

# Termikus sugárzás, lumineszcencia

Orvosi Biofizika I. 2024. október 29.

Kellermayer Miklós

Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet



**SEMMELWEIS**  
EGYETEM 1769

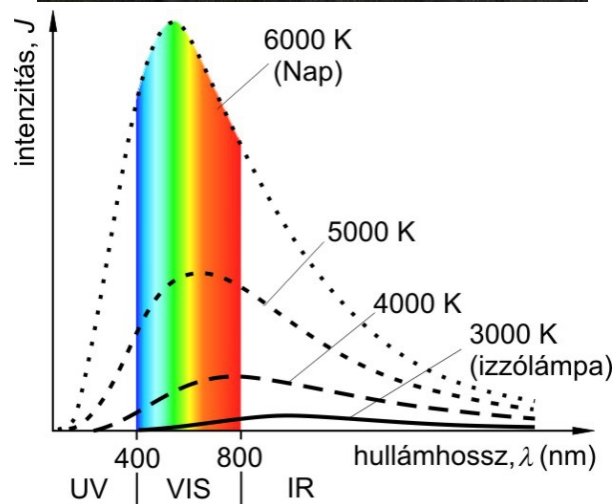
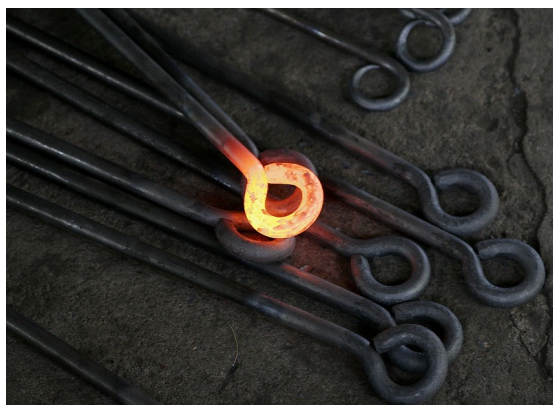
# Fény keltése

## Emisszió: “kibocsátás”

### 1. Termikus (“feketettest” v. hő-) sugárzás

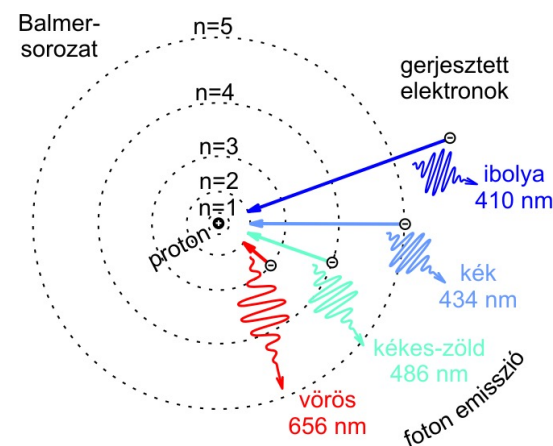
**Mechanizmus:** atomok, molekulák hőmozgása

Fényenergia  
forrása:  
rendszer  
belső  
energiája

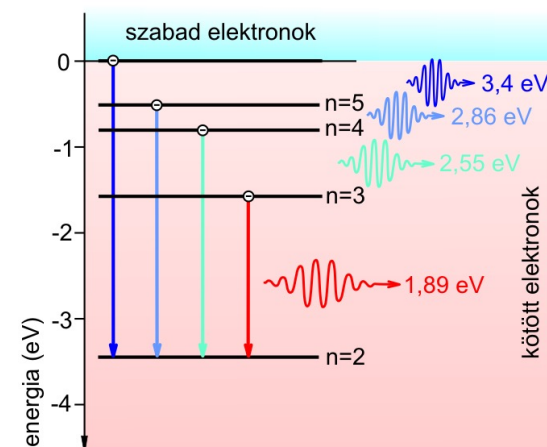


### 2. Lumineszcencia

**Mechanizmus:** gerjesztett állapoti energia kibocsátása

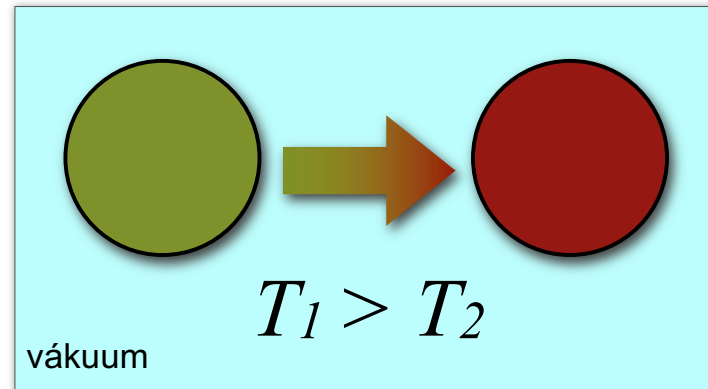


Fényenergia  
forrása:  
gerjesztett állapot  
energiája



# “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):



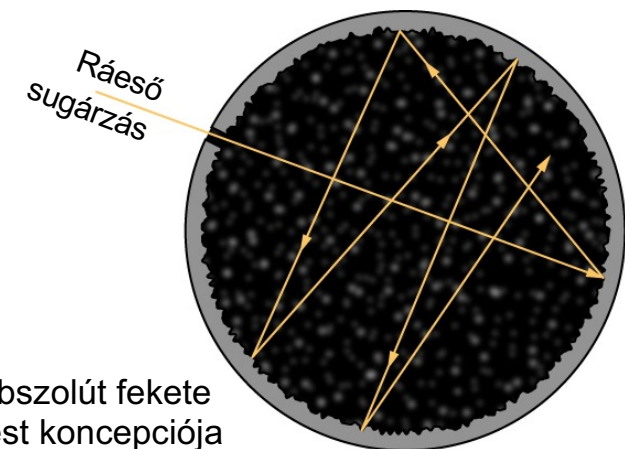
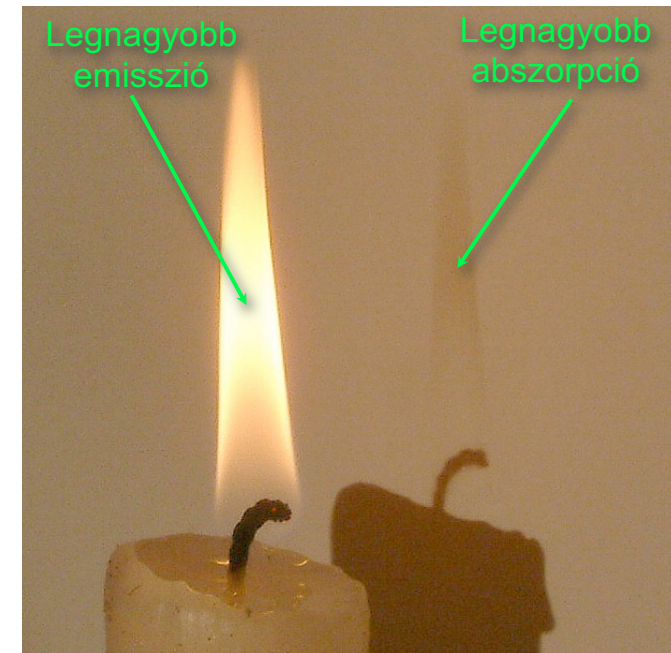
Gustav Robert Kirchhoff  
(1824-1887)

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

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.

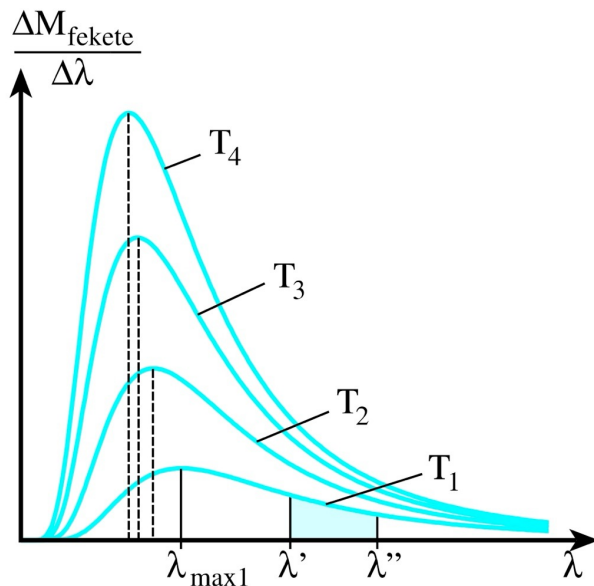
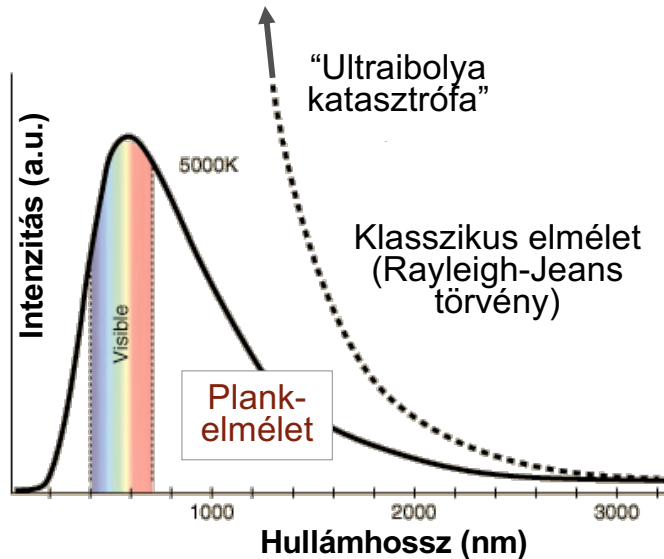


Abszolút fekete  
test koncepciója



# Termikus sugárzás

## Tulajdonságok és levonható következtetések



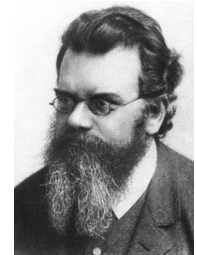
Stefan-Boltzmann törvény:

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

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



Jozef Stefan  
(1835-1893)



Ludwig E. Boltzmann  
(1844-1906)

Wien-féle eltolódási törvény:

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



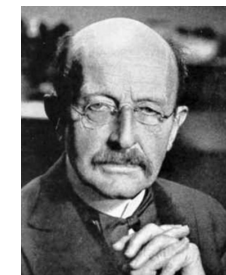
Wilhelm Wien  
(1864-1928)

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

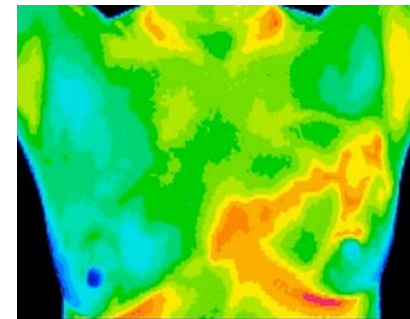


Max K. E. L. Planck  
(1858-1947)

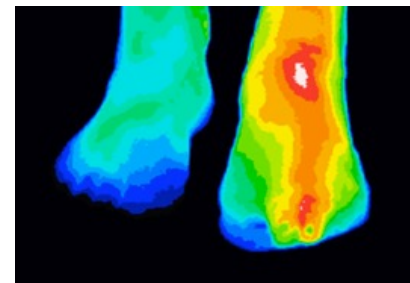
# Termikus sugárzás alkalmazása

## Thermográfia, infradiagnosztika

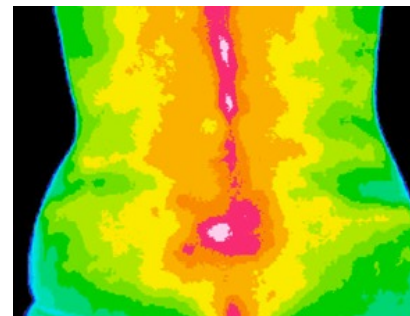
Nem abszorbeáló rétegeten “át lehet látni”



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

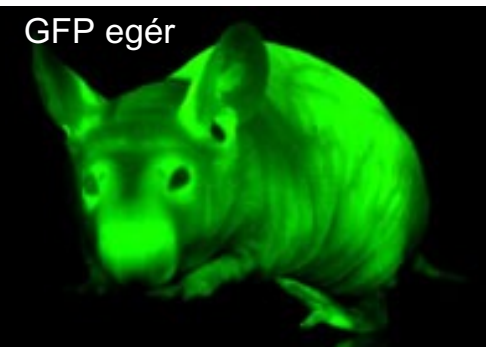
Radio-  
lumineszcencia



Bio-/kemi-  
lumineszcencia



Fluoreszcencia  
alkalmazások

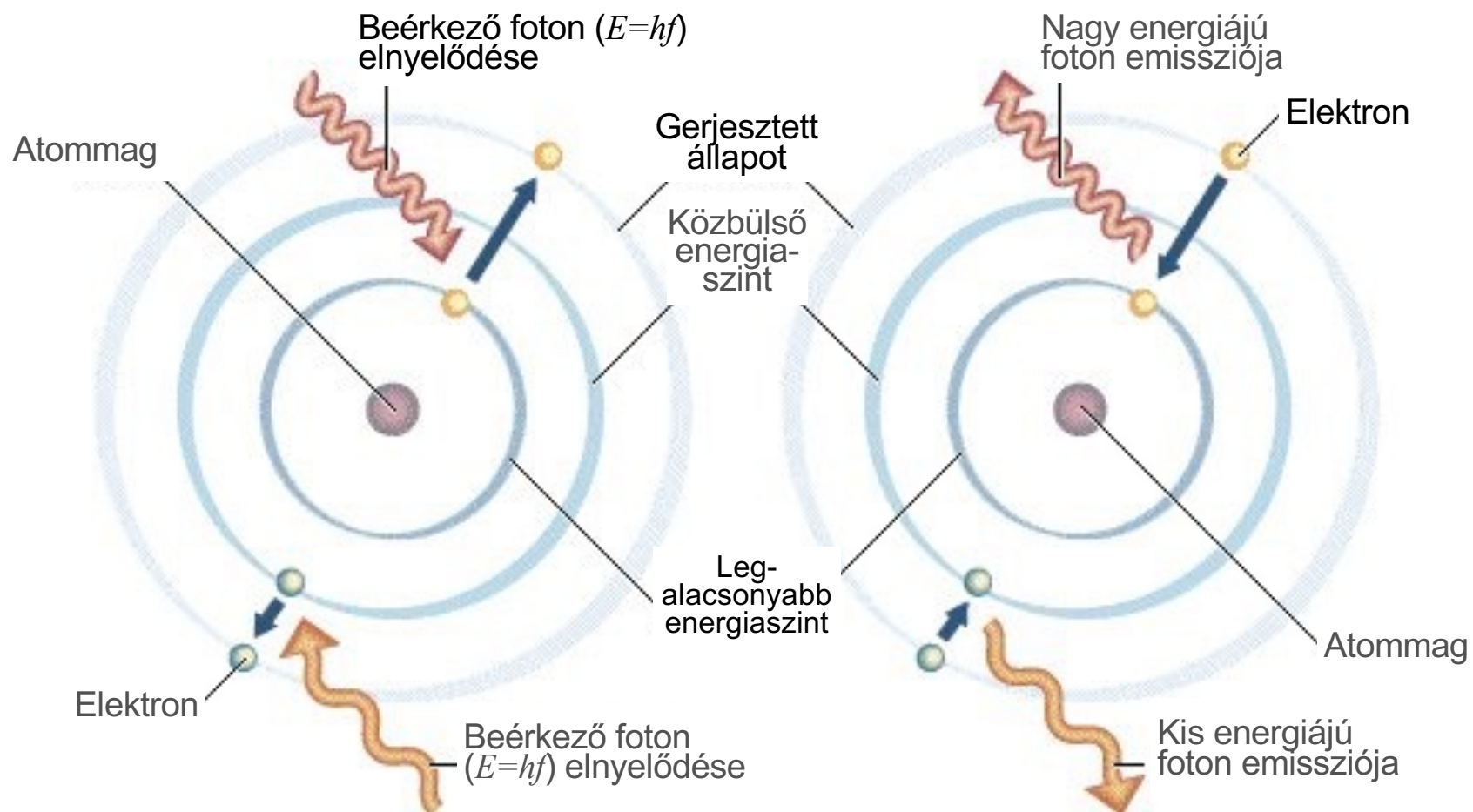




# A lumineszcencia típusai

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

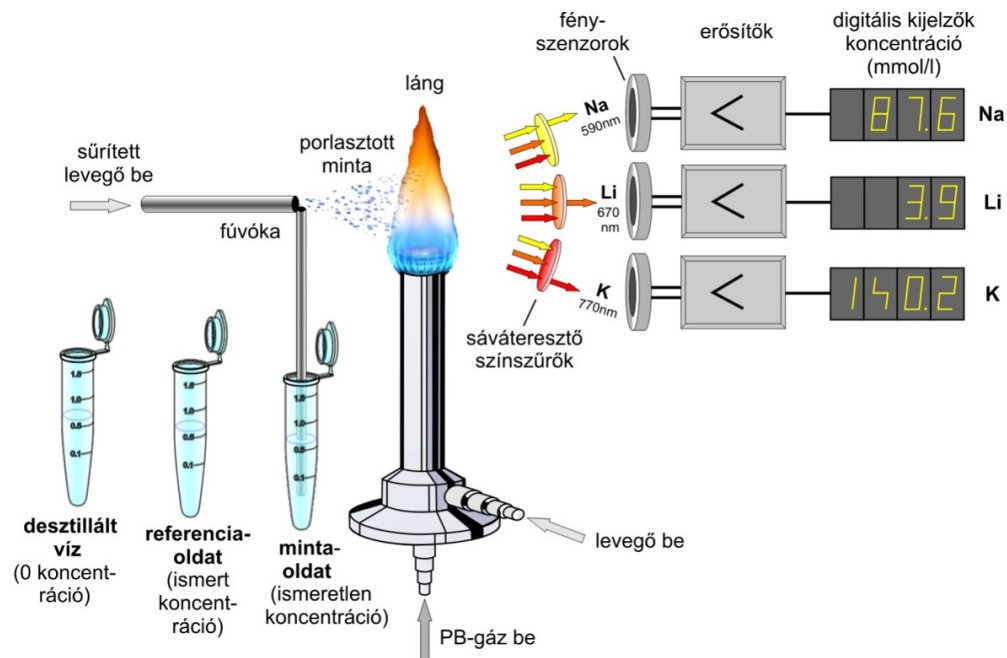
# Fényemisszó gerjesztett **atom** által



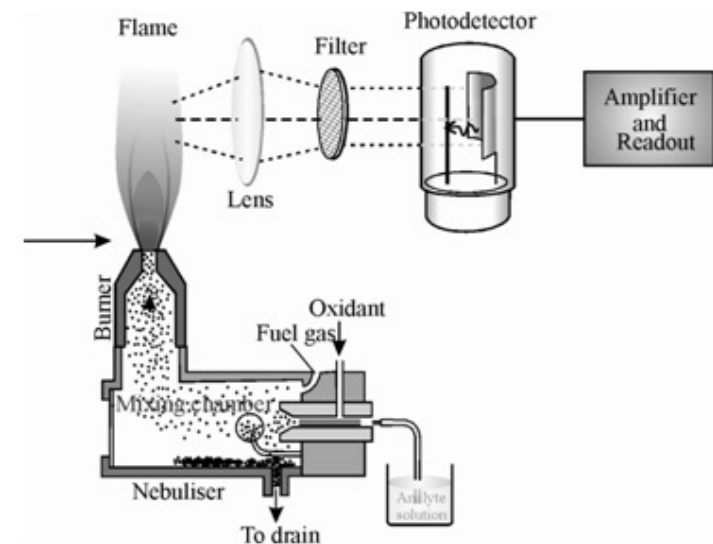
**Vonalas** emissziós spektrum

# Emissziós spektroszkópia alkalmazása: lángfotometria

Alkáli fémek kvalitatív és  
kvantitatív meghatározása



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



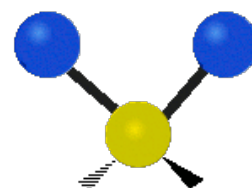
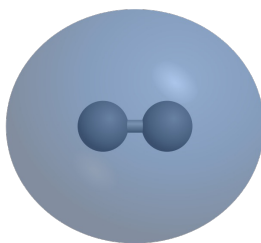
Lángfotométer



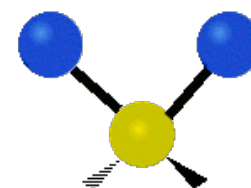


# Egy gerjesztett **molekula** emissziója bonyolultabb, mert energianívói összetettek

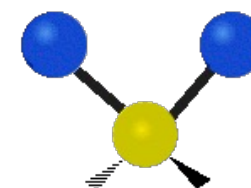
Molekula: kovalens kötéssel összekapcsolt atomok  
Legegyszerűbb eset: kétatomos molekula (pl., hidrogénmolekula)



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:

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

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

(Ökölszabály: ultraibolya > látható > infravörös )

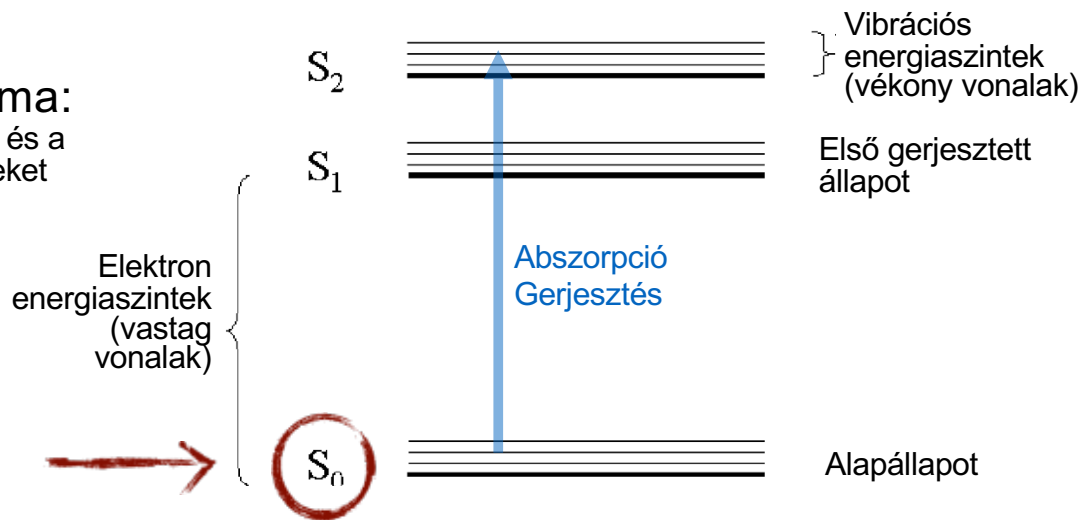
# Energia állapotok ábrázolása



Alexander Jabłoński  
(1898-1980)

**Jabłoński-féle termséma:**  
egy molekula elektronállapotait, és a  
köztük 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.

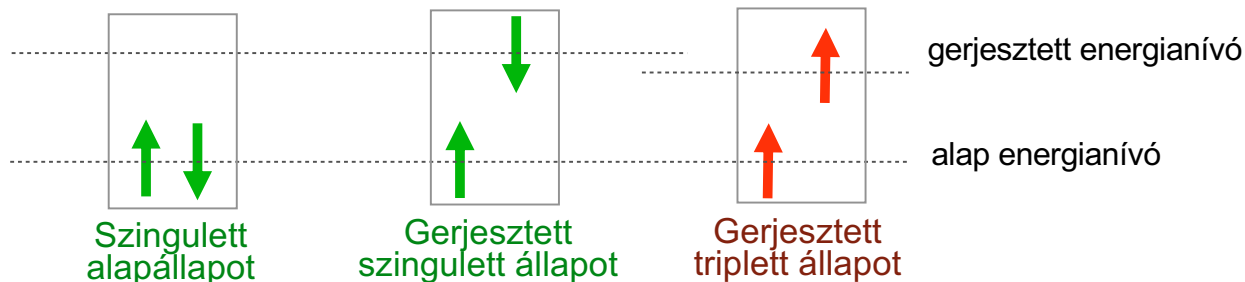


betöltött alhéj: spin párosítás  
(ellentétes spinű elektronok  
párosodnak)

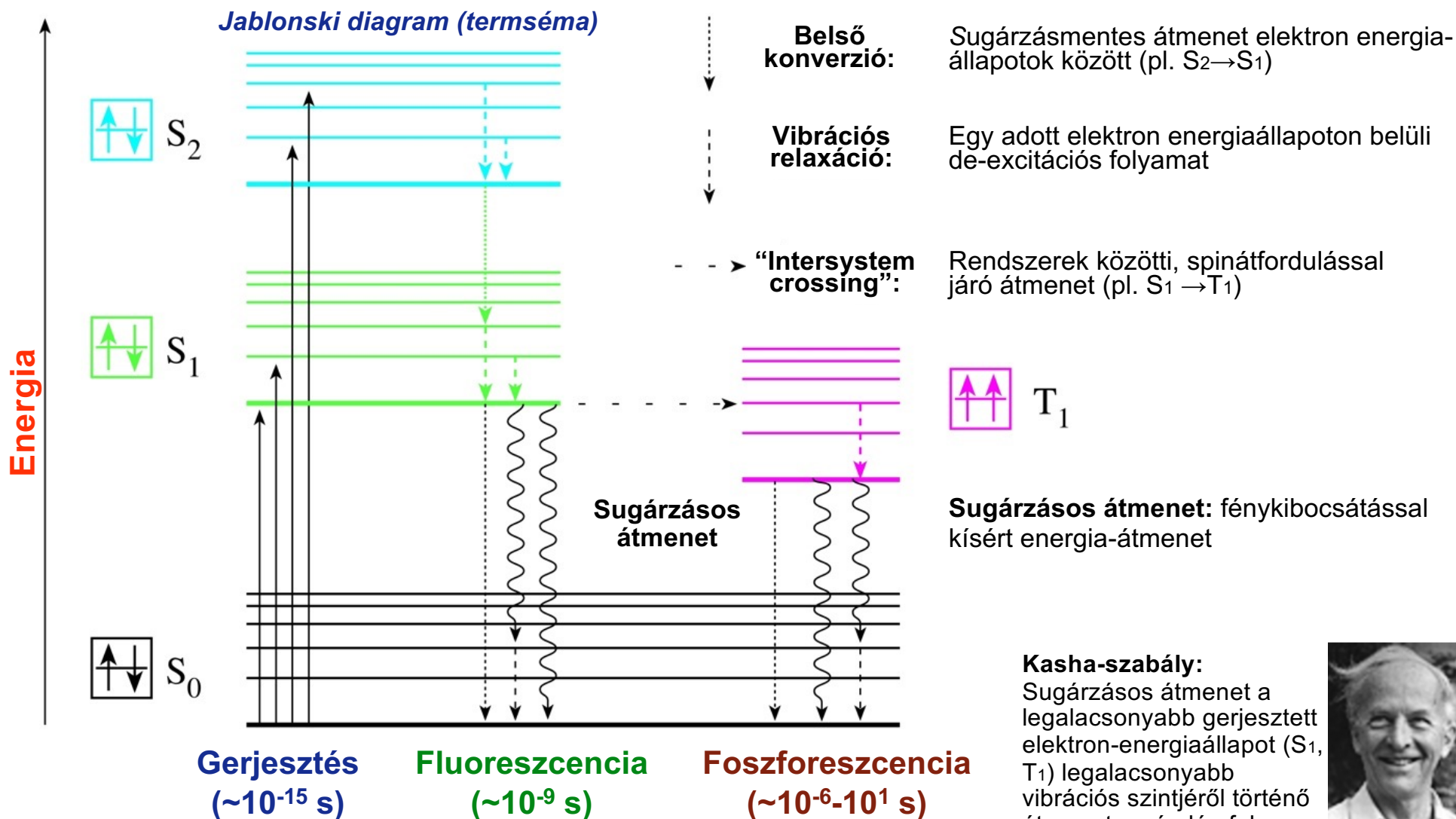
**Szingulett** és **triplett** állapotok: az eredő spinállapothoz rendelt mágneses momentum **orientációinak száma** (mágneses térben) =  $2S+1 = 1$  (szingulett) vagy 3 (triplett). ( $S$  = eredő spin, pl. betöltött alhéj esetén  $(+1/2)+(-1/2) = 0$ )

**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** =  $(2S+1) = 2+1 = 3$ .

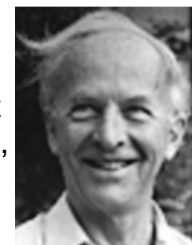


# A lumineszcencia folyamatai



## Kasha-szabály:

Sugárzásos átmenet a legalacsonyabb gerjesztett elektron-energiaállapot (S<sub>1</sub>, T<sub>1</sub>) legalacsonyabb vibrációs szintjéről történő átmenet során lép fel.



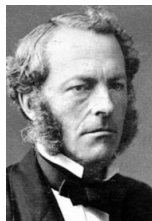
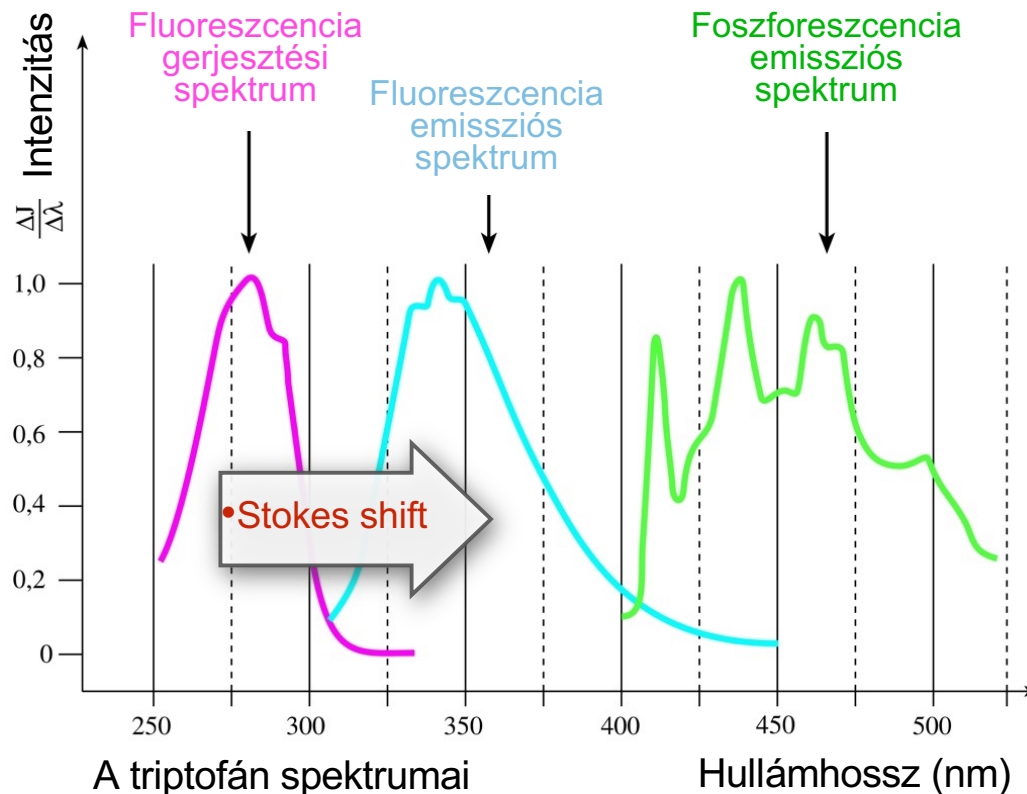
Michael Kasha  
(1920-2013)



# A lumineszcencia jellemzése

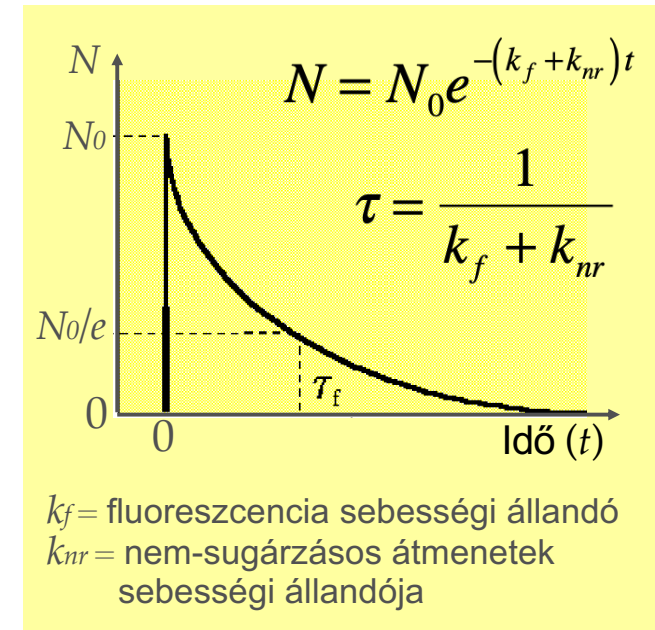
## 1. Spektrumok

- Sávos
- Gerjesztés-emisszió tükröszimmetrikus



George Stokes  
(1819-1903)

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

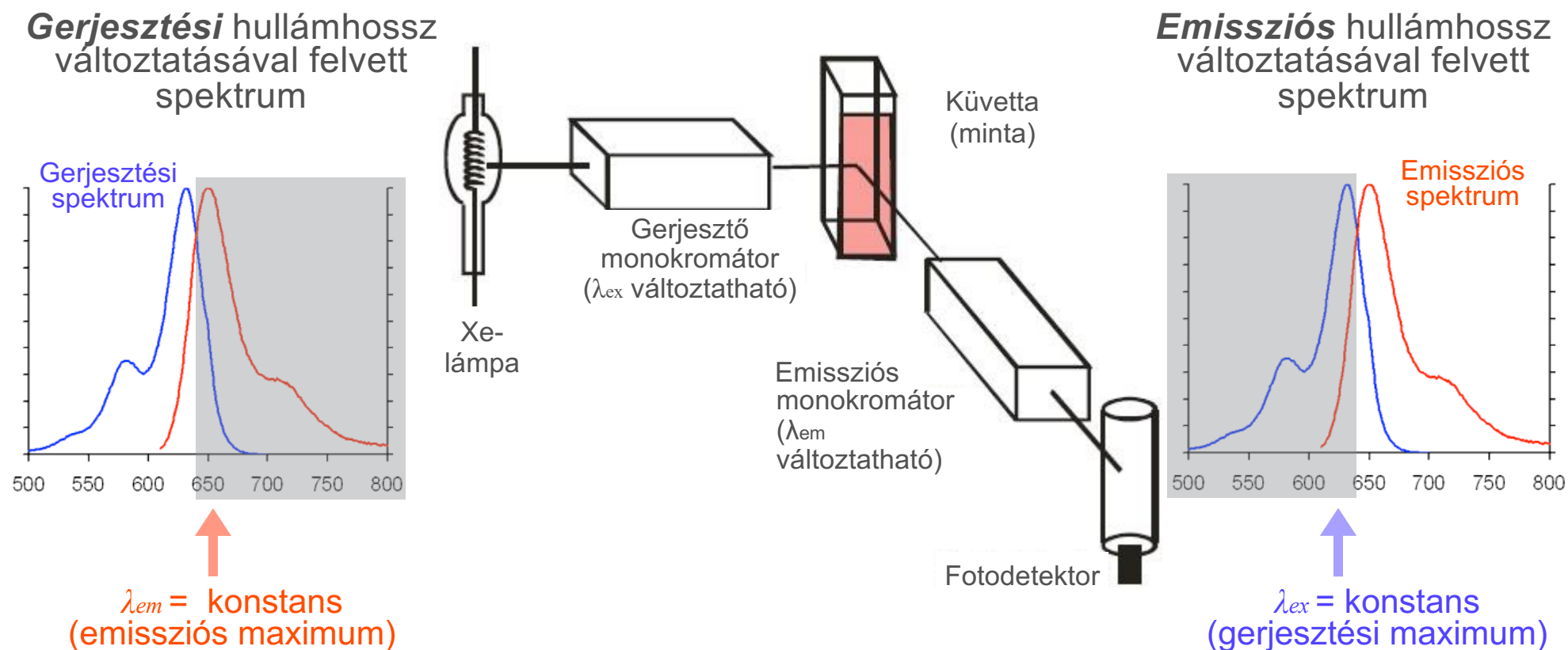


## 3. Kvantumhatásfok ( $\Phi$ )

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

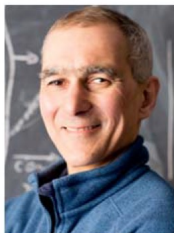
# A lumineszcencia mérése

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

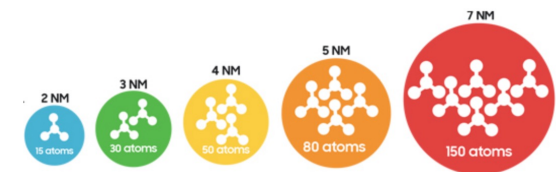
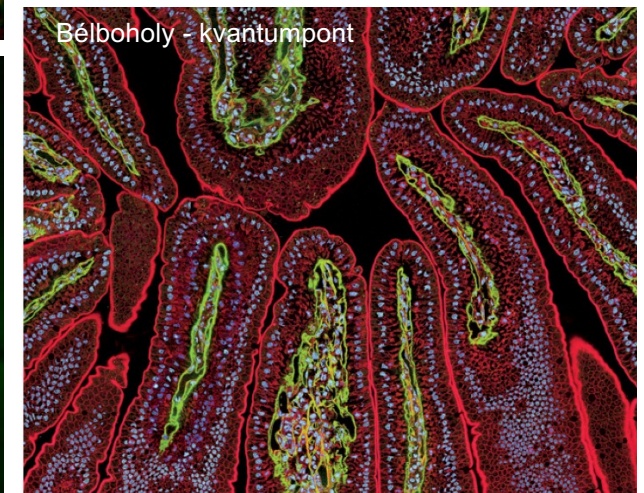
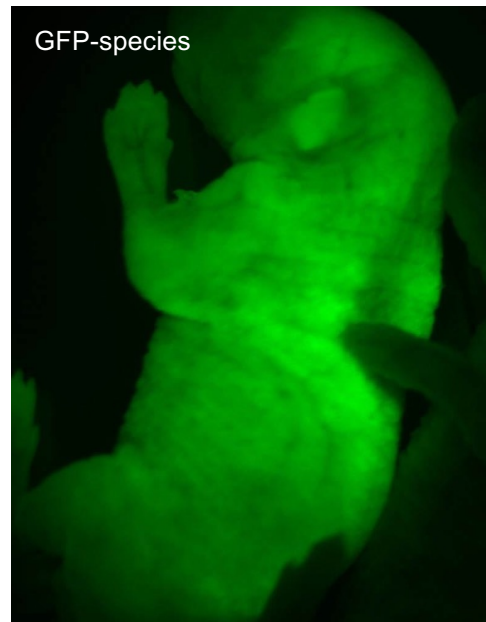
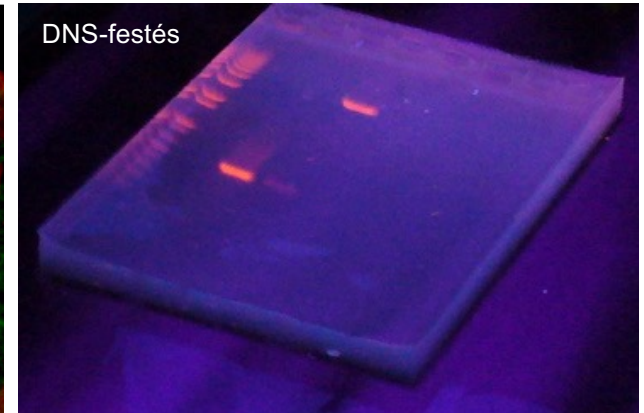
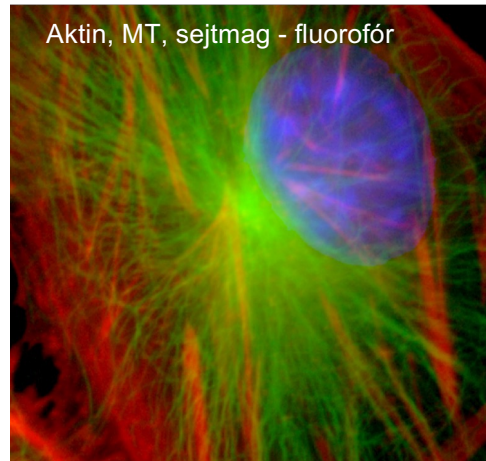


# A fluoreszcencia orvosi-biológiai alkalmazásai

- 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.



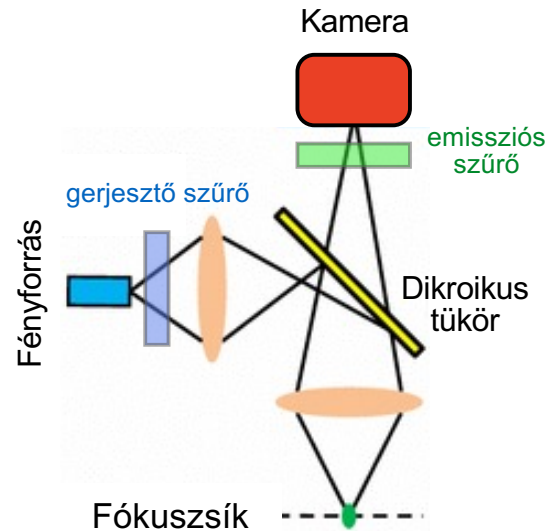
Mounqi G. Bawendi, Louis E. Brus, Alexei I. Ekimov  
kémiai Nobel-díj 2023





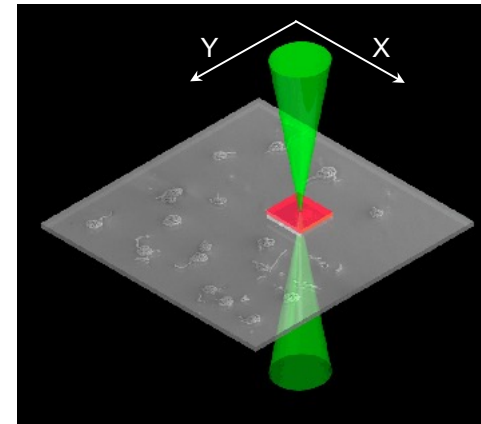
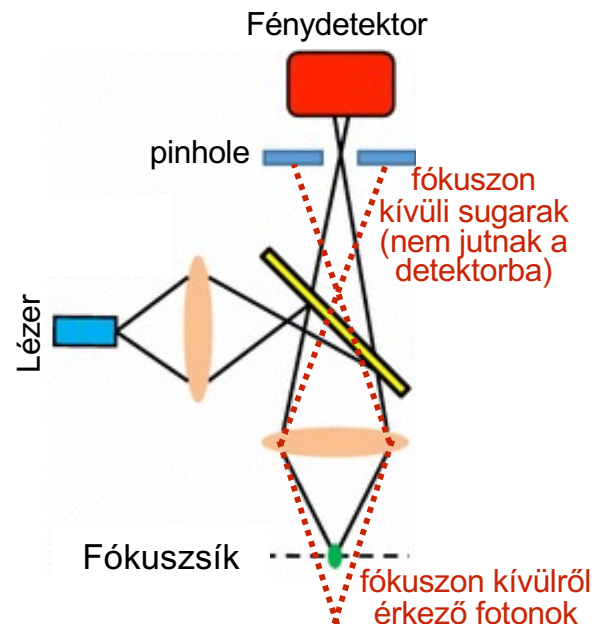
# Epifluoreszcencia mikroszkóp és Lézer pásztázó konfokális mikroszkóp

„Epi”:  
felületi,  
felülről érkező



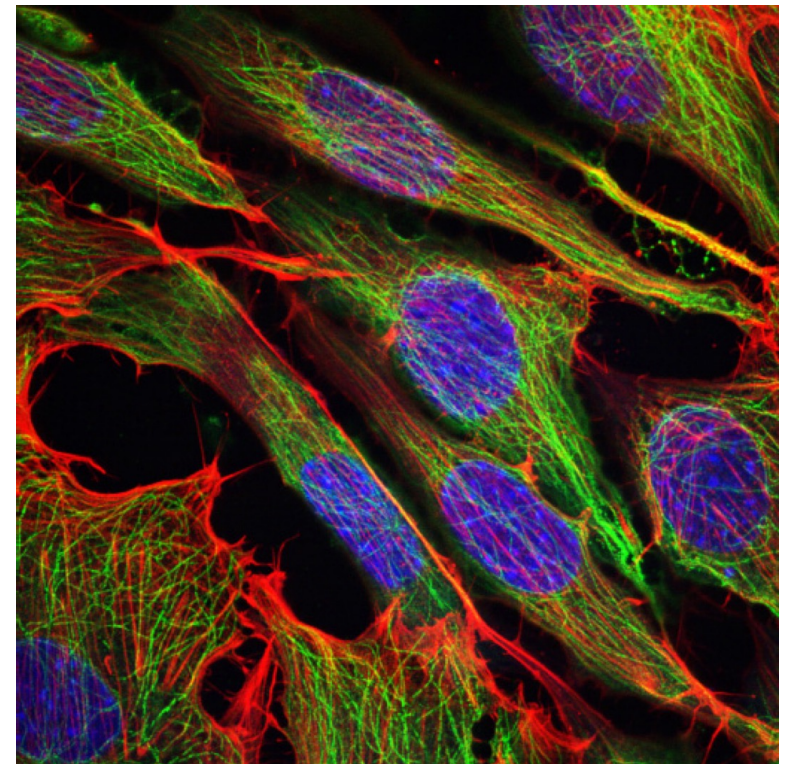
**Konfokálitás:**  
a gerjesztő és  
emissziós oldali optikai  
geometria fókuszpontja  
ugyanaz.

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



Pásztázás,  
pontról pontra  
adatgyűjtés

Zöld: mikrotubulusok;  
Vörös: aktin;  
Kék: sejtmag



# Szuperfelbontású mikroszkópia

Kémiai Nobel-díj, 2014



Eric Betzig



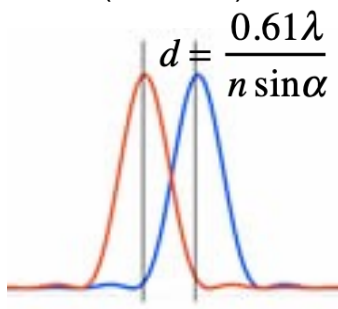
Stefan Hell



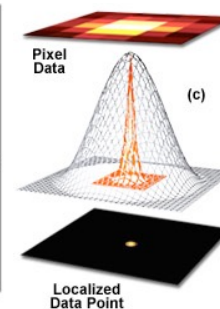
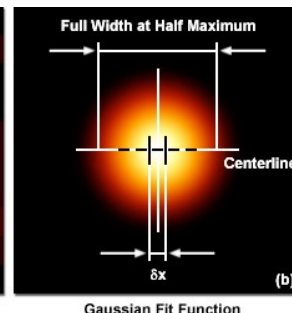
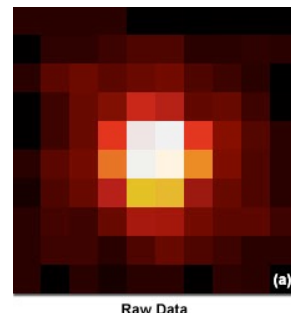
William E. Moerner

A feloldási problémát pozíciómeghatározási problémává alakítjuk!

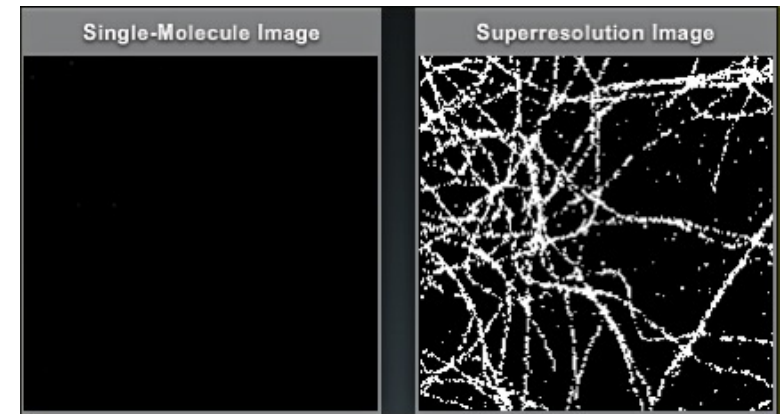
Feloldási probléma  
(Abbé-elv)



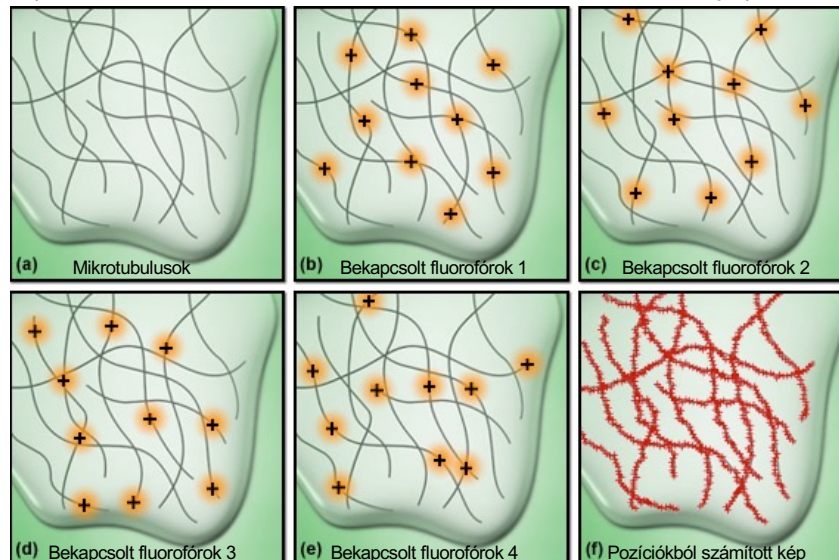
Pozíciómeghatározási probléma  
(pontosság a foton számától függ)



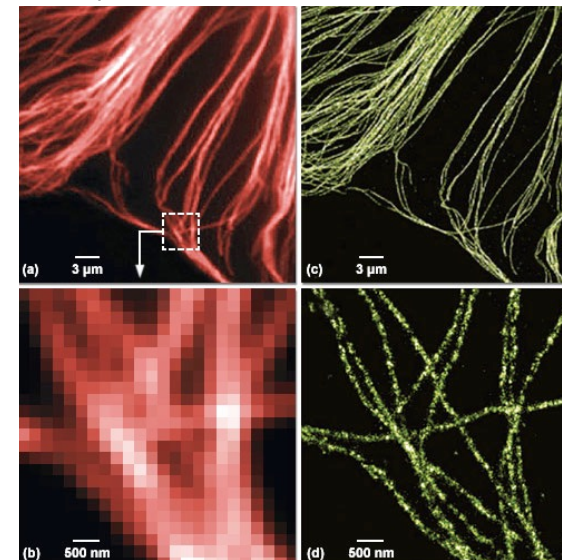
“Sztocasztikus” adatgyűjtés (egyedi fluorofórokról)



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



Adatgyűjtési  
folyamat



Mikrotubuláris  
rendszer

# OMHV



<https://feedback.semmelweis.hu/feedback/pre-show-qr.php?type=feedback&qr=CIGIENG55UU9KDVK>