

## Elektromágneses sugárzások és biológiai rendszerek

### Ionizáló és nem-ionizáló sugárzások

---

Dr. Fidy Judit  
egyetemi tanár  
2015 Március 4

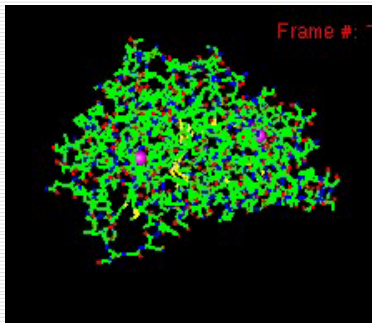
Mai kérdés:

---

Becsülje meg, hány % van felszakadva egy makromolekulában azokból a kötésekből, ahol a kötési energia  $2.7 \times 10^{-2}$  eV ( $kT = 0.027$  eV).

*Elmaradt ábra a fehérje-dinamikáról*

---



Tormaperoxidáz



Foszfoglícérát kináz

## Sugárzások és biológiai rendszerek

### Ionizáló és nem-ionizáló sugárzások

---



**Látható fény (nem ionizáló)**

**Röntgensugárzás**  
(Röntgen-cső, szerkezetvizsgálat, diagnosztika)

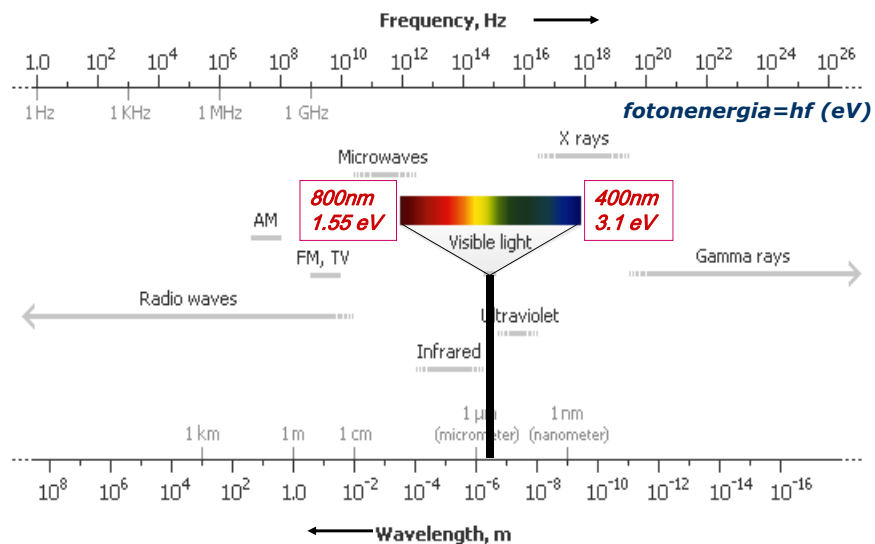
(Magsugárzások és nagy energiájú röntgen sugárzás orvosi alkalmazásai → „Orvosi fizika” MSc)

---

## Fény – Röntgen sug. : elektromágneses hullámok

Logaritmikus skála

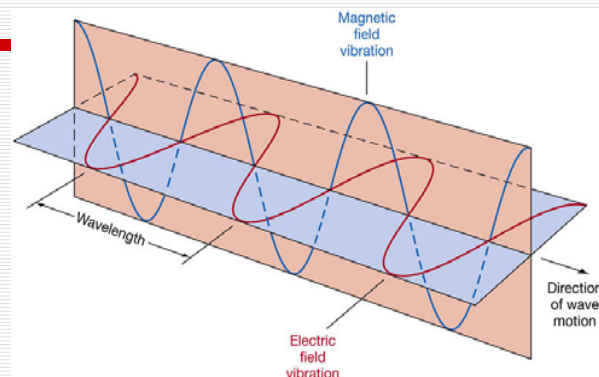
$10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nanometer}$



## emlékeztető

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

## Elektromágneses hullámok - emlékeztető

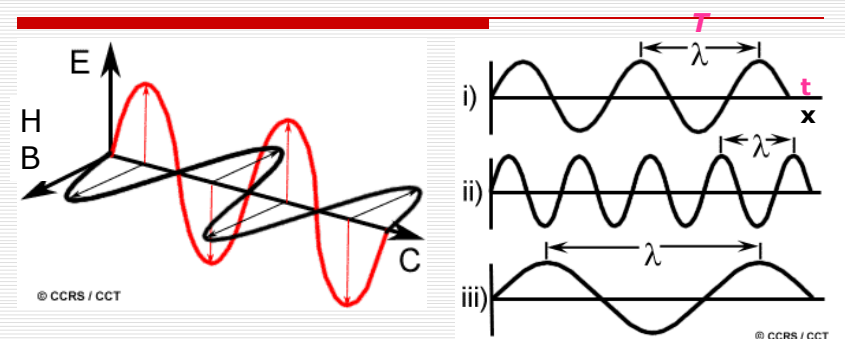


$$E = E_{\text{max}} \cdot \sin \left( 2\pi \frac{t}{T} + 2\pi \frac{x}{\lambda} + \Phi \right)$$

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

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

## EM hullámok fontos tulajdonságai



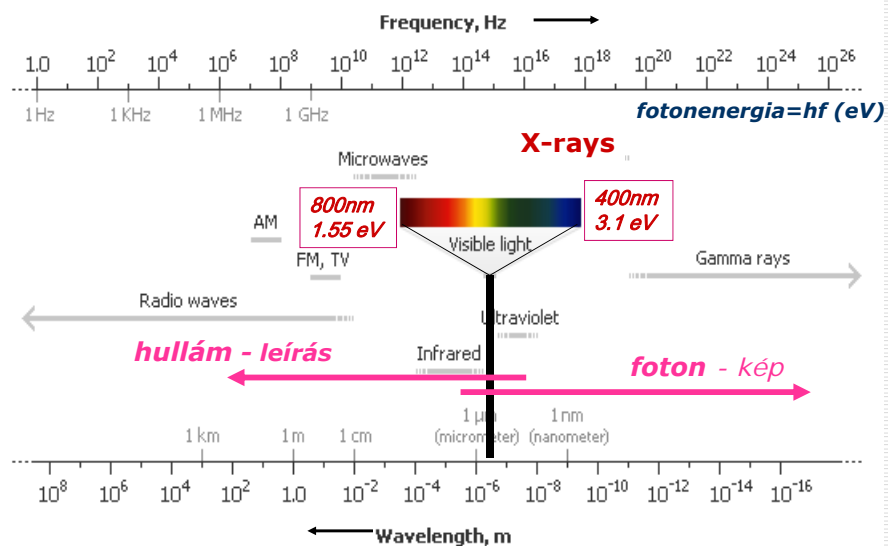
$$c = \lambda / T, \quad f = 1/T, \quad c = f\lambda \text{ (m/s)}$$

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

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

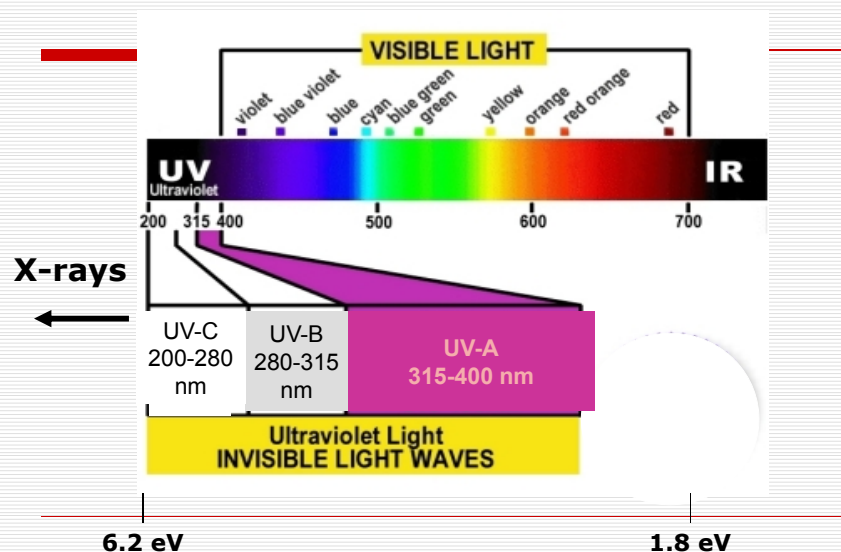
## Elektromágneses hullámok – kettős természet ?

Logaritmikus skála



## A fény természete, elnyelődés és emisszió

### A fény hullám paramétere



## A fény biológiai hatásai

### Szemponatok:

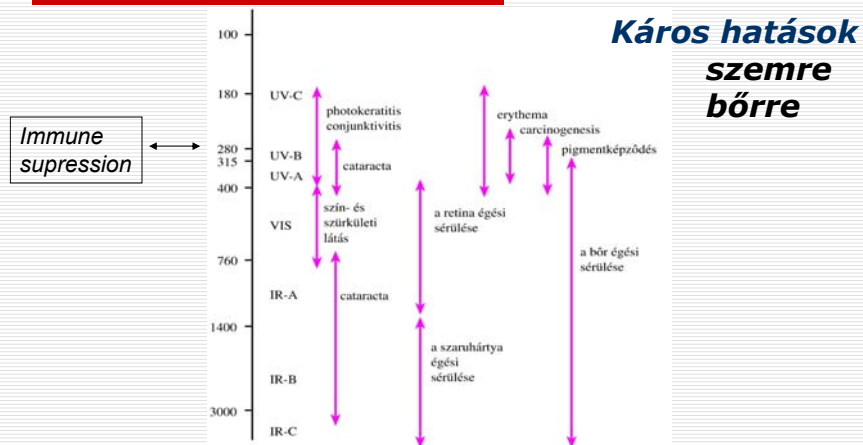
Mi nyeli el? Milyen mélyre jut?

Milyen szerveket ér fény?

Fénnyel kiváltott reakciók, terápiás beavatkozások

## A fény biológiai hatásai

### Mit ér közvetlenül fény?



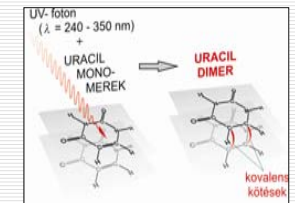
## A fény biológiai hatásai

### Mit ér közvetlenül fény?

**Direkt fotokémiai hatások → genetikus anyag:**  
az elnyelt foton közvetlenül vezet kémiai átalakuláshoz

- UV fotodimerizáció DNS, RNS-ben (timin, citozin, uracil)
- fotohidratáció
- DNS-fehérje keresztkötés

**gén-állomány sérülése**  
**sejtpusztulás**



## A fény biológiai hatásai

### Mit ér közvetlenül fény?

**Pozitív hatások**  
**szemre bőrre** → **Szervezetre ?**

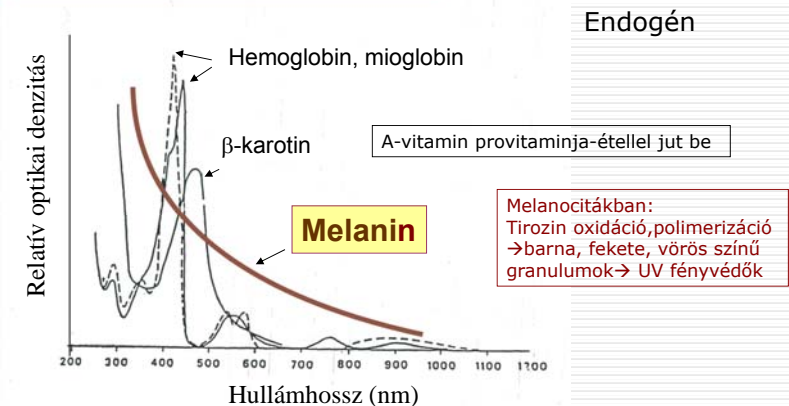
**Ismert hatások:**

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

..... Sok az ismeretlen tényező!

## A fény biológiai hatásai

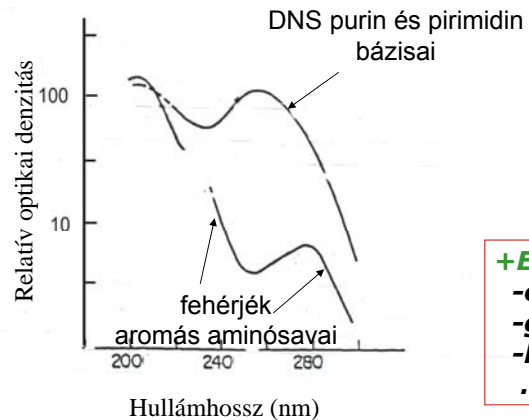
### Milyen molekulák nyelik el?



## A fény biológiai hatásai

### Milyen molekulák nyelik el?

Endogén

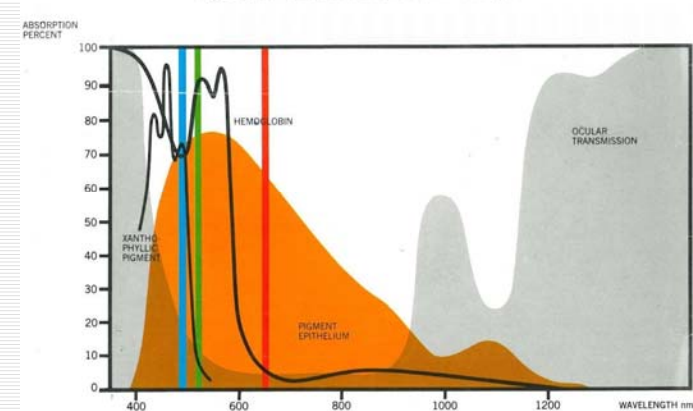


**+Exogén kromofórok**  
**-ételfestékek**  
**-gyógyszerek**  
**-kozmetikumok**  
 ....

## A fény biológiai hatásai

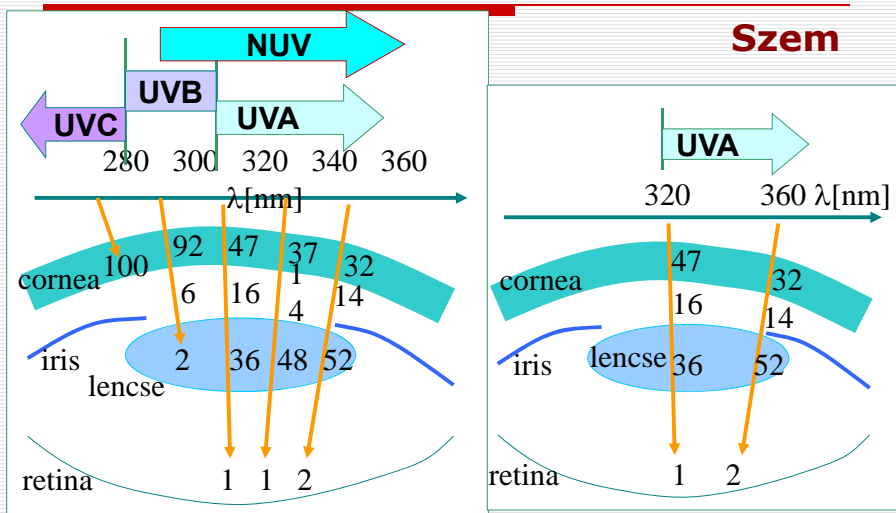
### Milyen molekulák nyelik el?

Spectral characteristics of the eye



## A fény biológiai hatásai

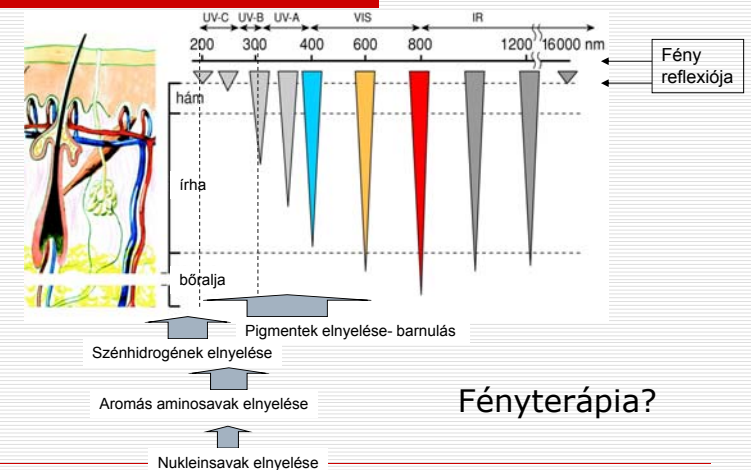
### Behatolási mélység?



## A fény biológiai hatásai

### Behatolási mélység?

Bőr

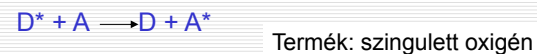
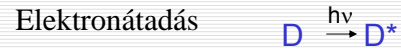


Fényterápia?

## A fény biológiai hatásai –fény mint terápiás „eszköz”

### 1. Sejtpusztítás fotokémiai mechanizmusokkal

#### Indirekt fotokémiai reakciók

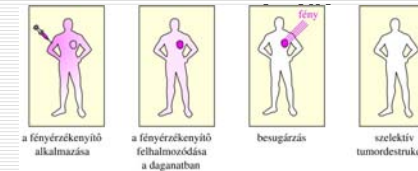


## A fény biológiai hatásai –fény mint terápiás „eszköz”

### Terápiás alkalmazások: rákos sejtek elpusztítása

#### fényérzékenyítőkön keresztül

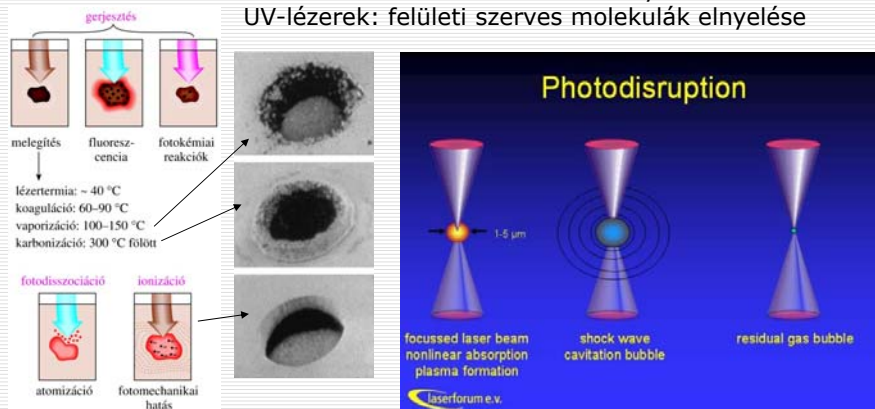
#### - specifikus kötődés + száloptika+lézerfény



#### - bőrgyógyászati alkalmazások felületi kezelések

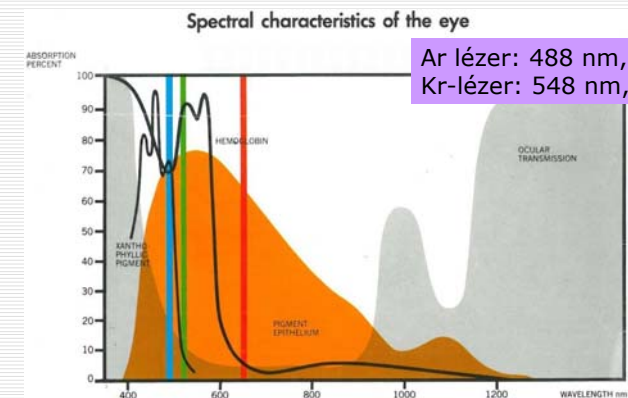
### 2. Lézerek sebészeti alkalmazása: „fénykés” elnyelés → energia → felmelegedés → karbonizáció → vágás

IR lézerek: szöveti víztartalom elnyelése  
UV-lézerek: felületi szerves molekulák elnyelése



### Lézerek sebészeti alkalmazása

#### elnyelés --- energia --- felmelegedés szem-alkotó szövetek specifikus elnyelése



Vérerek elzárása a szemfenéken fotokoagulációval  
(alacsonyabb T → fehérjék denaturációja → asszociátumok)

## A LASER

Nemcsak erősítő, hanem speciális fényforrás

### A lézer-fény speciális tulajdonságai

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

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

### Kettős természet

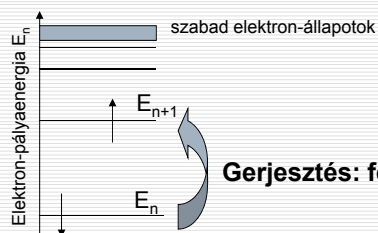
- hullám  
Huygens elv, diffrakció, **interferencia**
- részecske: **foton** (energia-kvantum)  
**fotoelektromos hatás**, energiaátadás anyagoknak  
kvantált energiaadagokban, kölcsönhatásokban  
partnere az elektron

## A fényelnyelés modellje

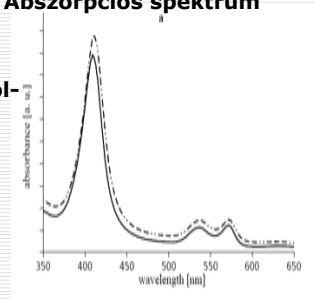
### Fény-foton koncepció

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

A fény-elnyelés mértéke függ a hullámhossztól-fotonenergiától



Hemoglobin molekula oldata  
**Abszorpciós spektrum**

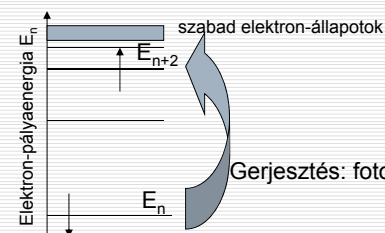


## Fény-foton koncepció

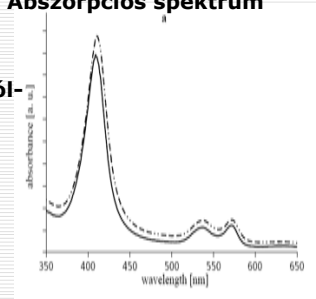
### anyaggal való kölcsönhatás magyarázata

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

A fény-elnyelés mértéke függ a hullámhossztól-fotonenergiától

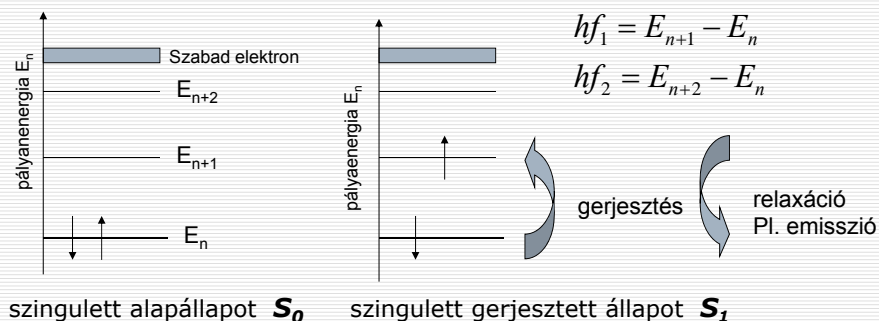


Hemoglobin molekula oldata  
**Abszorpciós spektrum**





## Fényfoton elnyelése - spontán emissziója használt sémák, jelölések



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

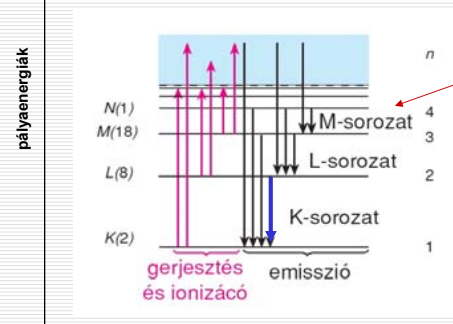
Sematikus ábrázolás: csak a legfelső betöltött nívó elektronjai

## Optikai elektron-átmenetek

FOTON  $\leftrightarrow$  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

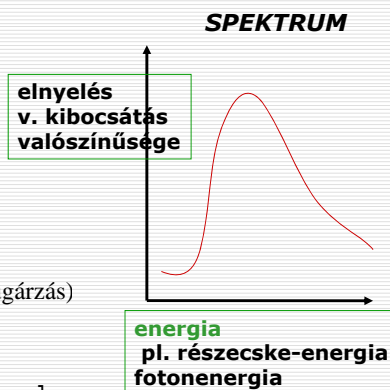
$(\frac{1}{2}mv^2 - \text{részecske-sugárzás})$

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

[eV]

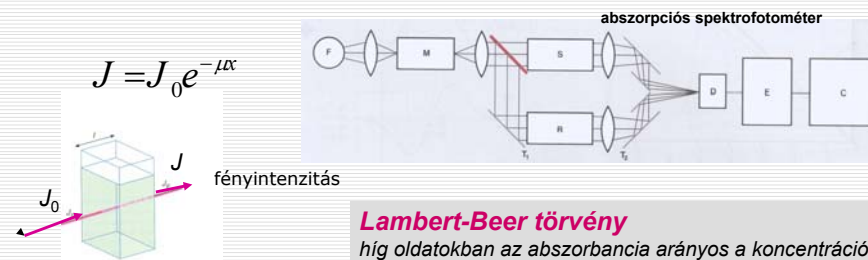
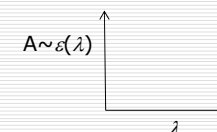
$\frac{1}{\lambda} [cm^{-1}]$

hullámszám



IR - VIS - UV  
Optikai spektroszkópia

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



A= Abszorbanca  
D= Optikai densitás

$$\lg \frac{J_0}{J} = \lg e * \mu * x = \epsilon(\lambda) * c * l$$

Moláris extinkció - függ a  
-fotonenergiától  
-anyagi minőségtől

Küvetta  
vastagsága

Koncentráció



Milyen fotonok gerjesztenek?

$\epsilon(\lambda)$  **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,  $\Delta l = +/-1$ ,  $\Delta m = 0$  vagy  $+/-1$

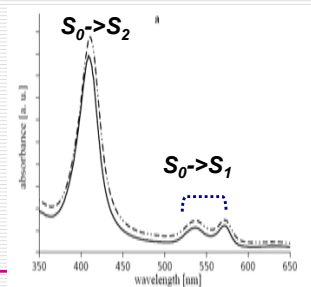
$\Delta s = 0$

+ vibrációs módusok csatolása

Gerjesztési vagy spontán emissziós átmenetben az elektron spinállapota nem változhat

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

Hemoglobin abszorpciós spektruma



## NEM TÁRGYALTUK

### 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 energiaátmenet során. Mekkora a dipólusmomentum keltésének valószínűsége?

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

állapotfüggvény

$$M_{a \rightarrow g}$$

Átmeneti momentum

$$\psi(\vec{r}_i, \vec{R}_j) = \theta(\vec{r}_i, \vec{R}_j) \phi(\vec{R}_j)$$

$$\psi_a(x, Q) = \theta_a(x, Q) \phi_a(Q)$$

elektronok magok

$$M_{a \rightarrow g} = \langle \psi_a | \hat{\mu} | \psi_g \rangle$$

**Born-Oppenheimer közelítés**

az elektronok mozgása független a magokétól: az állapotfüggvény szorzat-alakú

## NEM TÁRGYALTUK

### 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

## NEM TÁRGYALTUK

### A kiválasztási szabályok kvantummechanikai háttere

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

**Franc-Condon átfedési integrálok**

**Átmeneti valószínűség** =  $B_{g \leftarrow a} / \text{Einstein}$   
(indukált abszorpció)

$$B_{g \leftarrow a} = \text{konst} * M_{g, n \leftarrow a, 0}^2 = \text{konst} * \bar{M}_{g \leftarrow a}^2 * S_{g, n \leftarrow a, 0}^2$$

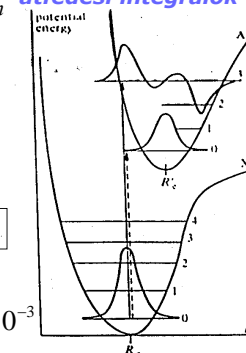
A spin-töltést egy faktoral veszik figyelembe

elektron-állapotok szimmetriája

a molekula torzulása gerjesztett állapotban

Nem ideális helyzetben:

$$f_{spin} \approx 10^{-8} \quad f_e \approx 10^{-1} \quad f_{vibr} \approx 10^{-1} - 10^{-3}$$



## Abszorpciós spektroszkópia biofizikai alkalmazások

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

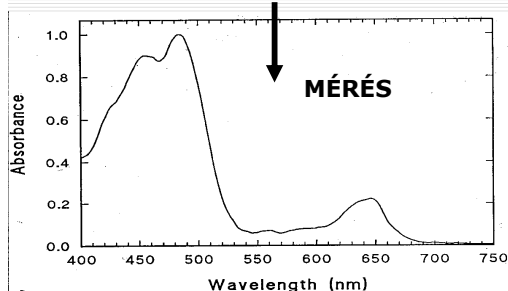
küvetta rétegvastagsága

moláris konc.

Abszorbania  
Optikai Denzitás

moláris extinkció

Molekuláris szerkezetvizsgálat



Az a-g átmeneti valószínűség

az összes vibrációs  
állapotokat tekintve

$$K_{spin} * |M_{a \rightarrow g}|^2 = const. * \int \frac{\varepsilon(f)}{f_1} df$$

multiplicitás

hullámszám

## Fontos mennyiségek

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

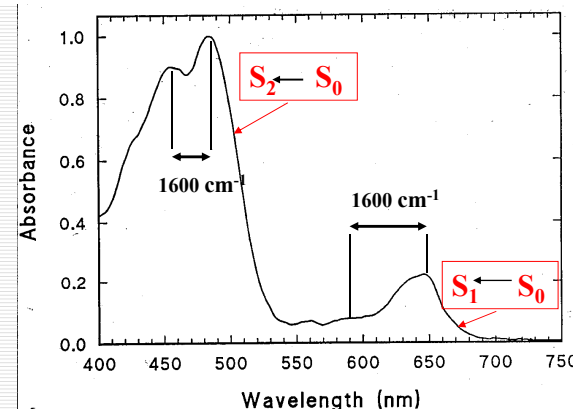
Oscillátor erő

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

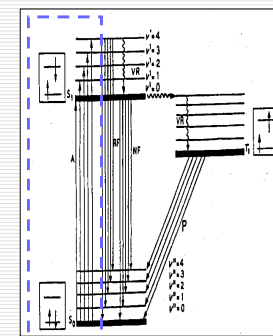
$$f = 4.3 * 10^{-9} \int \varepsilon(\tilde{\nu}) * d\tilde{\nu}$$

pl. Vibrációk energiája  
100 - 2000  $\text{cm}^{-1}$

## Kloroplaszt spektruma



Elektronátmenetek és  
molekuláris rezgések  
gerjesztése



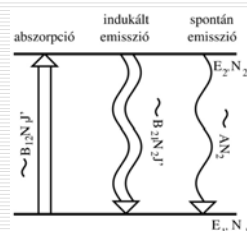
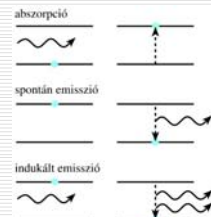
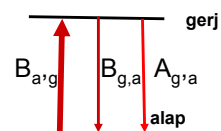
„vibronikus”átmenetek

## Fényabszorpció – fényemisszió

Fluoreszcencia: spontán fényemisszió gerjesztett  
állapotból azonos spinállapotú alapállapotba

Átmeneti valószínűségek

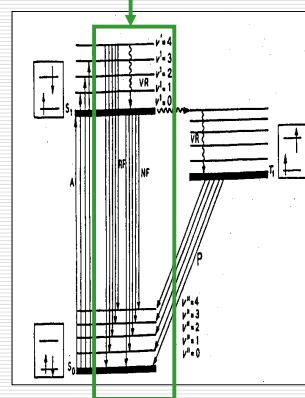
Einstein együtthatók:  $B_{ag}$  abszorpció  
 $B_{ga}$  indukált emisszió  
 $A_{ga}$  spontán emisszió



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

## Fényabszorpció – fényemisszió

Fluoreszcencia: spontán fényemisszió gerjesztett  
állapotból azonos spinállapotú alapállapotba



$$\frac{N_{em}}{N_{abs}} = \Phi_F \quad \text{Fluoreszcencia emisszió kvantumhatásfoka}$$

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

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

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

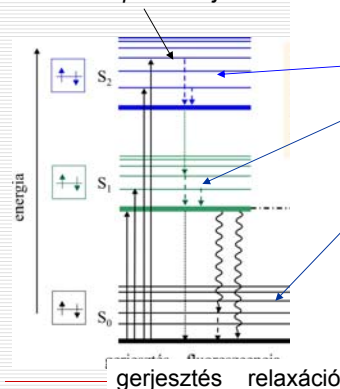
Fluoreszcencia spektrum

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

## Gyakorlati ismeretek

### 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**  
**Környezeti kölcsönhatások**

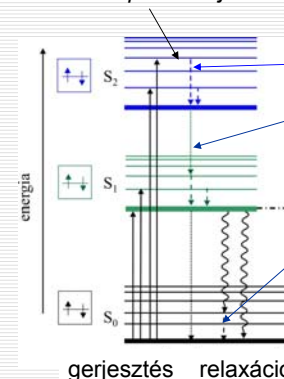
**SÁVOK**

Aromás szénhidrogének

## Gyakorlati ismeretek

### Molekula – kölcsönhatásban a környezettel emisszió csak a legelső 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 (energieleadás hő formájában) az elektronállapotokon belül, és az  $S_1$  állapotba

**Emisszió csak az  $S_1$  nívóról**

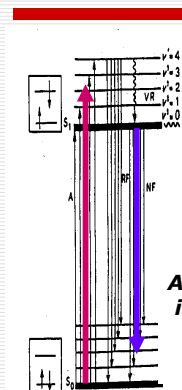
Aromás szénhidrogének

## Gyakorlati ismeretek

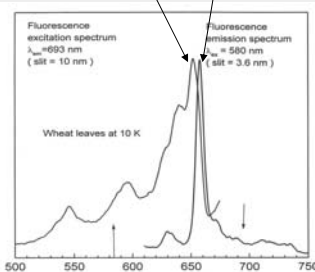
### Molekula – kölcsönhatásban a környezettel emisszió a gerjesztésnél hosszabb hullámhosszokon

A mért abszorpció és emissziós sávok energiája eltér egymástól

### Stokes-féle eltolódás



Az abszorpció és az emisszió is a legelső vibrációs szintről történik



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

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

Maximum-helyek

## Spontán fényemisszió: Lumineszcencia

### Jellemző paraméterek → természetben ritka

„hideg emisszió”

**Az emisszió előfeltétele: gerjesztett elektronállapot**

- Az emissziós spektrum

Stokes szabály  
Kasha szabály  
Sávos, vagy vonalas

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

Az emissziós spektrum görbe alatti területe

$$\Phi_{em} = \frac{N_{em}}{N_{absz}} = \frac{k_{em}}{k_{em} + k_{belső} + k_{külső}} \approx \int F(\nu) d\nu \quad \nu = \frac{1}{\lambda}$$

A gerjesztett elektron egyéb energieleadási reakciósebességei

## NEM TÁRGYALTUK

### Spontán fénymisszió: Lumineszcencia Ritka jelenség a természetben

A fénymisszió kvantumhatásfoka kicsi  
más reakcióutak az energialeadásra

VI.2. táblázat. Néhány sejtalkotó molekula fluoreszcencia paramétere

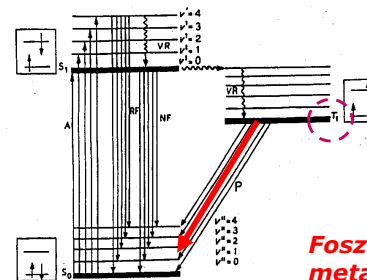
Molekula	Környezet	Abszorpció		Fluoreszcencia		Érzékenység	
		$\lambda_{\max}$ (nm)	$\epsilon_{\max}$ (1/Mcm)	$\lambda_{\max}$ (nm)	$\phi_F$	$\tau$ (nsec)	$\epsilon_{\max}\phi_F$
Triptofán	H <sub>2</sub> O, pH 7	280	5600	348	0,20	2,6	1120
Tirozin	H <sub>2</sub> O, pH 7	274	1400	303	0,14	3,6	200
Fenilalanin	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

## Spontán fénymisszió: Lumineszcencia Fluoreszcencia és Foszforeszcencia

Megkülönböztetés az emittáló gerjesztett elektronállapot alapján.

**Jablonski** – diagram

Az  $S_1$  állapotú gerjesztett elektron spin-átfordulással átmehet a  $T_1$  gerjesztett állapotba (energiacsökkenés), ahonnan az  $S_0$  alapállapotba visszatérés tiltott



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

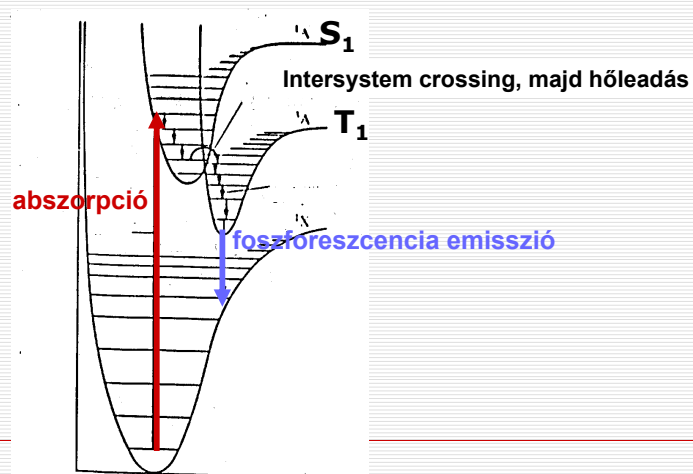
**Foszforeszcencia: spontán fotonemisszió  
metastabil ( $T_1$ ) állapotból**

**$T_1$ : Triplett állapot**

$$\sum_i |s_i| = 1$$

## NEM TÁRGYALTUK

**Jablonski** – diagram a vibronikus átmenetekkel



## 2.1. Spontán fénymisszió: Lumineszcencia Fluoreszcencia és Foszforeszcencia

### Fluoreszcencia:

- Megengedett elektron-átmenetből ( $S_1 \rightarrow S_0$ ) származó spontán fénymisszió
- Élettartama rövid,  $\tau \sim 1-10$  ns  $\leftrightarrow$  gerjesztési idő  $\sim 10^{-3}$  ns
- Karakterisztikus fotonenergia(tartomány) –szín jellemzi
- Többféle gerjesztési átmenettel is gerjeszthető

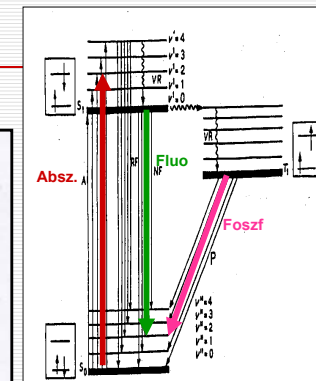
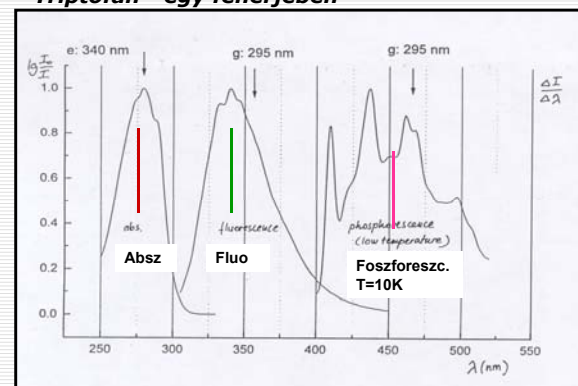
## 2.1. Spontán fényemisszió: Lumineszcencia Fluoreszcencia és Foszforeszcencia

### 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  
Tryptofán - egy fehérjében



Vibrációs relaxáció

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

Stokes-féle eltolódás

Köszönöm a figyelmet



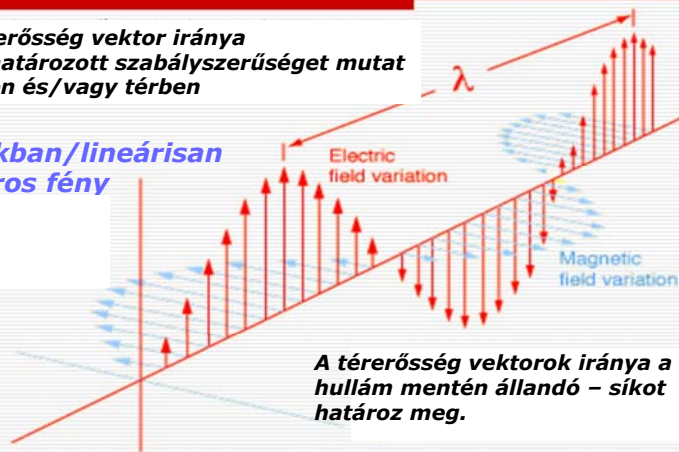
A következők olvasmányok.  
Nem lesznek tételszerűen számon kérve

Egy fontos fogalom: A fény hullám **polarizáltsága**

## Poláros fény

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

### a. Síkban/lineárisan poláros fény

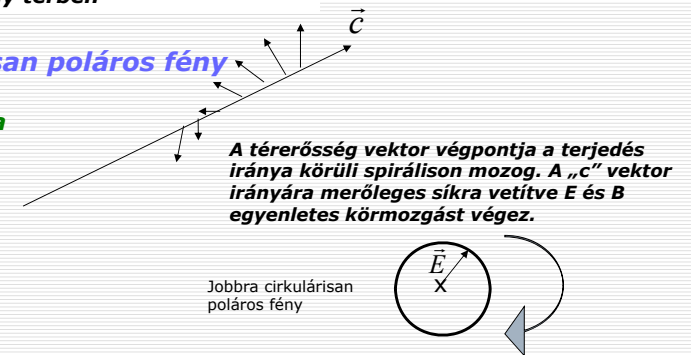


## Poláros fény

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

### b. Cirkulárisan poláros fény

jobbra - balra

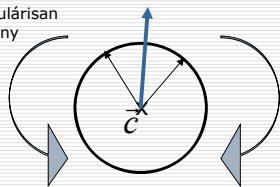


## Poláros fény

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

A **linárisan 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

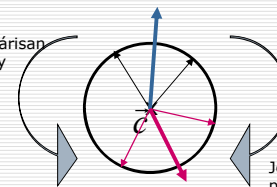
**Azonos terjedési sebesség, frekvencia és amplitudó**

## 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

Balra cirkulárisan poláros fény



Jobbra cirkulárisan poláros fény

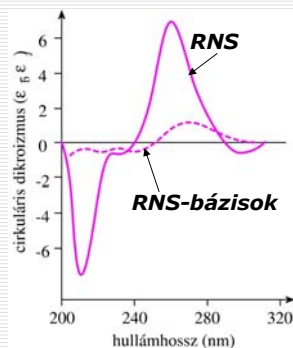
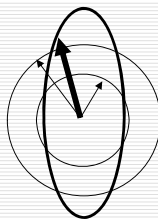
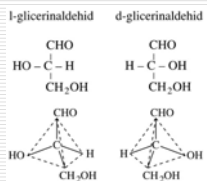
**Az optikai forgatás mértéke a molekulák minőségére jellemző és arányos a részecskeszámmal**

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



## Poláros fény

### Elliptikusan poláros fény Cirkuláris dikroizmus



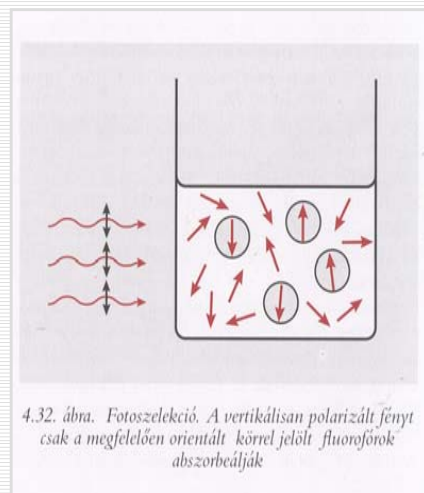
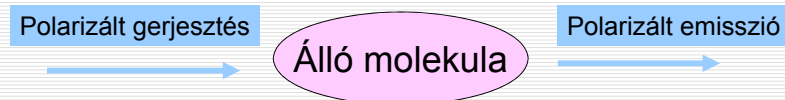
A két cirkulárisan poláros komponens törésmutatóban és abszorpciában is különbözik a kölcsönhatás után → az eredő elliptikusan polárossá válik

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

A molekulák gerjesztésekor elektronállapotváltozás → töltésselválódás →  
Dipólus vektorral jellemezhető átmeneti momentum

→ Függ a molekula szerkezetétől (elektronpályák szimmetriájától)  
a szerkezethez orientált  
pl. triptofán aminosav: 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.



4.32. ábra. Fotoszelekció. A vertikálisan polarizált fényt csak a megfelelően orientált körrel jelölt fluoroförök 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 forrásai, lézerek, biológiai hatások



## Fény-keltő mechanizmusok és fényforrások

### 1. Hőmérsékleti sugárzás folytonos spektrum

Oka: anyagok belső szerkezetének termikusan gerjesztett rezgései

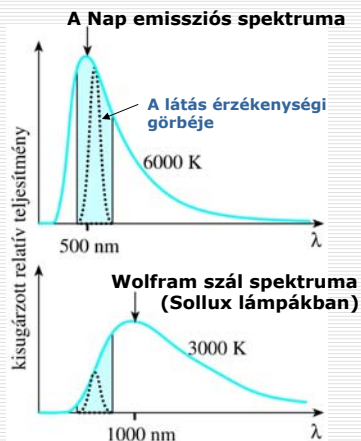
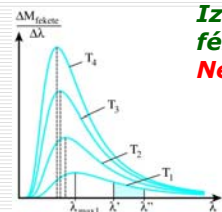
$$M = \sigma \cdot T^4$$

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{konst}$$

Fény? T-től függ

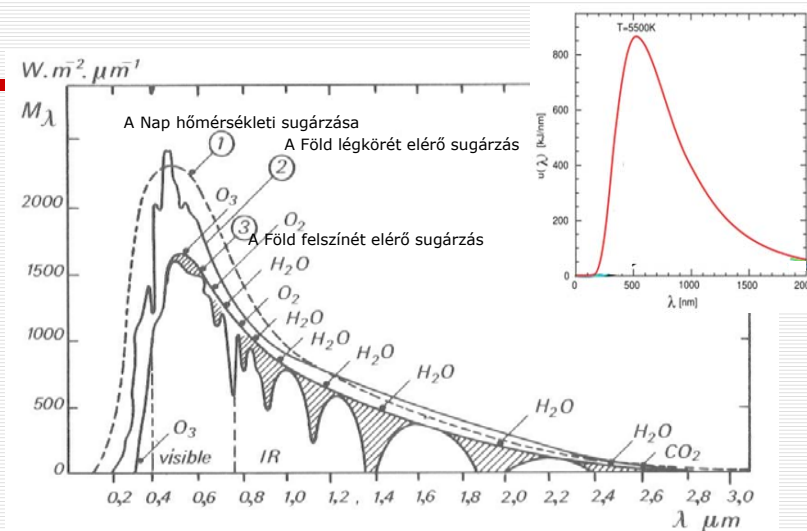
**Izzószálas fényforrások**  
**Nem gazdaságos!**

Halogén gáz töltet a szál párolgása ellen



**M** : teljes kisugárzott intenzitás – az emissziós spektrum görbe alatti területe

## A napsugárzás emissziós spektruma

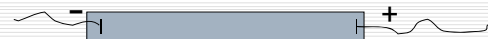


## Fény-keltő mechanizmusok és fényforrások

### 2. Lumineszcencián alapuló fényforrások

Alapja: gázkisülési csövekben keltett elektrolumineszcencia

(az üvegbúra elnyeli az UV fényt, a kvarc nem)



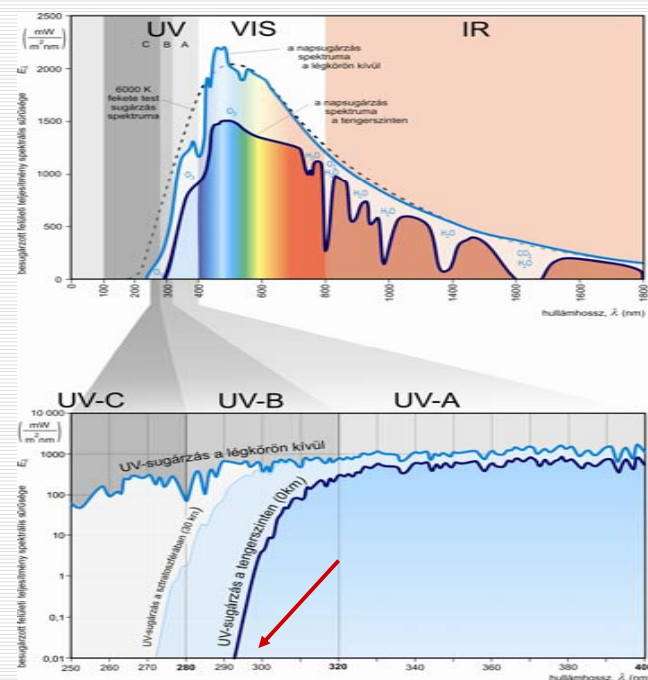
**Alacsony nyomású fémgőz-lámpák**

Pl. - **Na-lámpa** sárga fénye

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

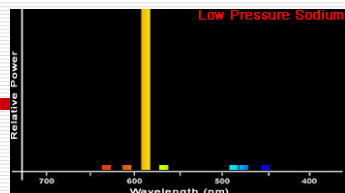
**Ívlámpák**

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

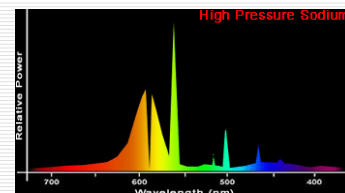
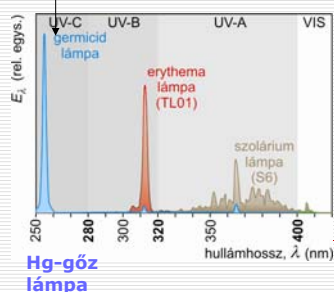


A Nap sugárzásának UV tartományát a légkör elnyelése szűri ki **O<sub>3</sub> tartalom!**

## Fémgőz lámpák

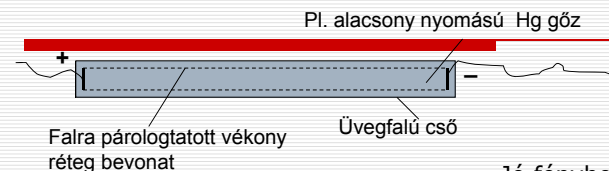


Kisnyomású Na-gőz lámpa emissziós spektruma



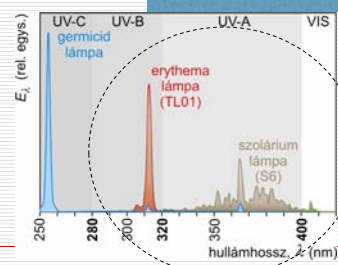
Nagy-nyomású Na-gőz lámpa emissziós spektruma

## - 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.

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

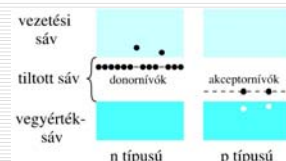
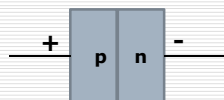


Jó fényhozam **kompakt csövek**



- Modern megoldás világításra: szilárd félvezető diódák

## LED- Light Emitting Diode



Áram hatása: pl. lyukak diffundálnak az n-típusú félvezető vezértéksávjába → rekombináció a vezetési elektronokkal → fényemisszió

## Speciális fényforrások: lézerek indukált és spontán emisszió

### Spontán emissziós fény :

Az egyes elektronátmenetek térben és időben rendezetlenül, véletlenszerűen történnek.  
Az egyes hullámvonulatok fázisa egymástól független.  
A fény „inkohereus”

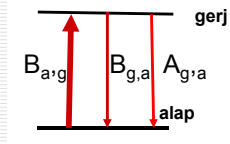
### Indukált emissziós fény:

A fényfotonok emisszióját az emittálandó fotonenergiával azonos energiájú foton jelenléte indukálja.  
A kibocsátott hullámvonulat a kiváltóval azonos fázisban lép ki, együtt koherensek

## A lézerek működési elve – indukált fényemisszió

Átmeneti valószínűségek

**Einstein együtthatók:**  $B_{ag}$  abszorpció  
 $B_{ga}$  indukált emisszió  
 $A_{ga}$  spontán emisszió

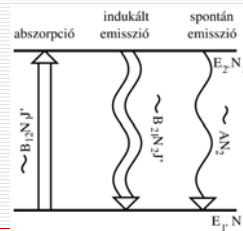
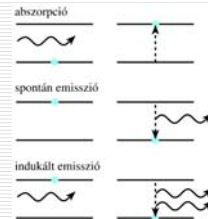


**Feltétel:**  $hf = \Delta E_{ga}$

**fotonsugárzás jelenléte**

$$B_{1,2}N_1J' = B_{2,1}N_2J' + AN_2$$

$$B_{1,2} = B_{2,1}$$



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

## Fényerősítés indukált emisszióban --- populáció inverzió

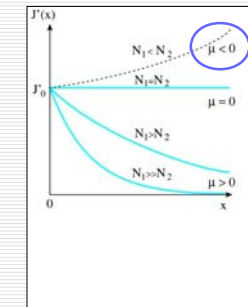
$$\Delta J' = K_1(hf)[B_{2,1}N_2 - B_{1,2}N_1]J'\Delta t$$

$$\Delta J' = K_1(hf)B[N_2 - N_1]J'\Delta t$$

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{c}$$

$$\Delta J' = K[N_2 - N_1]J'\Delta x$$

$$J' = J_0 e^{-\mu x} \quad \mu = K(N_1 - N_2)$$



**Populáció-inverzió →  
 fényerősítés**

**2 állapotú rendszerben  
 nem alakul ki**

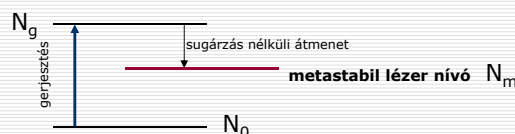
## LASER: Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation 1961, Rubin-lézer

**HOGYAN VALÓSÍTHATÓ MEG? Feltételek**

### 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**



## A lézerek működési feltételei

### A lézer anyag gerjesztése

Az elektronok gerjesztése külső forrásból:  
 Pl. gázkisülés, fényimpulzus

Intenzív gerjesztés → a felső nívó populálása →

átmenet a metastabil nivóra →  $N_m$  a hosszú élettartam

miatt megnő, az alsó nívó kiürül:

$$N_m \gg N_0$$

**populáció inverzió: a fényerősítés feltétele**

## A lézerek működési feltételei

### 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

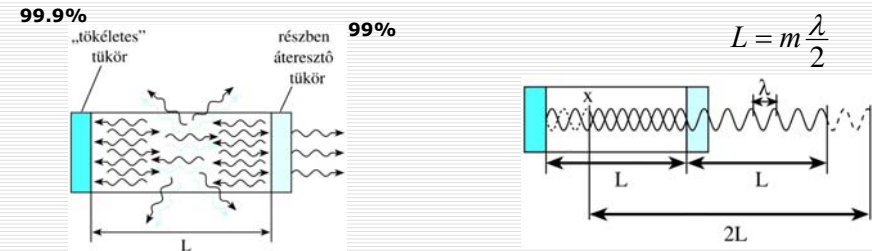
$\longrightarrow$  fényerősítés

## A lézerek működési feltételei

### Az optikai rezonátor

Erősíti a lézer tengelyével egyirányú sugárzást

Leszűkíti az emisszió hullámhossztartományát



állóhullámok kialakulása