

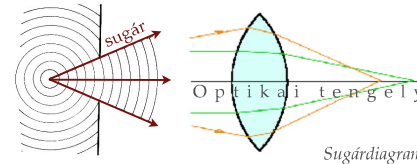
HULLÁMOPTIKA

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.

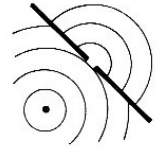


- Optikai nyaláb ("fényszugár"): absztrakció, matematikai egyenes.
- A nyílak az energiaterjedés irányát jelölik.
- Optikai tengely: az optikai elemek (pl. lencsék) középpontján áthaladó egyenes.
- Reverzibilitás elve: az energiaterjedés (nyílak) iránya megfordítható.

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 (λ): 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)



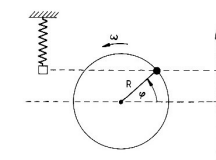
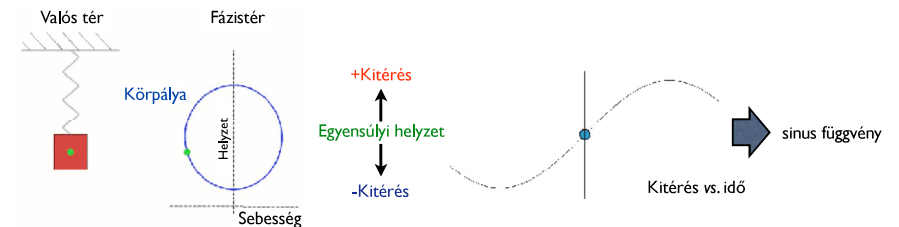
Kármán-féle örvények
(Szélben, a híd élein keletkeznek. Ha nem válnak le a felületről, rezgés lép fel.)



Kármán Tódor
(Theodore von Kármán)
1881-1963

Harmonikus rezgőmozgás

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



ϕ = fázisszög t időpontban
 y = kitérés t időpontban
 ω = 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 (ϕ_0) nem zérus: $y = R \sin(\omega t + \phi_0)$

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

A tovaterjedő hullámmozgás fontos paraméterei:

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

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

Hullámok típusai

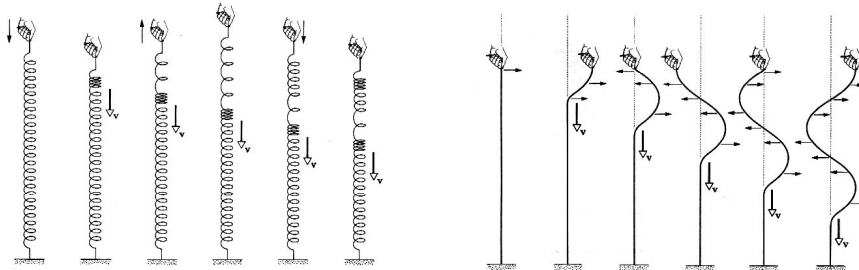
- Keletkezés **mechanizmusa** szerint:
 1. Mechanikai: rugalmas deformáció, rugalmas közegben terjed (pl. hang)
 2. Elektromágneses: elektromos zavar, vákuumban (is) terjed (pl. fény)
- Terjedés **dimenziója** szerint:
 1. egydimenziós (pl. megpendített húr)
 2. felületi hullámok (pl. síkhullám vízfelületen)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

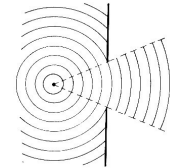


Christiaan Huygens
(1629-1695)

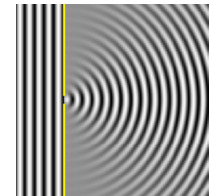


Augustin-Jean Fresnel
(1788-1827)

Hullámhossznál sokkal nagyobb rés



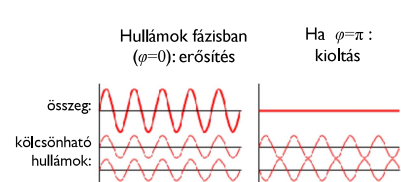
Hullámhossznál kisebb rés



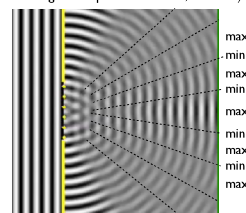
A hullám megjelenik az "árnyékos" területen is.

Hullámjelenségek II. Interferencia

Alapja: szuperpozíció elve

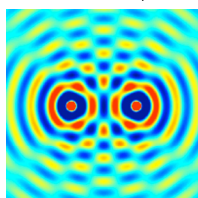


Több (>1), hullámhosszal összemérhető nagyságú rés
($=d$ távolságra levő pontszerű részek, ahol $d \sim \lambda$)

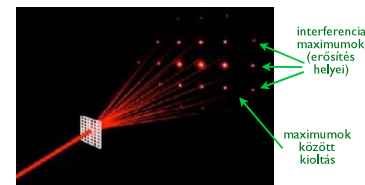
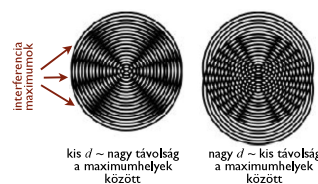


2D optikai rács elhajlasi (diffrakciós) interferencia képe

Két, pontszerű forrásból származó hullámok interferenciája



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



Hullámjelenségek III. Polarizáció

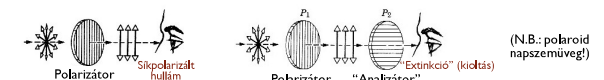
Polarizáció: kitüntetett irányú rezgés
Kettős törés: anizotróp terjedési sebesség
Csak a **transzverzális** hullámok polarizálhatók.



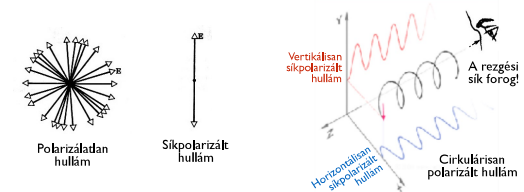
Mechanikai hullámok polarizálása



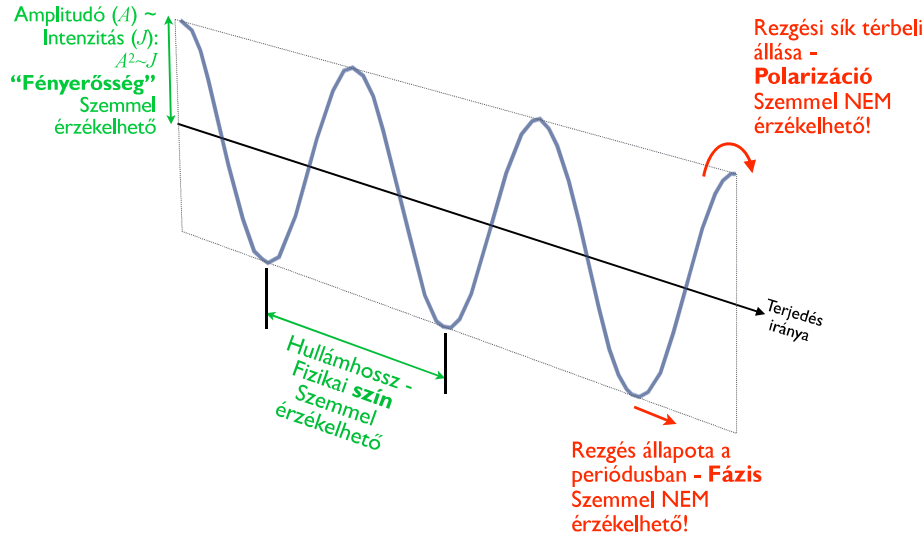
Elektromágneses hullámok polarizálása



Polarizáció illusztrálása a terjedési irányból nézve:



A fény mint hullám érzékelhető paraméterei



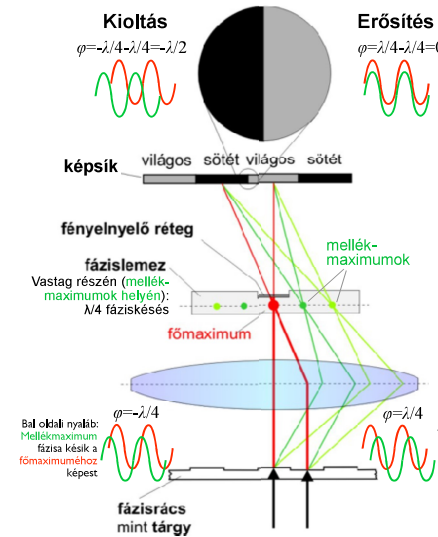
A hullám eredete és természete: jövő hét!

Fázis, fáziskontraszt mikroszkópia

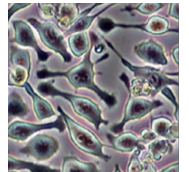
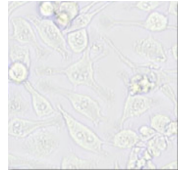
A mintában fellépő fáziseltolódásbeli különbségeket amplitúdó kontraszttá alakítja



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

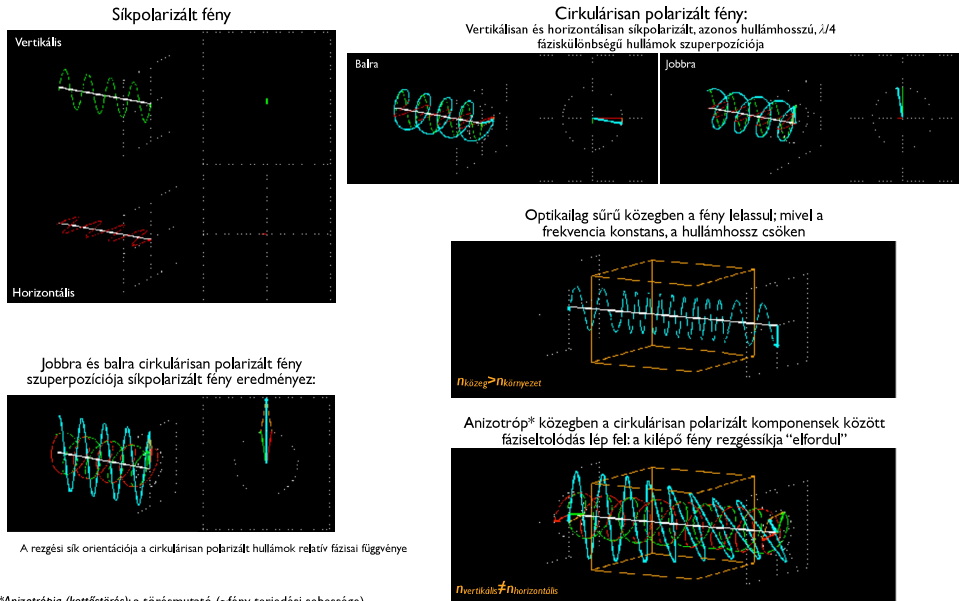


Élő (festetlen) sejtek mikroszkópos képe



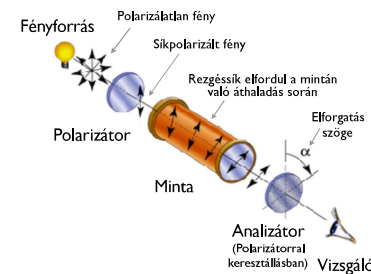
Polarizált fény és kölcsönhatásai

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



Polarizáció alkalmazásai

Polarimetria



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

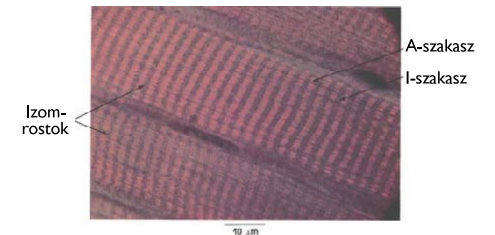
$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot c \cdot l$$

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

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

Polarizációs mikroszkópia

Harántcsikolt izomrost polarizációs mikroszkópban

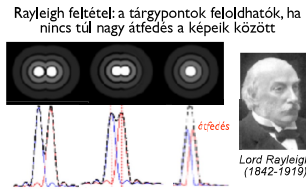


- **A-szakasz:** anizotróp (kettőstörő) szakasz (helikális filamentumokba rendezett miozinmolekulákat tartalmaz)
- **I-szakasz:** izotróp szakasz



A fény hullámtermészete behatárolja a szem működését!

A szem feloldóképessége I. Hullámoptikai korlát

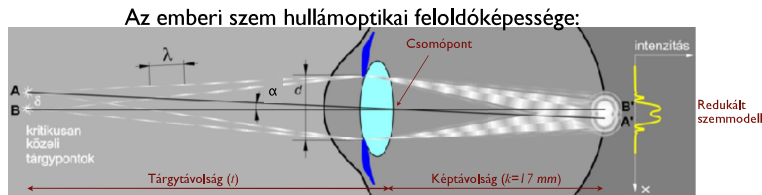


Legkisebb feloldott távolság behatárolt (Abbe-keplet):

$$d = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha}$$

λ = hullámhossz
 n = közeg törésmutatója
 α = optikai tengely és legszélső nyakból áthal bezárt szög (fénynyílásszög)

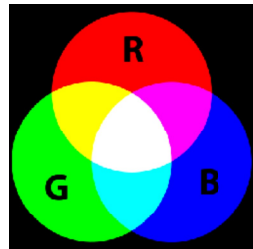
Ernst Abbe (1840-1905)



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

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

Színkódolás, színlátás



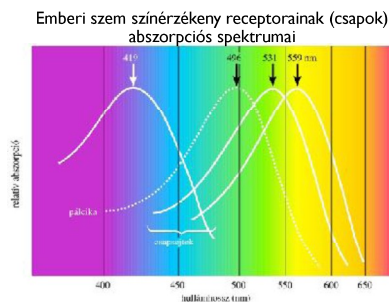
Additív színkódolás

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 ($R=64\%$, $G=32\%$, $B=2\%$).



A szem feloldóképessége II. Biológiai korlát: receptorsejt-sűrűség

Tárgy	Receptorokra eső kép	Látásérzet

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

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

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

α = kísérleti (mért) látószöghatár

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

Látásélesség mérése

