

# ORVOSI BIOFIZIKA

## A FÉNY MINT HULLÁM ÉS RÉSZECSKE

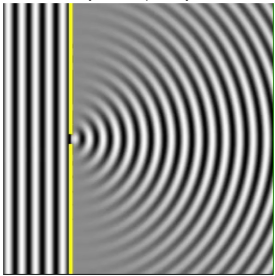
KELLERMAYER MIKLÓS

## A fény biofizikája

- A fény mint hullám. Hullámjelenségek.
- Elektromágneses hullámok, spektrum.
- A fény mint részecske. A fotoelektromos hatás.
- A fény kettős természete.
- Anyaghullámok. Az elektron mint hullám.
- Alkalmazások

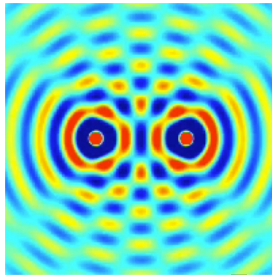
## Fény mint hullám: “hullámjelenségeket” mutat

Diffrakció  
(elhajlás)



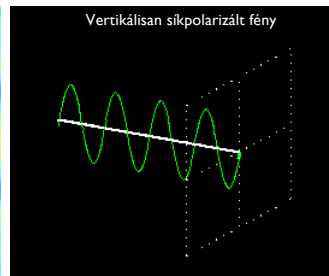
A fény nem várt  
helyekre “hajlik”

Interferencia



Kis és nagy amplitudójú  
területek tér- és időbeli  
mintázata

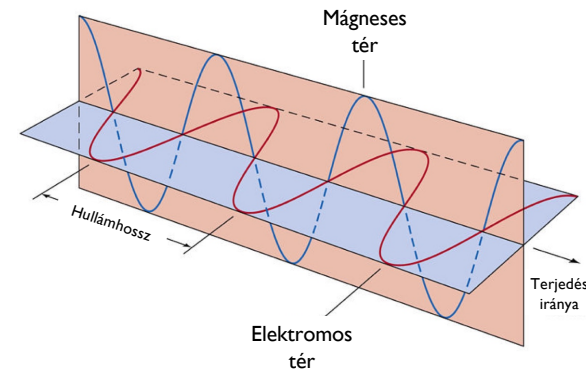
Polarizáció



A rezgés kitüntetett  
irányban történik

## A fény: elektromágneses hullám

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



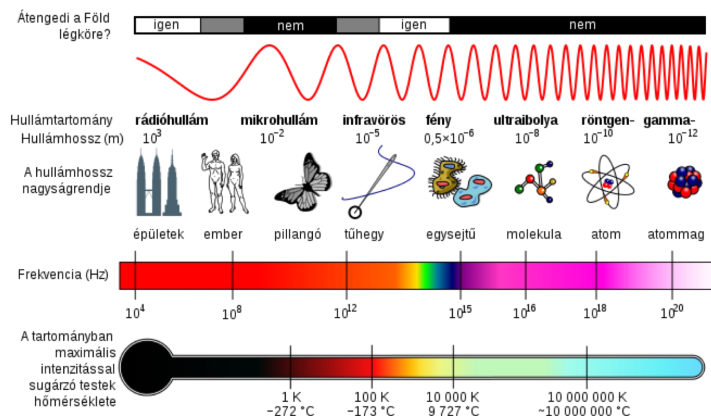
James Clerk Maxwell  
(1831-1879)

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

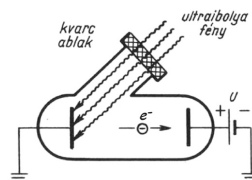
# Mi történik, ha egy testet fénnel világítunk meg?

## Fotoelektromos hatás: Megfigyelés

**Hallwachs-effektus:**  
UV fény hatására negatív töltések távoznak a megvilágított fémfelületről



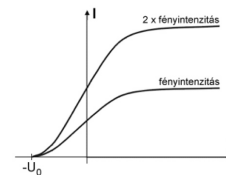
Wilhelm Hallwachs (1859-1922)



**Mérések, megállapítások**



Philipp Lenard/Lénárd Fülöp (1862-1947)



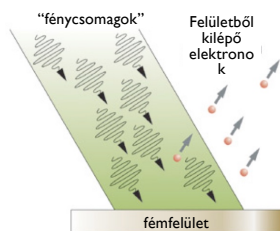
- Elektron emisszió: besugárzást azonnal követi
- Elektron emisszió csak nagyfrekvenciájú (pl. kék, UV) fényben
- Nincs elektron emisszió alacsony frekvenciájú (pl. vörös) fényben
- Fotoelektromos áram: fényintenzitás függvénye
- Fotoelektromos áram: nem függ a fény színétől

# 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 ( $6.62 \times 10^{-34}$  Js)  
 $f$  = frekvencia  
 $hf$  = fénymozgás = fény kvantum, "foton"  
 $W_{ex}$  = kilépési munka

**Foton:**  
• fényssebességgel ( $c$ ) terjed vákuumban  
• impulzus rendelhető hozzá  
• nyugalmi tömege 0.

# A fény egyszerre hullám és részecske



Christiaan Huygens (1629-1695)



Sir Isaac Newton (1643-1727)

**Hullám**

**Részecske**

Terjedés közben

- Diffrakció
- Interferencia
- Polarizáció

Kölcsönhatáskor

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

# 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)?

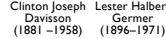


Puskagolyó:  $m=1 \text{ g}$ ,  $v=1 \text{ kms}^{-1}$   
esetén  $\lambda = 6 \times 10^{-34} \text{ m!!}$

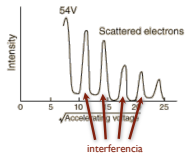
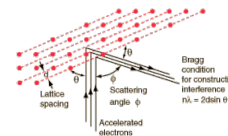
### Davisson-Germer kísérlet



Clinton Joseph Davisson  
(1881-1958)



Lester Halbert Germer  
(1896-1971)

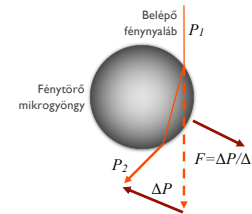


Interferencia  
mintázat  
jelenik meg!

### Az elektron hullám!

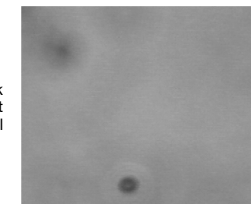
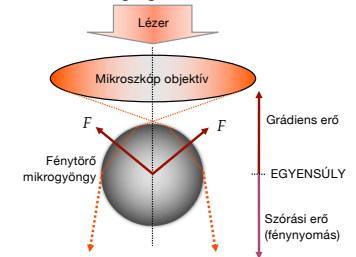
# Alkalmazás I: lézercsipesz (a részecske tulajdonság alapján könnyebben megérthetjük)

A fénytörés (refrakció) fényimpulzus-  
változással ( $\Delta P$ ) jár:



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

Fénytörő részecskék "optikai erőkkel"  
megfoghatók:



3  $\mu\text{m}$  átmérőjű latex  
(polistírol) mikrogöngyök  
optikai csipeszben

N.B.: lézercsipesz, optikai  
csipesz, optikai csapda  
szinonimák

## A lézercsipesz fontosabb történeti állomásai



Arthur Ashkin (Nobel-díj 2018)

1970: Arthur Ashkin: lézercsipesz

1991: J. Spudich, T. Yanagida, J. Molloy,  
egyedi miozin mechanika

1994: T. Yanagida, egyetlen ATP turnover miozinon

1994: K. Svoboda, S. Block, egyedi kinesin mechanika

1996: C. Bustamante, D. Bensimon, DNS molekula megnyújtása

1997: S. Chu, W.D. Phillips és C. Cohen-Tanoudji (Nobel-díj):  
lézeres atomhűtés.

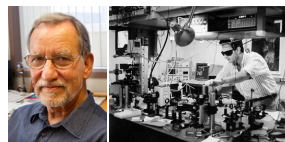
1997: M. Kellermayer, M. Rief, L. Tskhovrebova, titin  
megnyújtás (első fehérje)

2000: Galajda P., Ormos O., Mikrofabrikáció  
lézercsipesz, optikailag hajtott gépek

2001: J. Liphardt, C. Bustamante, RNS megnyújtása

2002: Holografikus lézercsipesz (spatial light modulator, SLM)

2008: Bustamante, Tinoco: riboszóma mechanika



J. Spudich



J. Finan



S. Chu, W.D. Phillips és C. Cohen-Tanoudji



S. Block



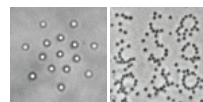
C. Bustamante



J. Molloy

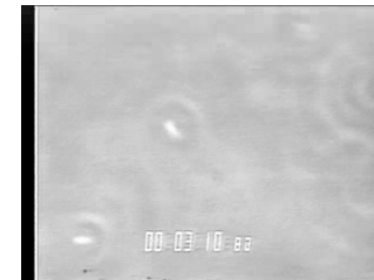


Mikrofabrikált propeller



Sok részecske egyidejű manipulálása  
holografikus lézercsipeszsel

## A lézercsipeszsel élő sejtek is megfoghatók



Baktérium csapdázása optikai csipeszsel



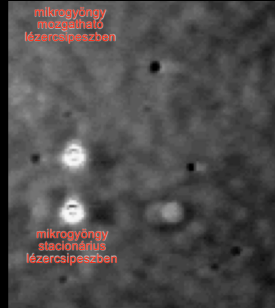
## Csomókötés egyetlen molekulafonálra optikai csipesszel

Aktin filamentum

DNS

Fáziskontraszt kép

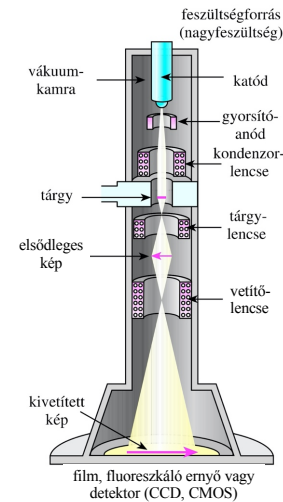
Fluoreszcencia kép



Fluoreszcencia kép

Arai et al. Nature 399, 446, 1999.

## Alkalmazások 2. Anyaghullámok: Elektronmikroszkóp



Transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM)

Sugárforrás:  
elektronágyú

Fókuszálás:  
elektronnyaláb  
kiterítése  
mágneslencsével

$$F = eBV_e \sin \alpha$$

$F$ =elektronra ható erő;  $e$ =elektron töltése;  $B$ =mágneses térerő;  $V_e$ =elektron sebessége;  $\alpha$ =optikai tengely és a mágneses tér iránya által bezárt szög

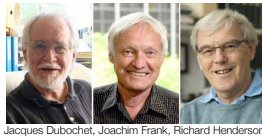
Feloldóképesség:

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

$d$ =legkisebb feloldott távolság  
 $\lambda$ ="de Broglie" hullámhossz  
 $\alpha$ =optikai tengely és a mágneses tér iránya által bezárt szög

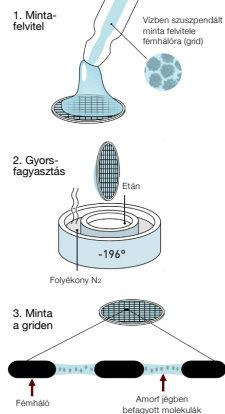
de Broglie hullámhossz alapján elméleti  $d \sim 0,005 \text{ nm}$  ( $\approx 5 \text{ pm}$ )

## Kémiai Nobel-díj 2017: Krioelektron mikroszkópia

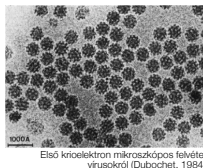
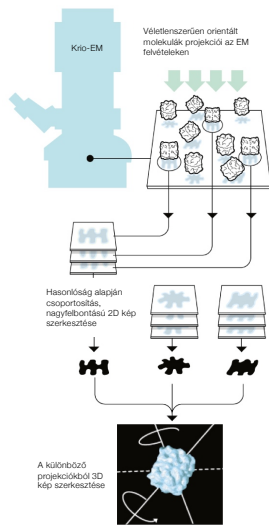


Jacques Dubochet, Joachim Frank, Richard Henderson

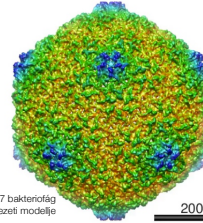
Minta-preparálás



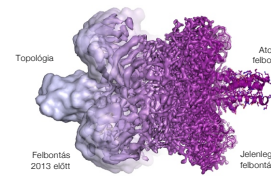
Krio-EM felvétel és képrekonstrukció



Első krio-elektron mikroszkópos felvétel vírusokról (Dubochet, 1984)



T7 bakteriófág szerkezeti modellje



Topológia Felbontás 2013 előtt Jelenlegi felbontás

## Alkalmazások 3.

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

Fénydetektálás,  
képrögzítés, CCD  
kamera



CCD mobiltelefon kamerájában

Fényenergia  
összegyűjtése, átalakítása



Napelemek

Fényerősítés



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

# OMHV



<http://report.semmelweis.hu/linkreport.php?qr=OUEDQQ0L7SCEEPWB>

pin: KQ8