

# Elektromágneses sugárzások és biológiai rendszerek I.

Hogyan függ hajlékony láncú makromolekulák statisztikus láncvégtávolsága a molekulát felépítő ismétlődő egységek számától?

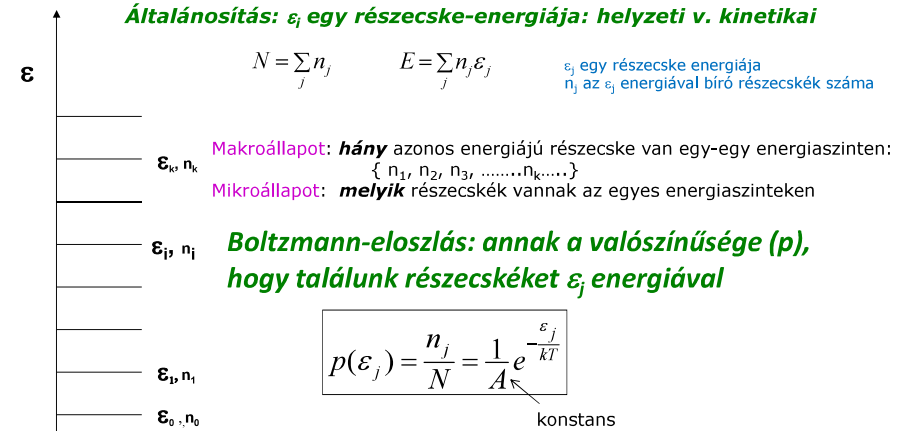
Dr. Fidy Judit  
egyetemi tanár  
2019 március 27

Több téma tárgyalásánál is szükség lesz a **Boltzmann-eloszlás** ismeretére.

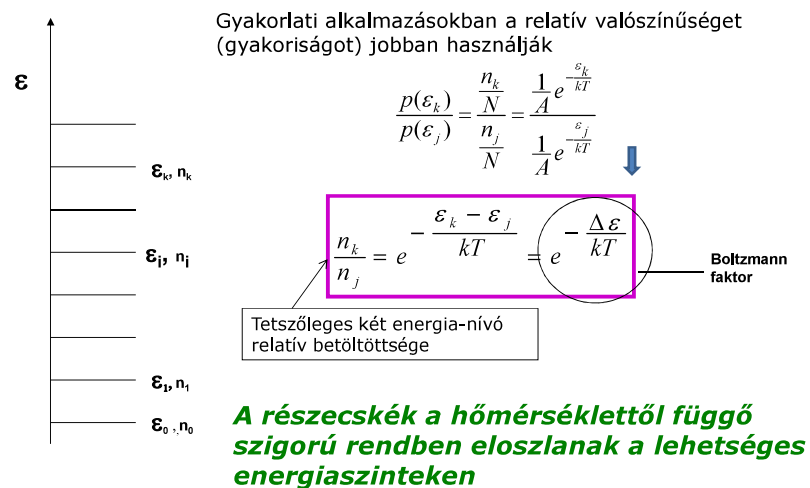
## A Boltzmann-féle energia-eloszlás-függvény

N megkülönböztethető, független részecske, környezetével termikus egyensúlyban, nem zero abszolút hőmérsékleten. A rendszer teljes energiája E állandó (termikus egyensúly).

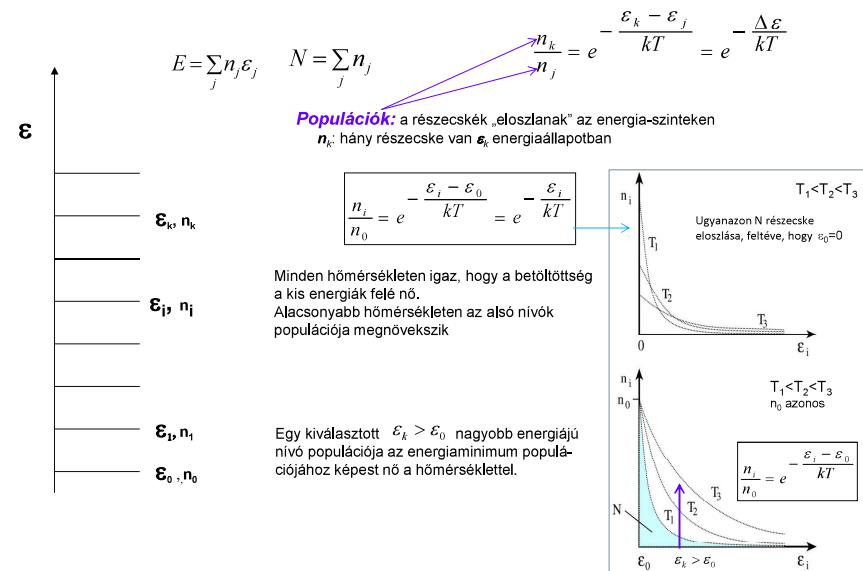
**Általánosítás:  $\varepsilon_j$  egy részecske-energiája: helyzeti v. kinetikai**



## A Boltzmann-féle energia-eloszlás-függvény



## A Boltzmann-eloszlás jelentése



## Sugárzások és biológiai rendszerek

### Ionizáló és nem-ionizáló sugárzások



#### Fény (nem ionizáló)

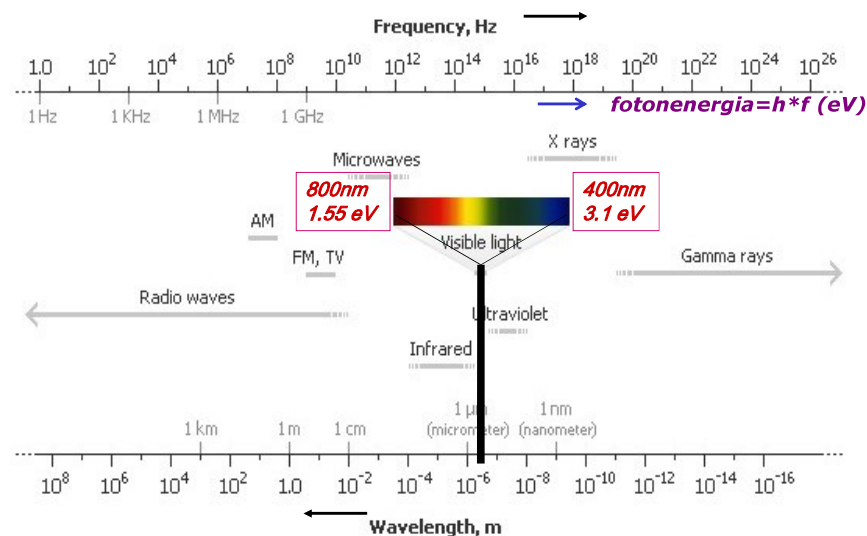
**Röntgensugárzás (ionizáló)** – diagnosztika és terápia  
 Röntgen-cső, szerkezetvizsgálat

**Magsugárzások (ionizáló)** – diagnosztika és terápia  
 $\gamma$ -sugárzás, részecskesugárzások („Orvosi fizika” MSC)

## Fény – Elektromágneses sugárzások

Logaritmikus skála

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



## emlékeztető

Fotonenergia fogalma:

Planck, Einstein

$$E_{\text{foton}} = h \cdot f$$

$h$  Plack állandó  
 $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$

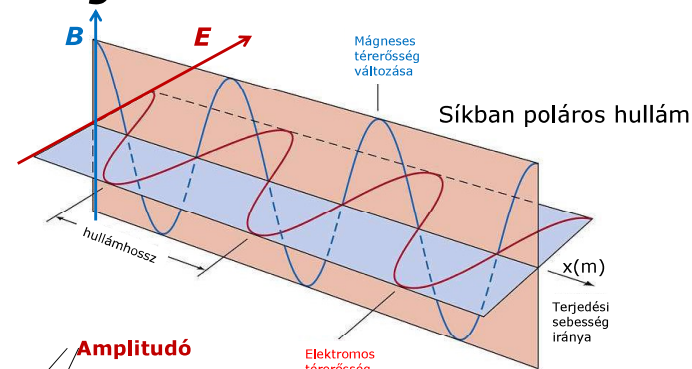
Fotonenergia egysége: elektron-volt, eV

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

elektron töltése

1 Volt feszültséggel gyorsított elektron energiája

## Elektromágneses hullámok - emlékeztető



**Amplitudó**

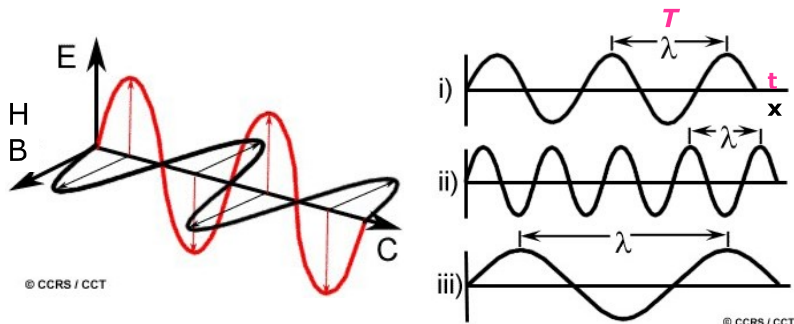
$$E = E_{\text{max}} \cdot \sin \left( 2\pi \frac{t}{T} + 2\pi \frac{x}{\lambda} + \Phi \right)$$

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

**Fázis**

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

## EM hullámok fontos tulajdonságai



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

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

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

**A fény**  
 természete, fényforrások, anyagi kölcsönhatások



**Diagnosztikai és terápiás alkalmazások**

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

**„Kettős természet”**

- **hullám**

Huygens elv, diffrakció, **interferencia**

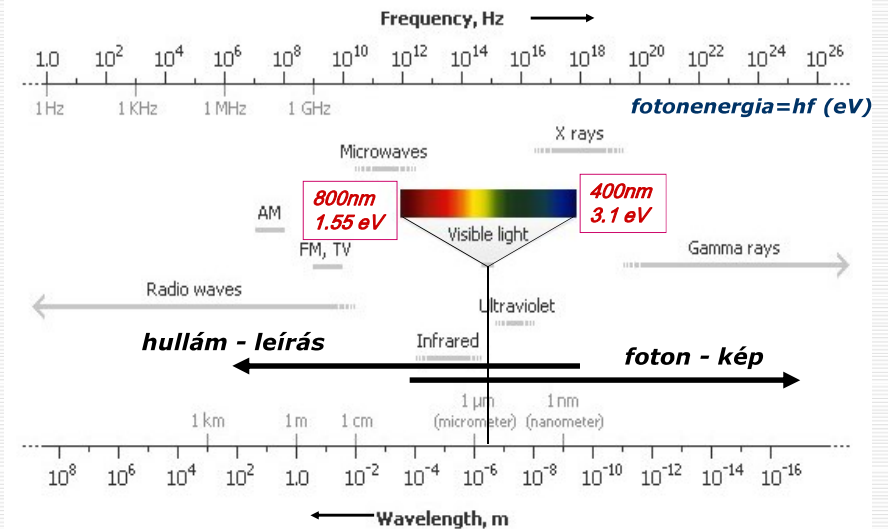
- **részecske: foton** (energia-kvantum)

**fotoelektromos hatás**

energiaátadás anyagoknak kvantált energiaadagokban  
kölcsönhatásokban partnere az elektron

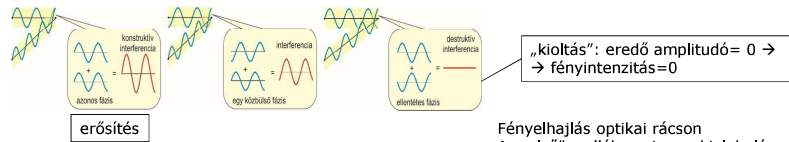
## A fény elektromágneses sugárzás

Logaritmikus skála



## Fényinterferencia – hullám leírás emlékeztető

Huygens elv – diffrakció – hullámok „szuperpozíciója”  
eredő = hullámfüggvények összege



Az erősítés feltétele „d” periodicitású optikai rácson való fényelhajlás esetén  $\alpha_k$  irányban

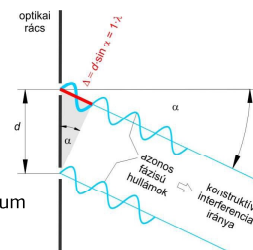
$$\Delta = d \sin \alpha_k = k\lambda$$

$k=0, 1, 2, 3, \dots$

A megvilágítás irányához képest  $\alpha_k$  irányokban erősítés  
 $\alpha_0=0$  (megvilágítás iránya,  $k=0$ ) → „nullad rendű” főmaximum

**Fényintenzitás**  $J \left[ \frac{\text{Joule}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] = J \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \approx (\text{Amplitúdó})^2$

Fényelhajlás optikai rácson  
Az „első” mellékmaximum kialakulása ( $k=1$ )

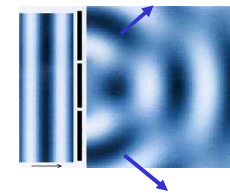


Az első interferencia-kísérlet: 1802,  
Young: diffrakció két résen → interferencia

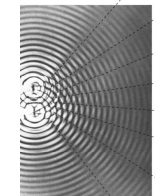


Thomas Young  
1773-1829

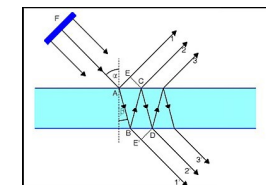
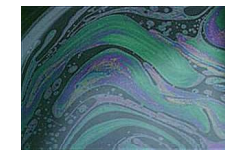
Hasonlóság: két pontforrás  
hullámainak interferenciája



Főmaximum=megvilágítási irány



Fényinterferencia olajfolton – egyenlő vastagság megjelenítése

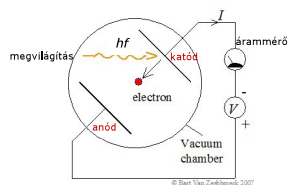


**Szemészeti diagnosztika:** Optikai Koherencia Tomográfia OCT

## A fotoelektrikus hatás - kísérlet

emlékeztető

### és Einstein magyarázata a foton-képpel



Kísérleti tapasztalatok:

Wilhelm Hallwachs (1859-1922): UV fény negatív töltéshordozókat váltott ki fémfelületről  
Philippe Lenard (1862-1947) : részletes vizsgálatok, tapasztalatok 1902-ben:

- A fény által kiváltott töltéshordozók elektronok, amelyek a megvilágítással egy időben lépnek ki az anód anyagából
- Csak elegendően nagy fény-frekvencia (kis hullámhossz) felett (alatt) van áram
- A fényintenzitás növelésével, azonos frekvenciát tartva, nő az áramerősség
- A kibocsátott elektronok száma/idő (áramerősség) nő a fény-frekvenciával

Magyarázat: Albert Einstein 1905:

A fény energiaátadása, ami elektronokat vált ki a katódból kvantumokban történik egy kvantum ↔ egy elektron  
**foton**

Tömege nincs  
Impulzusa ( $p$ ) van

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$$E_{\text{foton}} = hf$$

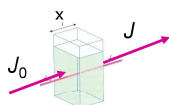
$$hf = W_{\text{el.ion.}} + \frac{1}{2} m_e v_e^2$$

## Fényelnyelődés-abszorpció

Fény energiaátadásának feltétele az anyagban való „elnyelődés”

Jelenség: mintán áthaladó fény intenzitása csökken

$$J \left[ \frac{\text{energia}}{\text{idő} \cdot \text{felület}} \right] = J \left[ \frac{N \cdot (hf)}{\text{idő} \cdot \text{felület}} \right] \quad \text{Fényintenzitás, } N = \text{fotonszám}$$



$$J = J_0 e^{-\mu x}$$

Abszorpció együttható

$J < J_0$ : Fotonok „elvesztek” a sugárzásból!

$$A = \lg \frac{J_0}{J} = \lg e \cdot \mu \cdot x = \varepsilon(\lambda) \cdot c \cdot x$$

Abszorbanca v. Optikai densitás (OD)

Moláris koncentráció

Küvetta vastagsága

Moláris extinkció – függ a -fotonenergiától -anyagi minőségtől

### Lambert-Beer törvény

híg oldatokban az abszorbanca arányos a koncentrációval → koncentráció-mérés

## Fény és anyag kölcsönhatása

Fényszórás  
Fényvisszaverődés  
Fénytörés

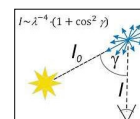
Hullám-kép  
Geometriai optika

## Fényelnyelődés – abszorpció

↔ Foton-kép

Fényszórás

Rayleigh szórás  $d < \lambda$



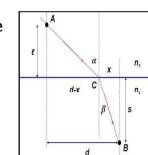
Fény által indukált rezgő dipólok sugárzása

Fényvisszaverődés-fénytörés

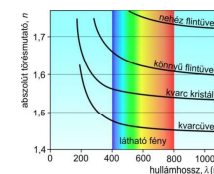
Fermat-elv: legkisebb idő elve

Snelius-Descartes törvény

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2}$$



→ Optikai eszközök



## Milyen hullámhosszú sugárzás esetén várható energia-átadás?

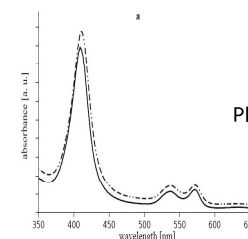
Milyen fény-fotonokat tud „elnyelni” az anyag?

## Mérés: optikai abszorpciós spektrum

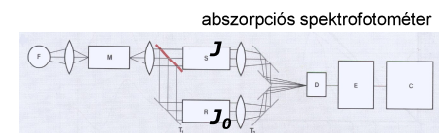
$$A = \lg \frac{J_0}{J}$$

$\lambda$

$$\lambda = \frac{c}{f} \rightarrow hf \text{ fotonenergia}$$



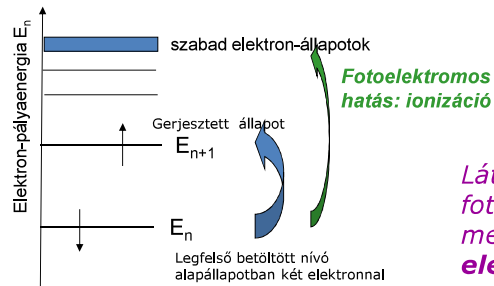
Pl. Hemoglobin oldat abszorpciós spektruma



$$A = \lg \frac{J_0}{J}$$

## A fényelnyelés modellje (izolált atomok, molekulák)

Mire használták el a fényfotonok az anyagban?



Látható tartományú fényfotonok elnyelésének vezető mechanizmusa: **elektron-gerjesztés**

**Gerjesztés:** fény-foton energiája felhasználódik arra, hogy magasabb energiájú kötött állapotba visz át egy alapállapotú elektront

$$E_{n+k} - E_n = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

A spektrumokban az abszorpciós átmenetek nem egyformán valószínűek. Miért?

Az elektron-átmenetekben a pályák között a kvantumszámok változását **kiválasztási szabályok** kötik meg:

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

$$\Delta s = 0$$

az elektron spinállapota nem változhat!

Elnevezések

„S” (szingulett) állapot

Az atom/molekula összes elektronja spinkvantumszámának összege

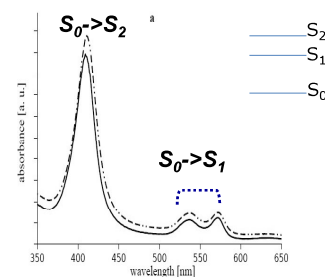
$$\sum_i s_i = 0$$

„T” (triplett) állapot

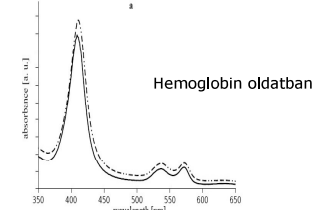
$$\sum_i s_i = 1$$

**S<sub>0</sub>: a legalacsonyabb energiájú szingulett állapot - alapállapot**

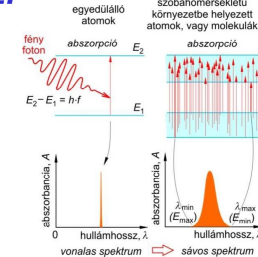
Hemoglobin abszorpciós spektruma



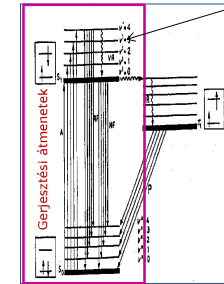
Molekulák oldatainak spektruma nem éles vonalakkól, hanem **széles sávokból** áll. Miért?



2.



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

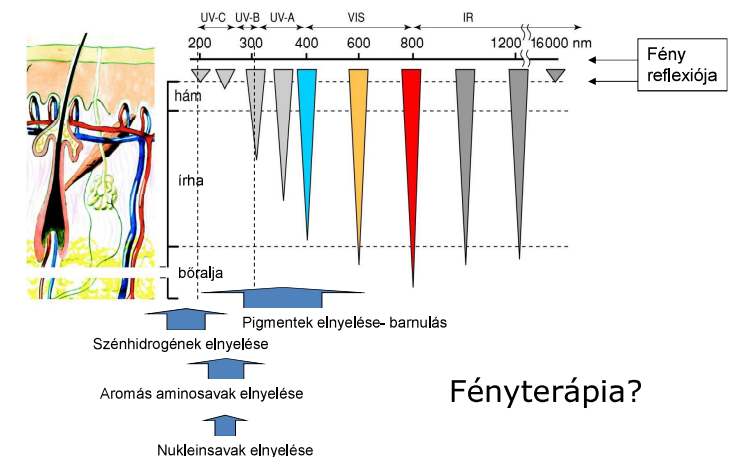


Magyarázat:

1. molekulák elektron-vibrációs átmenetei
2. a környezet sokfélesége -> energiaállapotok variációja
3. T > 0 K (Boltzmann eloszlás)

A fény biológiai hatásai – gyakorlati tapasztalat  
**Behatolási mélység?**

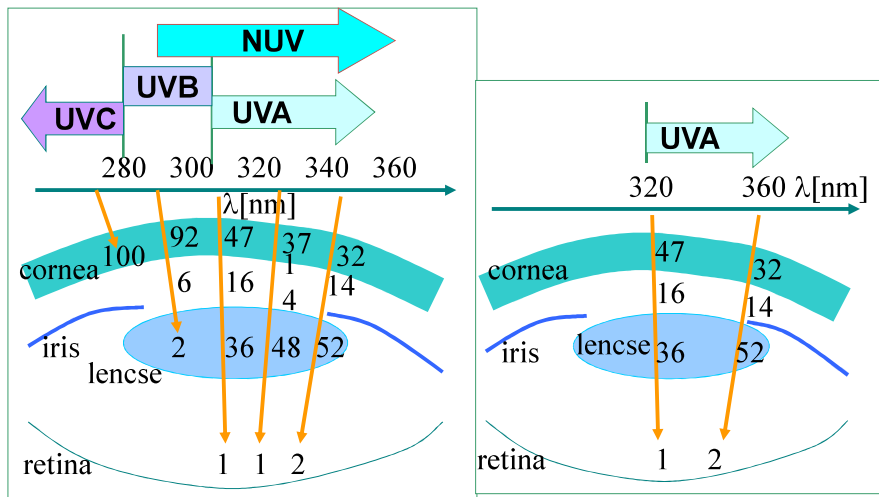
Bőr



Fényterápia?

## A fény biológiai hatásai Behatolási mélység?

## Szem



## Hőmérsékleti sugárzás

Minden test bocsát ki elektromágneses sugárzást mivel az alkotó részecskék vibrációs mozgásai során gyorsuló töltések és rezgő dipólusok keletkeznek, amely jelenségek elektromágneses sugárzás forrásai.

**Kirchhoff törvény:** a hőmérsékleti sugárzás emisszióképessége és abszorpcióképessége összefügg, hányadosuk minden testnél (i és j) minden  $\lambda$ -án állandó

$$\frac{M_{\lambda,i}}{\alpha_{\lambda,i}} = \frac{M_{\lambda,j}}{\alpha_{\lambda,j}} = \text{const.}$$

$$M_{\lambda} = \frac{\Delta P}{\Delta A} = (J_{\text{emitted}})$$

A teljes térszögben  $\lambda$  hullámhosszon emittált intenzitás

$$\alpha = \frac{E_{\text{abszorbeált}}}{E_{\text{teljesbeeső}}}$$

Abszorpcióképesség



## Fény-keltő mechanizmusok és fényforrások

### ➤ Hőmérsékleti sugárzás

➤ Spontán fotonemisszió gerjesztett elektronállapotból:

**Lumineszcencia**

➤ Fény-emisszió indukált emisszió révén: **LASER**

➤ (LED : elektronok és lyukak elektromos tér által indukált rekombinációja félvezető diódákban. )

## Orvosi alkalmazások

➔ **fény mint fizikai hatás : terápia eszköze**

➔ **fény mint diagnosztikai eszköz**

**Abszolút fekete test:** minden energiát elnyel

$\alpha = 1$  (maximum)  $\Rightarrow$  **M kibocsátott teljesítmény is maximális**

Az emberi test 95% fekete test

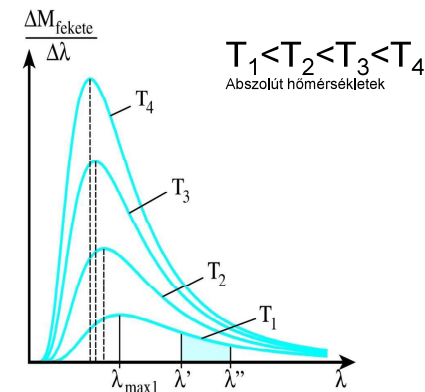
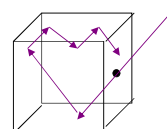
**Stefan-Boltzmann törvény:**

$$M_{\text{összes}} = \sigma \cdot T^4$$

$$\sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

**Wien-féle eltolódási törvény:**

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



**Fekete test:** fémdoboz egy kis nyílással.

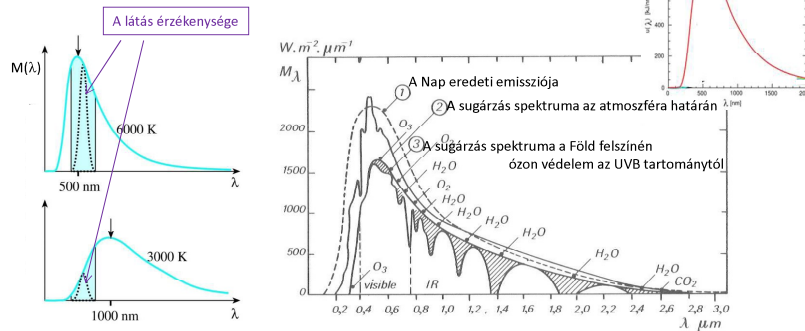
A belépő fénysugár reflexió útján soha nem tud kilépni: „teljesen elnyelődik”



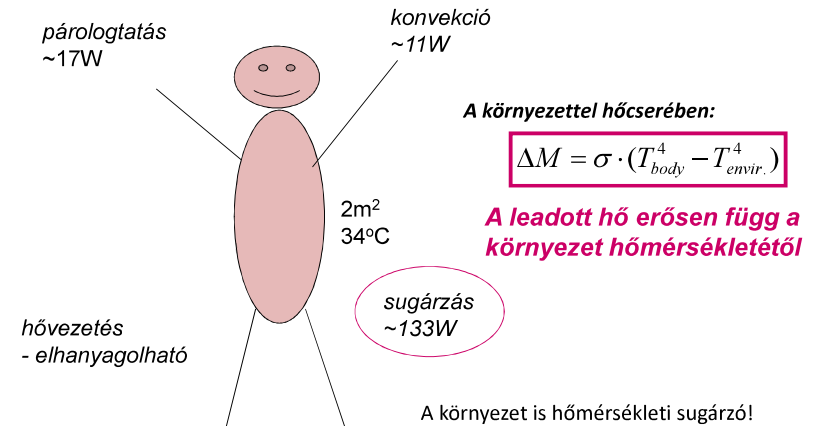
## Hőmérsékleti sugárzás a gyakorlatban

### 1. Fényforrások

- Nap 5500-6000 K es fekete test + ózon védelem (UVB -!)
- izzószálas égők (~3000 K): energia nagy része nem a VIS tartományban halogén gáz-védelem → magasabb hőmérséklet →  
→ fényhozam nő

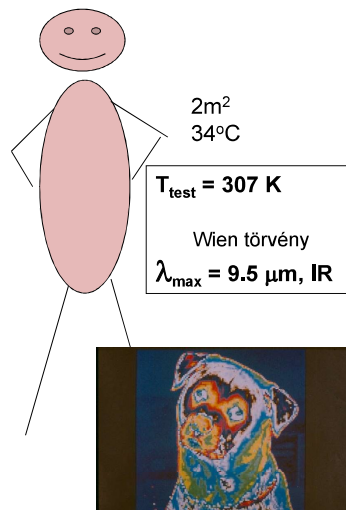


### 2. Az emberi szervezet hőegyensúlya



### 3. Diagnosztikai alkalmazások

700 K (430 C) alatt a sugárzás az IR tartományba esik



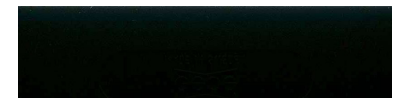
#### Teletermográfia

Adott felület felett IR kamerával 2D intenzitástérkép felvétele → hőmérsékleti eloszlás → szinkódolt hőmérséklet térkép az adott felületről

Gyulladásos góccok, vérellátási változások, anyagcserezavarok tumoros szövetekben ....  
→ hőmérsékletváltozások → diagnosztika

Szín-kódolt hőmérsékleti térképek

#### Példák

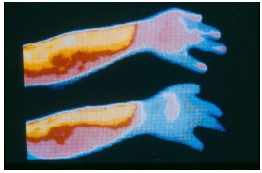


Kamionsofőr fáradása a vezetésben reggel délben este

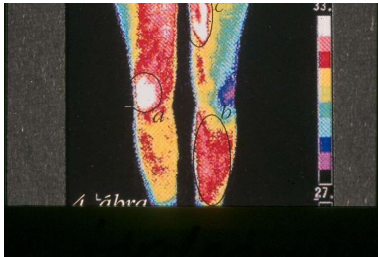




## Diagnosztika teletermográfia alapján



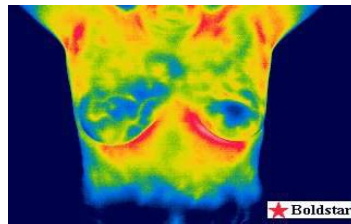
Cigarettázás: beszűkült véresek



Gyulladások és  
trombózis



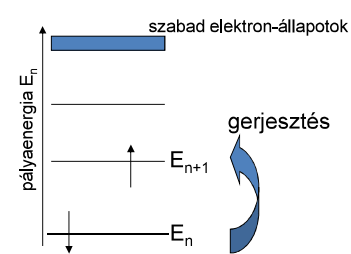
mellrák



## Spontán fényemisszió „gerjesztett” elektronállapotból: Lumineszcencia

A lumineszcenciát **elektron-gerjesztésnek** kell megelőznie

Sokféle módon lehetséges



Alapállapot: legmagasabb energiájú  
nívón ( $n$ ) két ellentétes spinű elektron  
(pl. aromás szénhidrogének)

-(fény) foton elnyelése: **fotolumineszcencia**

-kémiai reakció energiája: **kemo/bio-lumineszcencia**

-ütközés elektromos térrel gyorsított töltésekkel:  
**elektrolumineszcencia**

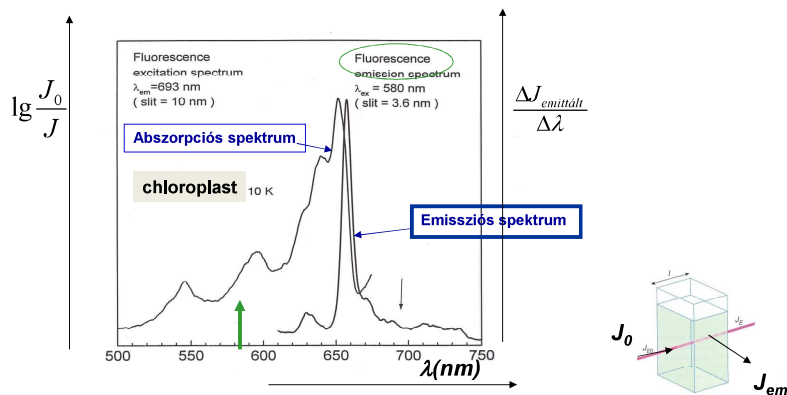
-mechanikai deformáció: **tribolumineszcencia**

-hőközlés: **termolumineszcencia**

## Fotolumineszcencia

Emissziós és abszorpciós spektrum: ugyanazon mintán

Maximumok normálva

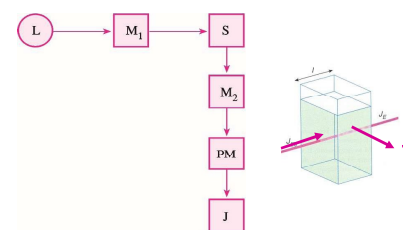


**Molekula – kölcsönhatásban a környezettel**  
**„sávós” spektrumok, emisszió hosszabb  $\lambda$ -nál**

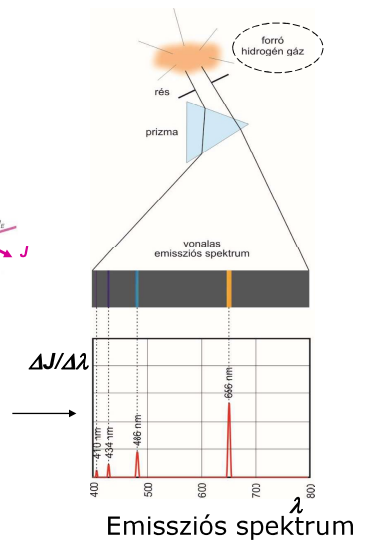
## Fotolumineszcencia

Emissziós és abszorpciós spektrum kapcsolata **gázokban**

Lumineszcencia spektrofotométer  
Spektrofluoriméter



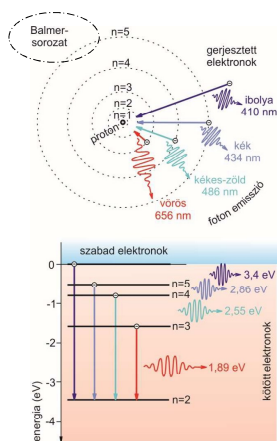
**Izolált** atomok, molekulák  
Diszkrét emissziós fotonenergiák  
**Vonalas** spektrum  
Emisszióban és abszorpcióban is



## Fotolumineszcencia

### Emissziós és abszorpciós spektrumok gázokban

H-atom egy lehetséges emissziós átmenet-sorozata  
alapállapot:  $n=1$  pálya egy elektronnal



Határozott (diszkrét) energiájú állapotok

Energia leadás diszkrét lépésekben

Diszkrét energiájú fotonok emittálódnak

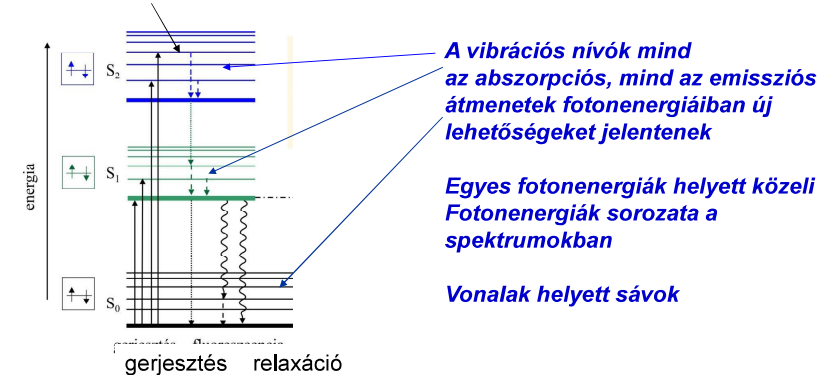
$$\Delta E_i = h \cdot f_i$$

## Fotolumineszcencia

### Molekula – kölcsönhatásban a környezettel

„sávos” spektrumok, emisszió hosszabb  $\lambda$ -nál - okok?

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

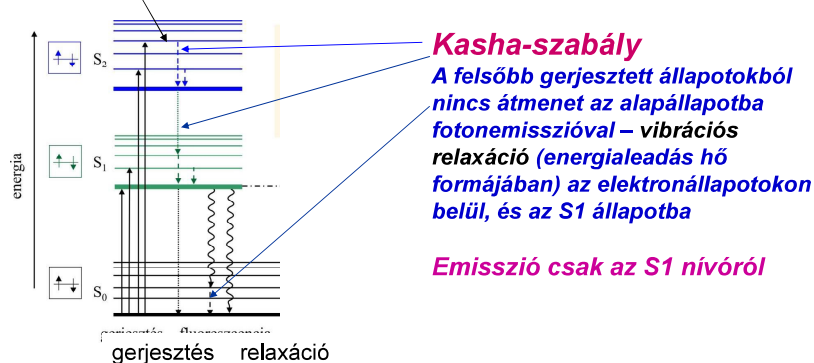


Aromás szénhidrogének

## Fotolumineszcencia

### Molekula – kölcsönhatásban a környezettel emisszió csak a legalsó gerjesztett állapotból - okok?

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

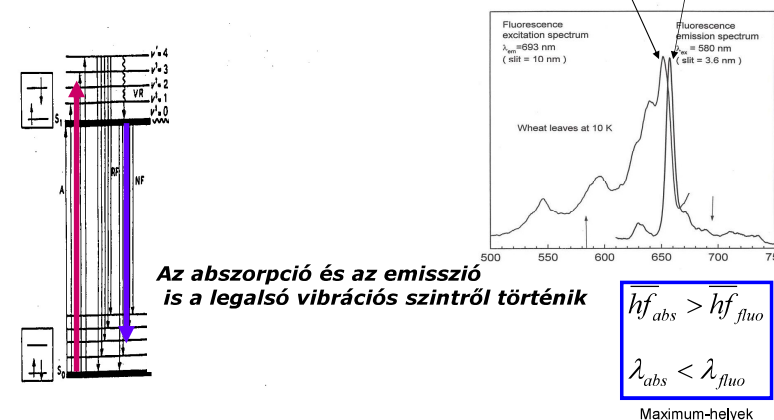


Aromás szénhidrogének

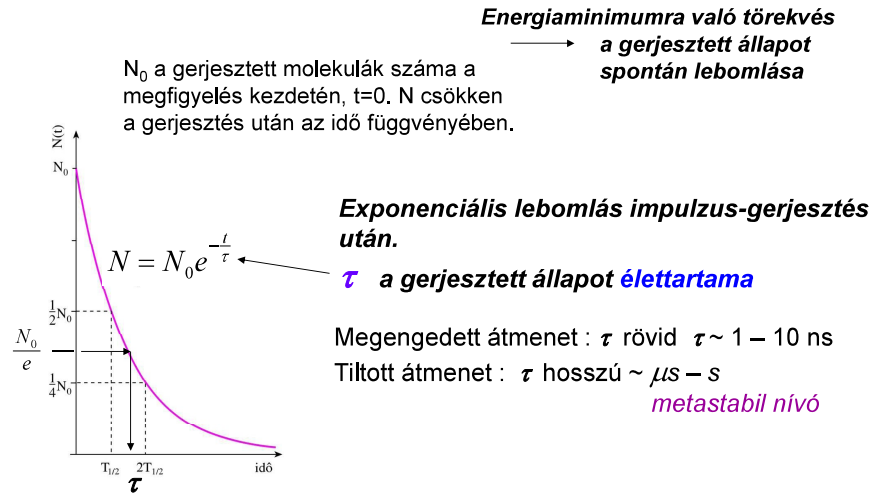
## Fotolumineszcencia

A mért abszorpciós és emissziós sávok energiája eltér egymástól

### Stokes-féle eltolódás



## Lumineszcencia- a gerjesztett állapot élettartama



## Spontán fényemisszió: Lumineszcencia Fluoreszcencia és Foszforeszcencia

### Foszforeszcencia:

- Spontán fényemisszió metastabil állapotból
- Az emittáló nivå élettartama hosszú  $\tau \sim \mu s, ms, sec...$   
metastabil állapot
- Az emittált fény fotonenergiája kisebb mint a fluoreszcenciáé
- Hosszú élettartam -> lehetőség a környezeti energialeadásra  
emissziós intenzitás igen kicsi -> orvosi alkalmazása csekély

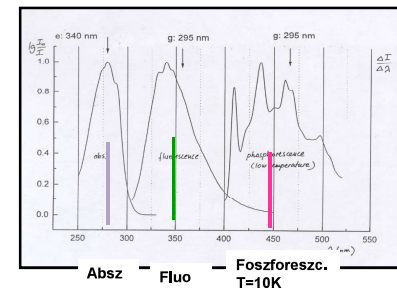
## Spontán fényemisszió: Lumineszcencia Fluoreszcencia és Foszforeszcencia

### 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

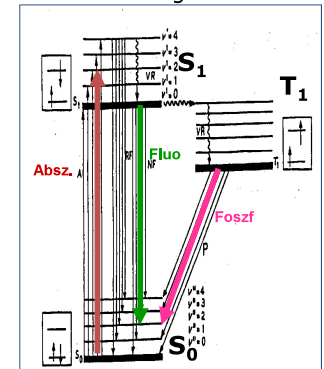
## Fluoreszcencia és Foszforeszcencia spektrumok összehasonlítása

### természetesen lumineszkáló aminosav Tryptofán - egy fehérjében



Stokes-féle eltolódás

### Jablonszki diagram



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

### Foszforeszcencia tiltott átmenetből: $T_1 \rightarrow S_0$

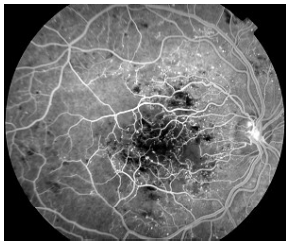
Gerjesztés:  $S_0 \rightarrow S_1$ , majd  $S_1 \rightarrow T_1$  spinátfordulás, energiavesztés (belső konverzió)

Kis intenzitás, gyakorlati jelentősége kicsi

## Fluoreszcencia orvosi gyakorlati alkalmazásai

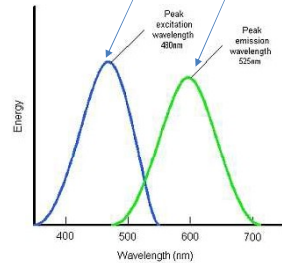
1. Fluoreszcencián alapuló fényforrások  
vonalas spektrum  $\rightarrow$  meghatározott hullámhossz  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  speciális gerjesztés *in vivo* kromofórokban (köv. dia)
2. Fluoreszcencia-fény mint *in vivo* diagnosztikai eszköz

### Angiográfia fluoreszcens festéssel



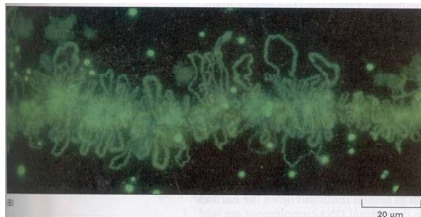
Vérerek jelölése a retinán fluoreszcein-festékkel, vizsgálat reflexióban.  
A megvilágító fény filterrel kiszűrhető a Stokes shift alapján

Fluoreszcein abszorpciós és emissziós spektruma



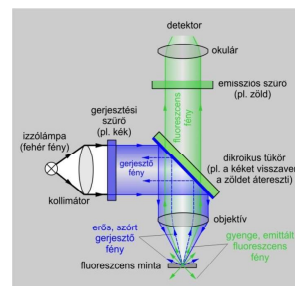
### 3. Fluoreszcencia-mikroszkópia $\rightarrow$ élettudományi kutatások $\rightarrow$ szemészeti diagnosztika

Alapja: a szövetekben igen kevés fluoreszkáló molekula van  $\rightarrow$  szelektív fluoreszcens festés után a kötődés helyét fluoreszcencia alapján leképezhetjük



A gén-expresszió egy állapota: az RNS-re kötődő fehérjék zöld fluoreszcenciája alapján az RNS kirajzolódik.

Konfokális Mikroszkóp: mélységbeli felbontás

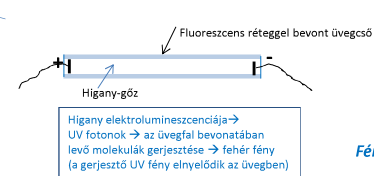


### ad 1. Fényforrások a mindennapokban



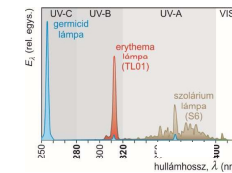
Fénycsövek: elektrolumineszcencia és fotolumineszcencia kombinációja

„F-tubes” –fénycső a Nap spektrumát célozza meg



Fénycső kompakt formája

### Speciális lámpák/fényforrások – az emisszió hullámhossztartománya alapján



Különböző nyomású Hg-gőz lámpák elektrolumineszcenciája

- alacsony nyomás: Germicid lámpa –  $\lambda = 254$  nm  $\rightarrow$  DNS-mutációk, törések bacteria  $\rightarrow$  baktérium-ölő hatás: mikrobiológiai laboratóriumok sterilizálása
- közepes nyomás: Erythema lámpa –  $\lambda = 280 - 320$  nm  $\rightarrow$  psoriasis, vitiligo kezelése
- nagy nyomás: Solarium lámpák, fényforrások fotoszenzibilizátorok gerjesztéséhez  $\rightarrow$  dermatológia

Na-gőz sárga fénye

### 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:

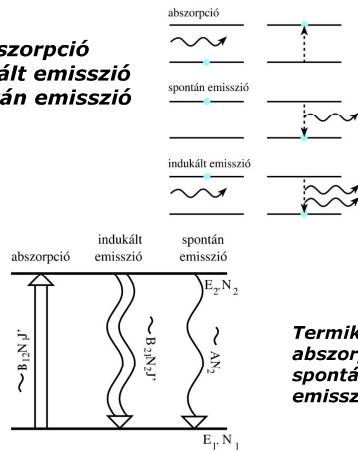
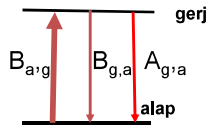
A fényfotonok emisszióját az emittálandó fotonenergiával azonos energiájú foton jelenléte indukálja.

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

## A lézerek működési elve – indukált fénymisszió *olvasmány*

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

*olvasmány*

Fényerősítés indukált emisszióban  
 --- populáció inverzió

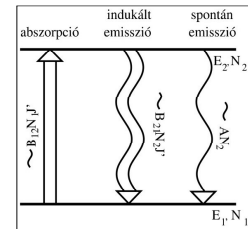
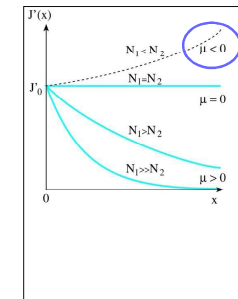
$$\Delta J' = K_1 (hf) [B_{21} N_2 - B_{12} N_1] J' \Delta t$$

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

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

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

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



Populáció-inverzió →  
 fényerősítés

2 állapotú rendszerben  
 nem alakul ki

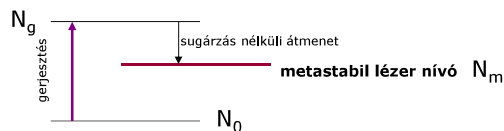
## LASER: Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation 1961, Rubin-lézer

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

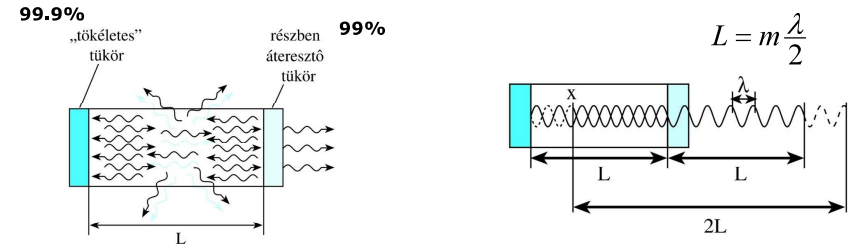
$N_m$  nagy  $\longrightarrow$  néhány spontán emisszió  $E_0$ -ra

$\longrightarrow$  fényerősítés

## A lézerek működési feltételei

### Az optikai rezonátor

Erősíti a lézer tengelyével egyirányú sugárzást  
Leszűkíti az emisszió hullámhossztartományát



állóhullámok kialakulása

### A lézer-fény speciális tulajdonságai

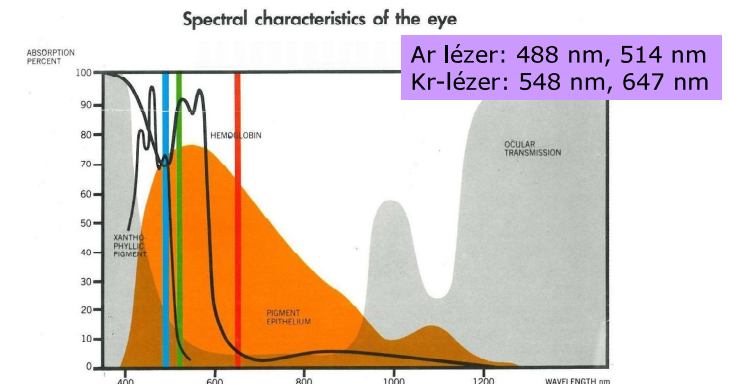
- monokromatikus  $\Delta f/f \sim 10^{-10}$  ( $\longleftrightarrow 10^{-6}$ )
- koherens : nagy a koherencia-hossz ( $10^3$  m  $\longleftrightarrow 10^{-3}$  m)
- kis divergencia (néhány szögperc)  $\longrightarrow$  jól fókuszálható
- nagy intenzitás  
átlagos intenzitás  $\longleftrightarrow$  impulzus-intenzitás

### Orvosi alkalmazások

- $\longrightarrow$  mikrosebészet
- $\longrightarrow$  fény-kés
- $\longrightarrow$  megvilágítás, fluoreszcencia gerjesztés száloptikán keresztül

### Lézerek sebészeti alkalmazása

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



**Vérerek elzárása a szemfenéken fotokoagulációval**  
(alacsonyabb T  $\rightarrow$  fehérjék denaturációja  $\rightarrow$  asszociátumok)



## Lézerek sebészeti alkalmazása: „fénykés”

elnyelés → energia → felmelegedés →  
karbonizáció → vágás



Köszönöm a figyelmet!

