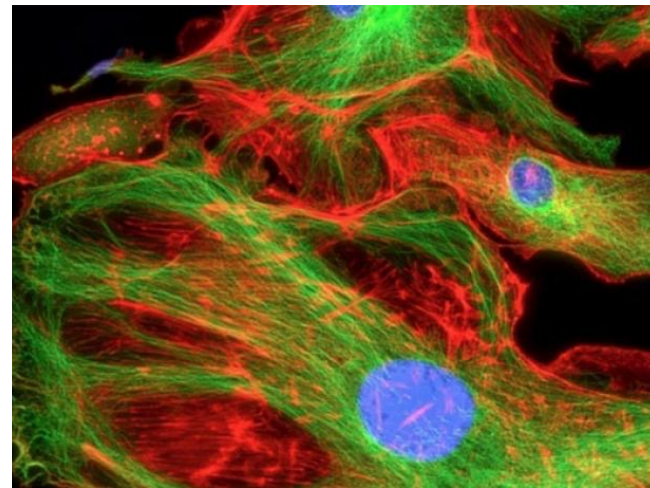


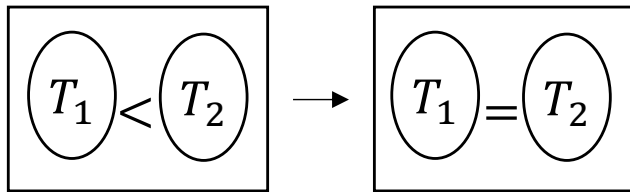
A fénykibocsátás mechanizmusai

Hőmérsékleti sugárzás és lumineszcencia



Mártonfalvi Zsolt

Hőmérsékleti sugárzás

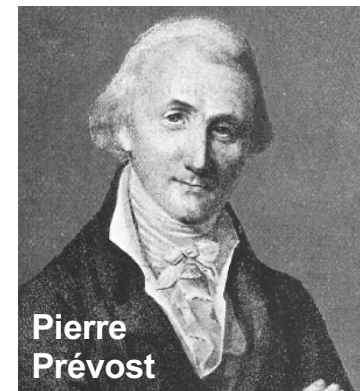


A testek hőmérséklet különbsége idővel kiegyenlítődik még vákuumban is!
(nincs se hővezetés, *kondukción*, se hőáramlás, *konvekció*)

Következésképpen:

Minden test a környezetének hőmérsékletétől függetlenül sugároz. (*Prévost, 1791*)

Ez a sugárzás mindig **elektromágneses sugárzás**.



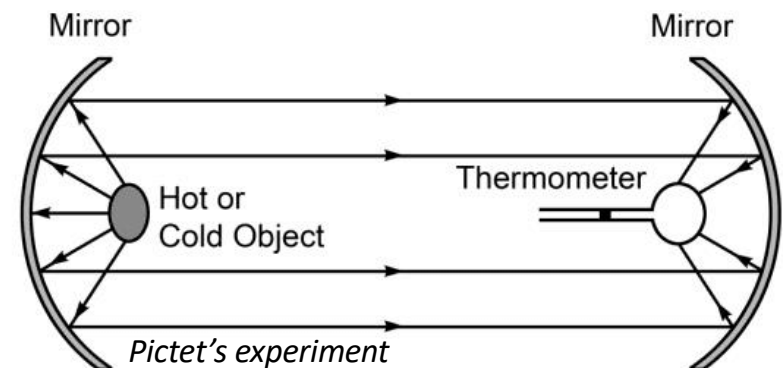
A sugárzás leírásához használt mennyiségek:

- **Kisugárzott felületi teljesítmény (M)**

$$M = \frac{\Delta P}{\Delta A} = \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

- **Abszorpciós tényező (α)**

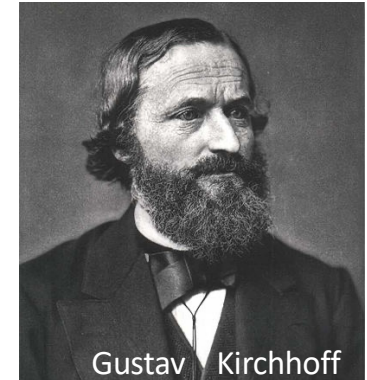
$$\alpha = \frac{J_{\text{test által elnyelt}}}{J_{\text{testre érkező}}} \quad (0 \leq \alpha \leq 1)$$



M és α erősen függenek a test termodinamikai hőmérsékletétől!

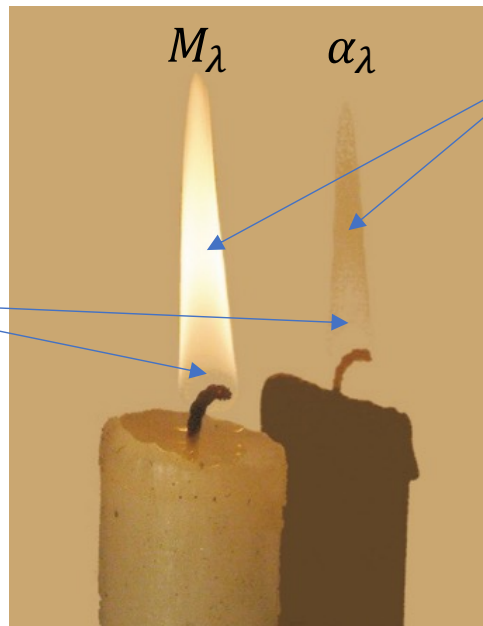
Kirchhoff sugárzási törvénye

Az a test amelyik erősebben sugároz, ugyanezt a sugárzást jobban el is nyeli. A kisugárzott felületi teljesítmény és az abszorpciós tényező hányadosa állandó egy szűk hullámhossz tartományban (λ):



$$\frac{M_{\lambda \text{ test1}}}{\alpha_{\lambda \text{ test1}}} = \frac{M_{\lambda \text{ test2}}}{\alpha_{\lambda \text{ test2}}} = \text{állandó}$$

Gyengébb sugárzás,
kevesebb elnyelés



Erősebb sugárzás,
erőteljesebb elnyelés

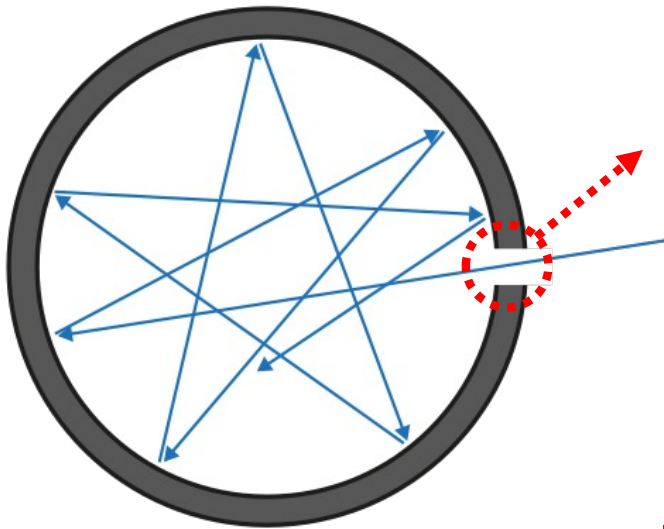
Az abszolút fekete test

Egy elméleti modell amit a hőmérsékleti sugárzás leírásához használunk.
Minden a felületére érkező sugárzást elnyel:

$$\alpha_{fekete\ test} = 1$$

Így $M_{\lambda\ fekete\ test}$ ismeretében kiszámíthatjuk bármely test kisugárzott felületi teljesítményét ha tudjuk az abszorpciós tényezőjét:

$$M_{\lambda i} = \alpha_{\lambda i} M_{\lambda\ fekete\ test}$$



Egy lyuk egy sötét üregben jól közelíti az abszolút fekete testet

A fekete test kisugárzott felületi teljesítménye erősen hőmérséklet függő!

Stefan-Boltzmann törvény:

$$M = \sigma T^4$$

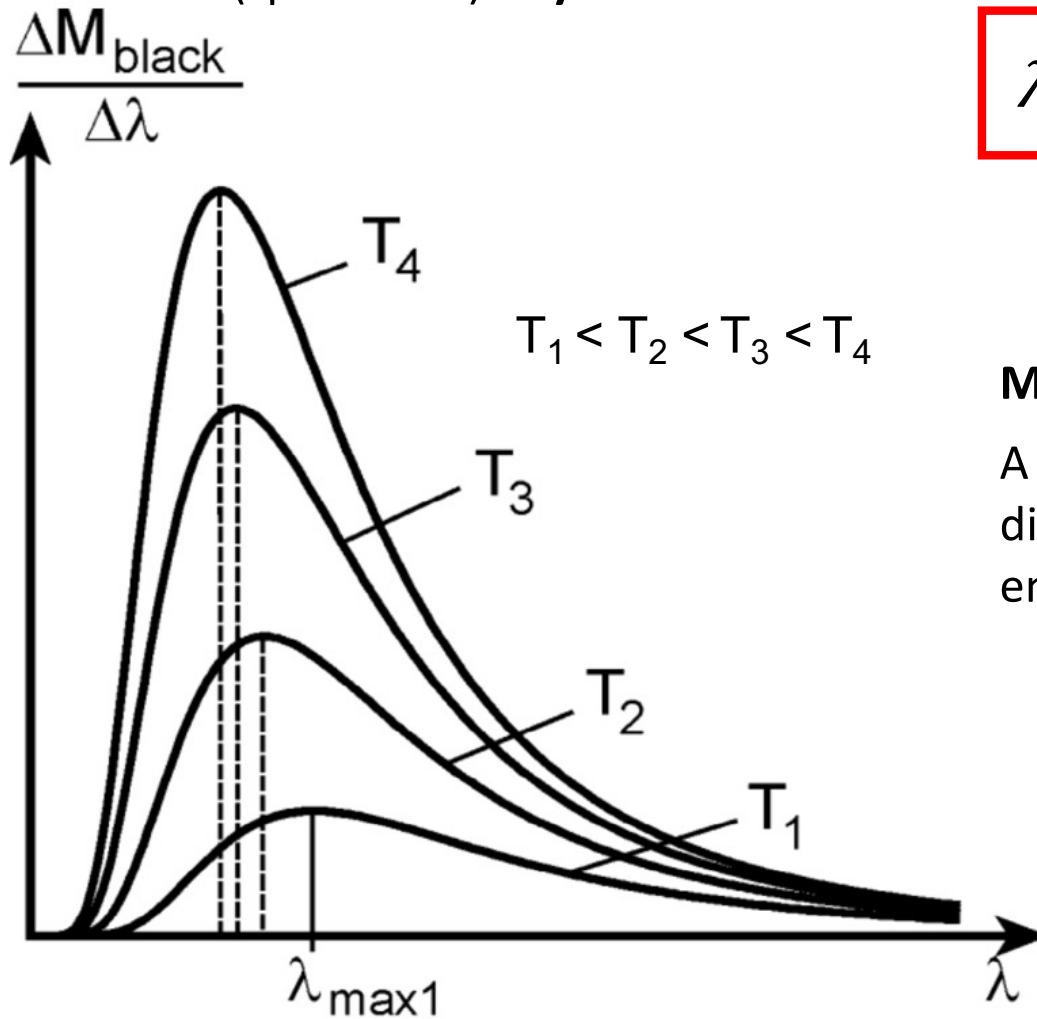
$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$



Jozef Stefan

Az abszolút fekete test

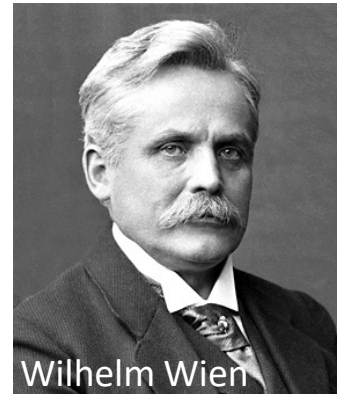
A fekete test emissziós színeképe (spektruma) **folytonos**.



Wien-féle eltolódási törvény

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

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T}$$



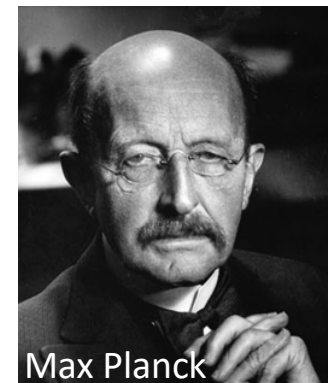
Max Planck sugárzási törvénye:

A fekete test sugárzás energiája diszkrét egységekben, *kvantumokban* emittál.

$$E = hf$$

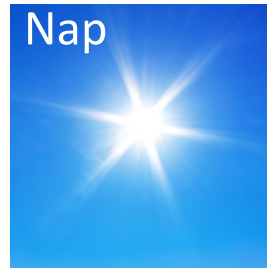
$$h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$M(f) = \frac{2\pi h f^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{hf}{k_B T}\right)} - 1}$$



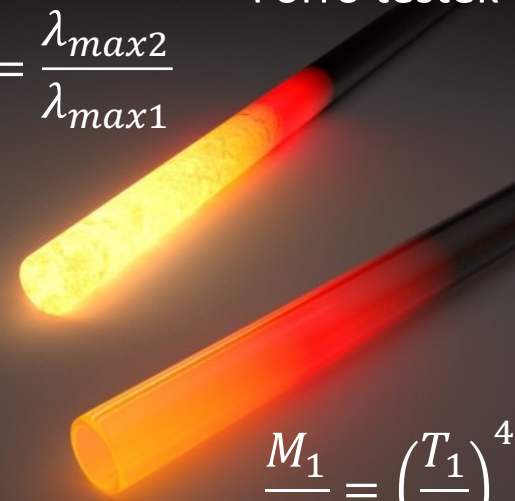
Hőmérsékleti sugárzó fényforrások

Nap

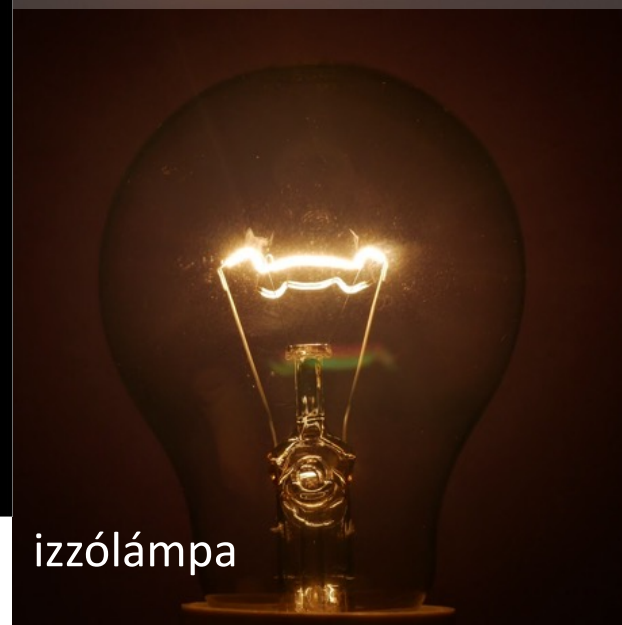
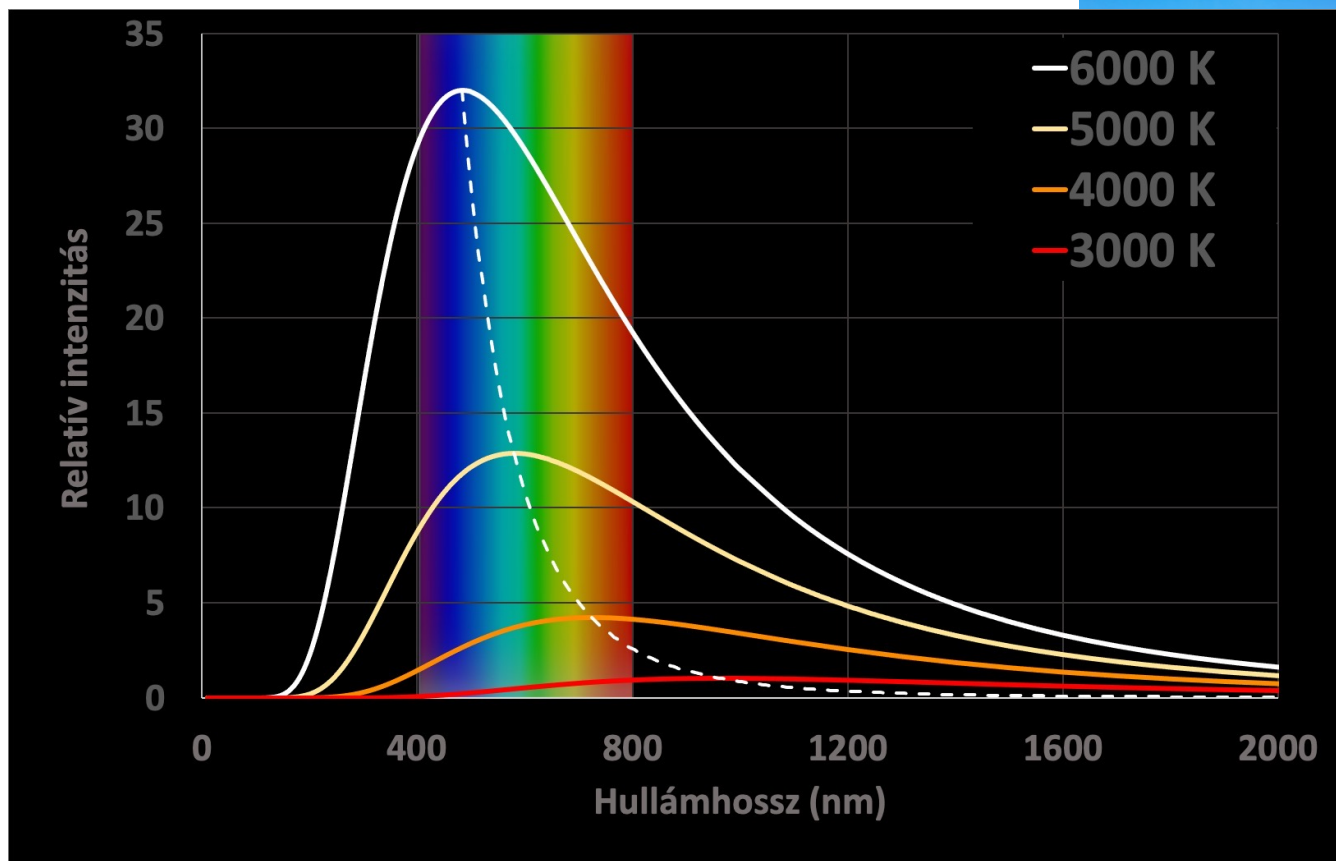


Forró testek

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\lambda_{max2}}{\lambda_{max1}}$$

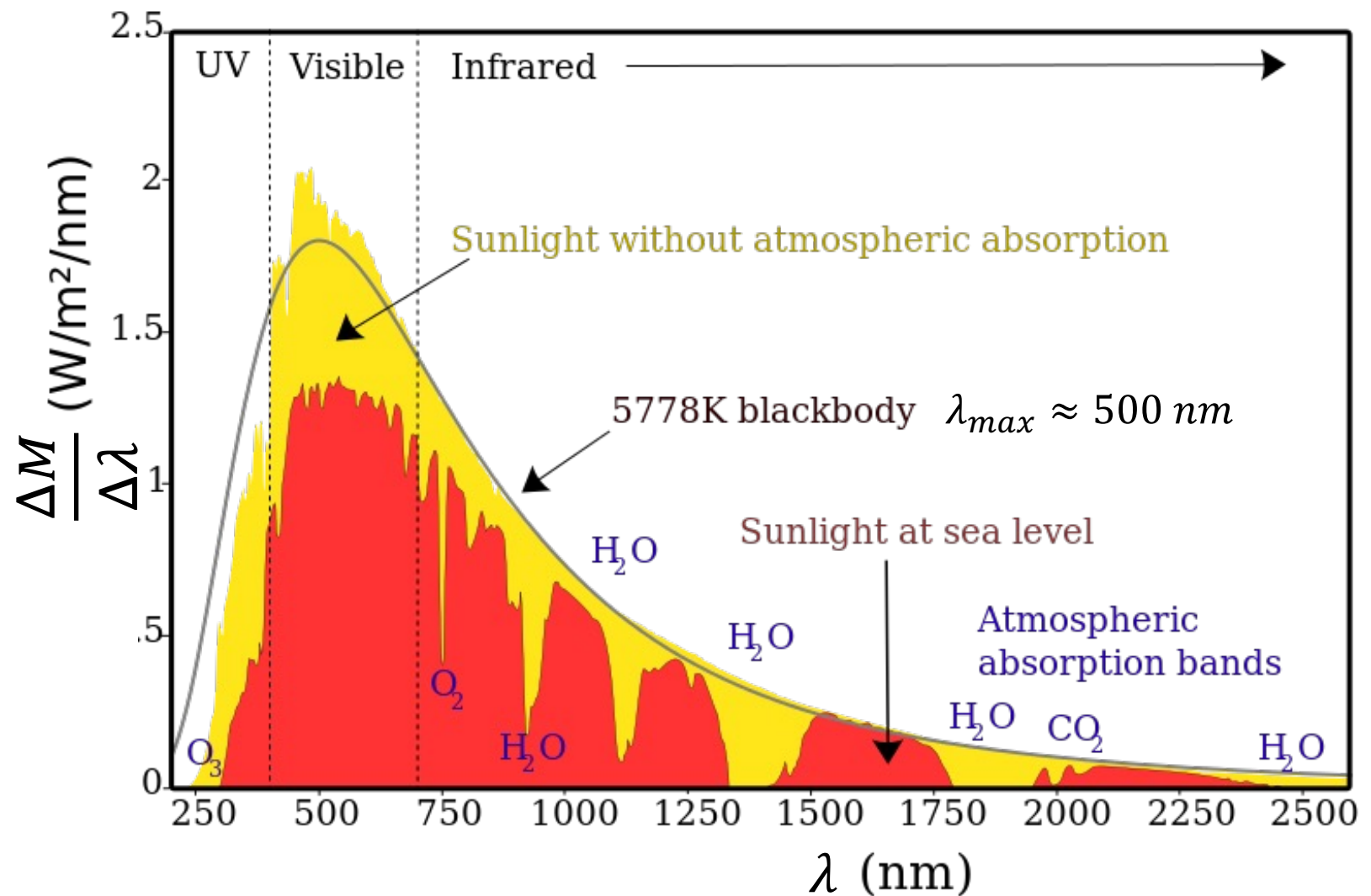


$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^4$$



izzólámpa

A napfény spektruma



Orvosi alkalmazás

Teletermográfia

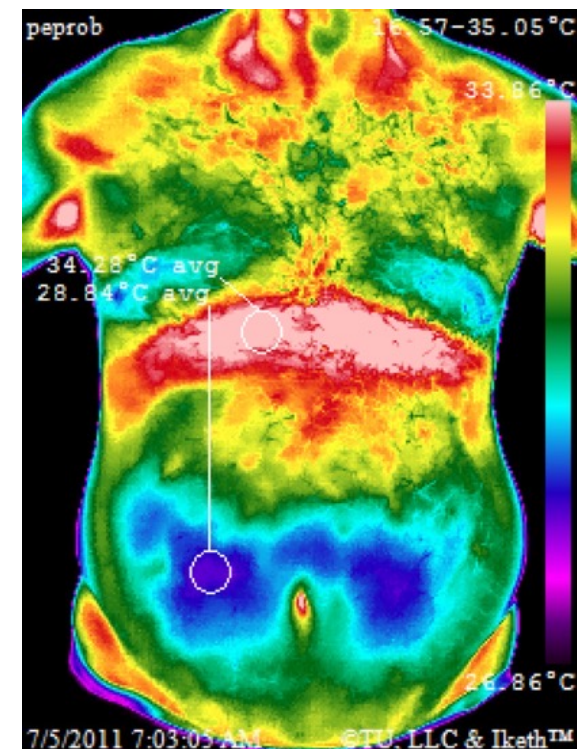
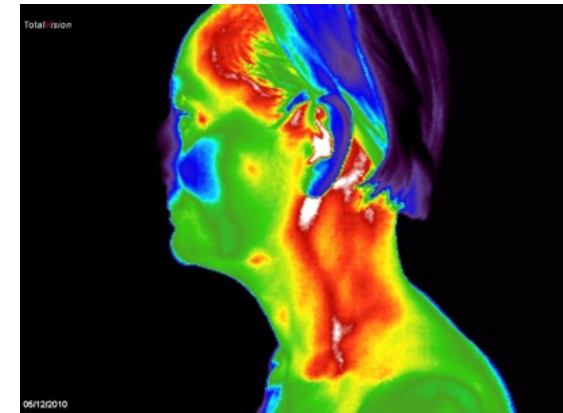
Az emberi test kisugárzott felületi teljesítményét méri az infravörös tartományban

Emberi test: $\lambda_{max} \approx 10 \mu m$ (IR)
 $\alpha \approx 0.95$ (95% -os fekete test)

A keletkezett kép hőmérsékleteloszlást mutat.



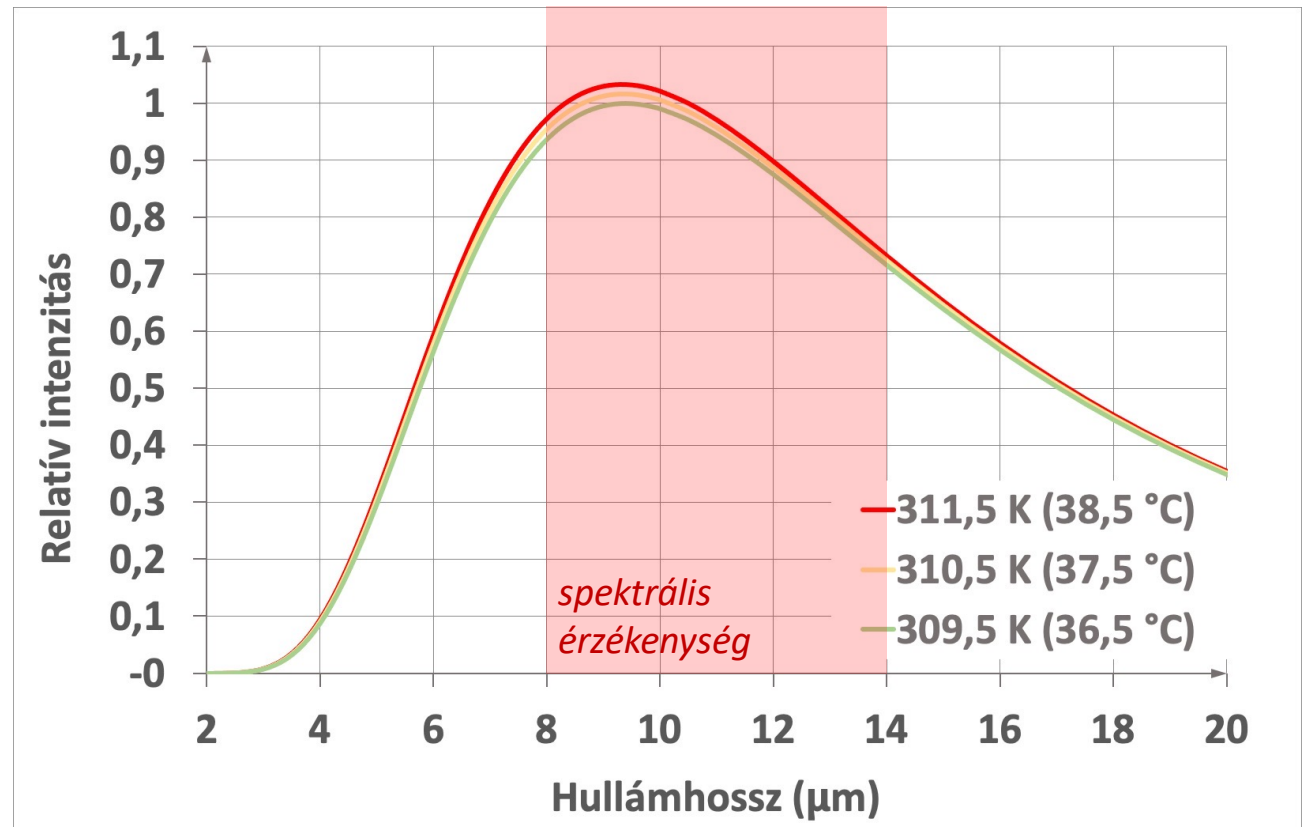
Orvosi infra szkennerek



Orvosi alkalmazások

Érintés mentes (“non-contact”) lázmérő

Az emberi test emissziós maximuma az infravörös tartományba ($\lambda_{\max} \sim 9 \mu\text{m}$) esik.
1 °C of hőmérséklet emelkedés mindössze ~1.5%-al növeli a kisugárzott felületi teljesítményt !



Lumineszcencia

Spontán fotonemisszió egy gerjesztett állapotú elektron relaxációja során.

Elemi lépései:

- Külső energia elnyelése
- Gerjesztés
- Az energia elektromágneses sugárzás formájában történő leadása (emisszió)

Lumineszcencia típusai

Gerjesztés módja	Név	Példa
Fény (VIS/UV)	Fotolumineszcencia	Fénycsövek (fénypor)
Elektromos	Elektrolumineszcencia	Hg gőz lámpa
Rádióaktív sugárzás	Radiolumineszcencia	NaI (Tl) (szcintillátor)
Mechanikai	Tribolumineszcencia	Ütés, surlódás
Biokémiai	Biolumineszcencia	Szentjánosbogár
Termikus	Termolumineszcencia	CaSO ₄ (Dy) (doziméter)

Relaxációs folyamat	Név	Példa
$S_1 - S_0$ (gyors)	Fluoreszcencia	Fluoreszcein
$T_1 - S_0$ (lassabb)	Foszforeszcencia	Foszfor

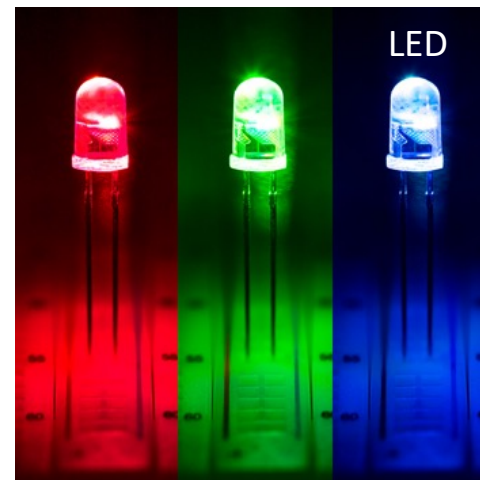
Fluoreszkáló festékoldatok



Biolumineszcencia



LED



Foszforeszcens óraszám



Radiolumineszcencia - szcintilláció

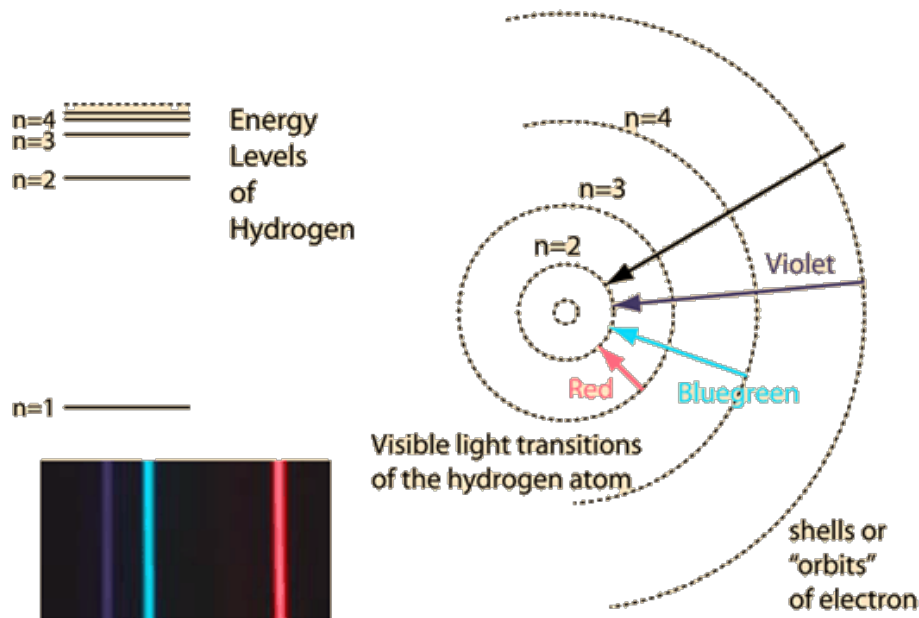
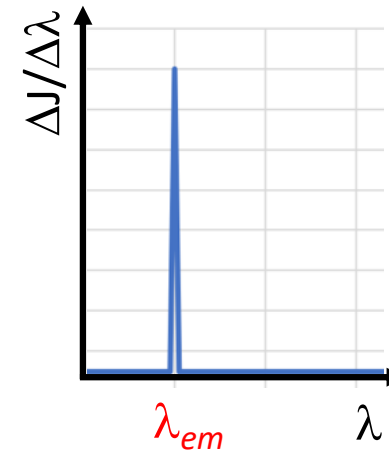
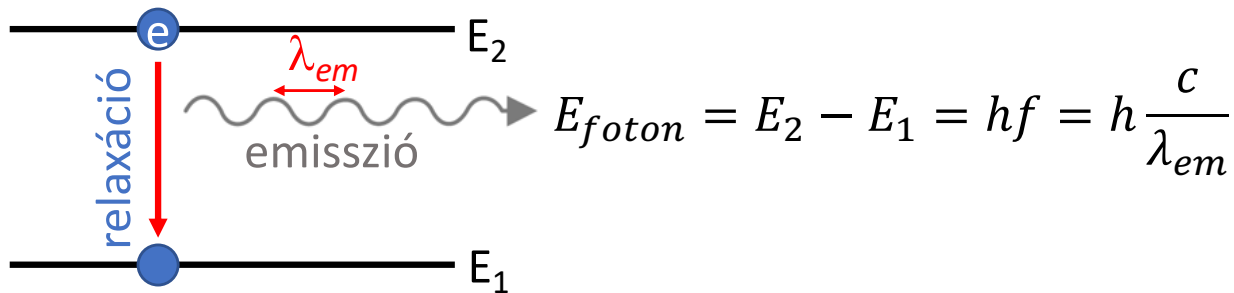


Na-lámpa

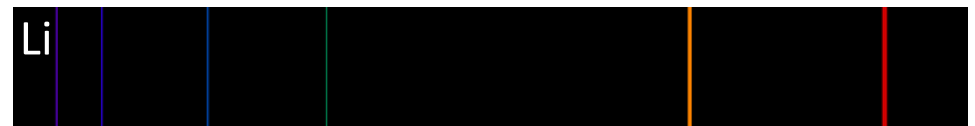
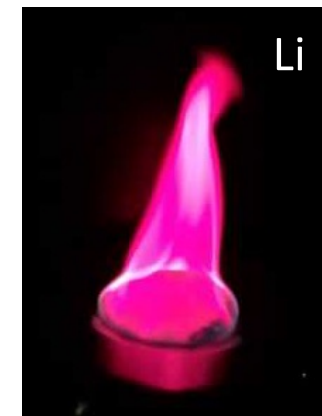


Atomok lumineszcenciája

Az atomok lumineszcencia spektruma **vonalas**.

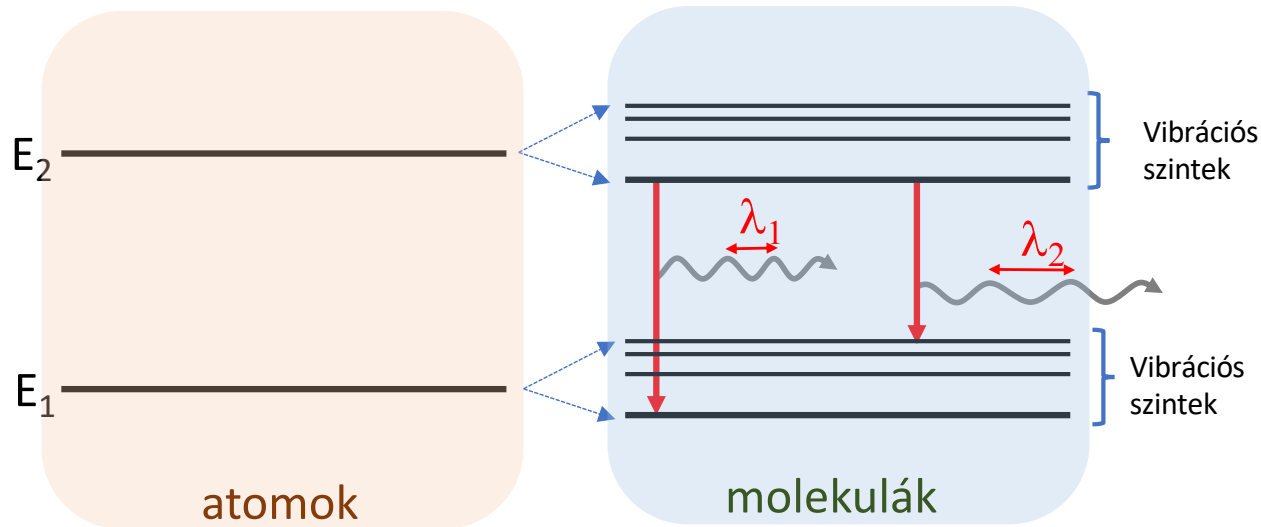


Lángfestés



Molekulák lumineszcenciája

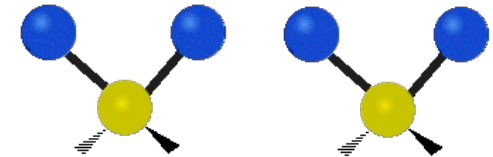
A diszkrét atomi energiaszintek felhasadnak **vibrációs szintekre**.



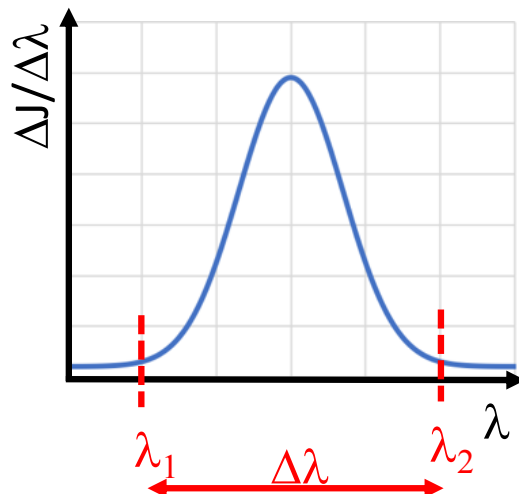
A molekula energiája az elektron-, vibrációs- és rotációs-átmeneti energiák összege:

$$E_{\text{össz}} = E_e + E_v + E_r$$

Molekula-vibrációk (2 példa):



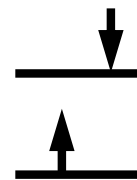
A molekulák lumineszcencia spektruma **sávos**.



A gerjesztett elektronok spinállapotai

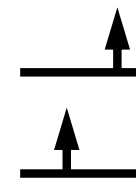
Szingulett állapot (S)

Az eredő spinkvantumszám
 $S = 0$ (+1/2, -1/2)



Triplett állapot (T)

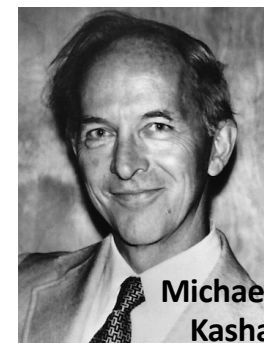
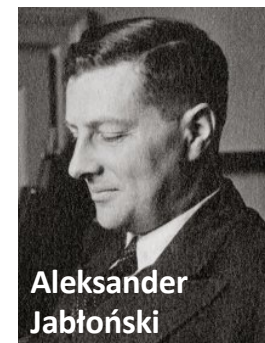
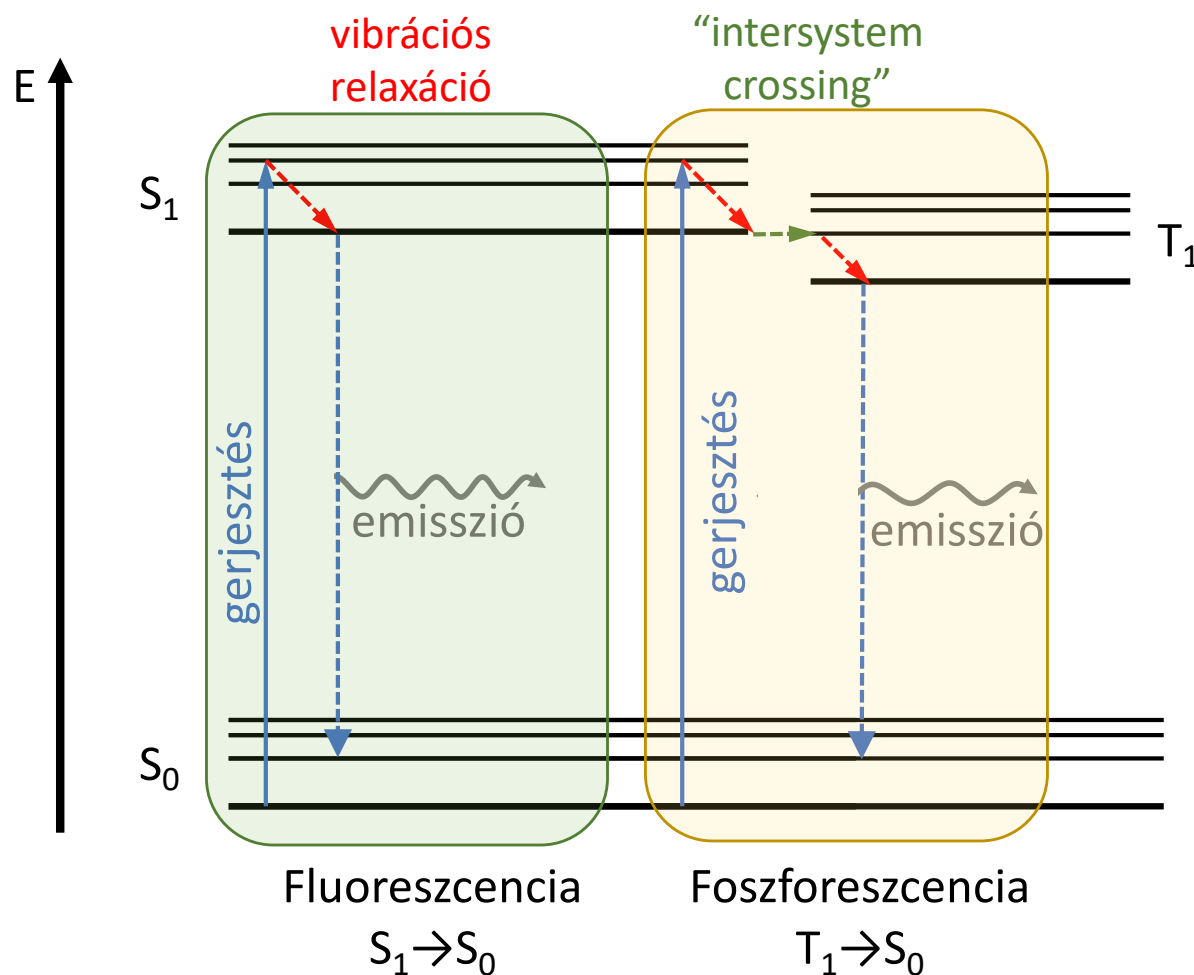
Az eredő spinkvantumszám
 $S = 1$ (+1/2, +1/2)



A mágneses momentum orientációja: $2S + 1$

Molekulák lumineszcenciája

Jabłoński diagram

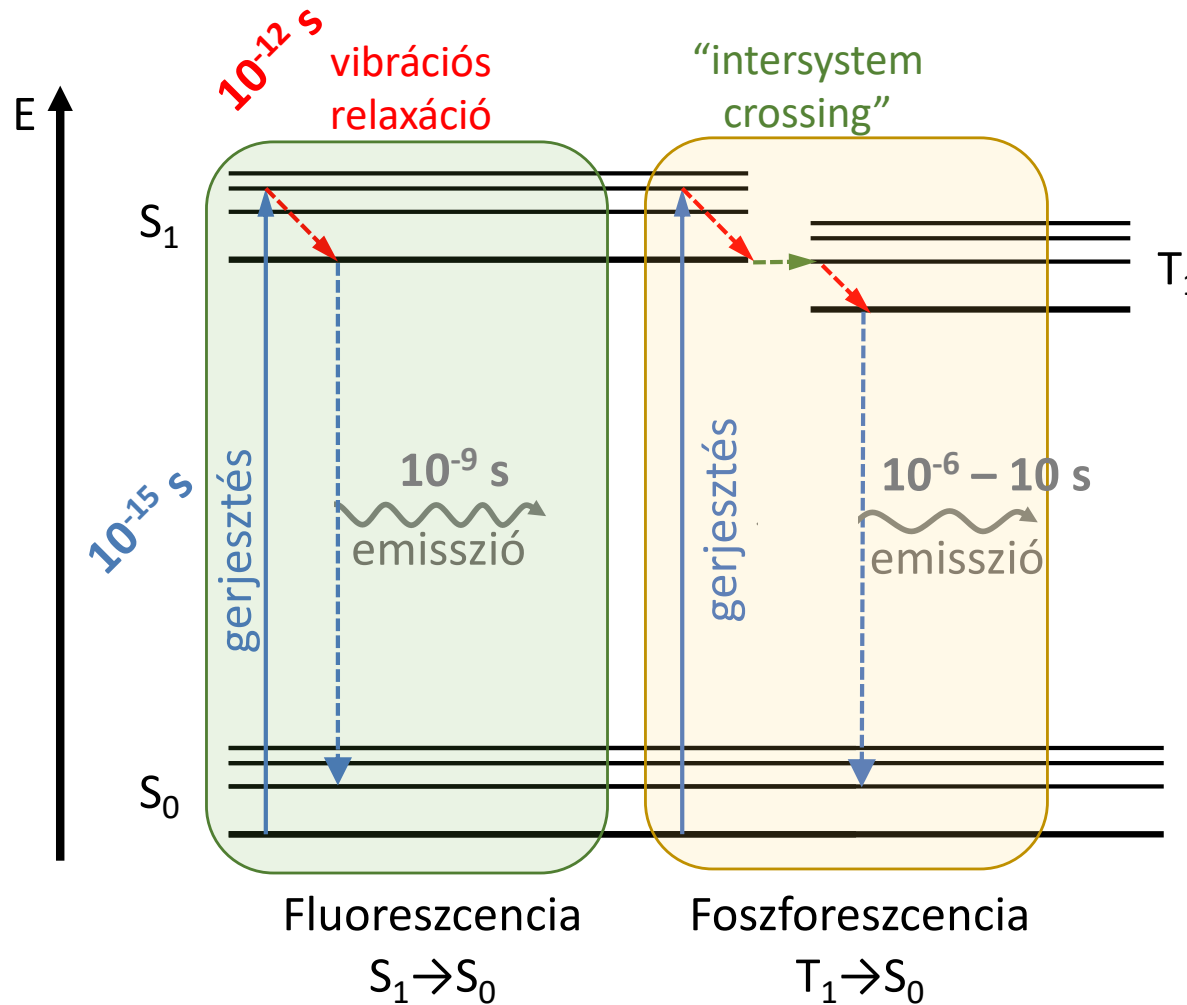


Kasha szabály:

A gerjesztett molekula gyors átmenetekkel az S_1 elektronállapot alap vibrációs szintjére kerül és a fotonemisszió mindig ebből az állapotból történik.

Molekulák lumineszcenciája

Jablonsky diagram



Élettartamok: (τ)

Gerjesztés:
femtosekundum

Vibrációs relaxáció:
pikosekundum

Fluoreszcencia emisszió:
nanosekundum

Foszforeszcencia emisszió:
*mikrosekundumtól
szekundumokig*

Lumieszcencia jellemzése

Kvantumhatásfok (Q_F):

$$Q_F = \frac{k_f}{k_f + k_{nr}} = \frac{\text{emittált fotonok száma}}{\text{elnyelt fotonok száma}}$$

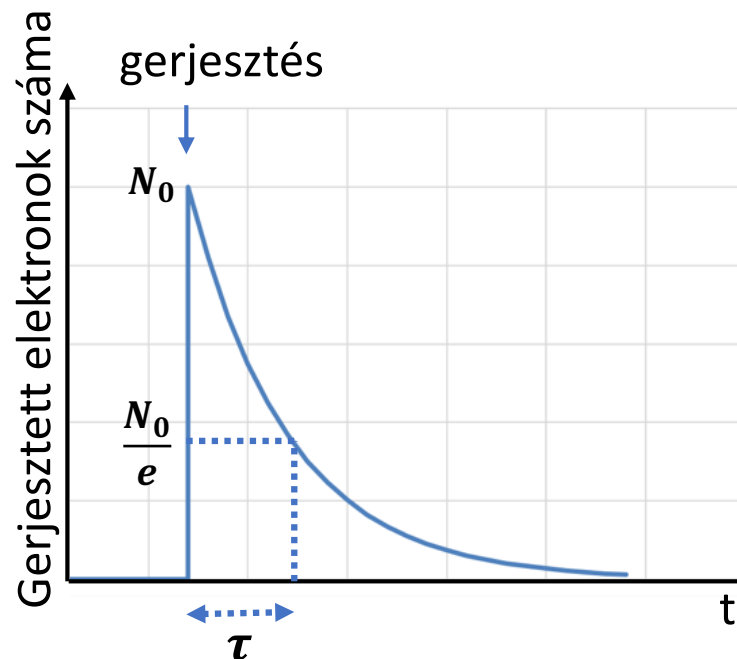
Lumineszcencia élettartam (τ):

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\tau = \frac{1}{k_f + k_{nr}}$$

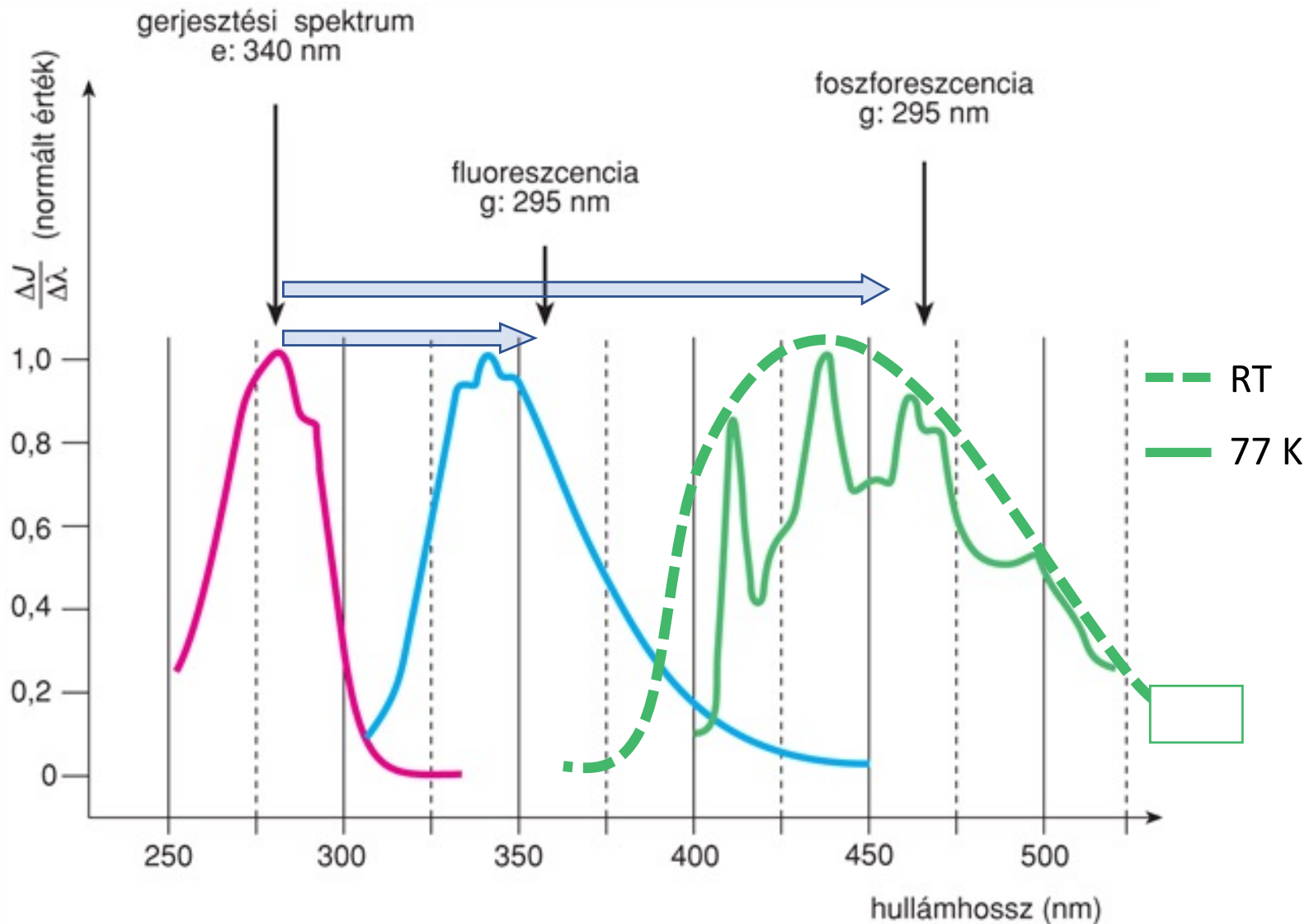
k_f : Emisszió reakciósebessége

k_{nr} : Nem emittáló átmenetek reakciósebessége



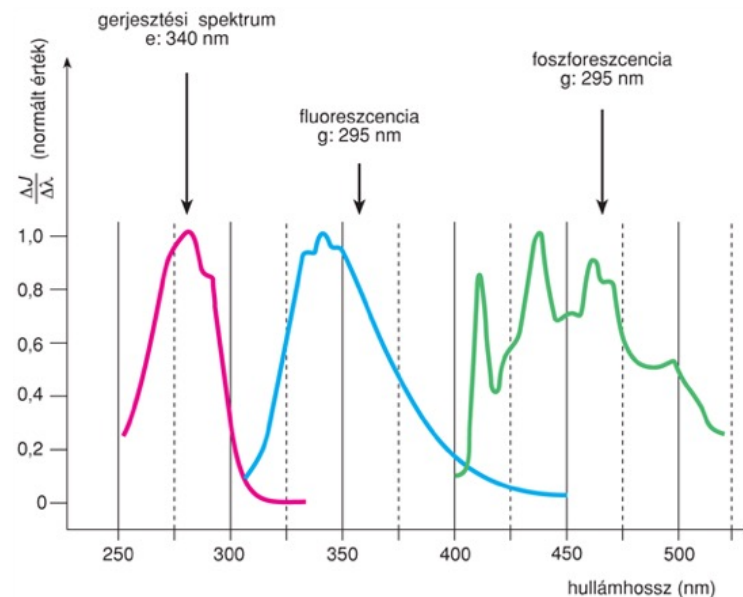
Stokes-féle eltolódás

Az energiaveszteség miatt az emissziós spektrum a gerjesztésihez képest kisebb energiák felé tolódik.



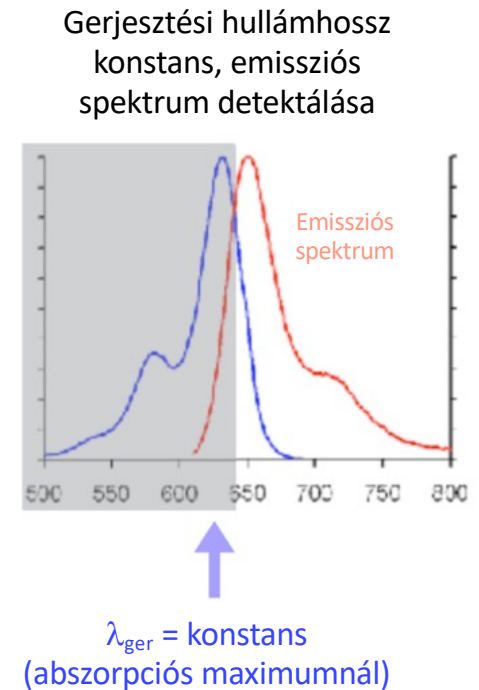
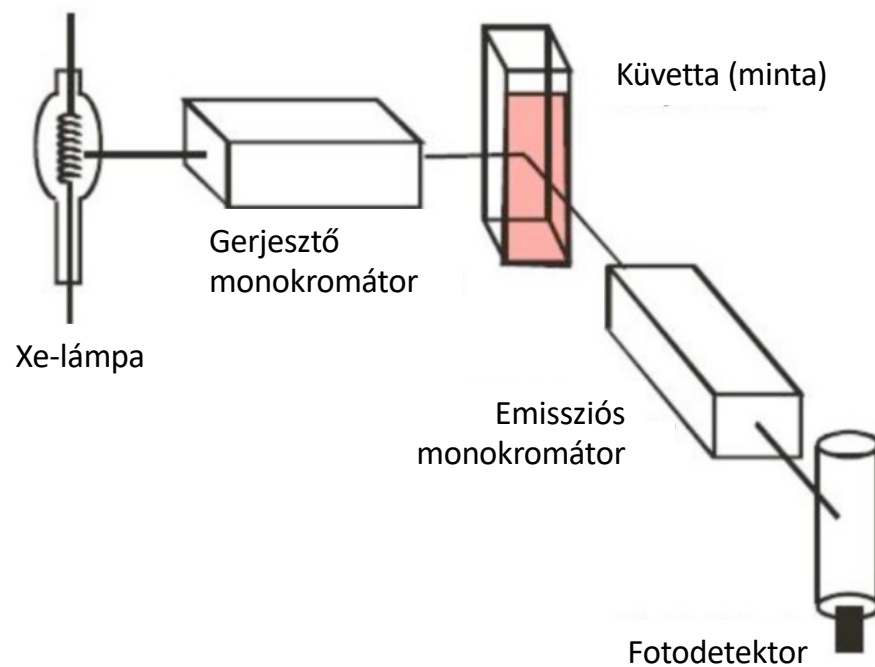
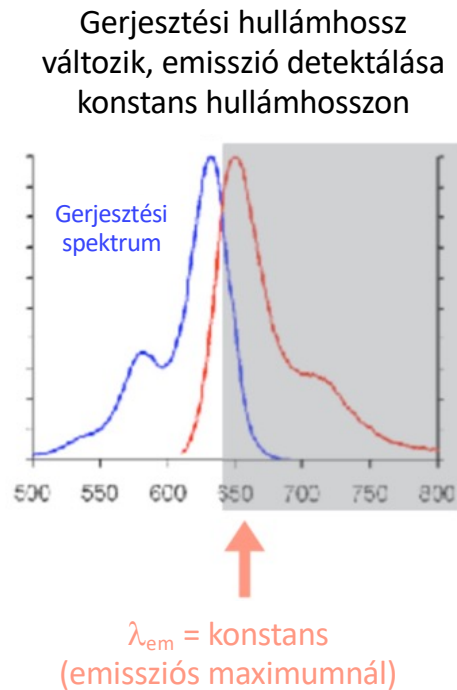
Az emissziós folyamatok összehasonlítása

	Fluoreszcencia	Foszforeszcencia
Relxáció	Szingulett állapotból $S_1 \rightarrow S_0$	Triplett állapotból $T_1 \rightarrow S_0$
Élettartam (τ)	Nanoszekundum	Mikroszekundumtól szekundumokig
Stokes-féle eltolódás	Kiessebb energiaveszteség	Nagyobb energiaveszteség (mert T_1 energiája alacsonyabb mint S_1 -é)



A lumineszcencia mérése

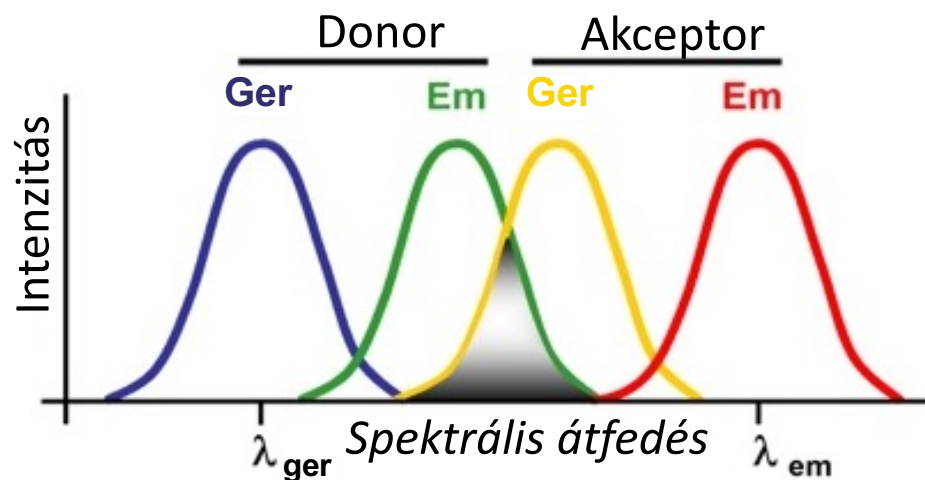
Spektrofluoriméter



Alkalmazások - FRET

Förster Rezonancia Energia Transzfer

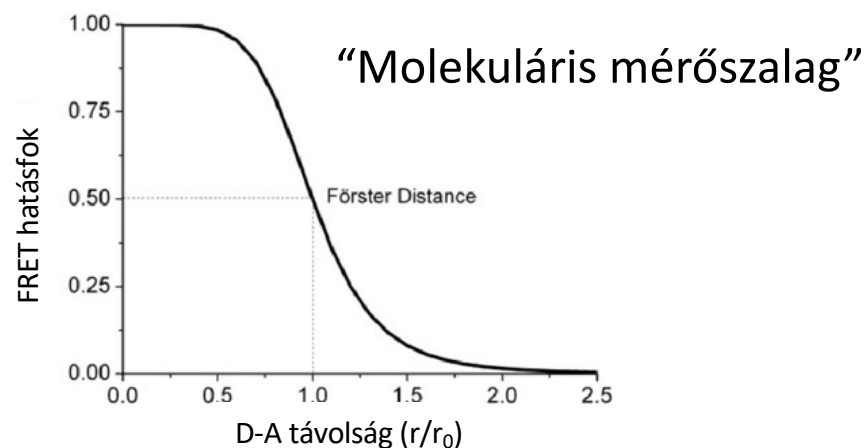
A gerjesztési energia egy donor molekuláról emisszió nélkül egy acceptor molekulára jut dipól-dipól kölcsönhatáson keresztül. Feltétele, hogy a donor emissziós és az acceptor gerjesztési spektruma átfedjen.



FRET hatásfok (E):

$$E = \frac{1}{1 + (r/r_0)^6}$$

r_0 : Förster távolság



Alkalmazások - FRAP

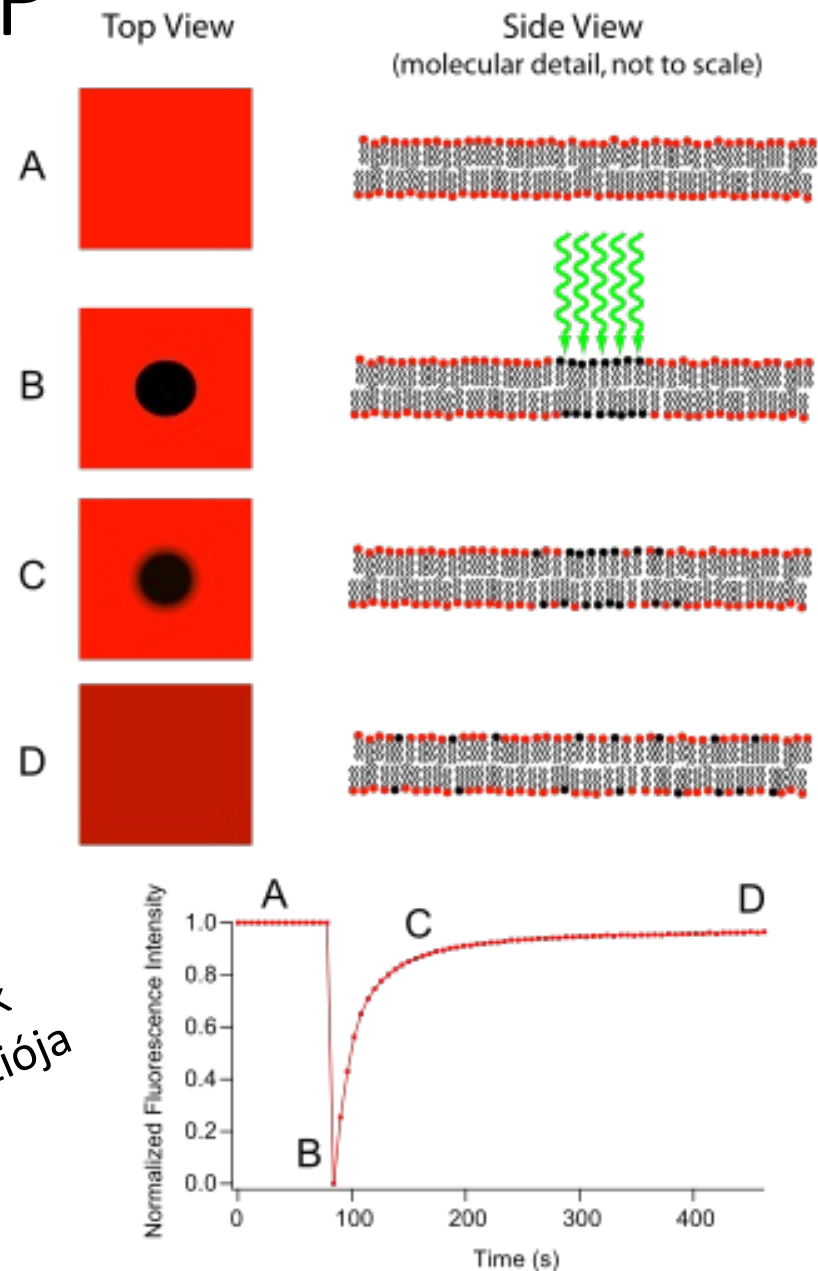
Fluorescence Recovery After Photobleaching

(*Fluoreszcencia visszatérése „photobleaching” után*)

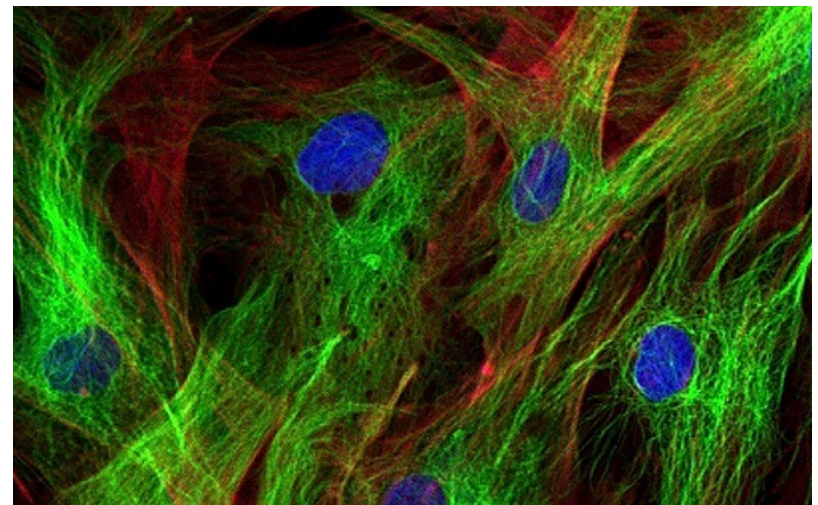
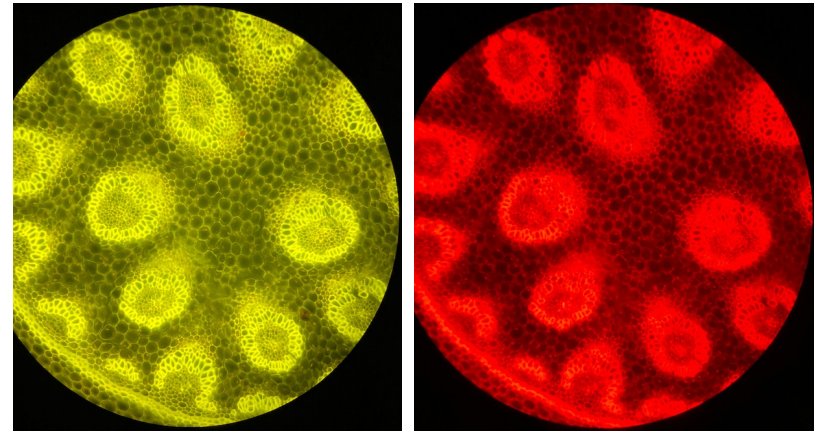
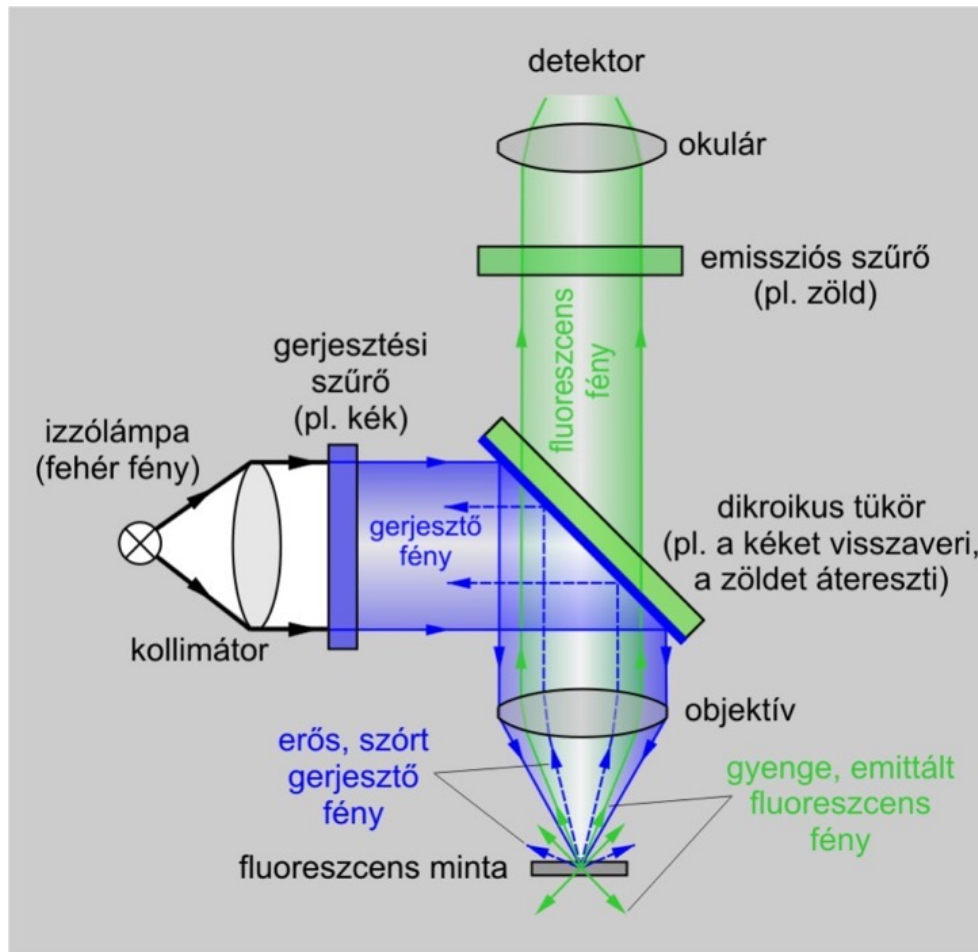
Photobleaching (Kiegész):

A fluoreszcencia képesség végleges elvesztése fotokémiai reakciók miatt.

Lipid molekulák
laterális diffúziója

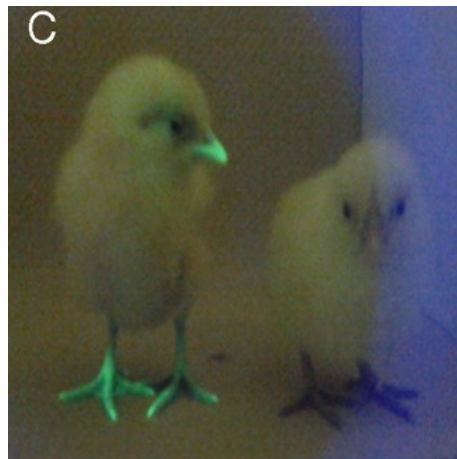


Fluoreszcencia mikroszkóp



Orvosbiológiai alkalmazások

Fluoreszcens transzgenikus
állatok



Fluoreszcencia a sebészetben

