

A fény kölcsönhatásai

1.

fénytörés, optikai eszközök,
fénymikroszkóp, elektronmikroszkóp

2020. 09. 28.

Liliom Károly

A fény kölcsönhatása az anyaggal

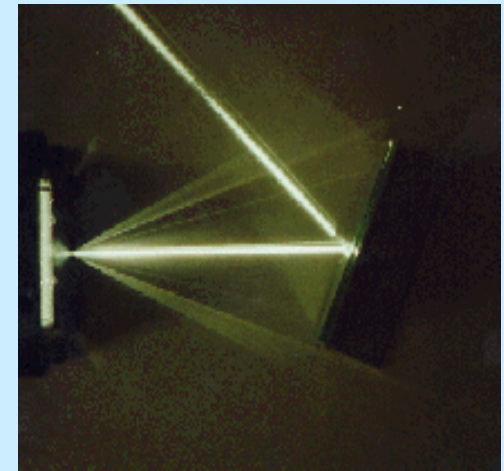
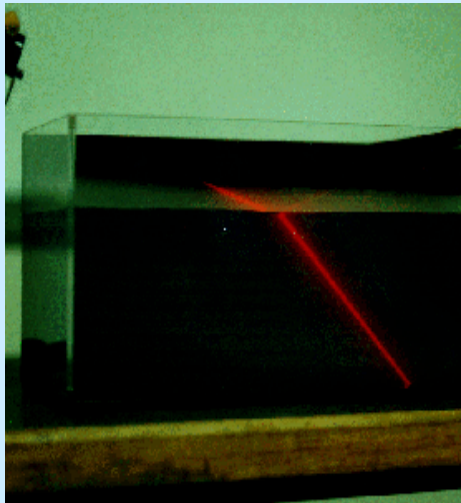
beeső fénysugár

visszaverődés

törés

szóródás

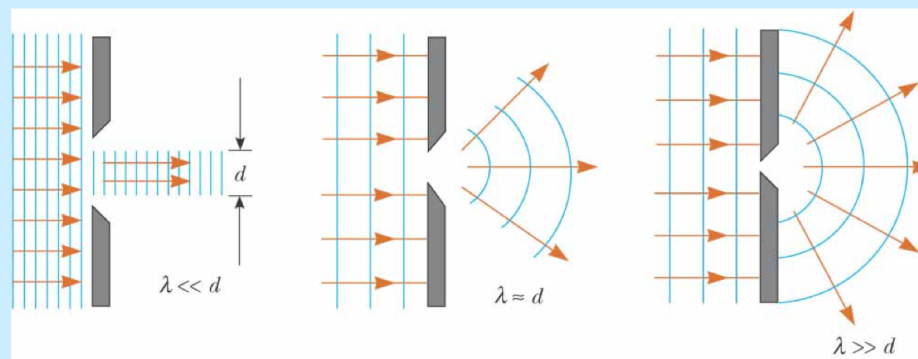
elnyelődés



Geometriai optika

Emlékeztető: a fény hullámként terjed →

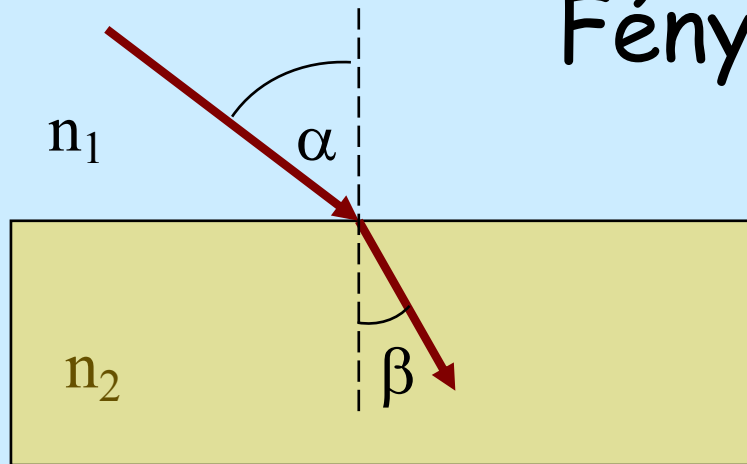
Homogén és izotróp közegben a fény egyenes mentén terjed → **fénysugár**



A fény terjedési sebessége $c = 3 \times 10^8$ m/s ($2,99792458 \dots \times 10^8$ m/s) – de csak vákumban!

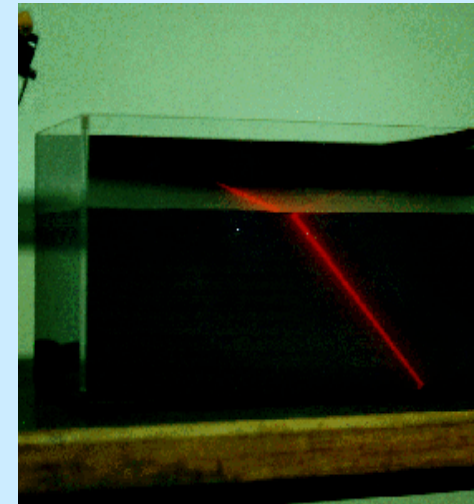
- optikailag sűrűbb közegben a fény lelassul, $c_1 < c$ (mivel $E = hf$ és $c = \lambda f$, ezért $\lambda_1 < \lambda$)
- a közeg abszolút törémutatója a vákumbeli és a közegbeli fénysebesség hányadosa: $n_1 = c/c_1$
- két közeg egymáshoz viszonyított (relatív) törésmutatója: $n_{2,1} = n_2 / n_1$
- a nyíl az energiaterjedés irányát mutatja – fordított irány azonos: reverzibilitás elve
- **Fermat elv:**
a fény két pont között azt az utat járja be, amelyet a legrövidebb idő alatt tehet meg

Fénytörés

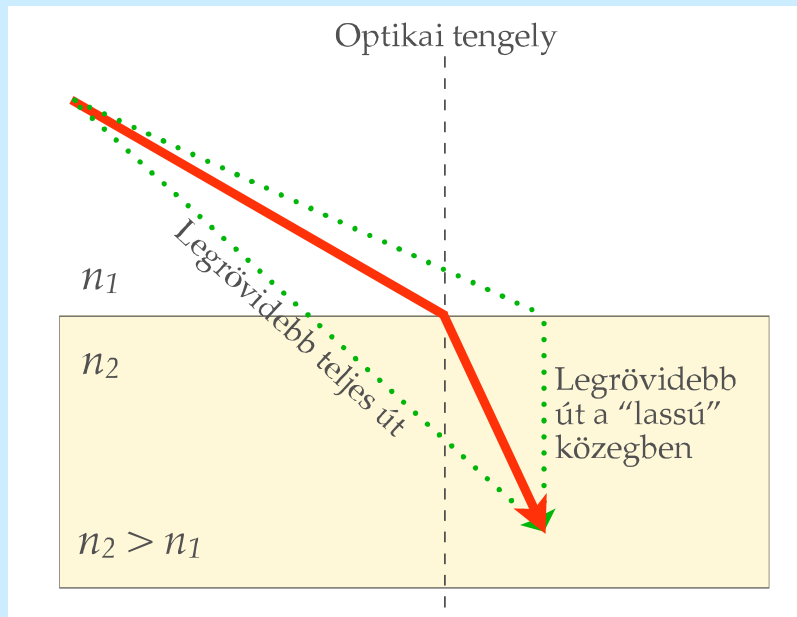


$$n_1 < n_2$$

$$\alpha > \beta$$

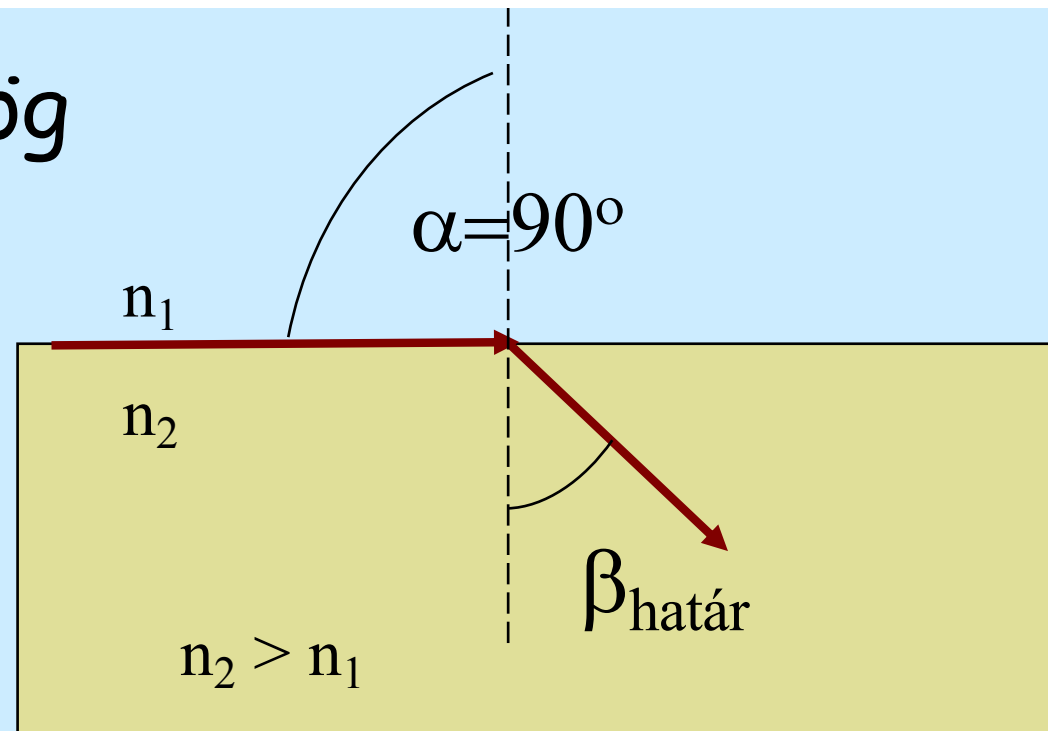


Snellius – Descartes törvény:
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$



A fénytörés értelmezhető
a Fermat elv segítségével

Határszög



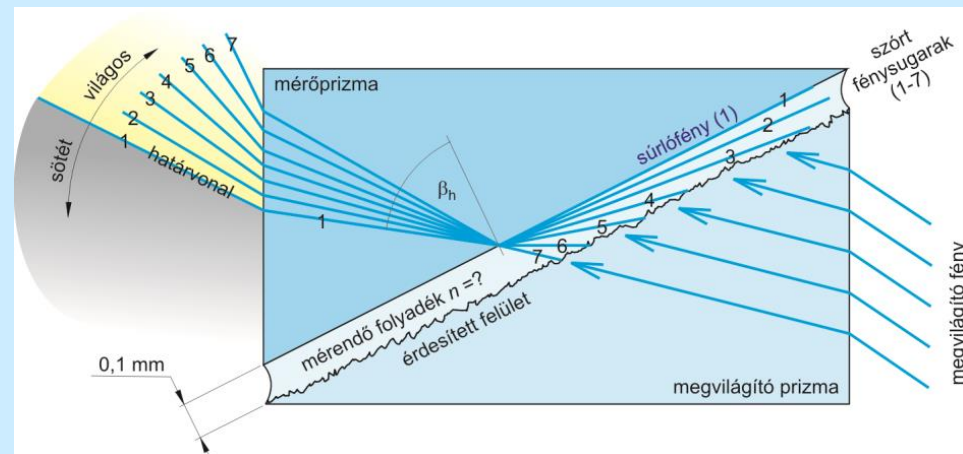
$$n_2/n_1 = \sin 90 / \sin \beta_{\text{határ}} = 1/\sin \beta_{\text{határ}} \rightarrow n_1 = n_2 \times \sin \beta_{\text{határ}}$$

Analitikai alkalmazás:

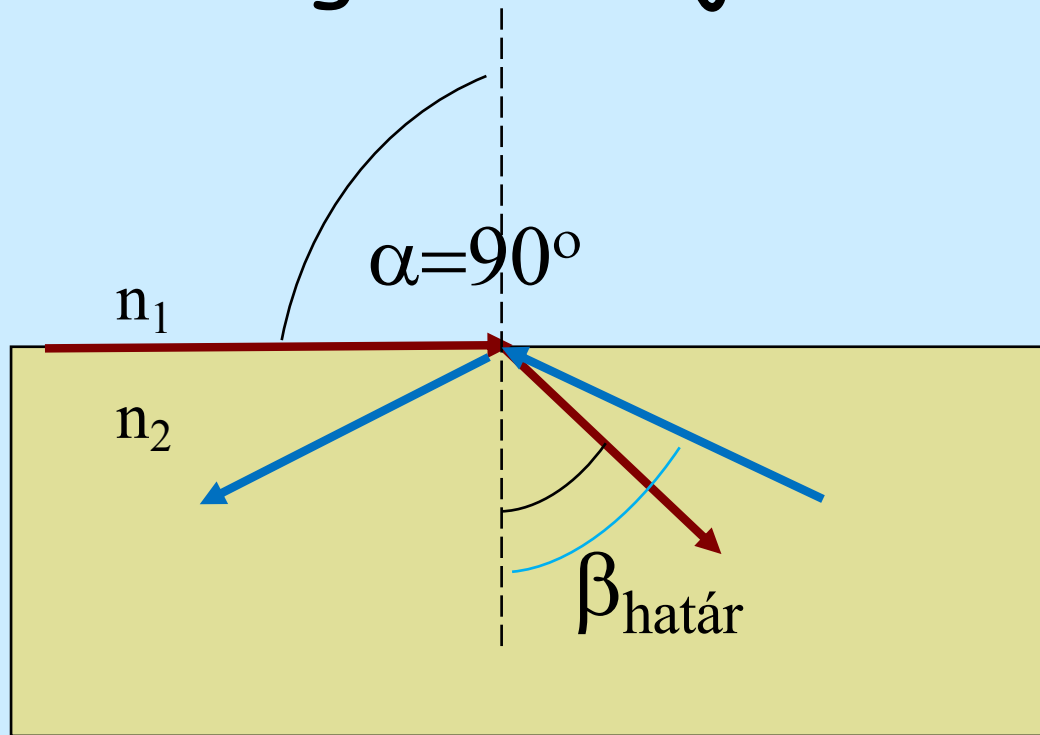
híg oldatok koncentrációjának(c)
meghatározása refraktometriával:

$$n_1 = n_0 + kc$$

feltétel: $n_1 < n_{\text{mérőprizma}}$



Határszög és a teljes visszaverődés

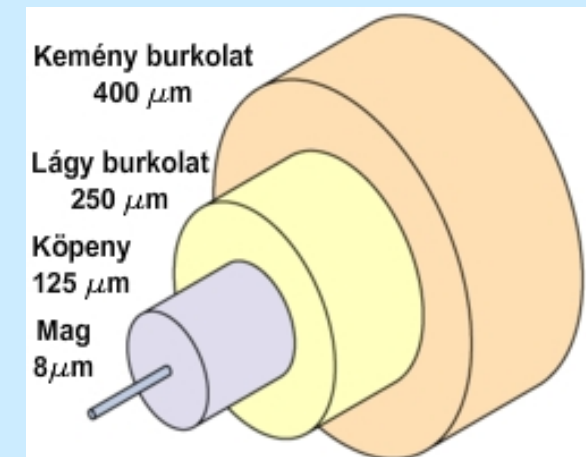
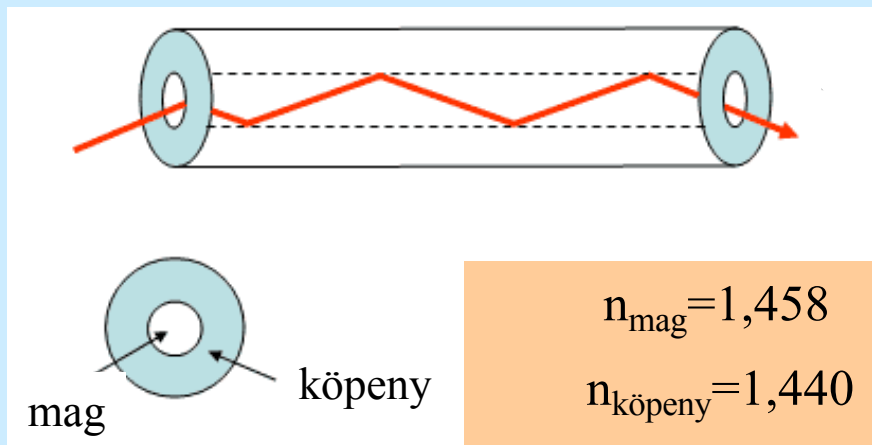


$$\beta > \beta_{\text{határ}}$$

alkalmazás:

optikai szál

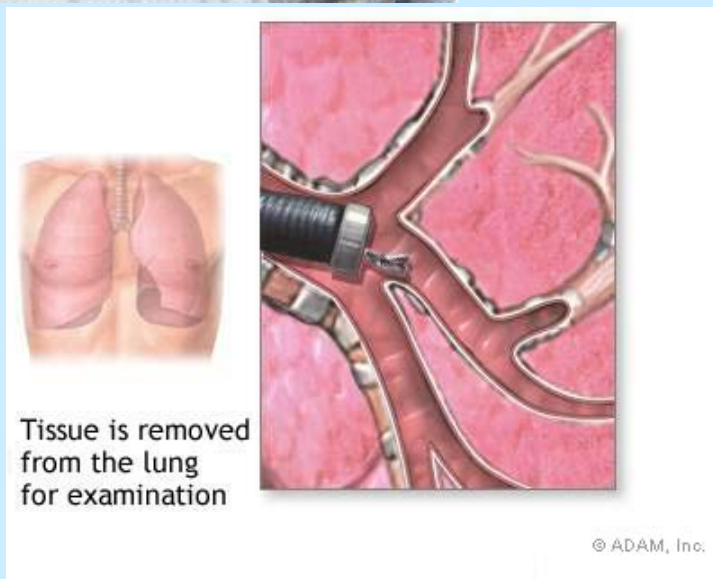
optikai
fényvezetés



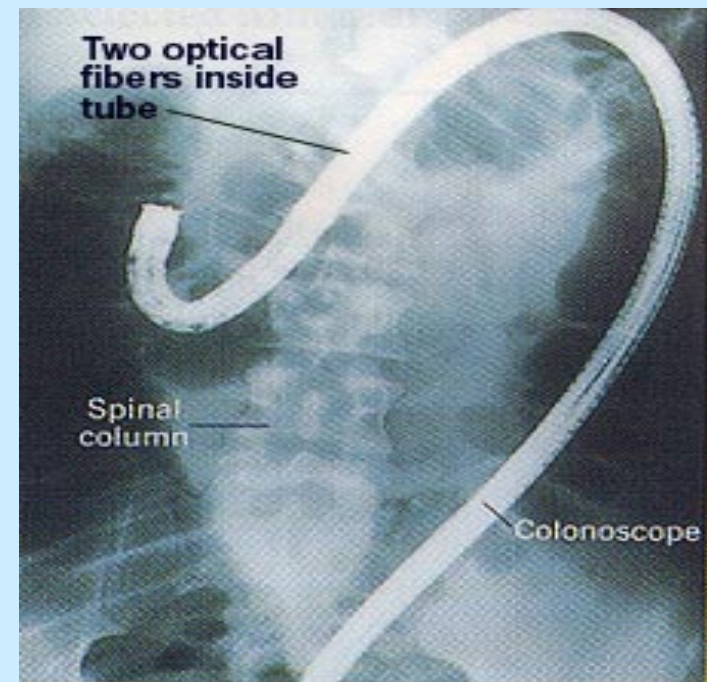


Példák orvosi alkalmazásra:

- diagnosztika: lokális inspekció, biopszia, kontrasztanyag beadás
- terápia: sebészet, vérzéscsillapítás,...

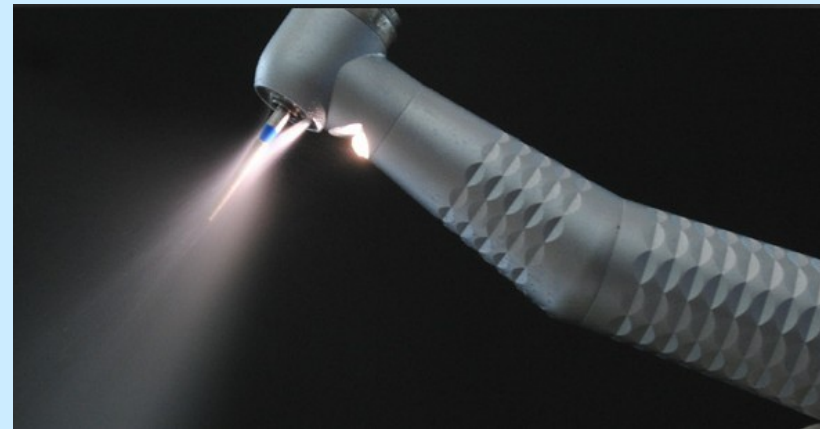


Bronchoszkópia



Colonoszkópia

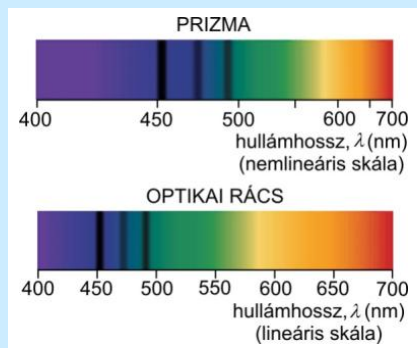
Példák fogorvosi alkalmazásra:



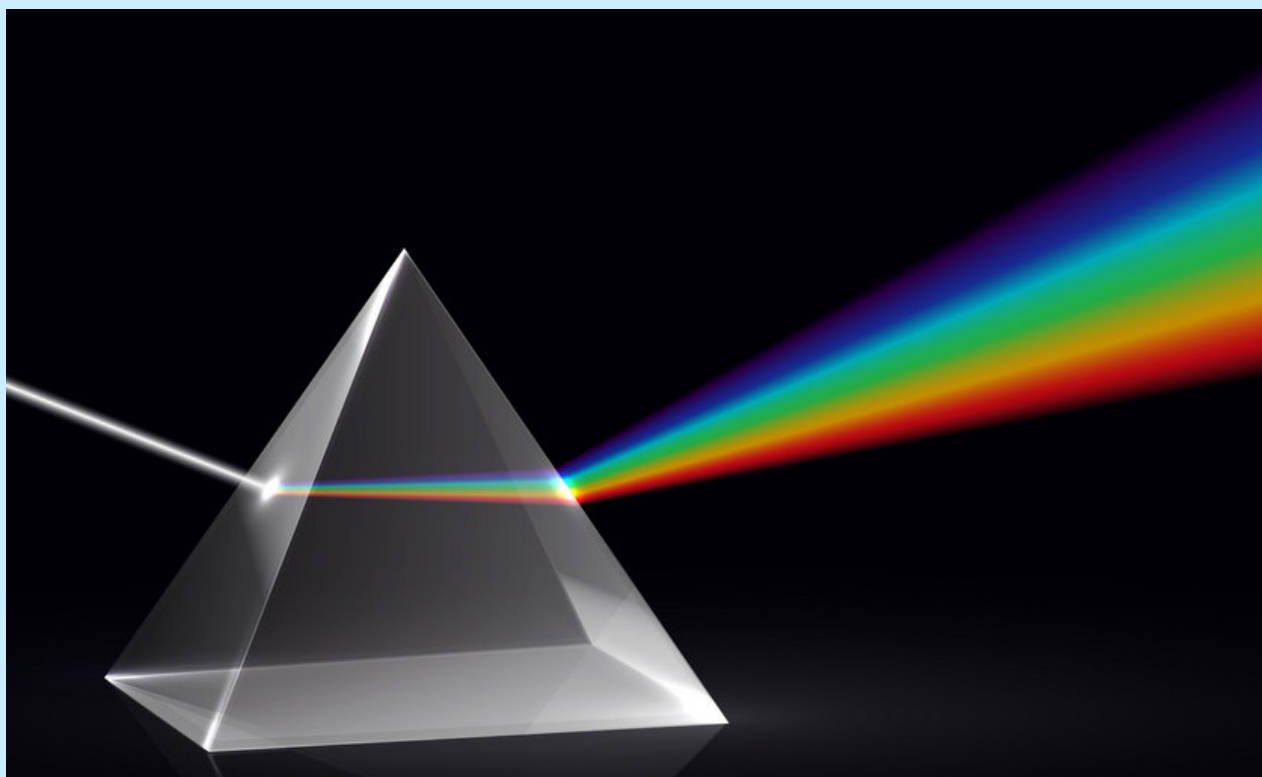
Diszperzió

A törésmutató függ a fény frekvenciájától:
nagyobb frekvencia = nagyobb törésmutató

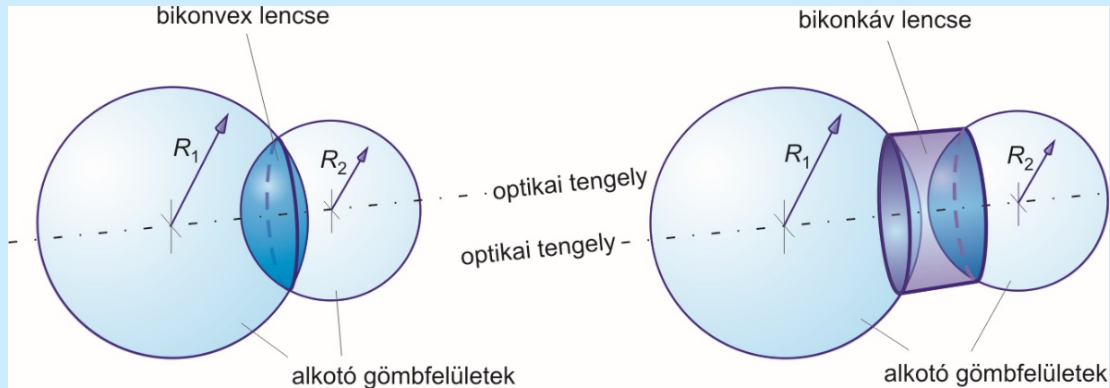
A fehér (kevert) fény prizmával (is) színekre bontható:



a prizmával előállított
színkép nem lineáris,
míg az optikai rács
színképe lineáris

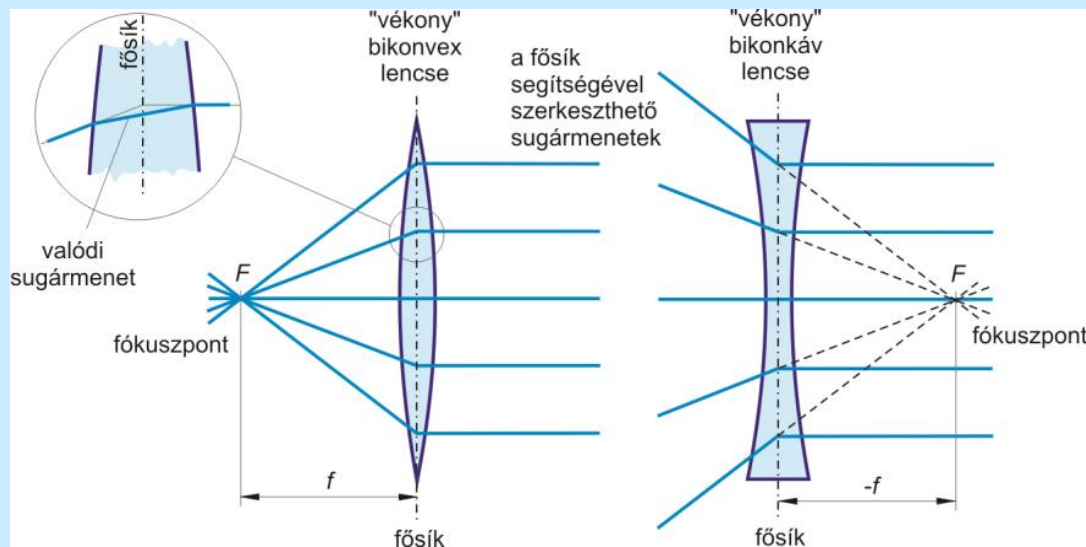


Fénytörés görbült felületen



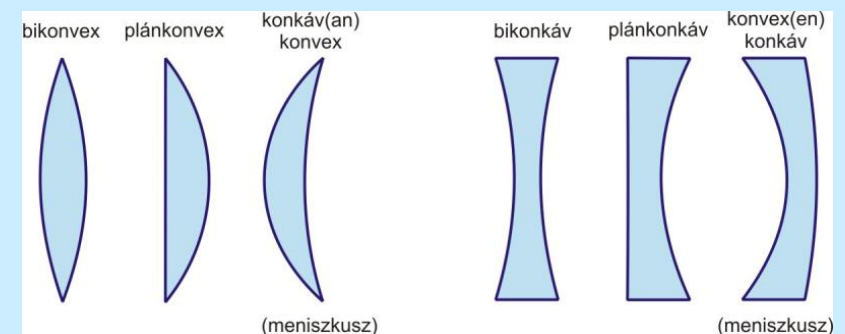
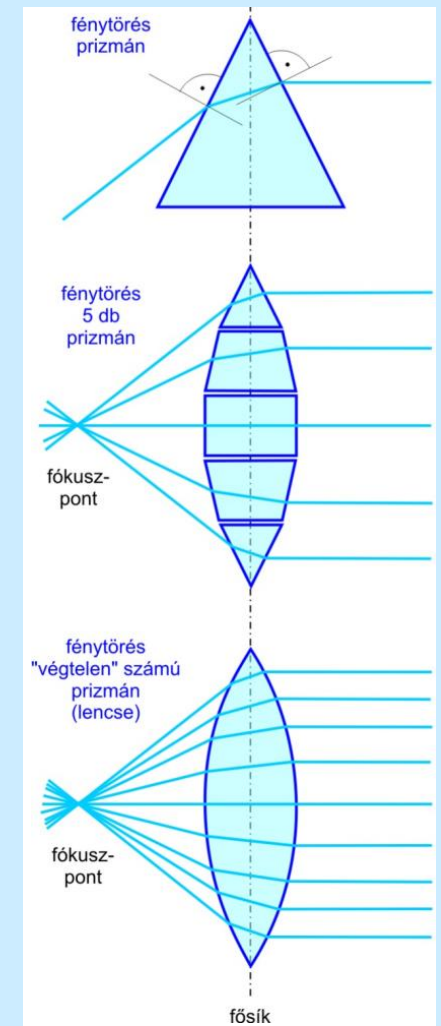
Optikai lencsék származtatása gömbfelületekből

- az optikai tengellyel párhuzamos fénysugarak egy pontban találkoznak (gyűjtőlencse, illetve úgy távolodnak egymástól, mintha egy pontból indulnának ki (szórólencse)
- vékony lencsékre érvényes közelítés: mintha csak a fősíkban történne fénytörés!



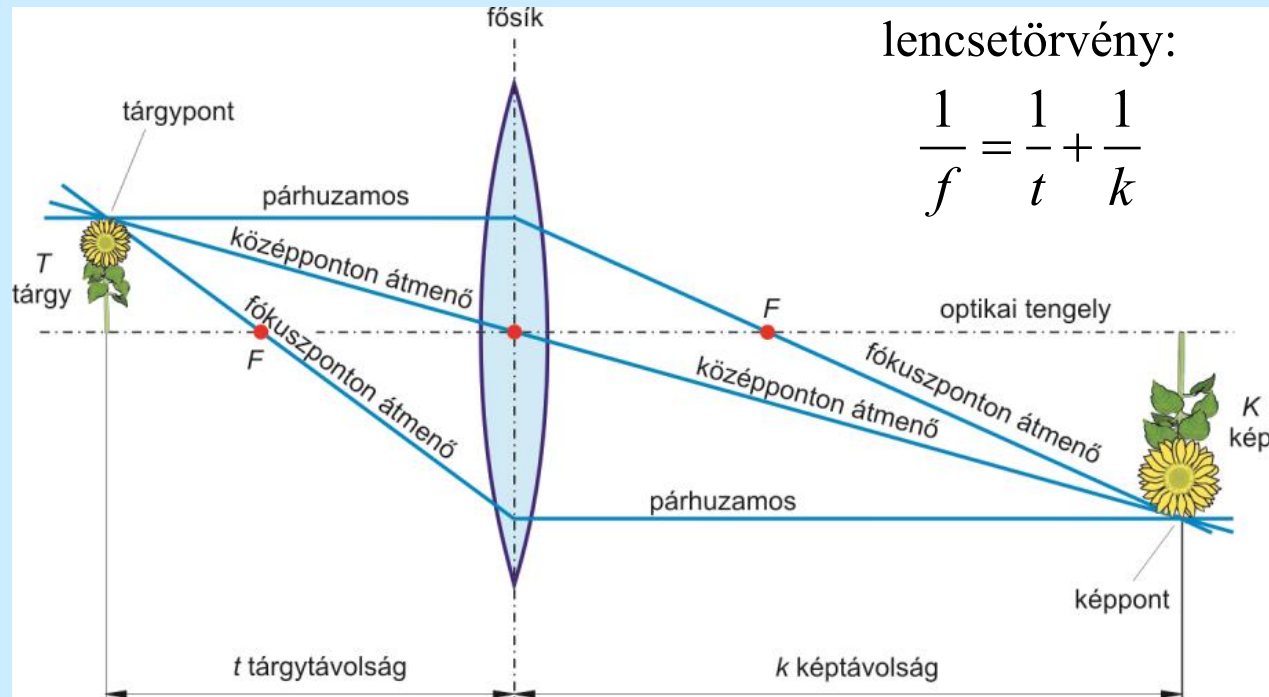
A lencse
törőerőssége
(dioptria, 1/m)

$$D = \frac{1}{f} = (n_{21} - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$



Vékony gömbi lencsék képképzése – nevezetes sugármenetek

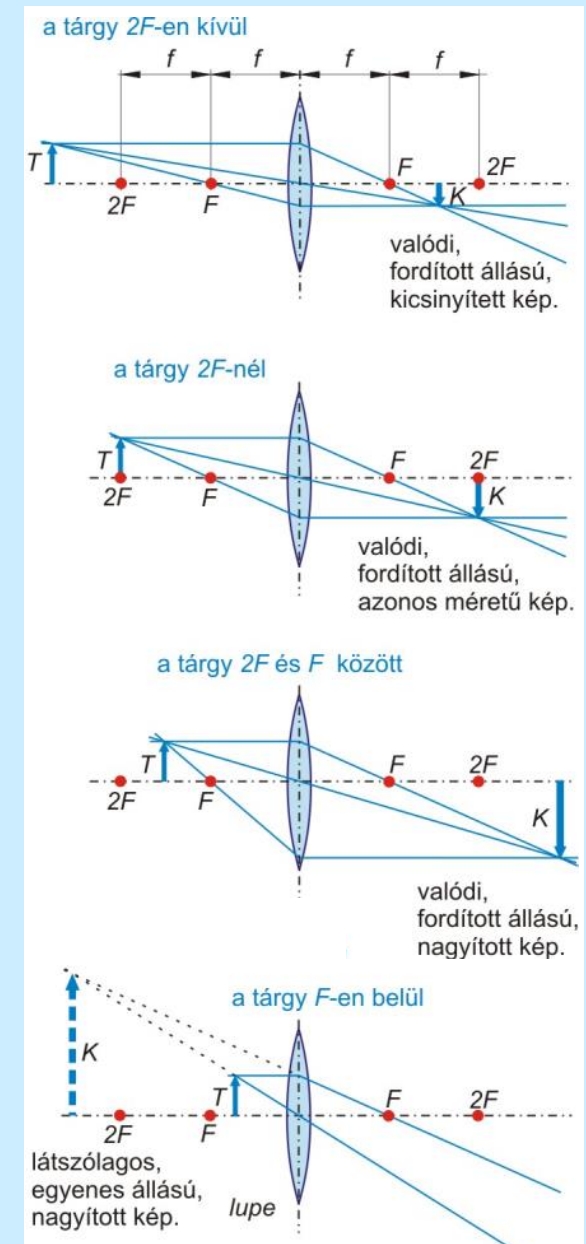
Leképezés: adott pontból kiinduló fénysugarak újra egyesülnek



Lineáris nagyítás: a képméret és a tárgyméret hányadosa

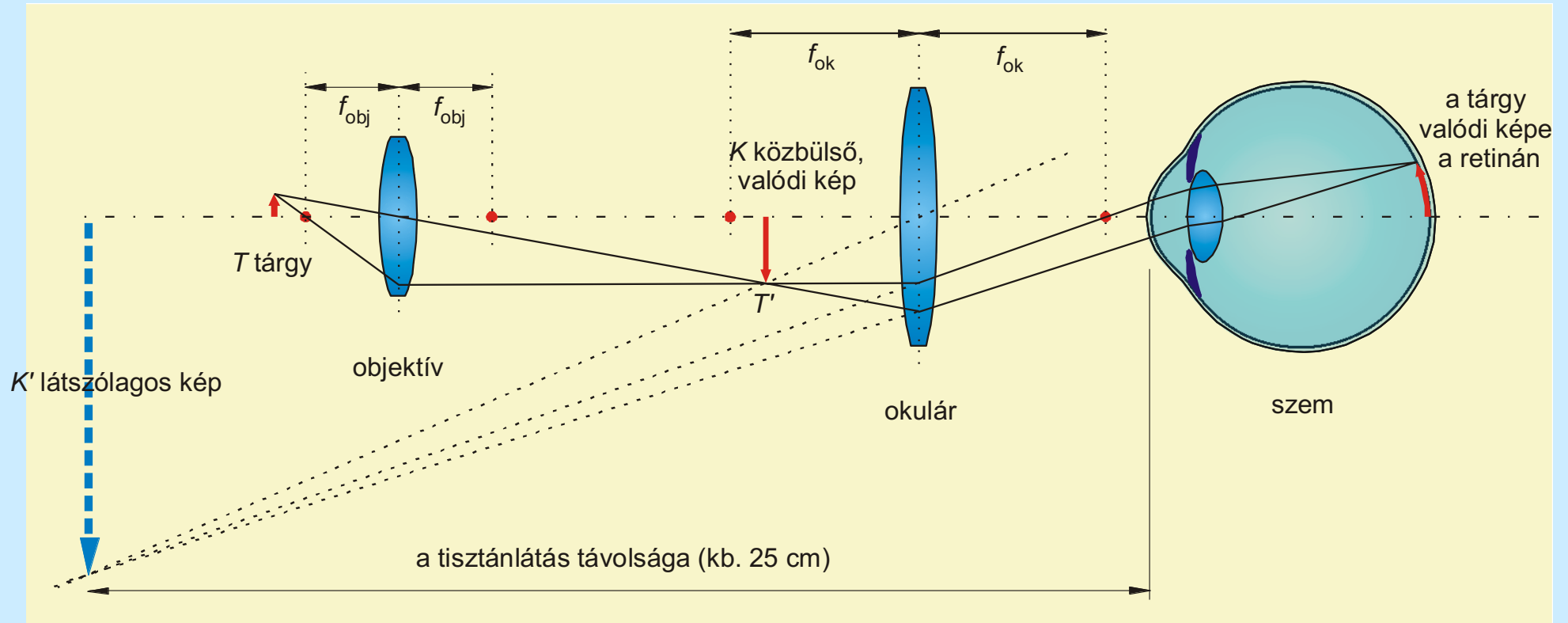
$$N = K / T \quad (= k / t)$$

- valódi kép: kivetíthető, fényérzékelő eszközzel rögzíthető
- látszólagos (virtuális kép): járulékos lencsével leképezhető



A mikroszkópi képzalkotás

- ahogy a geometriai optika látja



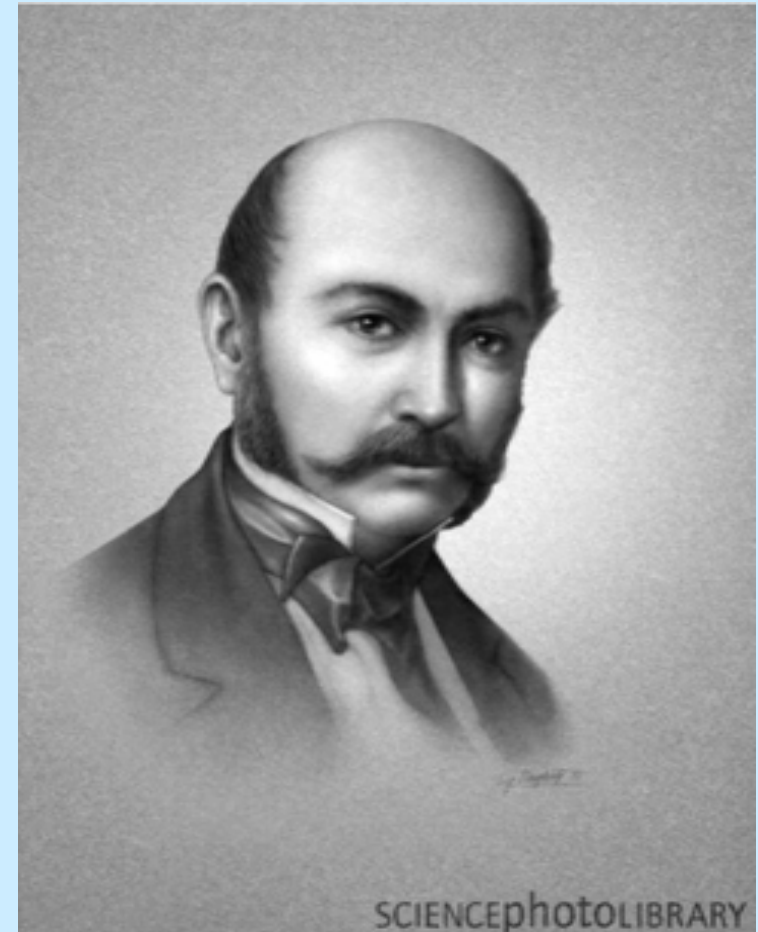
A keletkezett kép nagyított, fordított állású, látszólagos!

$$N = N_1 * N_2 = (T'/T) * (K'/T') = K'/T$$

Meddig növelhető a mikroszkóp nagyítása?



Nagyítás



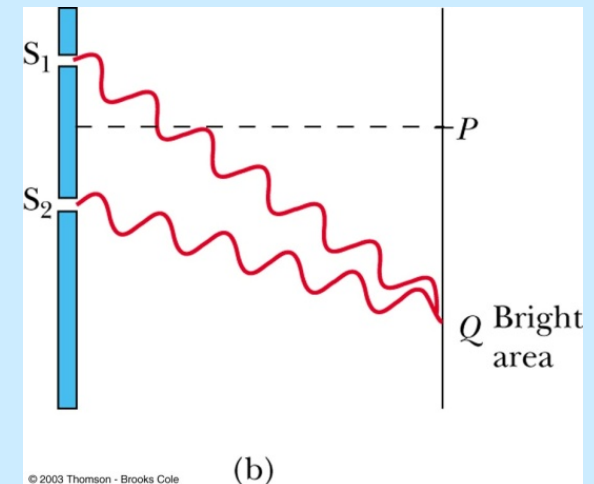
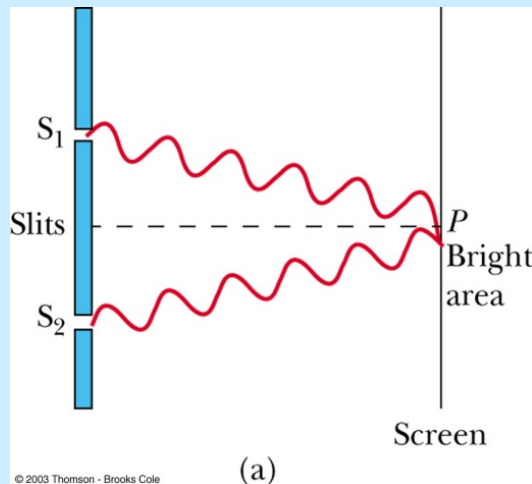
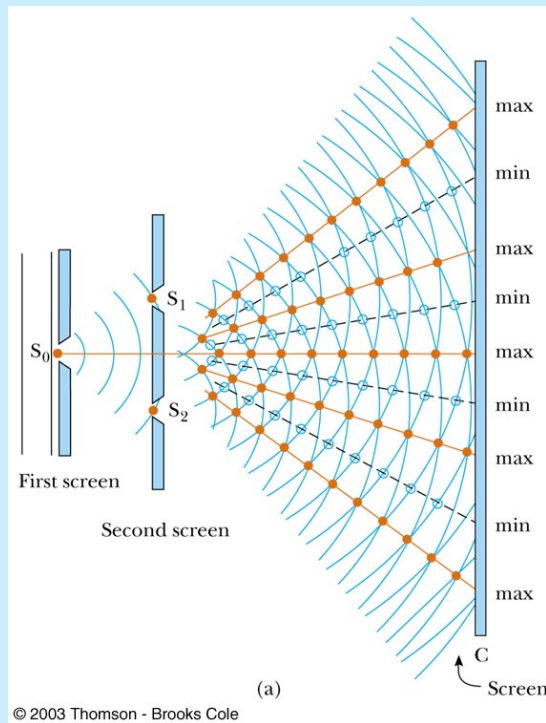
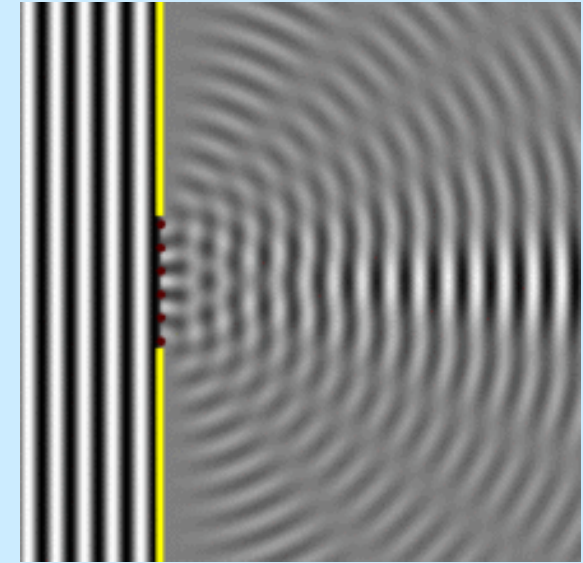
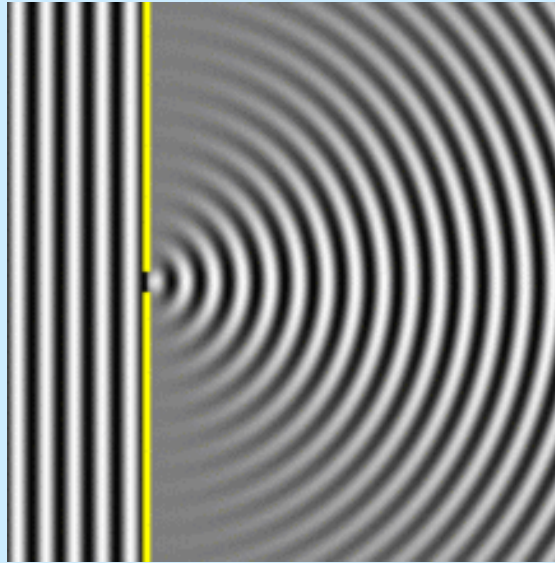
Feloldás

Mi a legkisebb megkülönböztethető részlet mérete a képen?

A mikroszkópi képalkotás

- ahogy a hullámoptika látja

A megvilágító fény
hullámhosszával
összemérhető
tárgyon fényelhajlás
következik be!

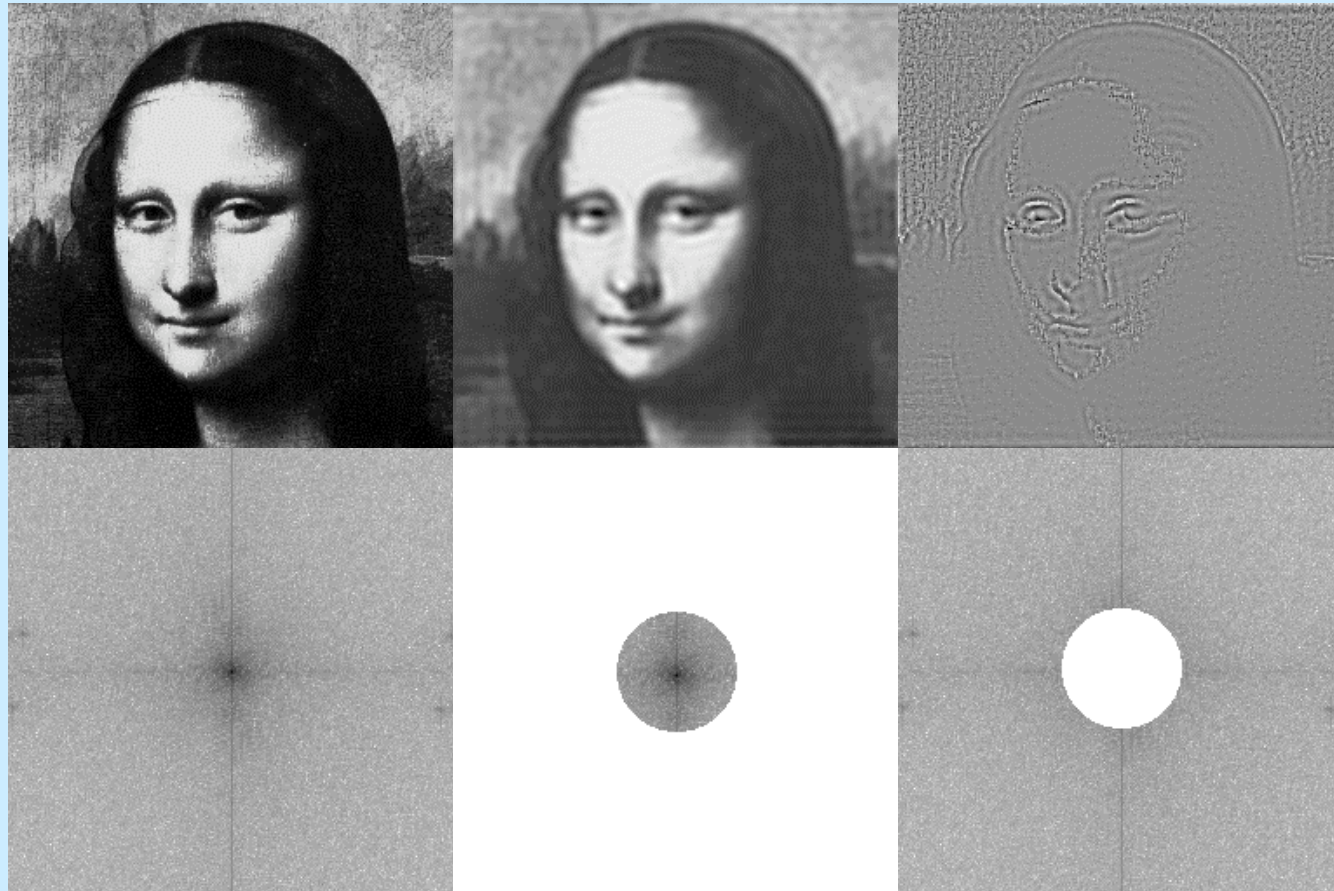


A felbontóképességet a tárgy pontjairól elhajló fény interferencia-mintázata korlátozza.

A mikroszkópi képalkotás hullámoptikai alapjai

Az objektív
képsíkjában
rögzített kép

A kép 2D
diffrakciós
mintázata

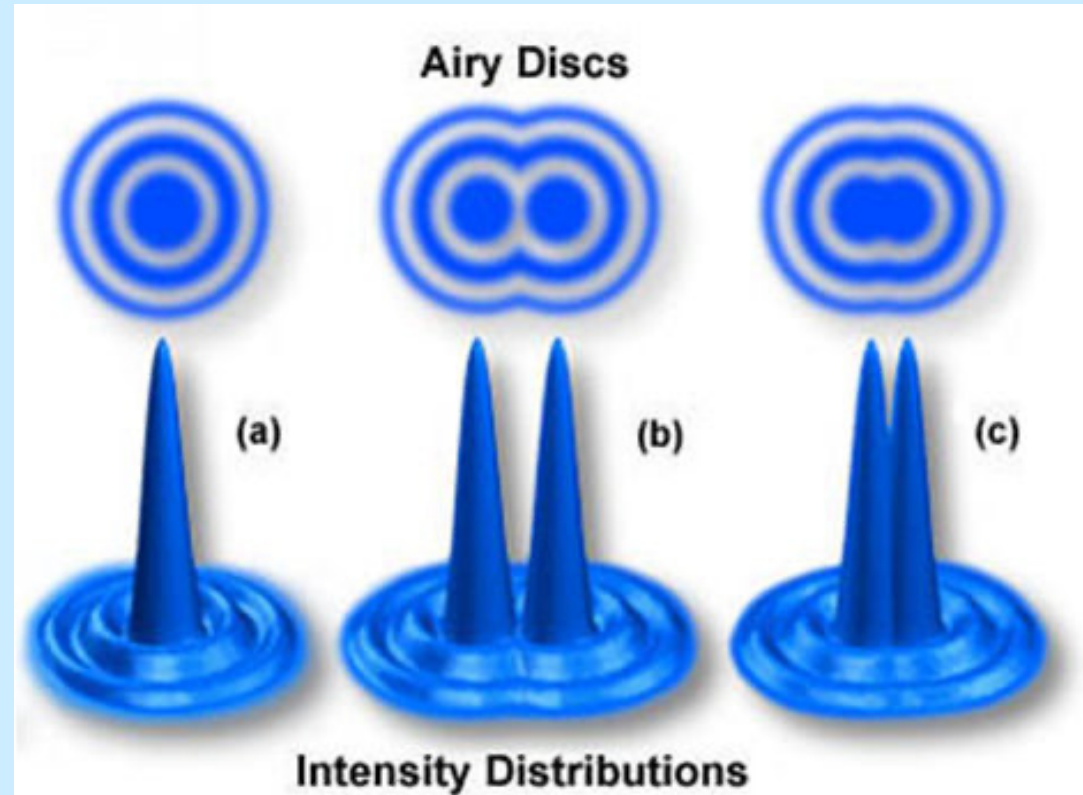
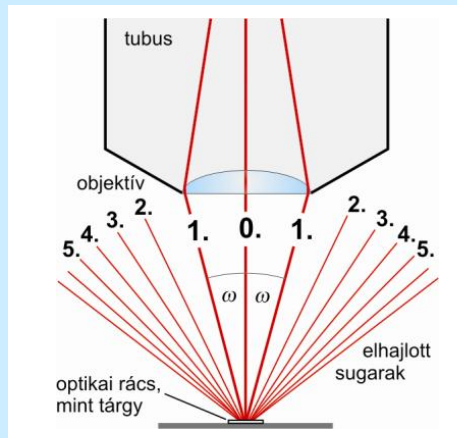
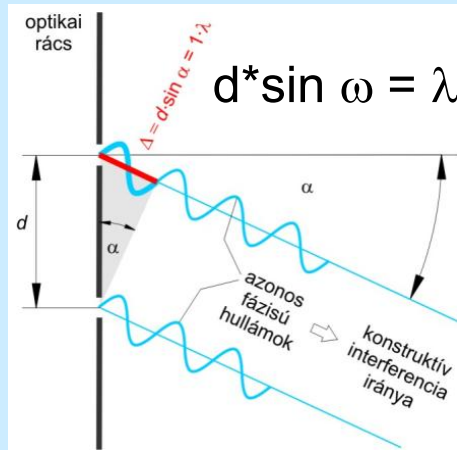


a teljes kép

magasabb rendek
kitakarva

nulladik rend
kitakarva

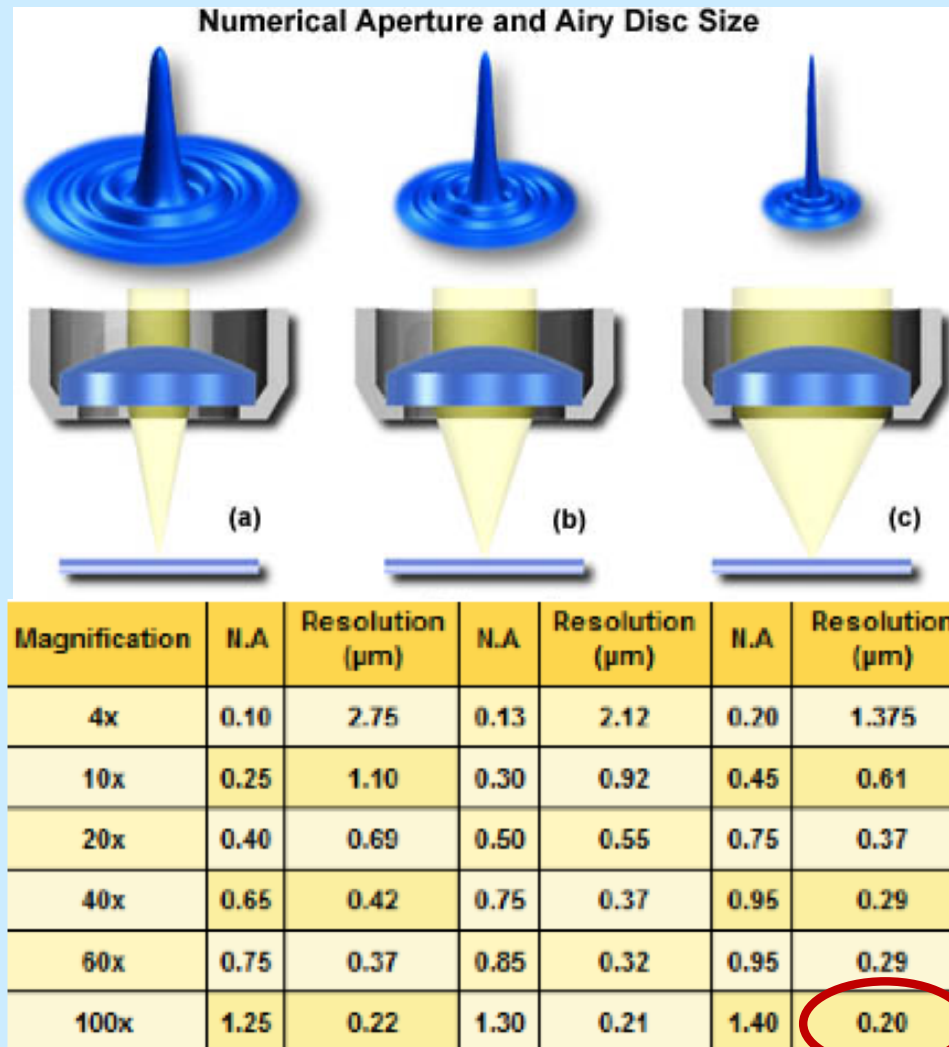
A mikroszkópi képalkotás hullámoptikai alapjai



$$d = 0,61 * \lambda / (n * \sin \omega) = 0,61 * \lambda / NA$$

Abbe elv: a képalkotáshoz legalább az első rendben elhajlott sugaraknak be kell jutniuk az objektívbe! A lencse felbontóképességét a megvilágító fény hullámhossza és az objektív numerikus apertúrája (félnyílásszöge) határozza meg.

A mikroszkópi képalkotás hullámoptikai alapjai

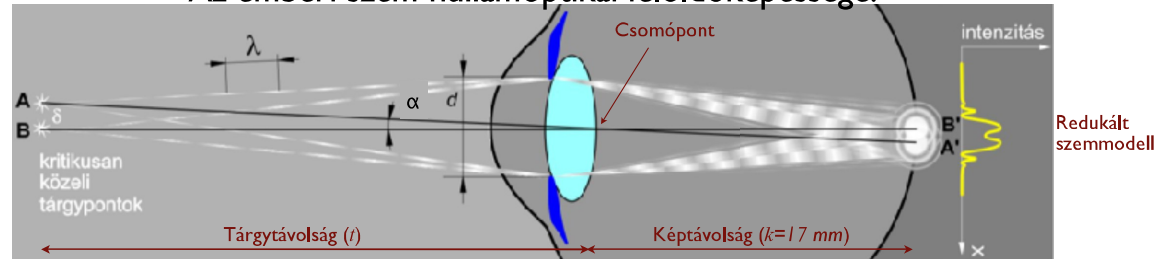


Kék fény és nagy numerikus apertúrájú (drága) objektív felbontóképessége sem haladja meg a **200 nm**-et! Ennél kisebb részleteket hagyományos mikroszkópban nem láthatunk!



Az emberi szem képkalkotása

Az emberi szem hullámoptikai feloldóképessége:



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'

Tárgy	Receptorokra eső kép	Látásérzet

feloldóképesség biológiai korlátja: a receptorsejtek sűrűsége

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

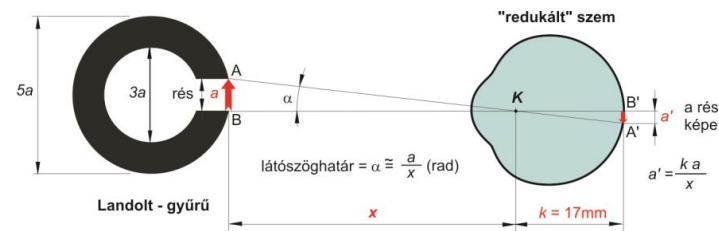
Látásélesség (*visus*, "Visual Acuity", VA):

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

α = kísérleti (mért) látószöghatár

Normál látószöghatár egészséges emberben:
1' (=100% *visus*)

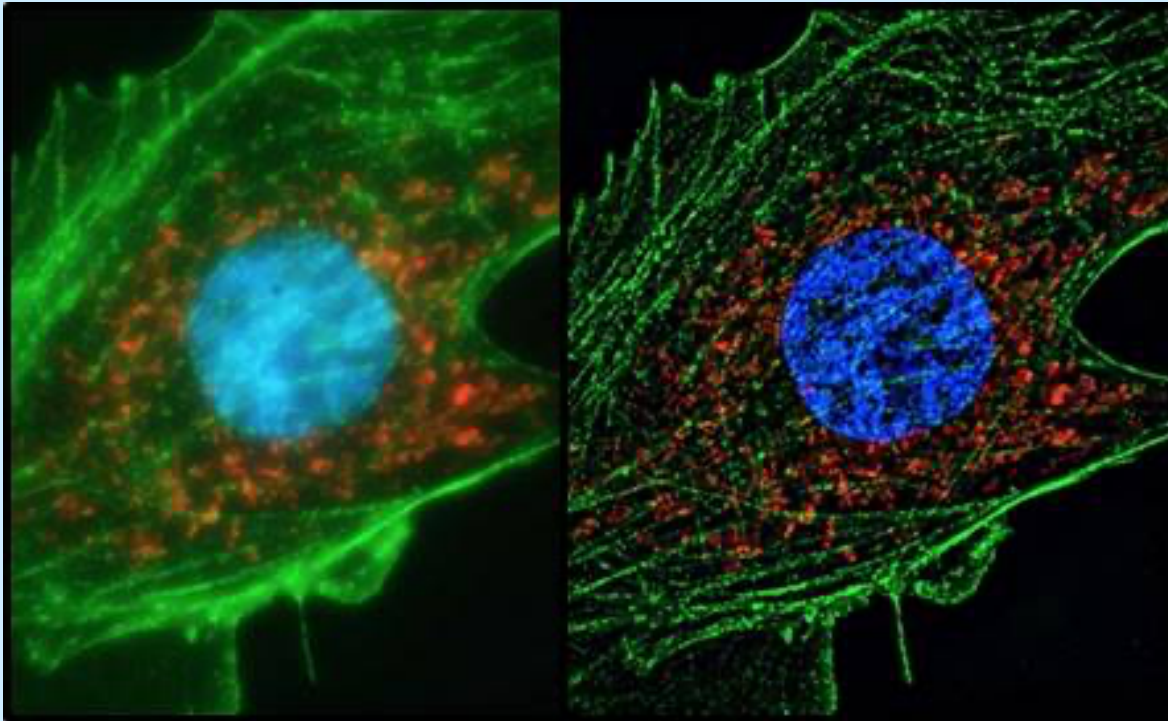
Látásélesség mérése



Megkerülhető-e az Abbe képlet?

Szuper-rezolúciós mikroszkópiák...

(5 hét múlva ☺)



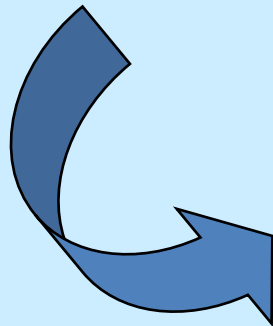
Megkerülhető-e az Abbe képlet?

$$d = 0,61 \frac{\lambda}{n \sin \Theta}$$

Fény - feloldási határ ~ 200 nm

Feloldási határ csökkentése \rightarrow rövidebb
hullámhossz \rightarrow elektronhullám?!

$$\lambda = h / m_e v$$



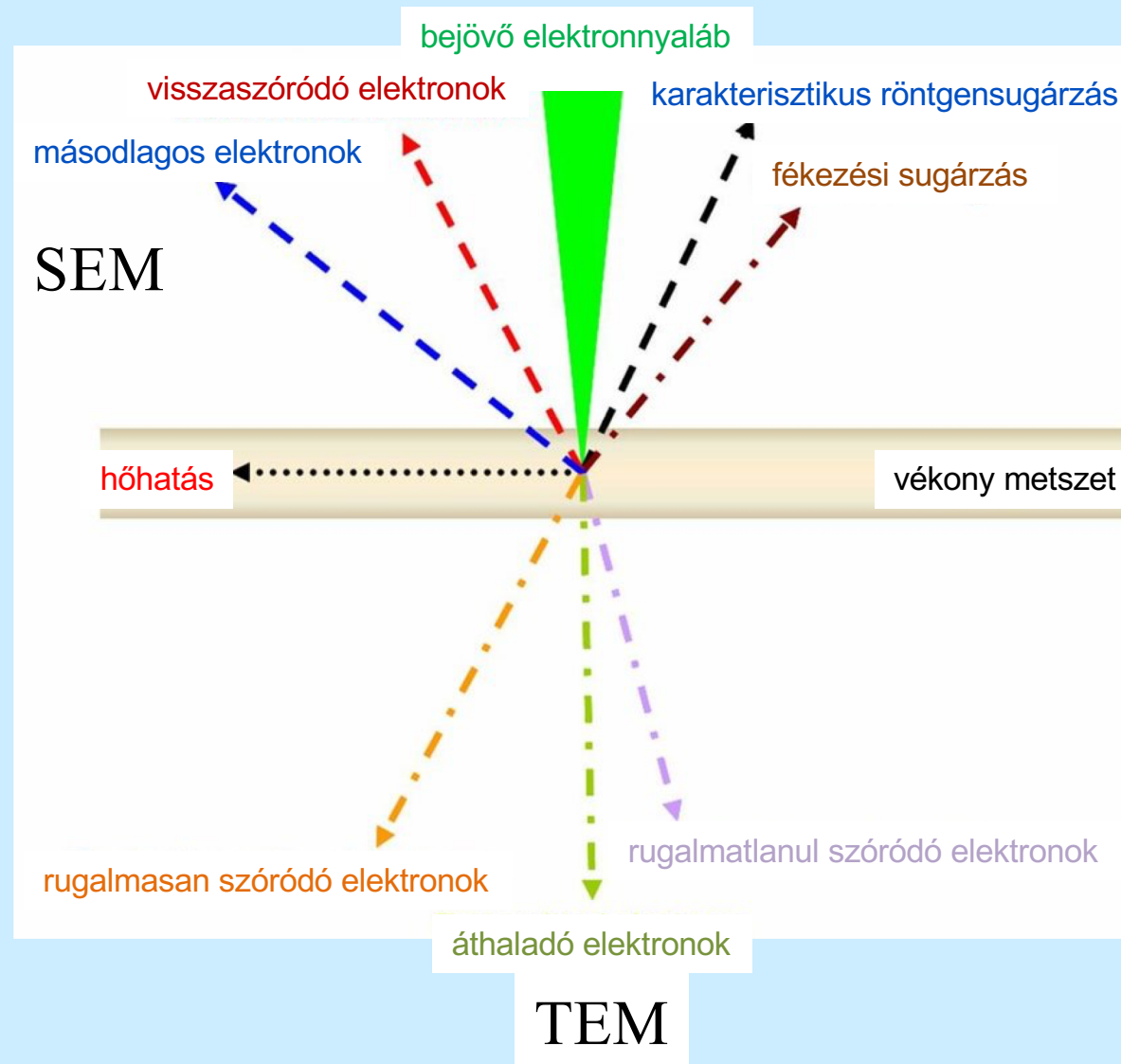
$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$$

$$U = 100 \text{ kV}$$

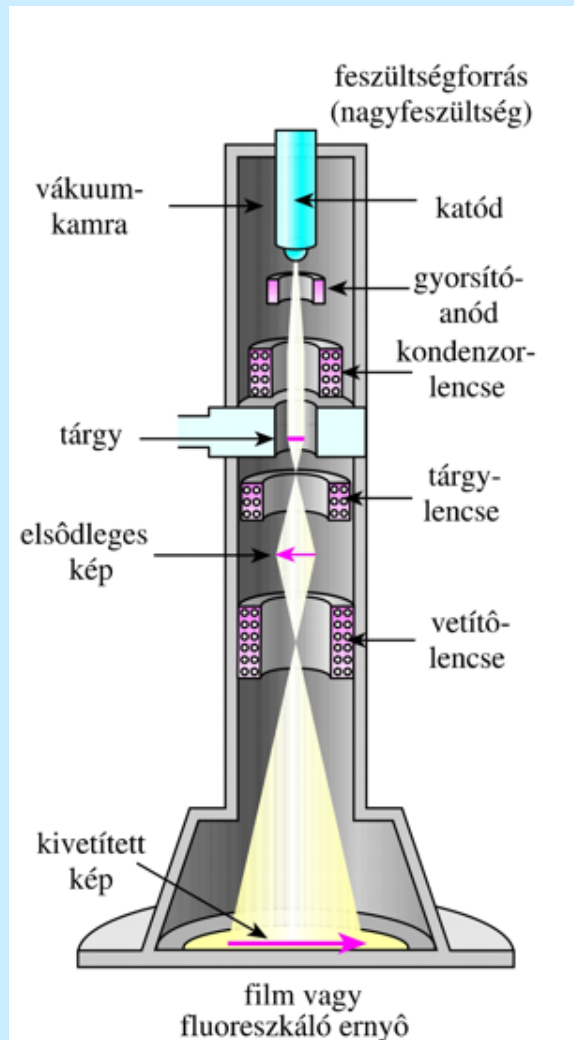
$$\rightarrow \lambda \sim 2 \text{ pm}$$

\rightarrow építsünk elektronmikroszkópot!

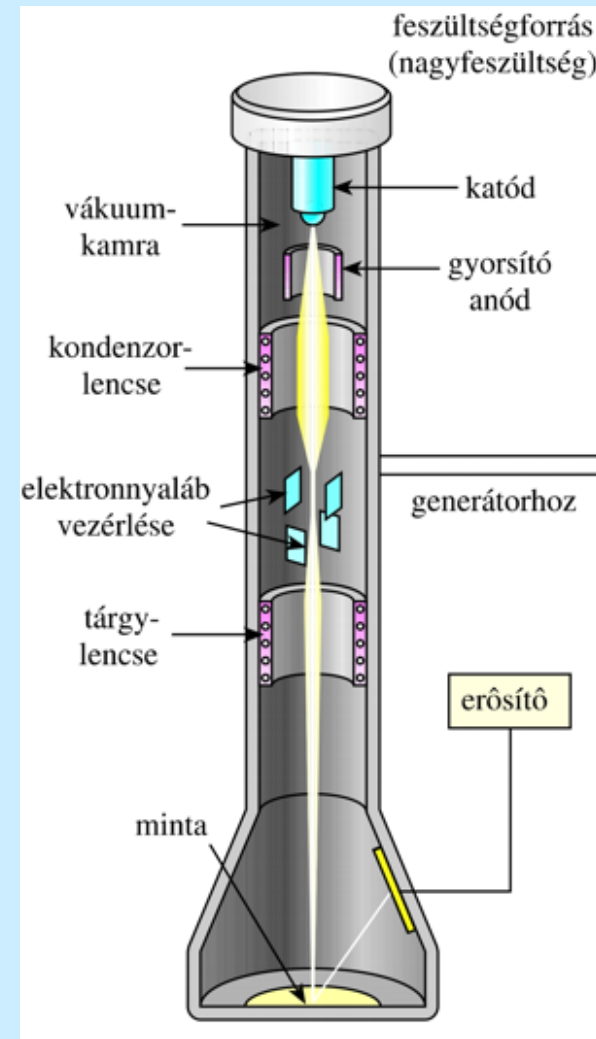
Az elektronnyaláb kölcsönhatása a mintával



Az elektronmikroszkóp felépítése

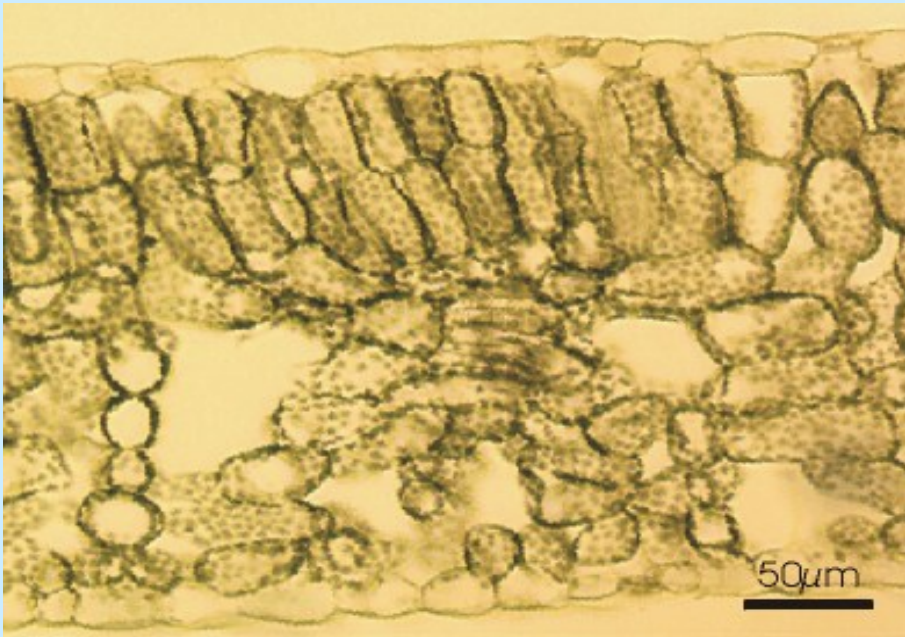


Transzmissziós elektronmikroszkóp
TEM

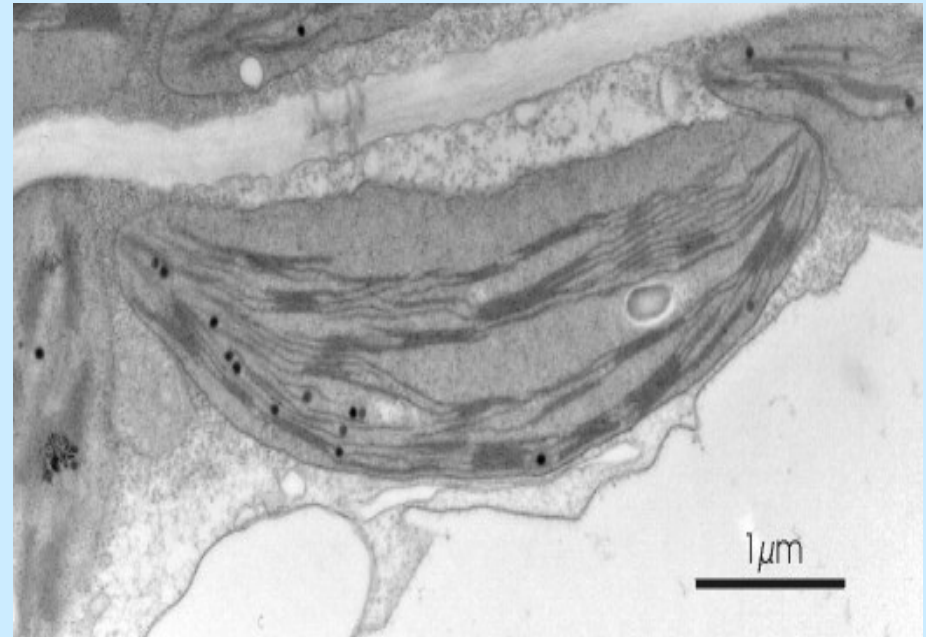


Pásztózó elektronmikroszkóp
SEM

Fénymikroszkóp vs Elektronmikroszkóp



Spenótleveél metszete
fénymikroszkópban



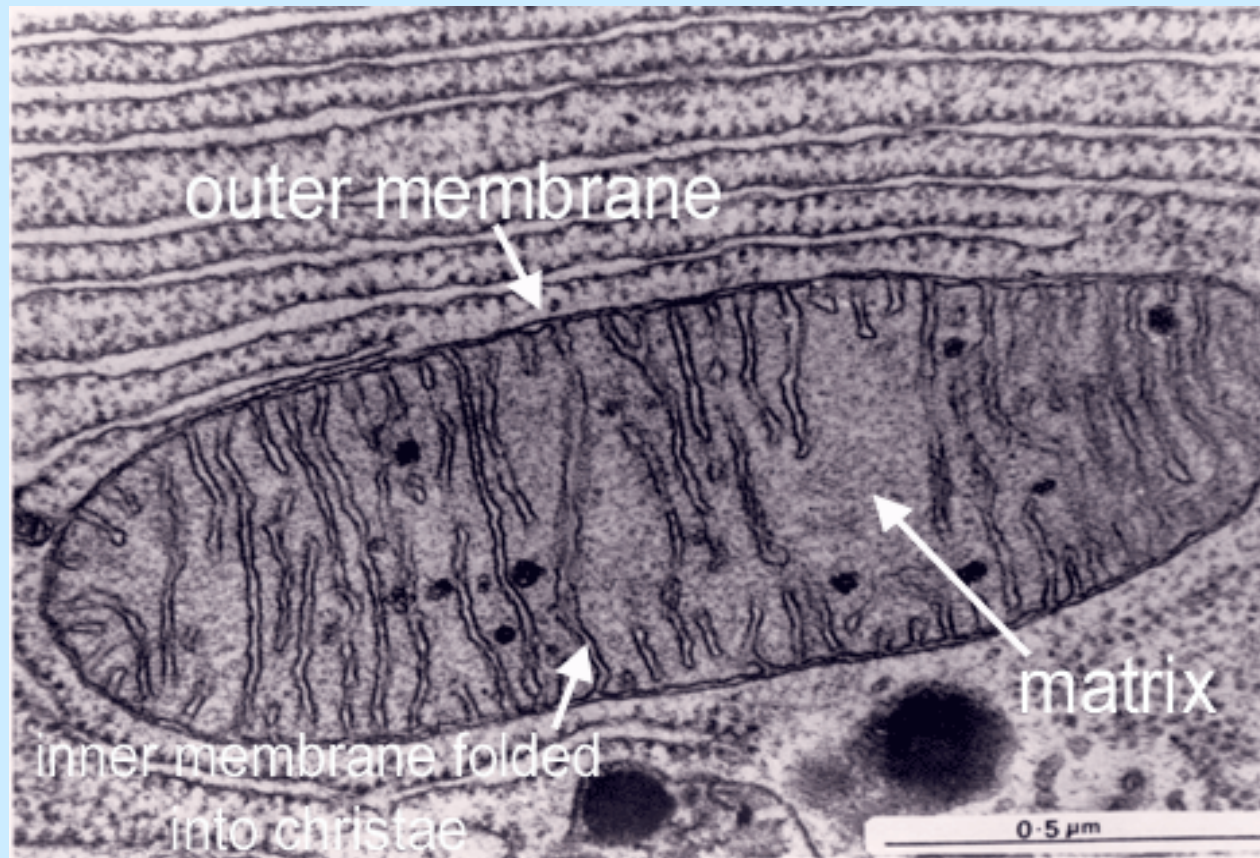
Spenótleveél színtestek, TEM,
ultravékony metszet

Felbontási határ

$\lambda \sim 400 \text{ nm}$
 $d = 0,61 \cdot \lambda / \text{NA}$
 $\text{NA} \sim 1,54$
 $d \sim 200 \text{ nm}$

$\lambda \sim 2 \text{ pm}$
 $d = \lambda / \text{NA}$
 $\text{NA} \sim 0,01$
 $d \sim 0,2\text{-}0,5 \text{ nm}$

TEM



Mitokondrium és endoplazmatikus retikulum

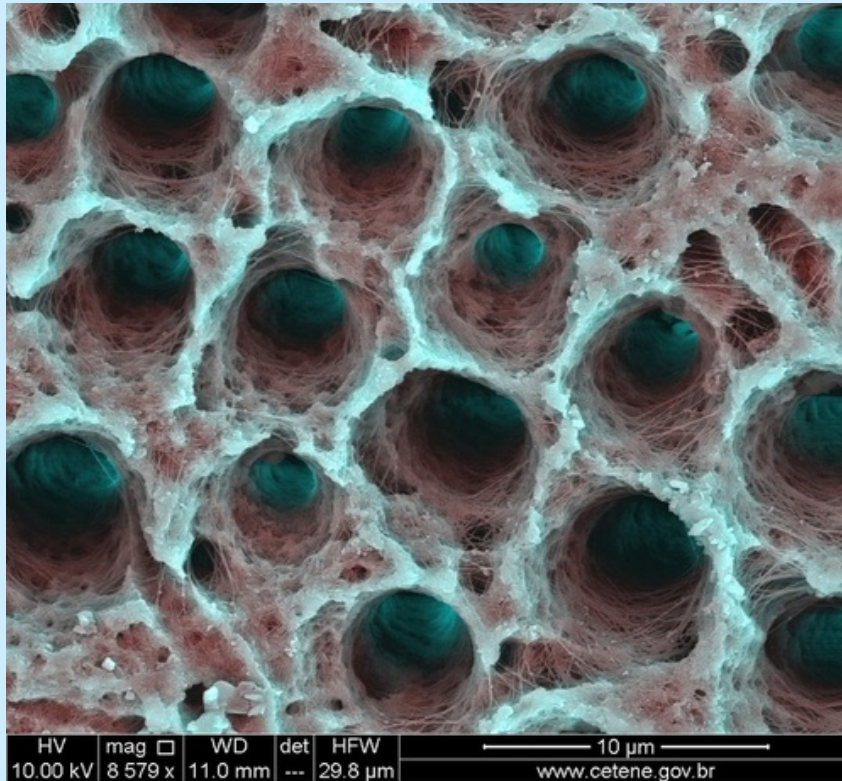


SEM

baktériumok fogkövön

Nagyítás: 30000X





A nap kérdése ☺

A képen a dentin csatornák elektronmikroszkópos képe látszik. Milyen technikával készülhetett a felvétel?

(SEM vagy TEM)?

Ellenőrző kérdések:

Snellius – Descartes törvény

Fermat elv

határszög – teljes visszaverődés

fehér fény felbontása prizmával

vékony gömbi lencsék képalkotása – nevezetes sugármenetek

lencsetörvény, dioptria

fénymikroszkóp képalkotása

fénymikroszkóp feloldási határa – Abbe elv, Abbe formula

elektronmikroszkópok

az elektronnyaláb hullámhossza

Kapcsolódó fejezetek:

Damjanovich, Fidy, Szöllősi: Orvosi Biofizika

I.1.

1.1.2

1.1.3

II. 1.1.

1.1.1

II. 2. 1.

2.1.1

2.1.2

2.1.3

2.1.4

2.1.5

2.1.8

VI. 2.

2.1.

2.2.

X.5.