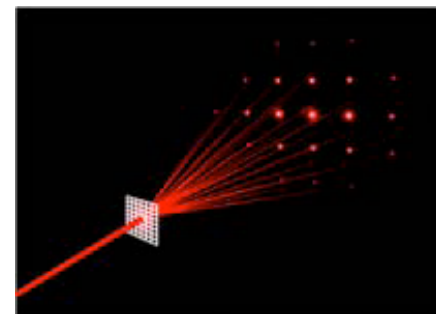


Elektromágneses sugárzások kölsönhatása szövetekkel és szöveti komponensekkel I. Lumineszcencia, lézerek és orvosi alkalmazások

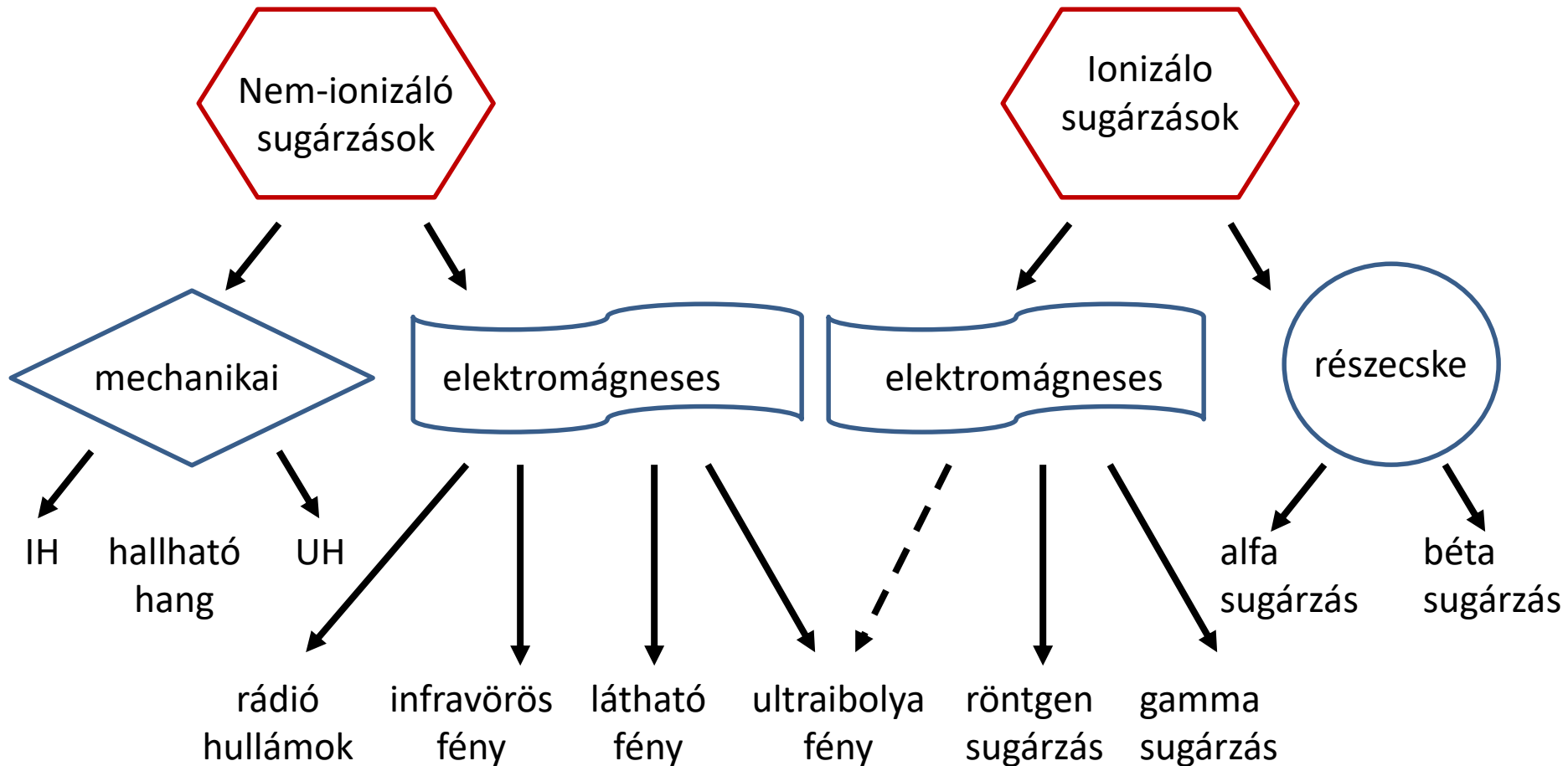


Jedlovsky-Hajdú Angéla
2020.04.08.



Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet,
Nanokémiai Kutatócsoport

Sugárzások



A fény természete

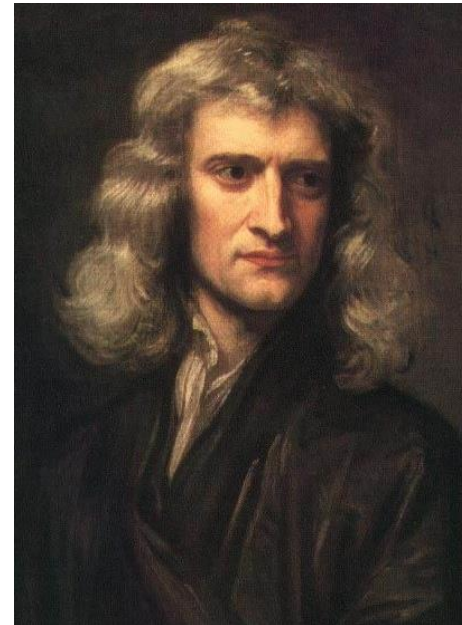
Hullám?



Christiaan Huygens
(1629 - 1695)

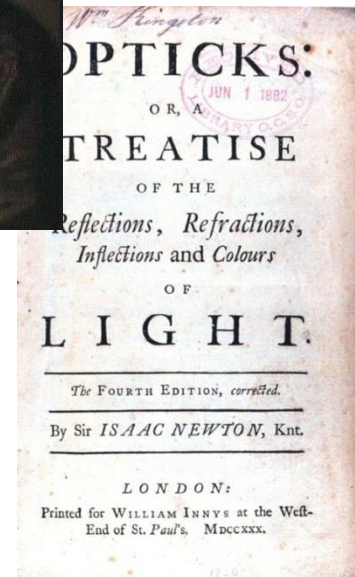
Traité de la lumière
1690

Részecske?



Isaac Newton
(1642 - 1727)

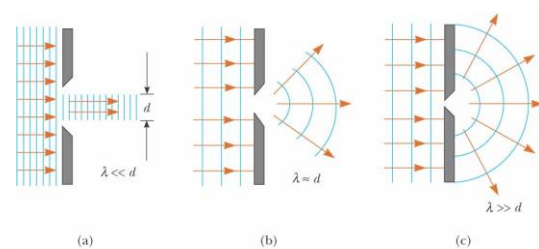
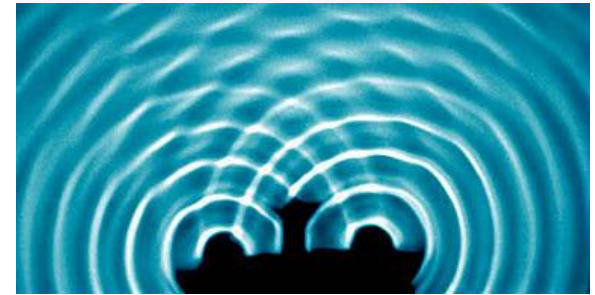
Opticks
1704



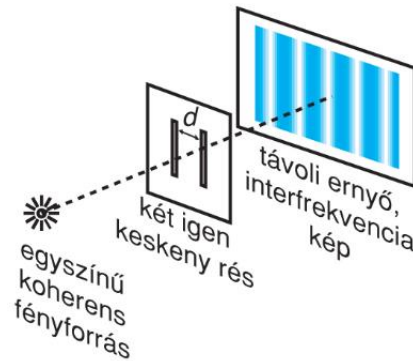
Rezgés v. oszcilláció következtében kialakuló, térben és időben periódikus jelenség, amelyben energia terjed

Hullámtermészetet bizonyító jelenségek:

- elhajlás
- szuperpozíció/interferencia
- polarizáció



©2004 Thomson - Brooks/Cole



Young kísérlet

Szuperpozíció: az eredő kitérés a találkozó hullámok kitéréseinek összege, azaz a tér egyes pontjaiban a jelenlevő rezgések összeadódnak

Elhajlás:

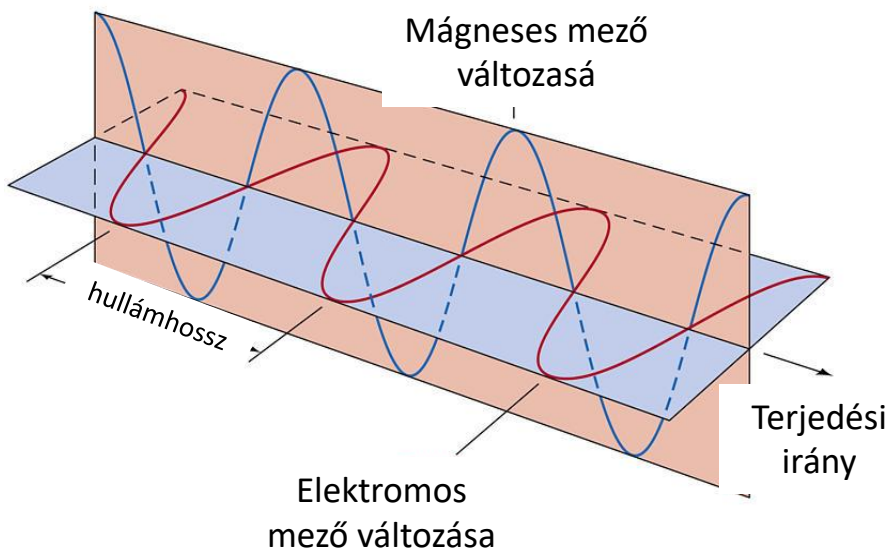
Huygens-elv: egy hullámfelület minden pontjából elemi hullámok indulnak ki. Az új hullámfelület ezen hullámok burkolófelülete.

Interferencia - koherens hullámok szuperpozíciója

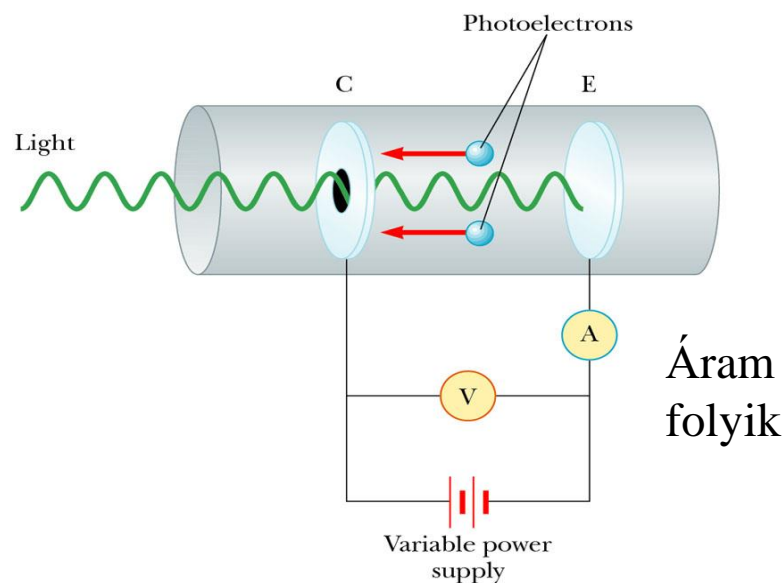
A fény kettős természetű

Hullám – transzverzálisan,
szinuszosan változó elektromos
és mágneses tér

Elektromágneses sugárzás



Hertz - kísérlete a
fotoelektromos hatásról



Fotoelektromos effektus

Nincs elektronkilépés, amíg a
frekvencia nem halad meg egy
kritikus értéket!

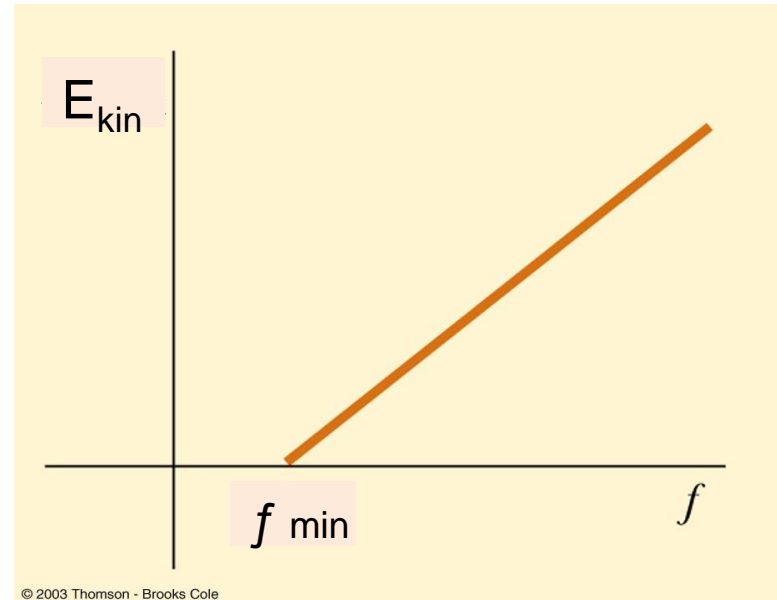
-A jelenség értelmezése a hullámtermészettel nem lehetséges

-Plank – a kvantumfizika kezdetei - hullámoknak az energiája csak diszkrét értékeket vehet fel

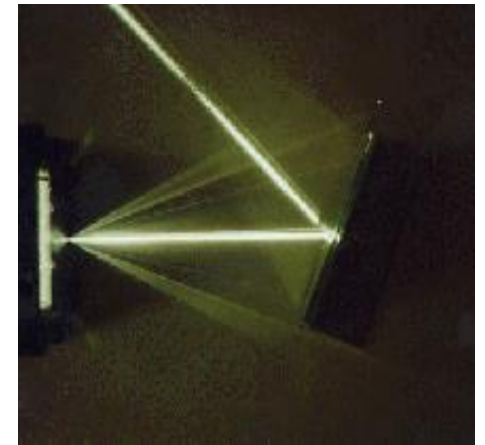
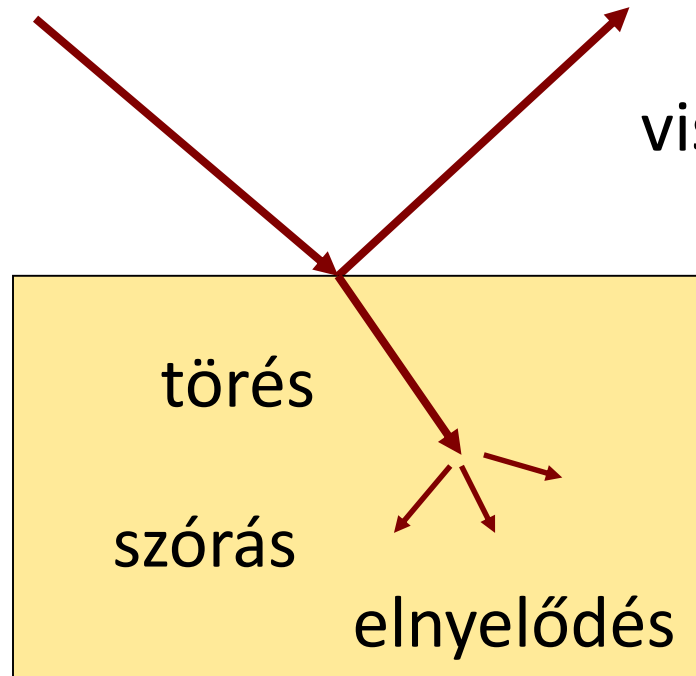
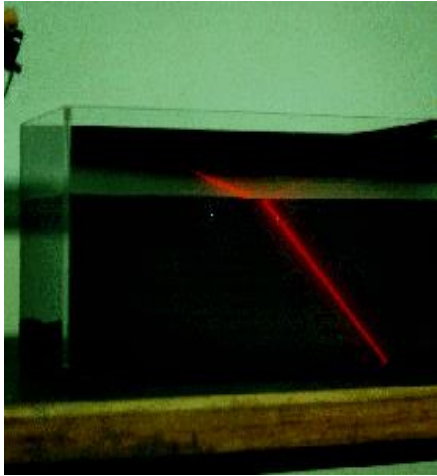
- Einstein – magyarázata a kvantumelmélet alapján:

- A fény kvantált természetű, energia csomagokban terjed
- A foton energiája: $E = hf$
- A foton az elektronnal való ütközéskor annak átadja teljes energiáját, ha ez az energia *legalább akkora*, mint az elektron kilépési munkája (A).
- Ha az energia kisebb, mint a kilépési munka (v. ionizációs energia), nincs kölcsönhatás
- 1 foton – 1 elektron kölcsönhatás
- A kilepő elektron mozgási energiája:

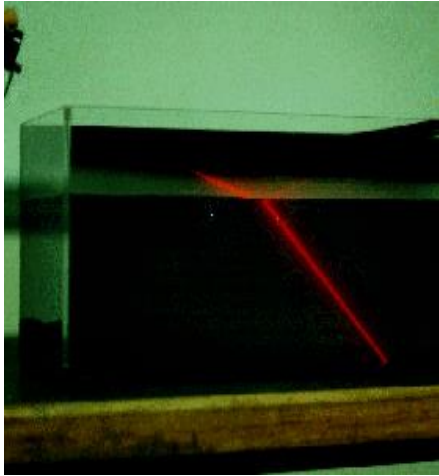
$$E_{kin} = hf - A$$



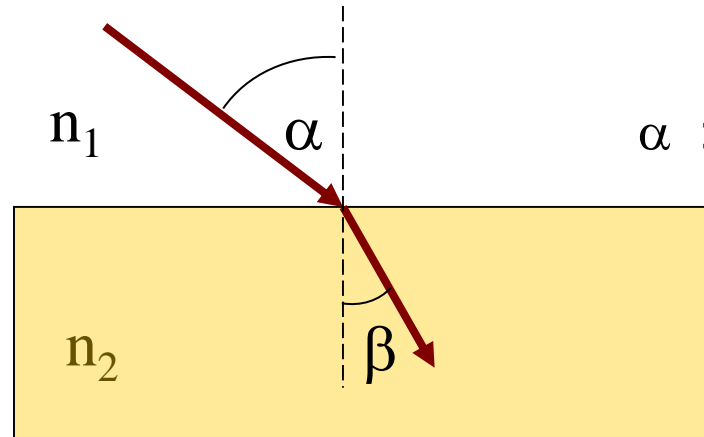
A fény kölcsönhatása az anyaggal



Fénytörés



Fermat-elv a legrövidebb időről



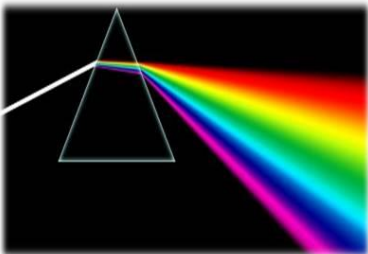
$$n_1 < n_2$$

$$\alpha > \beta$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

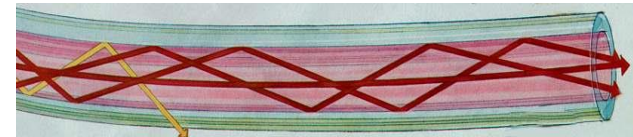
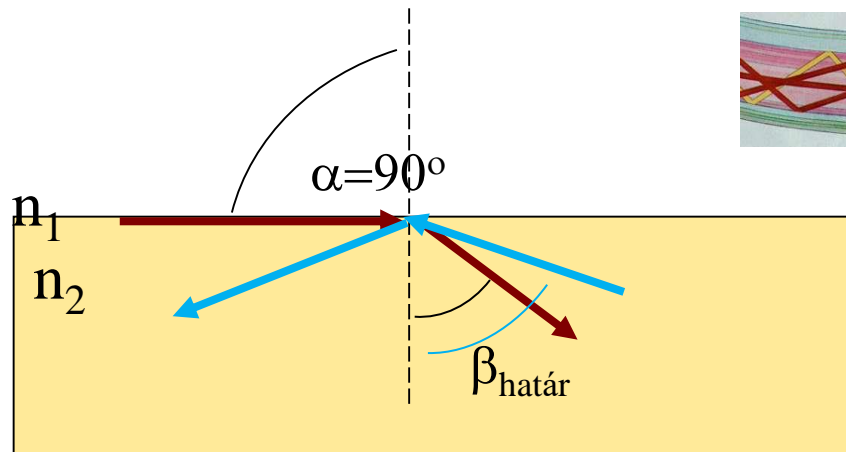
Snellius –Descartes törvény

Fehér fény felbontása



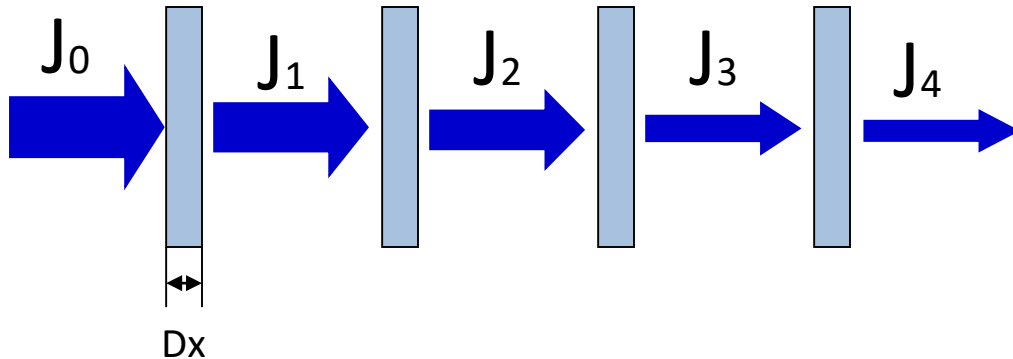
Határszög – **teljes visszaverődés**

$$\beta > \beta_{\text{határ}}$$



Optikai szál

Az intezitás gyengülésének törvénye



A közegen áthaladó sugárzás intenzitása a rétegvastagság exponenciális függvénye

J_0 : a rétegbe belépő intenzitás [W/m^2]

J : intenzitás x [m] rétegvastagság után

μ : gyengítési állandó [$1/\text{m}$]

A gyengítési állandó függ:

- a foton energiájától
- az abszorbens anyagi minőségétől
- az abszorbens sűrűségétől

$$\frac{\Delta J}{\Delta x} = -\mu \times J$$

megoldása

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

Integrált alak

A fényabszorpció gyakorlati alkalmazása

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

$$\lg \frac{J_0}{J} = \mu \cdot x \cdot \lg e$$

Híg oldatok esetén:
 $\mu \sim$ koncentráció

$$\mu \lg e = \varepsilon_{(\lambda)} c$$

$$\lg \frac{J_0}{J} = \varepsilon_{(\lambda)} \cdot c \cdot x$$

Lambert – Beer törvény

Abszorbancia

v.

dekadikus
molaris extinkciós állandó

moláris koncentráció

[l mol⁻¹cm⁻¹]

Optikai denzitás

Szóródás



Spektrális szóródási tényező

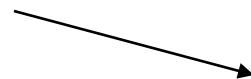
$$\sigma(\lambda) = \frac{J_{szórt}}{J_{beeső}}$$

Rugalmas szóródás: λ , f , ε változatlan

$$d \ll \lambda$$

Rayleigh-szóródás

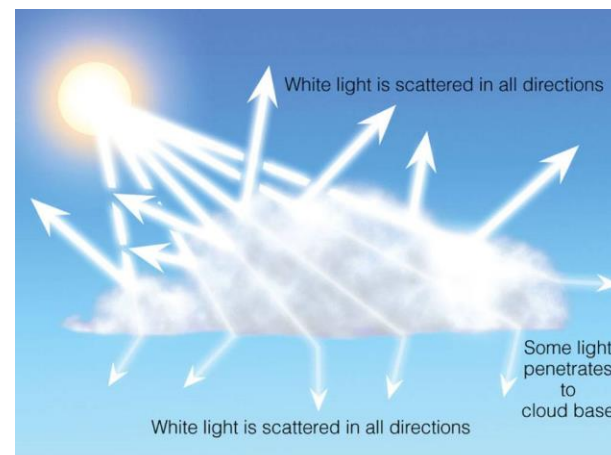
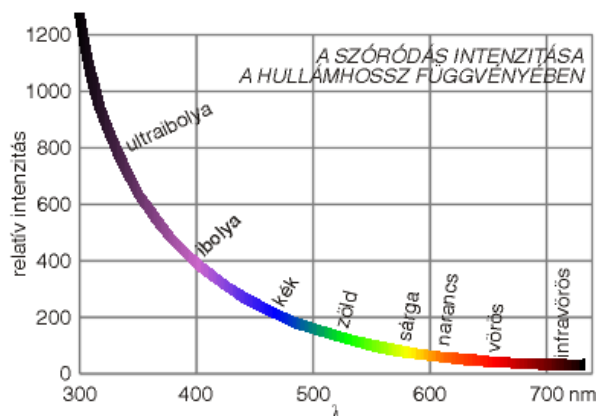
$$\sigma(\lambda) \sim \frac{d^6}{\lambda^4}$$



$$d \geq \lambda$$

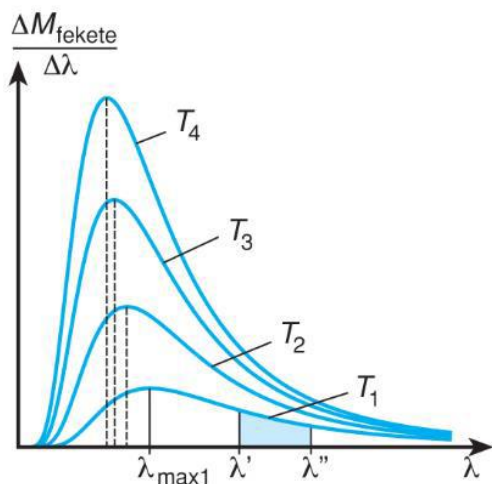
Mie-szóródás

σ független λ



Fényemisszió formái

- Hőmérsékleti (feketetest) sugárzás
- Lumineszcencia
- Lézer



Hőmérsékleti feketetest sugárzás

Környezetének hőfokától függetlenül **minden test** az abszolút nulla foktól különböző **hőmérsékleten** elektromágneses sugárzást bocsát ki.

Abszolút fekete test: minden rá eső energiát elnyel $\alpha = 1$ $\alpha = \frac{J_{\text{absz}}}{J_{\text{össz}}}$



Kirchhoff megfigyelése: ha egy test „erősebben” sugároz, akkor jobban el is nyel

Az emberi test kb. 95%-os fekete testnek tekinthető

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

M : kisugárzott felületi teljesítmény [W/m^2]

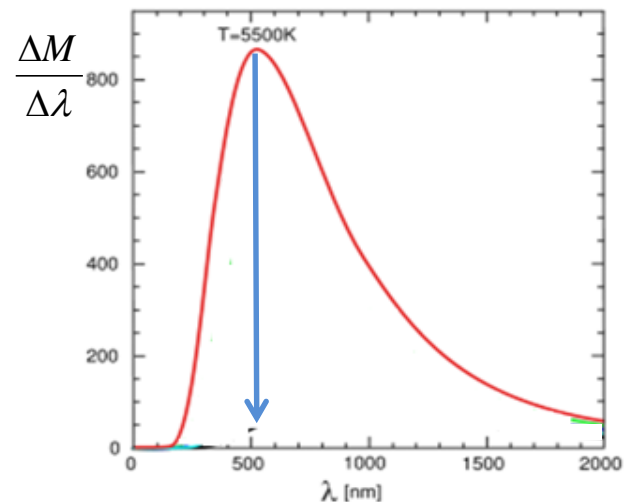
$$M_i < M_{\lambda(\text{fekete})}$$

A hőmérsékleti sugárzás emissziós spektruma

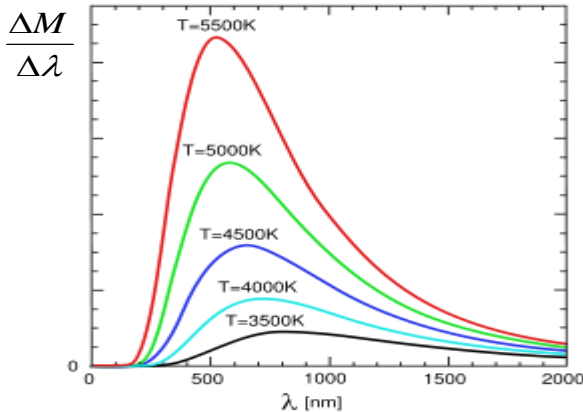
- a spektrum folytonos
- egy maximuma van : λ_{max}
- a görbe alatti terület: $M = \sigma T^4$

Stefan – Boltzmann törvény

$$\Delta M = \sigma(T_{\text{test}}^4 - T_{\text{környezet}}^4)$$



Hőmérsékleti feketetest sugárzás



$$T \times \lambda_{\max} = \text{állandó}$$

$$T \times \lambda_{\max} = k$$

Wien-féle eltolódási törvény

Alkalmazások:

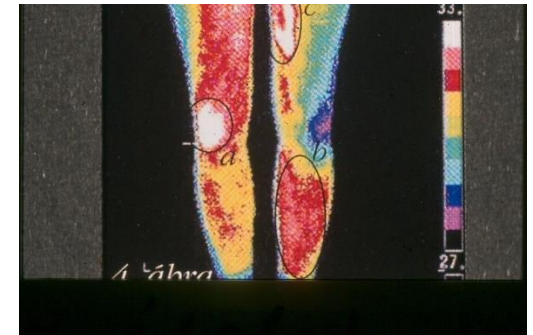
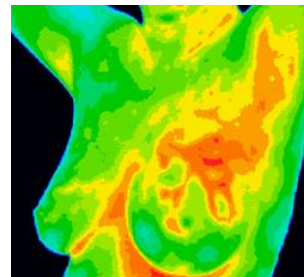
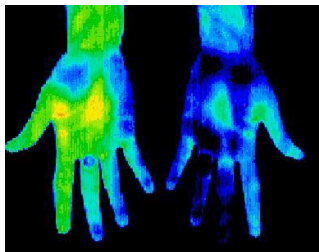
Hőmérsékleti sugárzás detektálása teletermográfia - infradiagnosztika

A köpeny hőtérképe – daganatok, gyulladások, érszűkületek diagnosztikája

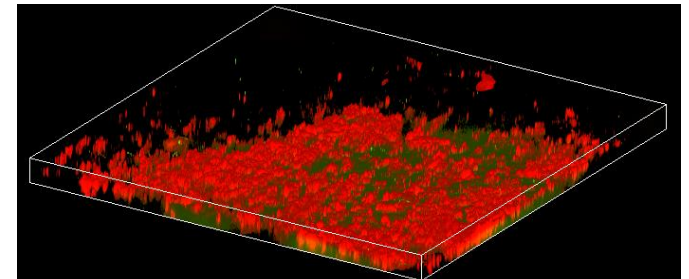
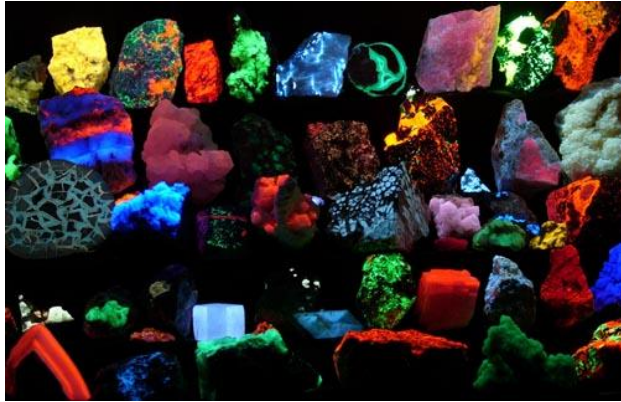
Wien-féle eltolódás alapján az emberi test spektrumának maximuma

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{2.898 \times 10^6 \text{ K} \cdot \text{nm}}{305 \text{ K}} = 9500 \text{ nm}$$

Emberi hőtérképek készítésében alkalmazott készülékek érzékenységi maximuma: **7-14 microméter**



Lumineszcencia

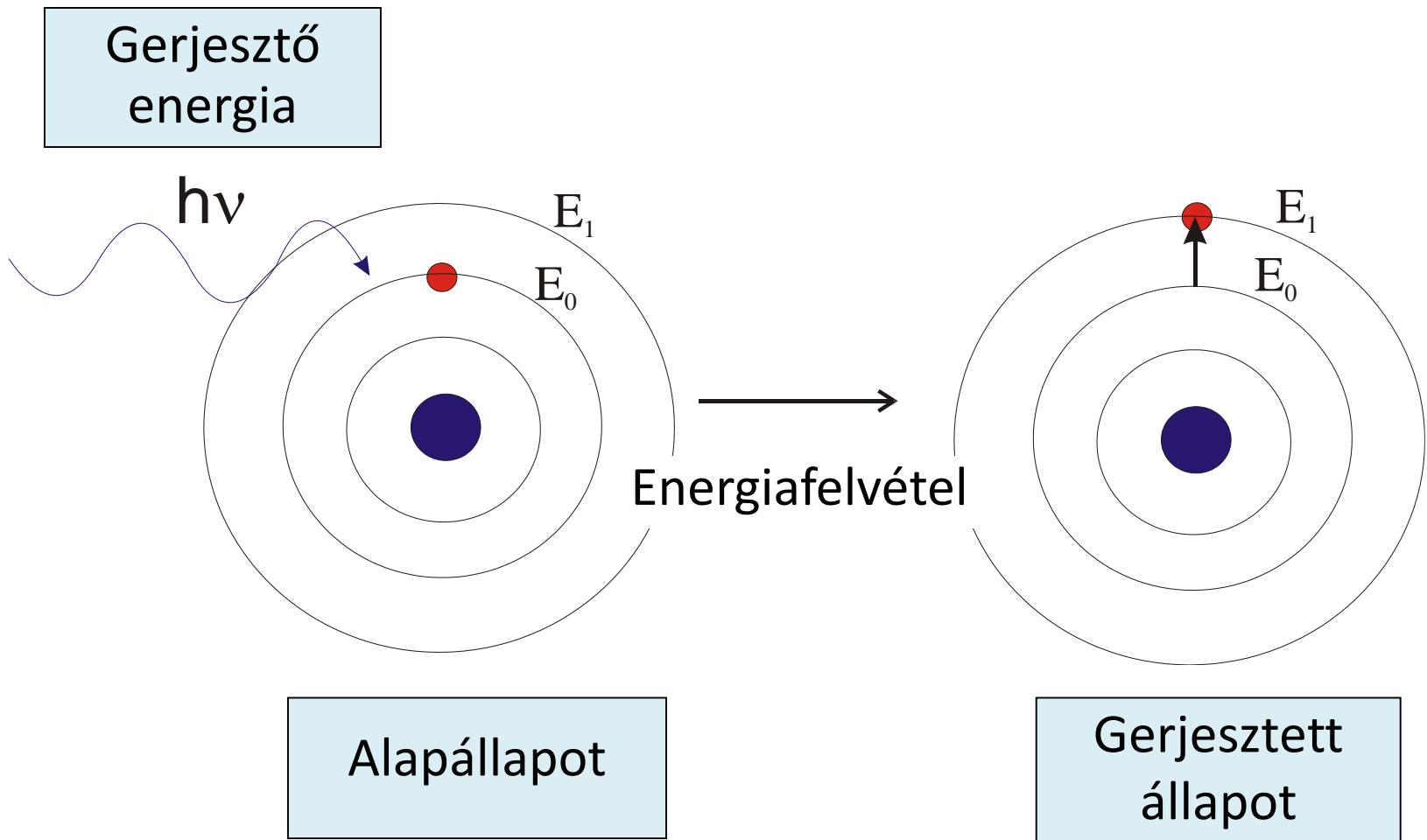


Ismétlés

- Az atomban az elektronok energiaállapotai kvantáltak
- A lehetséges legalacsonyabb energiájú állapotot töltik be
- Pauli-féle tilalmi elv

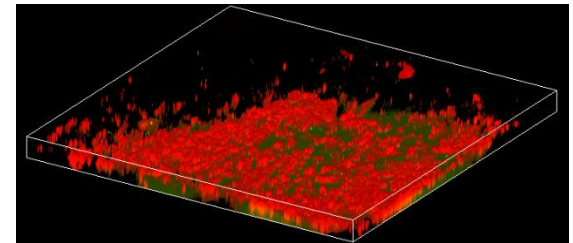
Egy atomon belül nem létezhet két olyan kötött elektron, amelynek mind a négy kvantumszáma megegyezik.

Tekintsünk egy atomot



Gerjesztés sokféleképpen lehetséges

-(fény) foton elnyelése: *fotolumineszcencia*



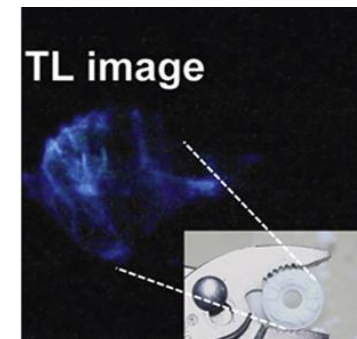
-kémiai reakció energiája: *kemo/bio-lumineszcencia*



-ütközés elektromos térrel gyorsított töltésekkel: *elektrolumineszcencia*



-mechanikai deformáció: *tribolumineszcencia*



-hőközlés: *termolumineszcencia*



Lumineszcencia:

spontán fényemisszió gerjesztett elektron energiájának a rovására

E_1



E_0

külső héjon lévő elektron gerjesztése

E_1



E_0

elektron visszatérése alapállapotba

Spontán, külső hatás nélkül!!!!

E_1



E_0



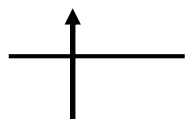
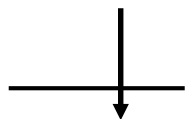
fényemisszió

$$hf = E_1 - E_0$$

Lépései:

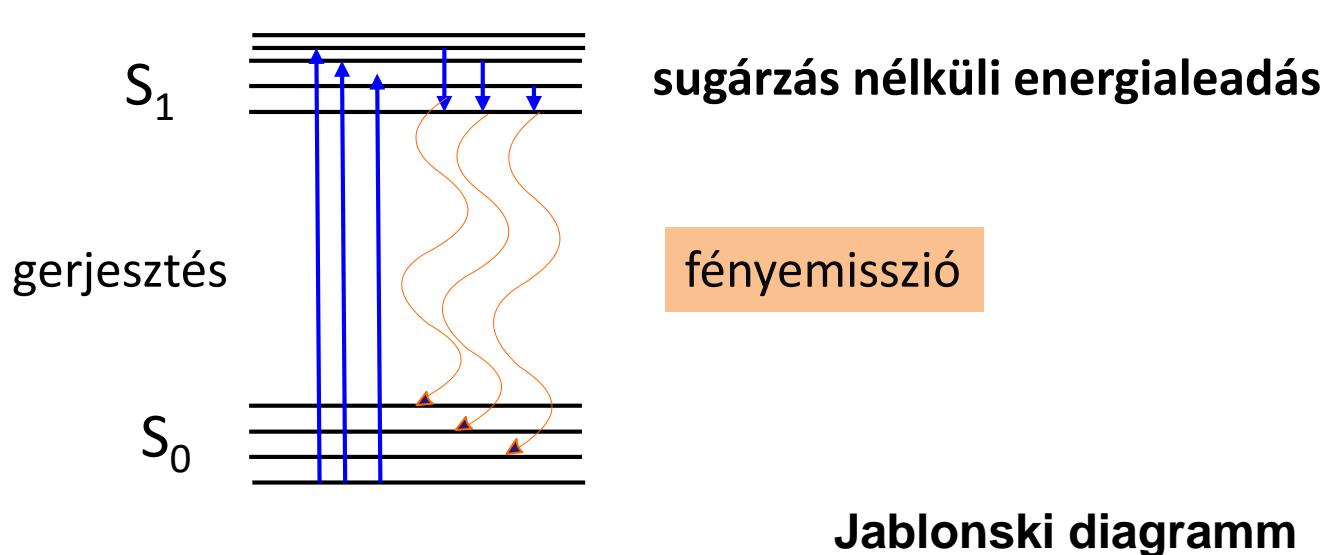
- külső héjon lévő elektron gerjesztése
- elektron spontán visszatérése alapállapotba

Tekintsük az atomok sokaságát kölcsönhatásban egymással és a környezetükkel



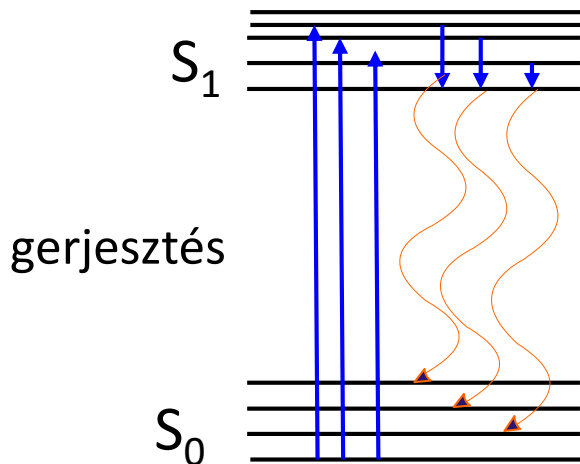
Szingulett állapot

Párosított spinű
elektronok



Fluoreszcencia

Fényemisszió spinváltozás
nélkül!



Fluoreszcencia

Fényemisszió spinváltás
nélkül

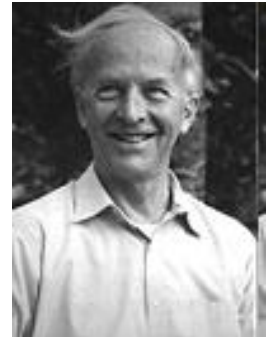
Kasha-szabály:

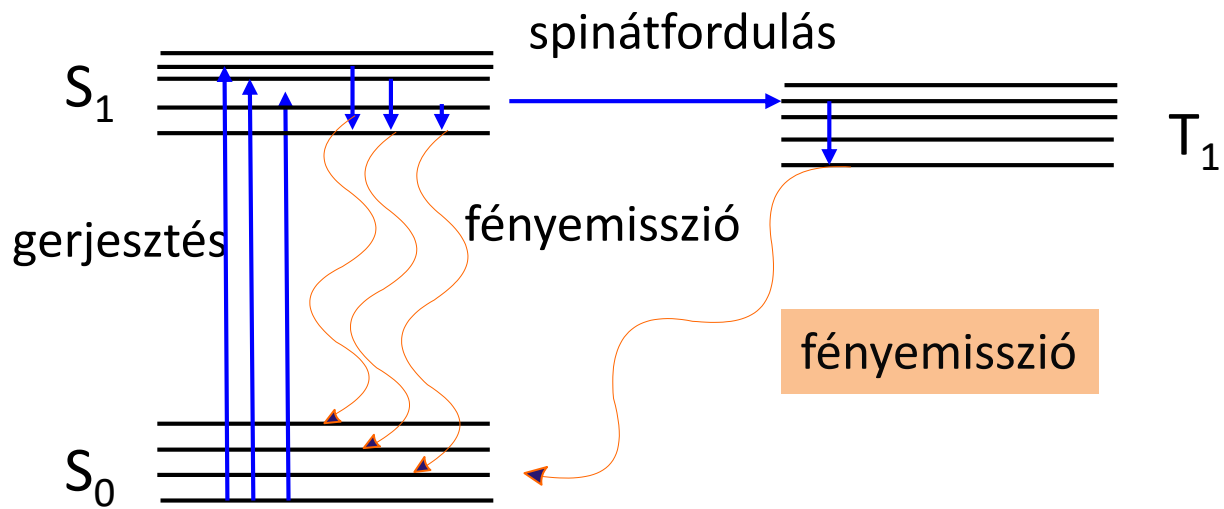
a fényemisszió a legalsó
gerjesztett elektronállapot
legalsó rezgési nívójáról történik

$$E_{\text{gerjesztés}} \geq E_{\text{fluoreszcencia}}$$

$$\lambda_{\text{gerjesztés}} \leq \lambda_{\text{fluoreszcencia}}$$

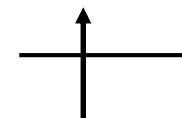
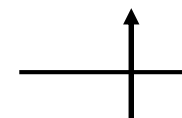
Stokes-eltolódás





Foszforeszcencia

Fényemiszió spinváltozás
után

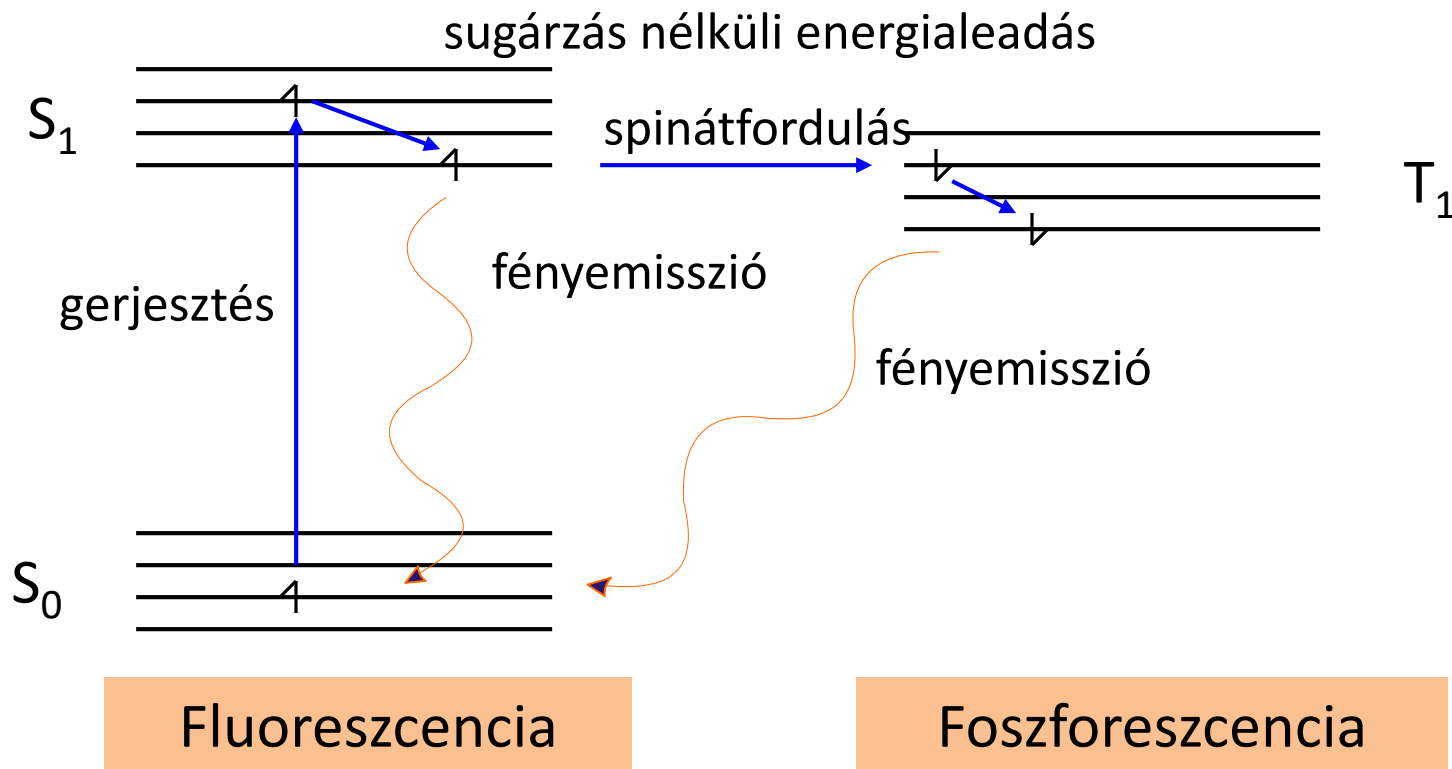


Triplett állapot

Párosítatlan
spinű elektronok

Metastabil állapot

Emittált foton energiájának jellemzése



Stokes-eltolódás

$$E_{\text{gerjesztés}} \geq E_{\text{fluoreszcencia}} > E_{\text{foszforeszcencia}}$$

$$\lambda_{\text{gerjesztés}} \leq \lambda_{\text{fluoreszcencia}} < \lambda_{\text{foszforeszcencia}}$$

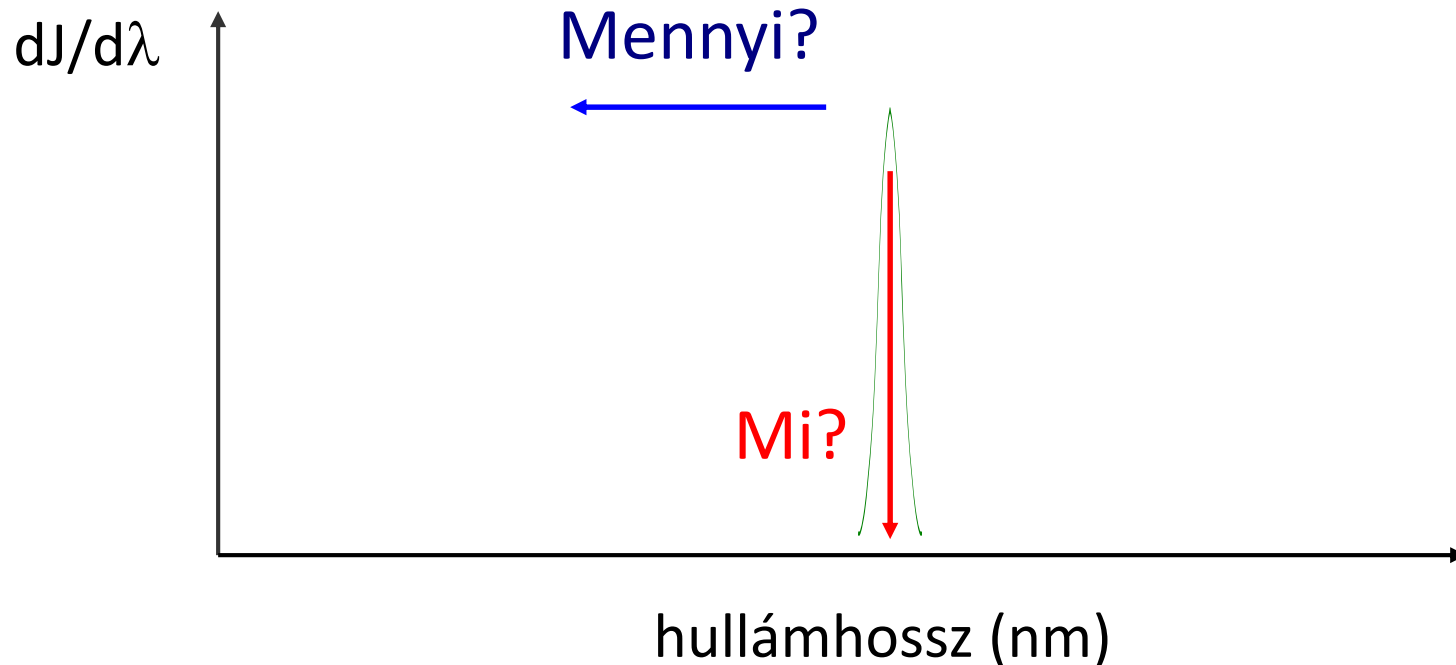
Emisszió jellemzése

Emittált intenzitás hullámhossz szerinti eloszlása

Emissziós spektrum

Atomok esetében:

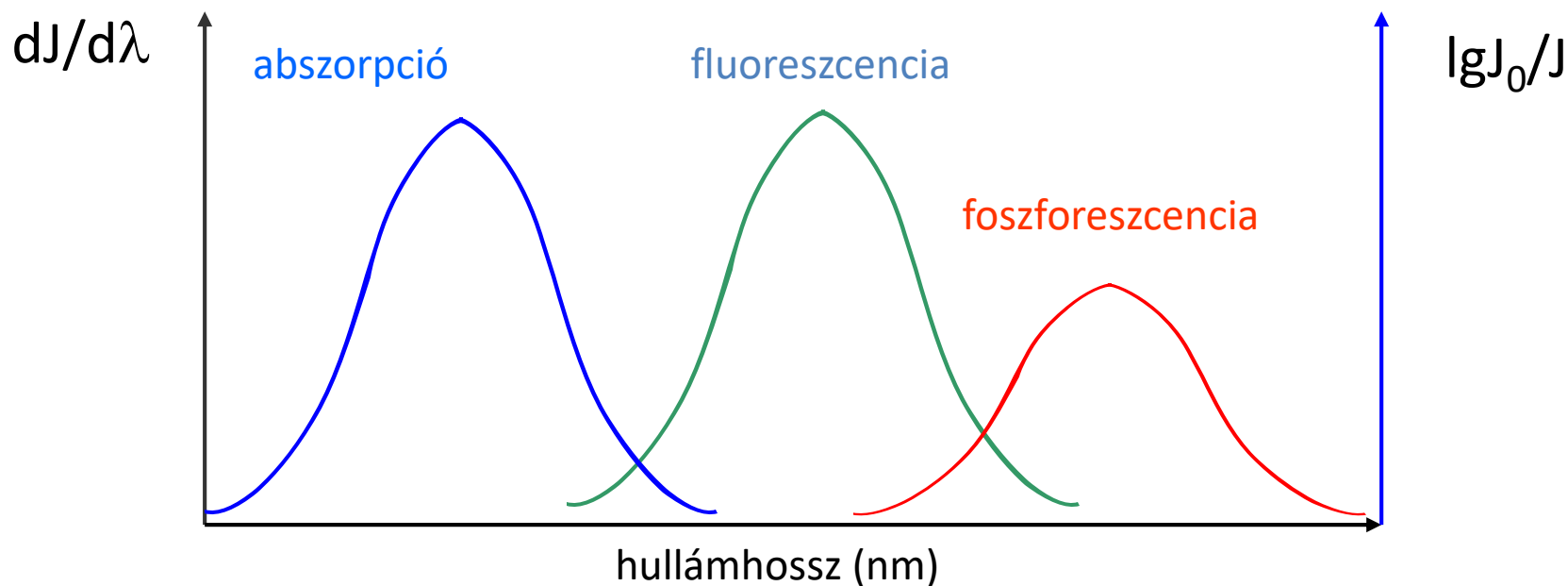
vonalas spektrum



Emittált intenzitás hullámhossz szerinti eloszlása

Emissziós spektrum

Molekulák esetében: sávos spektrum



$$\lambda_{\text{gerjesztés}} \leq \lambda_{\text{fluoreszcencia}} < \lambda_{\text{foszforeszcencia}}$$

Stokes-eltolódás

Pl.: A triptofán megfelelő spektrumai

Fluoreszcencia
gerjesztési spektrum

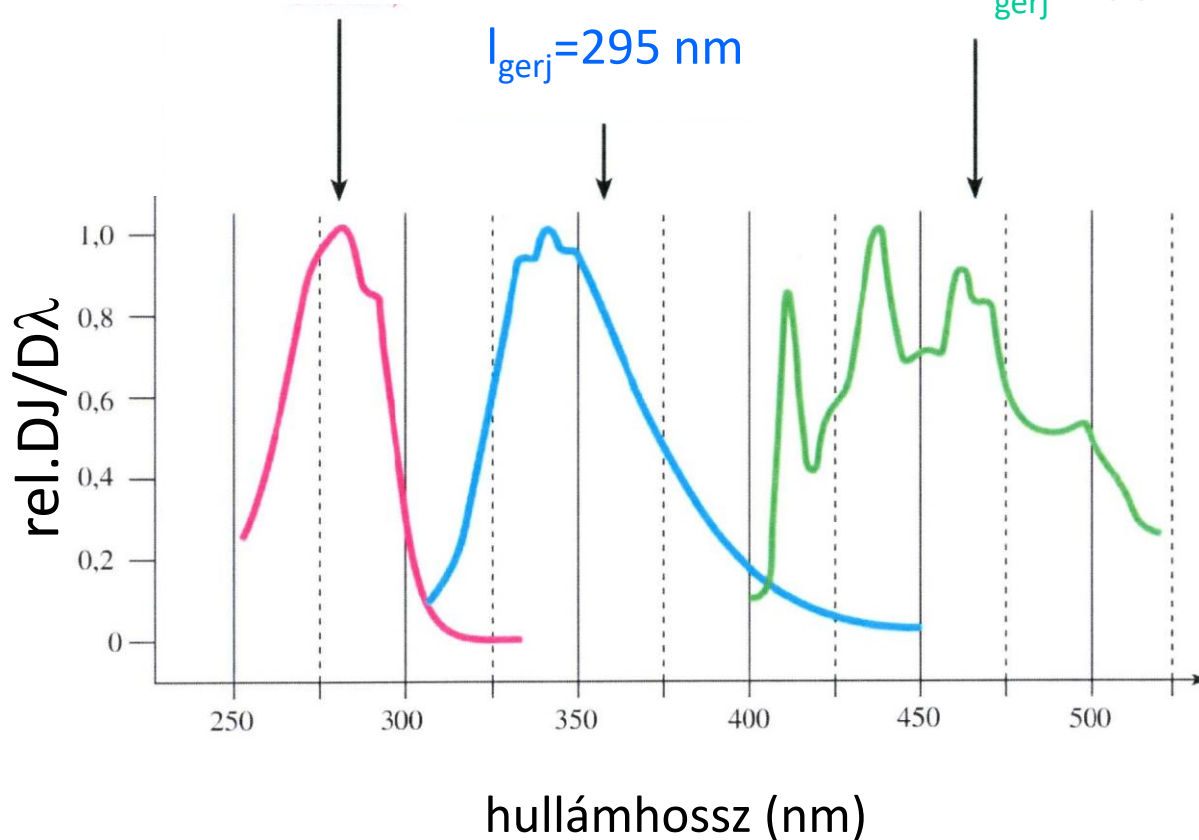
$\lambda_{em}=340\text{ nm}$

Fluoreszcencia
emissziós spektrum

$\lambda_{gerj}=295\text{ nm}$

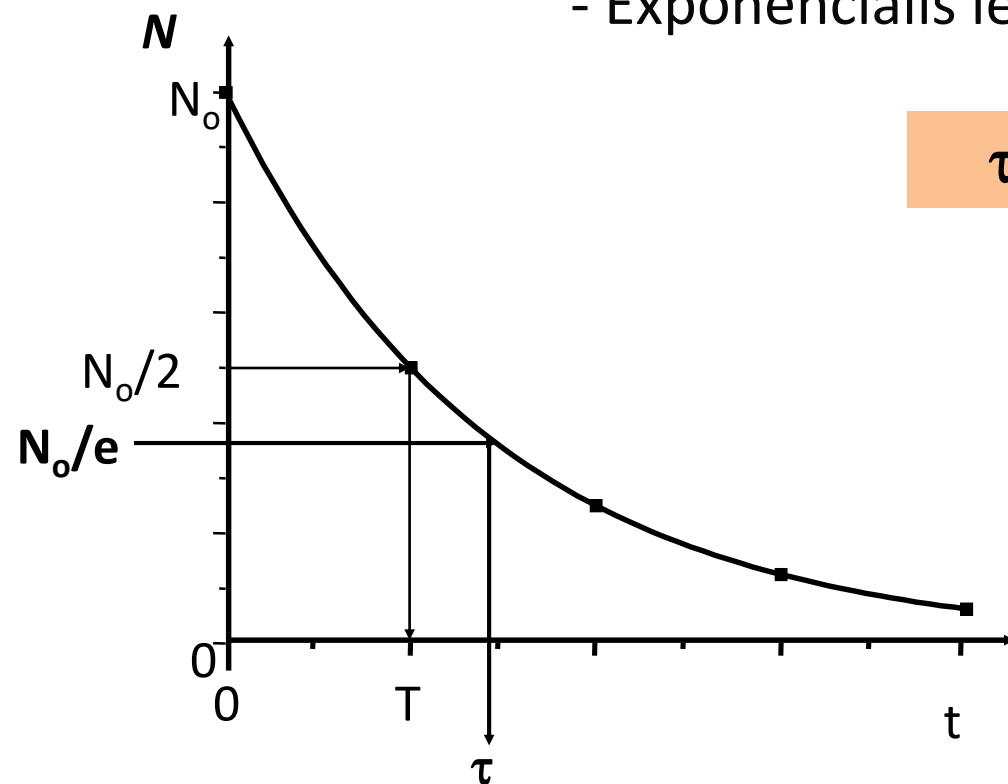
Foszforeszcencia
emissziós spektrum

$\lambda_{gerj}=295\text{ nm}$



Gerjesztett elektronok száma $\longrightarrow N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$

- Exponenciális lecsengés



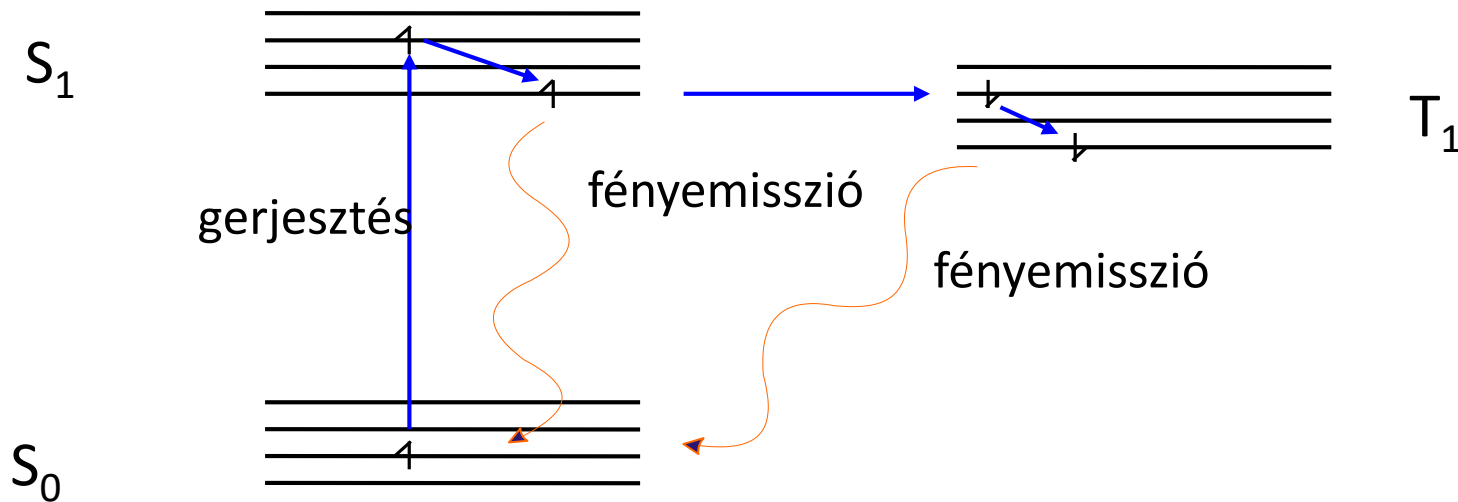
τ : Élettartam

az az idő, ami alatt a gerjesztett elektronok száma a gerjesztés megszűnése után e -ed részére csökken

Gerjesztett állapot időtartamának jellemzése

Élettartam

az az idő, ami alatt a gerjesztett elektronok száma a gerjesztés megszűnése után e-ed részére csökken



Fluoreszcencia

Foszforeszcencia

rövid

hosszú

$10^{-9} - 10^{-7} \text{ s}$

$10^{-3} - 10^2 \text{ s}$

Minden gerjesztést fényemisszió követ?

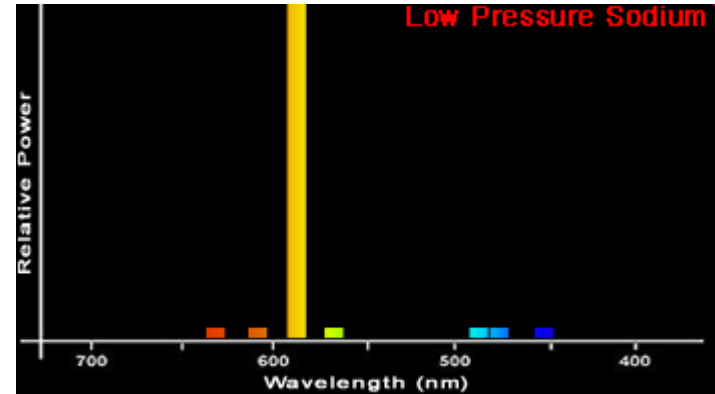
- Környezetükkel kölcsönhatásban levő molekulák (oldatban, sejtekben, szövetekben) elektronjai igen ritkán adják le *fotonemisszióval* a gerjesztéskor felvett energiájukat.
- Sokkal valószínűbb, hogy az energialeadás sugárzás nélkül, vagyis hő keltésével vagy kémiai reakciók útján történik.

A lumineszcencia alkalmazási területei

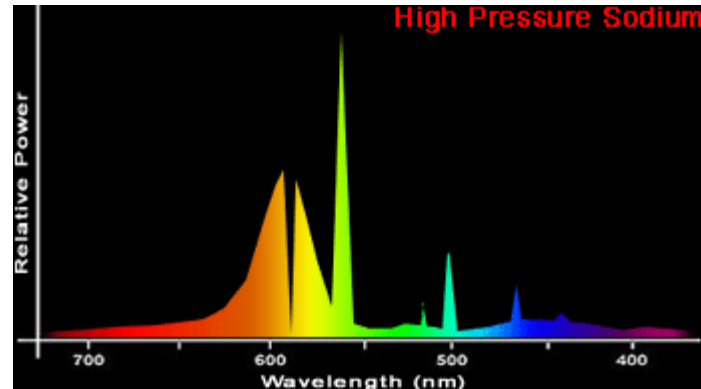
- fényforrások (világítás, sterilizálás, szolárium, terápiai alkalmazások, stb.)
- koncentráció meghatározása (pl. lángfotométer)
- lumineszcencia spektroszkópia
- lumineszcencia mikroszkópia
- diagnosztika
- dózismérés
- régészeti kormeghatározás

Fényforrások

Fémgőz lámpák

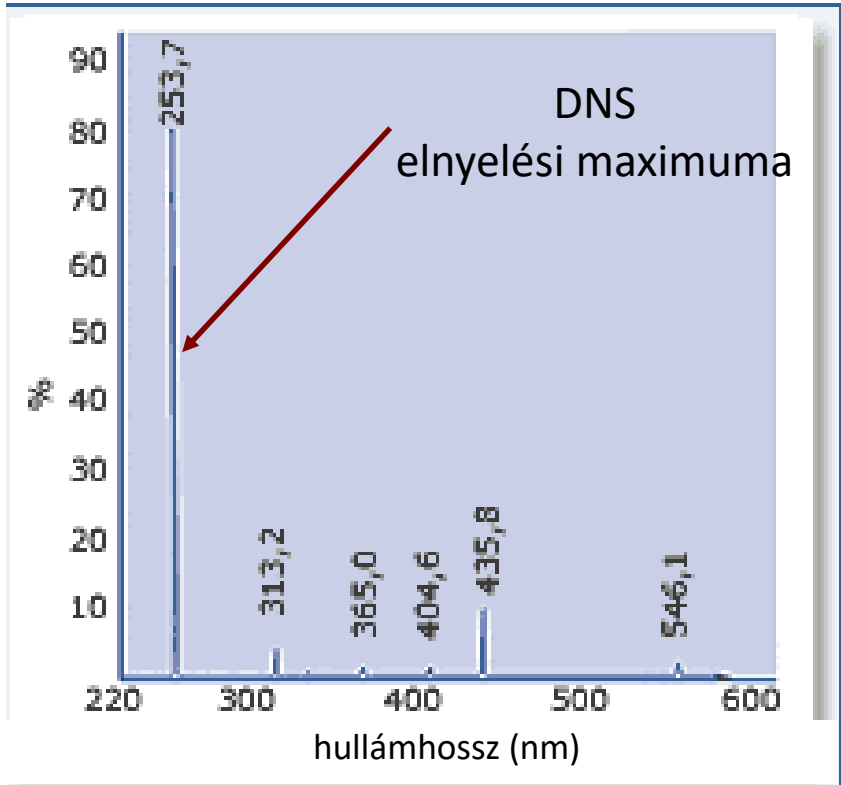


Kisnyomású Na-gőz lámpa
emissziós spektruma

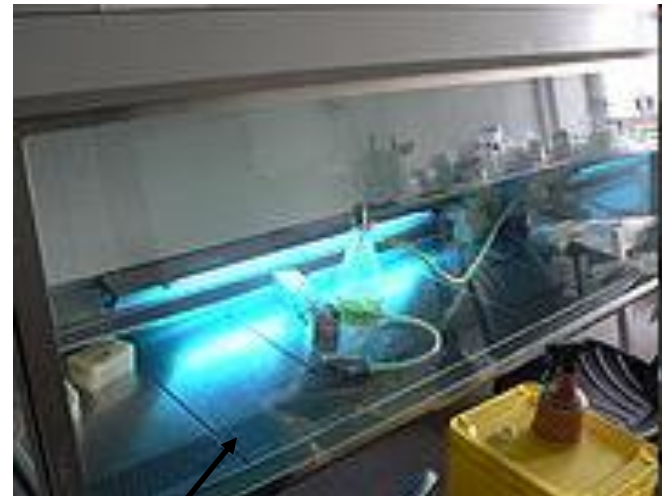


Nagynyomású Na-gőz lámpa
emissziós spektruma

Kisnyomású Hg-gőz lámpa



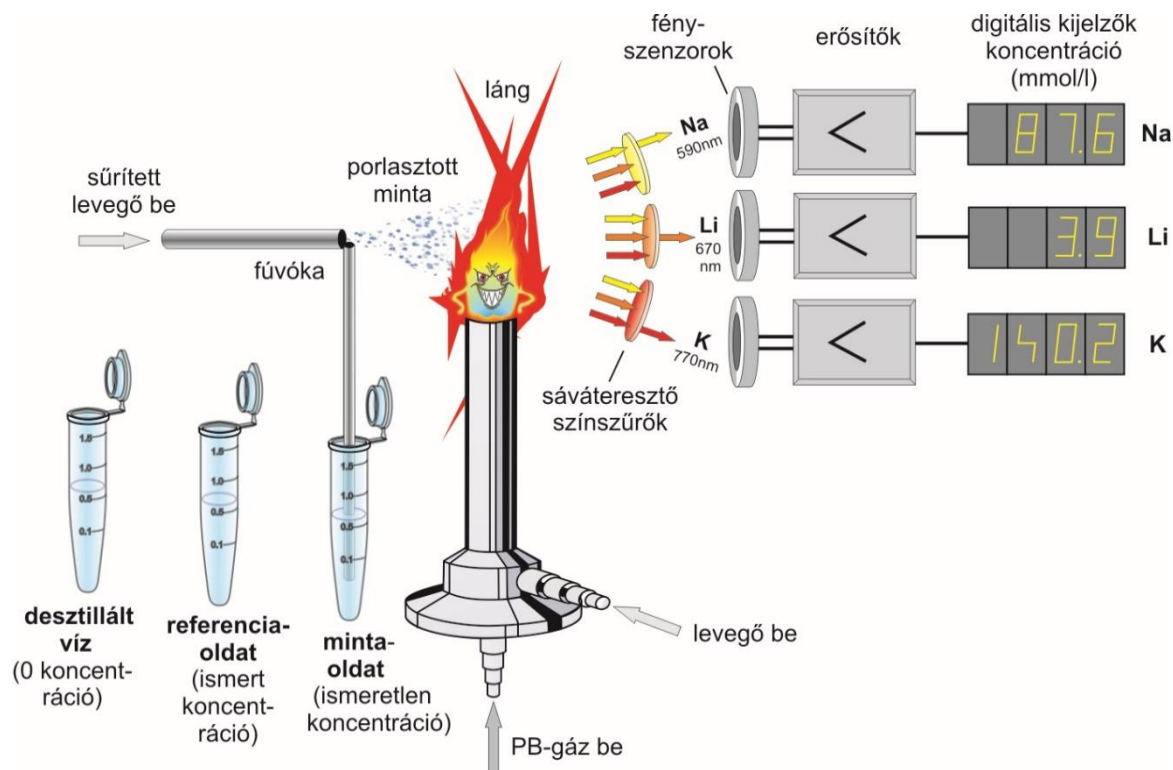
emissziós
spektruma



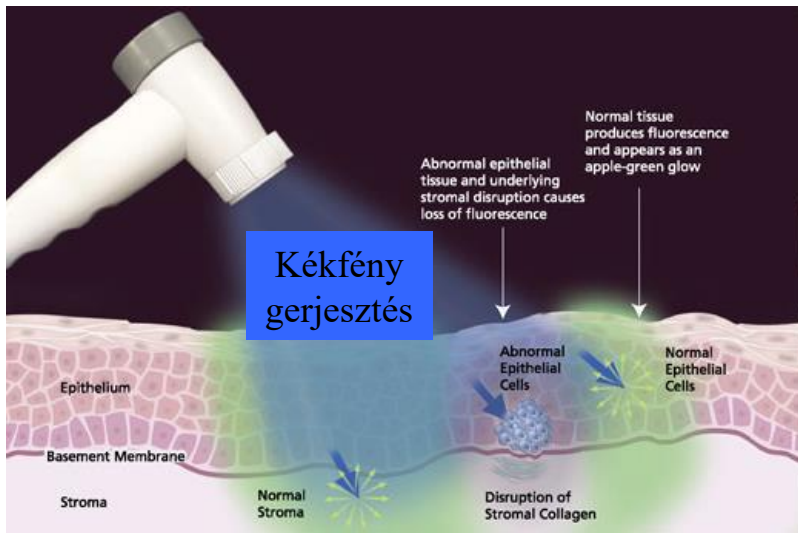
Sterilizálás
„germicid lámpa”



Diagnosztika-Lángfotométer



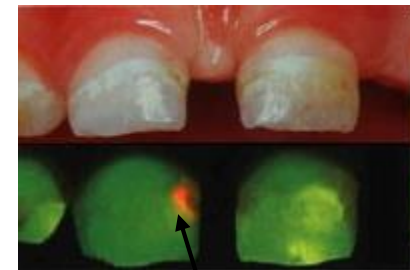
K^+ , Li^+ és Na^+ mennyiségi meghatározása



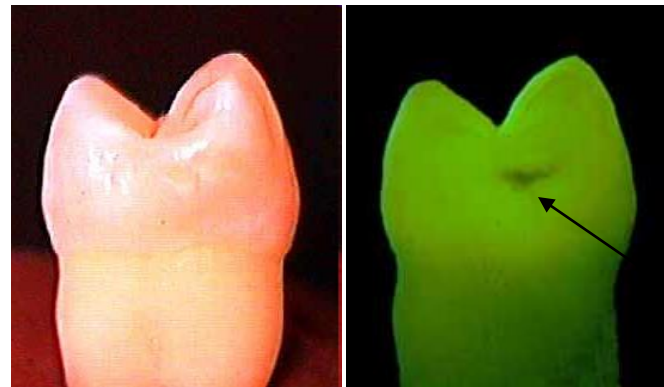
Egészséges és malignus szövetek eltérő fluoreszcens tulajdonságai

Diagnosztika

Tejfogak felszíne
natív állapotban és fluroescens
festés után



Aktív caries

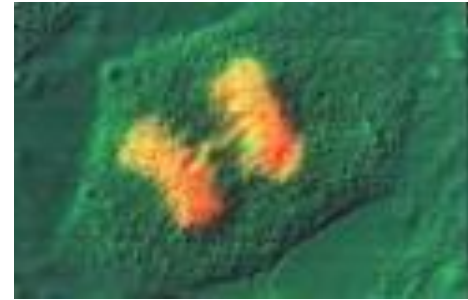
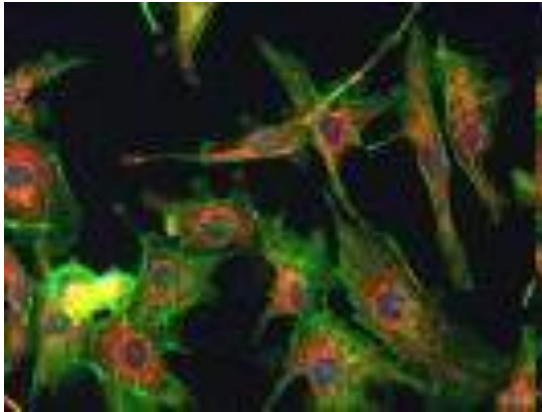


Fog felszíne
natív állapotban és fluroescens festés után

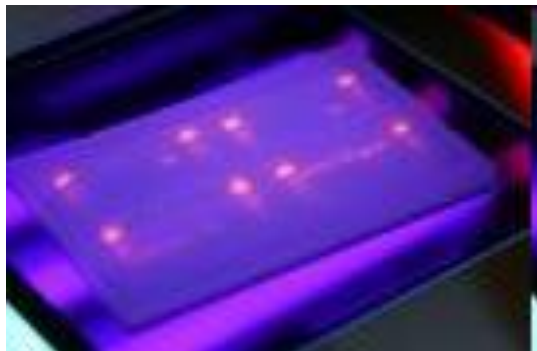
*Kezdődő
caries*

Diagnosztika

Lumineszcencia mikroszkópi



Laboratóriumi alkalmazás számos területe



Laser / lézer

light **a**mplification by **s**timulated **e**mission of **r**adiation

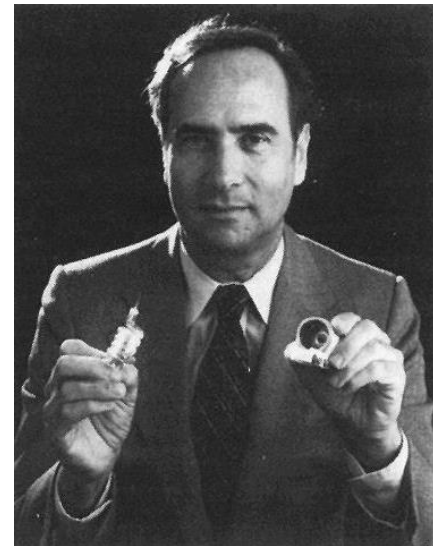
Fényerősítés a sugárzás indukált emissziója révén

Egy kis történelem

1917 - *Albert Einstein*: az indukált emisszió elméleti predikciója

1954 - *N.G. Basow, A.M. Prochorow, C. Townes*: ammonia maser

1960 - *Theodore Maiman*: az első lézer
(rubin lézer)



Egy kis történelem



Alexander Prokhorov



Charles H. Townes



Nicolay Basov

Fizikai Nobel-díj 1964

Lézerek és mézerek fejlesztése területén végzett úttörő munkásságukért

Gabor Denes

Fizikai Nobel-díj 1971
A holográfia kidolgozásáért



Egy kis történelem

William D. Phillips



Steven Chu



Claude Cohen-Tannoudji



Zhores Ivanovich Alferov



Herbert Kroemer

Fizikai Nobel-díj 1997
az atomok lézeres hűtésére és
befogására kifejlesztett
módszerért

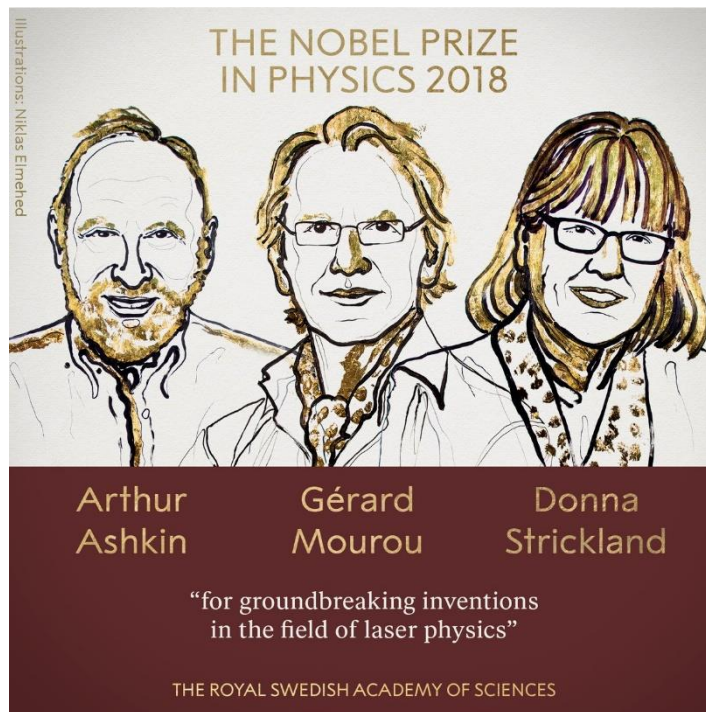
Fizikai Nobel-díj 2000
A félvezető lézergyódiákért

Nobel díj 2018

A díjat a mai lézertechnika kifejlesztését megalapozó fizikai alapkutatásokért osztották ki.

Ashkin,

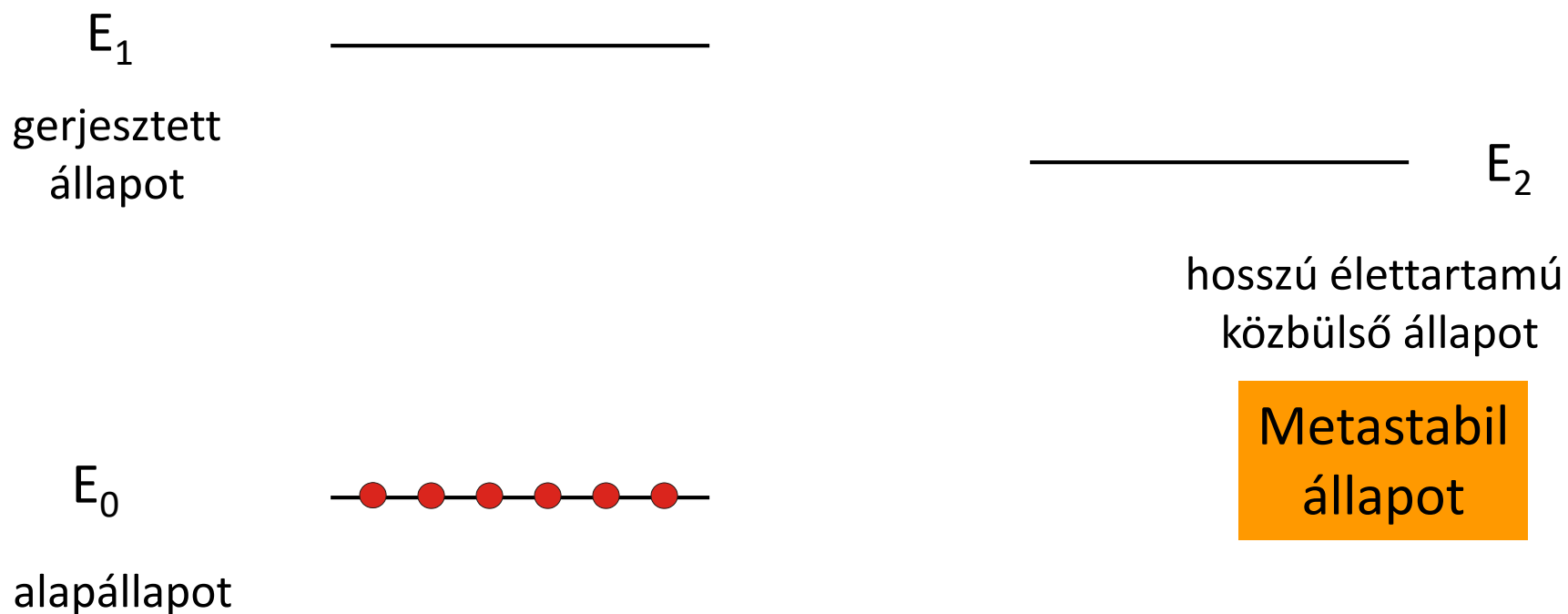
az optikai csipeszek létrehozásáért, illetve azok biológiai rendszerekben történő alkalmazásáért kapta meg az elismerést. Az optikai csipesz különlegessége, hogy lézerujjaival képes megragadni az apró részecskéket, például az atomokat.



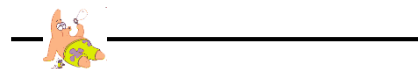
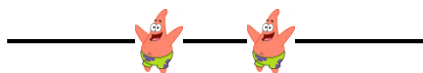
Mourou-nak és Stricklandnek ezzel szemben a nagy intenzitású, ultra-rövid optikai impulzusok előállításáért ítelték oda a díjat. Az efféle lézereket nemcsak az iparban, de a gyógyászatban is fel tudják használni, segítségükkel ugyanis precízen lehet bevágásokat ejteni és lyukakat fúrni a különböző anyagokon.

A lézerfény előállításának feltételei és lépései

Speciális elektron energia állapotok



Elektronállapotok betöltöttsége



Termikus egyensúly

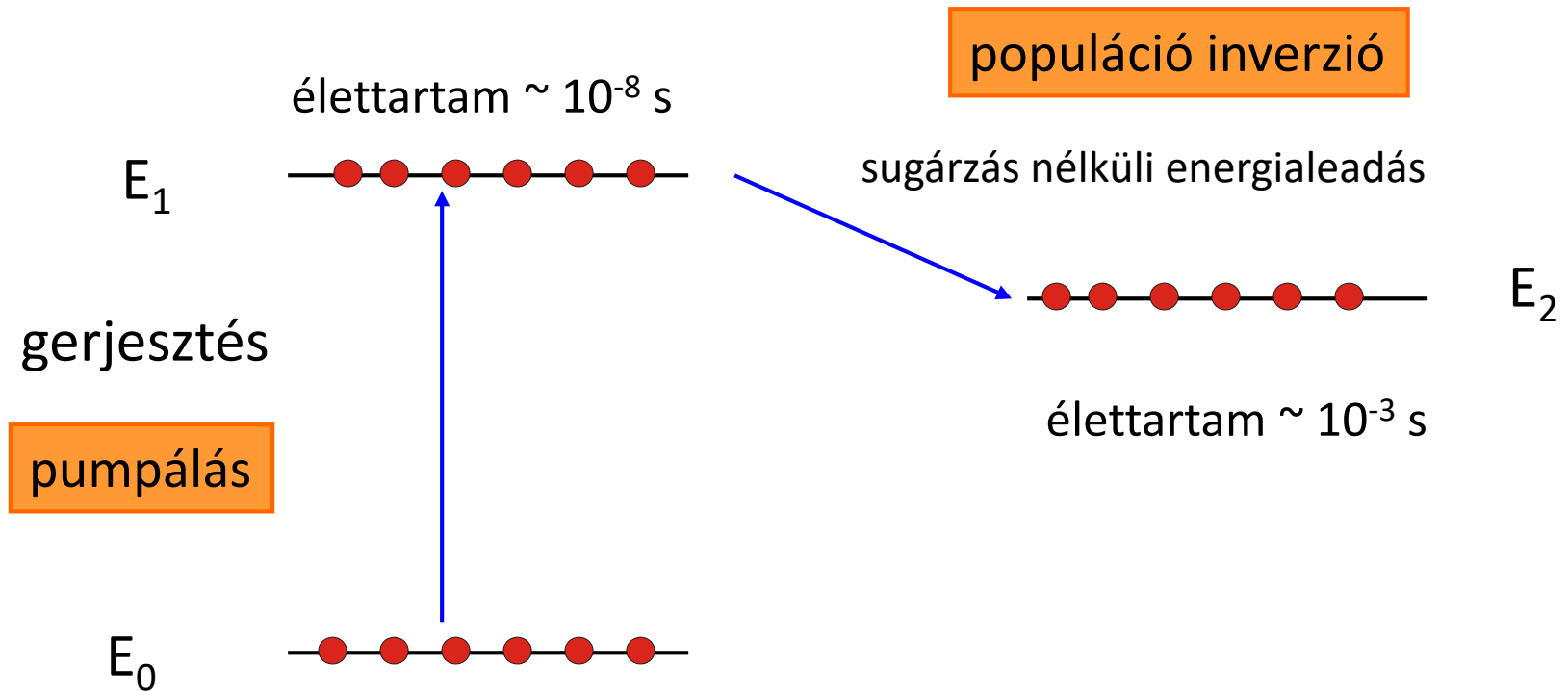
Boltzmann elosztás szerint:

$$n = n_0 e^{-\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}$$

Populáció inverzió

“fordított” betöltöttség

A lézerfény keletkezésének lépései

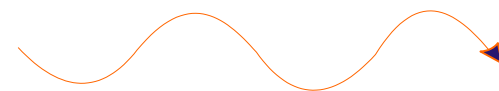


Spontán emisszió

E_1 _____

_____ E_2

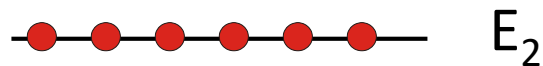
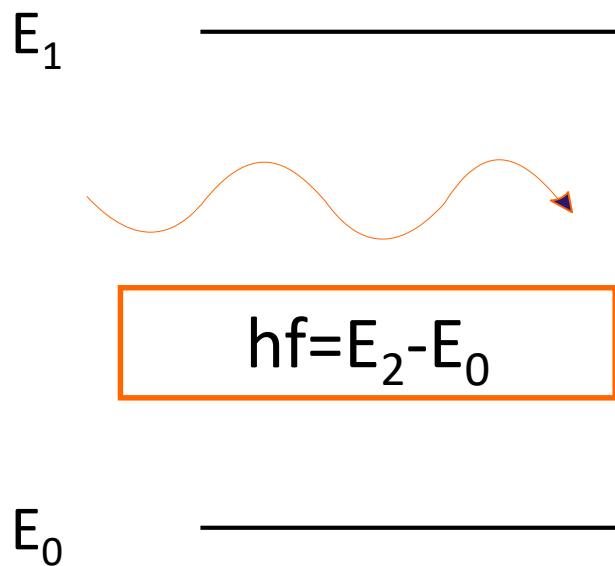
E_0 _____ ●



spontán
fényemisszió

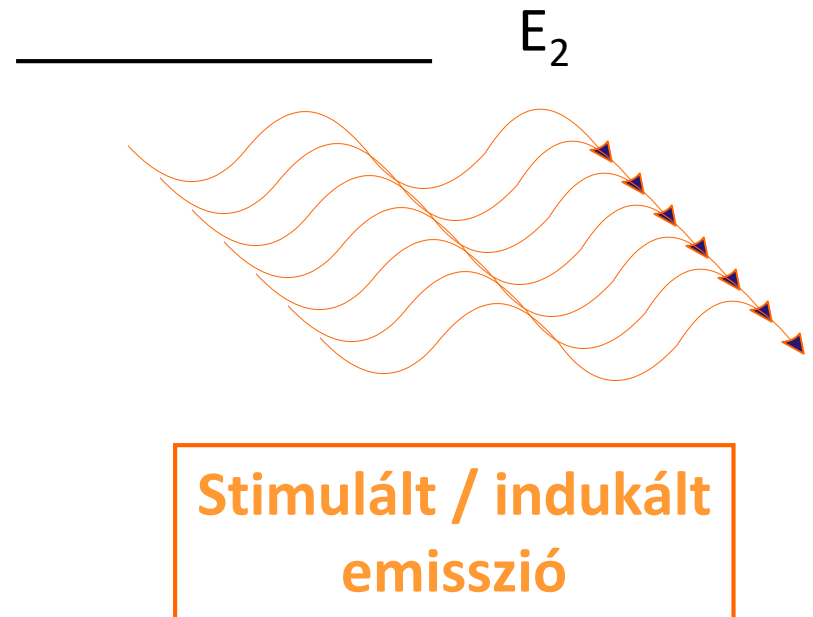
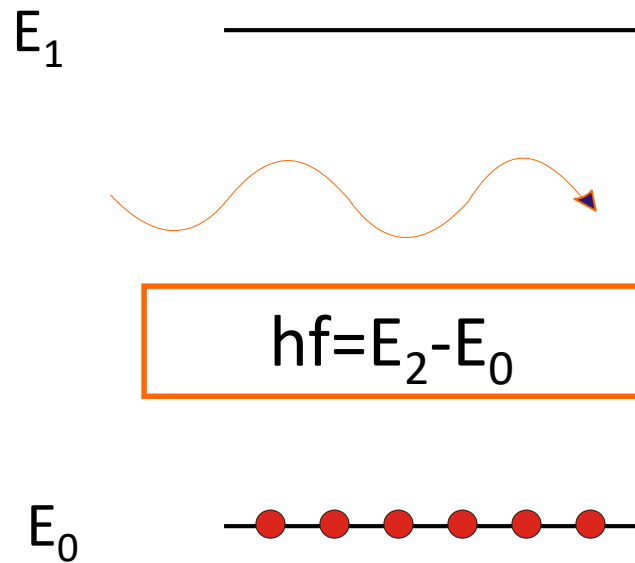
kis valószínűséggel

A metastabil nívón lévő elektronok relaxációjának stimulálása

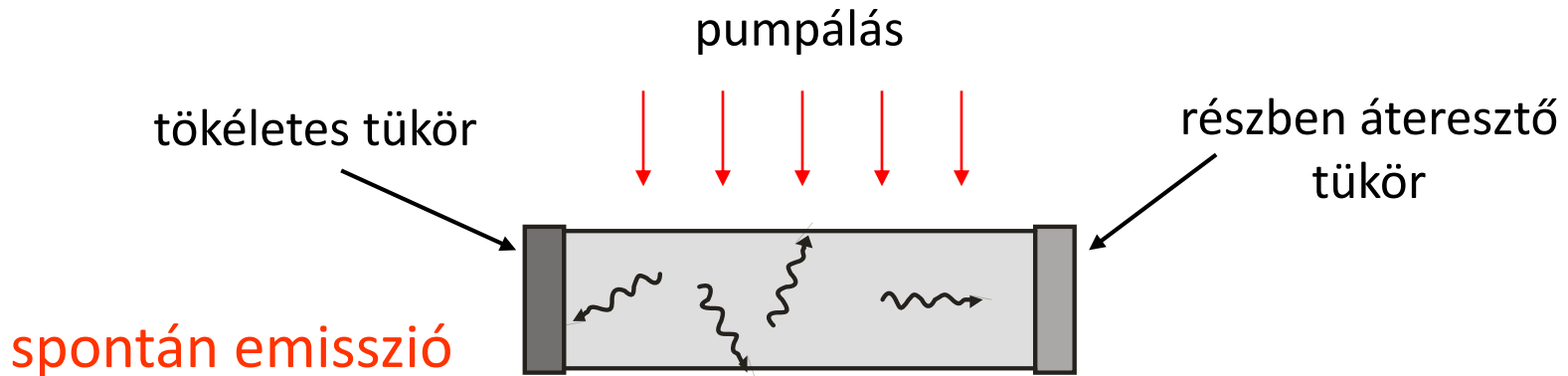


**Stimulált / indukált
emisszió**

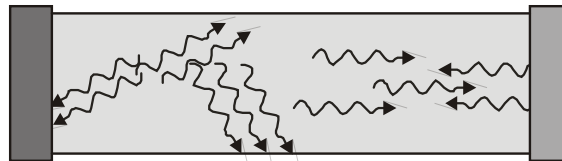
A metastabil nívón lévő elektronok relaxációjának stimulálása



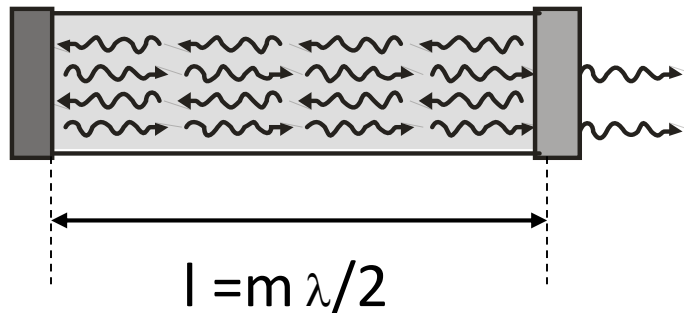
Lézercső – optikai rezonátor



spontán és indukált
emisszió

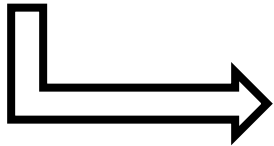
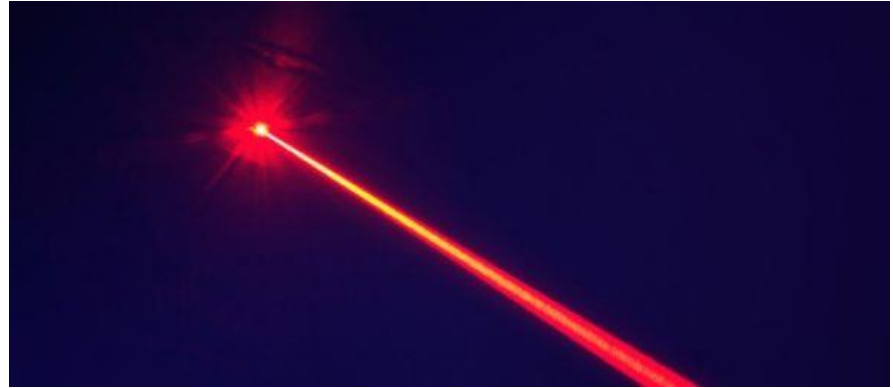


indukált
emisszió



Az indukáló és az indukált emisszió révén keletkezett fotonoknak **azonos** az:

- energiája
- fázisa
- rezgési síkja
- terjedési iránya.



Ezért az indukált emisszióval keletkezett fény:



- Monokromatikus
- koherens
- poláros
- jól fókuszálható

Az indukált emisszióval keletkezett fény

monokromatikus – keskeny spektrális sáv szélesség

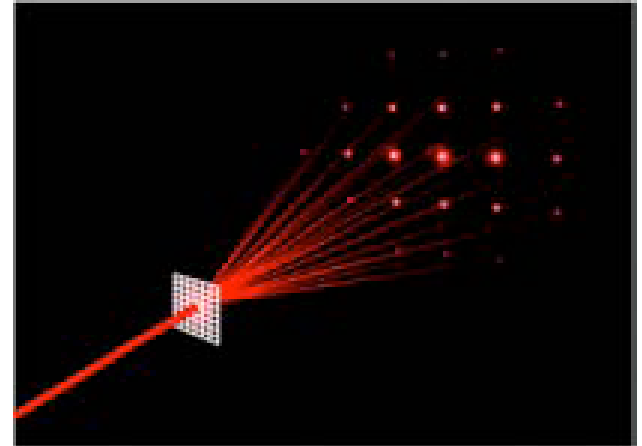
koherens – interferenciaképes

időbeli koherencia

térbeli koherencia

jól fókuszálható

poláros



Rövid impulzusidő lehetséges – ps , fs

Nagy teljesítmény érhető el – kW - GW

Nagy teljesítménysűrűség lehetséges

A lézerek típusai

<i>Anyaguk szerint:</i>	<i>Működésük szerint:</i>	<i>Teljesítményük szerint:</i>
szilárd	impulzus	nagy teljesítményű
gáz	folyamatos	kis teljesítményű
festék		
félvezető		

szilárdtest ~: fémionnal szennyezett kristályok

pl. Nd – Yag*, rubin, Ti-zafir

gáz ~ pl. helium – neon, széndioxid, argon/kripton

festék ~: szerves festékek híg oldata

pl. rodamin, kumarin

félvezető ~: p és n-típusú félvezetők kombinációjából

A lézerek típusai

Teljesítményük szerint:

5 mW – CD-ROM drive

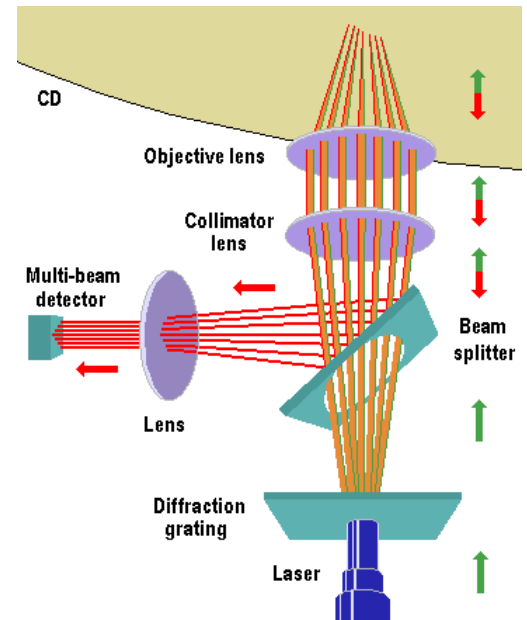
5 - 10 mW – DVD lejátszó

100 mW – CD-író

250 mW – DVD-író

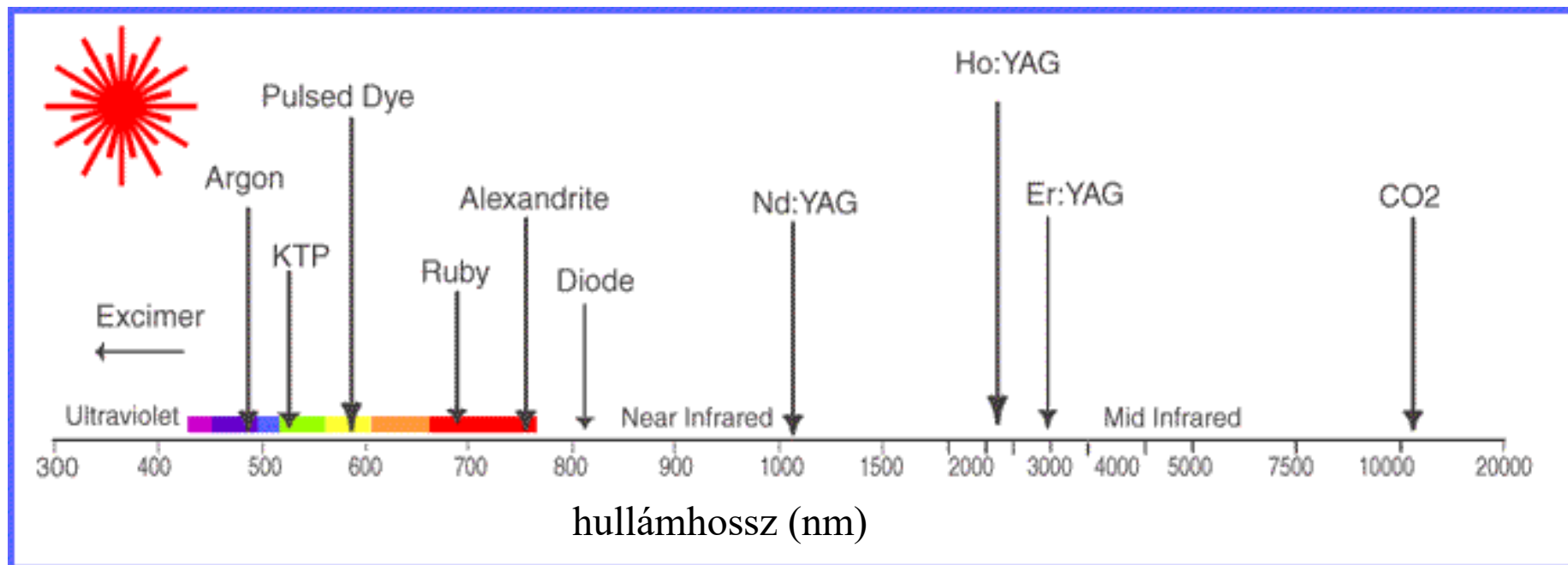
1-20 W – mikro-megmunkálásban használt szilárdtest lézerek

30-100 W – tipikus sebészeti lézerek



<https://www.youtube.com/watch?v=j0T8Fd9iQqs>

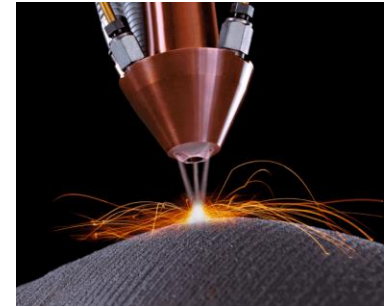




A lézerek alkalmazása

A kiválasztás szempontjai:

hullámhossz
teljesítmény
üzemmód



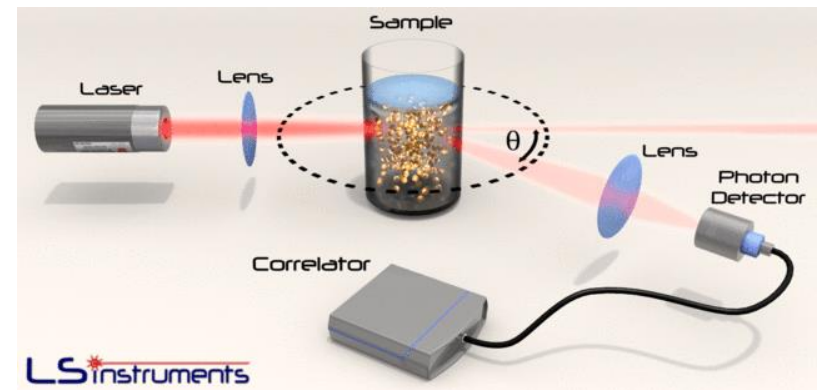
Felhasználási területek

orvos gyakorlat – sebészet, szemsebészet, bőrgyógyászat,
kozmetika, fogászat, biostimuláció, reumatológia
fotodinamikus terápia

technika, ipar

jelátvitel, kommunikáció

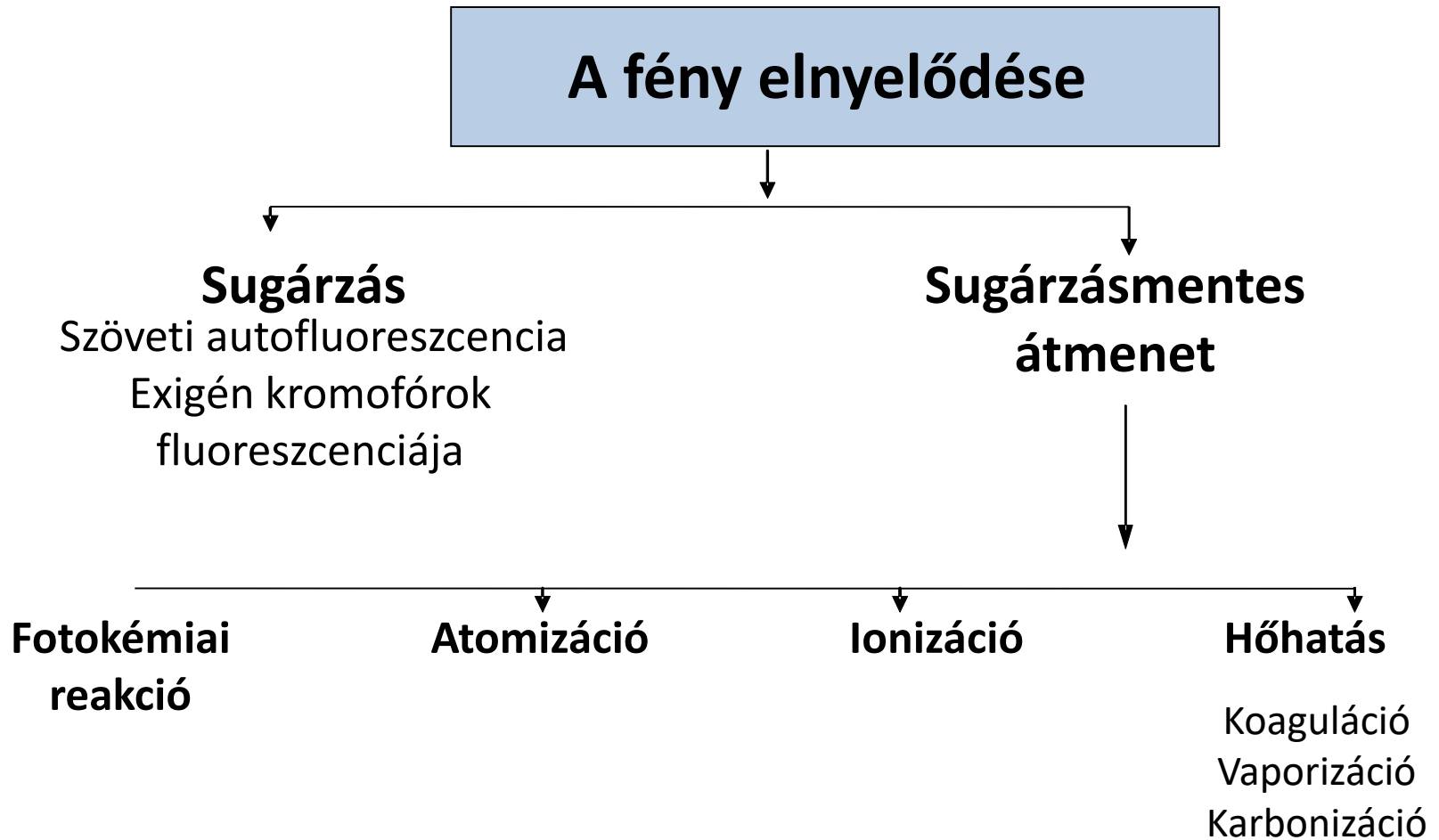
kutatás, szerkezetvizsgálat



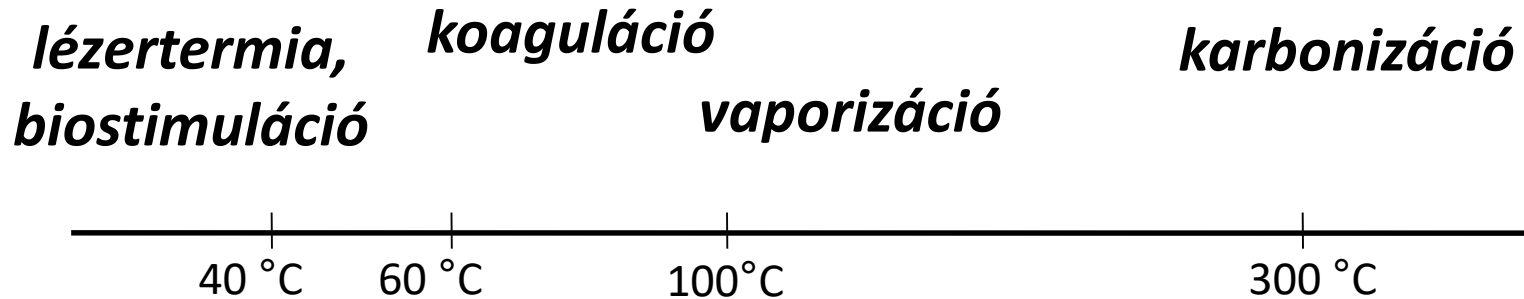
Leggyakoribb lézerek az orvosi gyakorlatban

Típus	λ nm	folytonos	impulzus	alkalmazás
Széndioxid	10 600	20–100 W	10^9 W	sebészet
Nd:Yag	1064	50 W	10^8 W	sebészet
Argon	488- 514	10 W	10^2 W	szemészet pumpálás

Fény által indukált folyamatok a szövetekben

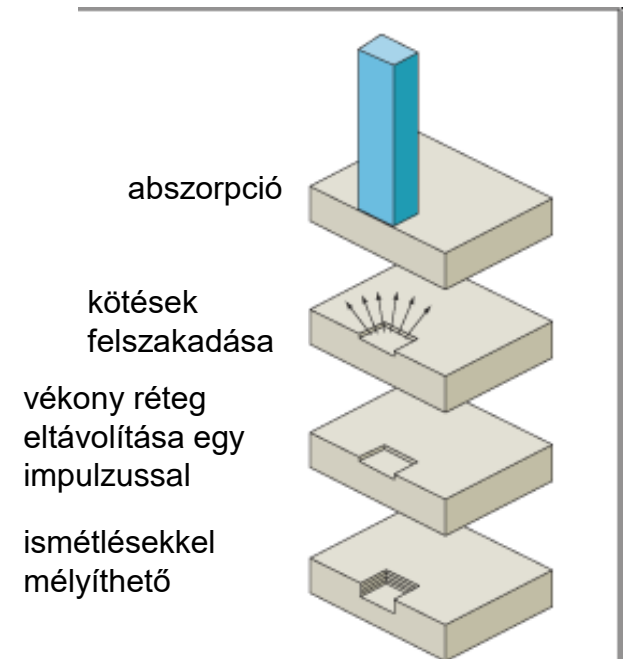


Termikus hatások



Fotoabláció (eltávolítás) – atomizáció/vaporizáció

- UV lézer impulzus (10 MW/cm^2 - 10 GW/cm^2)
- Excimer lézerek (193 nm-351 nm), 10-20 ns impulzus
- Refraktív kornea sebészet, szövet “contouring” (sculpting)

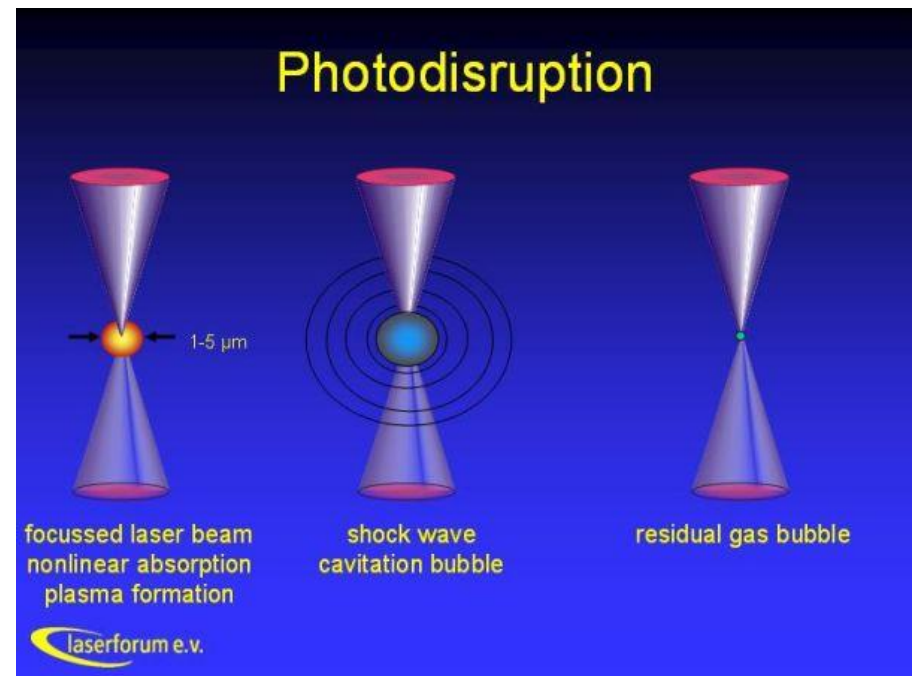


Fotodiszrupció

Lágy szövetekben v. testfolyadékokban nagy intenzitású, ns-os impulzusok hatására

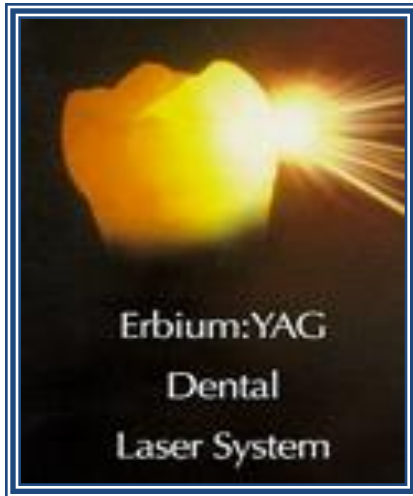


- Lökéshullám roncsolja a szöveteket
- Kavitáció
- Vízgőz és CO_2 tölti ki az üreget
- A lökéshullám következtében ez szétáramlik a környező szövetekbe



Er:YAG lézer

2940 nm



Maximális elnyelődés a vízben és
a hidroxiapatitban



Vaporizáció és mechanikai hullám



caries eltávolítása

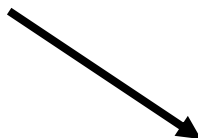
kemény szövetek módosítása

lágyszövetek módosítása

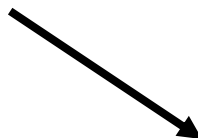




Argon lézer



fogfehérítés



Er:YAG lézer

2940 nm

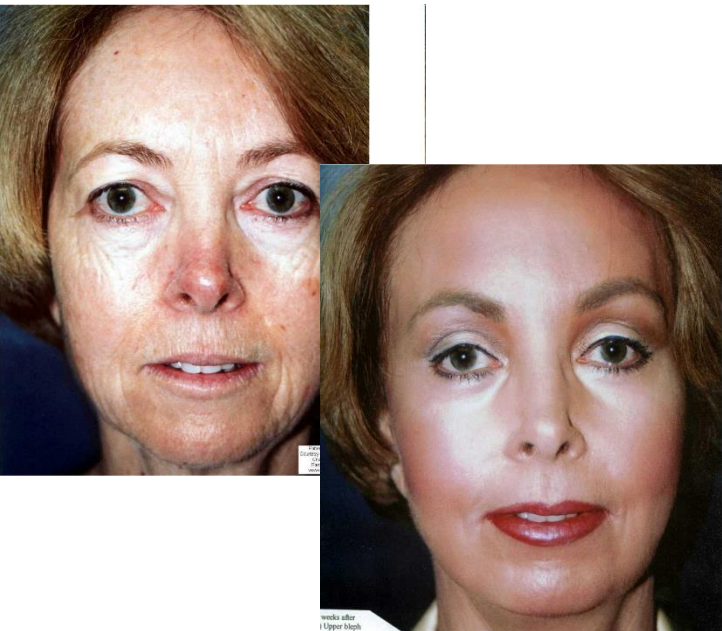
vagy

CO₂ lézer

10600 nm

„resurfacing” – ablációs technika

az epidermisz megújítására



Ráncok,
sérülések,
aknék stb.
kezelésére



Nd:YAG lézer

1064 nm

Felszíni erek fotokoaguláción alapuló
korrekciója



Vénák fotokoaguláción
alapuló korrekciója



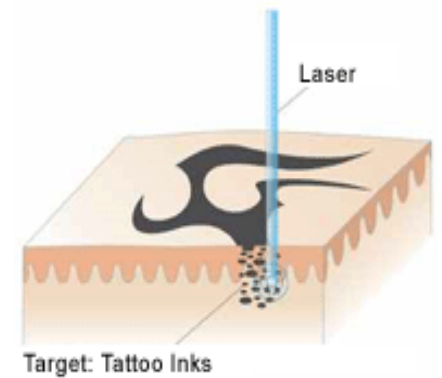
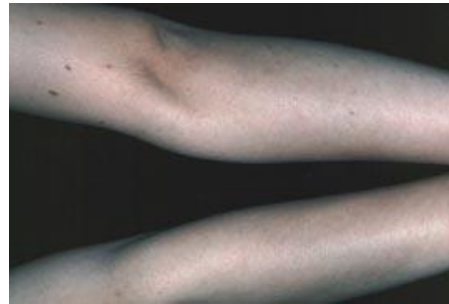
Esztétikai megoldások

DOES YOUR CAT NEED LASER HAIR REMOVAL?

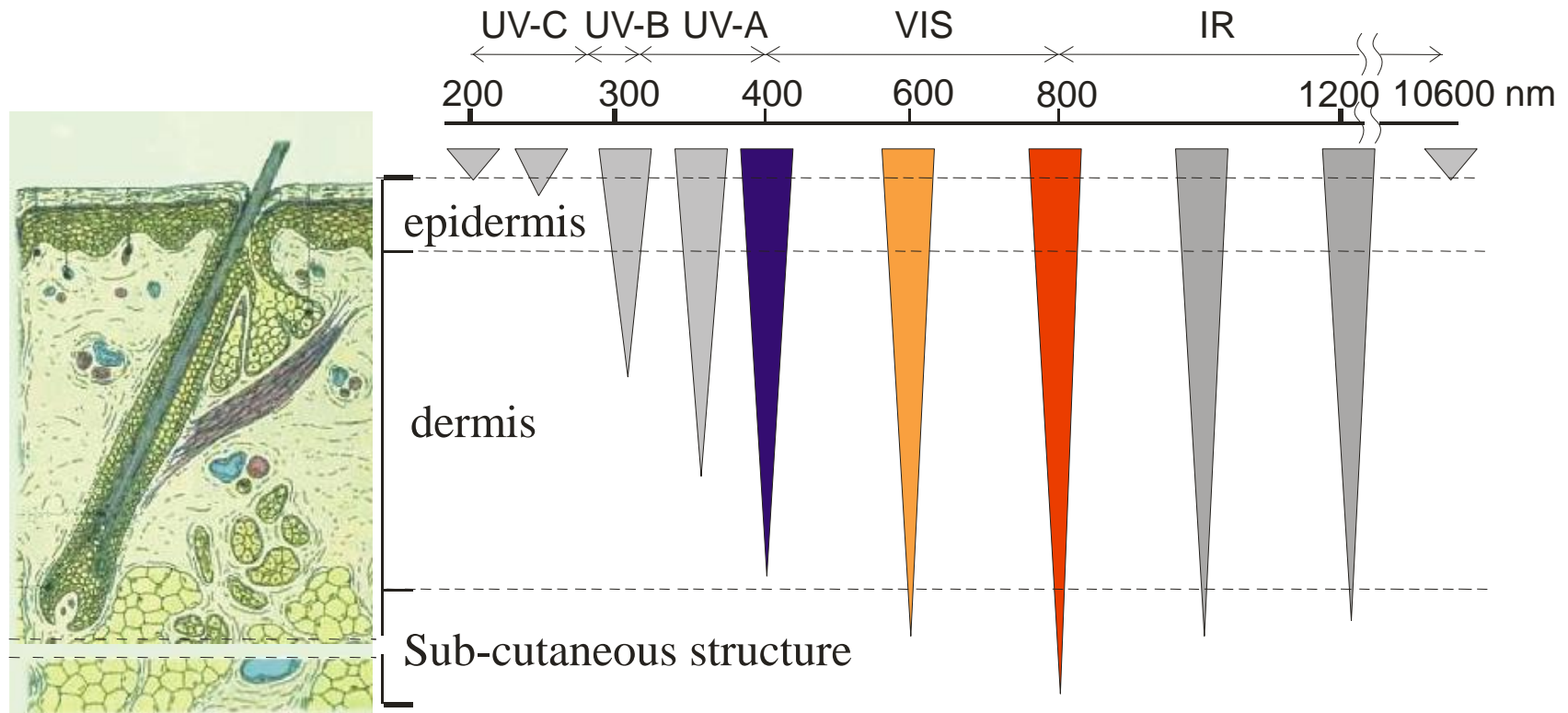


before

after



Fény behatolási mélysége a bőrbe



A fény intenzitás gyengülése elnyelődés, fénytörés és visszaverődéssel egyaránt megvalósul.

Az, hogy a fény milyen mélyen képes behatolni a szövetbe, hullámhossz függő!!!