

# **Elektromágneses sugárzások és biológiai rendszerek**

## **Ionizáló és nem-ionizáló sugárzások**

---

Dr. Fidy Judit  
egyetemi tanár  
2012 Febr.15

# Sugárzások és biológiai rendszerek

## Ionizáló és nem-ionizáló sugárzások

---



*Látható fény (nem ionizáló)*

*Röntgensugárzás*

*(Röntgen-cső, szerkezetvizsgálat, diagnosztika)*

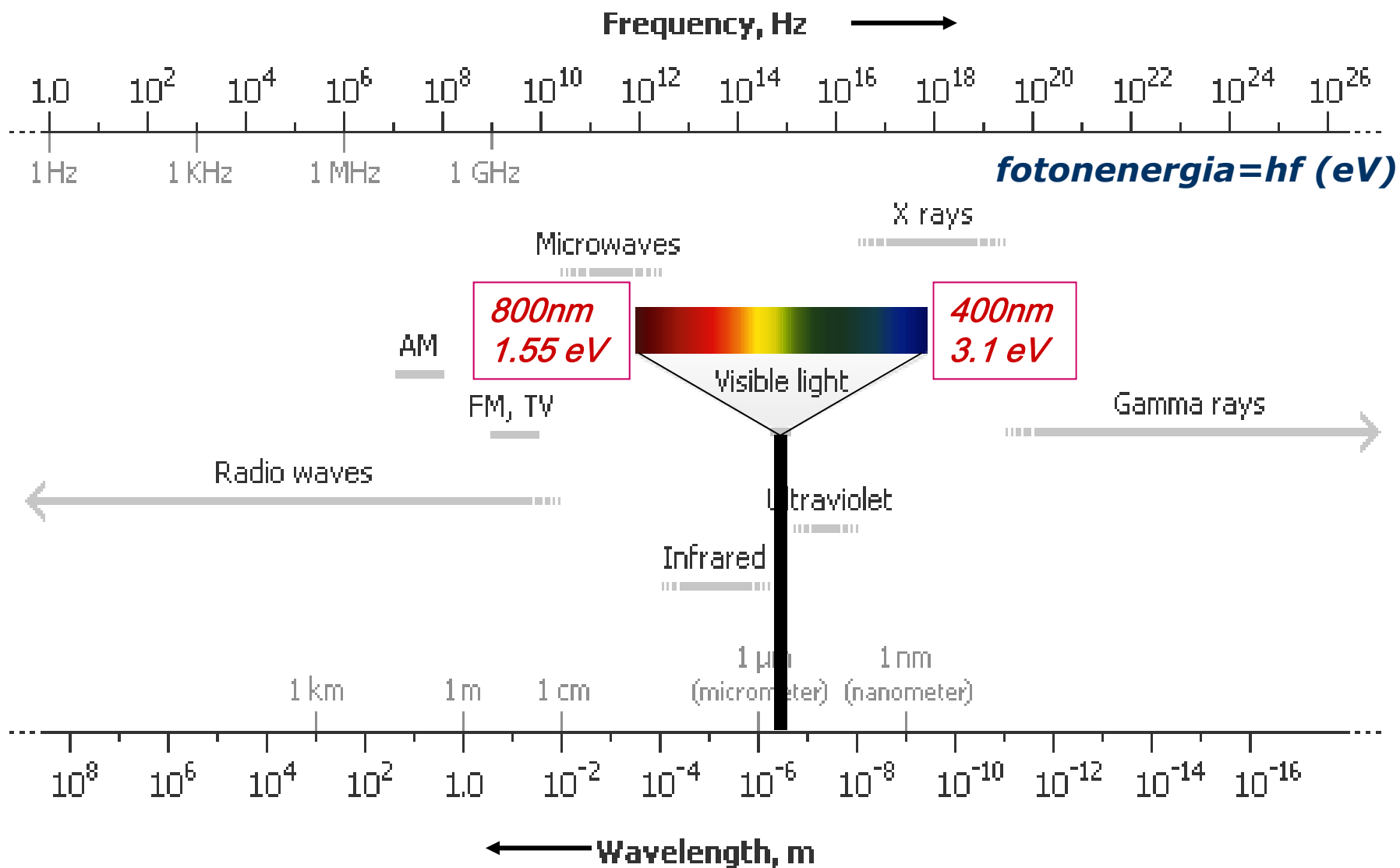
*(Magsugárzások és nagy energiájú röntgen sugárzás  
orvosi alkalmazásai ————— „Orvosi fizika” MSc)*

---

# **Fény – Röntgen sug. : elektromágneses hullámok**

*Logaritmikus skála*

$10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nanometer}$



***emlékeztető***

---

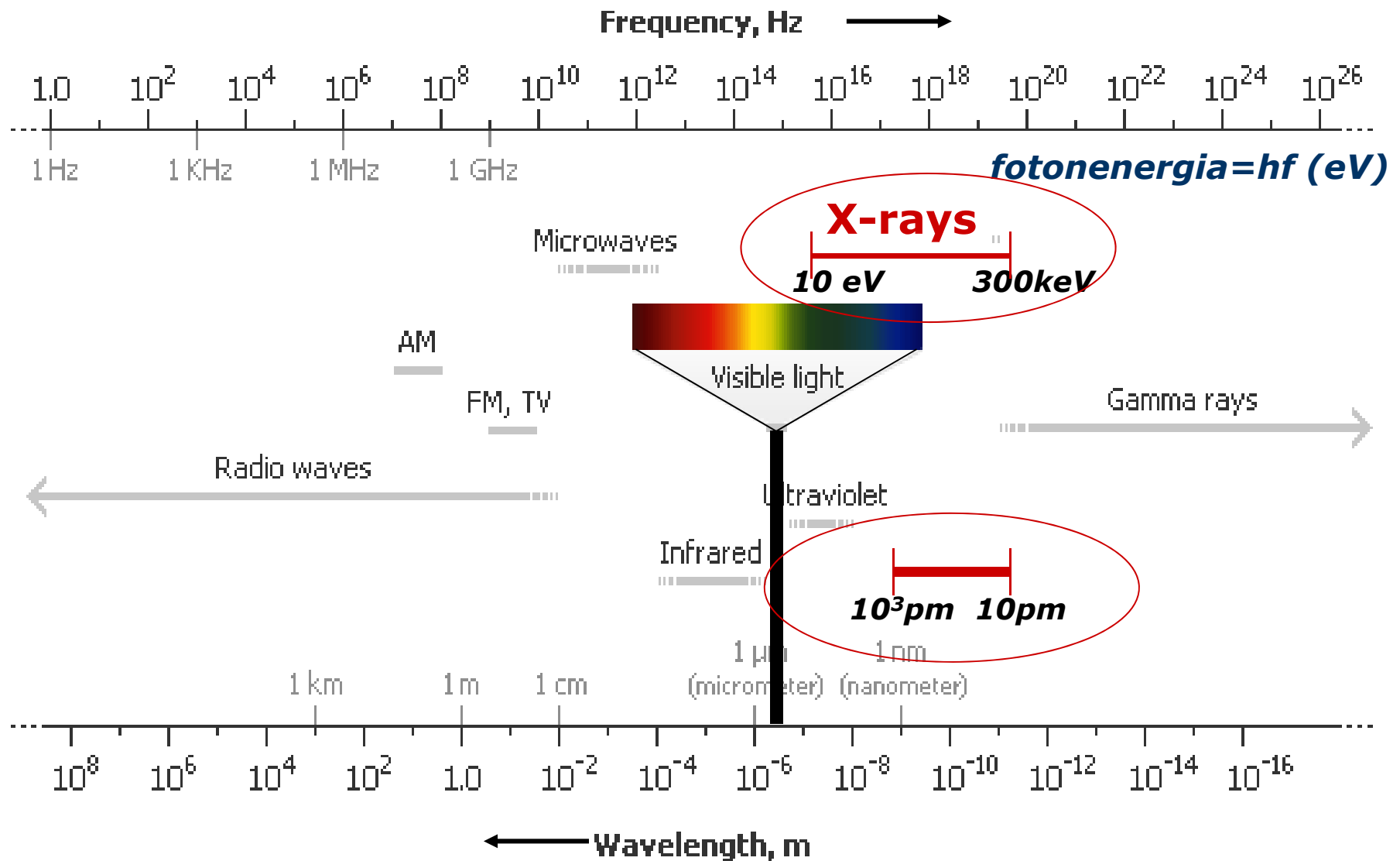
$$***1\text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{ Joule}***$$

---

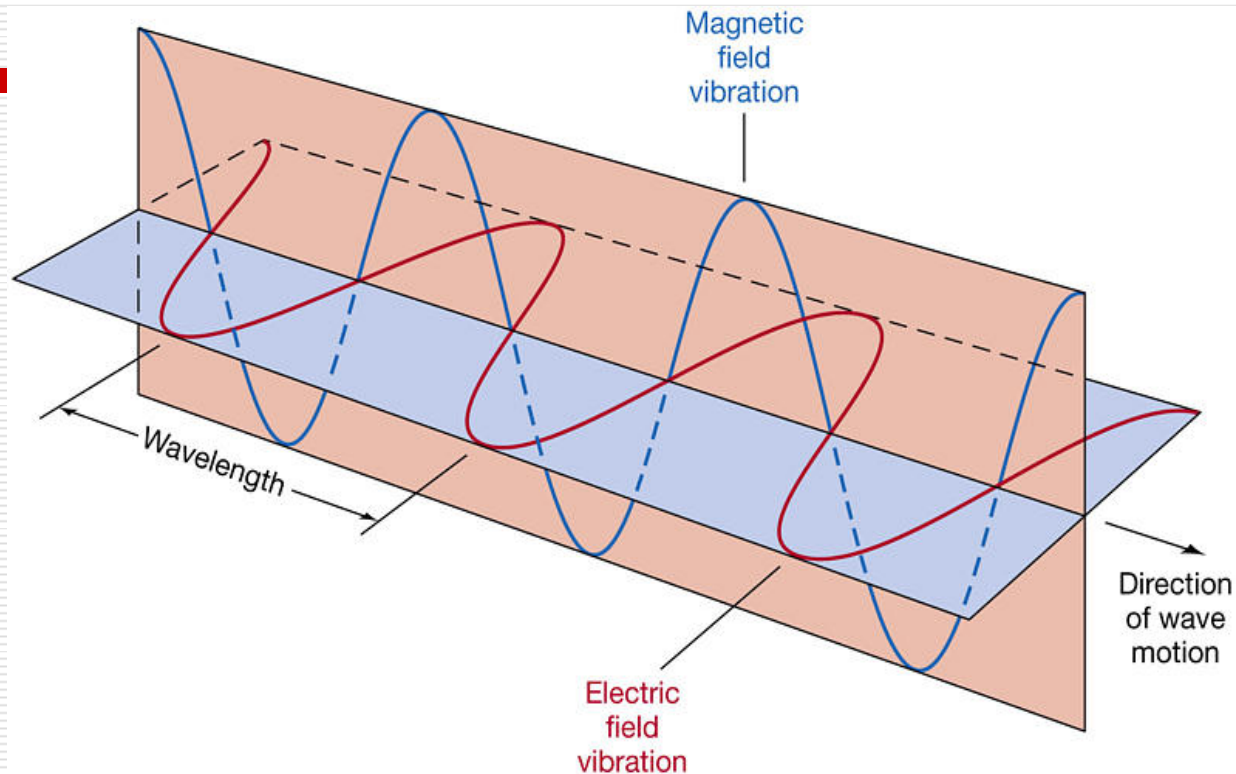
# Fény – **X-ray** elektromágneses hullámok

Logaritmikus skála

$10^{-9} m = 1 \text{ nanometer}$



# Elektromágneses hullámok - emlékeztető

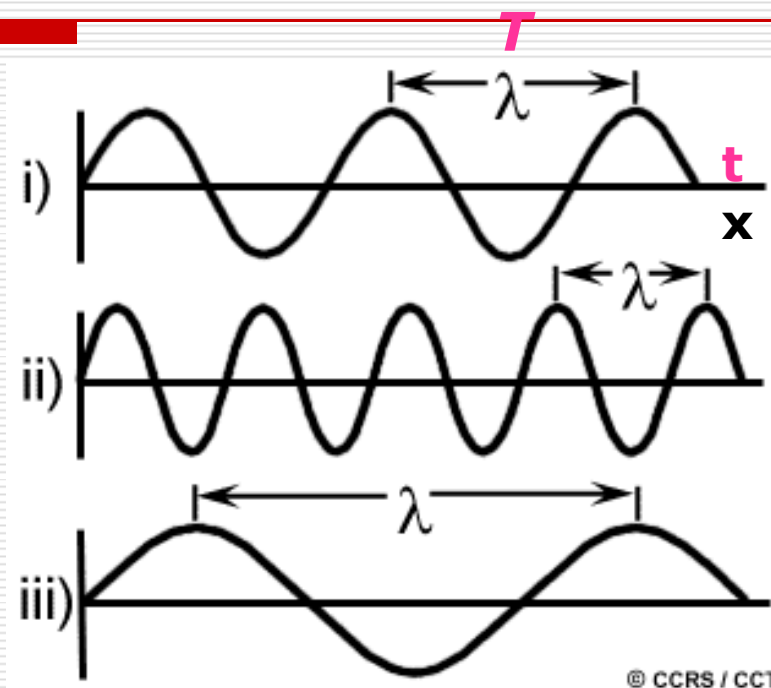
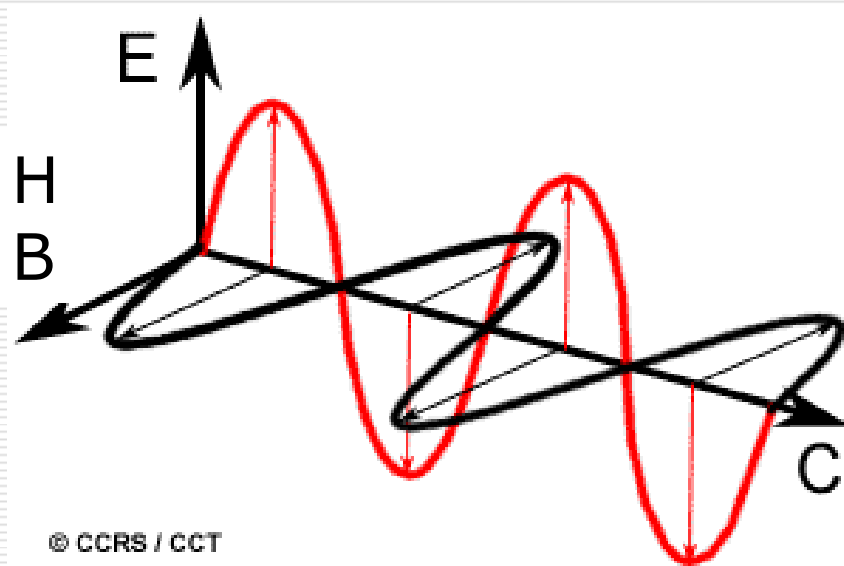


$$E = E_{\max} \cdot \sin \left( 2\pi \frac{t}{T} + 2\pi \frac{x}{\lambda} + \Phi \right)$$

$$B = B_{\max} \cdot \sin \left( 2\pi \frac{t}{T} + 2\pi \frac{x}{\lambda} + \Phi \right)$$

*Az elektromos és mágneses térnek azonos a fázisa és a periodicitása ( $T, \lambda$ )*

## EM hullámok fontos tulajdonságai



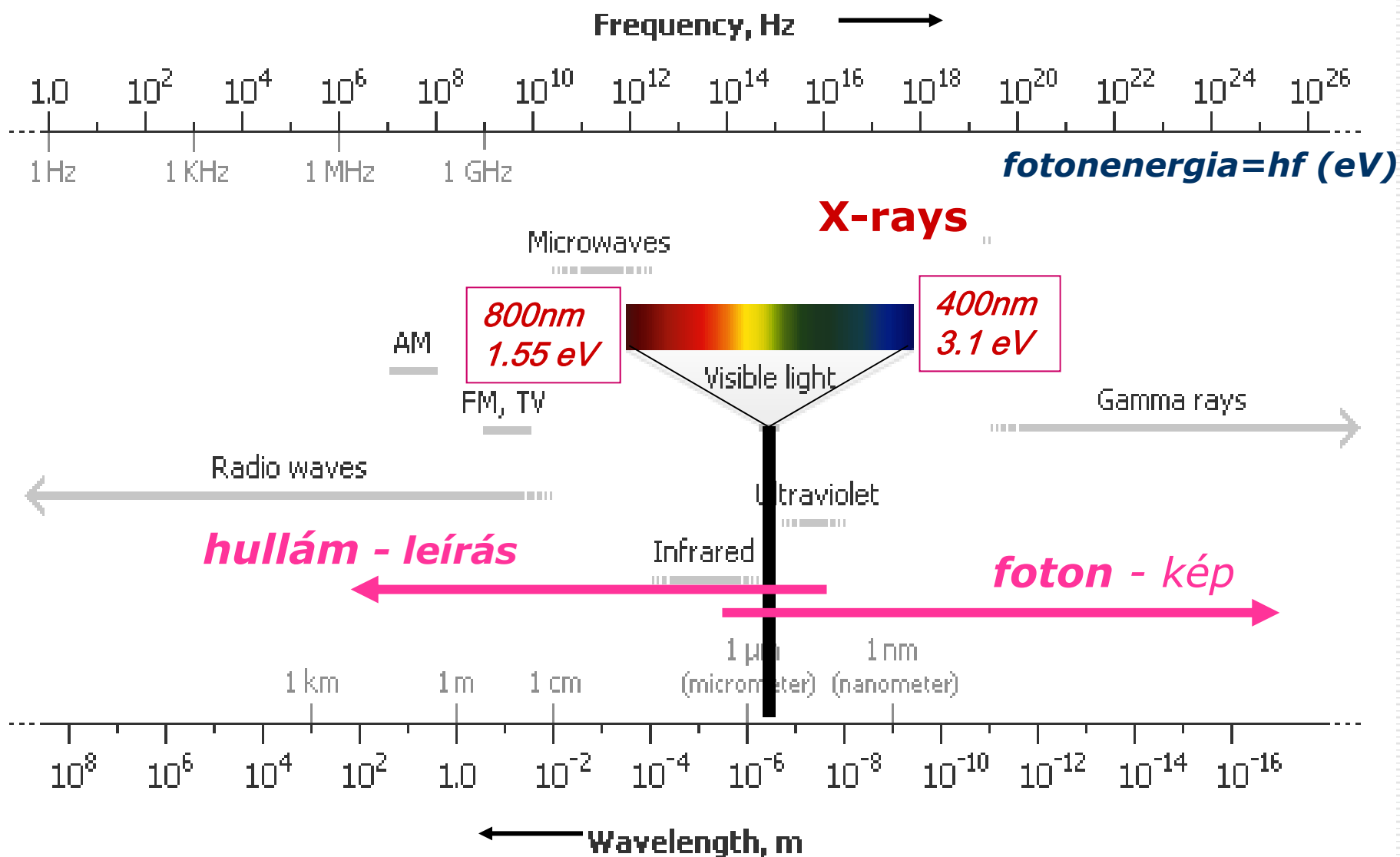
$$c = \lambda / T, \quad f = 1/T, \quad c = f \lambda (m/s)$$

**$c = 299,792,458 \text{ m/s}$  vákuumban**

$$c = \frac{E}{B}$$

# Elektromágneses hullámok – kettős természet ?

Logaritmikus skála





---

# ***A fény természete, forrásai és biológiai hatásai***

---

# ***A fény terjedésének és anyagi kölcsönhatásainak értelmezéséhez **mind a hullám- mind a foton-leírást használjuk*****

---

## ***Kettős természet***

- **hullám**

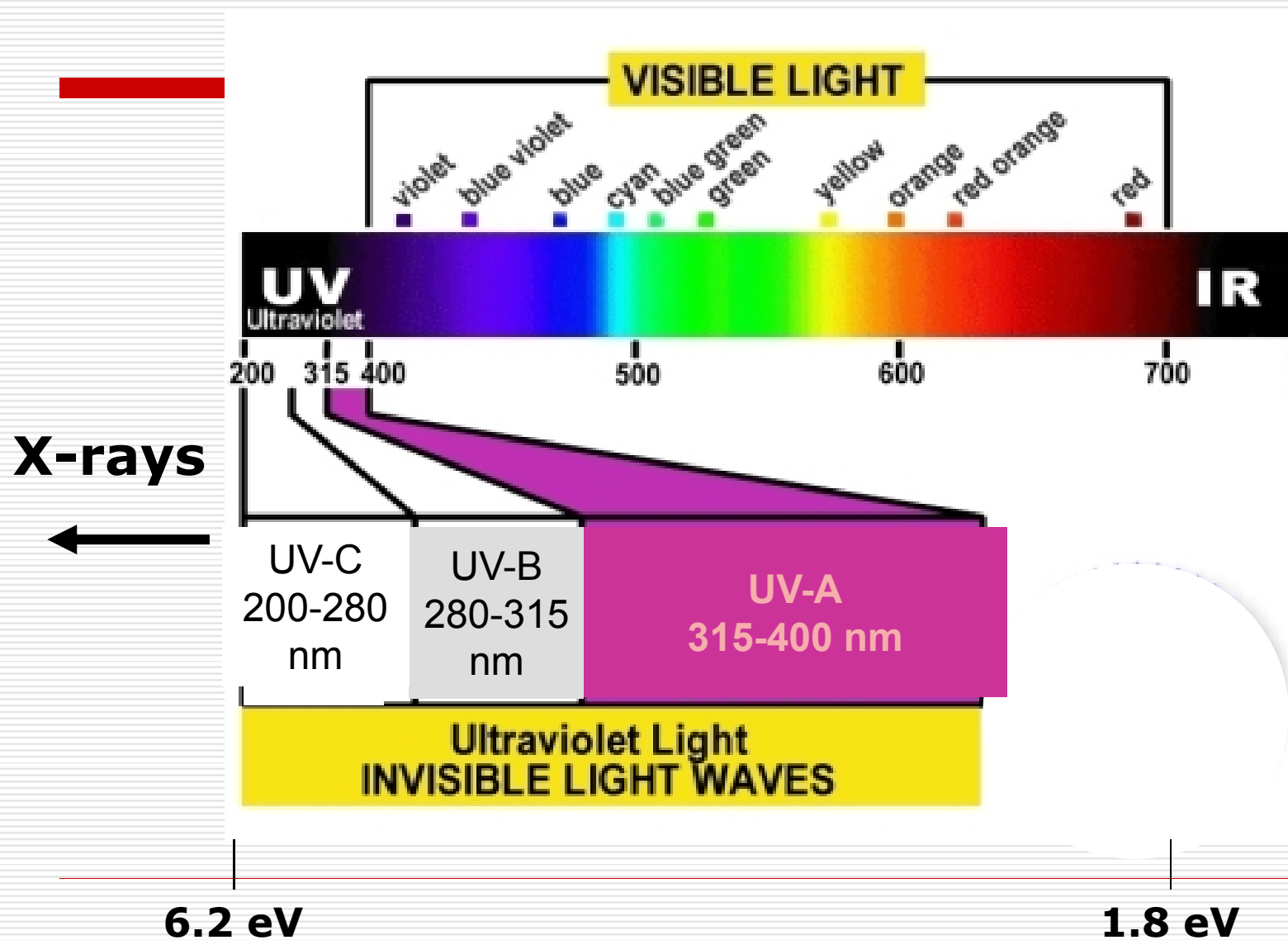
Huygens elv, diffrakció, **interferencia**

- részecske: **foton** (energia-kvantum)

**fotoelektromos hatás**, energiaátadás anyagoknak  
kvantált energiaadagokban, kölcsönhatásokban  
**partnere az elektron**

---

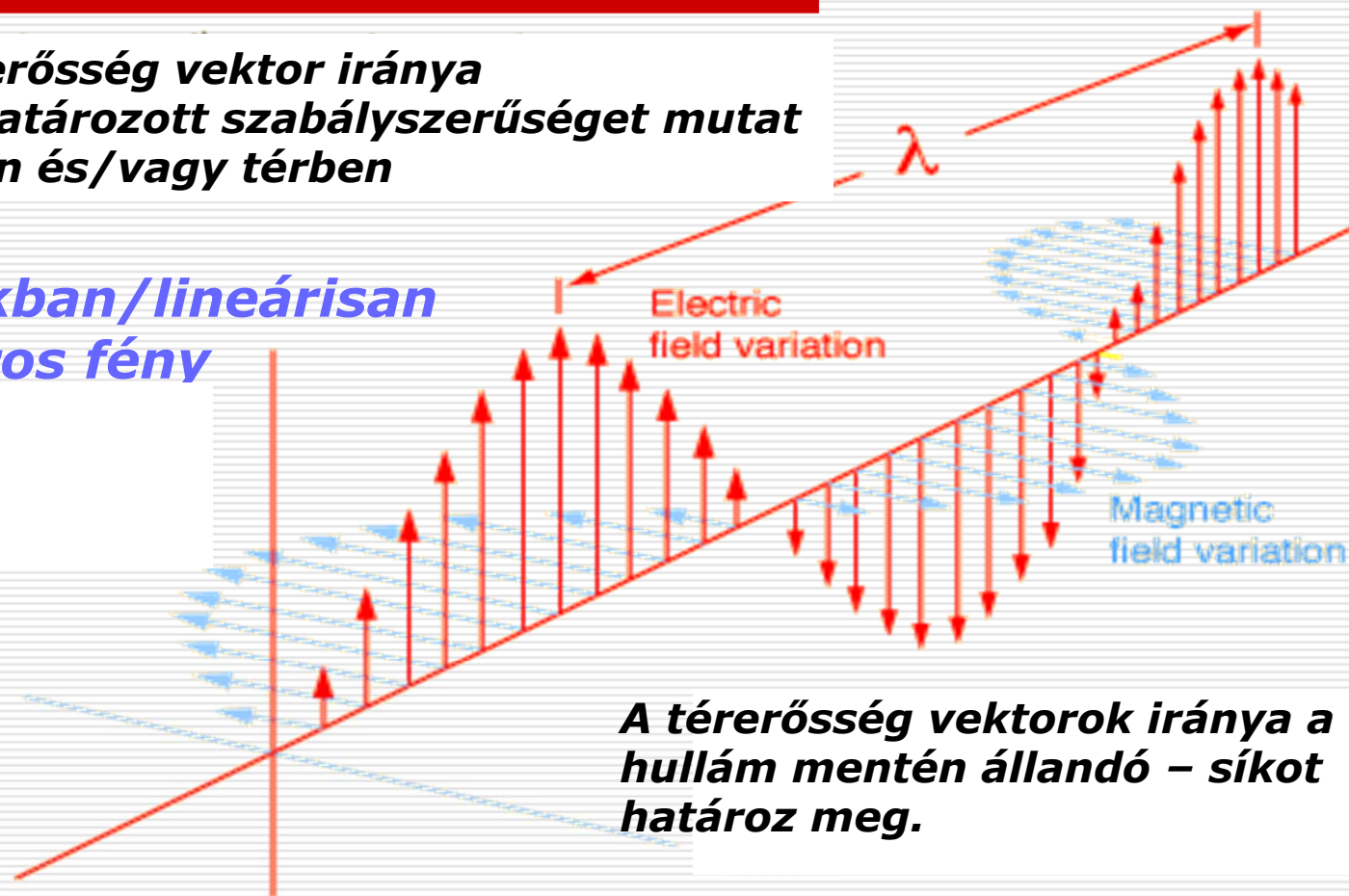
## *A fény hullám paramétere*



# A fény hullám polarizáltsága

**A térerősség vektor iránya meghatározott szabályszerűséget mutat időben és/vagy térben**

**a. Síkban/lineárisan poláros fény**



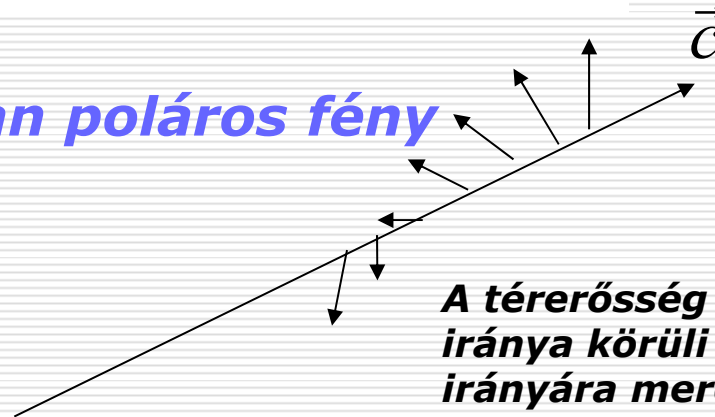
**A térerősség vektorok iránya a hullám mentén állandó – síkot határoz meg.**

# Poláros fény

**A térerősség vektor iránya meghatározott szabályszerűséget mutat időben és/vagy térben**

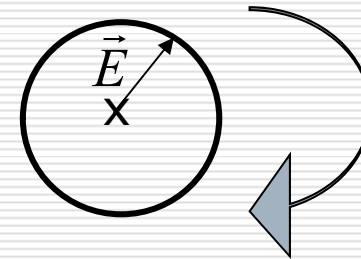
## b. Cirkulárisan poláros fény

**jobbra - balra**



**A térerősség vektor végpontja a terjedés iránya körüli spirálison mozog. A „c” vektor irányára merőleges síkra vetítve E és B egyenletes körmozgást végez.**

Jobbra cirkulárisan poláros fény

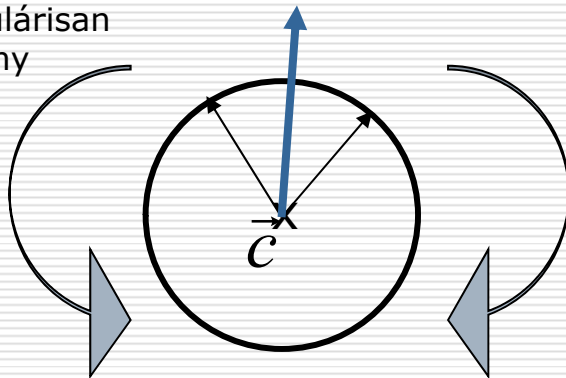


## Poláros fény

**A térerősség vektor iránya meghatározott szabályszerűséget mutat időben és/vagy térben**

**A lineárisan poláros fény két, jobbra, ill. balra cirkulárisan poláros fény eredője**

Balra cirkulárisan poláros fény



**A térerősség vektor végpontja a terjedés iránya körüli spirálison mozog. A „c” vektor irányára merőleges síkra vetítve E és B egyenletes körmozgást végez.**

Jobbra cirkulárisan poláros fény

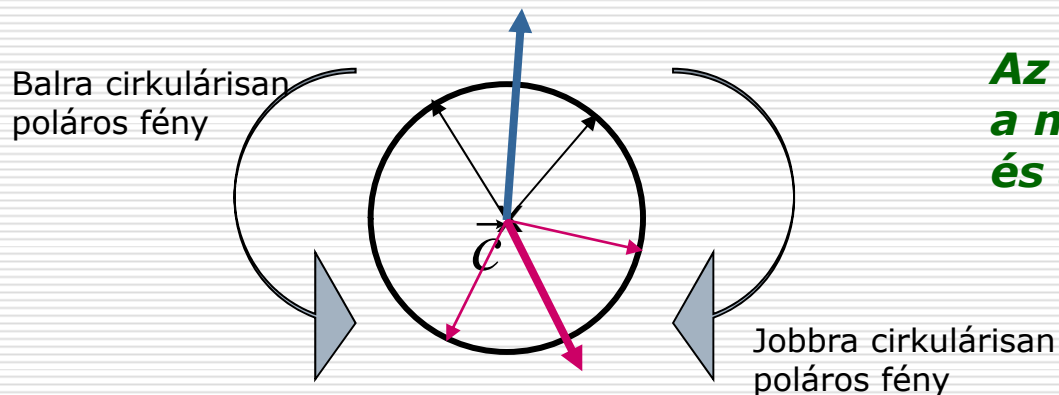
**Azonos terjedési sebesség, frekvencia és amplitudó**

## Poláros fény

### **Optikailag aktív anyagok (molekulák, szerkezetek) a linárisan poláros fény térerősség-vektorának irányát elfordítják**

Oka: speciális aszimmetria – tükörszimmetria hiánya

A mintában a cirkulárisan poláros komponensek terjedési sebessége különböző

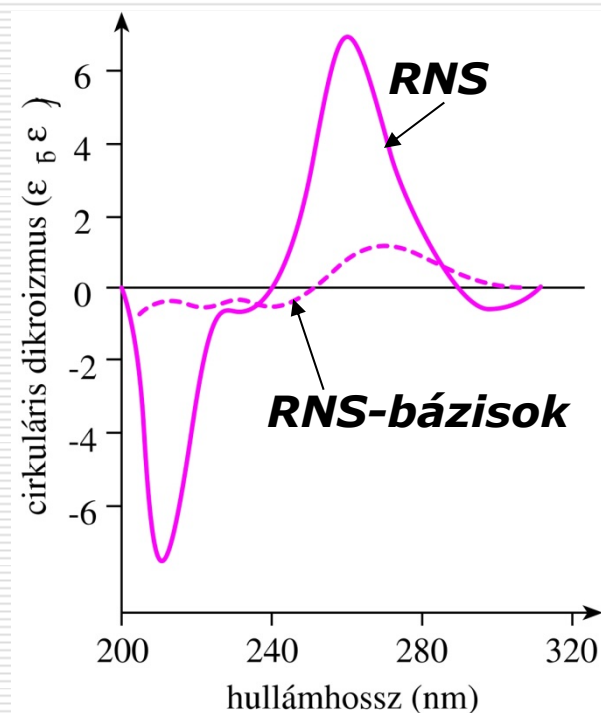
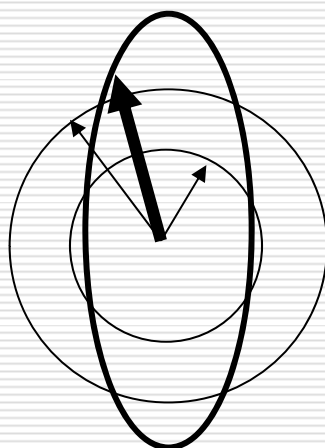
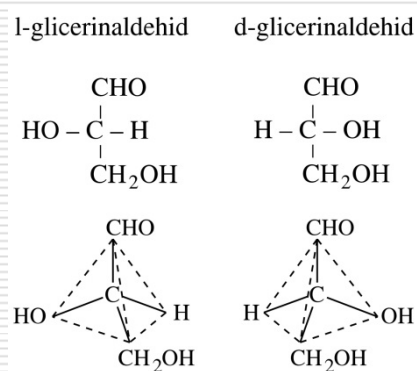


***Az optikai forgatás mértéke a molekulák minőségére jellemző és arányos a részecskeszámmal***

***Különböző terjedési sebesség, azonos amplitudó***  
***Azonos terjedési sebesség és amplitudó***

# Poláros fény

## Elliptikusan poláros fény Cirkuláris dikroizmus



**A két cirkulárisan poláros komponens törésmutatóban és abszorbanciában is különbözik a kölcsönhatás után → az eredő elliptikusan polárossá válik**

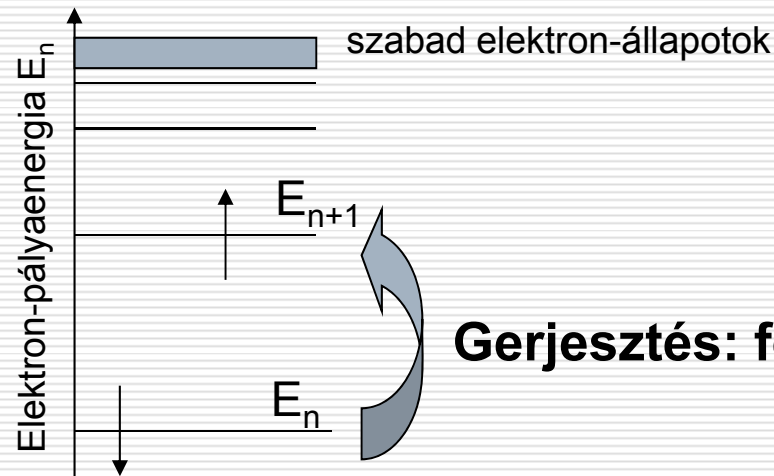


# Fény-foton koncepció

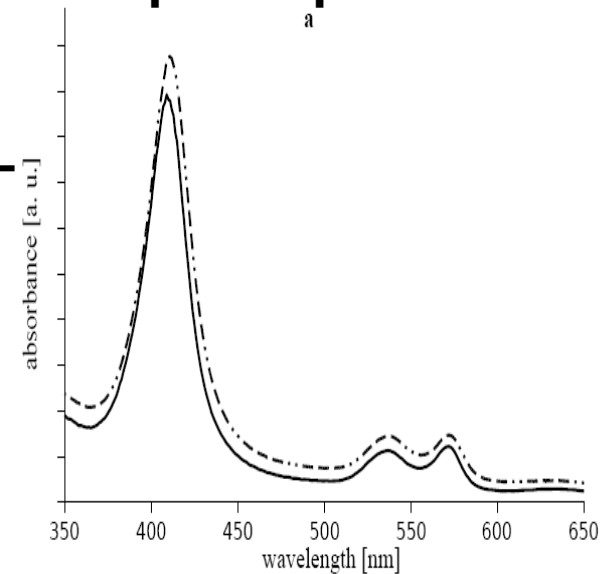
*anyaggal való kölcsönhatás magyarázata*

$$h * f = h * \frac{c}{\lambda}$$

**A fény-elnyelés mértéke függ a hullámhossztól-fotonenergiától**



Hemoglobin molekula oldata  
**Abszorpciós spektrum**



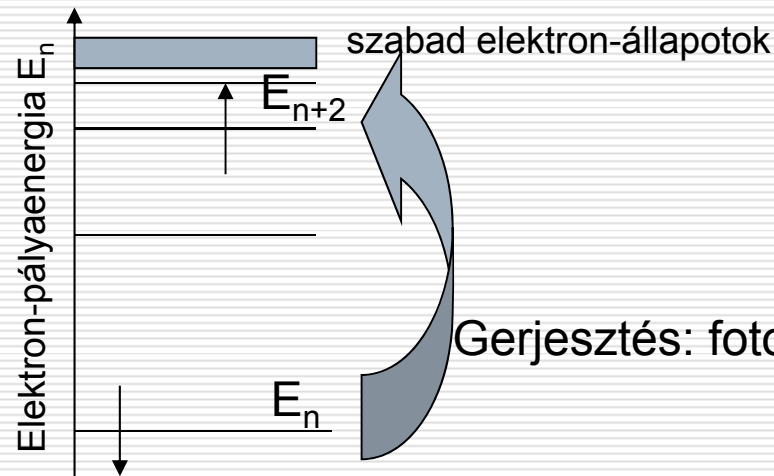
**Gerjesztés: fény-fotonenergia-felvétellel**

# Fény-foton koncepció

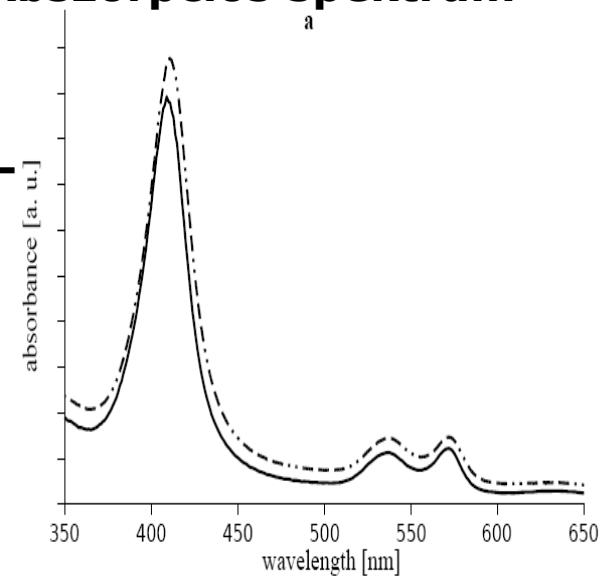
*anyaggal való kölcsönhatás magyarázata*

$$h * f = h * \frac{c}{\lambda}$$

**A fény-elnyelés mértéke függ a hullámhossztól-  
fotonenergiától**

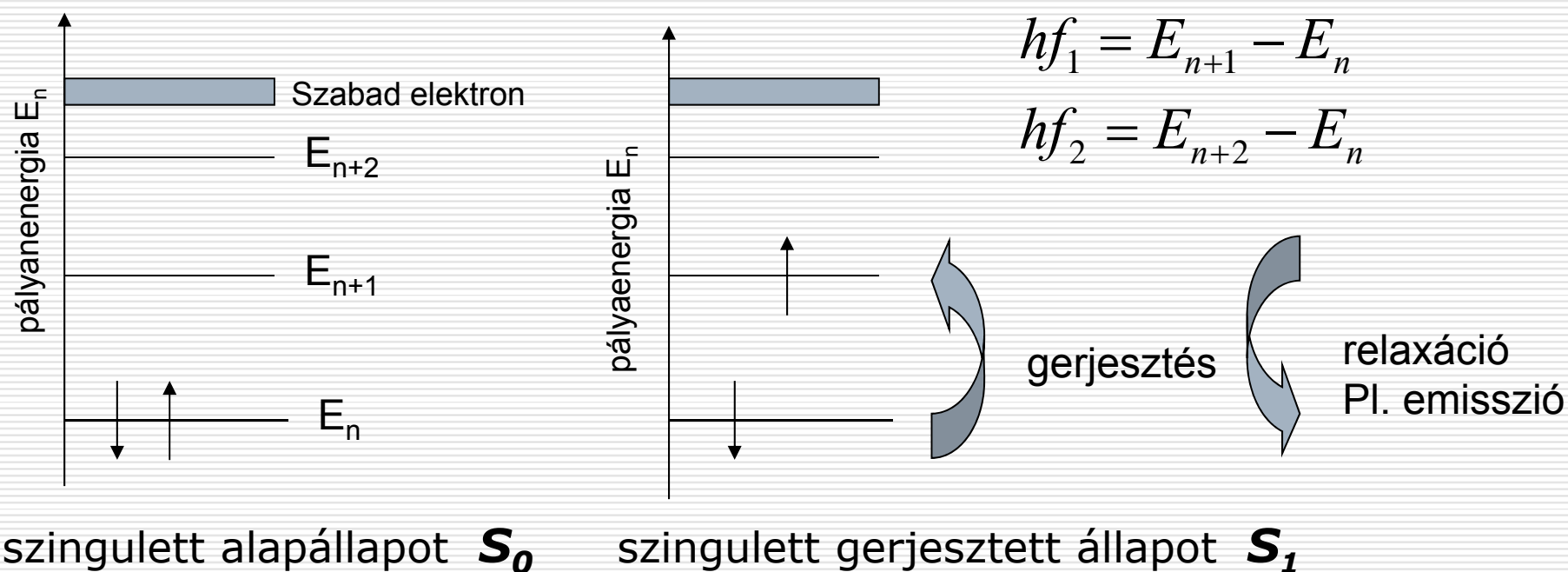


Hemoglobin molekula oldata  
**Abszorpciós spektrum**



# Fényfoton elnyelése - emissziója

## használt sémák, jelölések



**Szingulett állapot (singlet):**  $\sum_i s_i = 0$

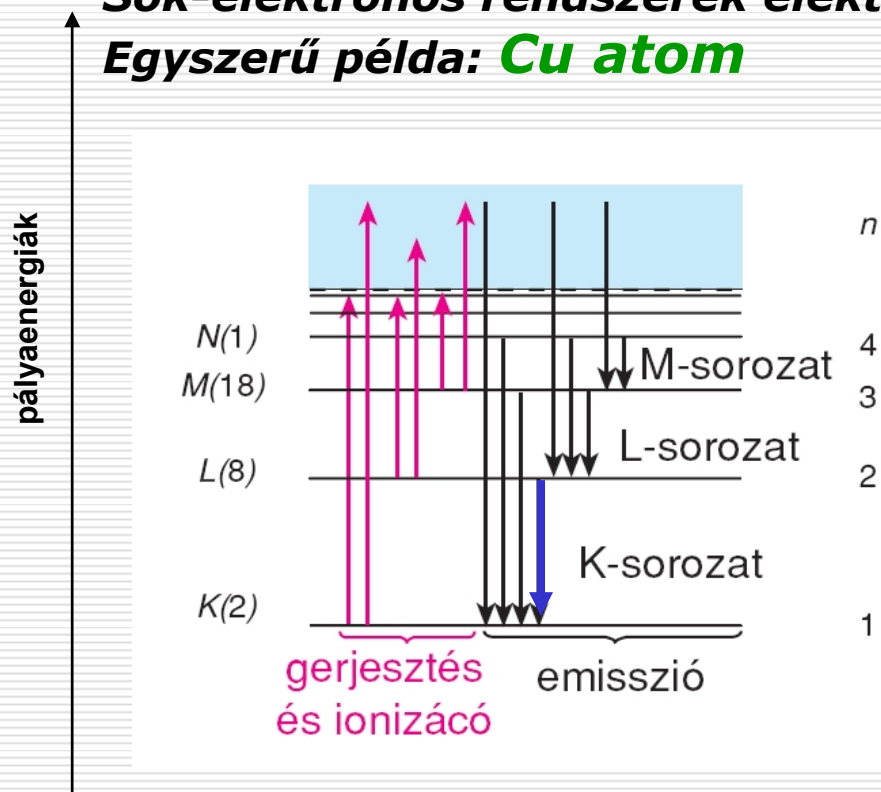
**Sematikus ábrázolás: csak a legfelső betöltött nível elektronjai**

# Optikai elektron-átmenetek

**FOTON  $\longleftrightarrow$  ELEKTRON**

**abszorpció és emisszió  
foton-képben**

**Sok-elektronos rendszerek elektron-energiái**  
**Egyszerű példa: *Cu atom***



**Optikai foton-energia ( $\sim 2-3$  eV)  
elnyelése - emissziója  
a legkülső – leglazábban kötött  
elektronokat érinti**

**$E_{K\alpha} \sim 8$  keV (L  $\rightarrow$  K átmenet)  
Röntgen-tartomány!**

# Fényfoton elnyelése – emissziója

## Mérés: optikai spektroszkópia

-Elnyelési  
-Abszorpciós spektrum

-Kibocsátási  
-Emissziós spektrum

$(\frac{1}{2}mv^2$  - részecske-sugárzás)

$$hf = h \frac{c}{\lambda} = hc \frac{1}{\lambda}$$

$[eV]$        $\frac{1}{\lambda} [cm^{-1}]$

**SPEKTRUM**

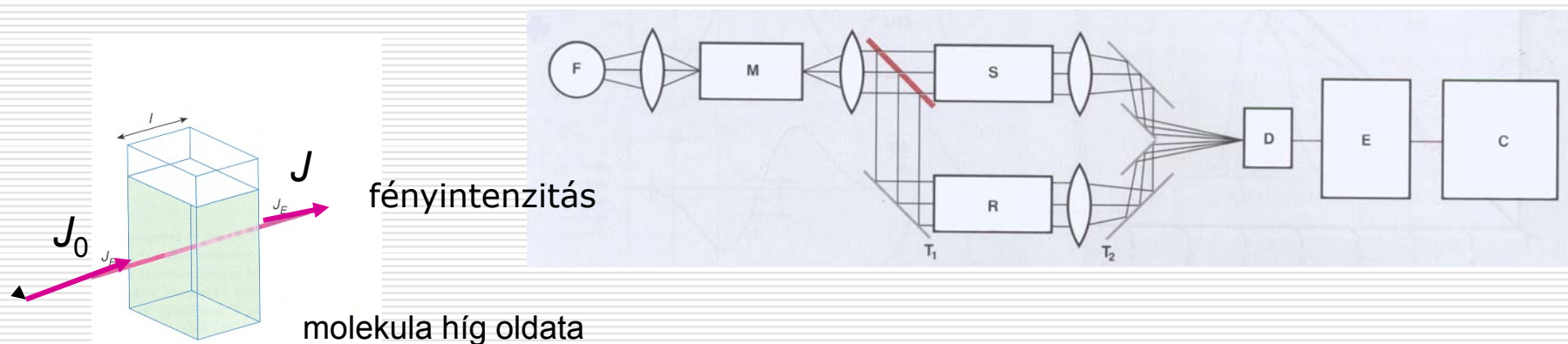
elnyelés  
v. kibocsátás  
valószínűsége

energia  
pl. részecske-energia  
fotonenergia

**IR- VIS – UV**  
Optikai spektroszkópia

Milyen fény-fotonok gerjesztenek?  
Mérés: **optikai abszorpciós spektrum**

abszorpciós spektrofotométer



**Lambert-Beer törvény**

A= Abszorbancia  
D= Optikai denzitás

$$\lg \frac{J_0}{J} = \varepsilon(\lambda) * c * l$$

$h*f$

Milyen fotonok gerjesztenek?

$\varepsilon(\lambda)$  **Moláris extinkció kvantumkémiai értelmezése:**  
„Átmeneti dipólus-momentum”

Egy elektronátmenet valószínűségét a kiindulási és a végső elektron-vibrációs pálya  
Kvantumszámai határozzák meg (hullám-kép):

**kiválasztási szabályok**

**Mennyit változhatnak a kvantumszámok?**

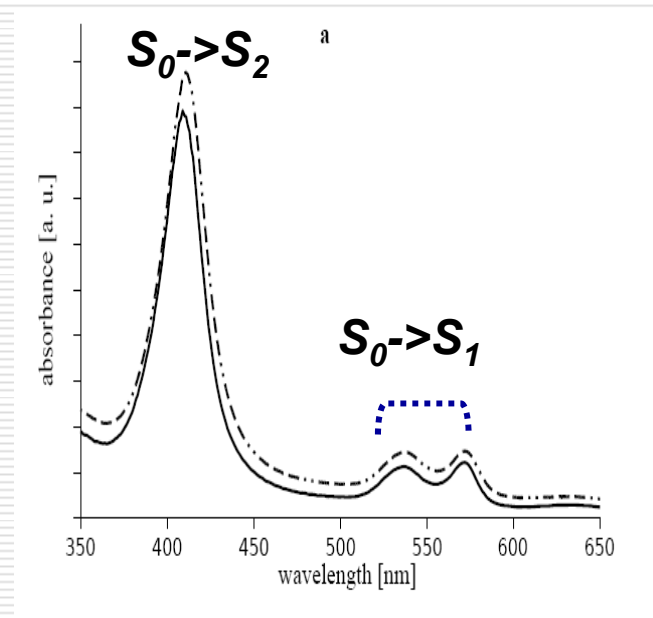
$\Delta n$  = bármennyi,  $\Delta l = \pm 1$ ,  $\Delta m = 0$  vagy  $\pm 1$

$\Delta s = 0$

+ vibrációs módusok csatolása

**Gerjesztési vagy emissziós átmenetben az elektron spinállapota nem változhat**

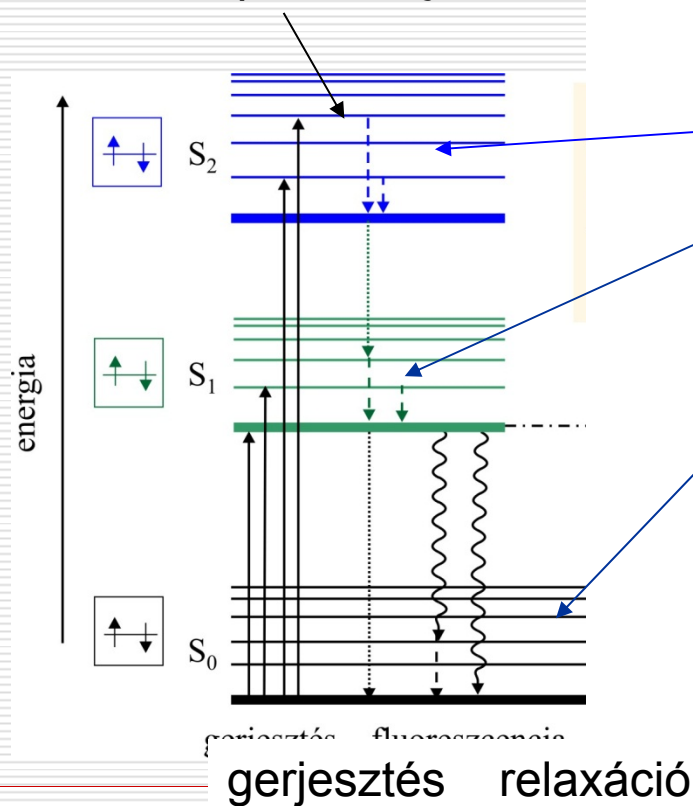
**Hemoglobin abszorpciós spektruma**



**Megengedett, és tiltott átmenetek .....nagy vagy kis valószínűségű átmenetek**

# Molekula – kölcsönhatásban a környezettel „sávos” spektrumok

Az elektron-pályák energiáit a **molekulák** diszkrét **vibrációs** állapotai kis mértékben perturbálják



A vibrációs nívók mind az abszorpció, mind az emisszió átmenetek fotonenergiáiban új lehetőségeket jelentenek

Egyes fotonenergiák helyett közeli Fotonenergiák sorozata a spektrumokban

**Molekulák vibrációi**  
**T hőmérséklet**

**SÁVOK**

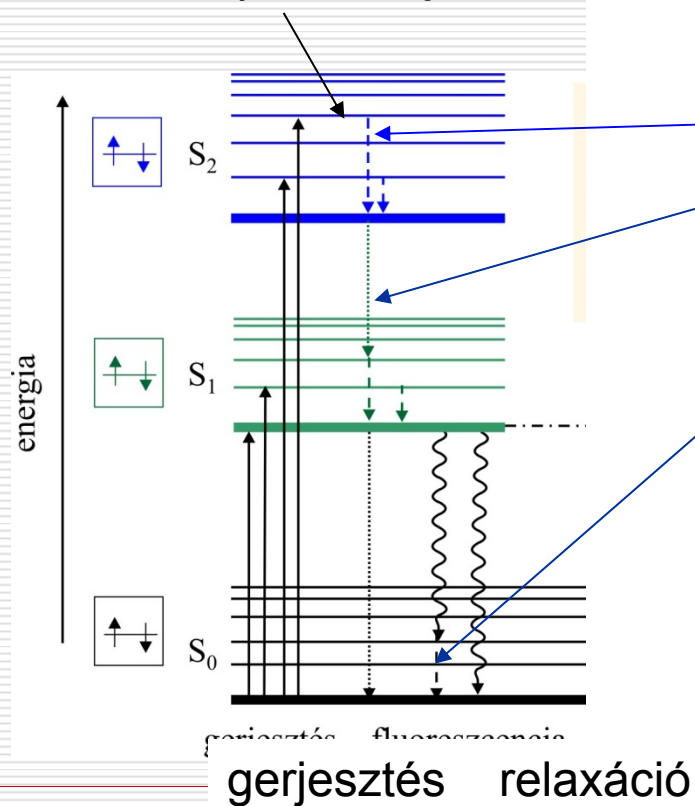
**Környezeti kölcsönhatások**

Aromás szénhidrogének



## **Molekula – kölcsönhatásban a környezettel emisszió csak a legalsó gerjesztett állapotból**

Az elektron-pályák energiáit a **molekulák** diszkrét **vibrációs** állapotai kis mértékben perturbálják



### **Kasha-szabály**

A felsőbb gerjesztett állapotokból nincs átmenet az alapállapotba fotonemisszióval – vibrációs relaxáció (energialeadás hő formájában) az elektronállapotokon belül, és az  $S_1$  állapotba

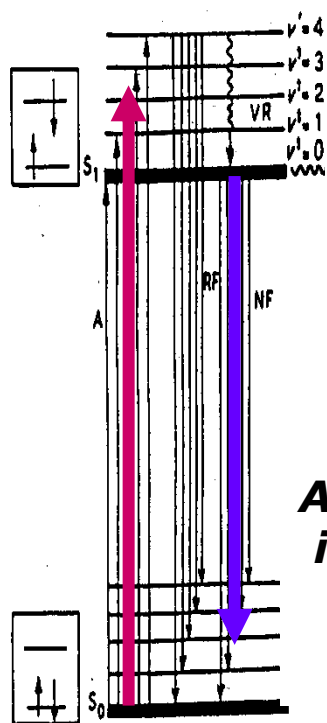
**Emisszió csak az  $S_1$  nívóról**

Aromás szénhidrogének

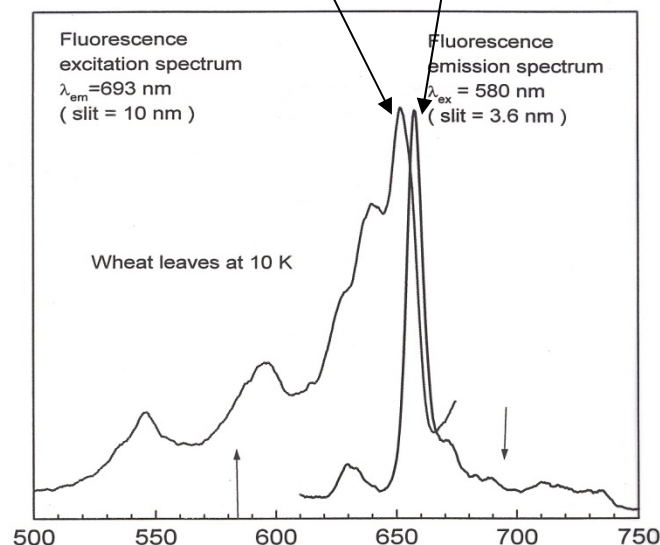
# **Molekula – kölcsönhatásban a környezettel** **emisszió a gerjesztésnél hosszabb hullámhosszakon**

*A mért abszorpciós és emissziós sávok energiája eltér egymástól*

## **Stokes-féle eltolódás**



**Az abszorpció és az emisszió  
is a legalsó vibrációs szintről történik**



$$\overline{hf}_{abs} > \overline{hf}_{fluo}$$

$$\lambda_{abs} < \lambda_{fluo}$$

Maximum-helyek

## ***A polarizáció (hullám-tulajdonság) szerepe fény-abszorpcióban, fény-emisszióban***

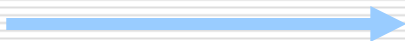
---

A molekulák gerjesztésekor elektronállapotváltozás töltéseltolódás  
Dipólus vektorral jellemezhető : **‘átmeneti momentum’**

→ Függ a molekula szerkezetétől, a szerkezethez orientált  
pl. triptofán: a molekula síkjában

**Fotoszelekció:** poláros fény elektromos térerősség vektora azokat az elektronokat gerjeszti, ahol a keltett dipólus-momentum és a térerősség vektor iránya (közelítőleg) megegyezik. Emisszióban is dipólus-jelleg érvényesül.

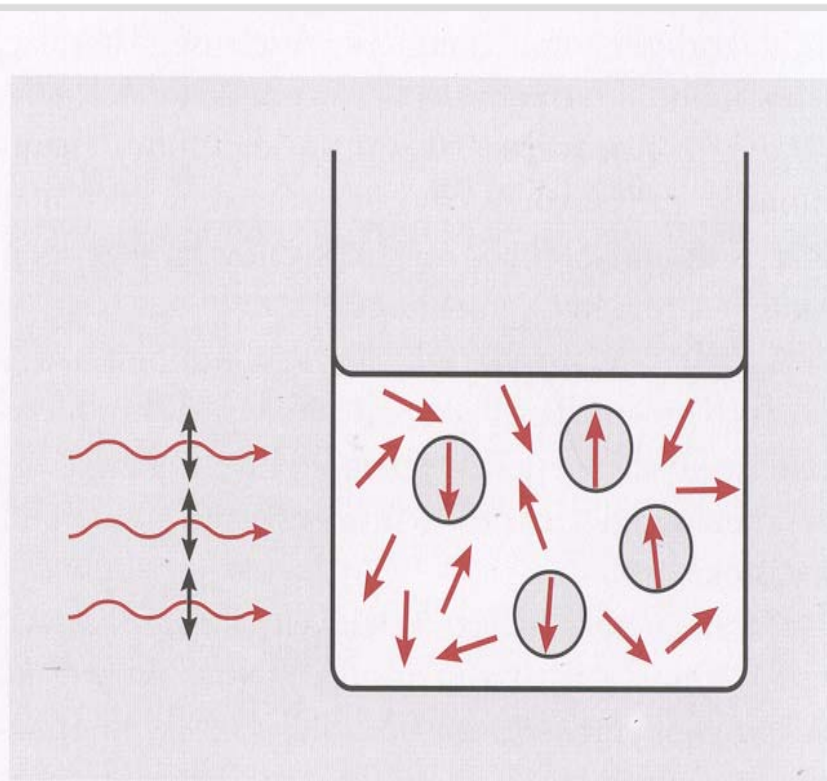
Polarizált gerjesztés



Álló molekula

Polarizált emisszió





4.32. ábra. Fotoszelekció. A vertikálisan polarizált fényt csak a megfelelően orientált körrel jelölt fluorofórok abszorbeálják

Az emisszió  
polarizációfokának ( $p$ )  
mérése

$$p = \frac{I_{VV} - I_{VH}}{I_{VV} + I_{VH}}$$

V vertikális polarizáció

H horizontális

**Ha a molekula a gerjesztett állapot ideje alatt **elfordul****  
**→ az emisszió **polarizációja csökken****  
**Beágyazó környezet (pl. plazmamembrán) **fluiditásának****  
**jellemzése**

# ***A fény biológiai hatásai***

---

## ***Szemponatok:***

Mi nyeli el? Milyen mélyre jut?

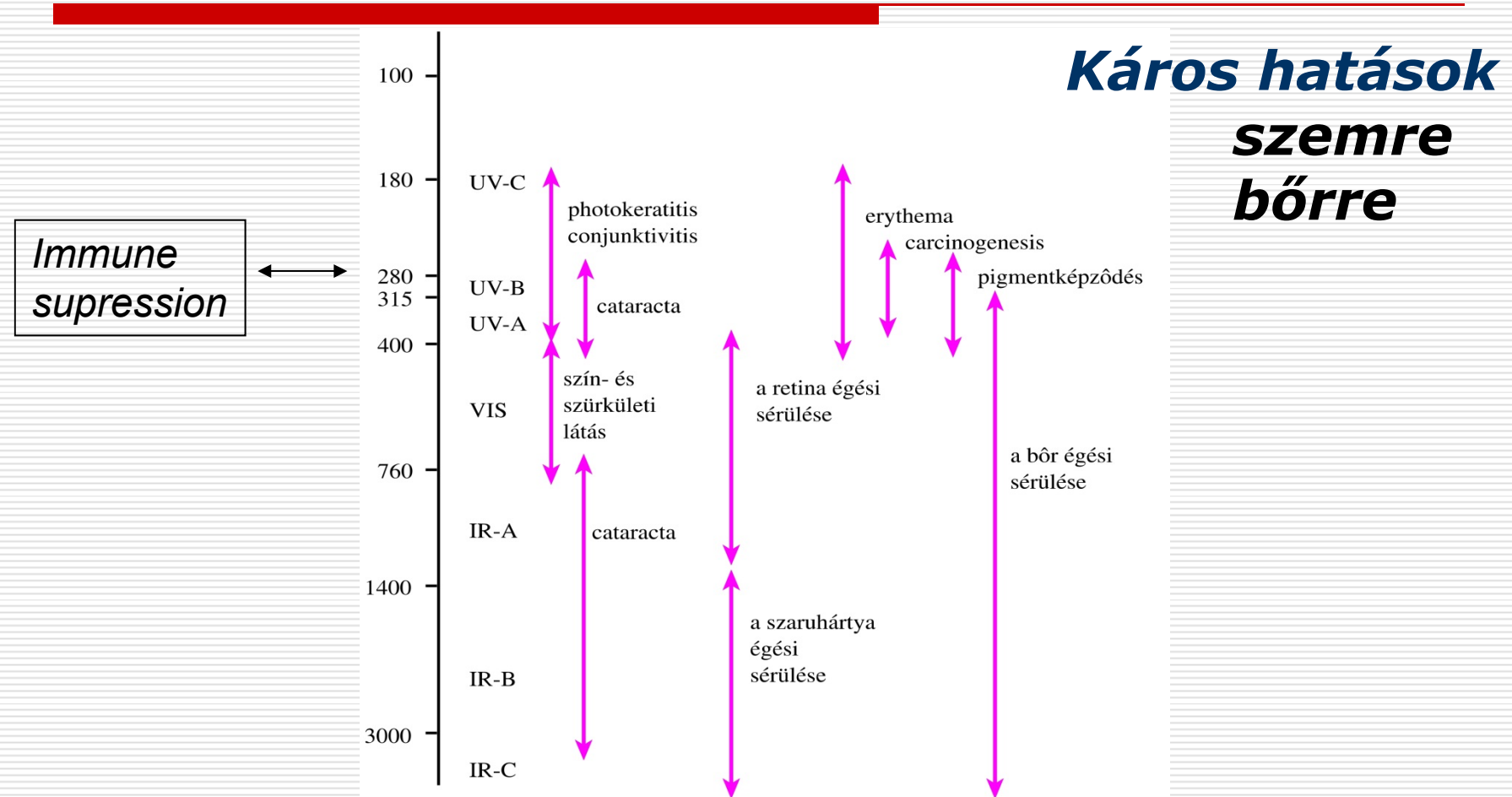
Milyen szerveket ér fény?

Fénnyel kiváltott reakciók, terápiás beavatkozások

---

# A fény biológiai hatásai

## Mit ér közvetlenül fény?



# *A fény biológiai hatásai*

## ***Mit ér közvetlenül fény?***

---

### ***Pozitív hatások***

***szemre  
bőrre***      **→**      ***Szervezetre ?***

#### ***Ismert hatások:***

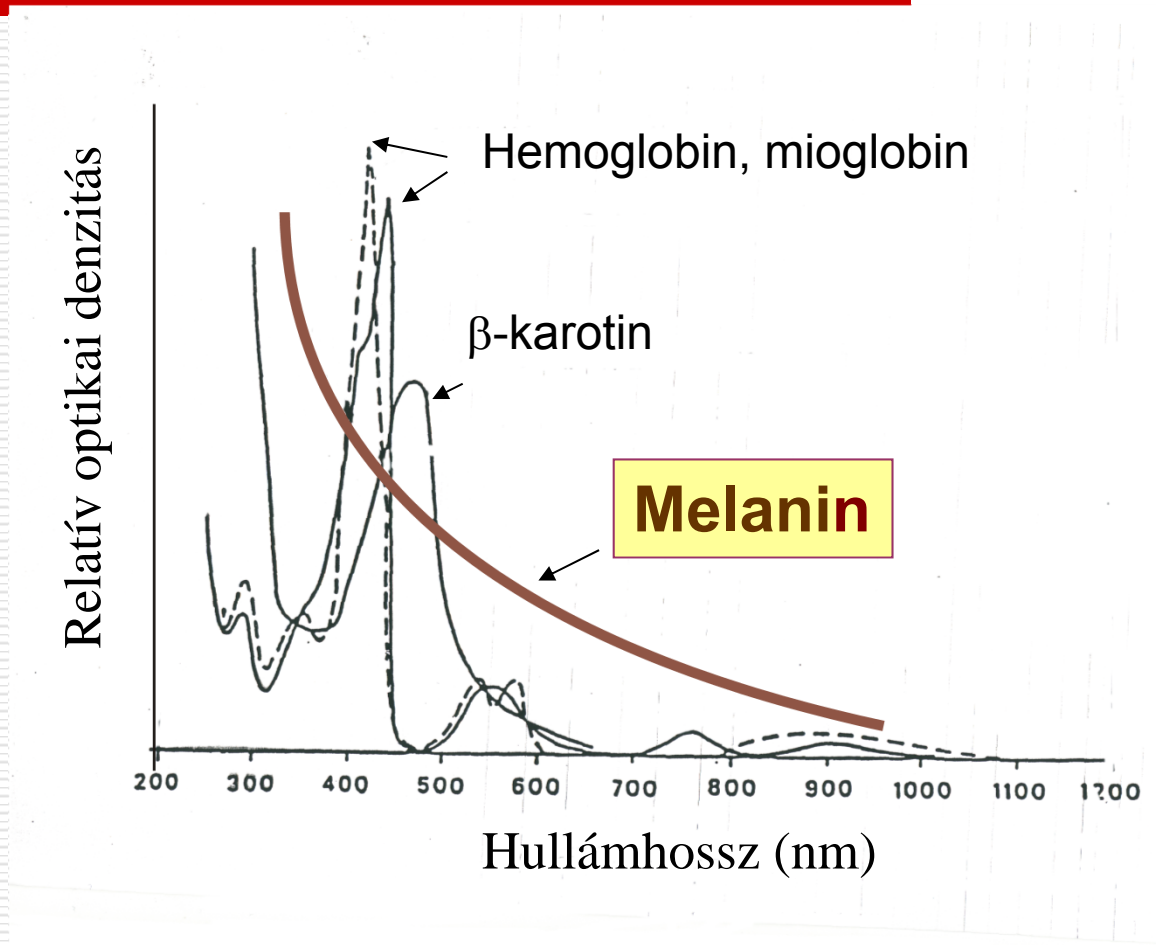
- D-vitamin szintézis (UV-A)***
- anyagcsere, hormonrendszer, immunrendszer stimulálása (VIS)***
- téli depresszió & melatonin hormon túltermelése***

***..... Sok az ismeretlen tényező!***

---

# *A fény biológiai hatásai*

## ***Milyen molekulák nyelik el?***



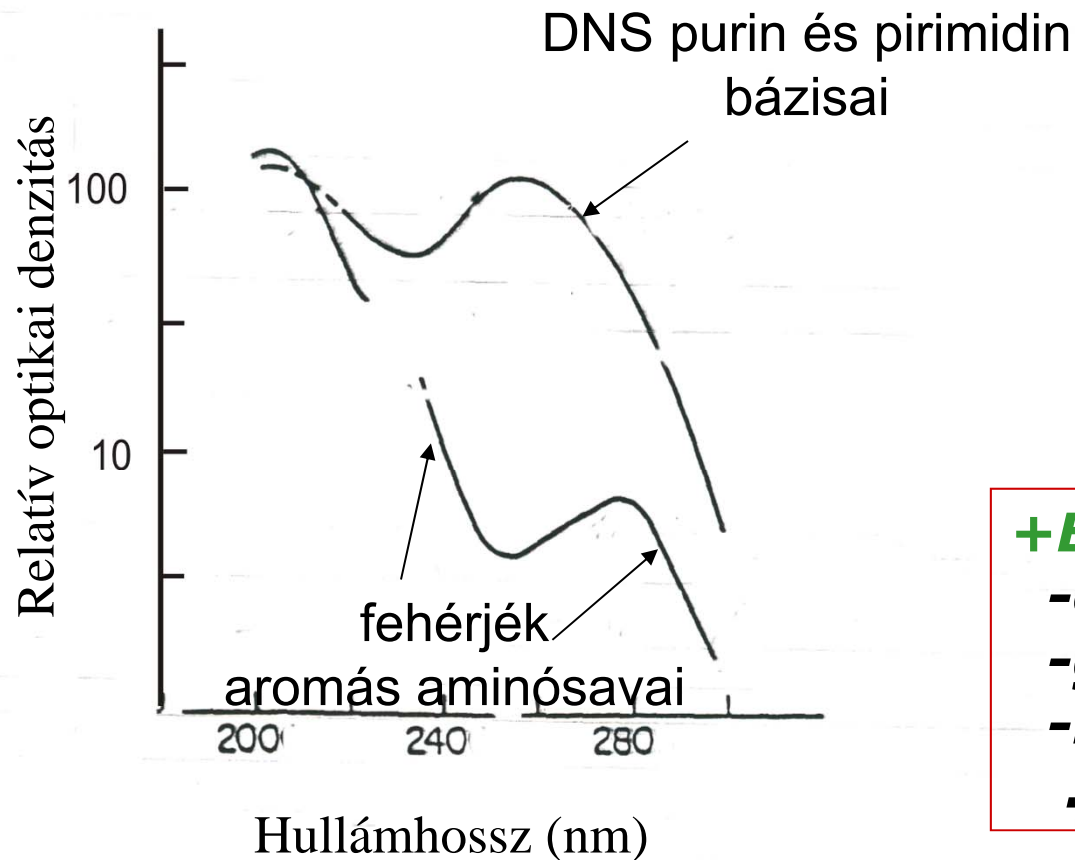
Endogén



# A fény biológiai hatásai

## Milyen molekulák nyelik el?

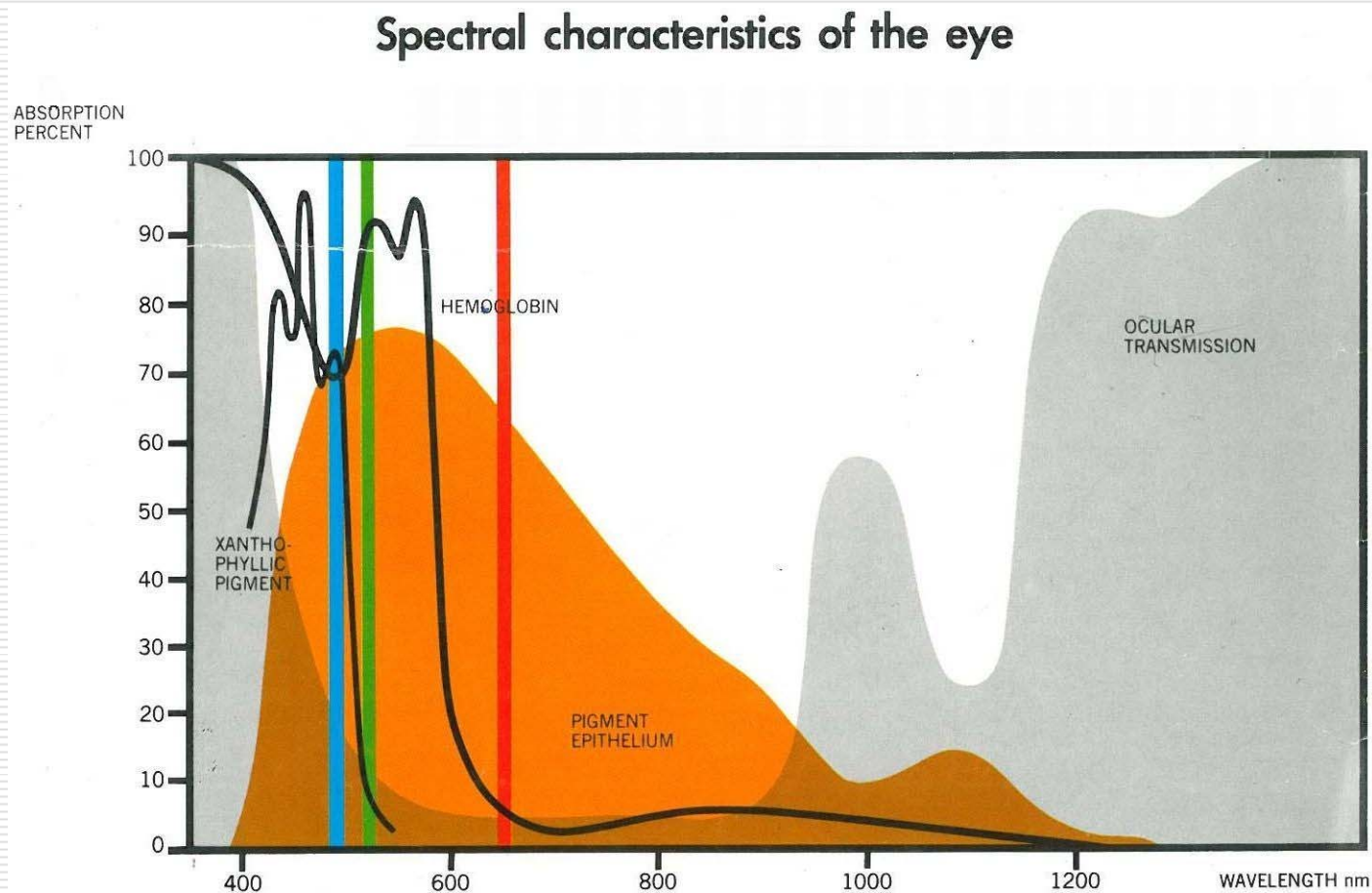
Endogén



**+Exogén kromofórok**  
**-ételfestékek**  
**-gyógyszerek**  
**-kozmetikumok**  
**.....**

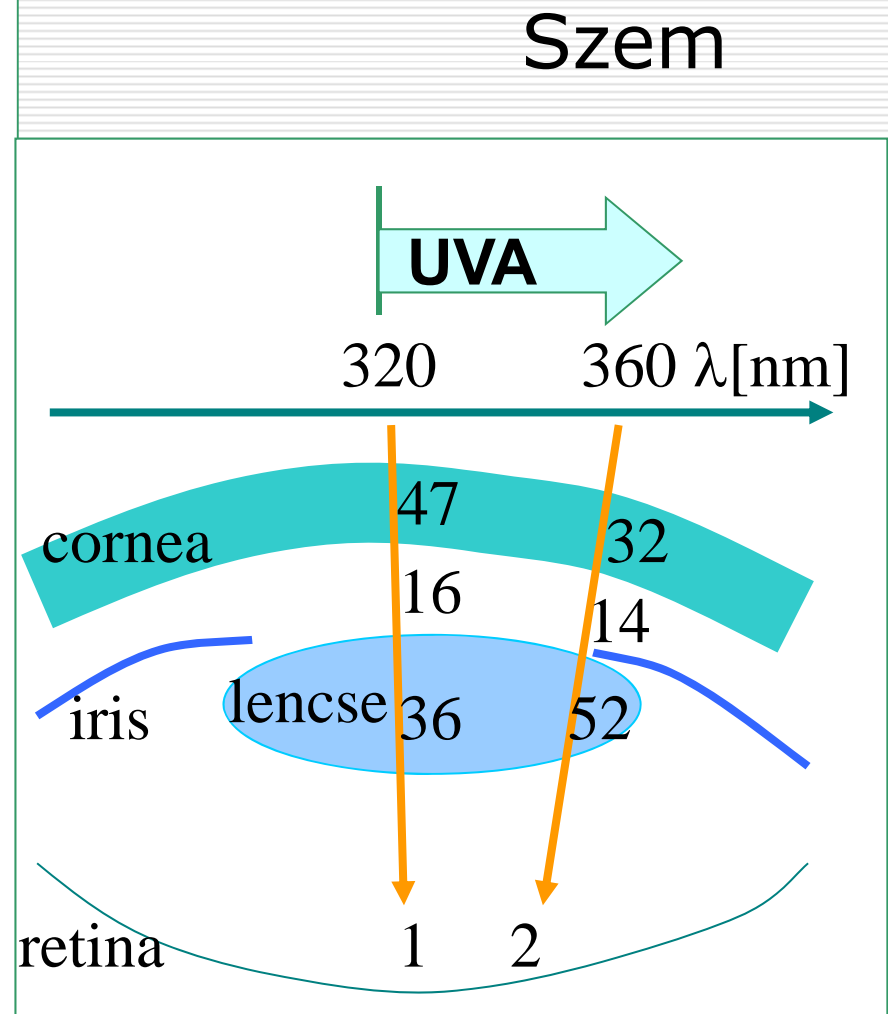
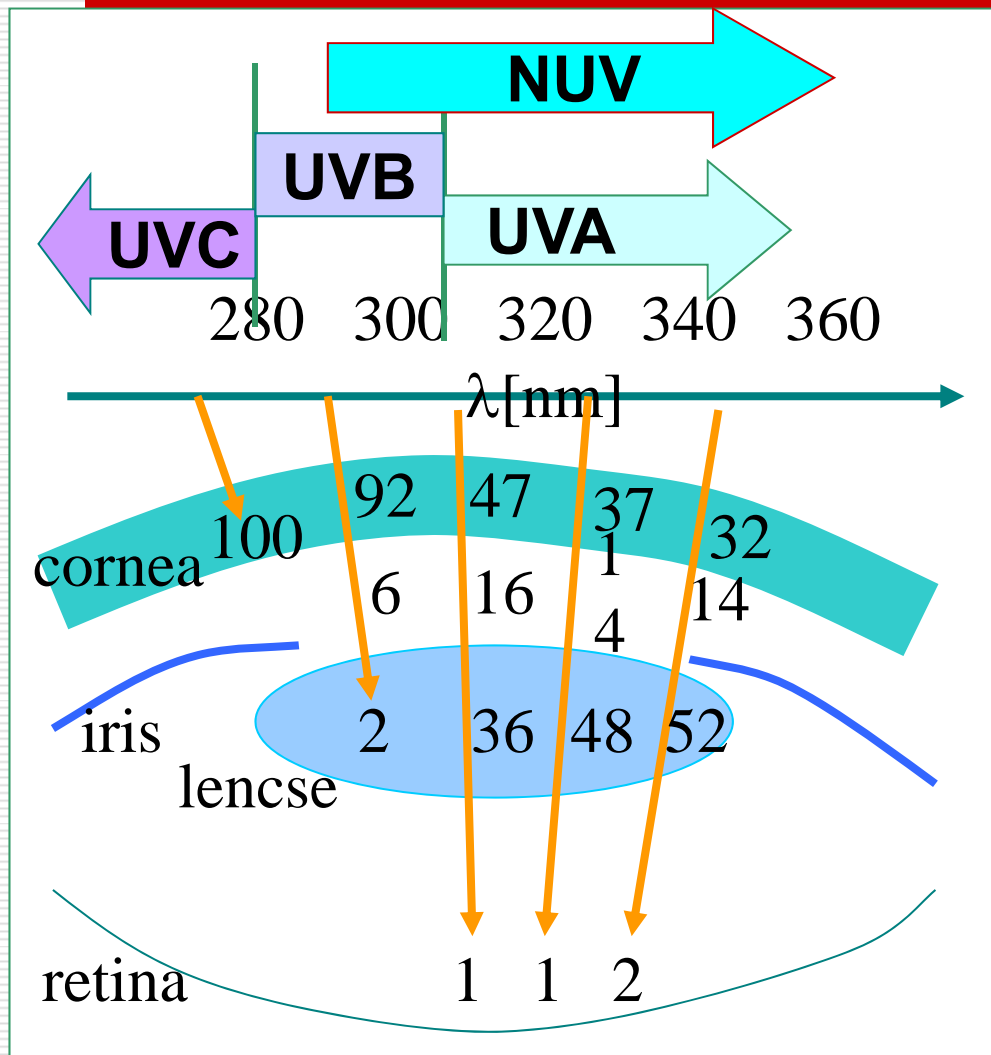
# *A fény biológiai hatásai*

## ***Milyen molekulák nyelik el?***



# A fény biológiai hatásai

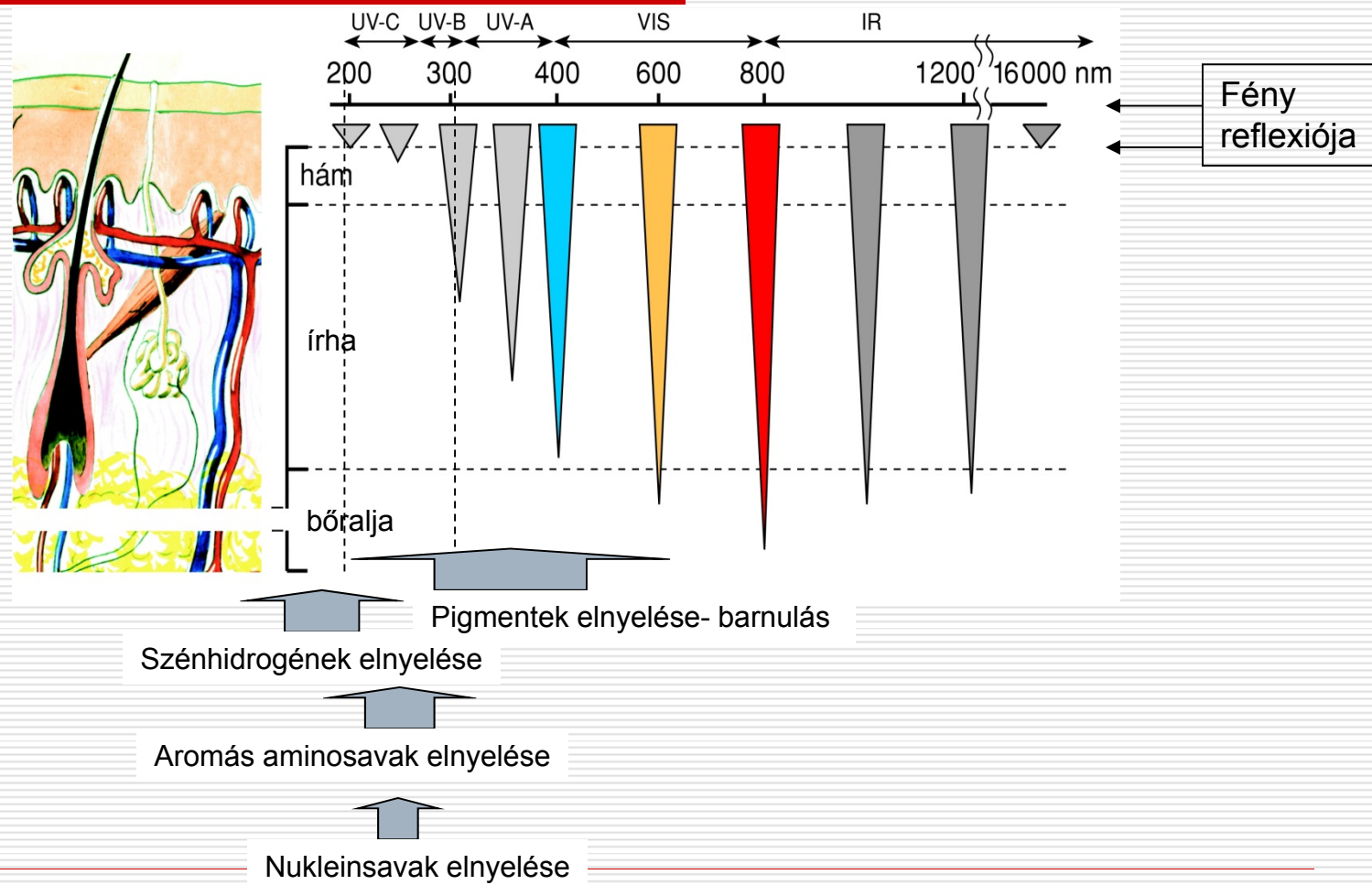
## Behatolási mélység?



# A fény biológiai hatásai

## **Behatolási mélység?**

Bőr



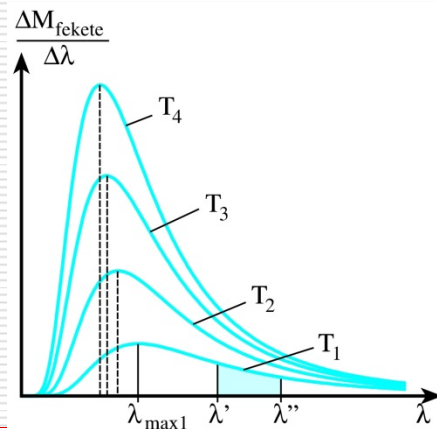
# Fény-keltő mechanizmusok és fényforrások

## 1. Hőmérsékleti sugárzás folytonos spektrum

Oka: anyagok belső szerkezetének termikusan gerjesztett rezgései

$$M = \sigma * T^4$$
$$\lambda_{\max} * T = konst$$

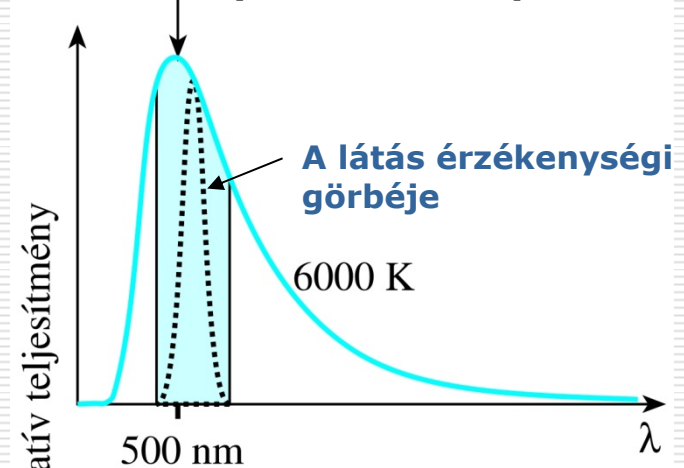
Fény? T-től függ



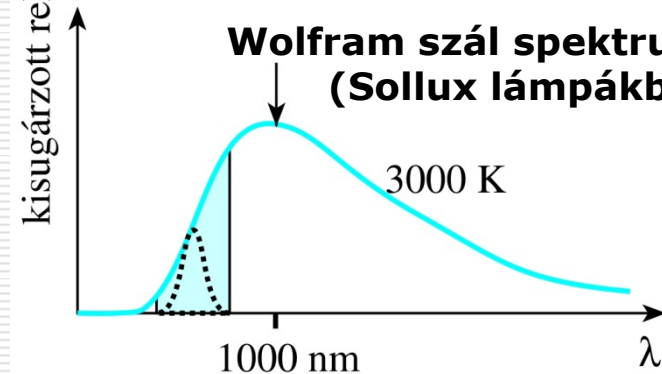
### Izzószálas fényforrások

Halogén gáz töltet a szál párolgása ellen

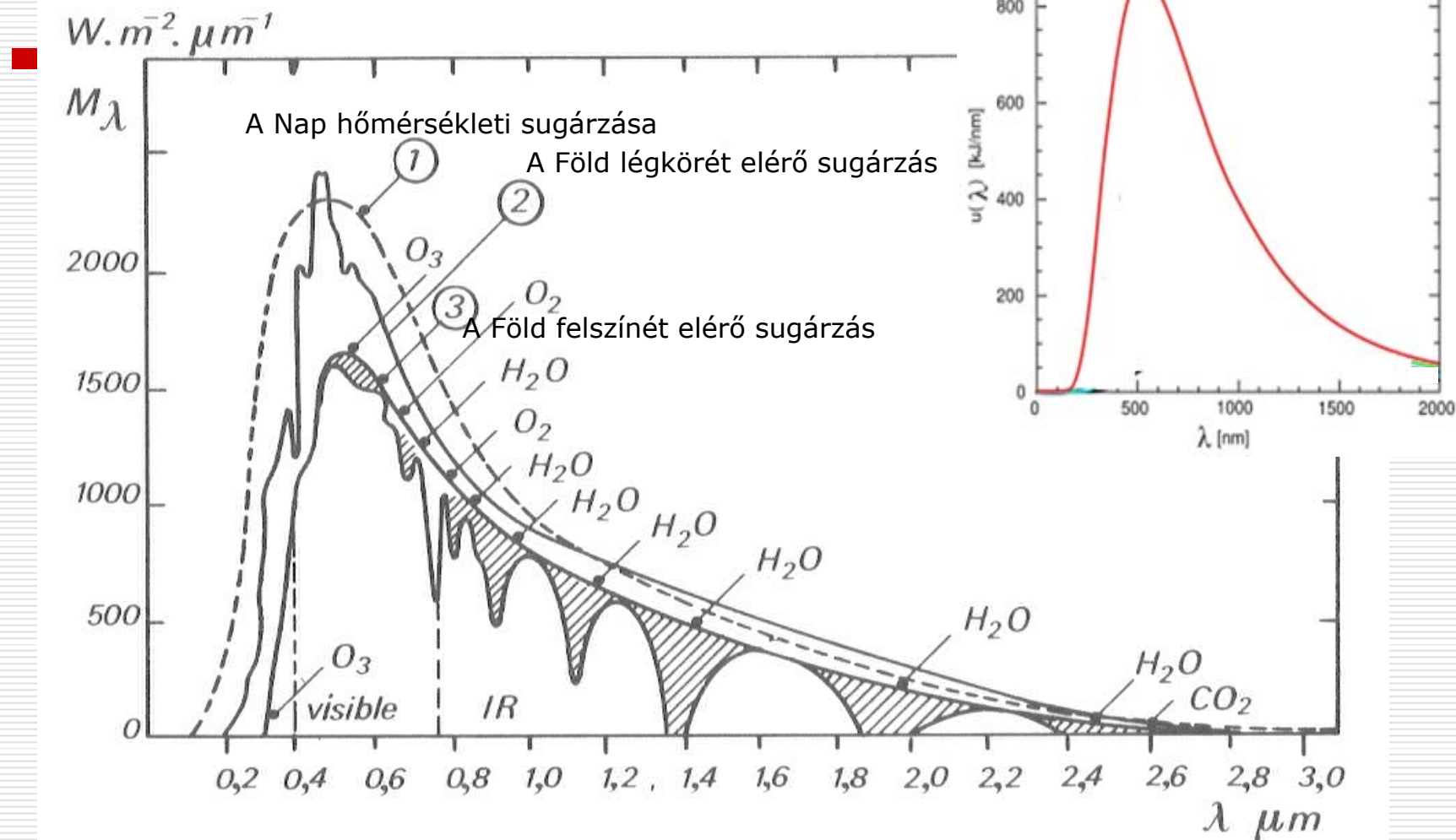
A Nap emissziós spektruma

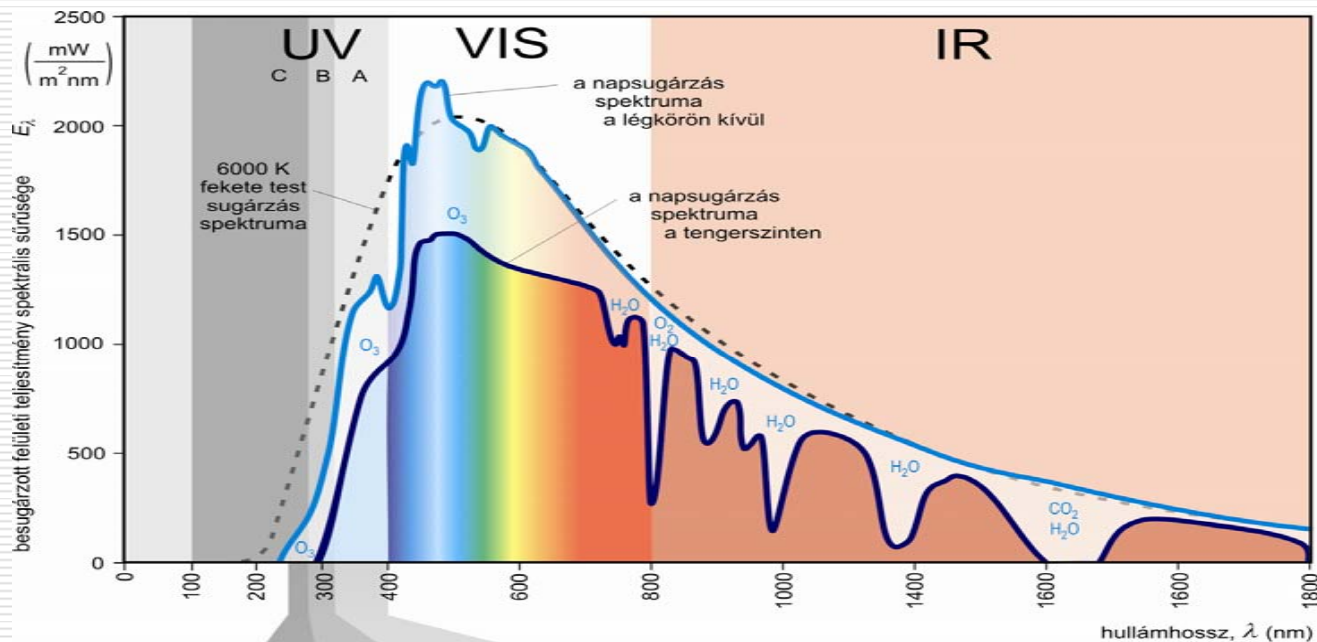


Wolfram szál spektruma (Sollux lámpákban)

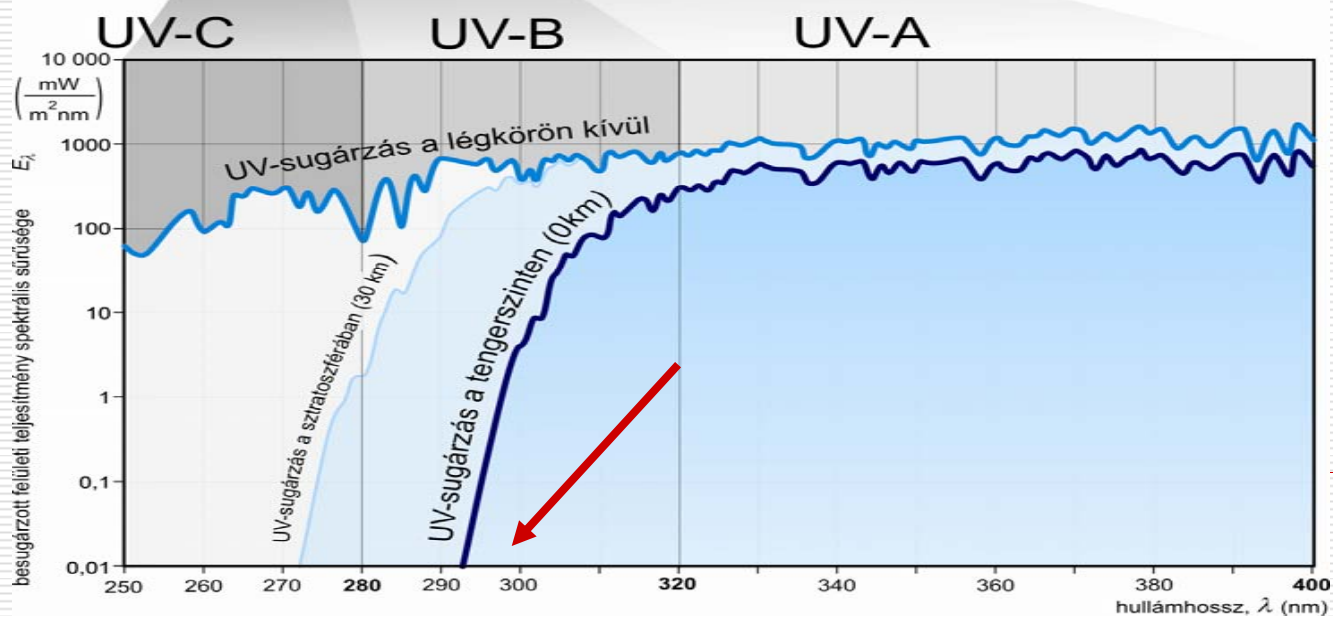


# A napsugárzás emissziós spektruma





A Nap sugárzásának UV tartományát a légkör elnyelése szűri ki  **$\text{O}_3$  tartalom!**





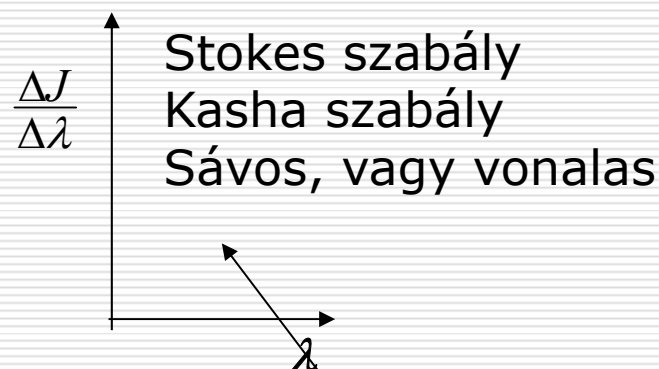
## 2.1. Spontán fényemisszió: Lumineszcencia

### Jellemző paraméterek → természetben ritka

„hideg emisszió”

**Az emisszió előfeltétele:  
gerjesztett elektronállapot**

- **Az emissziós spektrum**



- **Az emisszió kvantumhatásfoka: az elnyelt és emittált fotonok számának aránya (fotolumineszcenciánál)**

Az emissziós spektrum  
görbe alatti területe

$$\Phi_{em} = \frac{N_{em}}{N_{absz}} = \frac{k_{em}}{k_{em} + \underbrace{k_{belső} + k_{külső}}_{\text{A gerjesztett elektron egyéb energialeadási reakciósebességei}}} \approx \int F(\nu) d\nu \quad \nu = \frac{1}{\lambda}$$

A gerjesztett elektron egyéb  
energialeadási reakciósebességei



## 2. 1. Spontán fényemisszió: Lumineszcencia

### Ritka jelenség a természetben

A fényemisszió kvantumhatásfoka kicsi  
más reakcióutak az energialeadásra

VI.2. táblázat. Néhány sejtalkotó molekula fluoreszcencia paramétere

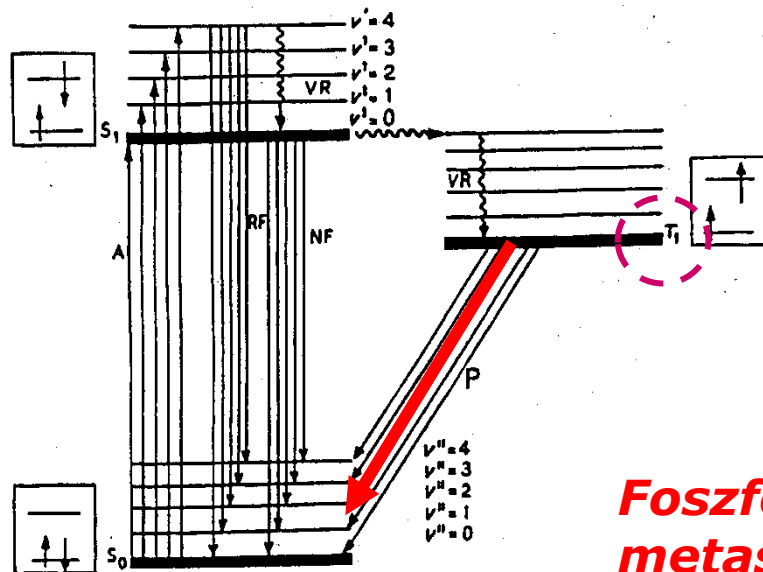
| Molekula    | Környezet                   | Abszorpció            |                           | Fluoreszcencia        |                     | Érzékenység   |                       |
|-------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|---------------|-----------------------|
|             |                             | $\lambda_{\max}$ (nm) | $\epsilon_{\max}$ (1/Mcm) | $\lambda_{\max}$ (nm) | $Q_F$               | $\tau$ (nsec) | $\epsilon_{\max} Q_F$ |
| Triptofán   | H <sub>2</sub> O, pH 7      | 280                   | 5600                      | 348                   | 0,20                | 2,6           | 1120                  |
| Tirozin     | H <sub>2</sub> O, pH 7      | 274                   | 1400                      | 303                   | 0,14                | 3,6           | 200                   |
| Fenilalanin | H <sub>2</sub> O, pH 7      | 257                   | 200                       | 282                   | 0,04                | 6,4           | 8                     |
| Y bázis     | élesztő tRNA <sup>Phe</sup> | 320                   | 1300                      | 460                   | 0,07                | 0,0637        | 91                    |
| Adenin      | H <sub>2</sub> O, pH 7      | 260                   | 13400                     | 321                   | $2,6 \cdot 10^{-4}$ | <0,02         | 3,2                   |
| Guanin      | H <sub>2</sub> O, pH 7      | 275                   | 8100                      | 329                   | $3,0 \cdot 10^{-4}$ | <0,02         | 2,4                   |
| Citozin     | H <sub>2</sub> O, pH 7      | 267                   | 6100                      | 313                   | $0,8 \cdot 10^{-4}$ | <0,02         | 0,5                   |
| Uracil      | H <sub>2</sub> O, pH 7      | 260                   | 9500                      | 308                   | $0,4 \cdot 10^{-4}$ | <0,02         | 0,4                   |
| NADH        | H <sub>2</sub> O, pH 7      | 260, 340              | 6200                      | 470                   | 0,019               | 0,40          | 120                   |

## 2.1. Spontán fényemisszió: Lumineszcencia Fluoreszcencia és Foszforeszcencia

Megkülönböztetés az emittáló gerjesztett elektronállapot alapján.

### **Jablonski** – diagram

Az  $S_1$  állapotú gerjesztett elektron spinátfordulással átmehet a  $T_1$  gerjesztett állapotba, ahonnan az  $S_0$  alapállapotba visszatérés tiltott



**$T_1$ : alacsonyabb energiájú,  
hosszú élettartamú  
– metastabil –  
gerjesztett állapot**

**Foszforeszcencia: spontán fotonemisszió  
metastabil ( $T_1$ ) állapotból**

## **2.1. Spontán fényemisszió: Lumineszcencia** **Fluoreszcencia és Foszforeszcencia**

---

### **Fluoreszcencia:**

- Megengedett elektron-átmenetből ( $S1 \rightarrow S0$ ) származó spontán fényemisszió
  - Élettartama rövid,  $\tau \sim 1-10 \text{ ns}$   $\leftrightarrow$  gerjesztési idő  $\sim 10^{-3} \text{ ns}$
  - Karakterisztikus fotonenergia(tartomány) –szín jellemzi
  - Többféle gerjesztési átmenettel is gerjeszthető
-

## **2.1. Spontán fényemisszió: Lumineszcencia** **Fluoreszcencia és Foszforeszcencia**

---

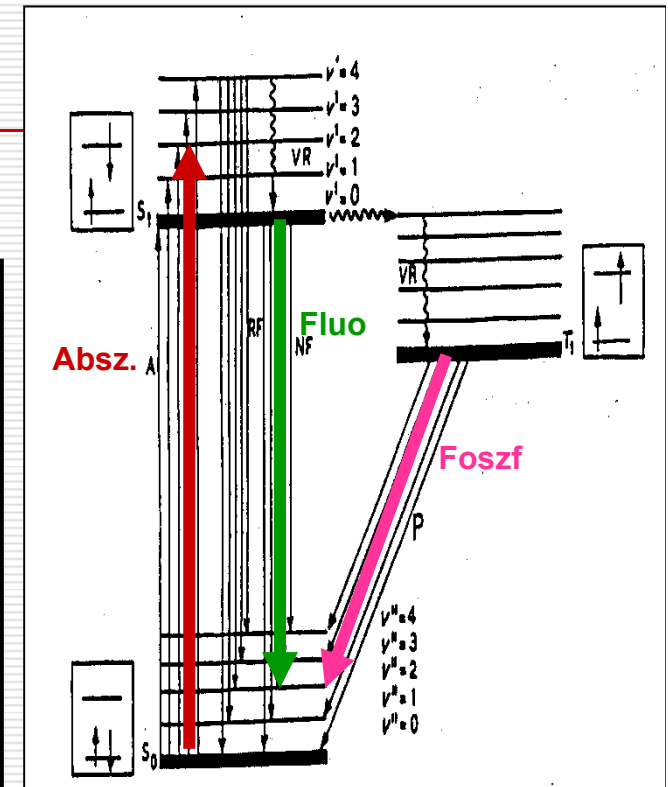
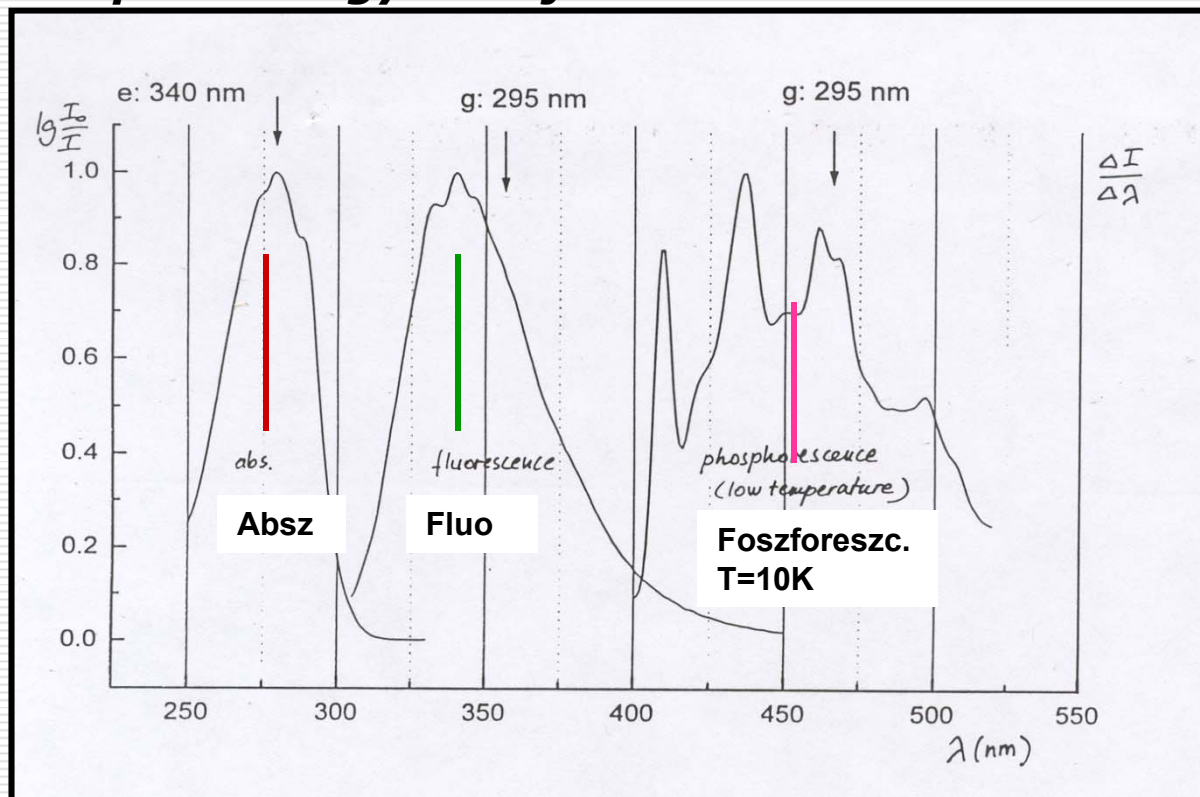
### **Foszforeszcencia:**

- Spontán fényemisszió metastabil átmenetből
  - Az emittáló nívó élettartama hosszú  $\tau \sim \text{ms, sec...}$   
**metastabil állapot**
  - Az emittált fény fotonenergiája kisebb mint a fluoreszcenciáé
  - Hosszú élettartam -> lehetőség a környezeti energialeadásra  
**emissziós intenzitás igen kicsi -> orvosi alkalmazása csekély**
-

## 2.1. Spontán fényemisszió: Lumineszcencia

### Fluoreszcencia és Foszforeszcencia spektrumok összehasonlítása

természetesen lumineszkáló aminosav  
**Triptofán - egy fehérjében**



Vibrációs relaxáció

$$\lambda_{\text{foszf}} > \lambda_{\text{fluo}} > \lambda_{\text{absz}}$$

**Stokes-féle eltolódás**

# Fény-keltő mechanizmusok és fényforrások

## 2.1. Lumineszcencián alapuló fényforrások

Alapja: gázkisülési csövekben keltett elektrolumineszcencia



### -Alacsony nyomású fémgőz-lámpák

Pl. - **Na-lámpa** sárga fénye

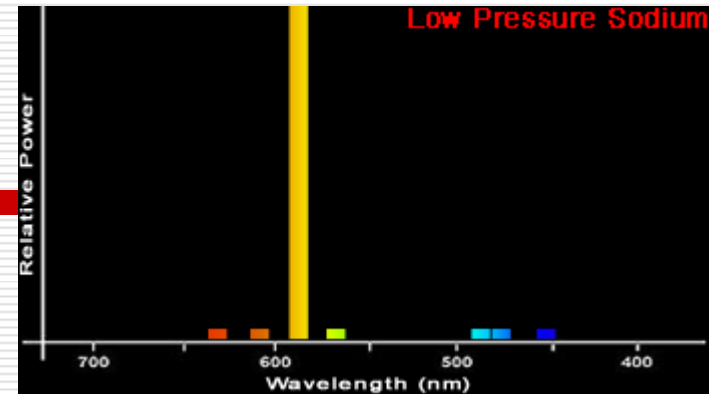
- **germicidlámpa**: alacsony nyomású higanygőz vonalas emissziós spektruma 254 nm-en elnyelődik baktériumok genetikai állományában

**sterilizáló hatás**

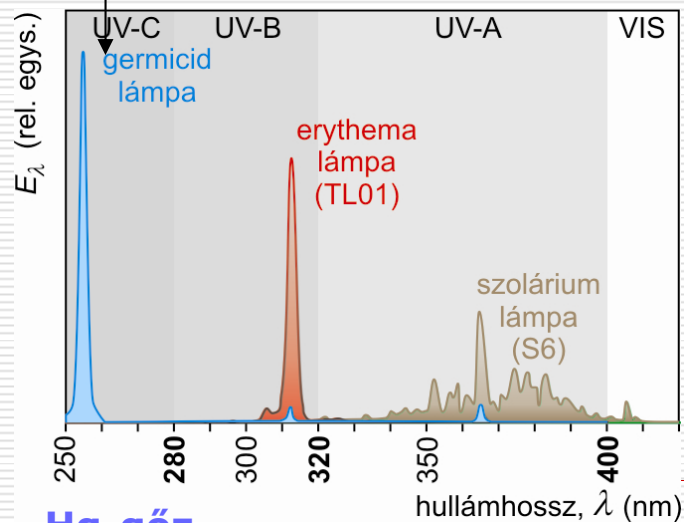
### -Ívlámpák

nagy nyomású Hg, Xe vagy Na-lámpák, ionizált plazma ívkisülése  
folytonos spektrum jellegzetes vonalakkal

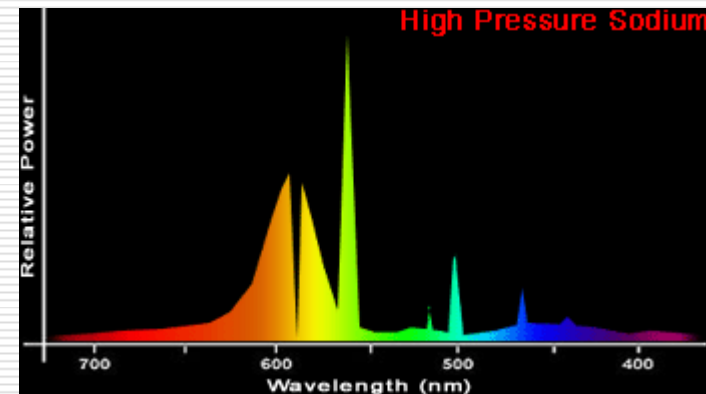
# Fémgőz lámpák



Kisnyomású Na-gőz lámpa  
emissziós spektruma

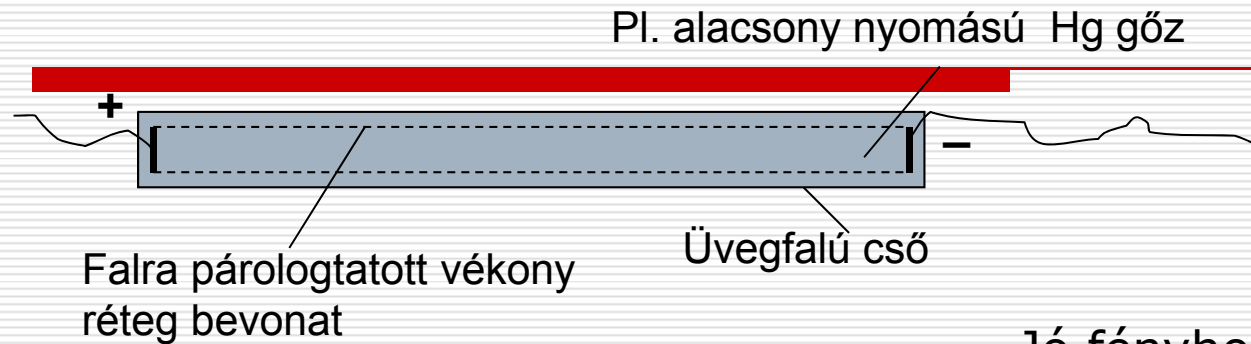


Hg-gőz  
lámpa



Nagy-nyomású Na-gőz lámpa  
emissziós spektruma

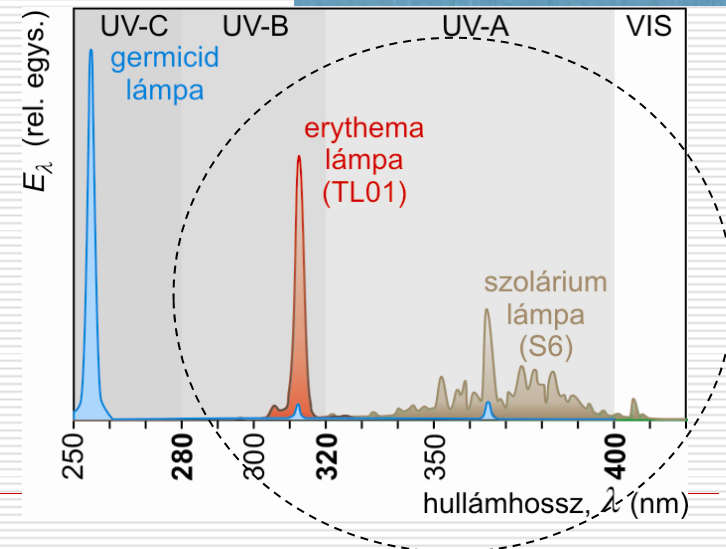
## - Fénycsövek



A gáz-töltet elektrolumineszcenciája (Hg esetén UV fény) gerjeszti a fal bevonatának fotolumineszcenciáját. Ez már látható fény, ami áthatol az üvegfalon. A kilépő fény spektruma a bevonattól függ, célja a Nap spektrumának közelítése.

**Erythemal lámpa** :  $\lambda$  a 280 – 320 nm közeli UV- tartományban, uviol üvegfal

Jó fényhozam  
**kompakt csövek**





# ***Fény-keltő mechanizmusok és fényforrások***

## ***2.2. Indukált fényemisszió - lézerek***

---

### ***Spontán emissziós fény :***

Az egyes elektronátmenetek térben és időben rendezetlenül, véletlenszerűen történnek.

Az egyes hullámvonulatok fázisa egymástól független.  
A fény „inkohereus”

### ***Indukált emissziós fény:***

A fényfotonok emisszióját az emittálandó fotonenergiával azonos energiájú foton jelenléte indukálja.

A kibocsátott hullámvonulat a kiváltóval azonos fázisban lép ki, együtt koherensek

---

# ***Fény-keltő mechanizmusok és fényforrások***

## ***2.2. Indukált fényemisszió - lézerek***

***LASER: Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation  
1961, Rubin-lézer***

Nemcsak erősítő, hanem speciális fényforrás

### ***A lézer-fény speciális tulajdonságai***

- monokromatikus  $\Delta f/f \sim 10^{-10}$  ( $\longleftrightarrow 10^{-6}$ )
- koherens : nagy a koherencia-hossz ( $10^3$  m  $\longleftrightarrow 10^{-3}$  m)
- kis divergencia (néhány szögperc)  $\longrightarrow$  jól fókuszálható
- nagy intenzitás  
átlagos intenzitás  $\longleftrightarrow$  impulzus-intenzitás

# Eddig: fény

## Következik: röntgensugárzás

---

|                             | fény                      | röntgensugárzás<br>(rtg. cső)  |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Fotonenergia                | 1.5 – 3 eV                | 20 – 200 keV                   |
| Primér hatás                | $e^-$ gerjesztés          | $e^-$ ionizáció                |
| Elnyelődés<br>valószínűsége | diszkrét fotonenergiáknál | energia folytonos<br>függvénye |

---

---

# ***A röntgensugárzás természete, és biológiai hatásai***

---



(a)

**Figure 4.10** Two radiographs taken by Röntgen. (a) The hand of Mrs. Röntgen. (*The Bettmann Archive/Bettmann Newsphotos.*) (b) Radiograph of a fully clothed man, showing not only the man's skeleton but also the keys in his pockets, the nails of his shoes, and the metal clasps of his garters. (*Deutsches Museum, Munchen.*)



(b)



---

**Wilhelm Konrad Röntgen  
(1845-1923)**

---

Az intenzitás-gyengülés törvénye érvényes mind a fényelnyelésre, mind a röntgensugárzás elnyelésére! Igen hasonló paraméterek!

$$\lg \frac{J_0}{J} = \varepsilon(\lambda) * c * l$$

**Fényelnyelés „c” moláris koncentrációjú oldatban**

Fotonenergia és a molekula elektronpályájának kölcsönhatására jellemző anyagi állandó: **moláris extikció**

Fényútban levő oldat vastagsága

$$\lg \frac{J_0}{J} = \lg e * \mu * x = \lg e * \mu_m * \rho * x$$

**rtg.sug. elnyelődése „ρ” sűrűségű „x” vastagságú anyagban**

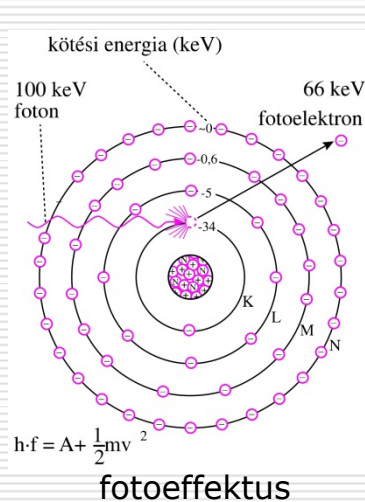
Fotonenergia és az anyag elektronpályájának kölcsönhatására jellemző anyagi állandó: **tömegabszorpció együttható**

# A röntgensugárzás alkalmazásai

## Röntgendiagnosztika alapjai

A diagnosztikai alkalmazások a rtg sugárzás szöveti **elnyelődésén** alapulnak

Kétféle mechanizmus a fotonenergiától függő súllyal.  
„Ionizáló” sugárzás: az elnyelt foton ionizál



Abszorpciós együttható

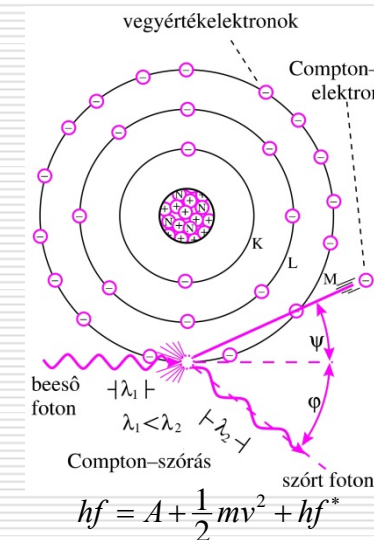
$$J = J_o e^{-\mu x} = J_o e^{-\mu_m \rho x}$$

Tömeggyengítési együttható

$$\mu = \mu'_m \rho$$

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m$$

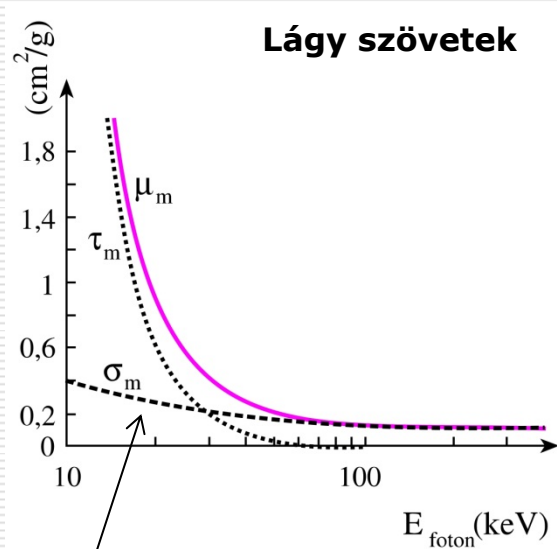
$\tau_m$  erősen függ Z-től  
és a fotonenergiától



# A röntgensugárzás alkalmazásai

## Röntgendiagnosztika alapjai

Abszorpciós spektrumok rtg. sug.-ra



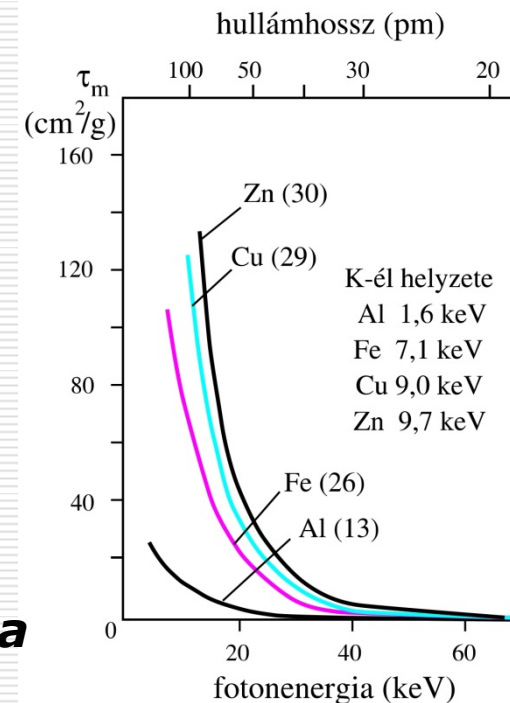
Compton effektus valószínűsége  
kevésbé függ a rendszámtól és a  
fotonenergiától.

$$\tau_m = \text{konst} * \lambda^3 Z^3$$

$$J = J_o e^{-\mu x} = J_o e^{-(\tau_m + \sigma_m) * \rho * x}$$

**Röntgen-kép kontrasztja  
függ**

- **sűrűségkülönbségektől**
- **rendszám-különbségektől**



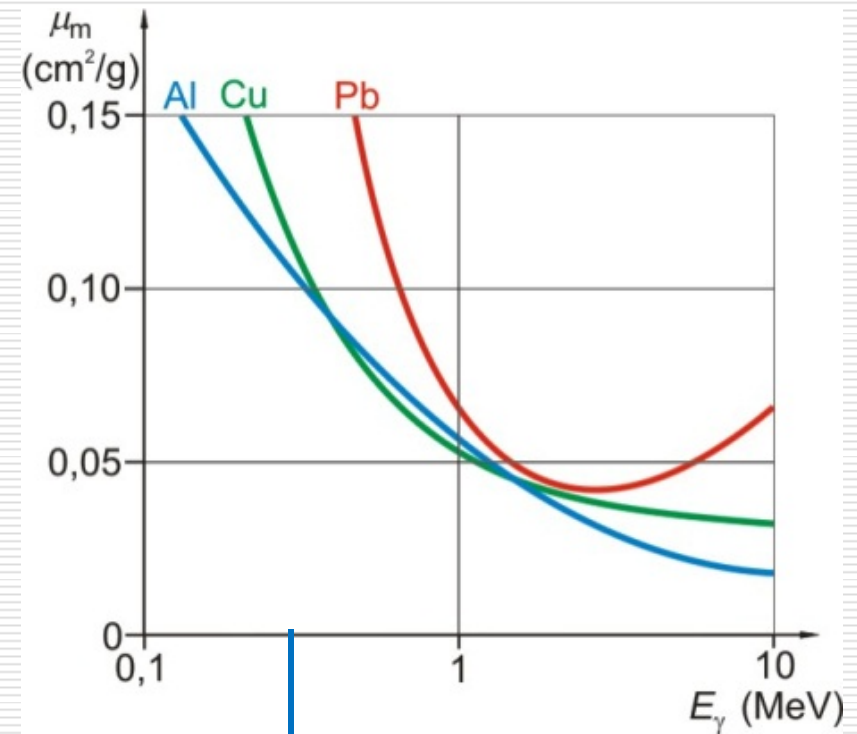
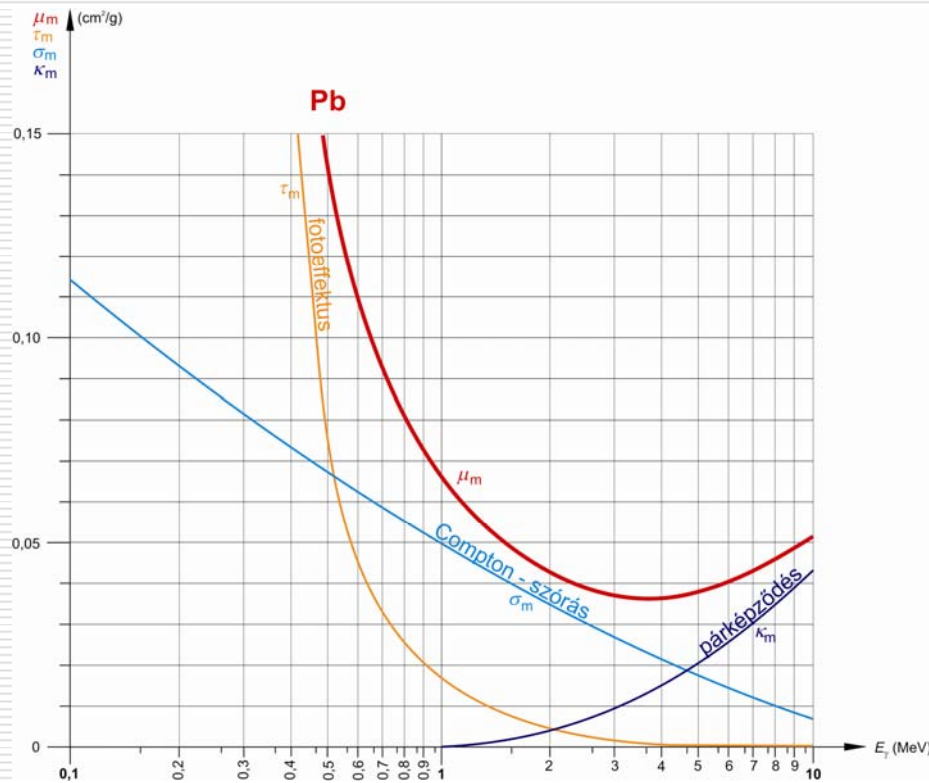


## Megjegyzések gamma-sugárzásról

fotonenergia  $\sim$  MeV

elnyelési valószínűség:  $\ll$  rtg. sug.

1 MeV körül minimuma lehet

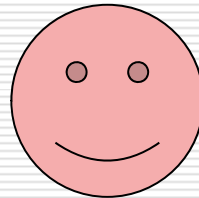


Röntgen sugárzás

***Vége***

---

***Köszönöm a figyelmet***



A továbbiakban néhány magyarázó dia következik a törzsanyagon kívül

---

# A kiválasztási szabályok kvantummechanikai háttere

---

Feltesszük, hogy az oldatot olyan fénnel világítjuk meg, amelyre teljesül a gerjesztési energia-feltétel  $hf = E_{n+1} - E_n$

Az elektronok a fény elektromos vektorának irányában elmozdulnak az energia-átmenet során. Mekkora a dipólusmomentum keltésének valószínűsége?

Az elektromos **dipólusmomentum várható értéke** az átmenet során?

$$M_{a \rightarrow g}$$

**Átmeneti momentum**

**állapotfüggvény**

$$\begin{aligned}\psi(\vec{r}_i, \vec{R}_j) &= \theta(\vec{r}_i, \vec{R}_j) \phi(\vec{R}_j) \\ \psi_a(x, Q) &= \theta_a(x, Q) \phi_a(Q)\end{aligned}$$

elektronok

magok

**Born-Oppenheimer közelítés**  
az elektronok mozgása független a magokétól

# A kiválasztási szabályok kvantummechanikai háttere

$$\vec{\mu} = \vec{\mu}_e + \vec{\mu}_{mag} = \sum q_e^* \vec{r}_i - \sum z_j^* q_e^* \vec{R}_j$$

dipól operátor

$$\psi_a(x, Q) = \theta_a(x, Q) \phi_a(Q) \quad M_{a \rightarrow g} = \langle \psi_a | \hat{\mu} | \psi_g \rangle$$

komplex konjugált

$$M_{a \rightarrow g}(Q) = q_e \int \theta_a^*(x, Q) [\sum \vec{r}_i] \theta_g(x, Q) dx$$

$$M_{gn \leftarrow a0} = \int \phi_{a0}^*(Q) M_{ag}(Q) \phi_{gn}(Q) dQ \cong \bar{M}_{ag} \int \phi_{a0}^*(Q) \phi_{gn}(Q) dQ$$

Atomtörzsek vibrációs állapotai:

***g, n*** -- a gerjesztett molekuláris  
elektronállapot n.-ik vibrációs állapota

# Abszorpciós spektroszkópia biofizikai alkalmazások

$$\lg \frac{I_0}{I} = \varepsilon(\lambda) * c * x$$

küvetta rétegvastagsága

moláris konc.

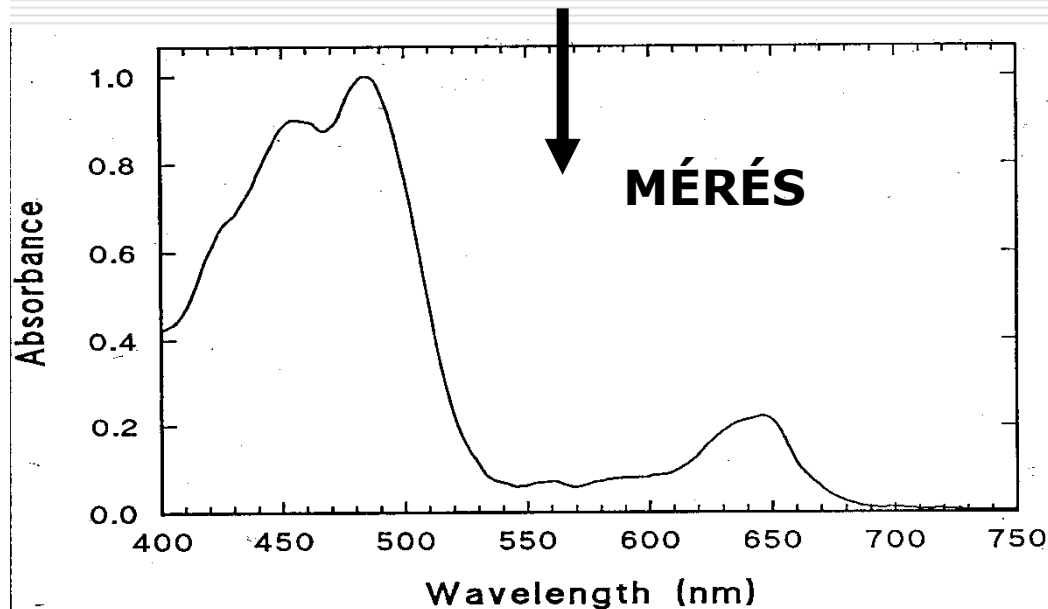
Abszorbancia  
Optikai Denzitás

moláris extinkció

↔ Molekuláris szerkezetvizsgálat

↕ Az a-g átmeneti valószínűség

az összes vibrációs  
állapotokat tekintve



$$K_{spin} * |M_{a \rightarrow g}|^2 = const. * \int \frac{\varepsilon(f)}{f} df$$

multiplicitás

hullámszám

## Fontos mennyiségek

Oszcillátor erő

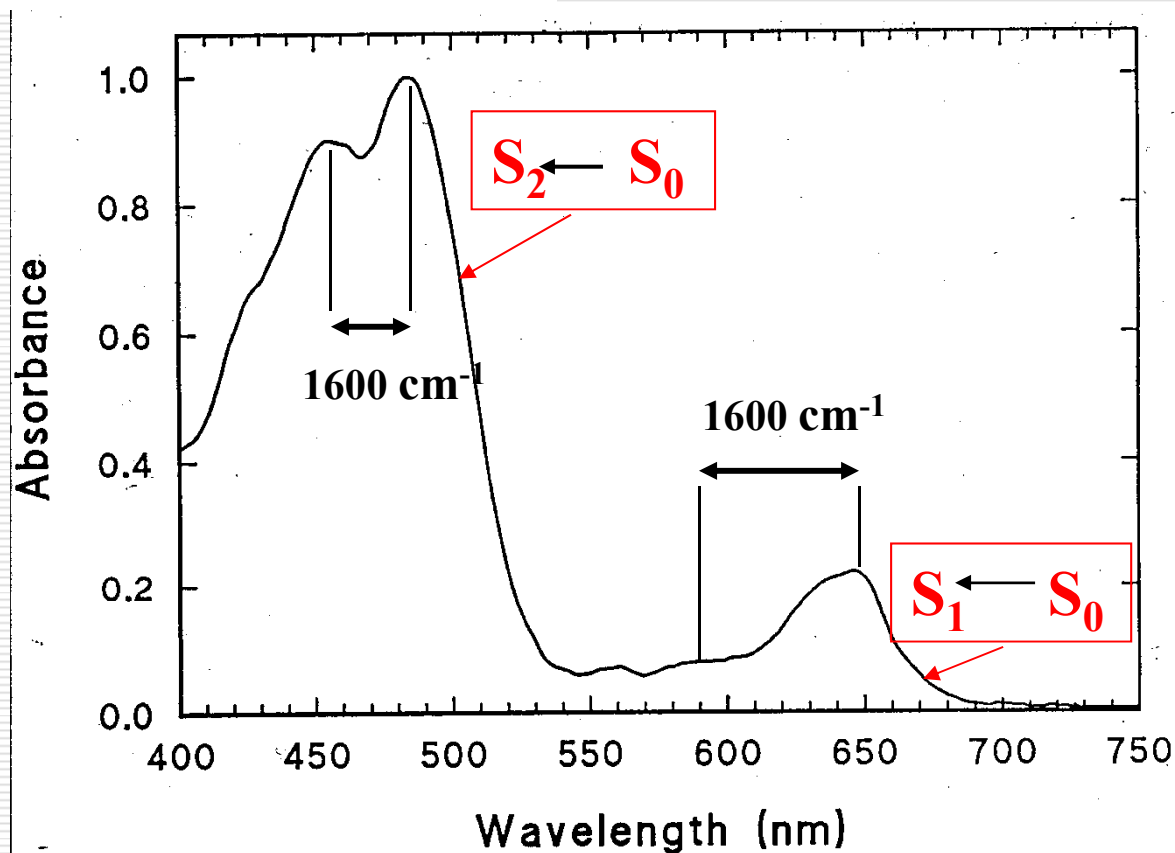
$$f = 4.3 \cdot 10^{-9} \int \varepsilon(\tilde{\nu}) * d\tilde{\nu}$$

$$hf = \text{fotonenergia (eV)} = 1234 \frac{1}{\lambda(\text{nm})}$$

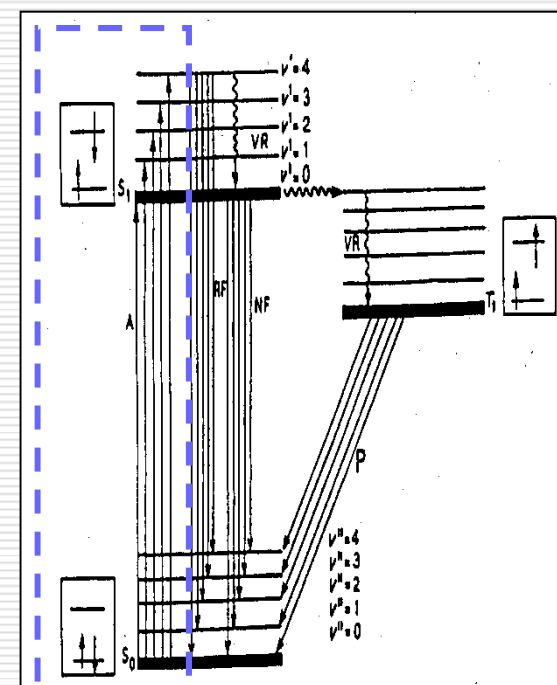
$$\text{Hullámszám (cm}^{-1}\text{)} = (1/\lambda(\text{nm})) * 10^7$$

pl. Vibrációk energiája  
~~100 – 2000 cm<sup>-1</sup>~~

## Kloroplaszt spektruma



Elektronátmenetek és  
molekuláris rezgések  
gerjesztése



„vibronikus”átmenetek

## 3.2. Fényabszorpció – fényemisszió

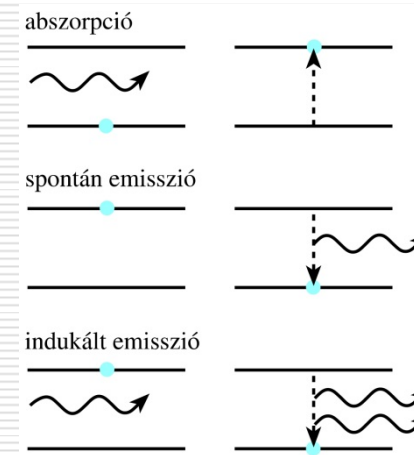
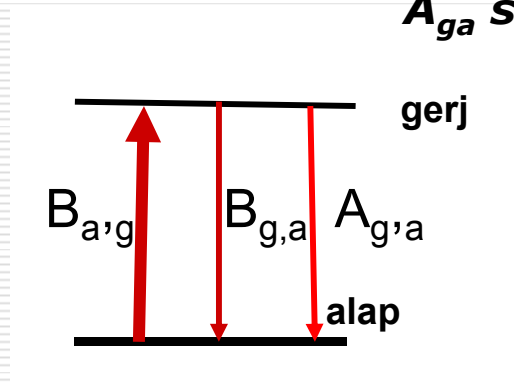
**Fluoreszcencia: spontán fényemisszió gerjesztett állapotból azonos spinállapotú alapállapotba**

**Átmeneti valószínűségek**

**Einstein együtthatók:  $B_{ag}$  abszorpció**

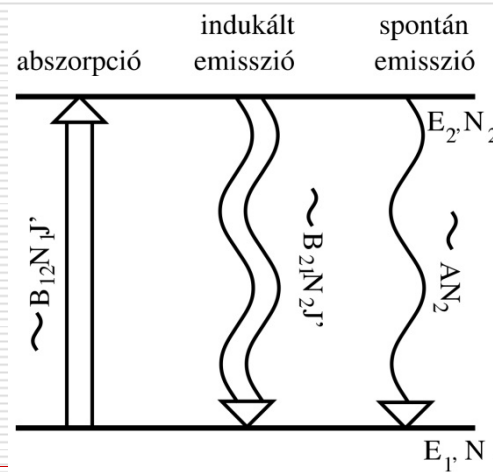
**$B_{ga}$  indukált emisszió**

**$A_{ga}$  spontán emisszió**



**Feltétel:  $hf = \Delta E_{ga}$**

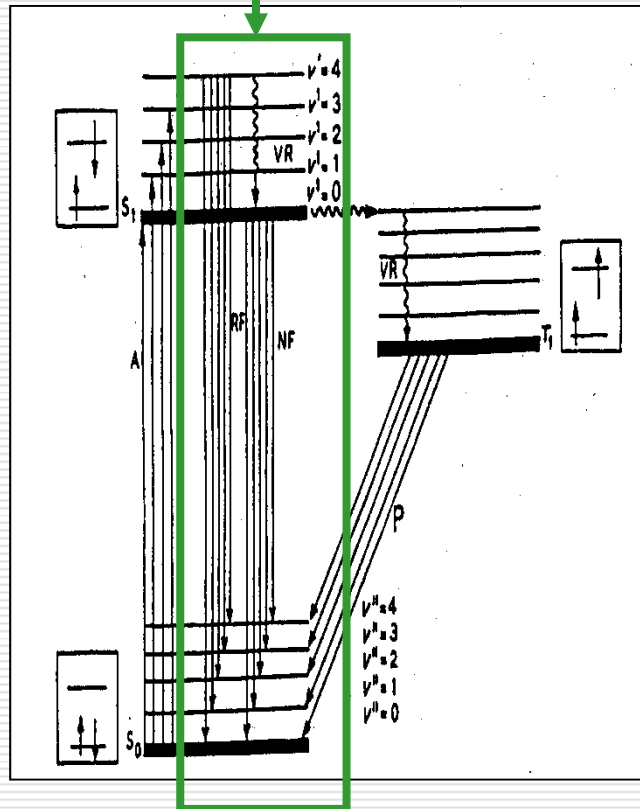
**fotonsugárzás jelenléte**



**Termikus egyensúly: abszorpciók száma = spontán és indukált emissziók száma/idő**

## 3.2. Fényabszorpció – fényemisszió

**Fluoreszcencia: spontán fényemisszió gerjesztett állapotból azonos spinállapotú alapállapotba**



$$\frac{N_{em}}{N_{abs}} = \Phi_F$$

**Fluoreszcencia emisszió kvantumhatásfoka**

$$\Phi_F = A_{g \rightarrow a} = 8\pi h f_{a \rightarrow g}^3 n^3 c^{-3} B_{g \rightarrow a}$$

$$B_{g \rightarrow a} = B_{a \rightarrow g} = K * M_{a \rightarrow g}^2$$

$$\Phi_F = \int F(\tilde{\nu}) d\tilde{\nu} \quad \tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} \propto \int \frac{\varepsilon(\tilde{\nu})}{\tilde{\nu}} d\tilde{\nu}$$

**Fluoreszcencia spektrum**

az abszorpciós és emissziós spektrumok görbe alatti területei (azonos állapotok között) egymásból kiszámíthatók



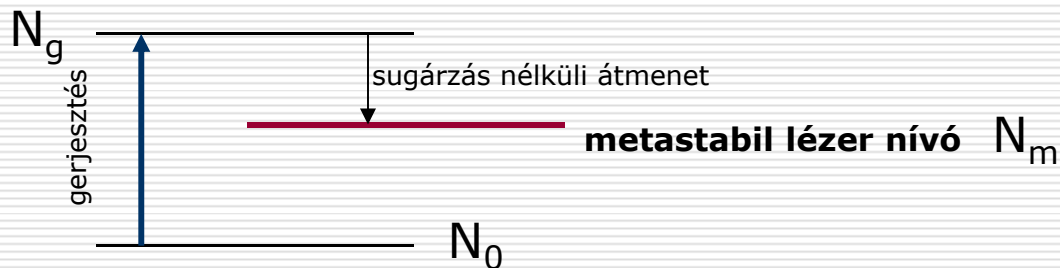
## 2.2. lézerek működési elve

---

### A lézer anyaga

Gáz, folyadék, szilárd test

Követelmény: a gerjesztési és emissziós elektron-átmenetek **három energiaállapoton belül** történjenek, amelyek közül az egyik magasabb nivónak legyen hosszú az élettartama – **lézer-nívó**



## 2.2. lézerek működési elve

---

### A lézer anyag gerjesztése

Az elektronok gerjesztése külső forrásból:  
Pl. gázkisülés, fényimpulzus

Intenzív gerjesztés  $\longrightarrow$  a felső nível populálása  $\longrightarrow$   
átmenet a metastabil nivóra  $\longrightarrow N_m$  a hosszú élettartam  
miatt megnő, az alsó nível kiürül:

$$N_m \gg N_0$$

**populáció inverzió: a fényerősítés feltétele**

---

## 2.2. Lézerek működési elve

---

### *Fényerősítés indukált emisszióval*

Populáció inverzió mellett a rendszer

a  $hf = E_m - E_0$  fotonenergiájú sugárzást

erősíti, ilyen foton *indukálja* az emissziót

$N_m$  nagy  $\longrightarrow$  néhány spontán emisszió  $E_0$ -ra

$\longrightarrow$  fényerősítés

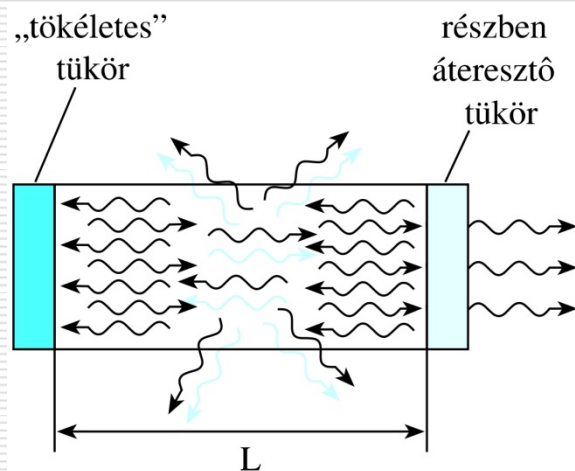
---

## 2.2. lézerek működési elve

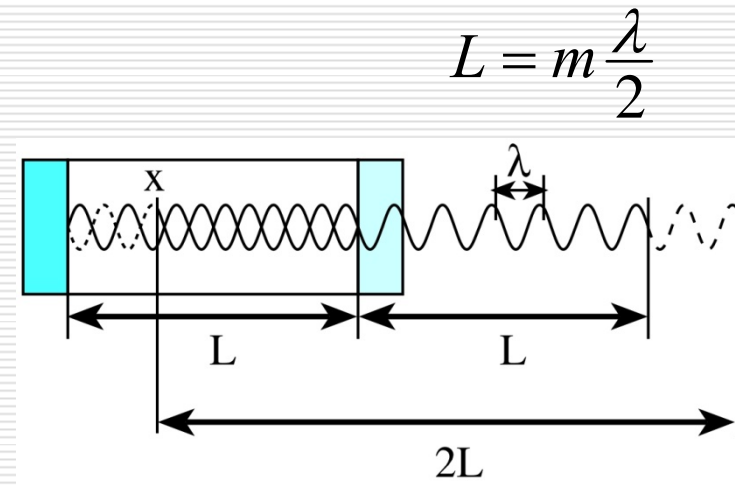
### Az optikai rezonátor

Erősíti a lézer tengelyével egyirányú sugárzást  
Leszűkíti az emisszió hullámhossztartományát

99.9%



99%



állóhullámok kialakulása

---

## Mai kérdés:

Hogyan alkalmazná az alábbi képletet, és milyen adatok hiányoznak, ha azt akarjuk megbecsülni a segítségével, hogy egy sok kötéssel stabilizált óriás-molekulában hány %-ban vannak felszakadt kötések?

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}$$

---