

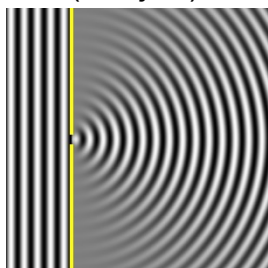
# ORVOSI BIOFIZIKA

## A FÉNY MINT HULLÁM ÉS RÉSZECSKE

KELLERMAYER MIKLÓS

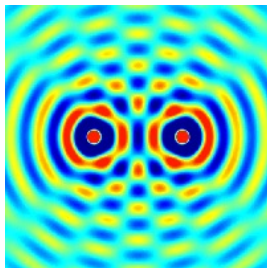
### Fény mint hullám: “hullámjelenségeket” mutat

Diffrakció  
(elhajlás)



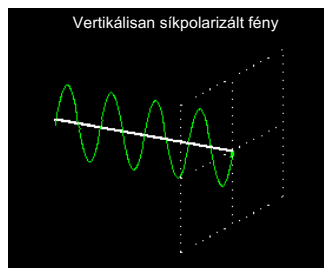
A fény nem várt  
helyekre “hajlik”

Interferencia



Kis és nagy amplitudójú  
területek tér- és időbeli  
mintázata

Polarizáció



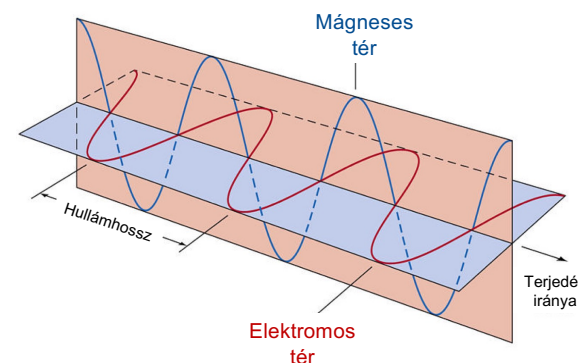
A rezgés kitüntetett  
irányban történik

## A fény 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

## A fény: elektromágneses hullám

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



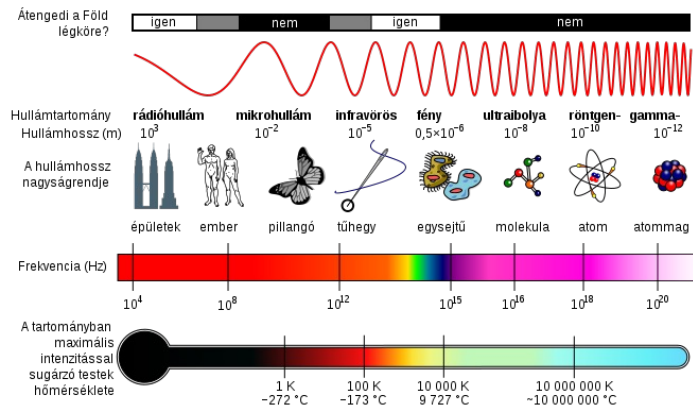
James Clerk Maxwell  
(1831-1879)

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

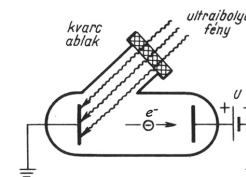
# Mi történik, ha egy testet fénnel világítunk meg?

## Fotoelektromos hatás: Megfigyelés

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



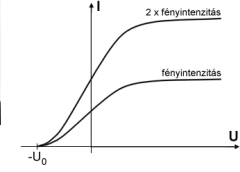
Wilhelm Hallwachs (1859-1922)



**Mérések, megállapítások**



Philipp Lenard (1862-1947)



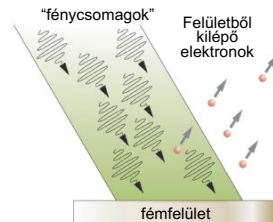
- Elektron emisszió: besugárzást azonnal követi
- Elektron emisszió csak nagyfrekvenciájú (pl. kék, UV) fényben
- Nincs elektron emisszió alacsony frekvenciájú (pl. vörös) fényben
- Fotoelektromos áram: fényintenzitás függvénye
- Fotoelektromos áram: nem függ a fény színétől

## 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
- Pákkeltés

# 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  
 $c = \lambda f$



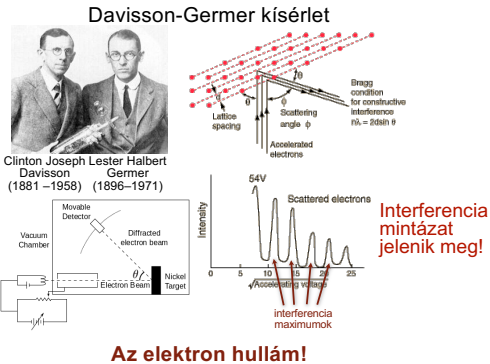
Louis-Victor-Pierre-Raymond, 7th duc de Broglie (1892-1987)

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

Részecske (foton is!) impulzusa:  $P = \frac{h}{\lambda}$

Részecske hullámhossza ('de Broglie hullámhossz'):  $\lambda = \frac{h}{mv}$

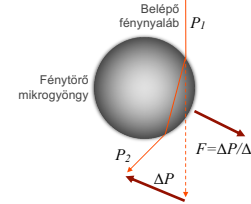
Miért nem érzékeljük makroszkopikus testek hullámtermészetét (pl. puskagolyó)?



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

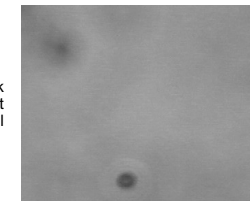
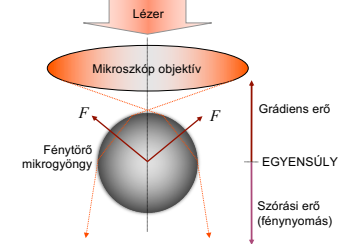
# Alkalmazás I: lézercsipesz (a részecske tulajdonság alapján könnyebben megérthetjük)

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



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

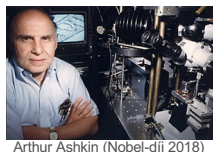
Fénytörő részecskék "optikai erőkkel" megfoghatók:



3 μm átmérőjű latex (polistírol) mikrogöngyökök 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. Spudis, 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.

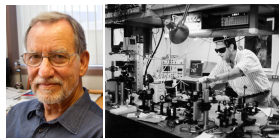
1997: M. Keller, M. Rief, L. Tsvetkov, titin megnyújtás (első fehérje)

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

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

2002: Holografikus lézercsipesz (spatial light modulator, SLM)

2008: Bustamante, Tinoco: riboszóma mechanika



J. Spudis

J. Finer



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



C. Bustamante



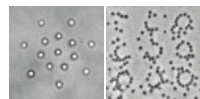
J. Molloy



S. Block

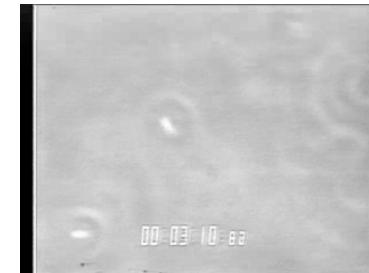


Mikrofabrikált propeller



Sok részecske egyidejű manipulálása holografikus lézercsipesszel

## A lézercsipesszel élő sejtek is megfoghatók



Baktérium csapdázása optikai csipesszel



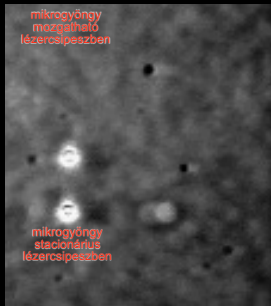
## Csomókötés egyetlen molekulafonálra optikai csipesszel

Aktin filamentum

DNS

Fáziskontraszt kép

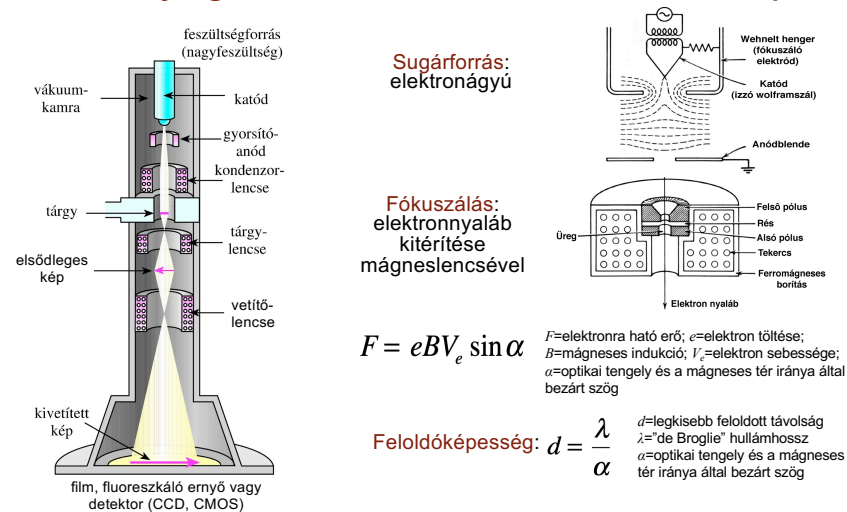
Fluoreszcencia kép



Fluoreszcencia kép

Arai et al. Nature 399, 446, 1999.

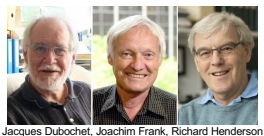
## Alkalmazások 2. Anyaghullámok: Elektronmikroszkóp



Transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM)

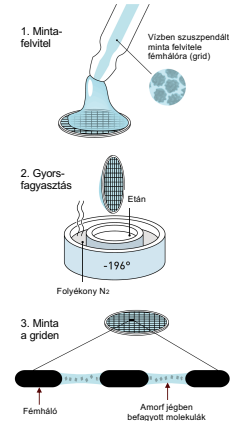
de Broglie hullámhossz alapján elméleti  $d \sim 0,005 \text{ nm}$  (=5 pm)

## Kémiai Nobel-díj 2017: Krioelektron mikroszkópia

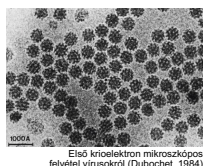
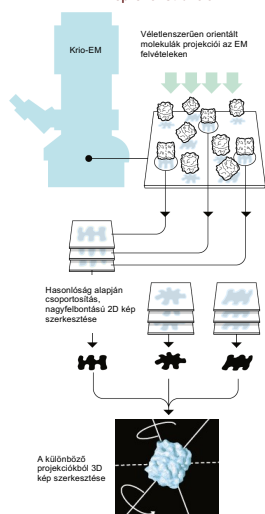


Jacques Dubochet, Joachim Frank, Richard Henderson

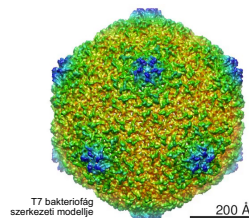
### Mintapreparálás



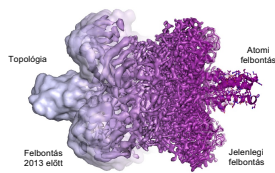
### Krio-EM felvétel és képrekonstrukció



Első krioelektron mikroszkópos felvétel vírusokról (Dubochet, 1984)



T7 bakteriofág szerkezeti modellje



Topológia

Felbontás 2013 előtt

Atom felbontás

Jelenlegi felbontás

## Alkalmazások 3.

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

Fénydetektálás, képrögzítés, CCD kamera



CCD mobiltelefon kamerájában

Fényenergia összegyűjtése, átalakítása



Napelemek

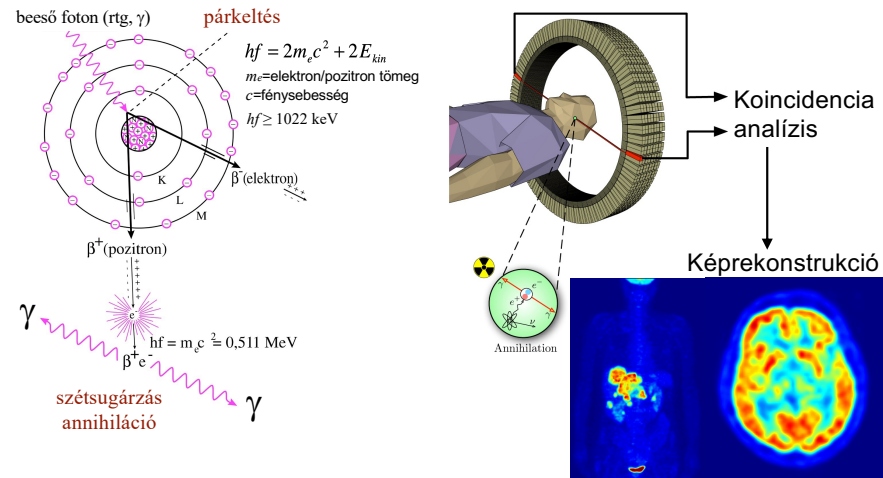
Fényerősítés



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

# Alkalmazások 4.

Párkeltés – annihilációs sugárzás: Pozitron Emissziós Tomográfia (PET)



OMHV



<https://feedback.semmelweis.hu/feedback/index.php?feedback-qr=9305R12FCN91BS6Y>