

A fény mint hullám és részecske

Orvosi Biofizika I. 2026. szeptember 29.

Kellermayer Miklós

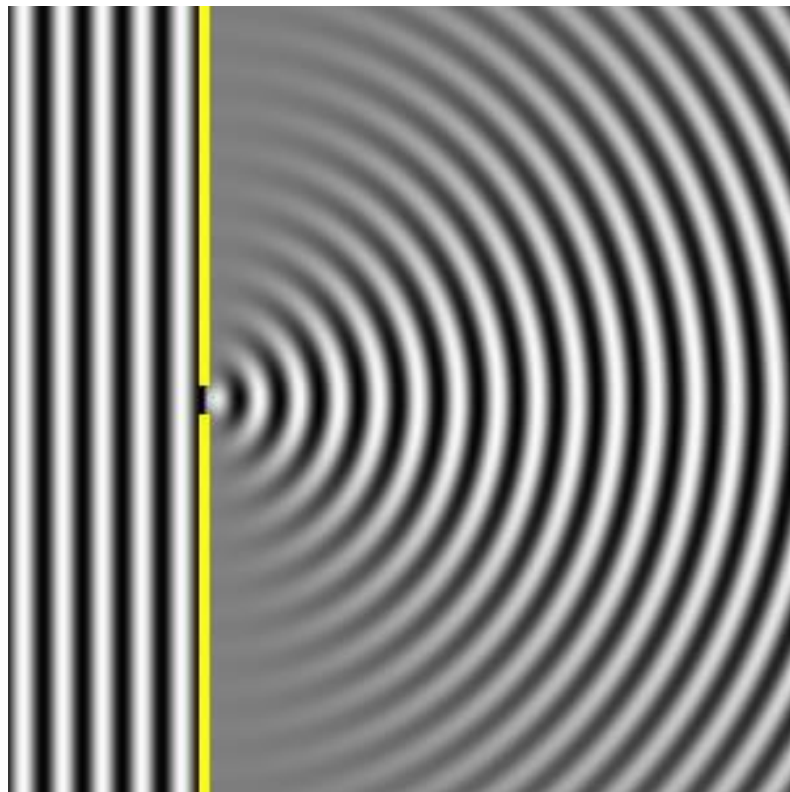
Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet



SEMMELWEIS
EGYETEM 1769

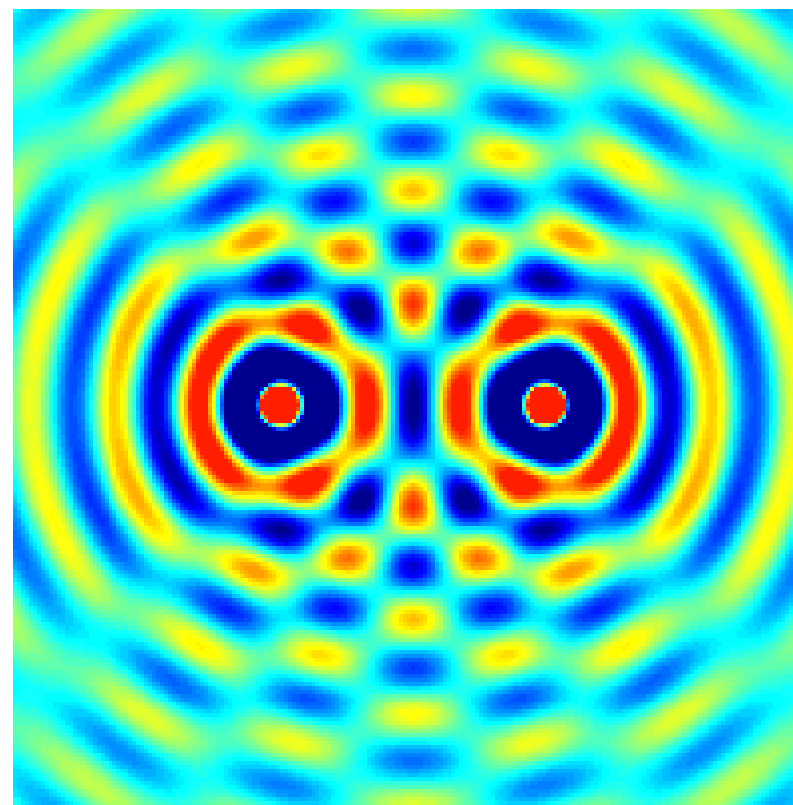
Fény mint hullám: “hullámjelenségeket” mutat

Diffrakció
(elhajlás)



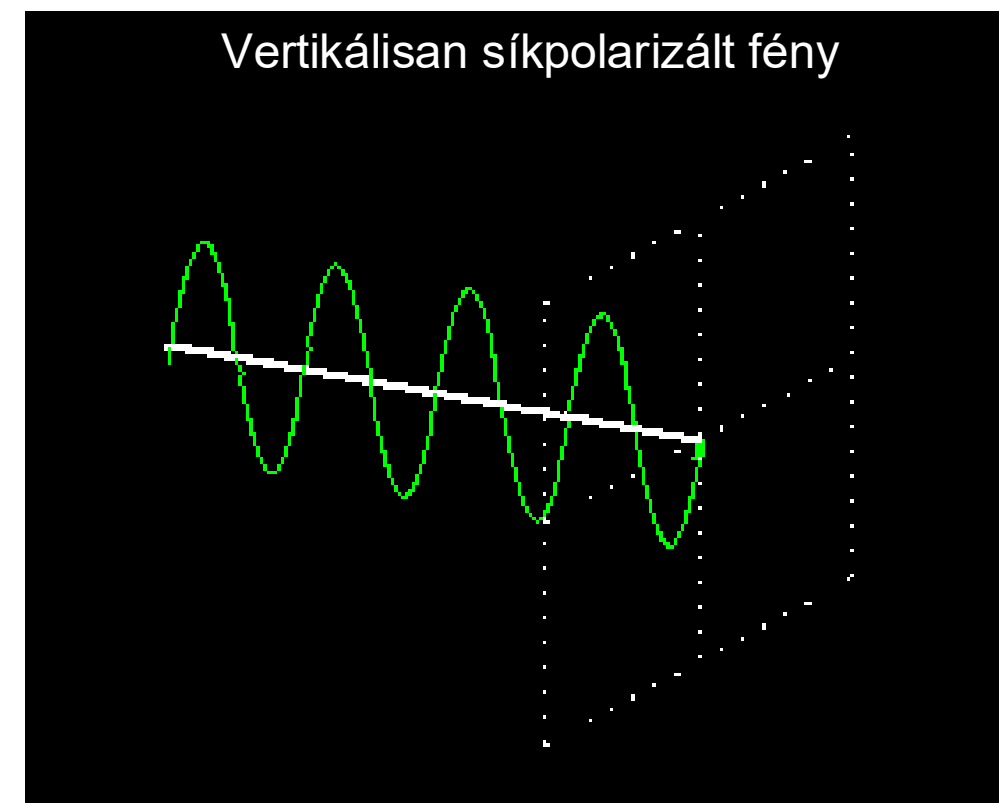
A fény nem várt
helyekre “hajlik”

Interferencia



Kis és nagy amplitudójú
területek tér- és időbeli
mintázata

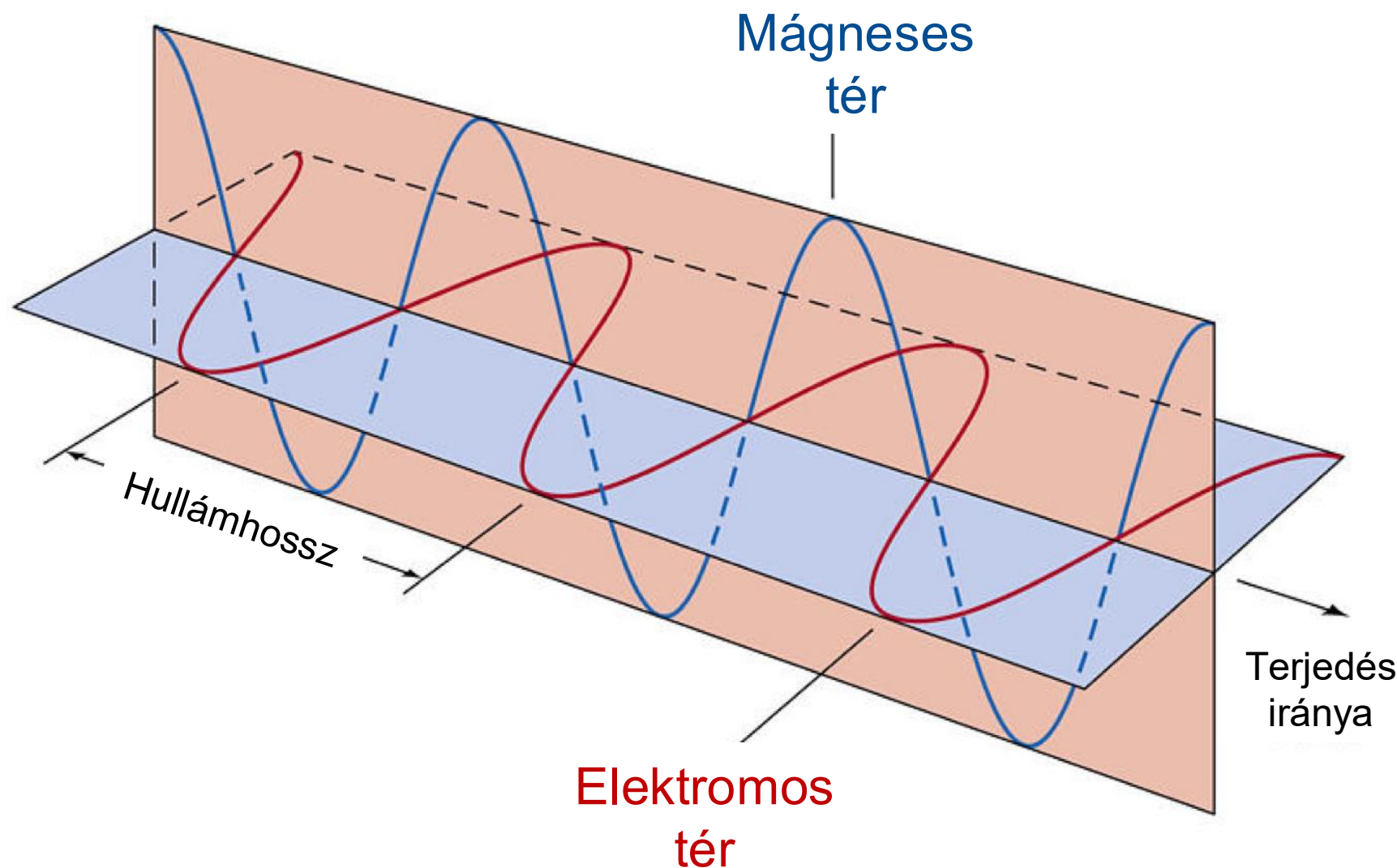
Polarizáció



A rezgés kitüntetett
irányban történik

A fény: elektromágneses hullám

Térben tovaterjedő elektromágneses zavar.
Rugalmas közeg nem szükséges a terjedéséhez.



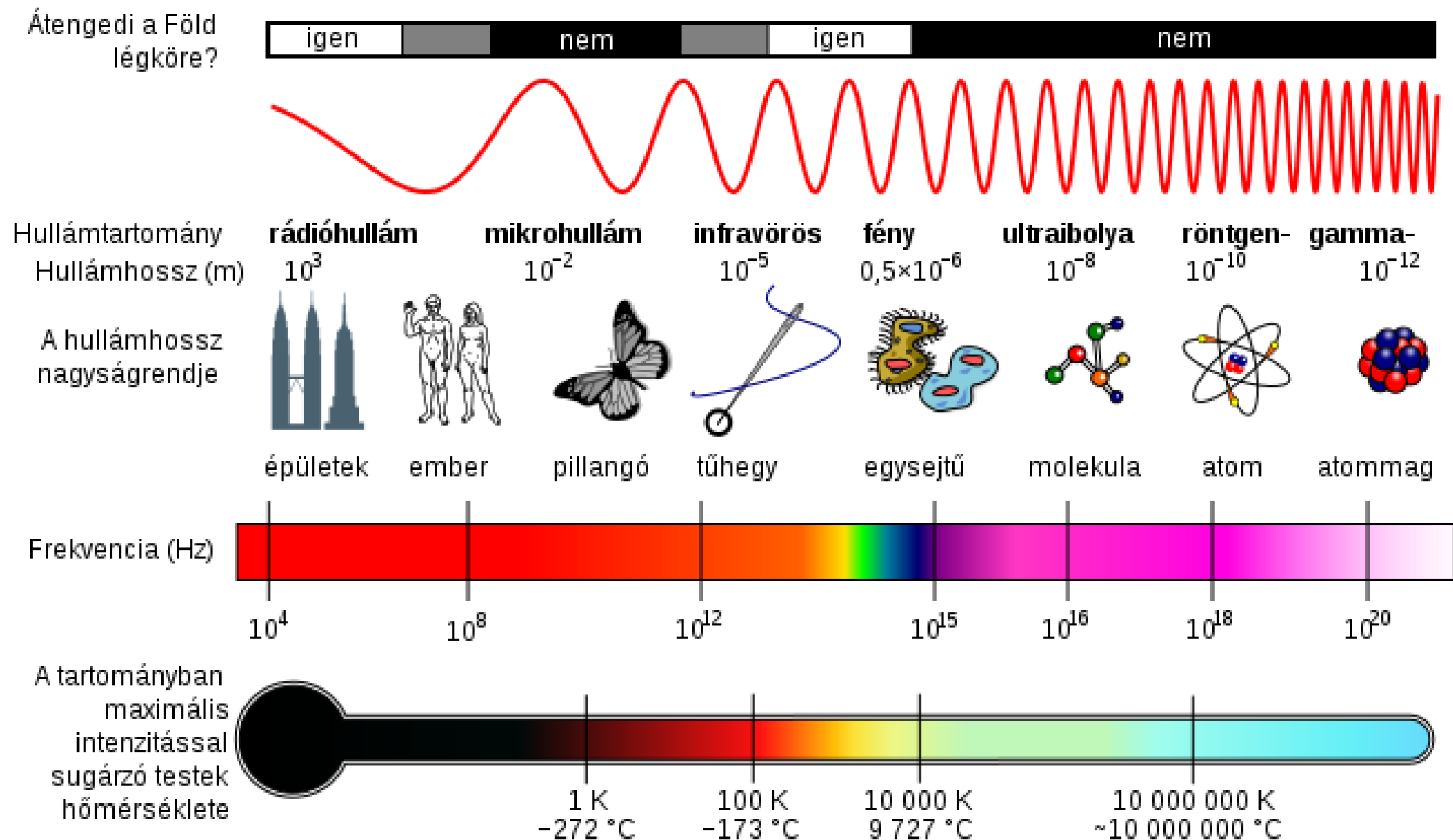
James Clerk Maxwell
(1831-1879)

Terjedési sebessége:

$$c = \lambda f$$

$$c_{\text{vákuum}} = 2,99792458 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

Az elektromágneses spektrum



- N.B.: 1) "spektrum" = függvény (EM sugárzás intenzitása az energia függvényében)
 2) "elektromágneses spektrum" = sugárzás fajtái az energia függvényében

Mi történik, ha egy testet fénnnyel világítunk meg?

Fotoelektromos hatás: Megfigyelés

Hallwachs-effektus:

UV fény hatására negatív töltések távoznak a megvilágított fémfelületről

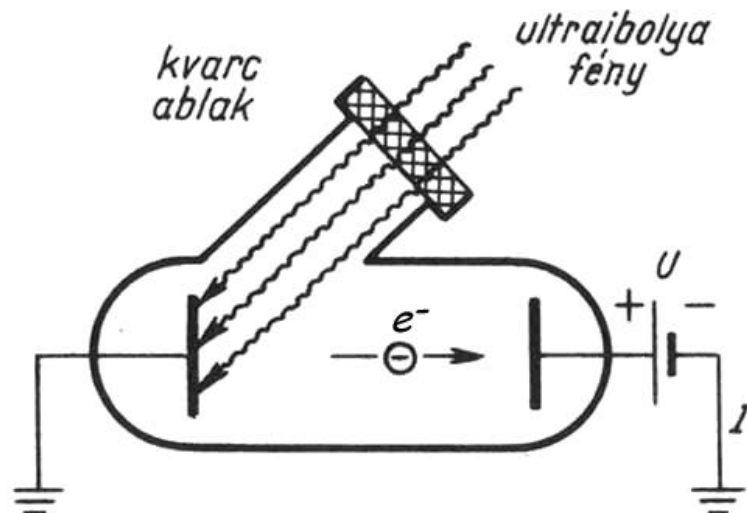
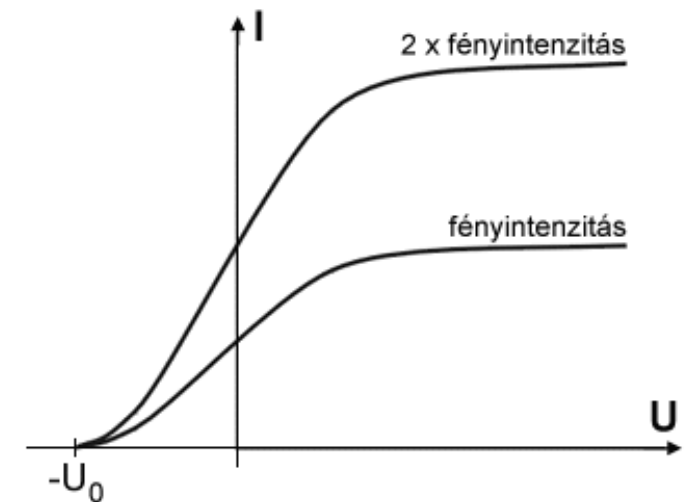


Wilhelm Hallwachs
(1859-1922)

Mérések, megállapítások



Philipp
Lenard/Lénárd
Fülöp
(1862-1947)



- Elektron emisszió: besugárzást azonnal követi
- Elektron emisszió csak nagyfrekvenciájú (pl. kék, UV) fényben
- Nincs elektron emisszió alacsony frekvenciájú (pl. vörös) fényben
- Fotoelektromos áram: fényintenzitás függvénye
- Fotoelektromos áram: nem függ a fény színétől

Fotoelektromos hatás:

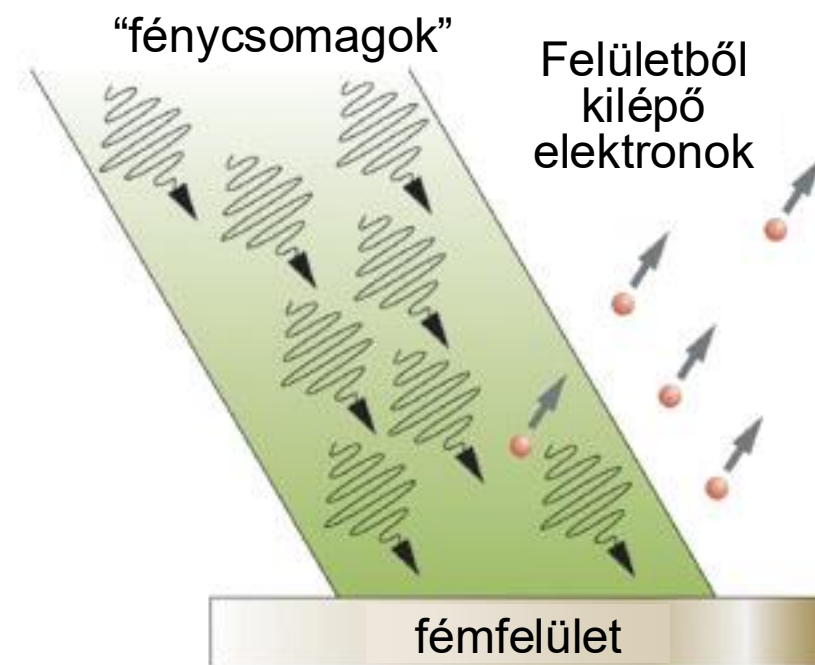
Magyarázat

1905: “Annus mirabilis”

- fotoelektromos hatás
- diffúzió
- speciális relativitáselmélet



Albert Einstein
(1879-1955)



$$E_{kin} = hf - W_{ex}$$

E_{kin} = kilépő elektron mozgási energiája
 h = Planck állandó ($6.62 \cdot 10^{-34}$ Js)
 f = frekvencia
 hf = fényenergia = fény kvantum, “**foton**”
 W_{ex} = kilépési munka

Foton:

- fénysebességgel (c) terjed vákuumban
- impulzus rendelhető hozzá
- nyugalmi tömege 0.

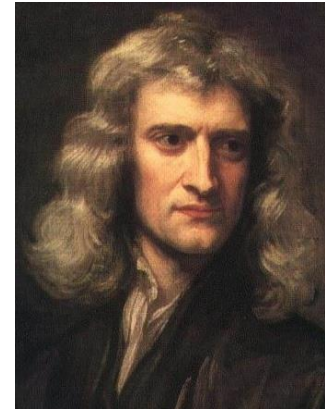
A fény egyszerre hullám és részecske



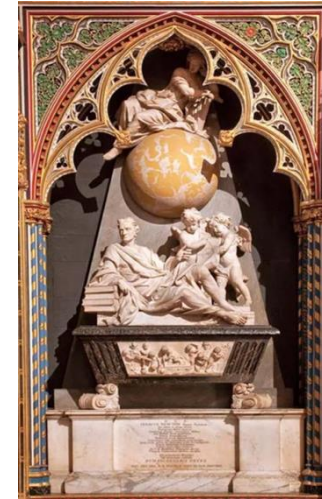
Grote Kerk church,
The Hague



Christiaan Huygens
(1629-1695)

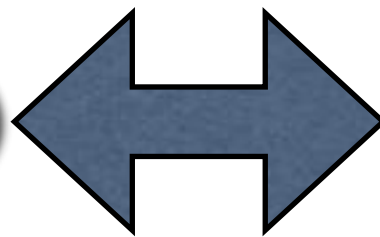


Sir Isaac Newton
(1643-1727)



Westminster abbey

Hullám



Részecske

Terjedés közben

- Diffrakció
- Interferencia
- Polarizáció

Kölcsönhatáskor

- Fotoelektromos hatás
- Fénytörés
- Gerjesztés, Ionizáció
- Compton-szórás
- Párkeltés

Ha a fény lehet részecske, egy részecske lehet hullám?

Anyaghullámok - az elektron mint hullám

Einstein:
tömeg-energia
ekvivalencia

$$E = mc^2$$

Planck:
sugárzási
törvény

$$E = hf$$

Maxwell:
fény terjedési
sebessége

$$c = \lambda f$$



Louis-Victor-Pierre-Raymond, 7th duc de Broglie (1892-1987)

$$mc^2 = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Részecske (foton
is!) impulzusa:

$$P = \frac{h}{\lambda}$$

Részecske hullámhossza
("de Broglie hullámhossz"):

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Miért nem érzékeljük makroszkopikus testek
hullámtermészetét (pl. puskagolyó)?

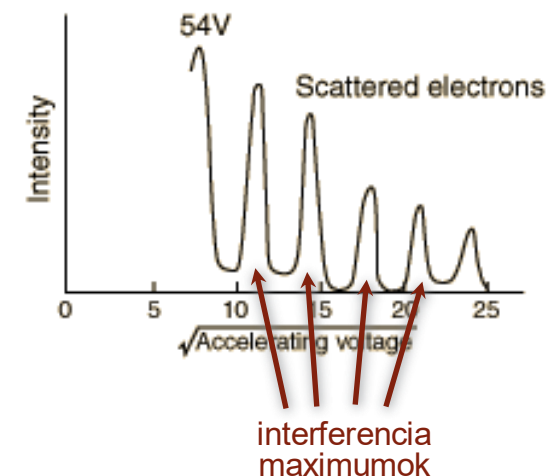
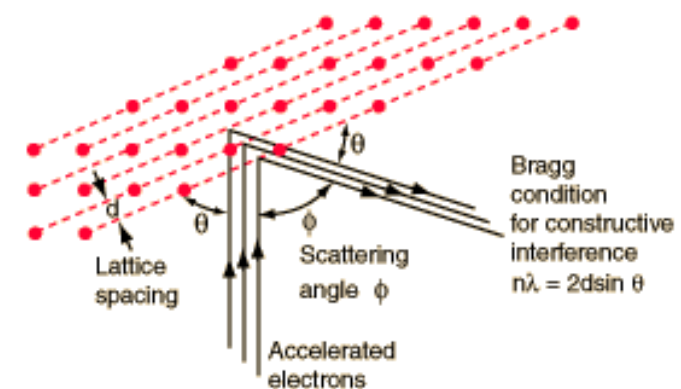
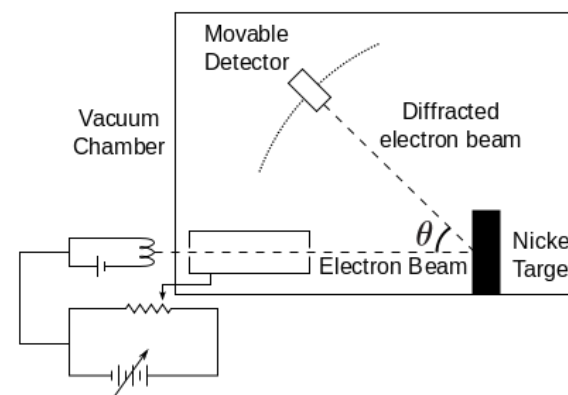


Puskagolyó: $m=1$ g, $v=1$ kms⁻¹
esetén $\lambda = 6 \times 10^{-34}$ m!!

Davisson-Germer kísérlet (1927)



Clinton Joseph Lester Halbert Davisson (1881 –1958) Lester Halbert Germer (1896–1971)



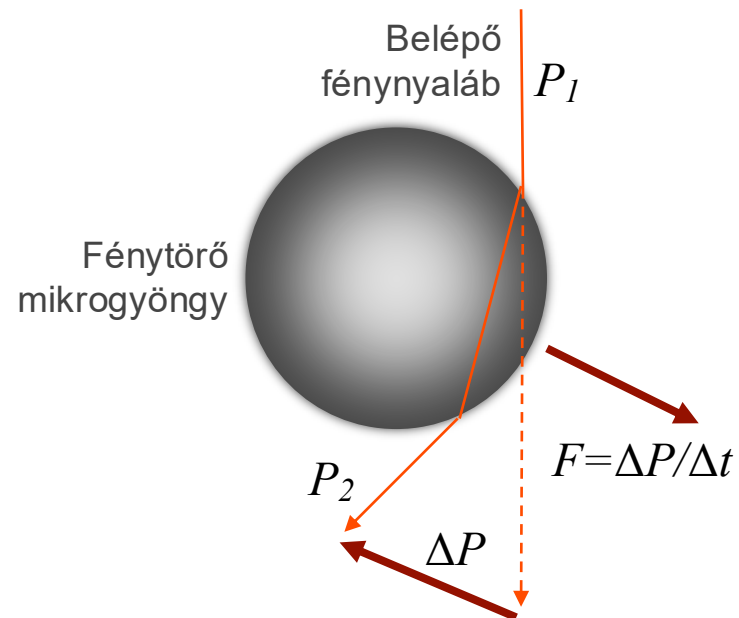
Interferencia
mintázat
(hullám-
jelenség)!

Az elektron hullám!

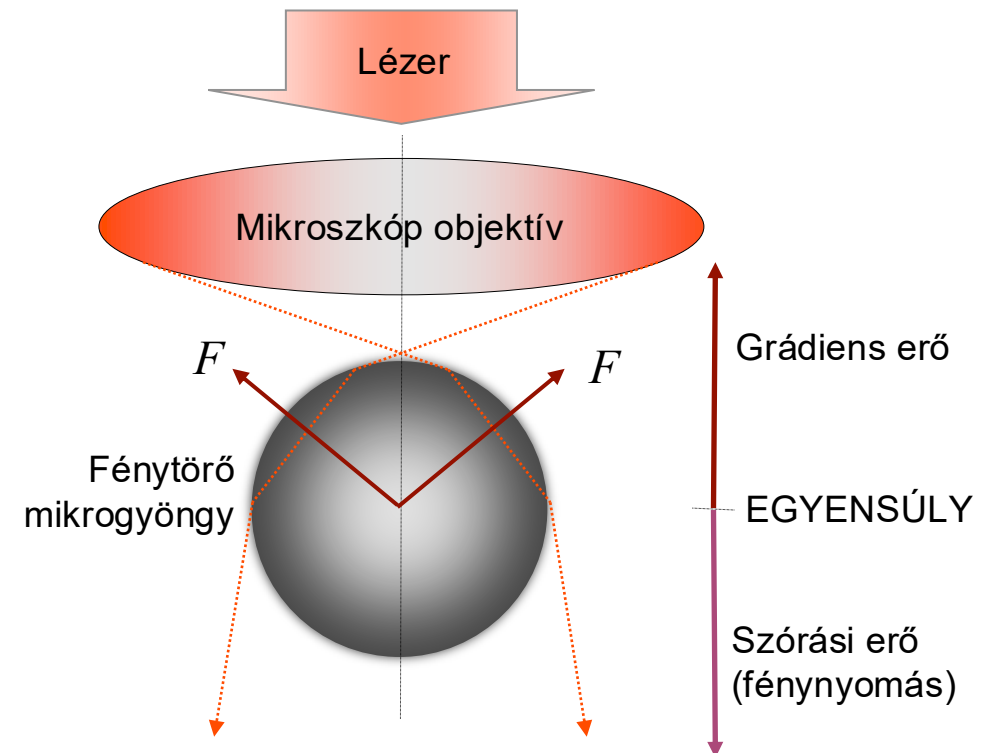
Alkalmazás I: lézersipesz

(a részecske tulajdonság alapján könnyebben megérthetjük)

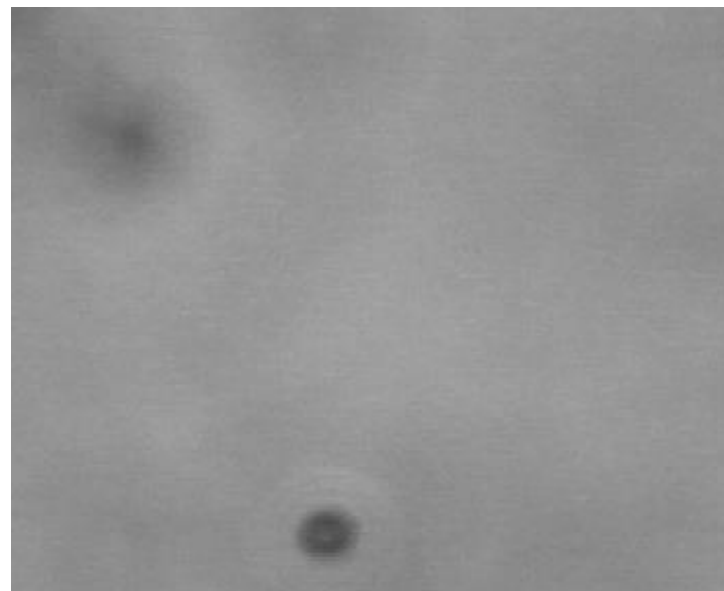
A fénytörés (refrakció) fényimpulzus-változással (ΔP) jár:



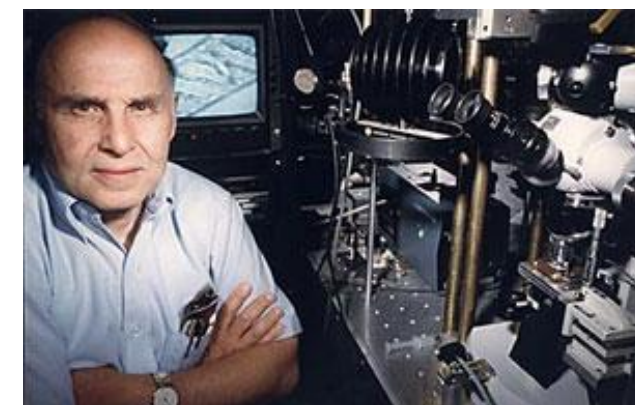
Fénytörő részecskék “optikai erőkkel” megfoghatók:



Az **optikai csipeszben** a fotonok és a fénytörő részecske között **impulzuscsere** lép fel



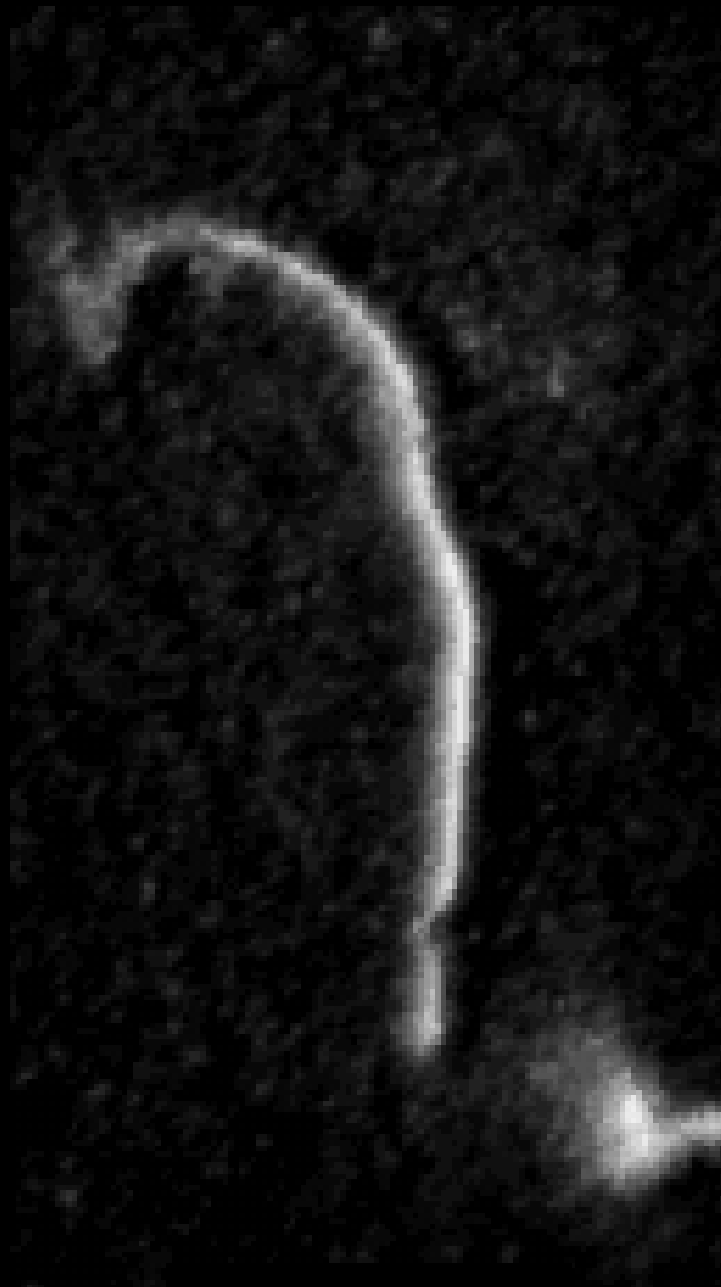
3 μm átmérőjű latex (polistírol) mikrogöngyök optikai csipeszben



Arthur Ashkin (Nobel-díj 2018)

Csomókötés egyetlen molekulafonálra optikai csipeszszel

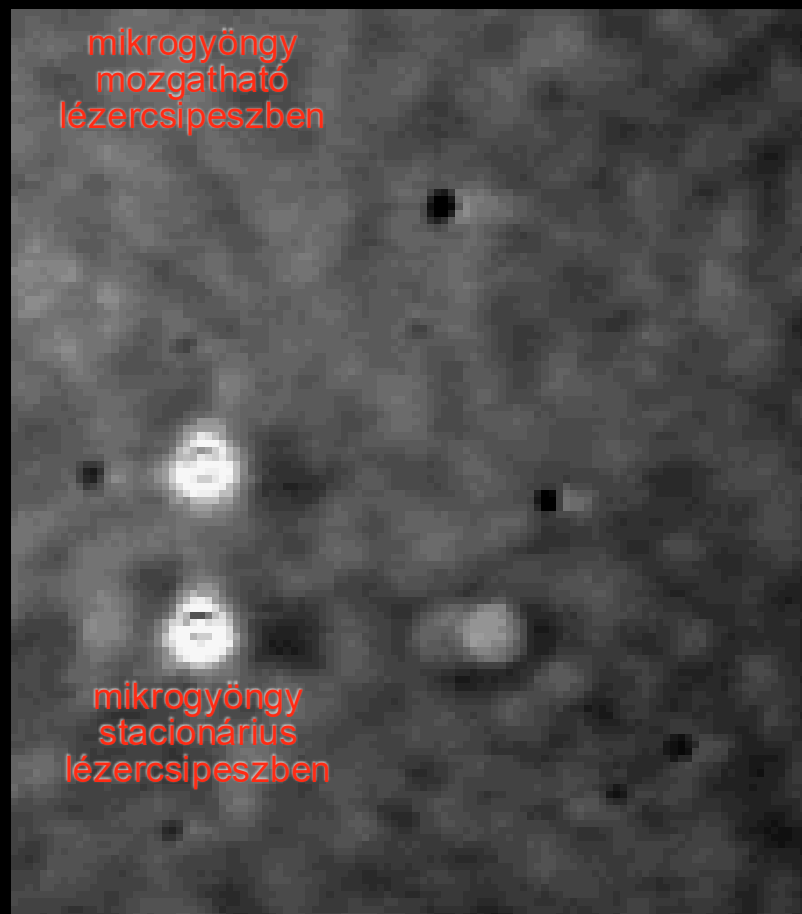
Aktin filamentum



Fluoreszcencia kép

DNS

Fáziskontraszt kép

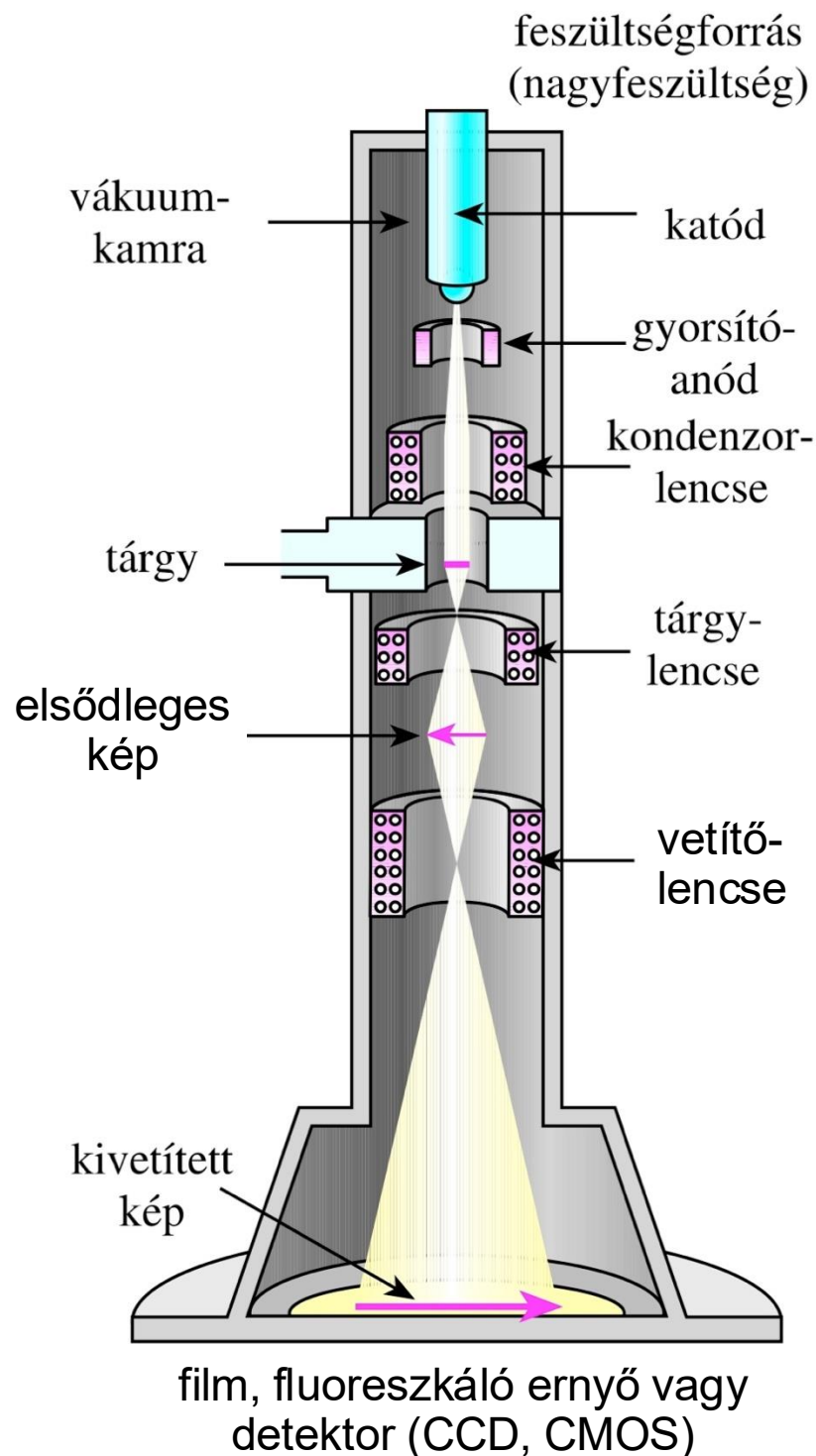


Fluoreszcencia kép



Alkalmazások 2.

Anyaghullámok: Elektronmikroszkóp



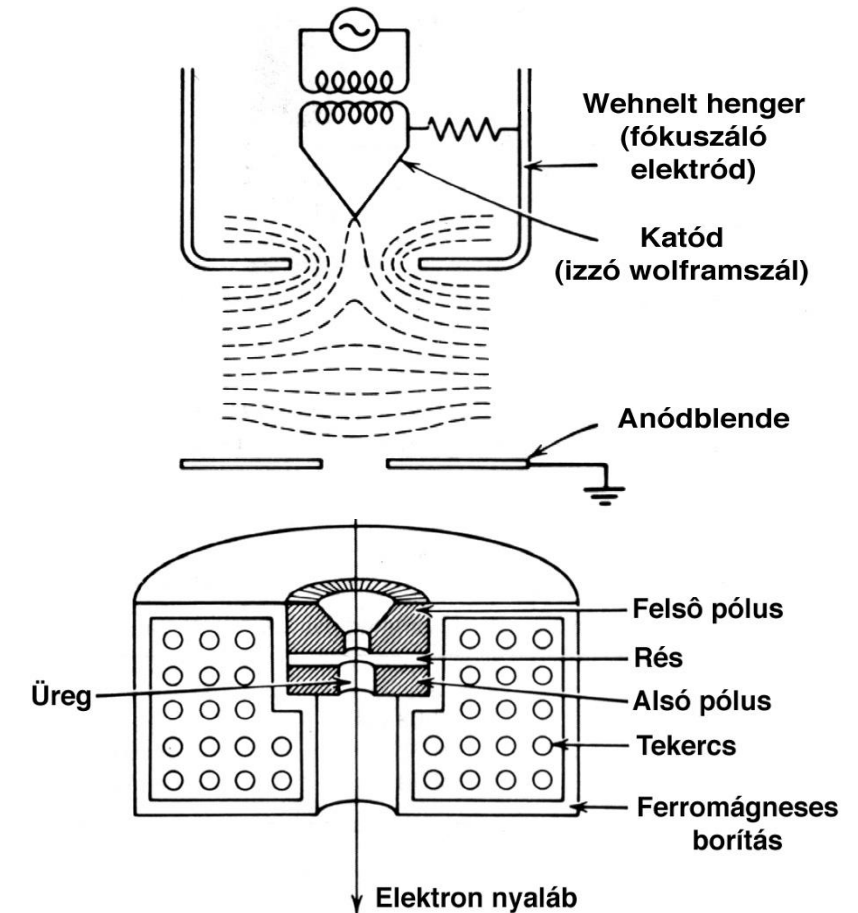
Transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM)

Sugárforrás:
elektronágyú

Fókuszálás:
elektronnyaláb
kitérítése
mágnestlencsével

$$F = eBV_e \sin \alpha$$

Feloldóképesség: $d = \frac{\lambda}{\alpha}$



F =elektronra ható erő; e =elektron töltése;
 B =mágneses indukció; V_e =elektron sebessége;
 α =optikai tengely és a mágneses tér iránya által bezárt szög

d =legkisebb feloldott távolság
 λ =„de Broglie” hullámhossz
 α =optikai tengely és a mágneses tér iránya által bezárt szög

de Broglie hullámhossz alapján elméleti $d \sim 0,005 \text{ nm}$ (=5 pm)

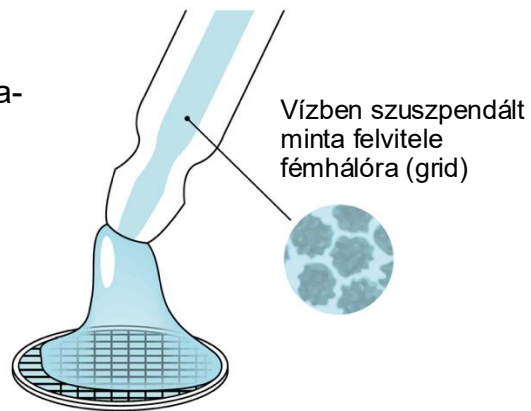
Kémiai Nobel-díj 2017: Krioelektron mikroszkópia



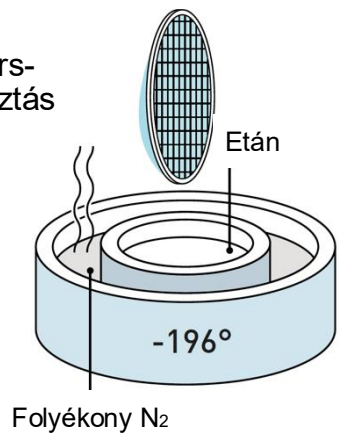
Jacques Dubochet, Joachim Frank, Richard Henderson

Mintapreparálás

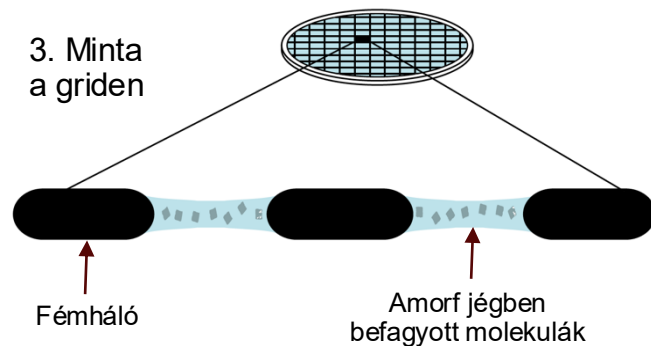
1. Minta-felvétel



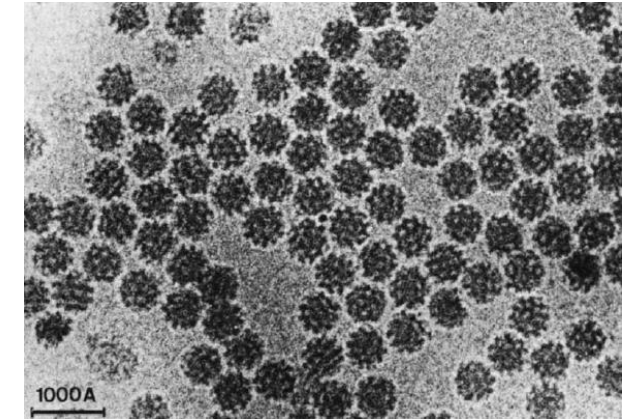
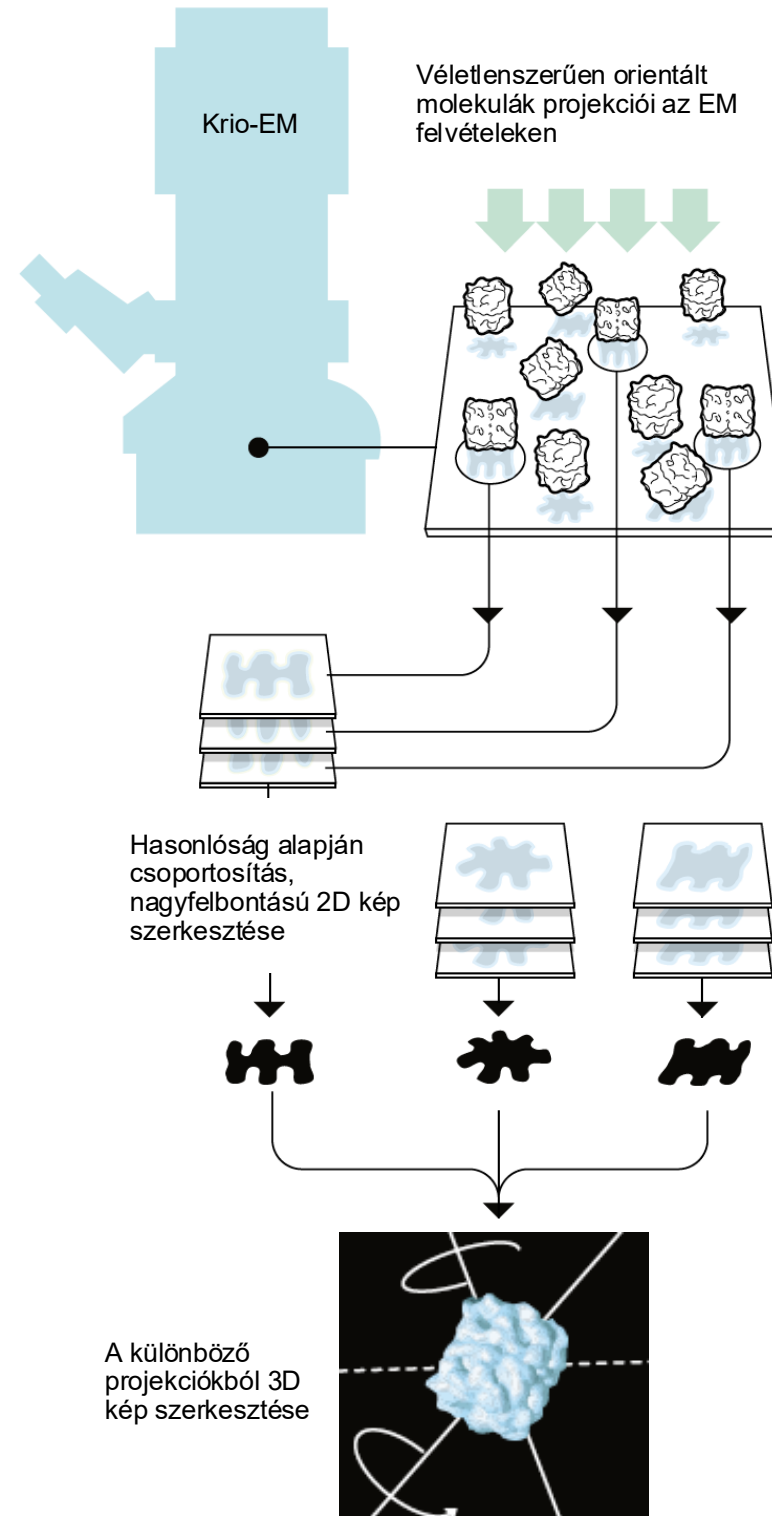
2. Gyors-fagyasztás



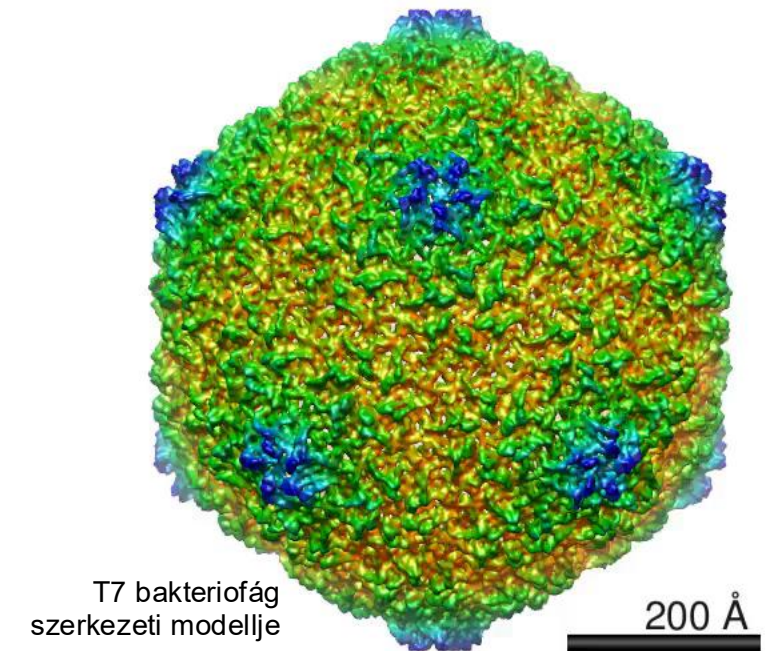
3. Minta a griden



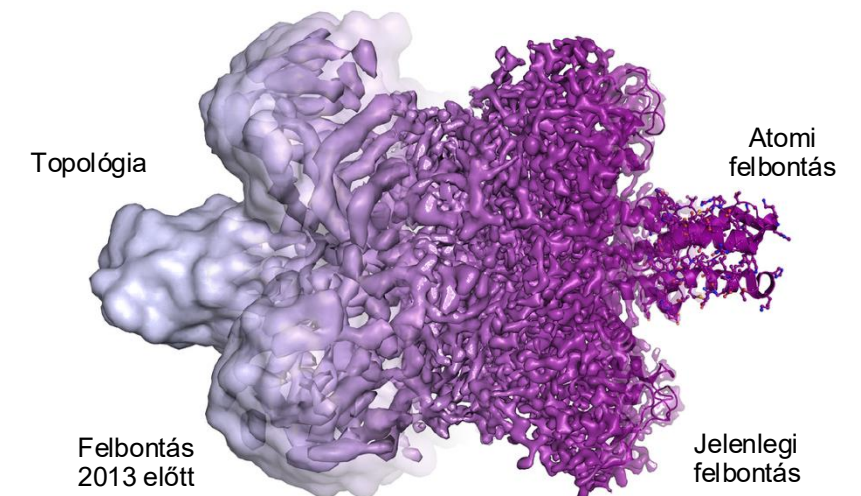
Krio-EM felvétel és képrekonstrukció



Első krioelektron mikroszkópos felvétel vírusokról (Dubochet, 1984)



T7 bakteriofág szerkezeti modellje



Alkalmazások 3.

Fotoelektromos hatás: fotodetektálás, fotocella, CCD, stb, stb.....

Fénydetektálás,
képrögzítés, CCD
kamera



CCD mobiltelefon
kamerájában

Fényenergia
összegyűjtése,
átalakítása



Napelemek

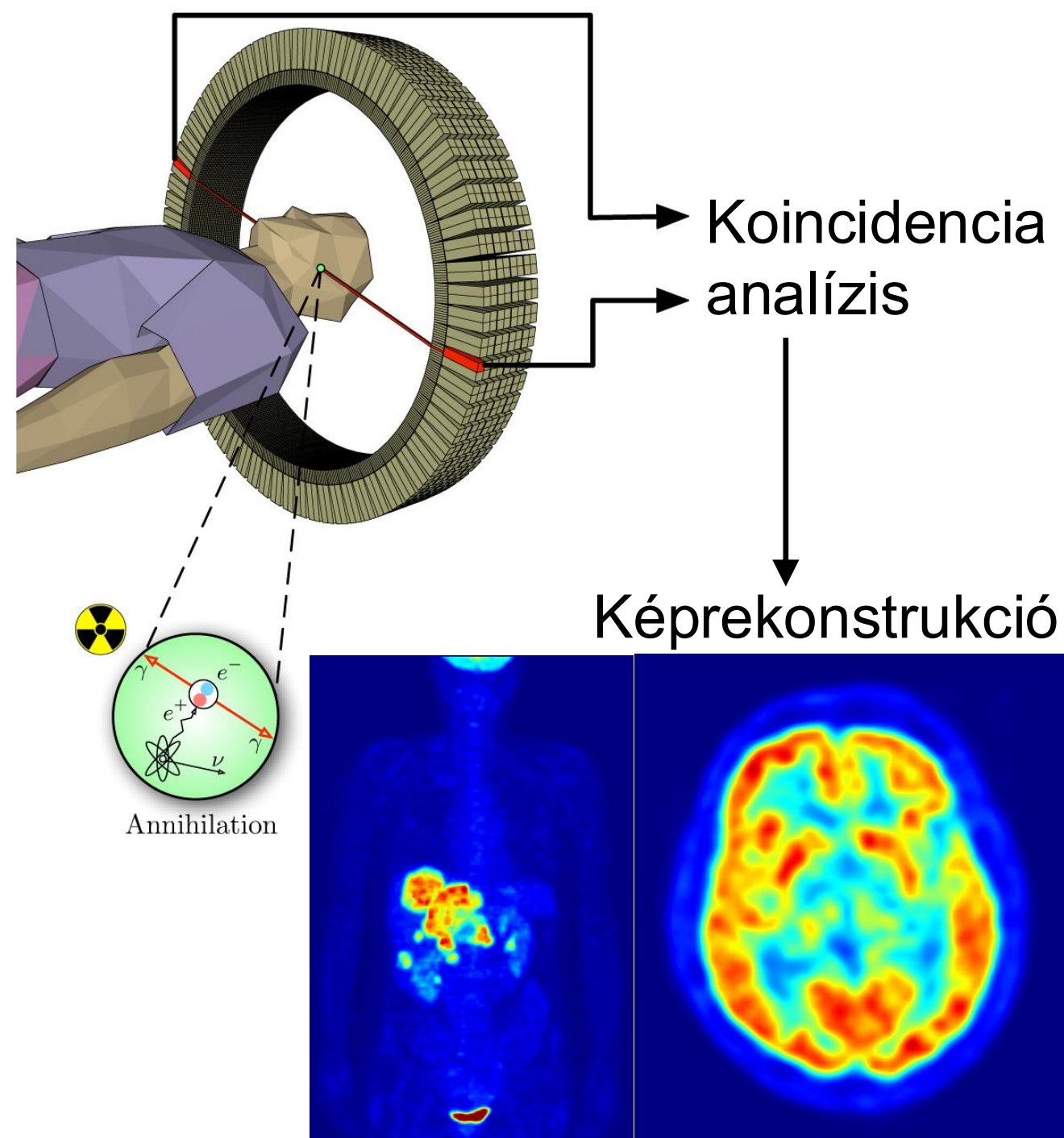
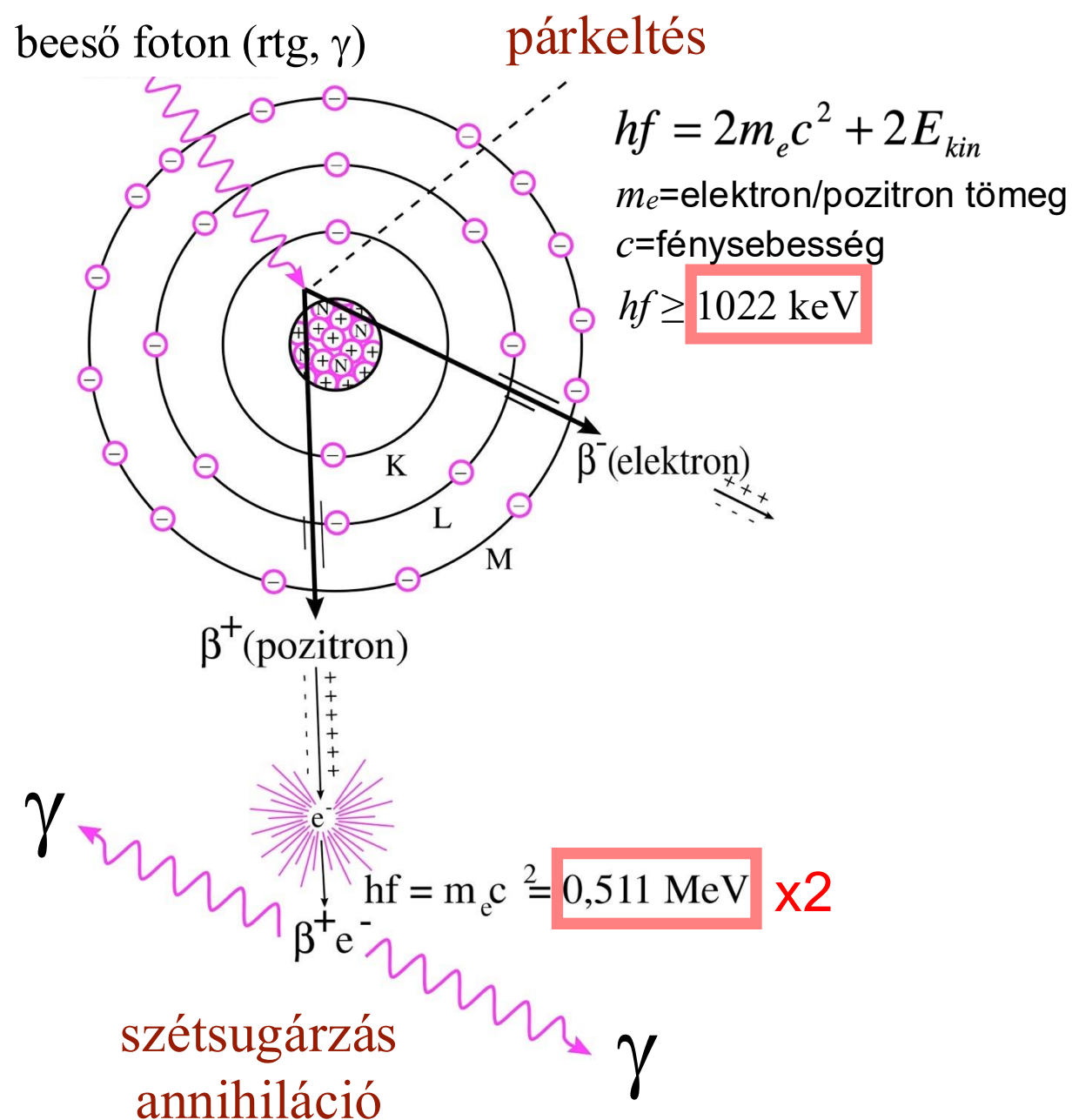
Fényerősítés



*A Bárányok hallgatnak (1991) "Buffalo Bill"
jelenete (fényerősítés csatornalemezes
fotoelektron-sokszorozóval)*

Alkalmazások 4.

Párkeltés – annihilációs sugárzás: Pozitron Emissziós Tomográfia (PET)



OMHV



<https://feedback.semmelweis.hu/feedback/index.php?feedback-qr=ECAEPE4ZCBK9XV4E>