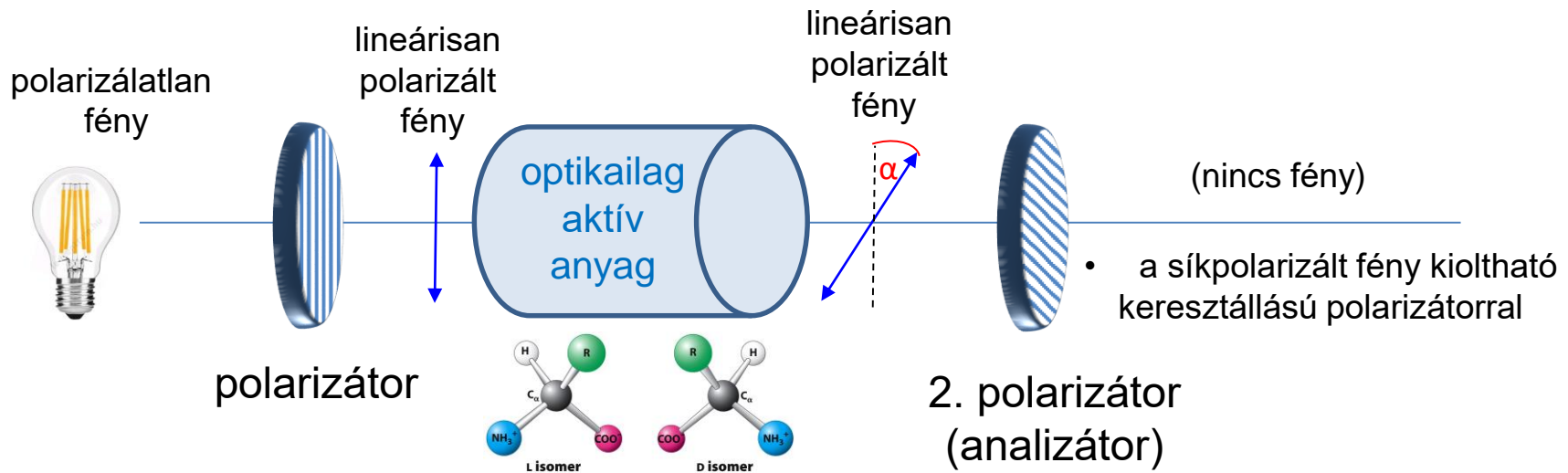
- az elektromos térerősségvektor forog a frontális síkban

- **fáziskülönbség: $+\lambda/4$ vagy $-\lambda/4$**
- **síkpolarizált fény: jobbra és balra cirkulárisan polarizált fény összege**
- az emberi szem számára a rezgési sík térbeli állása nem érzékelhető
- az emberi szem számára a rezgésállapot fázisa sem érzékelhető



Polarizált fény az orvosi gyakorlatban

Alkalmazás: polarizációs mikroszkópia - kettőtörő anyagok az emberi szövetekben
polarimetria - koncentrációmérés



Biot-törvény:

elforgatás szöge ($^{\circ}$)

koncentráció (g/cm^3)

rétegvastagság (dm)

$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot c \cdot l$$

fajlagos forgatóképesség

($^{\circ} \cdot \text{cm}^3 / (\text{g} \cdot \text{dm})$) 20°C -on és a Na-lámpa „D-vonalára” (589 nm) megadva

