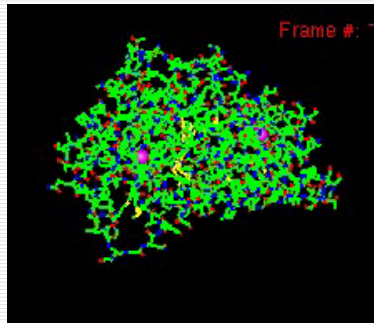
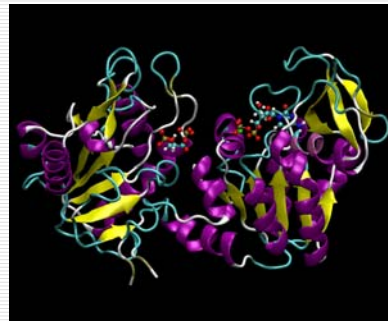


Elmaradt ábra a fehérje-dinamikáról



Tormaperoxidáz



Foszfoglicerát kináz

Elektromágneses sugárzások és biológiai rendszerek

Ionizáló és nem-ionizáló sugárzások

Dr. Fidy Judit
egyetemi tanár
2014 Febr.26

Sugárzások és biológiai rendszerek

Ionizáló és nem-ionizáló sugárzások



Látható fény (nem ionizáló)

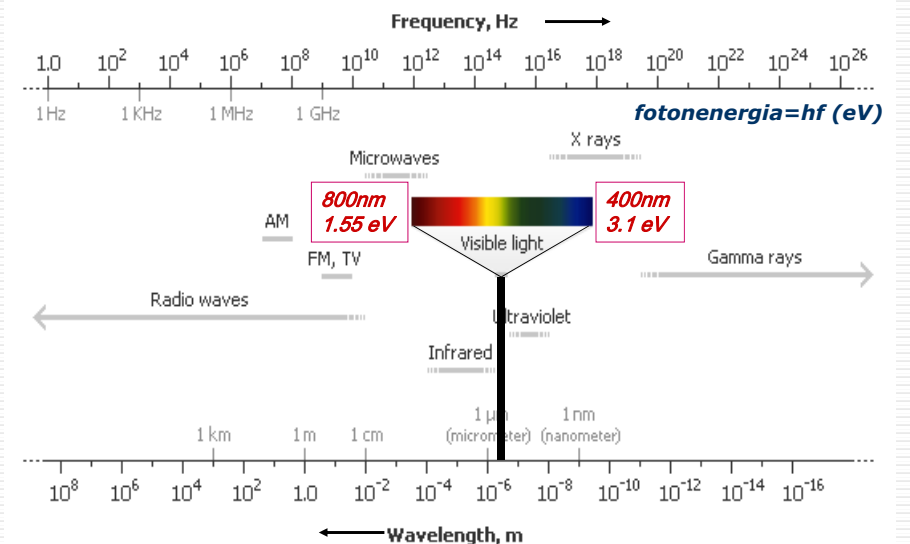
Röntgensugárzás
(Röntgen-cső, szerkezetvizsgálat, diagnosztika)

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

Fény – Röntgen sug. : elektromágneses hullámok

Logaritmikus skála

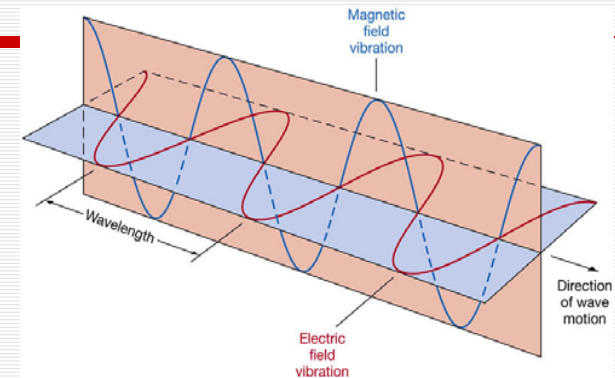
$10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nanometer}$



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

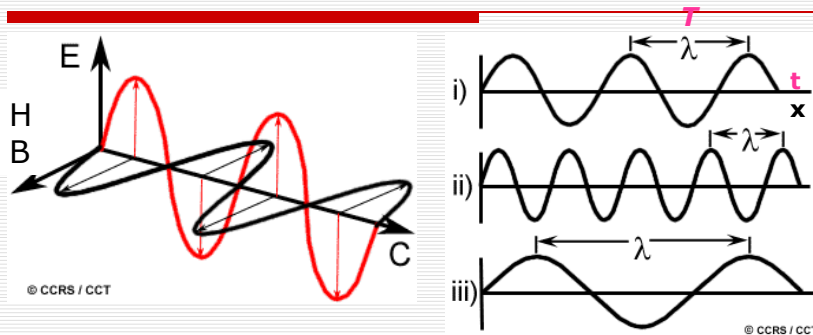


$$E = E_{\max} \cdot \sin \left(2\pi \frac{t}{T} + 2\pi \frac{x}{\lambda} + \Phi \right)$$

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

Az elektromos és mágneses térnek azonos a fázisa és a periodicitása (T, λ)

EM hullámok fontos tulajdonságai



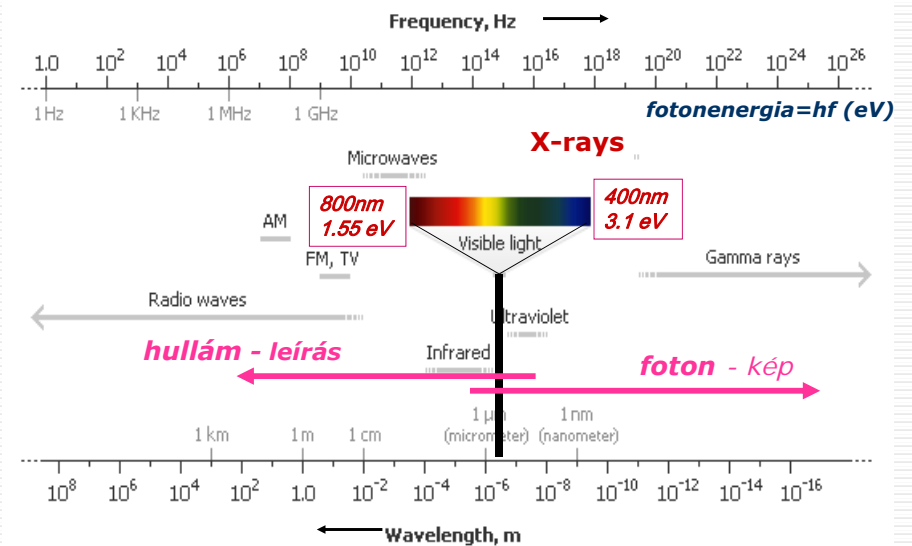
$$c = \lambda / T, f = 1/T, c = f\lambda (\text{m/s})$$

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

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

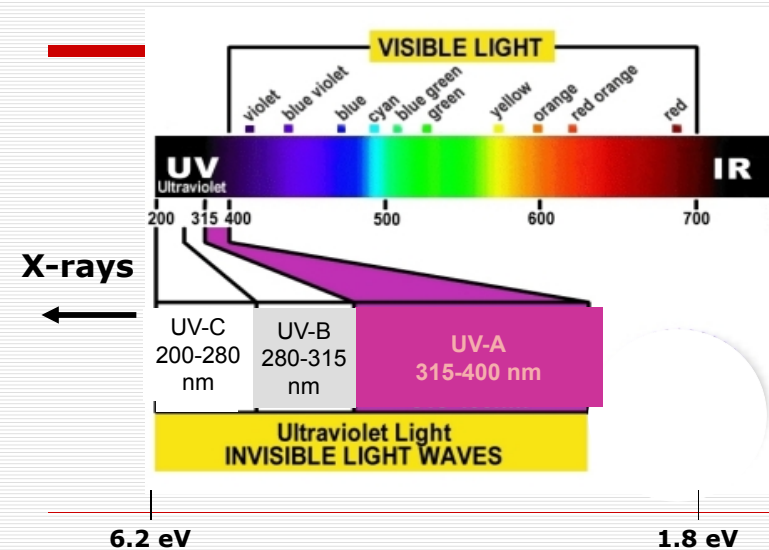
Elektromágneses hullámok – kettős természet ?

Logaritmikus skála



A fény természete, elnyelődés és emisszió

A fény hullám paraméterei



A fény biológiai hatásai

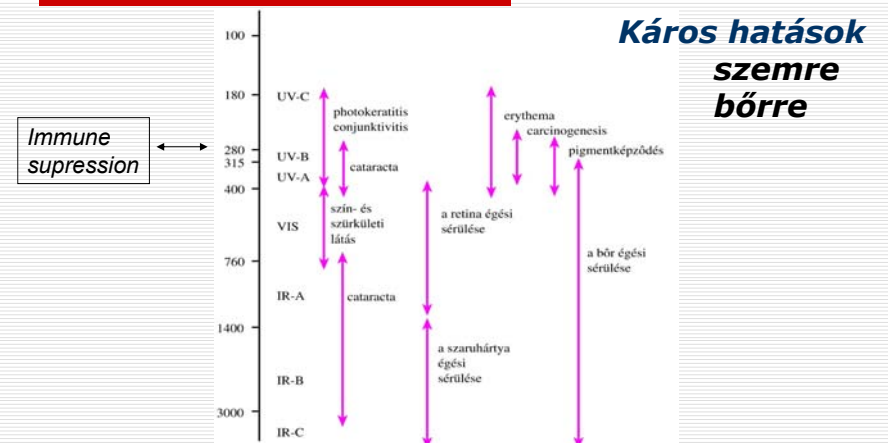
Szempontok:

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 → **Szervezetre ?**
bőrre

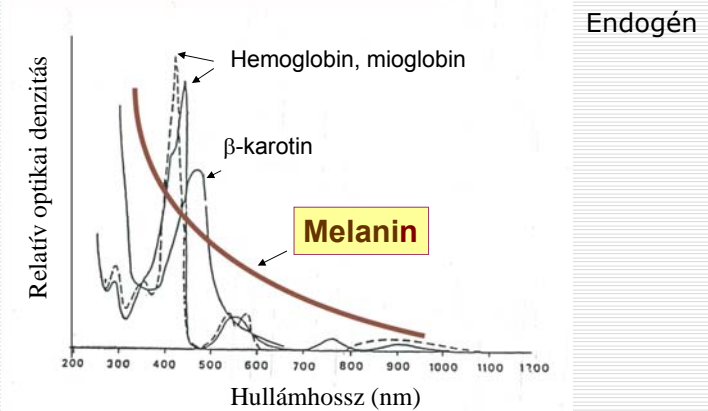
Ismert hatások:

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

..... Sok az ismeretlen tényező!

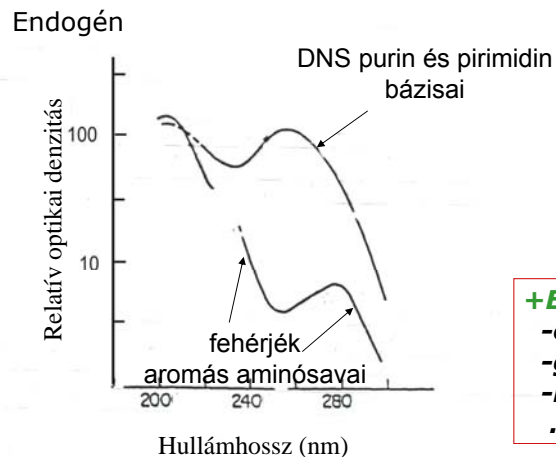
A fény biológiai hatásai

Milyen molekulák nyelik el?



A fény biológiai hatásai

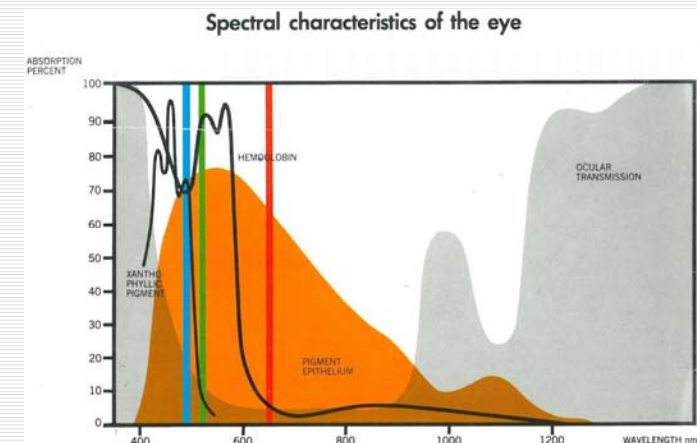
Milyen molekulák nyelik el?



+Exogén kromofórok
 -ételfestékek
 -gyógyszerek
 -kozmetikumok

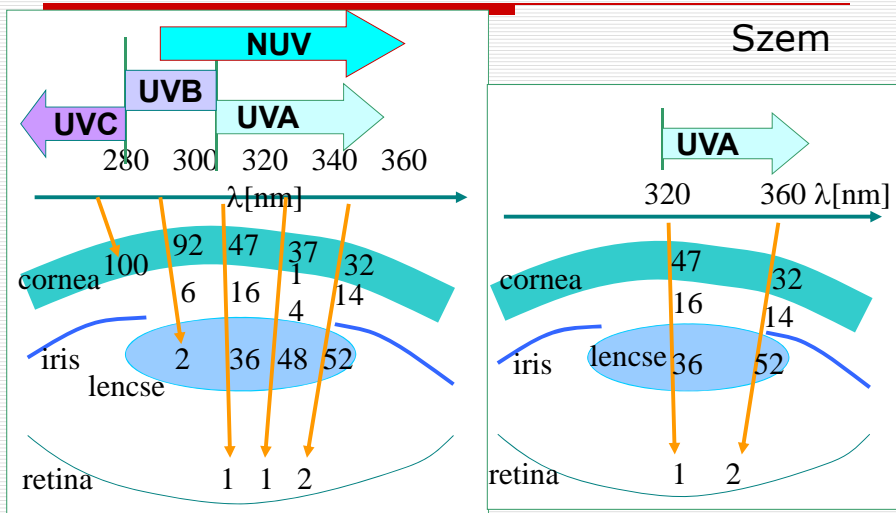
A fény biológiai hatásai

Milyen molekulák nyelik el?



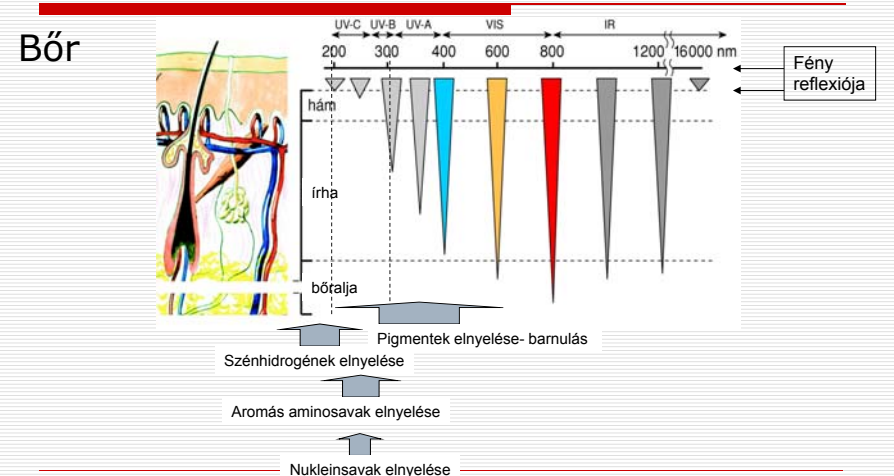
A fény biológiai hatásai

Behatolási mélység?



A fény biológiai hatásai

Behatolási mélység?



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

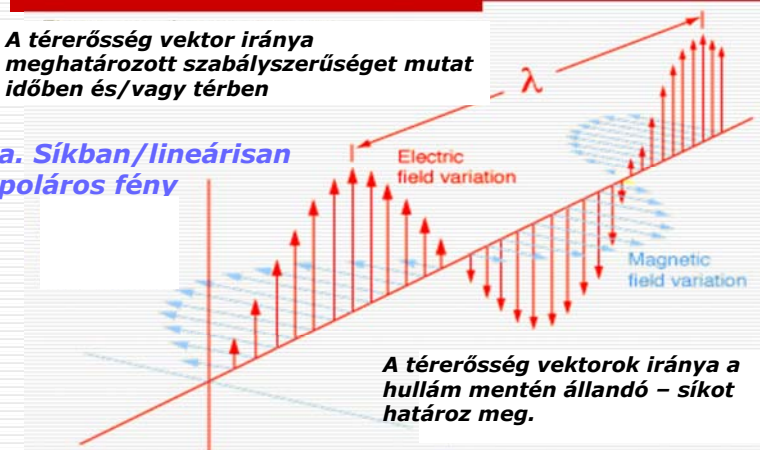
Kettős természet

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

A fény hullám polarizáltsága

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

a. Síkban/lineárisan poláros fény

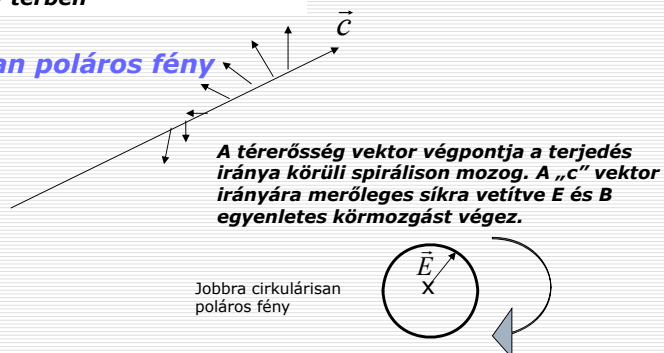


Poláros fény

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

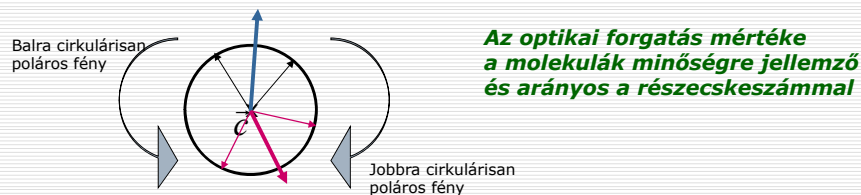


Azonos terjedési sebesség, frekvencia és amplitudó

Poláros fény

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

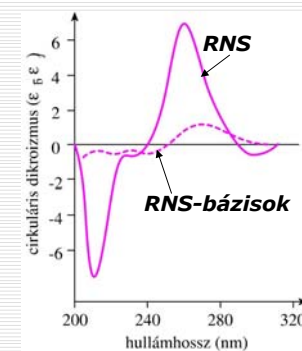
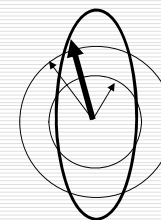
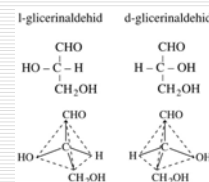
Oka: speciális aszimmetria – tükörszimmetria hiánya
A mintában a cirkulárisan poláros komponensek terjedési sebessége különböző



Különböző terjedési sebesség, azonos amplitudó
Azonos terjedési sebesség és amplitudó

Poláros fény

Elliptikusan poláros fény Cirkuláris dikroizmus



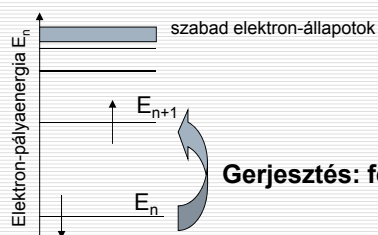
A két cirkulárisan poláros komponens törésmutatóban és abszorbanciában is különbözik a kölcsönhatás után → az eredő elliptikusan polárossá válik

A fényelnyelés modellje

Fény-foton koncepció

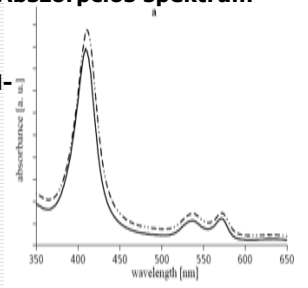
$$h * f = h * \frac{c}{\lambda}$$

A fény-elnyelés mértéke függ a hullámhossztól-fotonenergiától



Gerjesztés: fény-fotonenergia-felvétellel

Hemoglobin molekula oldata
Abszorpciós spektrum

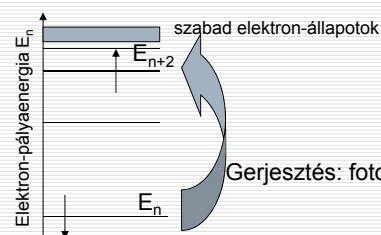


Fény-foton koncepció

anyaggal való kölcsönhatás magyarázata

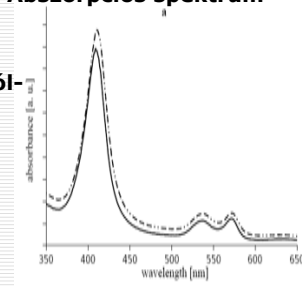
$$h * f = h * \frac{c}{\lambda}$$

A fény-elnyelés mértéke függ a hullámhossztól-fotonenergiától



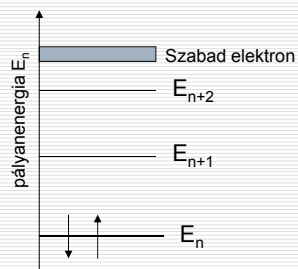
Gerjesztés: fotonenergia-felvétellel

Hemoglobin molekula oldata
Abszorpciós spektrum

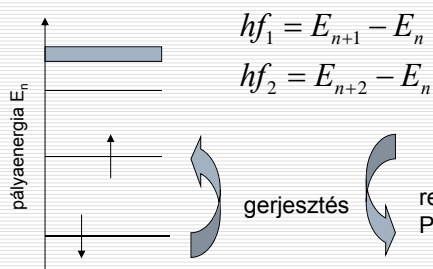


Fényfoton elnyelése - spontán emissziója

használt sémák, jelölések



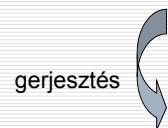
szingulett alapállapot S_0



szingulett gerjesztett állapot S_1

$$hf_1 = E_{n+1} - E_n$$

$$hf_2 = E_{n+2} - E_n$$



relaxáció
PI. emisszió

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

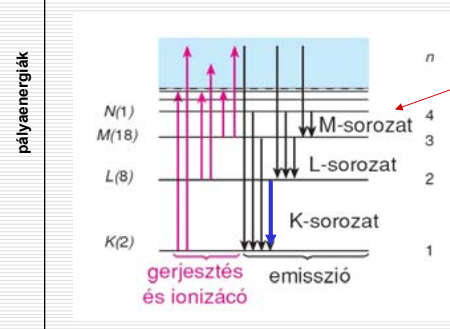
Sematikus ábrázolás: csak a legfelső betöltött nível elektronjai

Optikai elektron-átmenetek

FOTON ↔ ELEKTRON

abszorpció és emisszió
foton-képben

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



Optikai foton-energia (~2-3 eV)
elnyelése - emissziója
a legkülső - leglazábban kötött
elektronokat érinti

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

Fényfoton elnyelése – emissziója Mérés: optikai spektroszkópia

-Elnyelési
-Abszorpciós spektrum

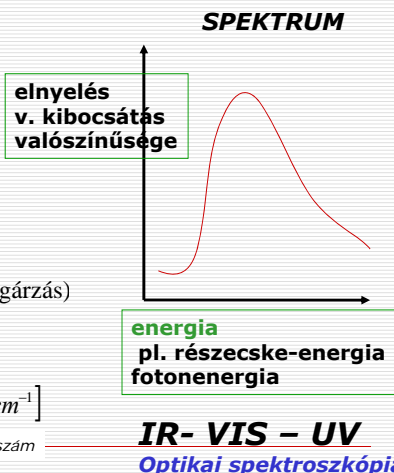
-Kibocsátási
-Emissziós spektrum

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

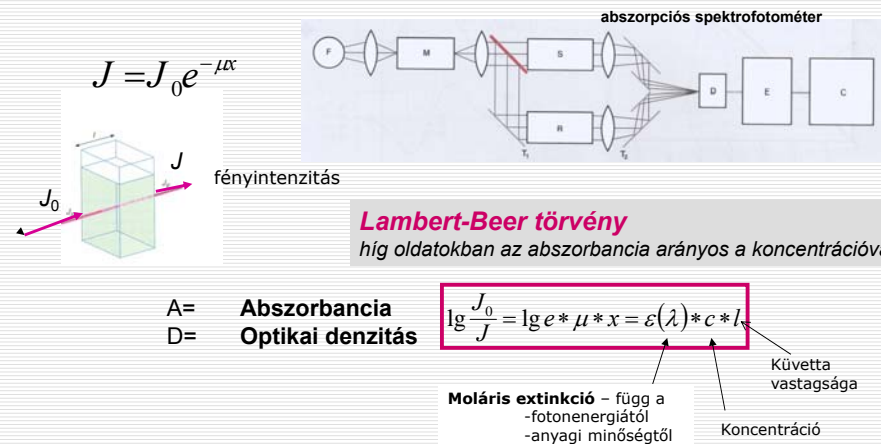
$$hf = h \frac{c}{\lambda} = hc \frac{1}{\lambda}$$

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

hullámszám



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



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

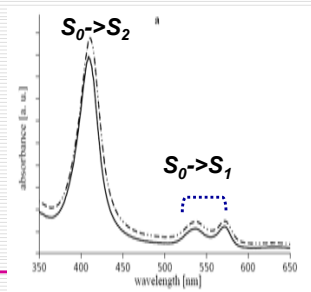
Mennyit változhatnak a kvantumszámok?

$\Delta n = \text{bármennyi}, \Delta l = +/-1, \Delta m = 0 \text{ vagy } +/-1$
 $\Delta s = 0$
+ vibrációs módusok csatolása

Gerjesztési vagy spontán emissziós
átmenetben az elektron spinállapota nem változhat

Megengedett, és tiltott átmeneteknagy vagy kis valószínűségű
átmenetek

Hemoglobin abszorpciós spektruma



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?

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

A kiválasztási szabályok kvantummechanikai háttere

$$\vec{\mu} = \vec{\mu}_e + \vec{\mu}_{mag} = \sum q_e \cdot \vec{r}_i - \sum z_j \cdot q_e \cdot \vec{R}_j \quad \text{dipól operátor}$$

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

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

$$M_{g \leftarrow a 0} = \int \phi_{a0}^*(Q) M_{ag}(Q) \phi_{gn}(Q) dQ \cong \bar{M}_{ag} \int \phi_{a0}^*(Q) \phi_{gn}(Q) dQ$$

Atomtörzsek vibrációs állapotai:

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

A kiválasztási szabályok kvantummechanikai háttere

$$M_{g \leftarrow a 0} = \int \phi_{a0}^*(Q) M_{ag}(Q) \phi_{gn}(Q) dQ \cong \bar{M}_{ag} \int \phi_{a0}^*(Q) \phi_{gn}(Q) dQ$$

$S_{a,0 \rightarrow g,n}$ Franck-Condon átfedési integrálok

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

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

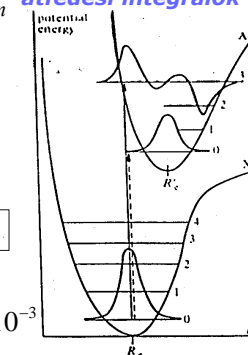
A spin-töltést egy faktoral veszik figyelembe

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

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

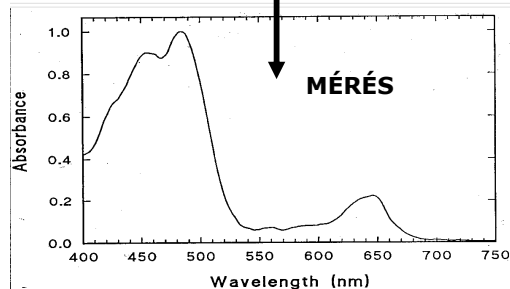
küvetta rétegvastagsága

moláris konc.

Abszorbania
Optikai Denzitás

moláris extinkció

Molekuláris szerkezetvizsgálat



Az a-g átmeneti valószínűség

az összes vibrációs állapotokat tekintve

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

multiplicitás

hullámszám

Fontos mennyiségek

Oscillátor erő

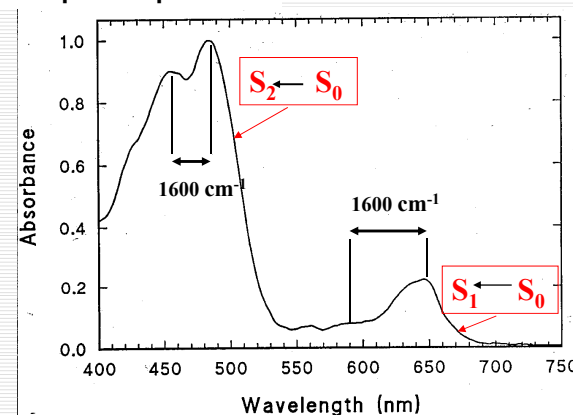
$$f = 4.3 * 10^{-9} \int \varepsilon(\tilde{\nu}) * d\tilde{\nu}$$

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

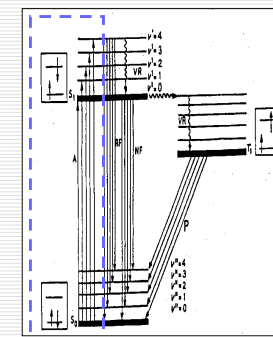
$$\text{Hullámszám (cm}^{-1}\text{)} = (1 / \lambda(\text{nm})) * 10^7$$

pl. Vibrációk energiája
100 – 2000 cm^{-1}

Kloroplaszt spektruma



Elektronátmenetek és molekuláris rezgések gerjesztése



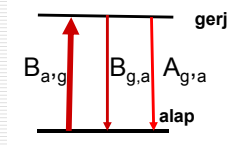
„vibronikus” átmenetek

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

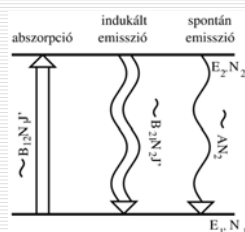
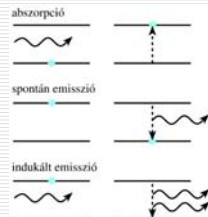


Feltétel: $hf = \Delta E_{ga}$

fotonsugárzás jelenléte

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

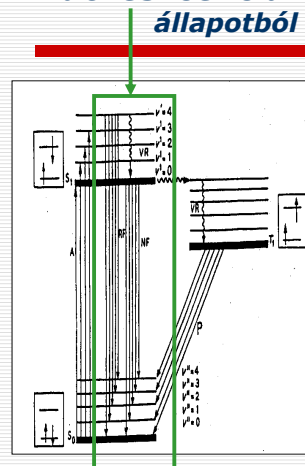
$$B_{1,2} = B_{2,1}$$



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

Fényabszorpció – fényemisszió

Fluoreszcencia: spontán fényemisszió gerjesztett állapotból azonos spinállapotú alapállapotba



Fluoreszcencia emisszió kvantumhatásfoka

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

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

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

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

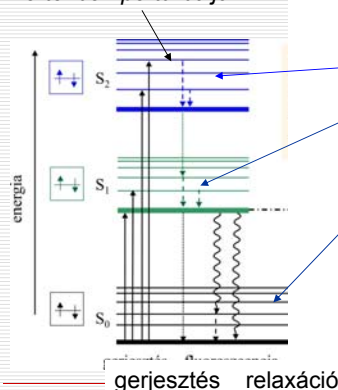
Fluoreszcencia spektrum

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 abszorpciós, mind az emissziós átmenetek fotonenergiáiban új lehetőségeket jelentenek

Egyes fotonenergiák helyett közeli fotonenergiák sorozata a spektrumokban

Molekulák vibrációi
T hőmérséklet
Környezeti kölcsönhatások

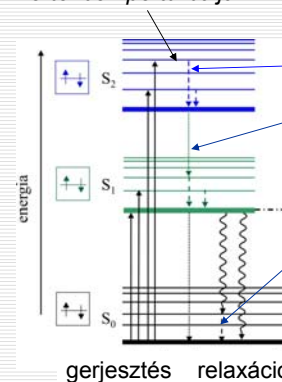
SÁVOK

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 (energialeadás hő formájában) az elektronállapotokon belül, és az S_1 állapotba

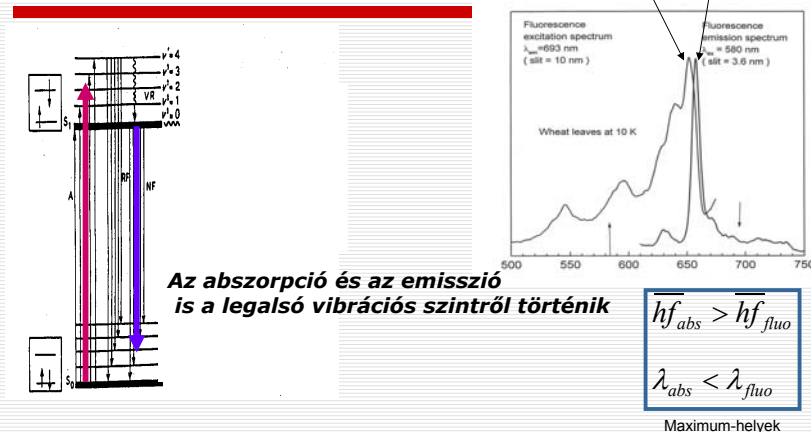
Emisszió csak az S_1 nívóról

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

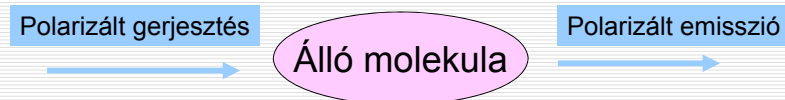


Az átmeneti momentum gyakorlati megfigyelésben A polarizáció (hullám-tulajdonság) szerepe fény-abszorpcióban, fény-emisszióban

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

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

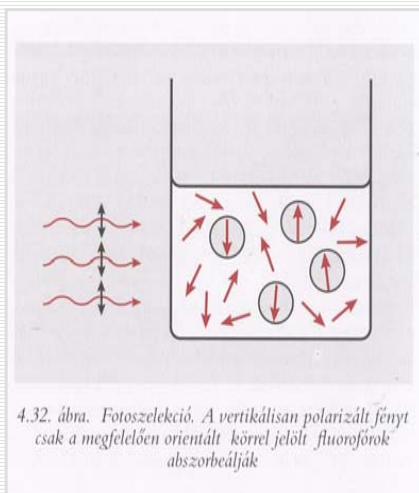
Fotoszelekció: poláros fény elektromos térerősség vektora azokat az elektronokat gerjeszti, ahol a keltett dipólus-momentum és a térerősség vektor iránya (közelítőleg) megegyezik. Emisszióban is dipólus-jelleg érvényesül.



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

Spontán fényemisszió: Lumineszcencia Jellemző paraméterek → természetben ritka

„hideg emisszió”

Az emisszió előfeltétele: gerjesztett elektronállapot

- Az emissziós spektrum

$\frac{\Delta J}{\Delta \lambda}$
Stokes szabály
Kasha szabály
Sávós, 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 energialeadási reakciósebességei

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

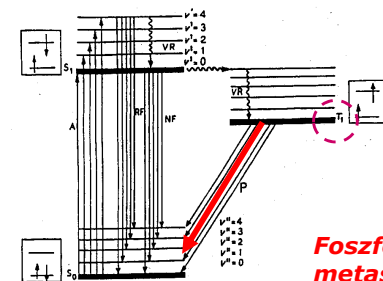
Spontán fényemisszió: Lumineszcencia

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



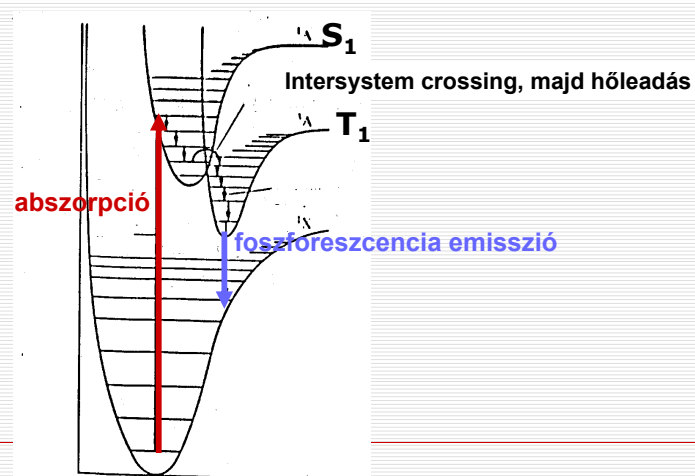
**T_1 : alacsonyabb energiájú,
hosszú élettartamú
– metastabil –
gerjesztett állapot**

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

T_1 : Triplett állapot

$$\sum_i |s_i| = 1$$

Jablonski – diagram a vibronikus átmenetekkel



2.1. Spontán fényemisszió: Lumineszcencia

Fluoreszcencia és Foszforeszcencia

Fluoreszcencia:

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

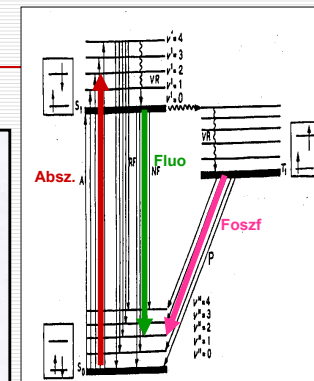
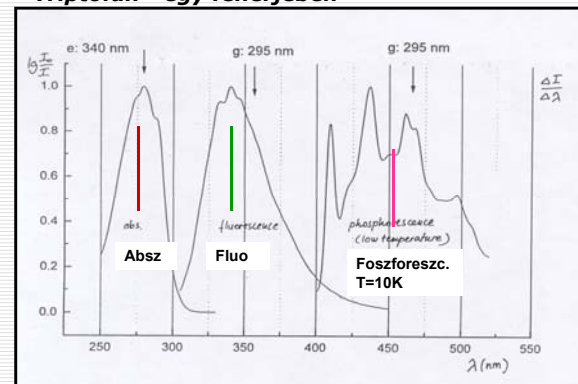
2.1. Spontán fényemisszió: Lumineszcencia Fluoreszcencia és Foszforeszcencia

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

Vége – 2014.02.26

Köszönöm a figyelmet



A fény
forrásai , lézerek, biológiai hatások

Fény-keltő mechanizmusok és fényforrások

1. Hőmérsékleti sugárzás folytonos spektrum

Oka: anyagok belső szerkezetének termikusan gerjesztett rezgései

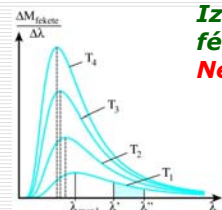
$$M = \sigma \cdot T^4$$

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

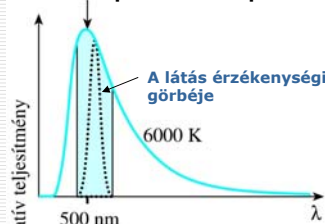
Fény? T-től függ

Izzószálas fényforrások
Nem gazdaságos!

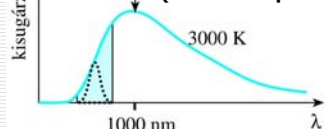
Halogén gáz töltet a szál párolgása ellen



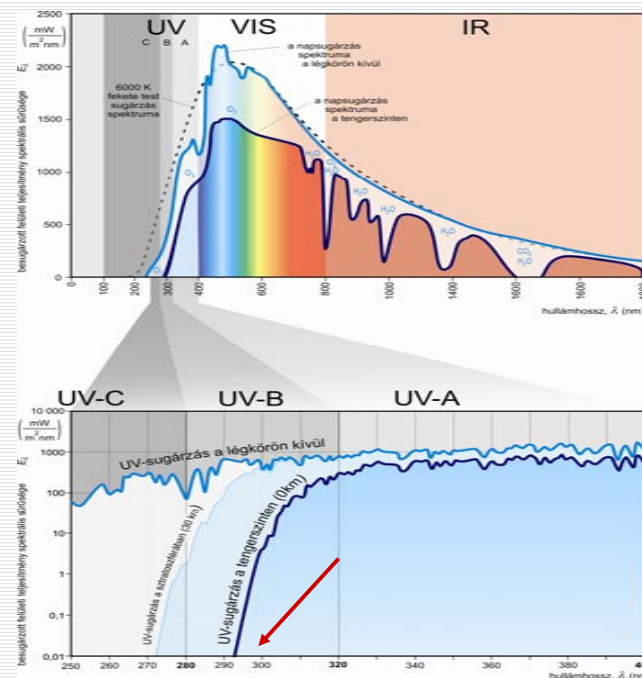
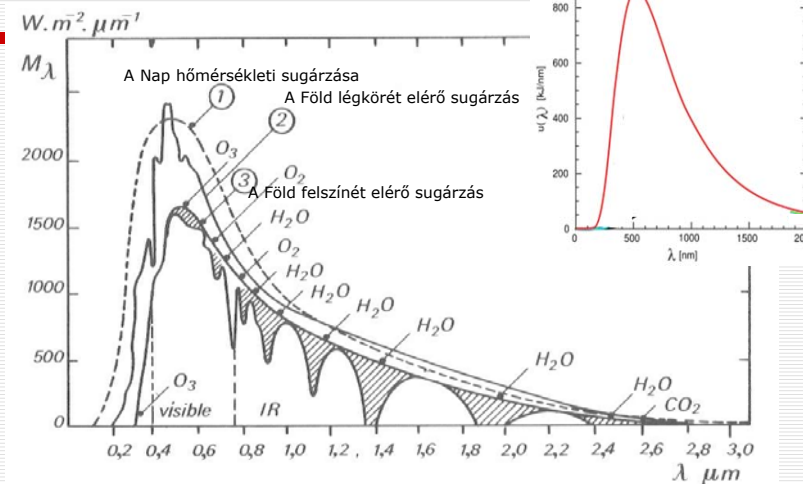
A Nap emissziós spektruma



Wolfram szál spektruma (Sollux lámpákban)



A napsugárzás emissziós spektruma

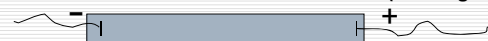


A Nap sugárzásának UV tartományát a légkör elnyelése szűri ki **O₃ tartalom!**

Fény-keltő mechanizmusok és fényforrások Lumineszcencián alapuló fényforrások

Alapja: gázkisülési csövekben keltett elektrolumineszcencia

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



Alacsony nyomású fémgőz-lámpák

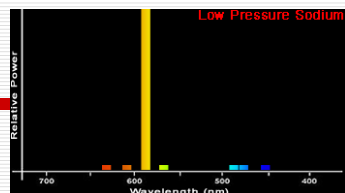
Pl. - **Na-lámpa** sárga fénye

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

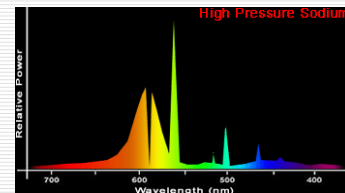
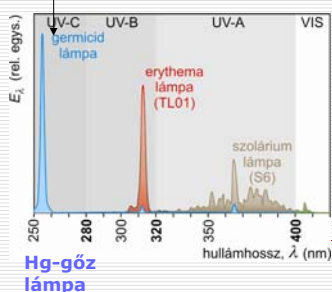
Ívlámpák

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

Fémgőz lámpák

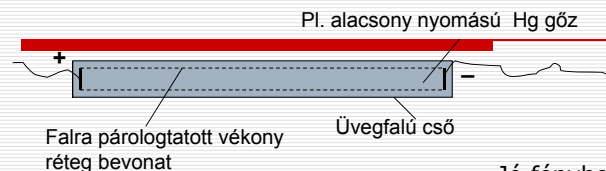


Kisnyomású Na-gőz lámpa emissziós spektruma



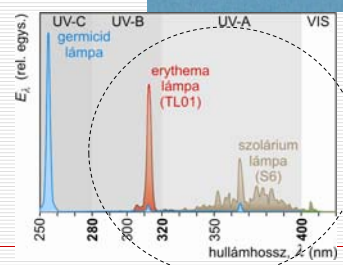
Nagy-nyomású Na-gőz lámpa emissziós spektruma

- 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 : λ a 280 – 320 nm közeli UV- tartományban, uviol üvegfal

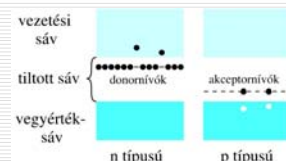
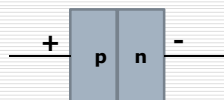


Jó fényhozam
kompakt csövek



- Modern megoldás világításra: szilárd félvezető diódák

LED- Light Emitting Diode



Áram hatása: pl. lyukak diffundálnak az n-típusú félvezető vegyértéksávjába
→ 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”

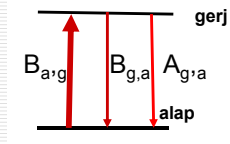
Indukált emissziós fény:

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

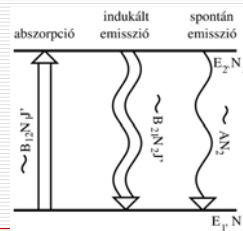
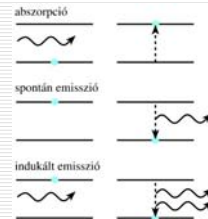


Feltétel: $hf = \Delta E_{ga}$

fotonsugárzás jelenléte

$$B_{1,2} N_1 J' = B_{2,1} N_2 J' + A N_2$$

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



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

Fényerősítés indukált emisszióban --- populáció inverzió

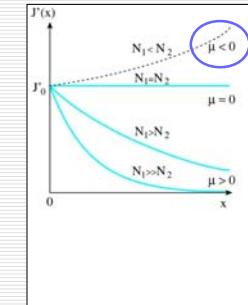
$$\Delta J' = K_1 (hf) [B_{2,1} N_2 - B_{1,2} N_1] J' \Delta t$$

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

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

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

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



**Populáció-inverzió →
 fényerősítés**

**2 állapotú rendszerben
 nem alakul ki**

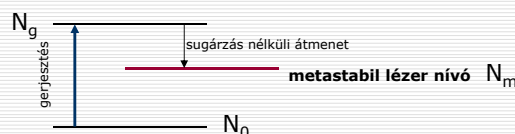
LASER: Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation 1961, Rubin-lézer

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

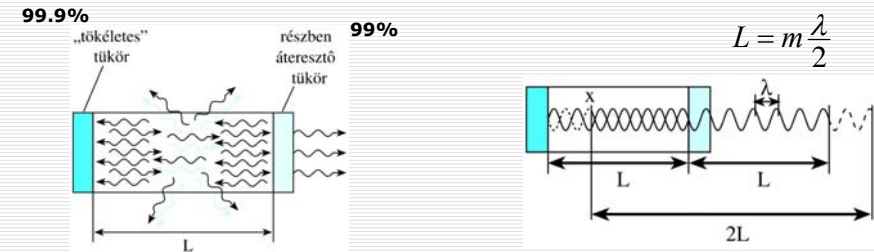
erősíti, ilyen foton **indukálja** az emissziót

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

A LASER

Nemcsak erősítő, hanem speciális fényforrás

A lézer-fény speciális tulajdonságai

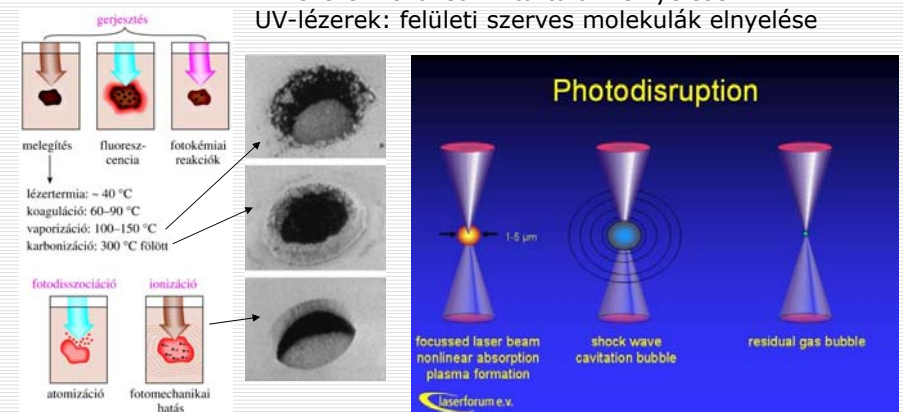
- monokromatikus $\Delta f/f \sim 10^{-10}$ ($\longleftrightarrow 10^{-6}$)
- koherens : nagy a koherencia-hossz (10^3 m $\longleftrightarrow 10^{-3}$ m)
- kis divergencia (néhány szögperc) \longrightarrow jól fókuszálható
- nagy intenzitás
átlagos intenzitás \longleftrightarrow impulzus-intenzitás

2.2. Lézerek sebészeti alkalmazása

elnyelés \rightarrow energia \rightarrow felmelegedés \rightarrow

IR lézerek: szöveti víztartalom elnyelése

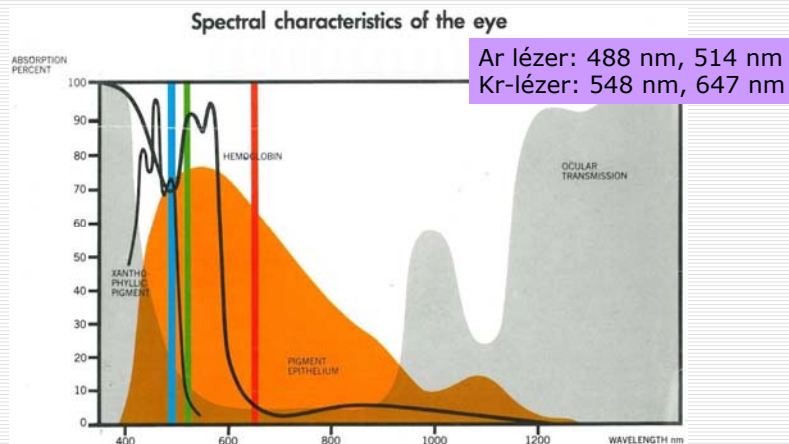
UV-lézerek: felületi szerves molekulák elnyelése



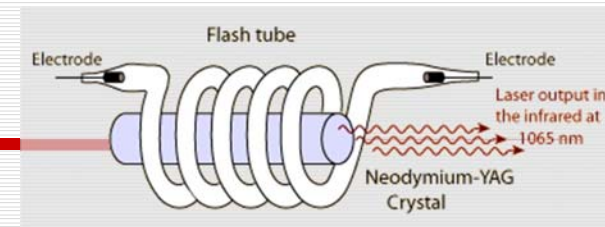
2.2. Lézerek sebészeti alkalmazása

elnyelés --- energia --- felmelegedés

szem-alkotó szövetek specifikus elnyelése

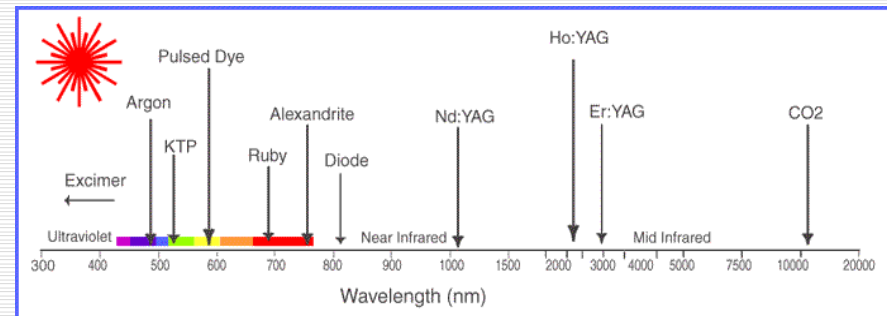


Lézerek



Szemészeti alkalmazás

Általános sebészeti alkalmazás

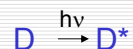


A fény biológiai hatásai –káros reakciók

Fotokémiai mechanizmusok

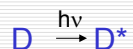
Indirekt fotokémiai reakciók

Elektronátadás



Termék : reaktív szabadgyökök

Energiaátadás



Termék: szinglet oxigén

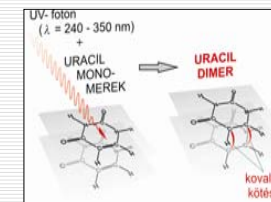
Fotokémiai mechanizmusok

Direkt fotokémiai hatások:

az elnyelt foton közvetlenül vezet kémiai átalakuláshoz

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

**gén-állomány sérülése
sejtpusztulás**

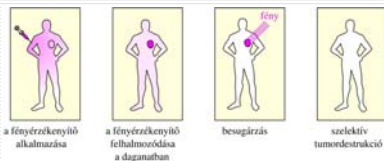


Fotokémiai mechanizmusok

Terápiás alkalmazások: rákos sejtek elpusztítása

fényérzékenyítőkön keresztül

**- specifikus kötődés + száloptika
szervezetén belül**



**- bőrgyógyászati alkalmazások
felületi kezelések**
