

# Termikus sugárzás, lumineszcencia

Orvosi Biofizika I. 2025. november 4.

Kellermayer Miklós

Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet



**SEMMELWEIS**  
EGYETEM 1769

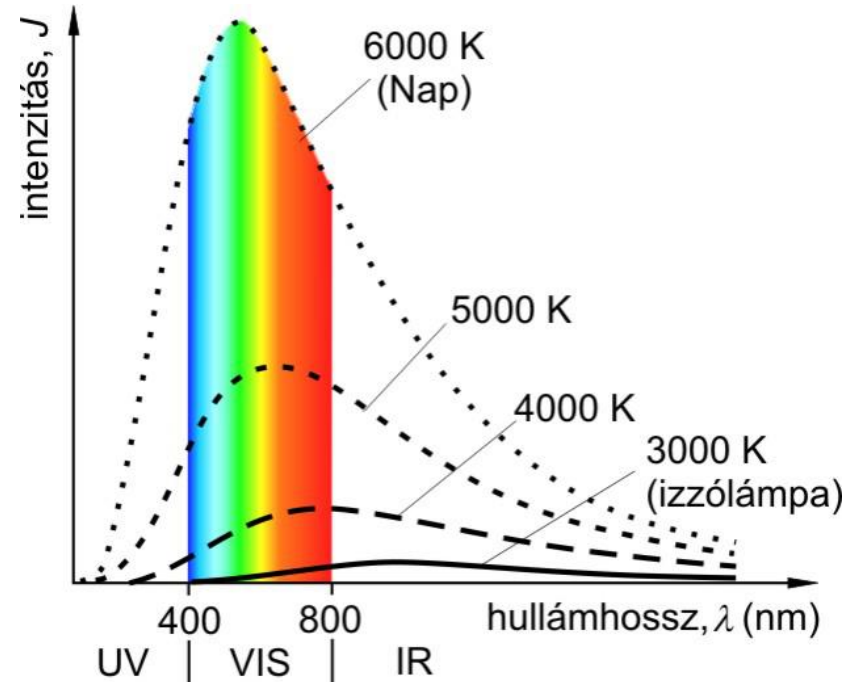
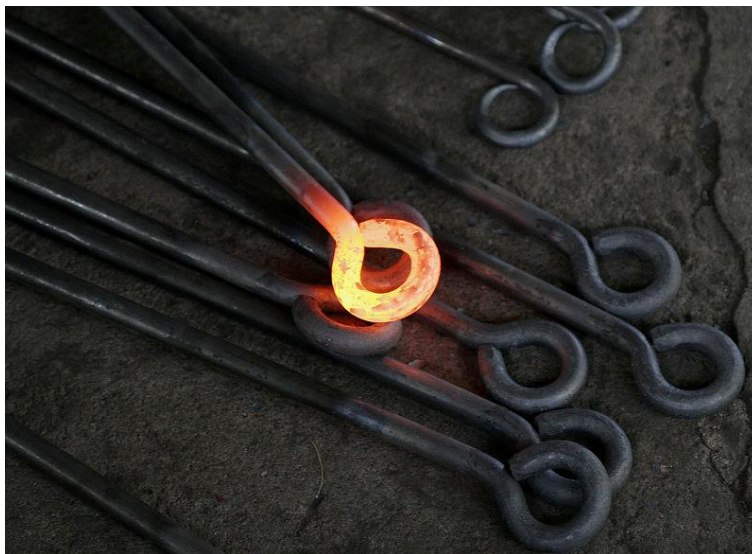
# Fény keltése

## Emisszió: "kibocsátás"

### 1. Termikus ("feketetest" v. hő-) sugárzás

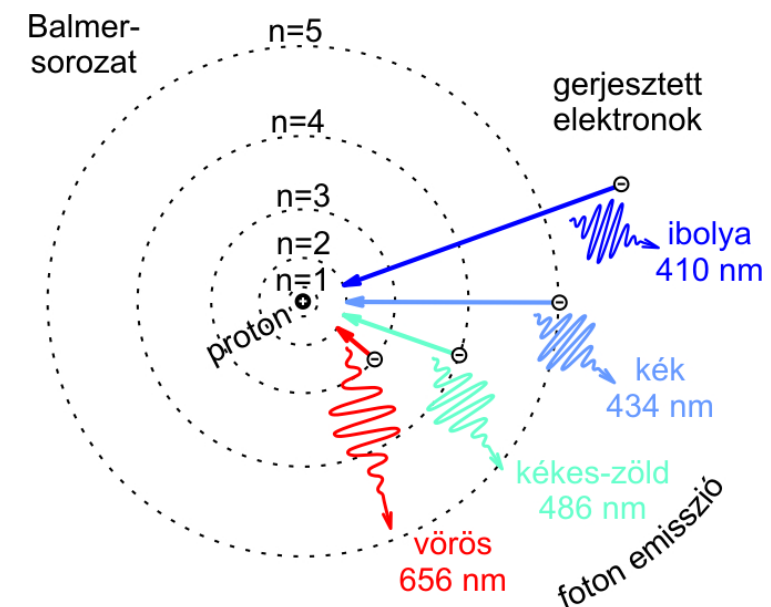
**Mechanizmus:** atomok, molekulák hőmozgása

Fényenergia forrása: rendszer belső energiája

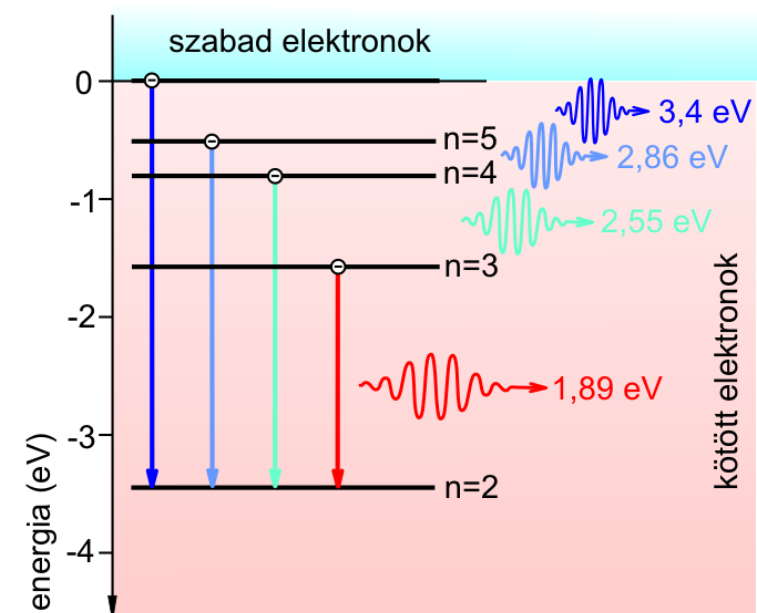


### 2. Lumineszcencia

**Mechanizmus:** gerjesztett állapoti energia kibocsátása

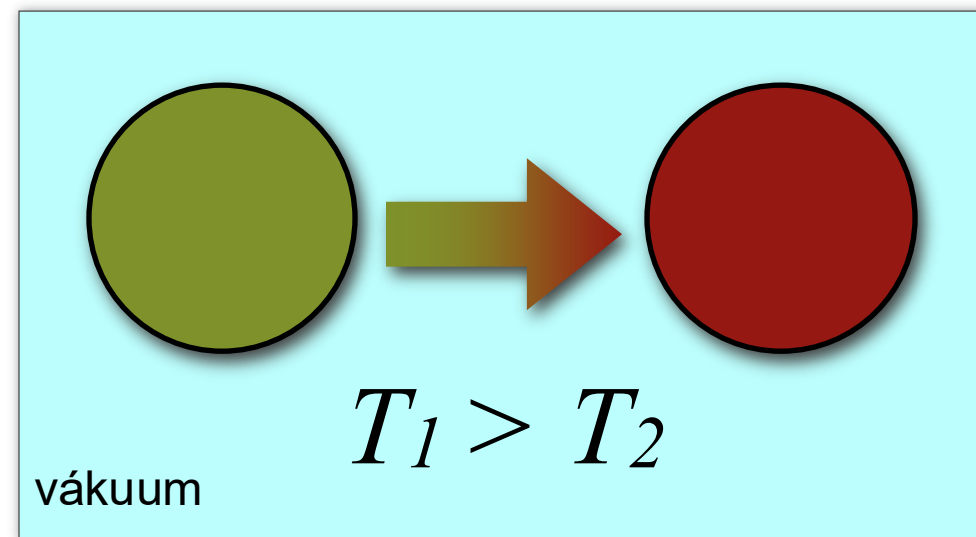


Fényenergia forrása: gerjesztett állapot energiája

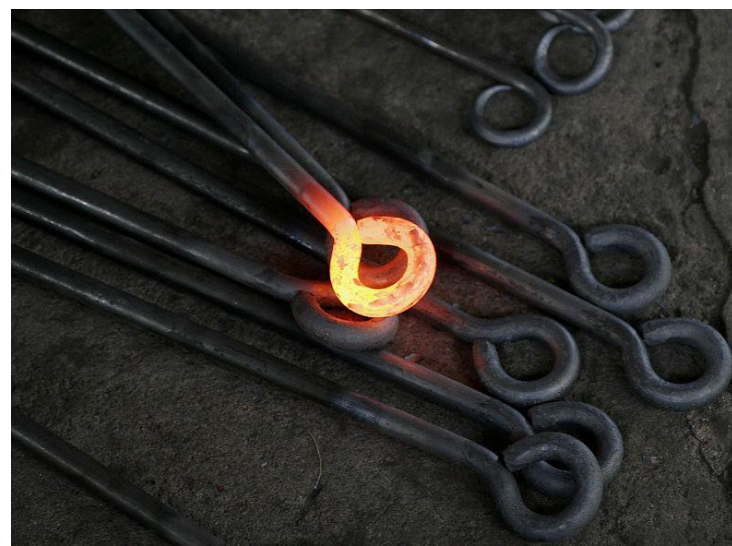


# “Feketetest” (Termikus) sugárzás

A fénykeltés egyik mechanizmusa



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 fekete test minden ráeső fényt elnyel

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

Kisugárzott felületi teljesítmény ( $M$ ) és abszorpciós tényező ( $\alpha$ ) aránya konstans (Kirchoff törvénye):



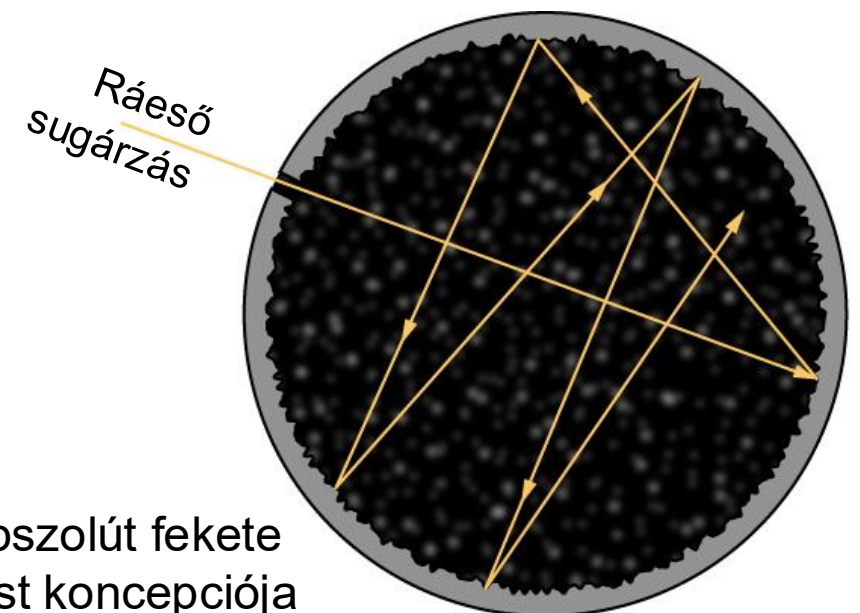
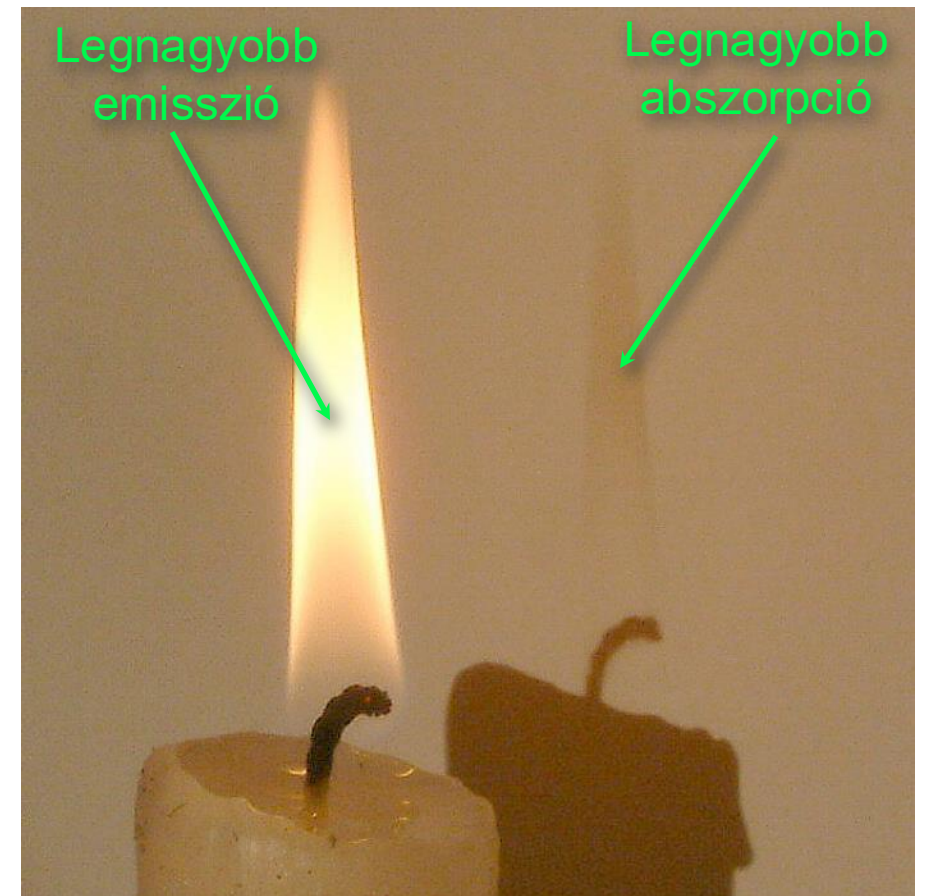
Gustav Robert Kirchhoff  
(1824-1887)

$$\frac{M_{\lambda_i}}{\alpha_{\lambda_i}} = \frac{M_{\lambda_j}}{\alpha_{\lambda_j}}$$

Abszolút fekete testre (BB\*):

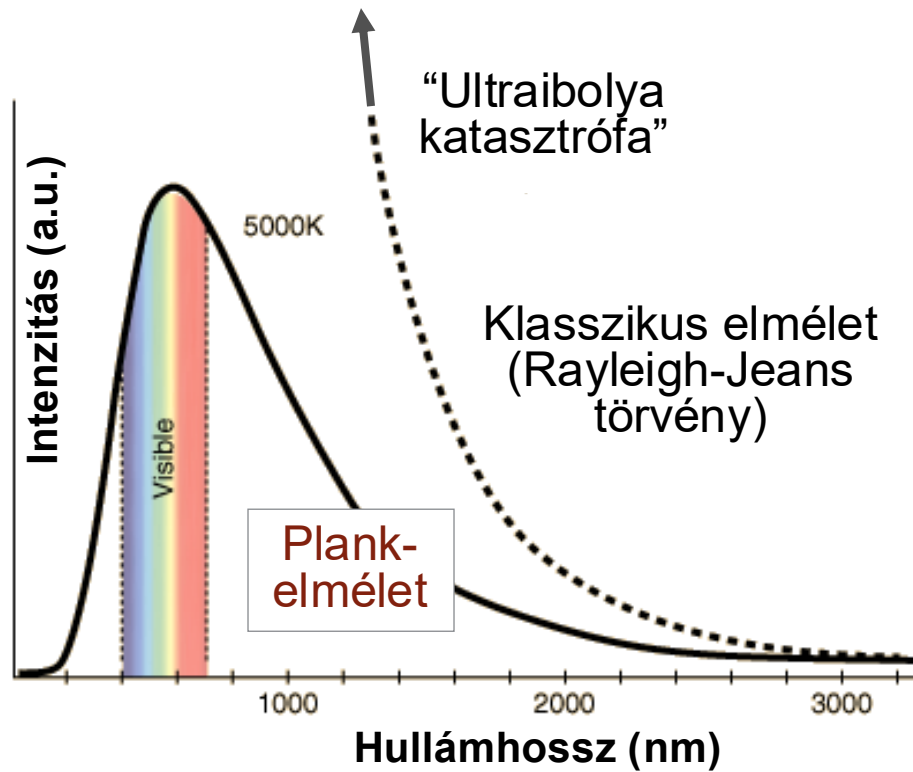
$$\alpha_{\lambda_{BB}} = 1 \quad (*BB = \text{"black body"})$$

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



# Termikus sugárzás

## Tulajdonságok és levonható következtetések



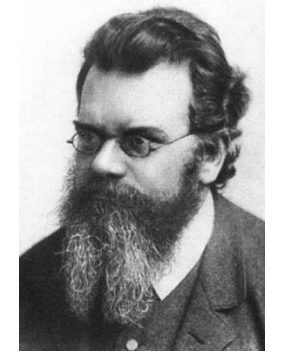
Stefan-Boltzmann törvény:

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

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



Jozef Stefan  
(1835-1893)



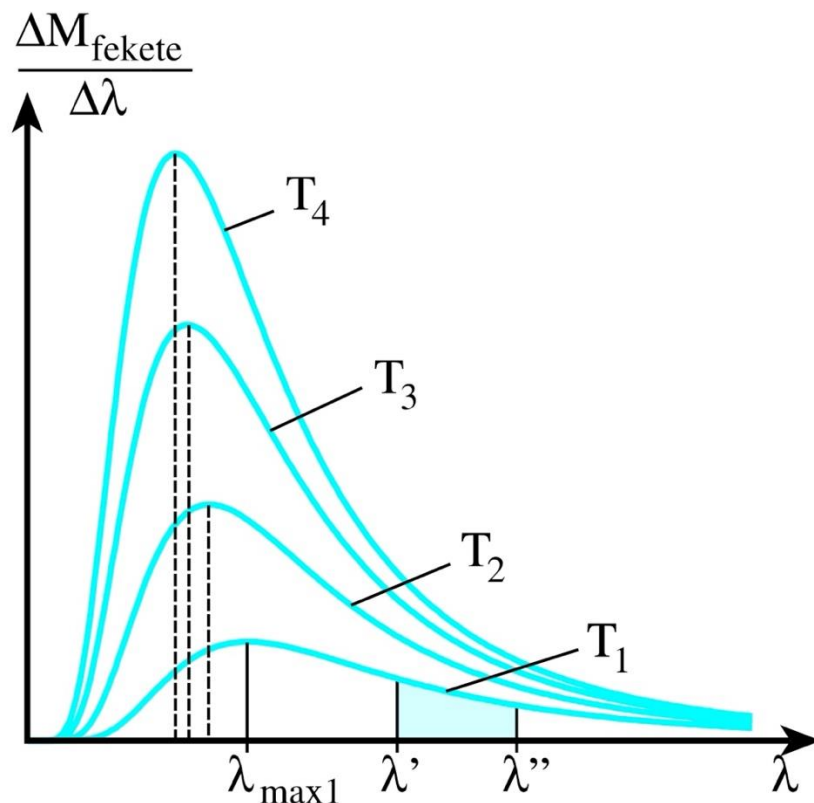
Ludwig E. Boltzmann  
(1844-1906)

Wien-féle eltolódási törvény:

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



Wilhelm Wien  
(1864-1928)

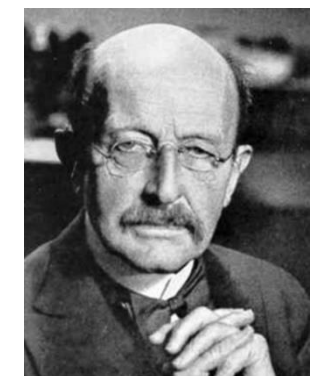


Planck-féle sugárzási törvény:

$$E = hf$$

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

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

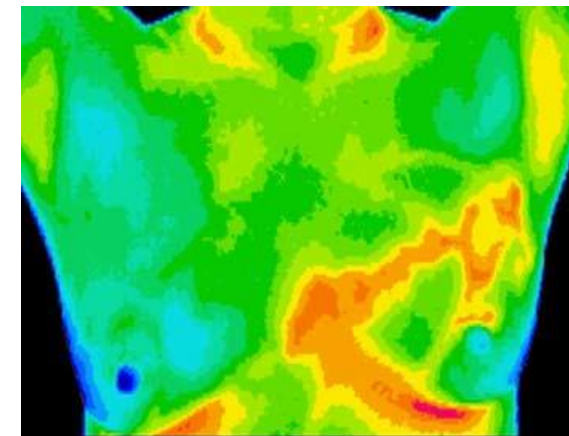


Max K. E. L. Planck  
(1858-1947)

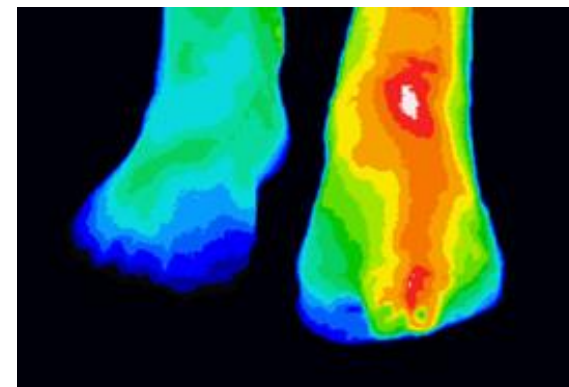
# Termikus sugárzás alkalmazása

## Thermográfia, infradiagnosztika

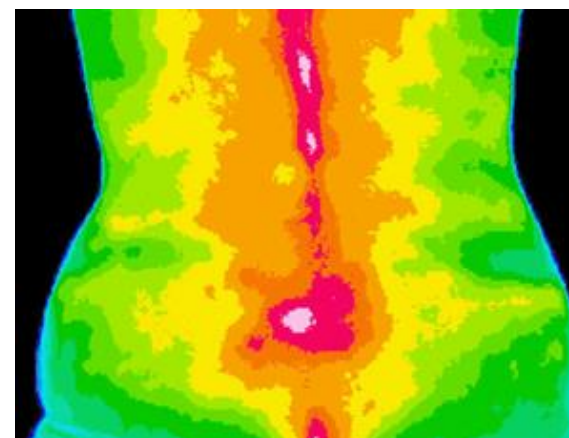
Nem abszorbeáló rétegeten “át lehet látni”



Emlőszűrés,  
emlőcarcinoma



Gyulladás



Krónikus  
musculoskeletális  
stressz (fájdalom)

Reptéri termográfia



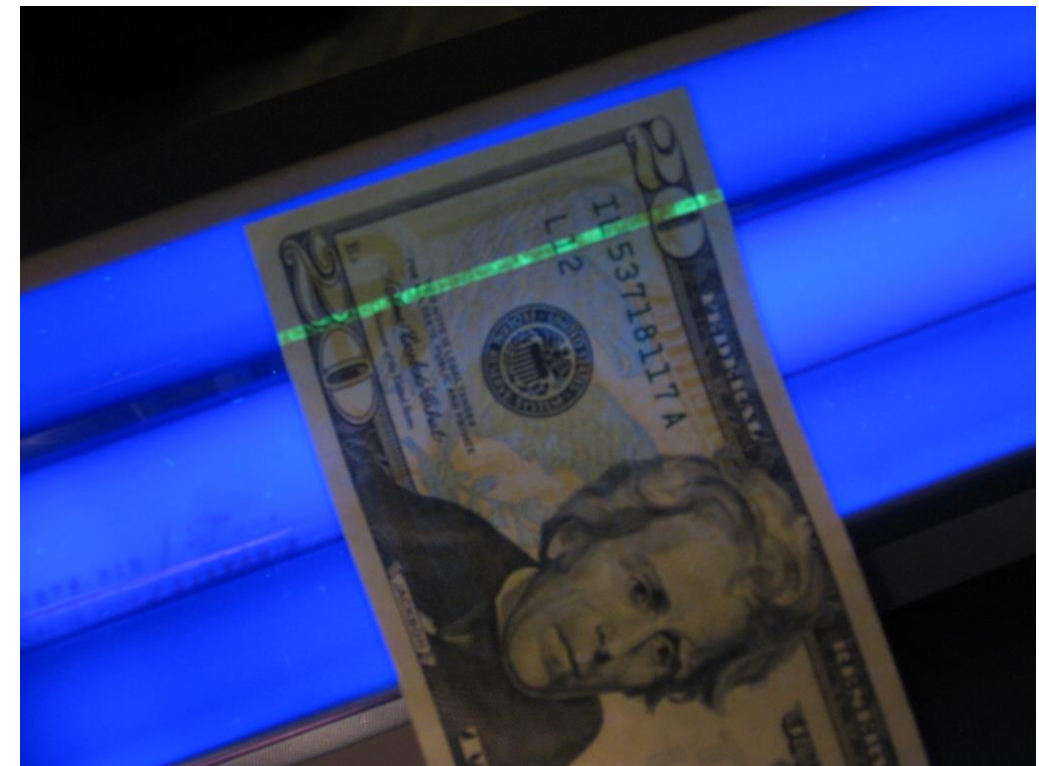
Lázás állapot, epidémia/pandémia detektálása, követése

# Lumineszcencia

- Gerjesztett állapotból fényemisszióval járó relaxáció
- A hőmérsékleti sugárzáson felül kibocsátott sugárzás
- “Hideg fény”
- Fluoreszcencia és foszforeszcencia

## Lumineszcencia mindenütt

Foto-  
lumineszcencia

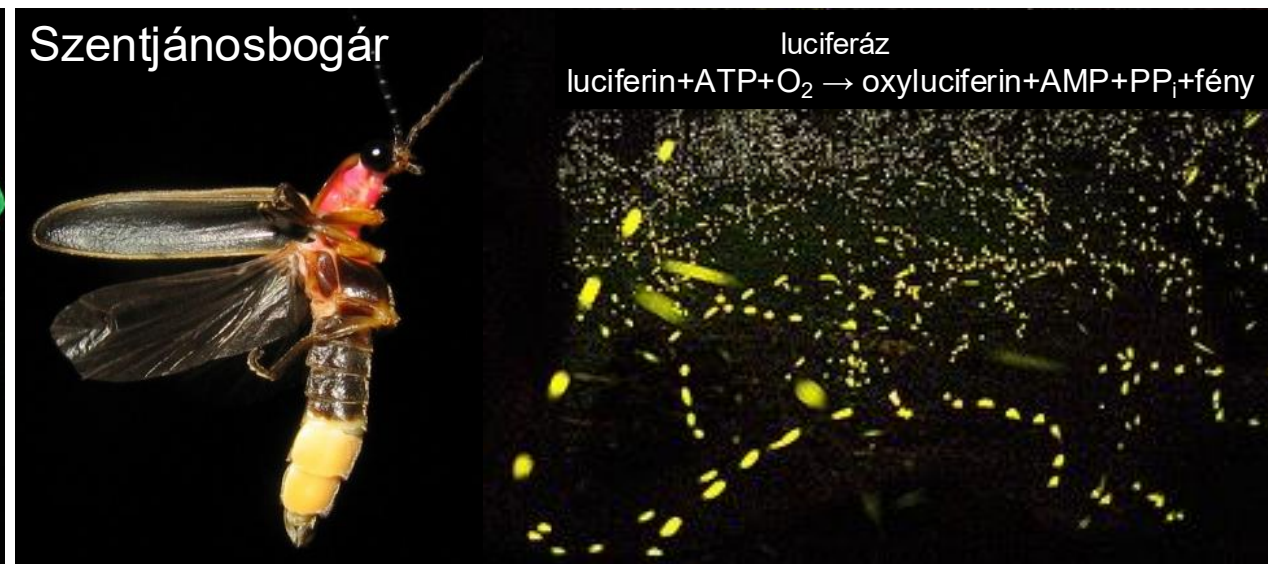


# Lumineszcencia mindenütt

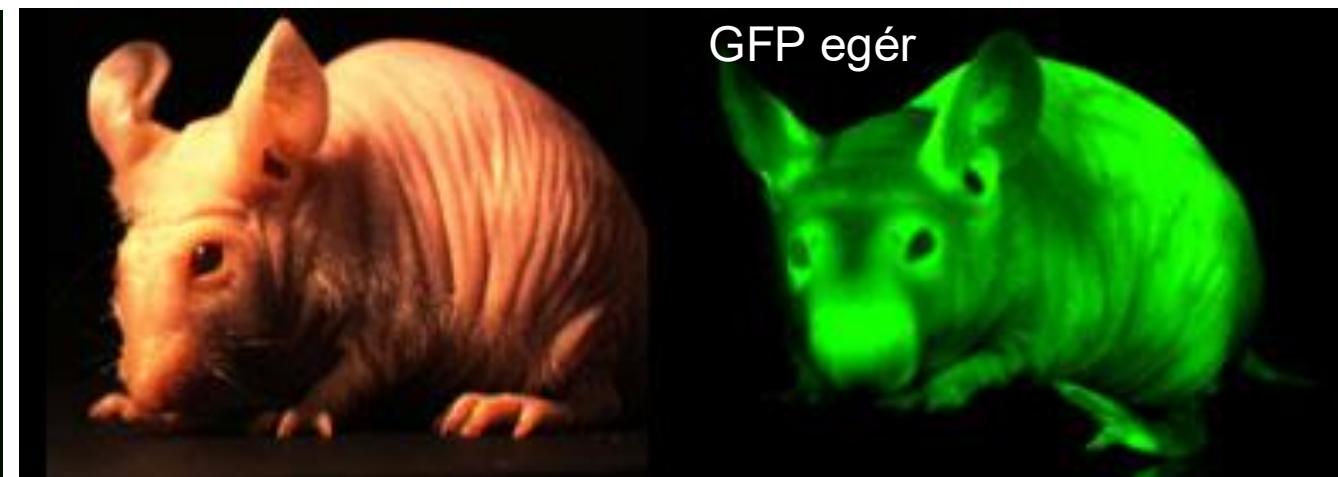
Radio-  
lumineszcencia



Bio-/kemi-  
lumineszcencia



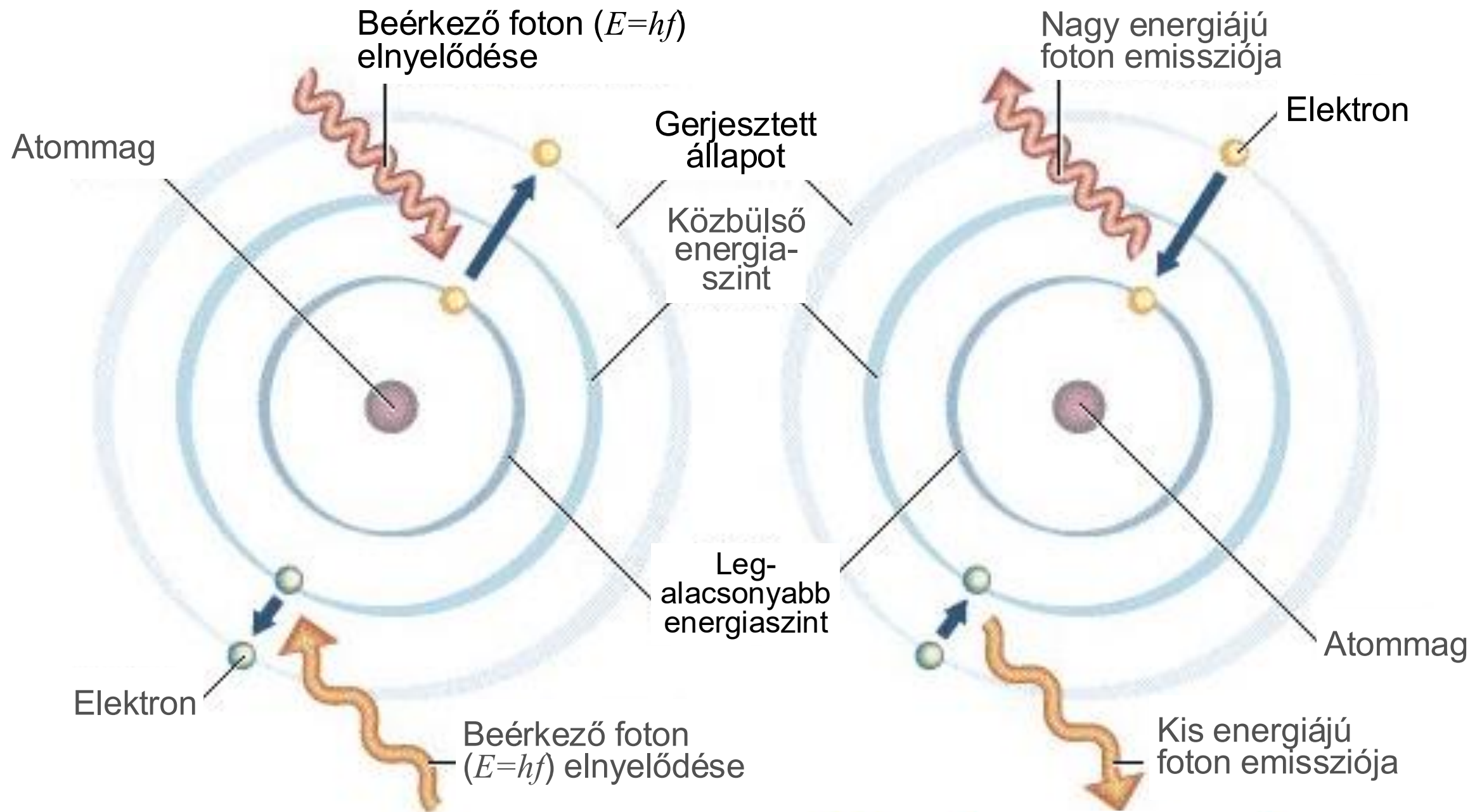
Fluoreszcencia  
alkalmazások



# A lumineszcencia típusai

<b>Gerjesztés <i>módja</i> szerint</b>	<b>Lumineszcencia típusa</b>
fényabszorpció	fotolumineszcencia
kémiai reakció	kemilumineszcencia, biolumineszcencia
termikusan aktivált ion-rekombináció	termolumineszcencia
töltés injekció	elektrolumineszcencia
nagyenergiájú radioaktív sugárzás	radiolumineszcencia
súrlódás	tribolumineszcencia
hanghullámok	szonolumineszcencia
<b>Gerjesztett <i>állapot</i> szerint</b>	<b>Lumineszcencia típusa</b>
első gerjesztett szingulett állapot	fluoreszcencia
legalsó (gerjesztet) triplett állapot	foszforeszcencia

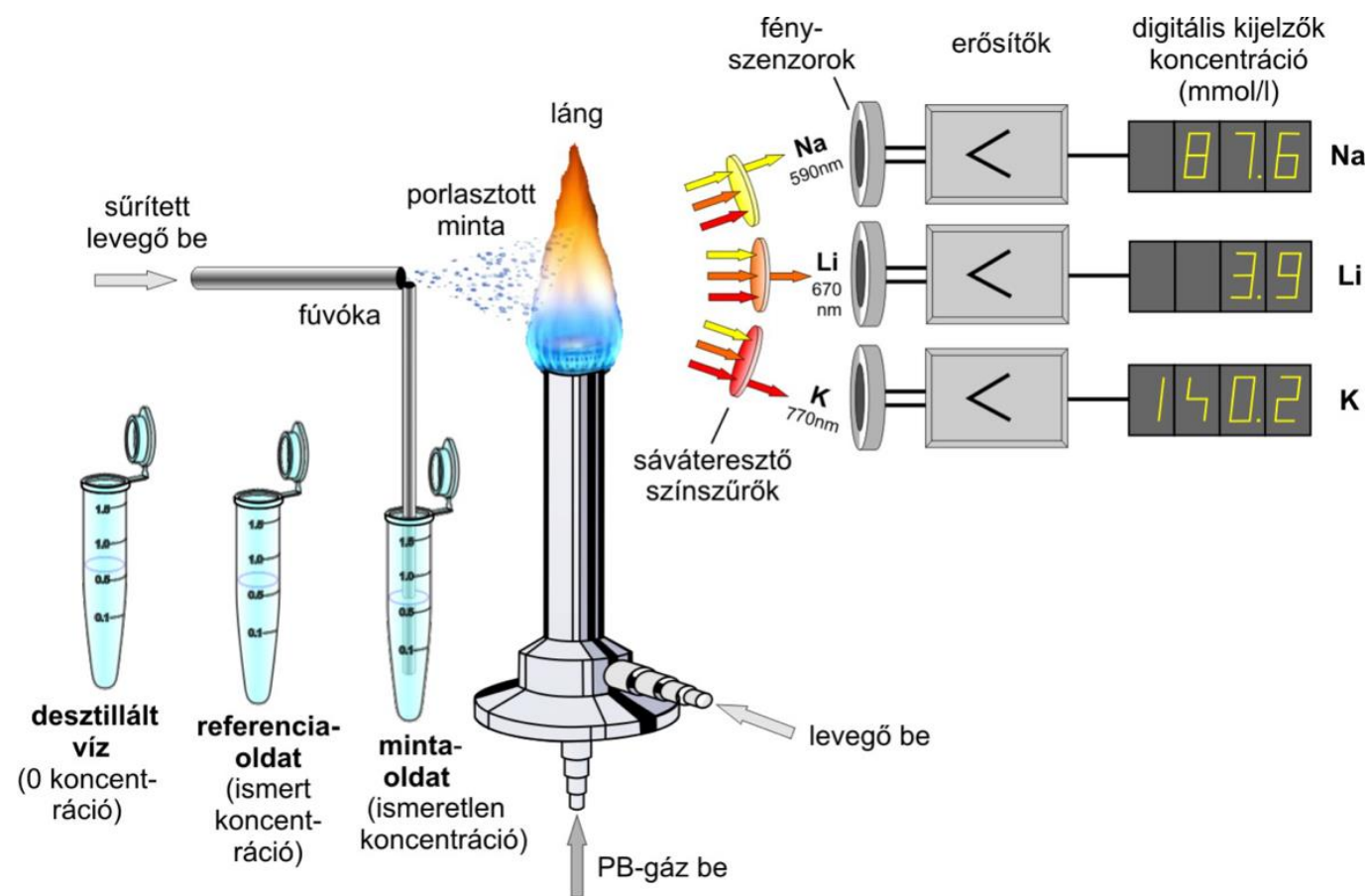
# Fényemisszó gerjesztett **atom** által



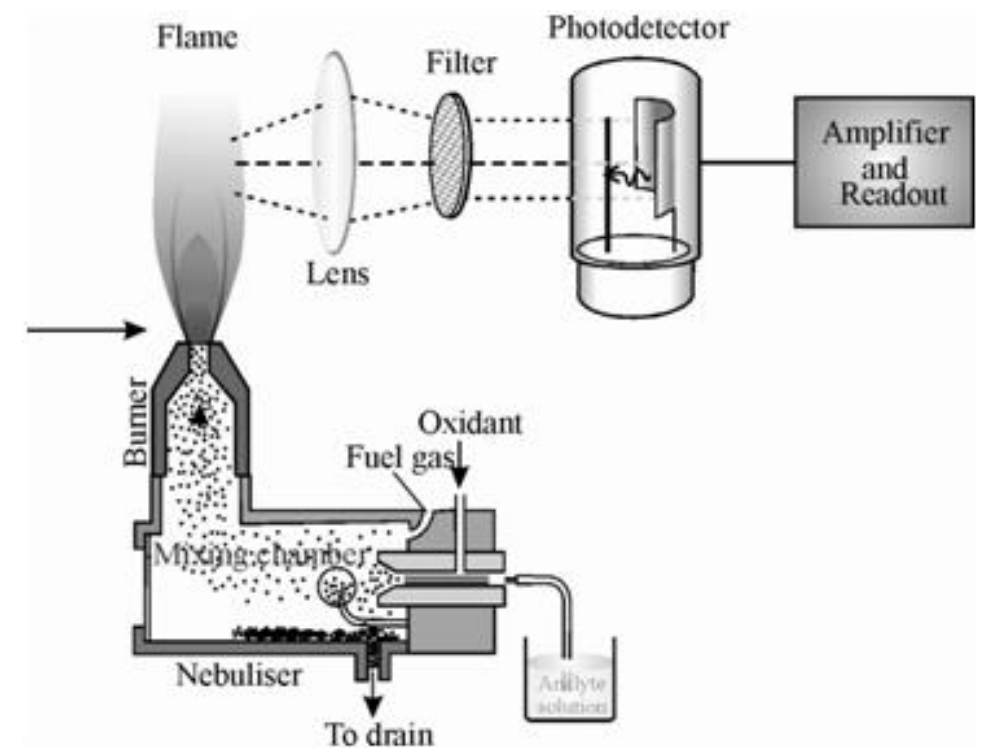
**Vonalas** emissziós spektrum

# Emissziós spektroszkópia alkalmazása: lángfotometria

Alkáli fémek kvalitatív és kvantitatív meghatározása



Klinikum: szérumban ionok ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) meghatározása

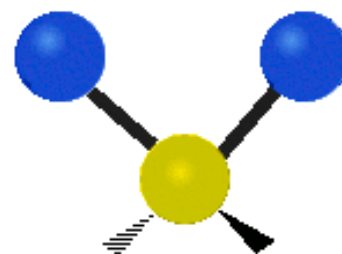
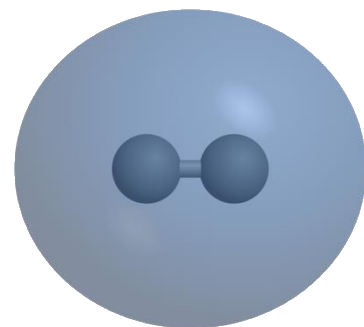


Lángfotométer

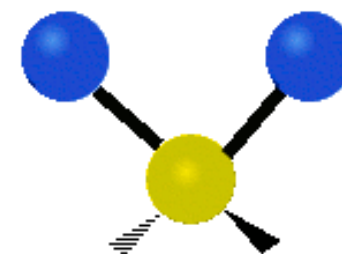


# Egy gerjesztett **molekula** emissziója bonyolultabb, mert energianívói összetettek

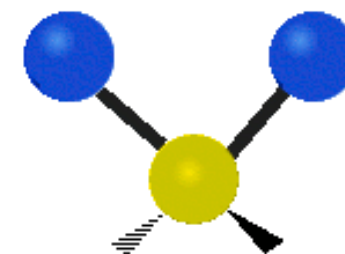
Molekula: kovalens kötéssel összekapcsolt atomok  
Legegyszerűbb eset: kétatomos molekula (pl., hidrogénmolekula)



Aszimmetrikus nyúlás



Szimmetrikus nyúlás



Ollózás

A molekulák **vibrációs** és **rotációs** mozgásokat végeznek:

**Vibráció:** kovalens kötés **mentén** történő periodikus mozgás  
**Rotáció:** kovalens kötés **tengelye körüli** periodikus mozgás

Molekula energiája: Born-Oppenheimer - közelítés:

$$E_{total} = E_e + E_v + E_r$$

- Energia állapotok egymástól függetlenek.
- Állapotok energianívói kvantáltak.
- Átmenetek energiacsomag elnyelésével/kibocsátásával járnak.
- Energiaszintek nagyságrendje különbözik (lásd ökölszabály).

Energiák skálázódása:

$$E_e \stackrel{\sim 100x}{>} E_v \stackrel{\sim 100x}{>} E_r$$

$$\sim 3 \times 10^{-19} \text{ J } (\sim 2 \text{ eV}) > \sim 3 \times 10^{-21} \text{ J} > \sim 3 \times 10^{-23} \text{ J}$$

(Ökölszabály: ultraibolya > látható > infravörös )

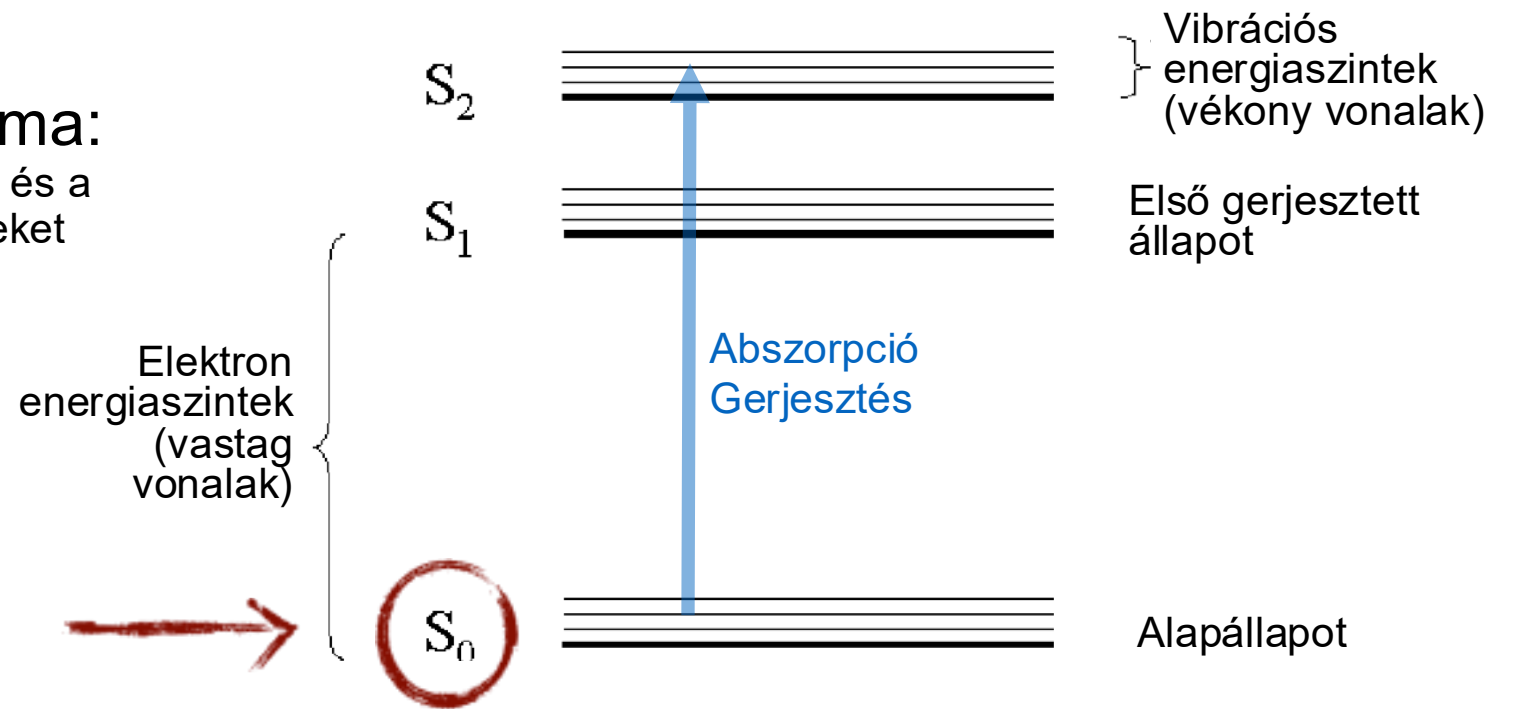
# Energia állapotok ábrázolása



Alexander Jabłoński  
(1898-1980)

**Jabłoński-féle termséma:**  
egy molekula elektronállapotait, és a közöttük végbemenő átmeneteket (nyilakkal) mutatja

Vajon mi ez az "S" (szingulett) állapot?

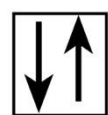


## Spinállapotok - a Pauli-elv

Wolfgang Pauli  
(1900-1958)



- Minden kvantumállapotot csak egyetlen elektron tölthet be.
- Egy atomon belül nem létezhet két olyan elektron, amelynek mind a négy kvantumszáma megegyezik.

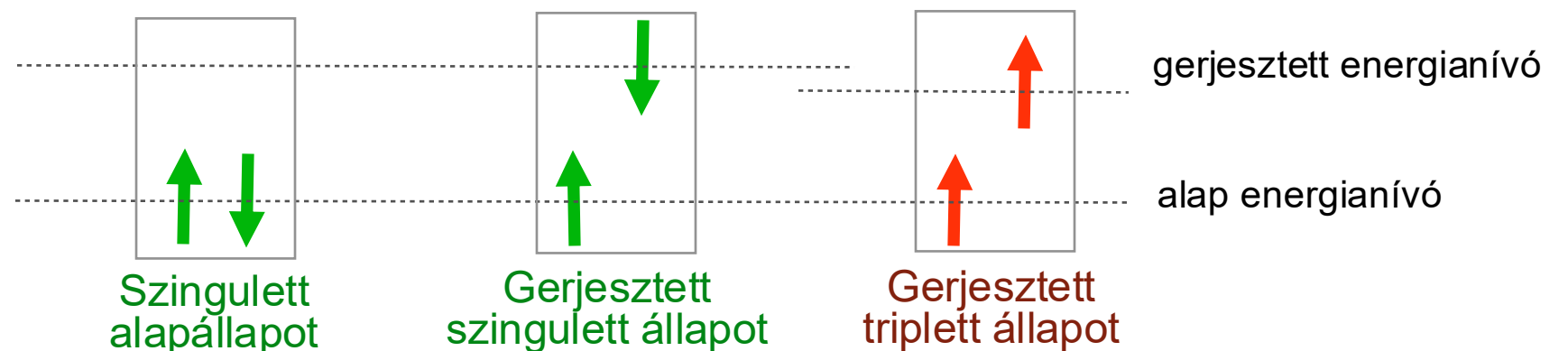


betöltött alhéj: spin párosítás (ellentétes spinű elektronok párosodnak)

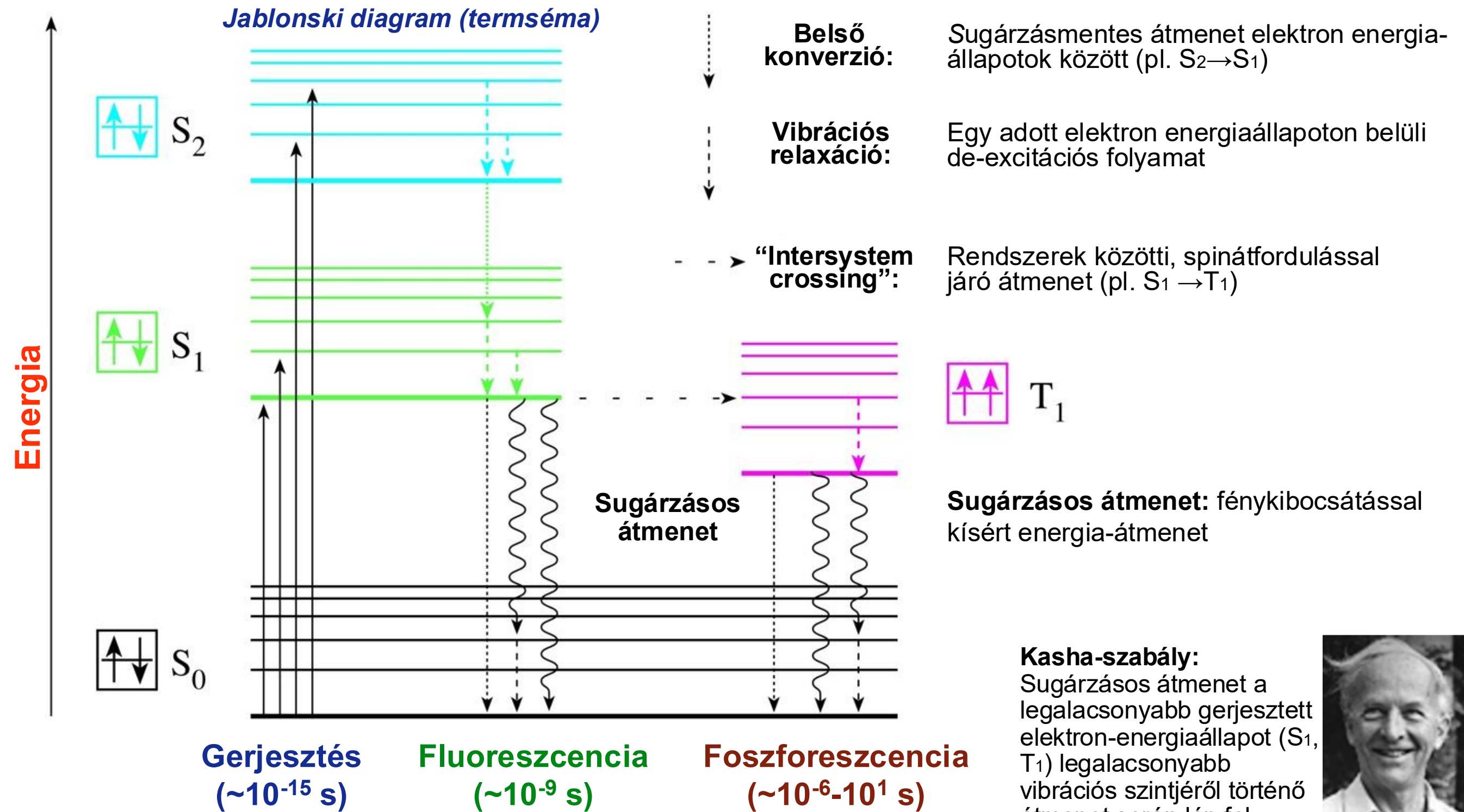
**Szingulett** és **triplett** állapotok: az eredő spinállapothoz rendelt mágneses momentum **orientációinak száma** (mágneses térben) =  $2S+1 = 1$  (**szingulett**) vagy 3 (**triplett**). ( $S$  = eredő spin, pl. betöltött alhéj esetén  $(+1/2)+(-1/2) = 0$ )

**S:** szingulett állapot: ellentétes spinű párosított elektronok, eredő spin ( $S$ ) = 0, **orientációk száma** =  $(2S+1) = 1$ .

**T:** triplett állapot: a molekulában azonos spinállapotú elektronok vannak, eredő spin = 1 (pl.  $(+1/2)+(+1/2) = 1$ ), **orientációk száma** =  $(2S+1) = 2+1 = 3$ .



# A lumineszcencia folyamatai



## Kasha-szabály:

Sugárzásos átmenet a legalacsonyabb gerjesztett elektron-energiaállapot ( $S_1$ ,  $T_1$ ) legalacsonyabb vibrációs szintjéről történő átmenet során lép fel.

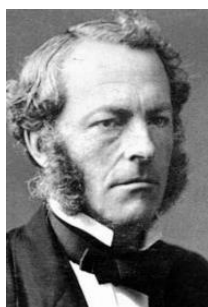
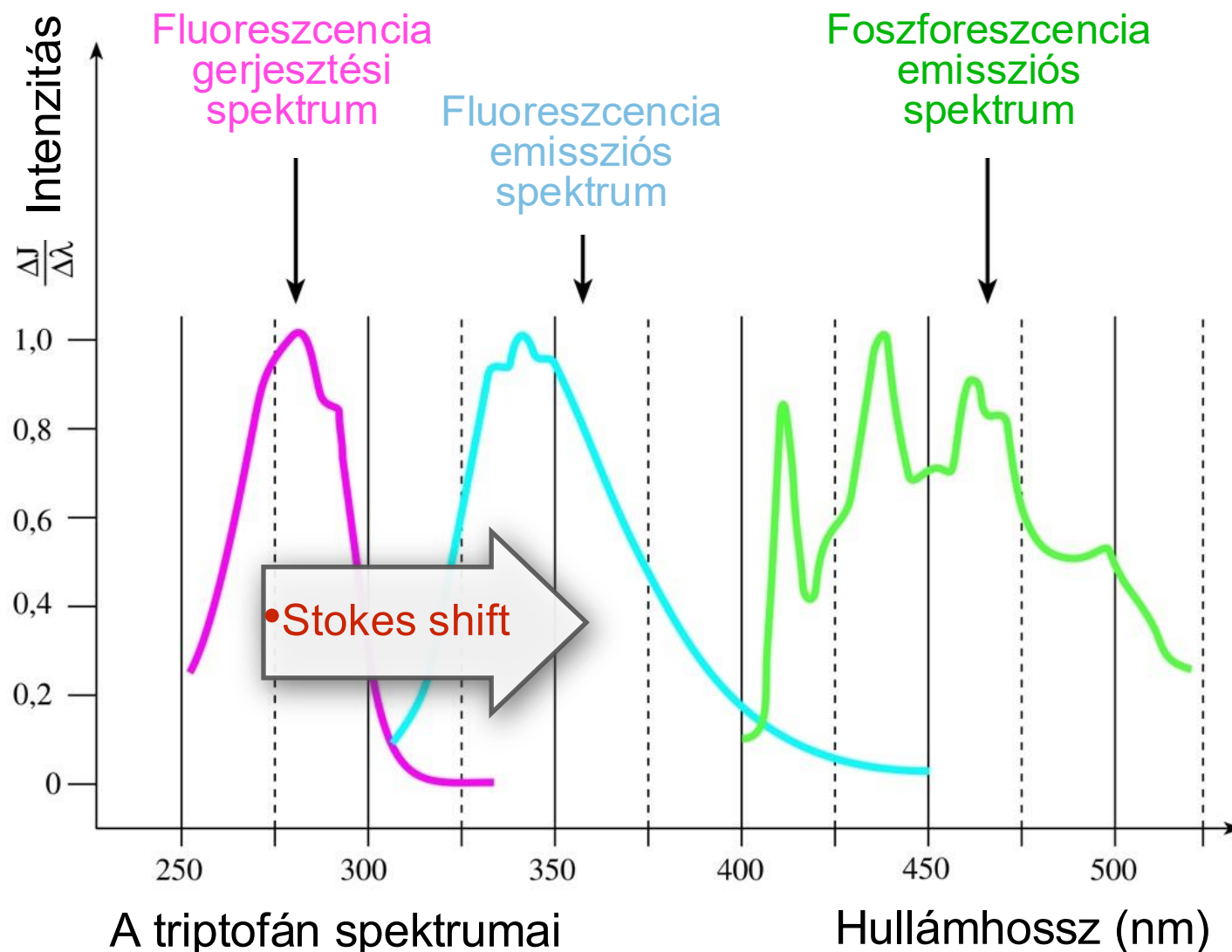


Michael Kasha (1920-2013)

# A lumineszcencia jellemzése

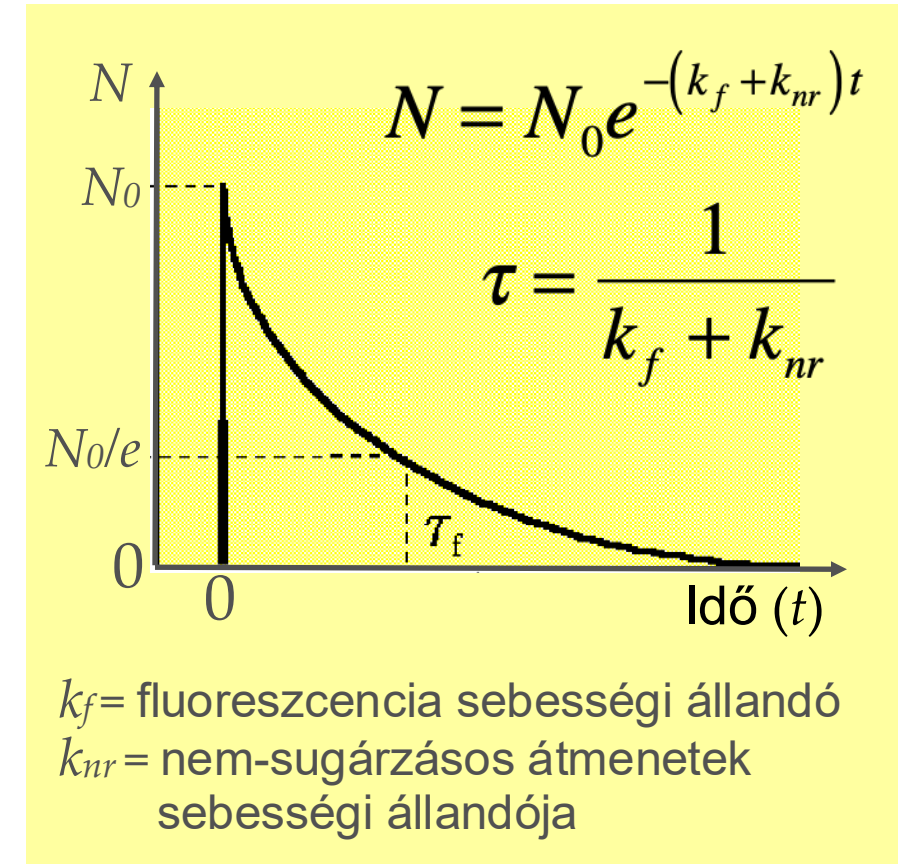
## 1. Spektrumok

- Sávos
- Gerjesztés-emisszió tükörszimmetrikus



George Stokes  
(1819-1903)

## 2. A gerjesztett állapot élettartama ( $\tau$ )



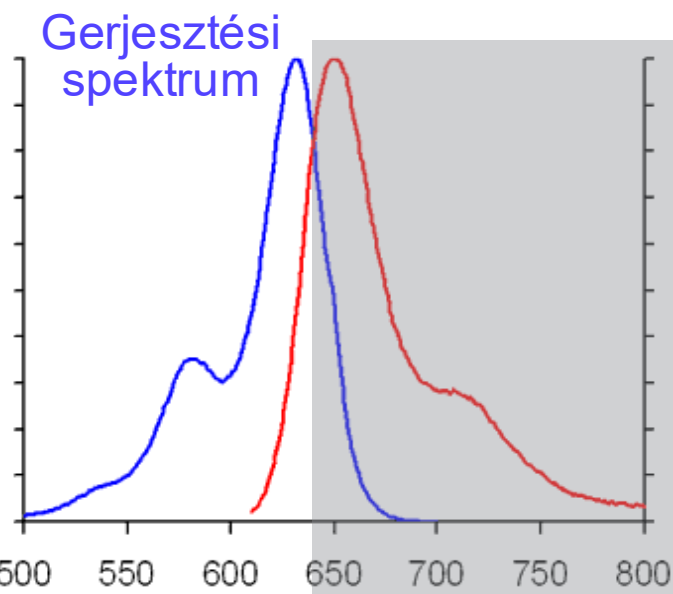
## 3. Kvantumhatásfok ( $\Phi$ )

$$\Phi = \frac{k_f}{k_f + k_{nr}} = \frac{N_{emittált\ foton}}{N_{abszorbeált\ foton}}$$

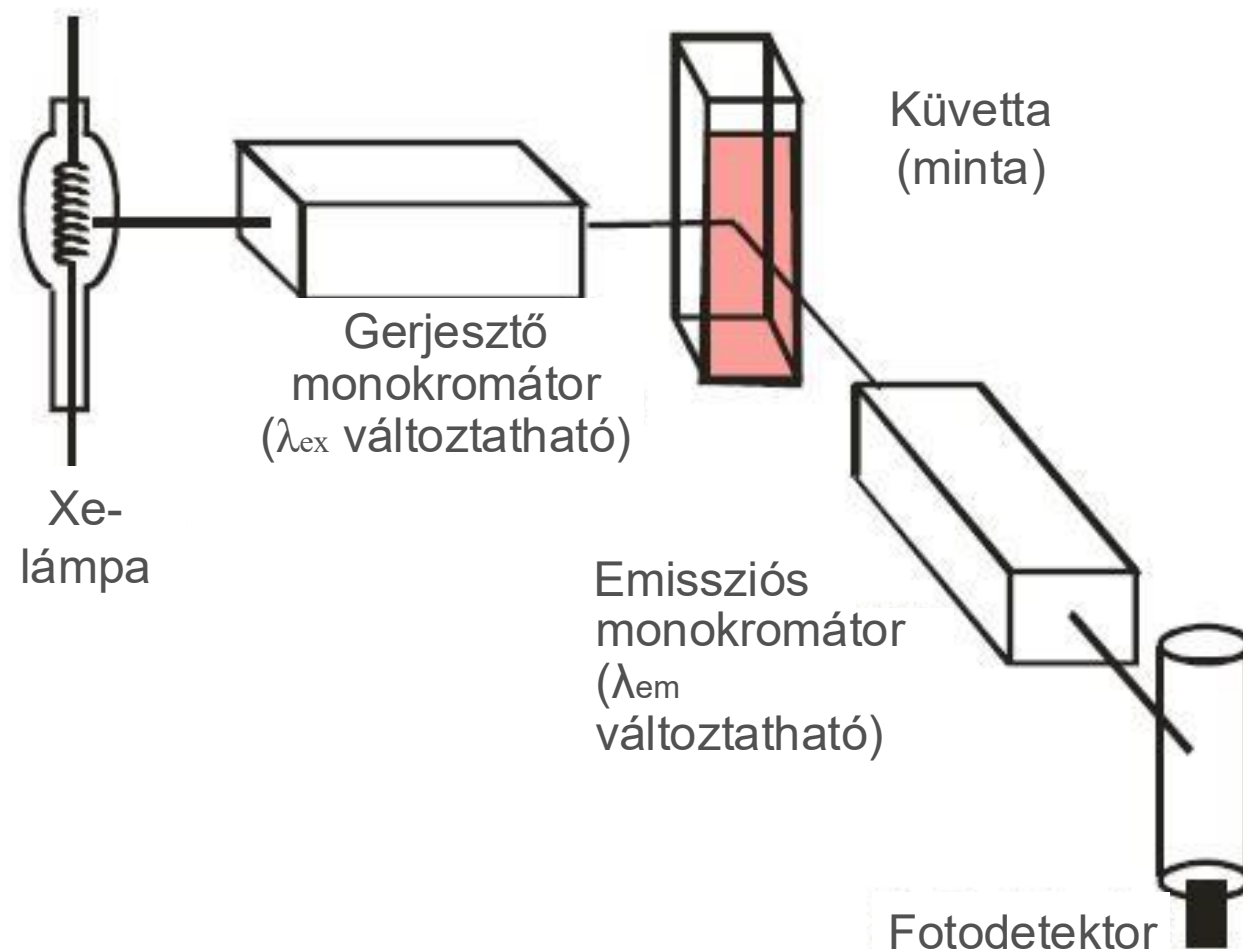
# A lumineszcencia mérése

## Fluoreszcencia spektrométer ("Steady-state" spektrofluoriméter)

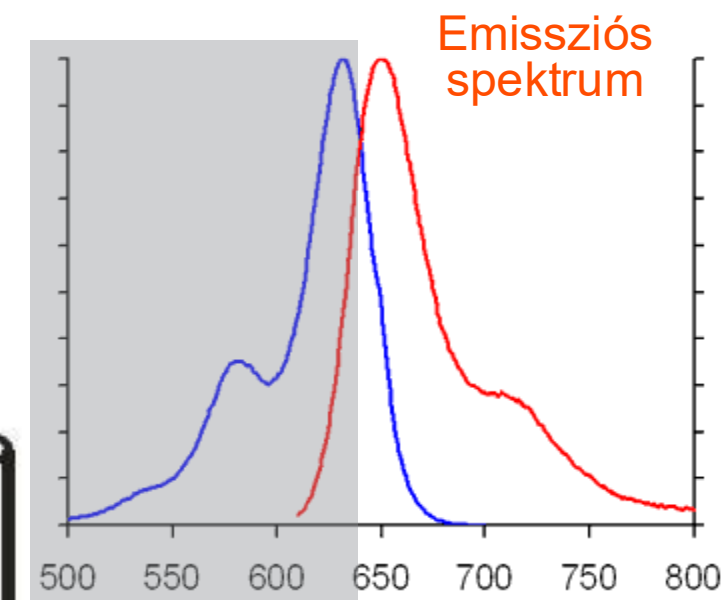
**Gerjesztési** hullámhossz  
változtatásával felvett  
spektrum



$\lambda_{em} = \text{konstans}$   
(emissziós maximum)



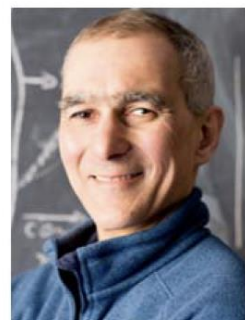
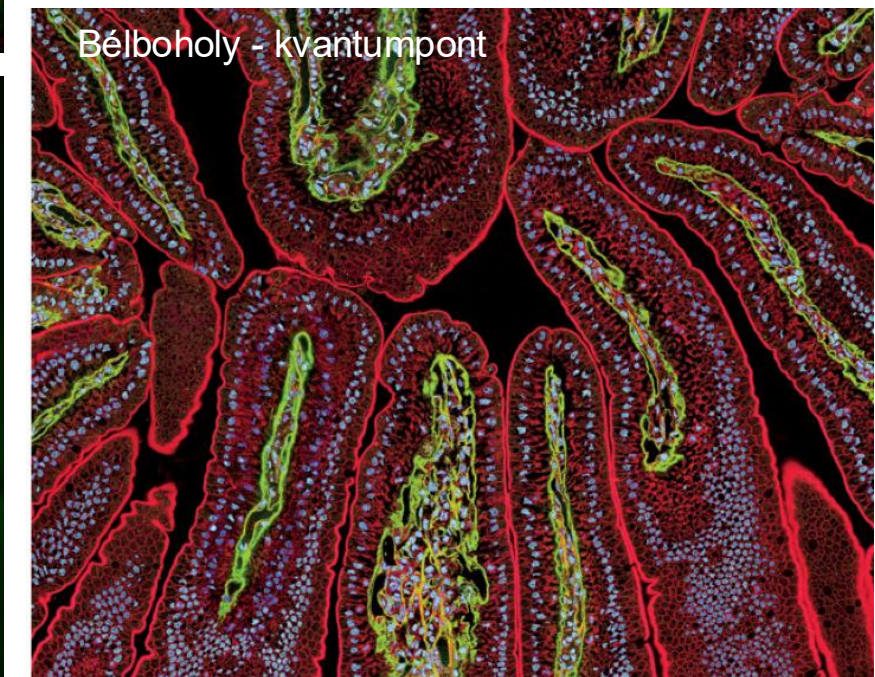
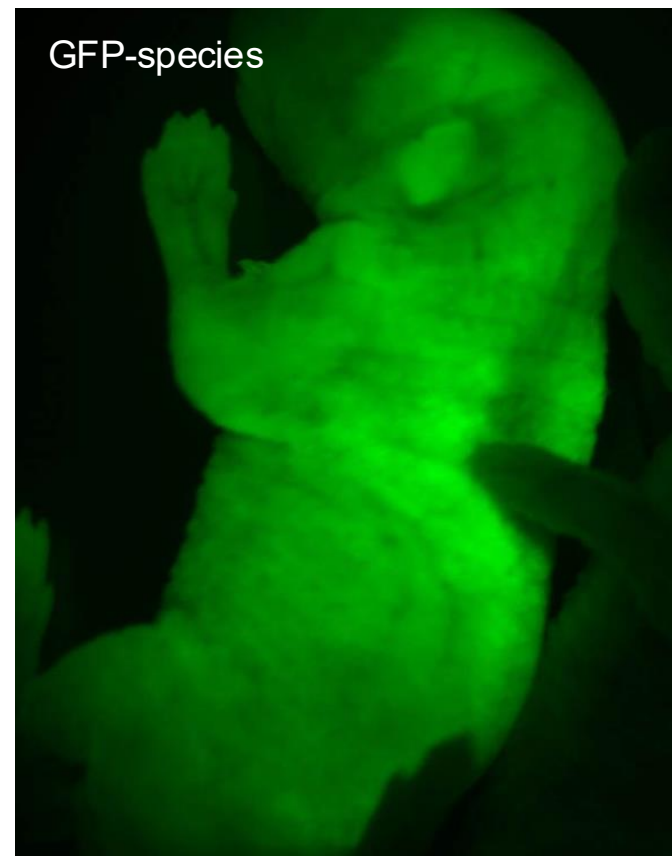
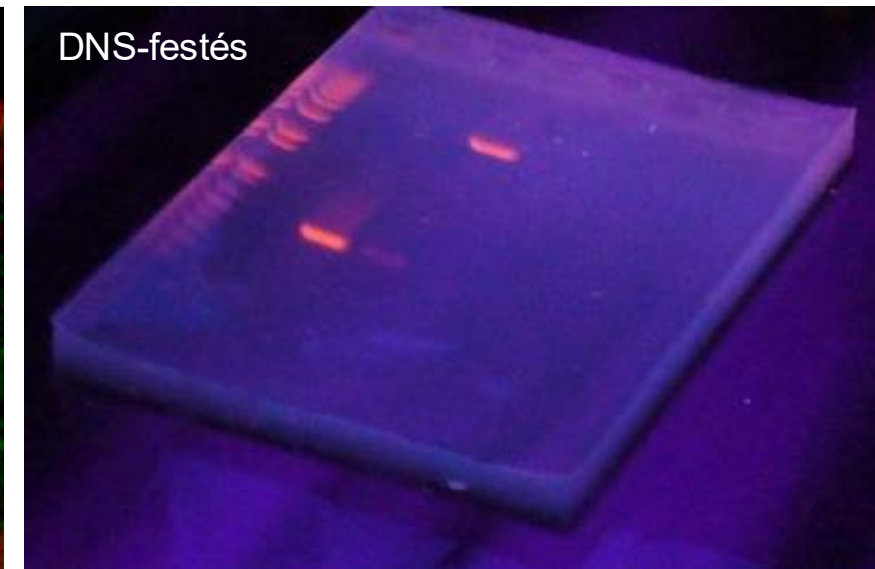
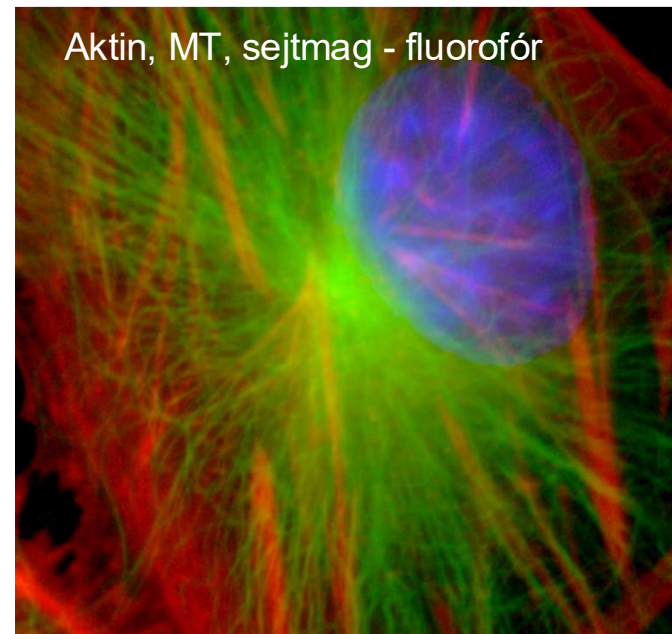
**Emissziós** hullámhossz  
változtatásával felvett  
spektrum



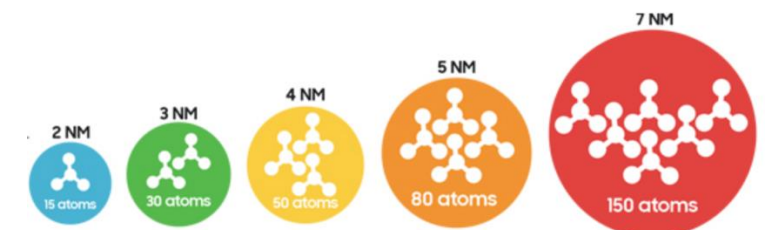
$\lambda_{ex} = \text{konstans}$   
(gerjesztési maximum)

# A fluoreszcencia orvosi-biológiai alkalmazásai

- Fluoreszcens jelölés fluorofórokkal
- DNS szekvenálás (lánc terminációs módszer), DNS festés (EtBr), DNS microarray technológia
- Immunfluoreszcencia
- Fluoreszcens fehérje-konjugációs technikák (GFP)
- FRET (Fluoreszcencia Rezonancia Energia Transzfer)
- FRAP (Fluorescence Recovery After Photobleaching)
- FACS (Fluorescence Activated Cell Sorting)
- Jelölés kvantum pontokkal (quantum dots)
- stb., stb.

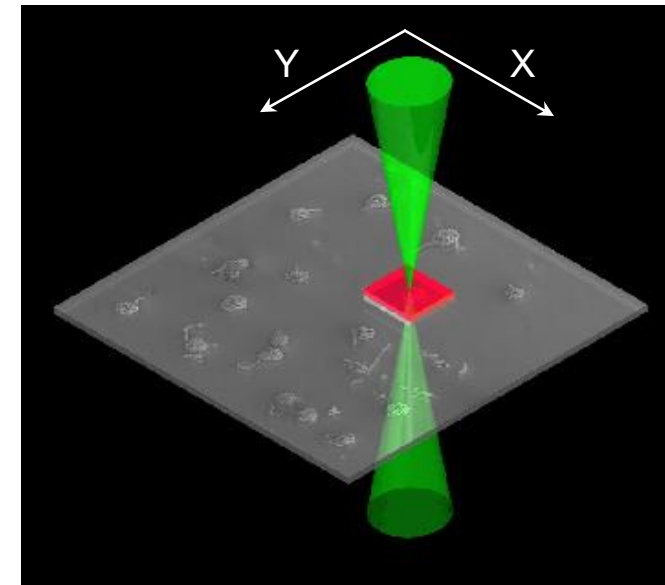
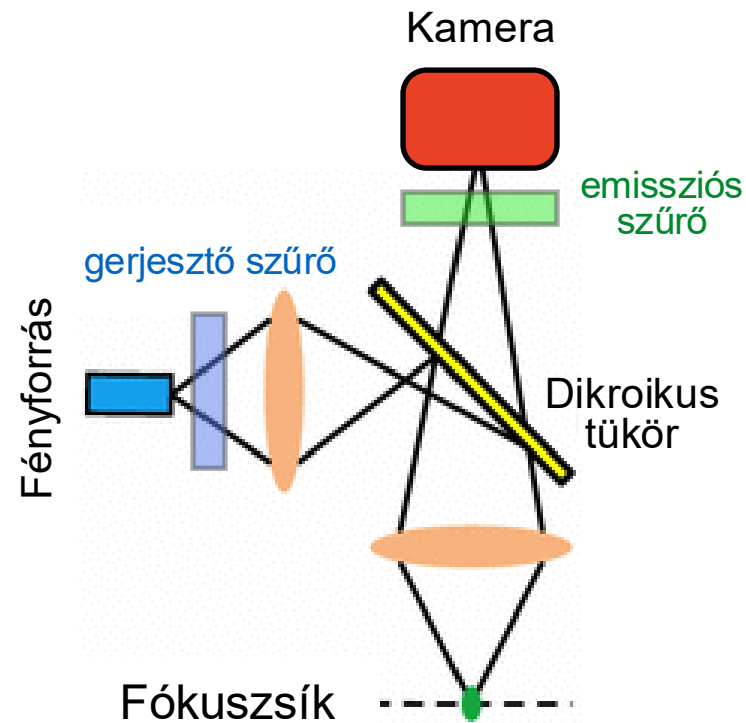


Moungi G. Bawendi, Louis E. Brus, Alexei I. Ekimov  
kémiai Nobel-díj 2023



# Epifluoreszcencia mikroszkóp és Lézer pásztázó konfokális mikroszkóp

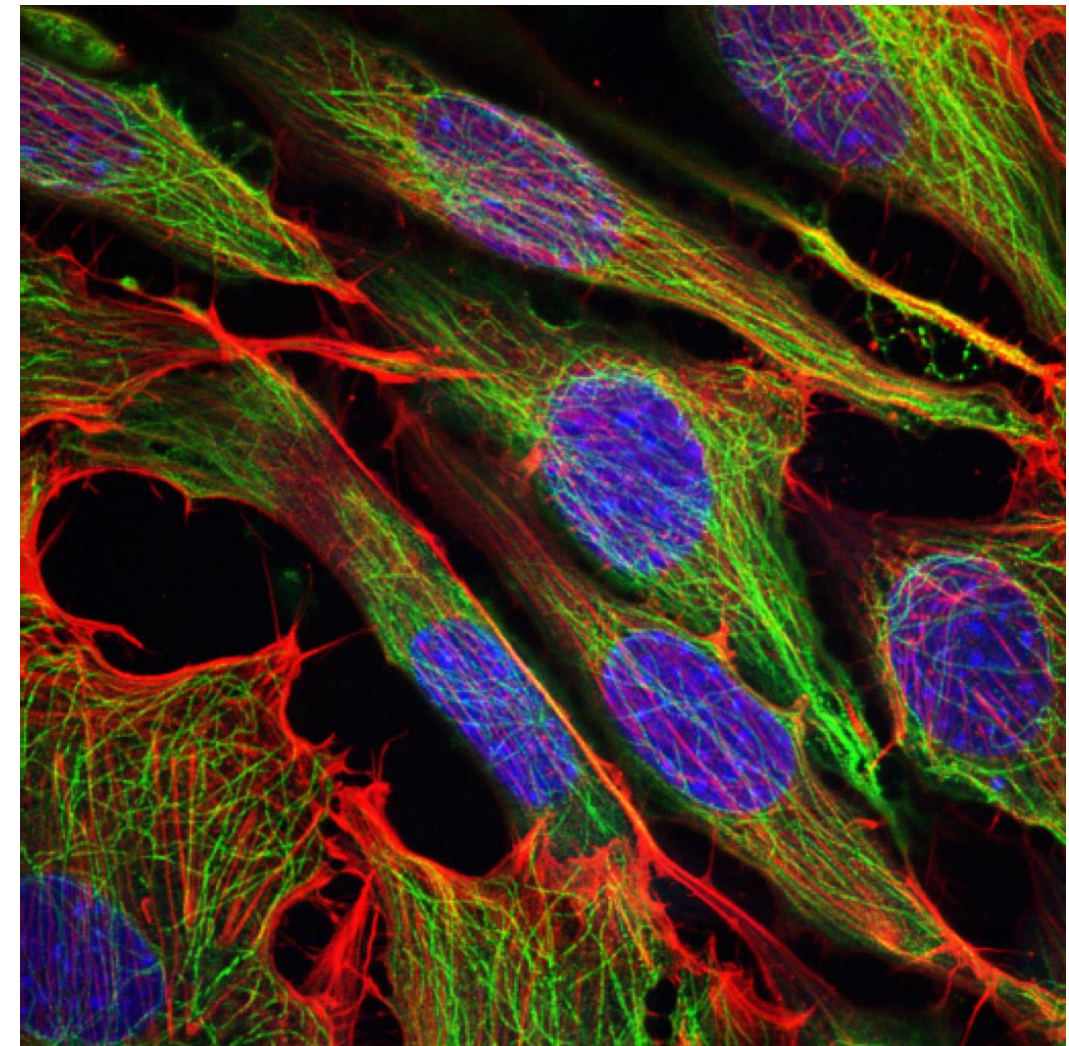
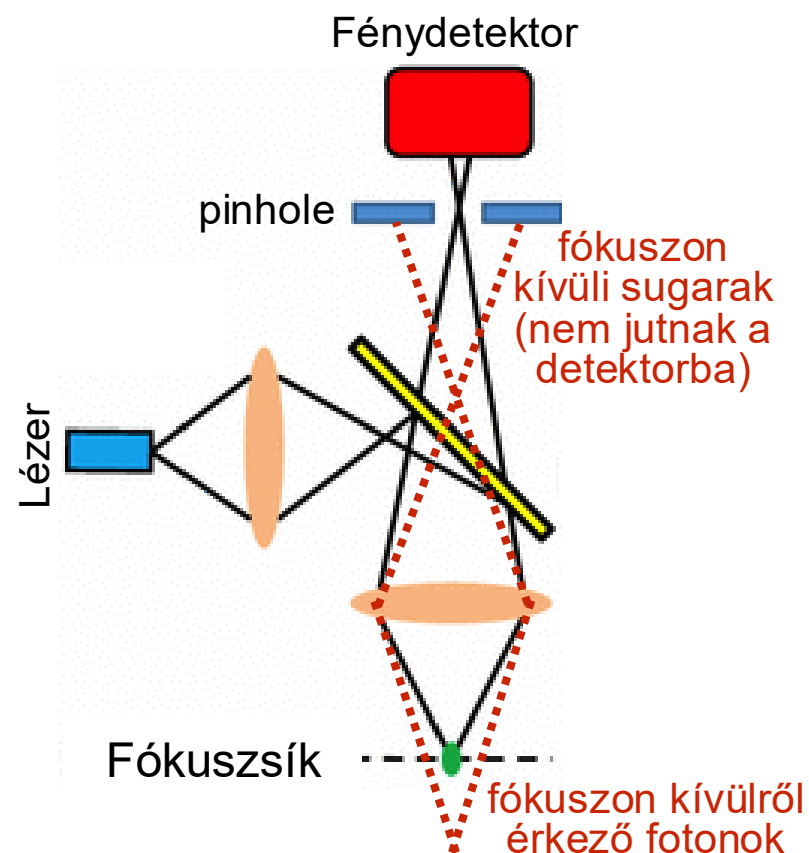
„Epi”:  
felületi,  
felülről érkező



Zöld: mikrotubulusok;  
Vörös: aktin;  
Kék: sejtmag

**Konfokálitás:**  
a gerjesztő és  
emissziós oldali optikai  
geometria fókuszpontja  
ugyanaz.

**Konfokális elv:**  
a „pinhole”  
segítségével a nem  
fókuszpontból érkező  
fotonok kiszűrhetők.



# Szuperfelbontású mikroszkópia

Kémiai Nobel-díj, 2014



Eric Betzig



Stefan Hell



William E. Moerner

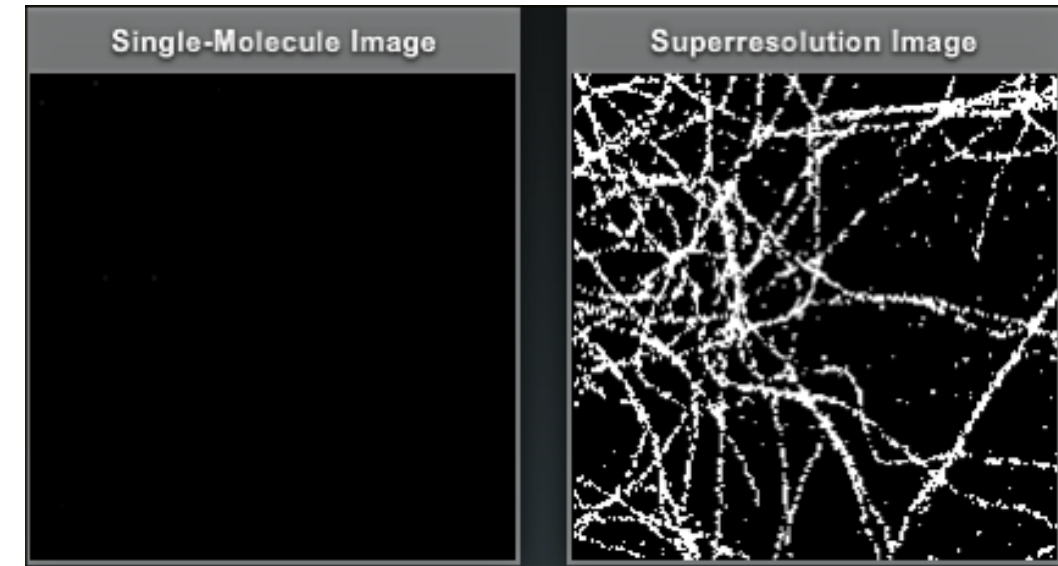
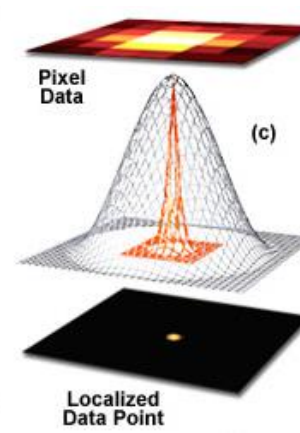
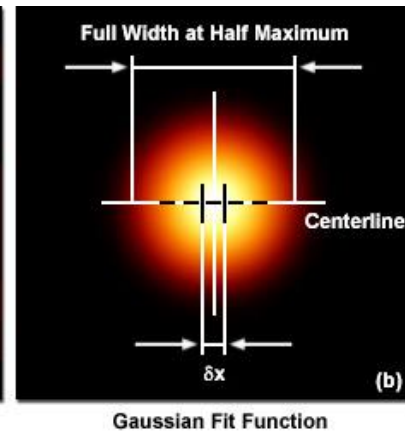
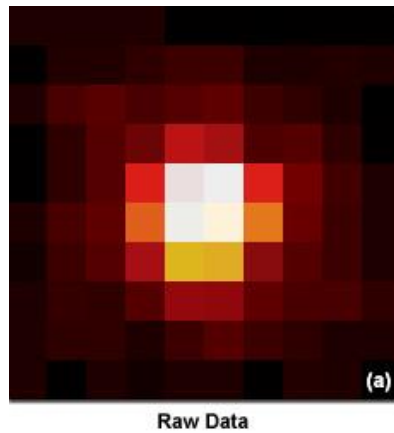
A feloldási problémát pozíciómeghatározási problémává alakítjuk!

“Sztochasztikus” adatgyűjtés (egyedi fluorofórokról)

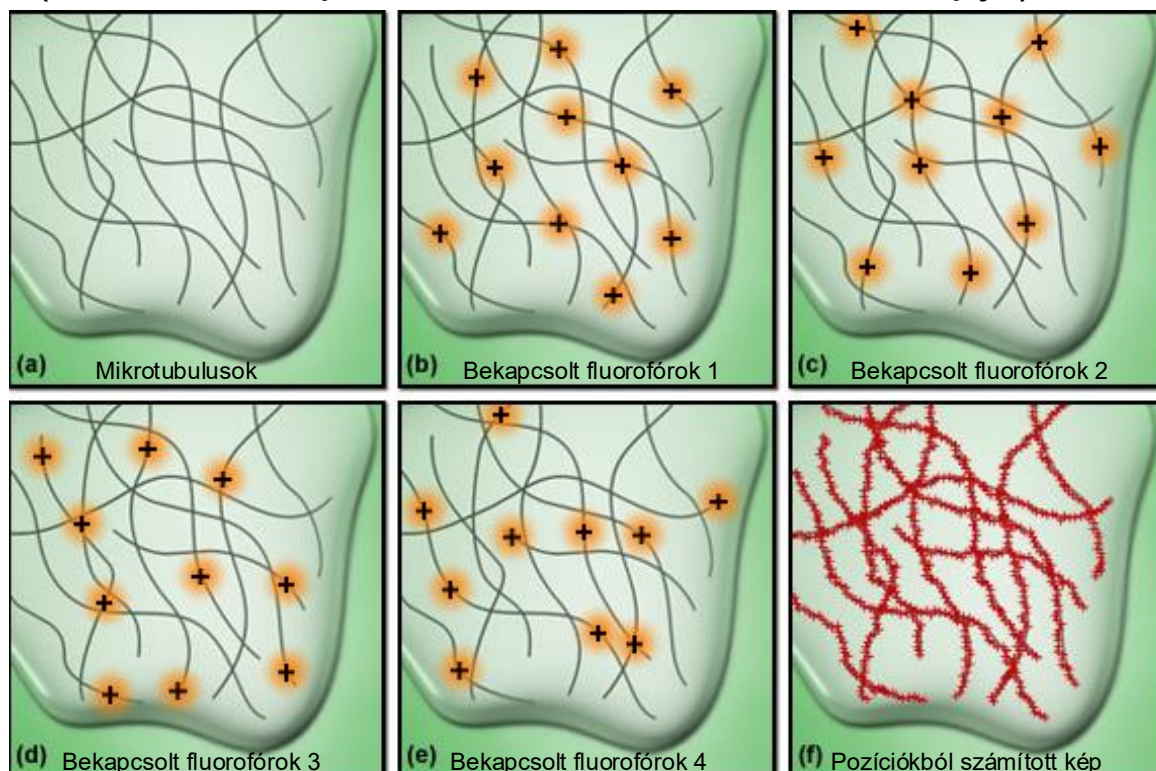
Feloldási probléma (Abbé-elv)

Pozíciómeghatározási probléma (pontosság a fotonyszámtól függ)

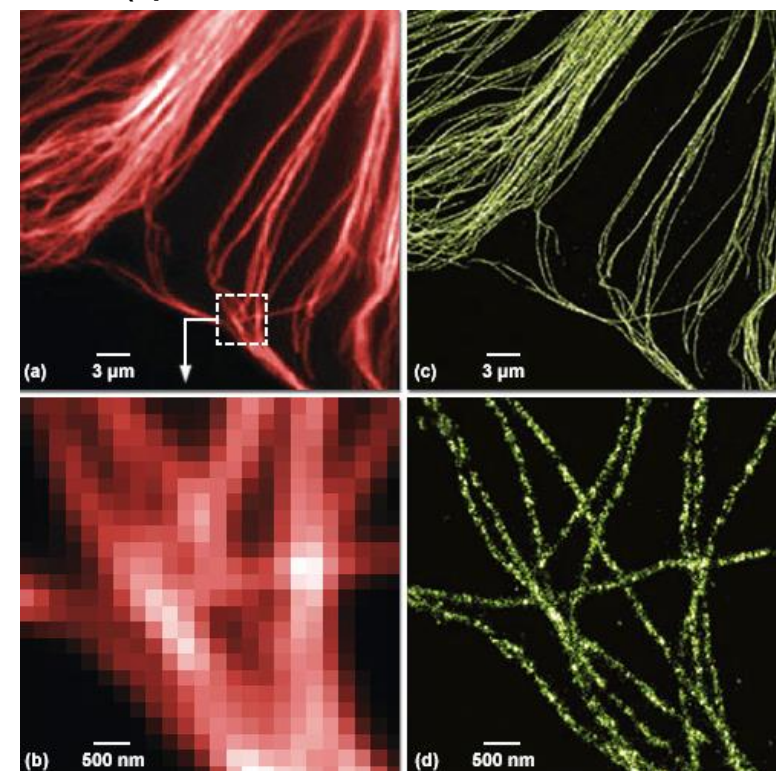
$$d = \frac{0.61\lambda}{n \sin\alpha}$$



STORM (“stochastic optical reconstruction microscopy”); PALM (“photoactivated localization microscopy”)



Adatgyűjtési folyamat



Mikrotubuláris rendszer

# OMHV



<https://feedback.semmelweis.hu/feedback/index.php?feedback-qr=SRIFVEX0EPZKYAKW>