

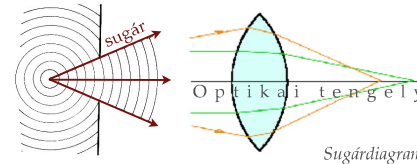
# HULLÁMOPTIKA

KELLERMAYER MIKLÓS

## GEOMETRIAI ÉS HULLÁMOPTIKA

### Geometriai optika

Ha a fény a hullámhossznál sokkal nagyobb résen halad át, a hullámfront (fázis) terjedése egy egyenessé ("sugár") egyszerűsíthető.

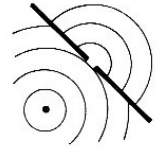


- Optikai nyaláb ("fényszugár"): absztrakció, matematikai egyenes.
- A nyílak az energiaterjedés irányát jelölik.
- Optikai tengely: az optikai elemek (pl. lencsék) középpontján áthaladó egyenes.
- Reverzibilitás elve: az energiaterjedés (nyílak) iránya megfordítható.

### Hullámoptika

Ha a fény a hullámhossznál kisebb vagy azzal összemérhető résen halad át, a hullámtermészetet figyelembe kell venni.

Bizonyos jelenségek nem magyarázhatók a geometriai optikával!



A fény mint hullám fontos paraméterei:

- Periódusidő ( $T$ )
- Frekvencia ( $f=1/T$ )
- Terjedési sebesség ( $v, c$ )
- Hullámhossz ( $\lambda$ ): egy  $T$  alatt megtett távolság:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

A fény terjedési sebessége vákuumban:  $c=2,99792458 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$

Optikailag sűrűbb közegben a fény terjedési sebessége csökken ( $c_1$ ). Ez kifejezhető az abszolút törésmutatóval ( $n_1$ ):

$$n_1 = \frac{c}{c_1}$$

## A hullámok forrása: rezgőmozgás

Példa:  
Tacoma Narrows Bridge



Tacoma Narrows Bridge ("Gallopín' Gertie")  
("Gertie the Dinosaur") (1914), rajzfilm, Winsor McCay)  
Átadás: 1940. július 1.  
Szélben (50-70 km/h): órákon át tartó rezgés.  
Rezgés amplitúdó eleinte 0,5 m, majd egy tartókábel elszakadása után akár 9 m!  
Összeomlás: 1940. november 7.

(A jelenség magyarázata)



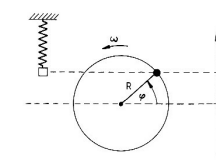
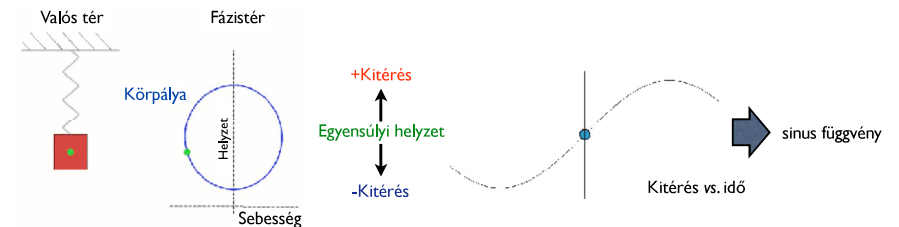
Kármán-féle örvények  
(Szélben, a híd élen keletkeznek. Ha nem válnak le a felületről, rezgés lép fel.)



Kármán Tódor  
(Theodore von Kármán)  
1881-1963

## Harmonikus rezgőmozgás

Egyensúlyi helyzetéből kitérített rendszerre visszatérítő erő hat (pl. rugóra függesztett tömeg).



$\phi$  = fázisszög  $t$  időpontban  
 $y$  = kitérés  $t$  időpontban  
 $\omega$  = szögsebesség ( $\phi/t = 2\pi/T$ )  
= körfrekvencia ( $2\pi f$ )  
 $R$  = forgó egységvektor hossza  
= maximális kitérés (amplitúdó)

$$y = R \sin \phi$$

Mivel  $\phi = \omega t$ :  $y = R \sin(\omega t)$

Ha a kiindulási fáziszög ( $\phi_0$ ) nem zérus:  $y = R \sin(\omega t + \phi_0)$

Mivel a szögsebesség ( $\omega$ ) a periódusidő ( $T$ ) alatt megtett teljes kör ( $2\pi$ ):  $y = R \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi_0\right)$

A tovaterjedő hullámmozgás fontos paraméterei:

- Periódusidő ( $T$ )
- Frekvencia ( $f=1/T$ )
- Terjedési sebesség ( $v, c$ )
- Hullámhossz ( $\lambda$ ): egy periódusidő alatt megtett távolság:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

# Hullámok típusai

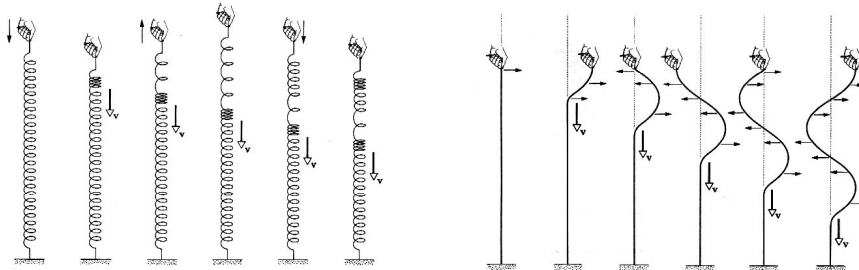
- Keletkezés **mechanizmusa** szerint:
  1. Mechanikai: rugalmas deformáció, rugalmas közegben terjed (pl. hang)
  2. Elektromágneses: elektromos zavar, vákuumban (is) terjed (pl. fény)
- Terjedés **dimenziója** szerint:
  1. egydimenziós (pl. megpendített húr)
  2. felületi hullámok (pl. síkhullám vízfelületen)
  3. térbeli hullámok (pl. hang)



- A rezgés és terjedés relatív **irányai** szerint:

1. Longitudinális (pl. hang)

2. Transzverzális (pl. fény)



# Hullámjelenségek I. Diffrakció, hullámelhajlás

**Huygens-Fresnel elv:**  
egy hullámfront minden pontja további hullámok forrása

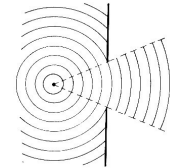


Christiaan Huygens  
(1629-1695)

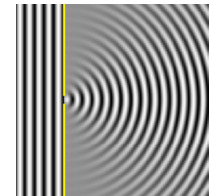


Augustin-Jean Fresnel  
(1788-1827)

Hullámhossznál sokkal nagyobb rés



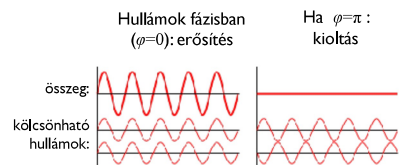
Hullámhossznál kisebb rés



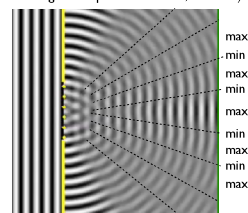
A hullám megjelenik az "árnyékos" területen is.

# Hullámjelenségek II. Interferencia

Alapja: szuperpozíció elve

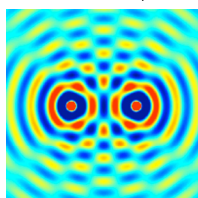


Több ( $>1$ ), hullámhosszal összemérhető nagyságú rés  
( $=d$  távolságra levő pontszerű részek, ahol  $d \sim \lambda$ )

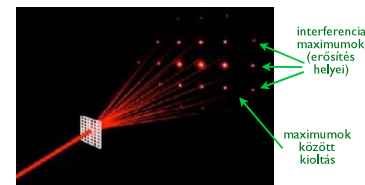
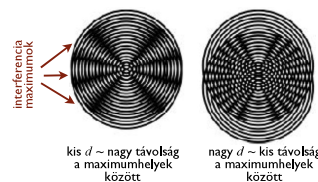


2D optikai rács elhajlasi (diffrakciós) interferencia képe

Két, pontszerű forrásból származó hullámok interferenciája



Kialakuló **interferencia mintázat** a pontszerű részek közötti távolságtól ( $d$ ) függ



interferencia maximumok (erősítés helyei)  
maximumok között kioltás

# Hullámjelenségek III. Polarizáció

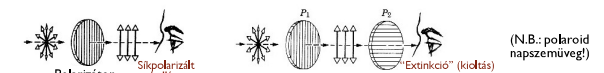
**Polarizáció:** kitüntetett irányú rezgés  
**Kettős törés:** anizotróp terjedési sebesség  
Csak a **transzverzális** hullámok polarizálhatók.



**Mechanikai** hullámok polarizálása

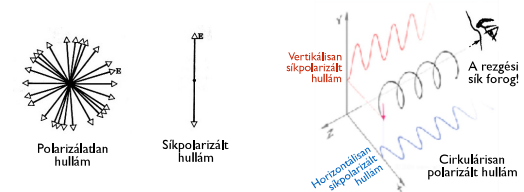


**Elektromágneses** hullámok polarizálása

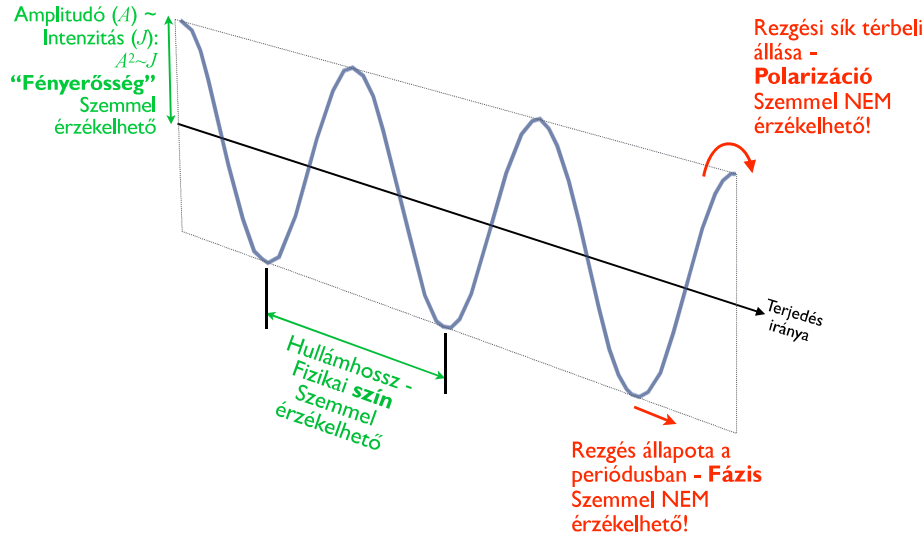


(N.B.: polaroid napszemüveg!)

Polarizáció illusztrálása a terjedési irányból nézve:



# A fény mint hullám érzékelhető paraméterei



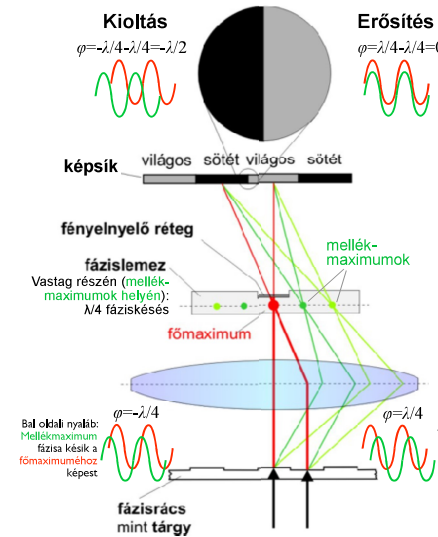
A hullám eredete és természete: jövő hét!

# Fázis, fáziskontraszt mikroszkópia

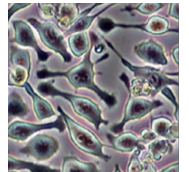
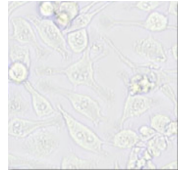
A mintában fellépő fáziseltolódásbeli különbségeket amplitudó kontraszttá alakítja



- **Fázis**: azt mutatja meg, hogy a teljes hullámmozgási periódus ( $2\pi$ ) mely részén tart a rezgés.
- **Fázisszöggel** ( $\varphi$ ) fejezzük ki.
- **Hullámok egymáshoz viszonyított fáziskülönbsége**: **fáziseltolódás** (késés v. sietés)

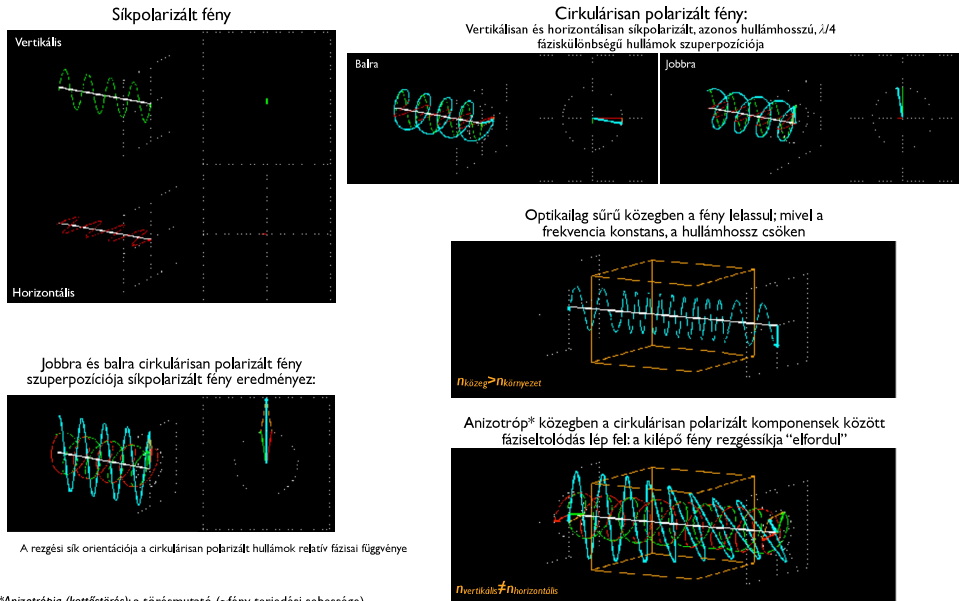


Élő (festetlen) sejtek mikroszkópos képe



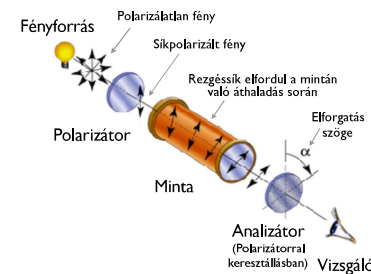
# Polarizált fény és kölcsönhatásai

Rezgés (elektromos v. mágneses tér) kitüntetett irányú - rezgési sík kitüntetett állású



# Polarizáció alkalmazásai

## Polarimetria



Elfordulás szöge az optikailag aktív\* anyag koncentrációjától ( $c$ ) függ:

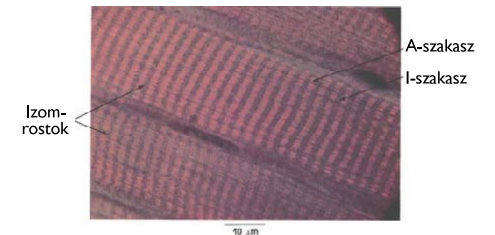
$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot c \cdot l$$

$[\alpha]$  = fajlagos forgatóképesség ("20": szobahő;  
 "D": Na spektrális vonala  $\lambda = 589$  nm)  
 $l$  = rétegvastagság (mintatartó hossza)

\*Optikailag aktív anyag: kiralitás molekulákat tartalmazó minta, amely a sikpolarizált fény rezgésikját elforgatja.

## Polarizációs mikroszkópia

Harántcsikolt izomrost polarizációs mikroszkópban

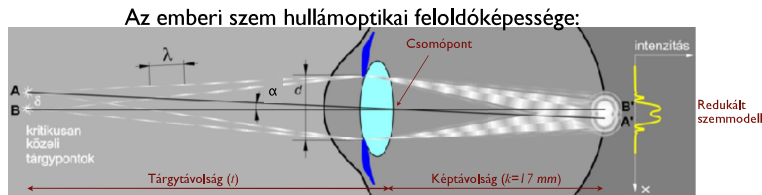
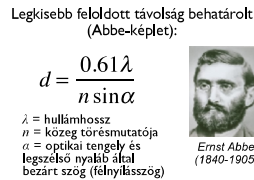
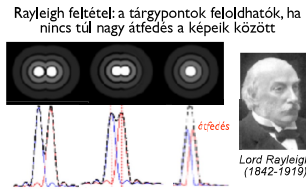


- **A-szakasz**: anizotróp (kettőstörő) szakasz (helikális filamentumokba rendezett miozinmolekulákat tartalmaz)
- **I-szakasz**: izotróp szakasz



A fény hullámtermészete behatárolja a szem működését!

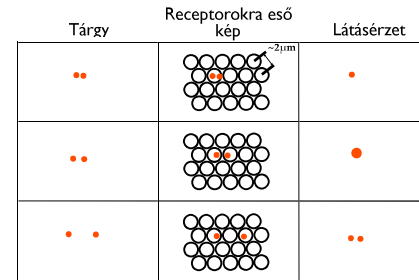
# A szem feloldóképessége I. Hullámoptikai korlát



Látószöghatár:  $\alpha_H = 1.22 \frac{\lambda}{d}$

Az a legkisebb látószög, amelynél két különálló pontot meg tudunk különböztetni egymástól.  
 Közepes hullámhossz (550 nm) és pupilla átmérő (4 mm) értékekre:  $0.6'$

# A szem feloldóképessége II. Biológiai korlát: receptorsejt-sűrűség



- Feloldás feltétele: legalább egy inaktívált receptorsejt legyen két aktivált receptorsejt között. Ekkor a legkisebb látószöghatár a redukált szemmodell alapján ( $\alpha_H$ )  $\approx 0.8'$ .
- Az emberi szemben a hullámoptikai és biológiai feloldóképesség értékei nagyjából **egybeesnek**.

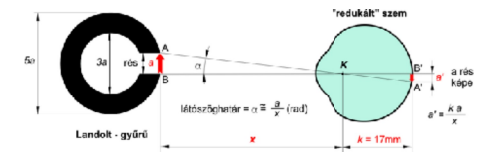
Látásélesség (*visus*, "Visual Acuity", VA):

$$\text{látásélesség} = \frac{1'}{\alpha} 100\%$$

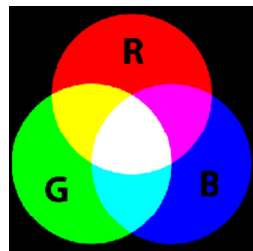
$\alpha$  = kísérleti (mért) látószöghatár

Normál látószöghatár egészséges emberben:  
 $1' (=100\% \text{ visus})$

Látásélesség mérése



# Színkódolás, színlátás



## Additív színkódolás

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

$$X = rR + gG + bB$$

Emberi szemben:

- 3 különböző színérzékeny receptor.
- Mindegyik receptor más-más színtartományban érzékeny, azaz más színeket nyel el ( $R=64\%$ ,  $G=32\%$ ,  $B=2\%$ ).

