

ORVOSI BIOFIZIKA

“A FÉNY BIOFIZIKÁJA”

KELLERMAYER MIKLÓS

A fény biofizikája

- A fény mint hullám. Hullámjelenségek.
- Elektromágneses sugárzás, spektrum.
- Feketetest-sugárzás, Planck-elmélet.
- A fény mint részecske. Fényelektromos hatás.
- Fény kettős természete.
- Anyaghullámok, az elektron mint hullám.
- Alkalmazások.

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 amplitudó eleinte 0,5 m, majd egy tartókábel
 elszakadása után akár 9 m!
 Összeomlás: 1940. november 7.

(A jelenség magyarázata)



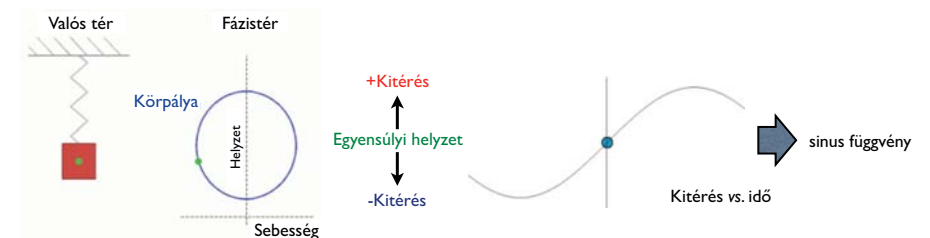
Kármán-féle örvények
 (Szélben, a híd élén keletkeznek. Ha nem
 válnak le a felületről, rezgés lép fel.)



Kármán István
 (Theodore von Kármán)
 1881-1963

Harmonikus rezgőmozgás

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



$$y = R \sin \varphi$$

Mivel $\varphi = \omega t$: $y = R \sin(\omega t)$

Ha a kiindulási fáziszög (φ_0) nem zérus: $y = R \sin(\omega t + \varphi_0)$

Mivel a szögsebesség (ω) a periódusidő (T) alatt megtett teljes kör (2π): $y = R \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$

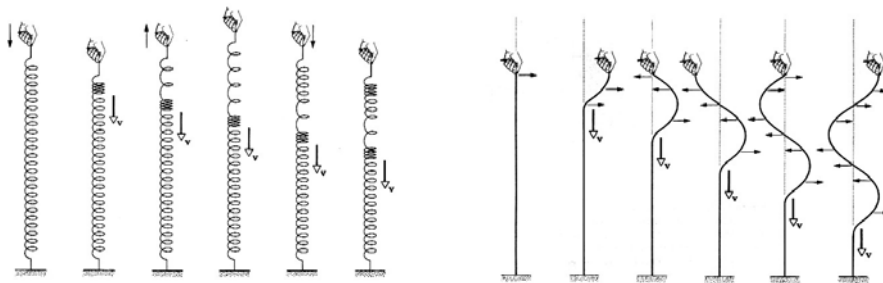
A tovaterjedő hullámmozgás fontos paraméterei:

- 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

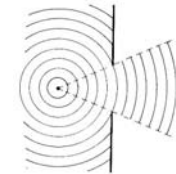


Christiaan Huygens
(1629-1695)

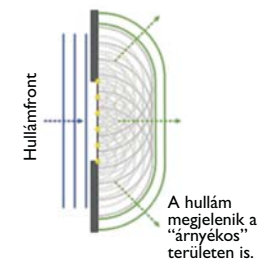
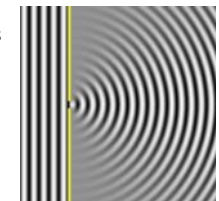


Augustin-Jean Fresnel
(1788-1827)

Hullámhossznál
sokkal nagyobb rés



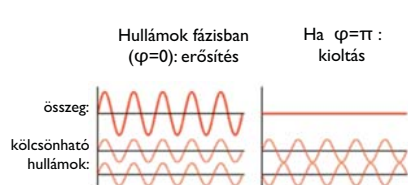
Hullámhossznál kisebb rés



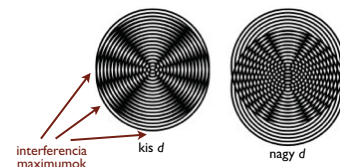
A hullám
megjelenik az
"árnyékos"
területen is.

Hullámjelenségek II. Interferencia

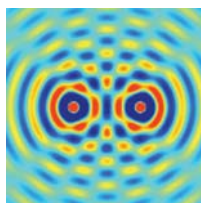
Alapja: szuperpozíció elve



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



Két, pontszerű forrásból
származó hullámok
interferenciája



Hullámjelenségek III. Polarizáció

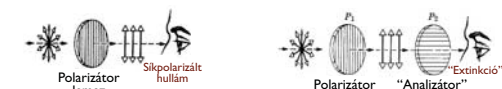
Polarizáció: kitüntetett irányú rezgés
Kettős törés: anizotróp terjedési sebesség
Csak a **transzverzális** hullámok polarizálhatók.



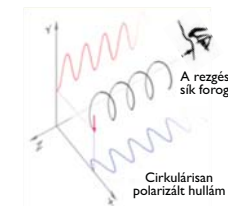
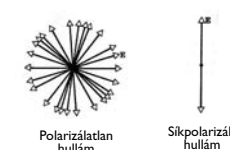
Mechanikai
hullámok polarizálása



Elektromágneses
hullámok polarizálása

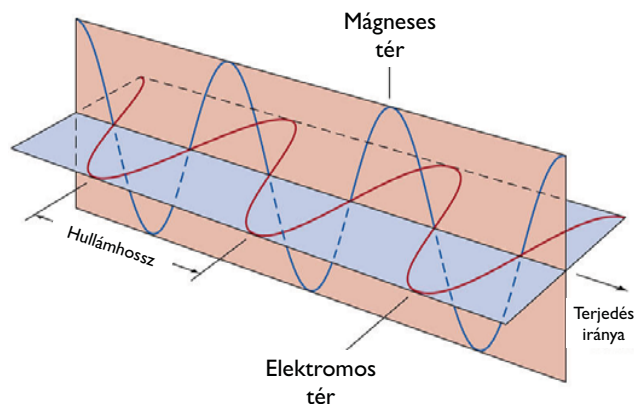


Polarizáció
illusztrálása a terjedési
irányból nézve:



A fény: elektromágneses hullám

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



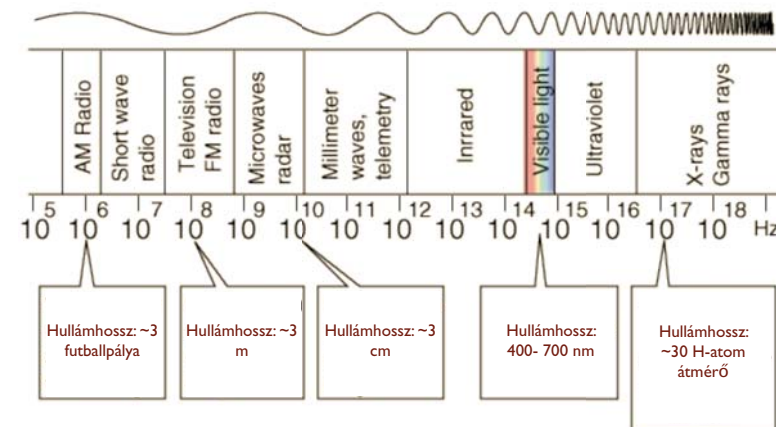
James Clerk Maxwell
(1831-1879)

A fény elektromágneses hullám.
Terjedési sebessége:

$$c = \lambda f$$

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

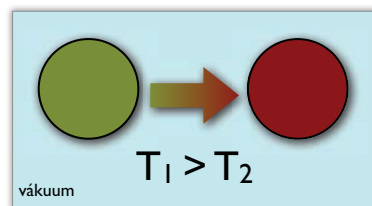
Az elektromágneses spektrum



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

"Feketetest" (Termikus) sugárzás

A termikus sugárzás a fénykeltés egyik mechanizmusa (a lumineszcencia mellett, l. később)



Hőcsere:
Hőmérséklet
kiegyenlítődés



- Magas hőmérsékletű testek fényt bocsátanak ki (emittálnak).
- Minél magasabb a test hőmérséklete, annál rövidebb hullámhosszak jelennek meg az emissziós spektrumában.

... no de mi az a "fekete test" ...?

A feketetest minden ráeső fényt elnyel

A tárgyak nemcsak sugároznak, hanem a sugárzást el is nyelik (abszorbeálnak)!

Kisugárzott felületi teljesítmény (M) és abszorpciós tényező (α) aránya konstans (Kirchoff törvénye):



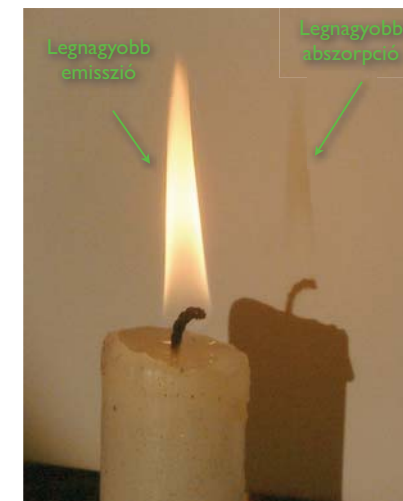
Gustav Robert Kirchhoff
(1824-1887)

$$\frac{M_{\lambda i}}{\alpha_{\lambda i}} = \frac{M_{\lambda j}}{\alpha_{\lambda j}}$$

Abszolút fekete testre (BB*):

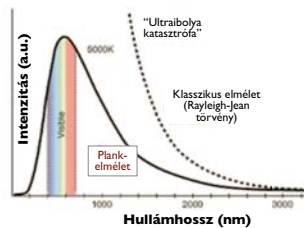
$$\alpha_{\lambda BB} = 1 \quad ("BB" = "black body")$$

- Vagyis az abszolút fekete test minden ráeső sugárzást elnyel ("semmit" nem ver vissza).
- Az abszolút fekete testen ezért a hőmérsékletfüggő emisszió ("feketetest sugárzás") ideálisan vizsgálható.



Feketestest sugárzás

Tulajdonságai és a levonható következtetések



Stefan-Boltzmann törvény:

$$M_{BB}(T) = \sigma T^4$$

M_{BB} = kisugárzott felületi teljesítmény, emissziós spektrum alatti terület.



Jozsef Stefan
(1835-1893)



Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)

Wien-féle eltolódási törvény:

$$\lambda_{\max} T = \text{const}$$



Wilhelm Wien
(1864-1928)

Planck-féle sugárzási törvény:

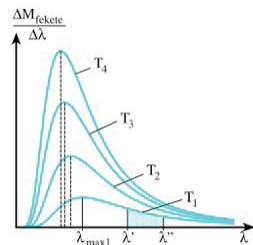
$$E = hf$$

h = hatáskvantum, Planck-állandó (6.626×10^{-34} Js).

Értelme: az energia csomagokban (kvantumokban) nyelődik el és emittálódik



Max Karl Ernst Ludwig Planck
(1858-1947)



Mi történik, ha egy testet fénnel világítunk meg?

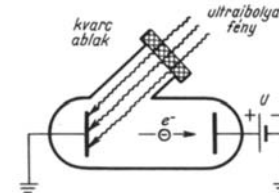
Fotoelektromos hatás: Megfigyelés

Hallwachs-effektus:

UV fény hatására negatív töltések távoznak a megvilágított fémfelületről



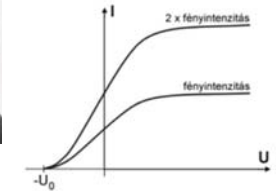
Wilhelm Hallwachs
(1859-1922)



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

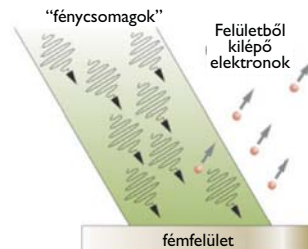
Fotoelektromos hatás: Magyarázat

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

Foton:

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

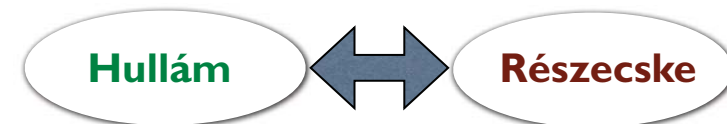
A fény egyszerre hullám és részecske



Christiaan Huygens
(1629-1695)



Sir Isaac Newton
(1643-1727)



Terjedés közben

- Diffrakció
- Interferencia
- Polarizáció

Kölcsönhatáskor

- Fotoelektromos hatás
- Fénytörés
- Gerjesztés, ionizáció
- Compton-szórás
- Párhajtás

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)?

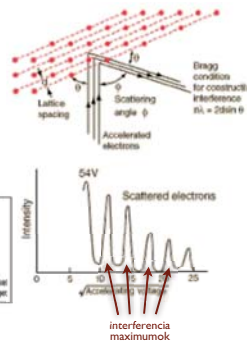
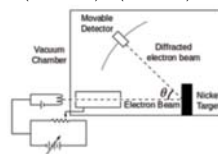


Puskagolyó: $m=1$ g, $v=1$ kms⁻¹
esetén $\lambda = 6 \times 10^{-34}$ m!!

Davisson-Germer kísérlet



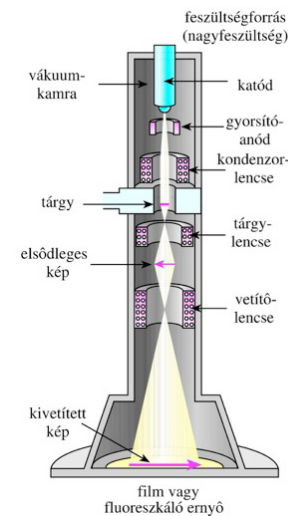
Clinton Joseph Davisson (1881-1958) Lester Halbert Germer (1896-1971)



Az elektron hullám!

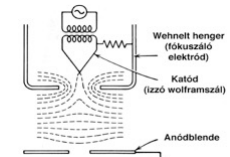
Alkalmazások II.

Anyaghullámok: Elektronmikroszkóp

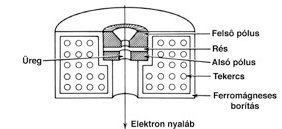


Transmissziós elektronmikroszkóp (TEM)

Sugárforrás:
elektronágyú



Fókuszálás:
elektronnyaláb
kiterítése
mágnestlencsével



$$F = eBV_e \sin \alpha$$

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

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

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~ 0,005 nm (=5 pm)

Alkalmazások III.

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 csatornalemezeds
fotoelektroncsorozával)