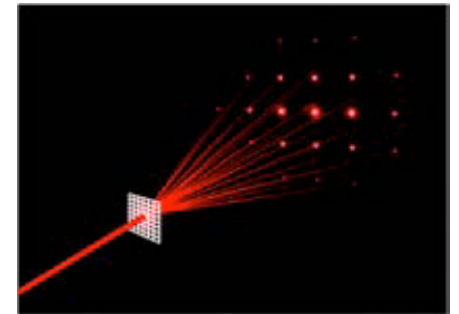


# Elektromágneses sugárzások kölcsönhatása szövetekkel és szöveti komponensekkel I. Lumineszcencia, lézerek és orvosi alkalmazások

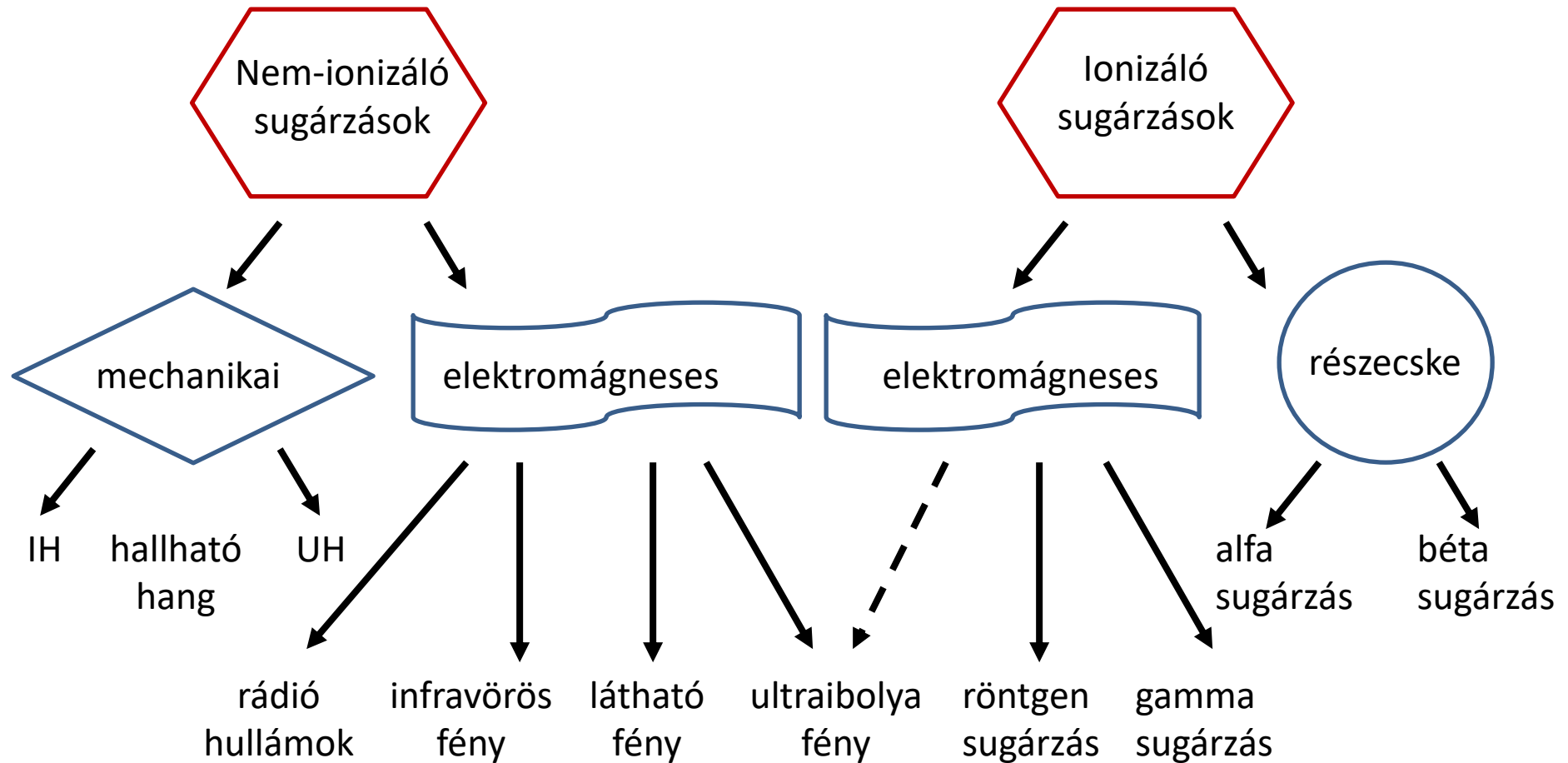


Jedlovsky-Hajdú Angéla  
2024.02.21.



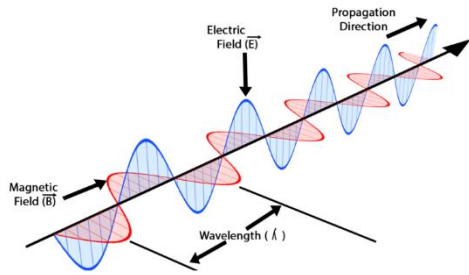
Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet,  
Nanokémiai Kutatócsoport

# Sugárzások



# A fény természete

Electromagnetic Wave



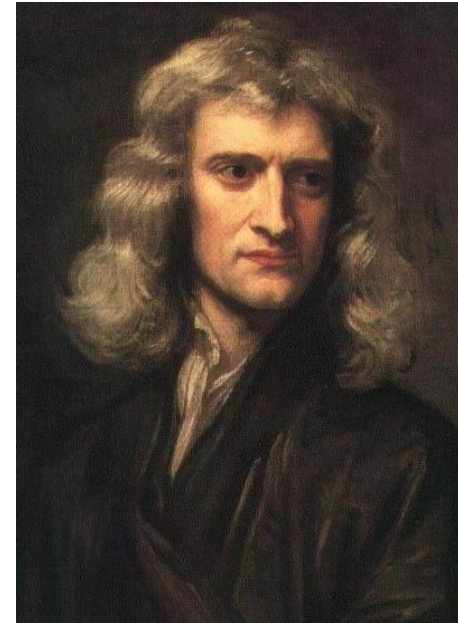
Hullám?



Christiaan Huygens  
(1629 - 1695)

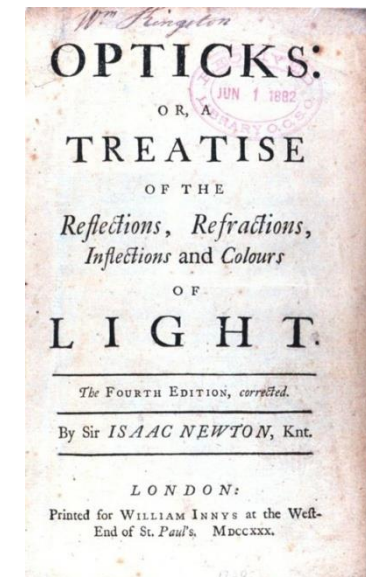
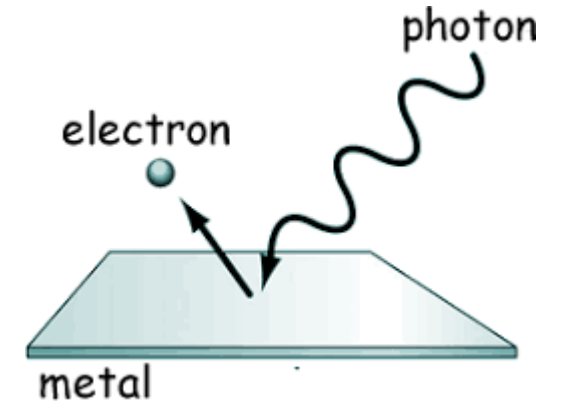
*Traité de la lumière*  
1690

Részecske?



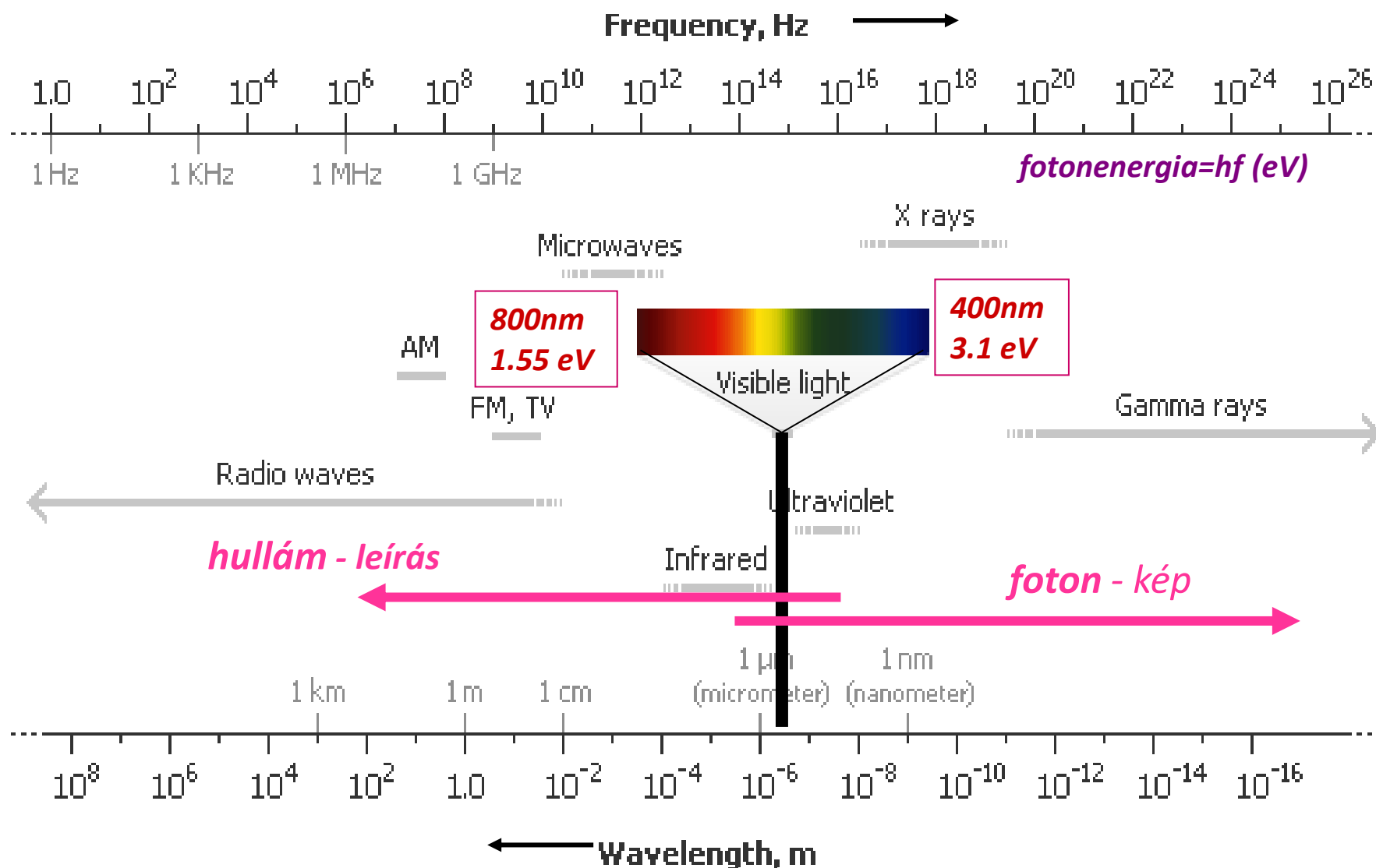
Isaac Newton  
(1642 - 1727)

*Opticks*  
1704



# Elektromágneses sugárzások – kettős természet

Logaritmikus skála

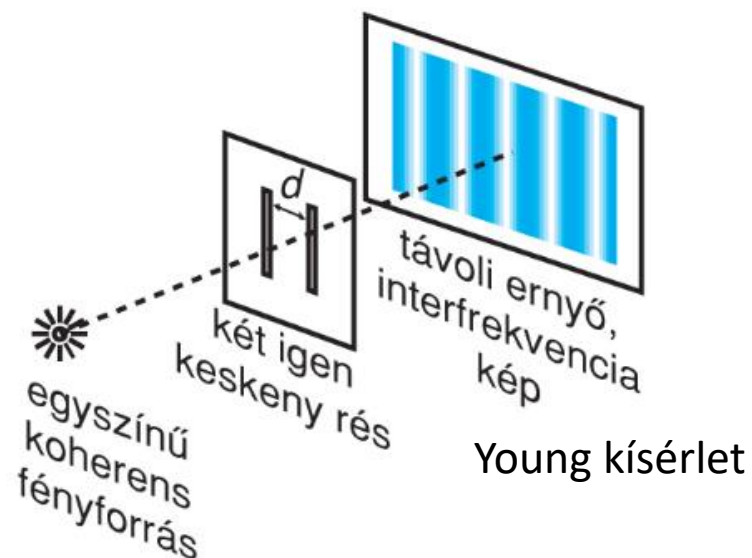


Rezgés v. oszcilláció következtében kialakuló, térben és időben periódikus jelenség, amelyben energia terjed.

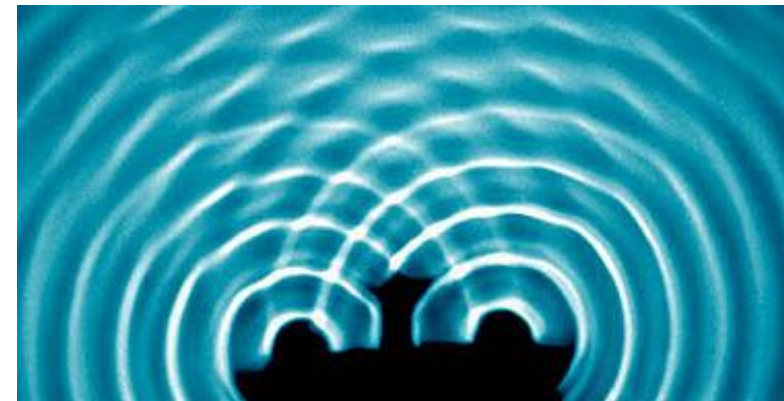
Hullámtermészetet bizonyító jelenségek:

- elhajlás
- szuperpozíció/interferencia
- polarizáció

### Elhajlás:

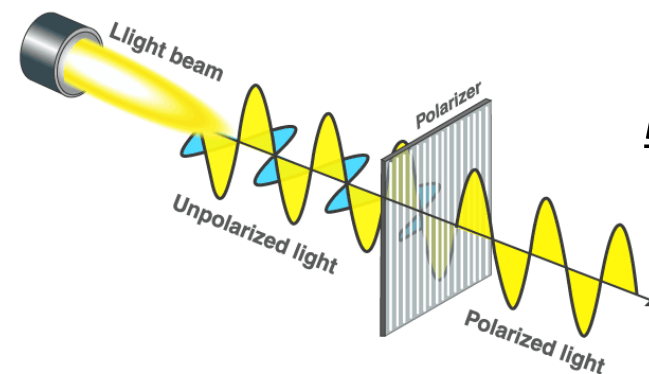


**Huygens-elv:** egy hullámfelület minden pontjából elemi hullámok indulnak ki. Az új hullámfelület ezen hullámok burkolófelülete.



**Interferencia** - koherens hullámok szuperpozíciója

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

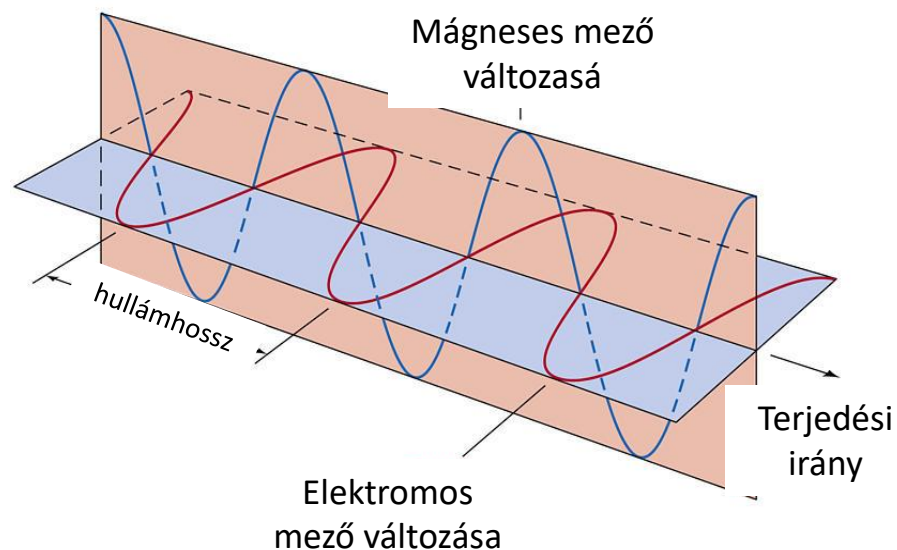


### Polarizáció

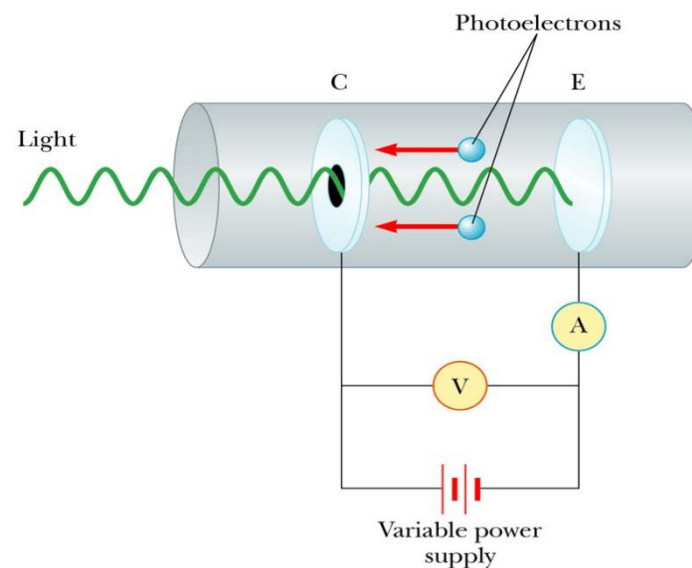
# A fény kettős természetű

Hullám – transzverzálisan, szinuszosan  
változó elektromos és mágneses tér

## Elektromágneses sugárzás



Wilhelm Hallwachs fizikusnak tulajdonítható az a felfedezés (1888), hogy ultraibolya sugárzás hatására negatív elektromos töltéshordozók távoznak a megvilágított fém felületéről. Ezt nevezzük fénylektromos jelenségnek (fotoelektromos hatás). Később Philipp Lenard fizikus tanulmányozta alaposabban a jelenséget (1902)



## Fotoelektromos effektus

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



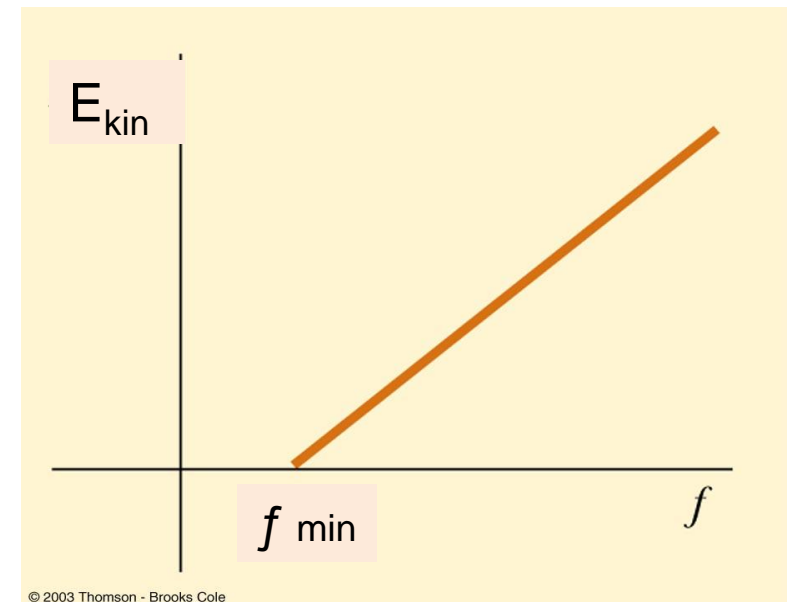
# A jelenség értelmezése a hullámtermészettel nem lehetséges

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

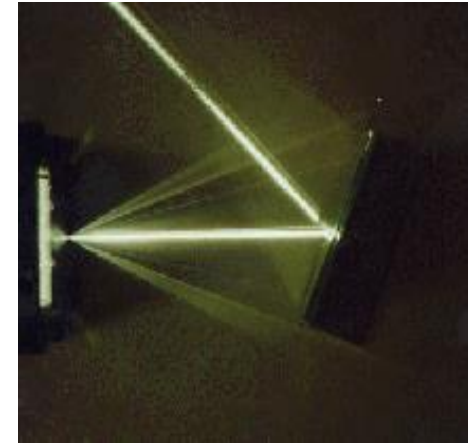
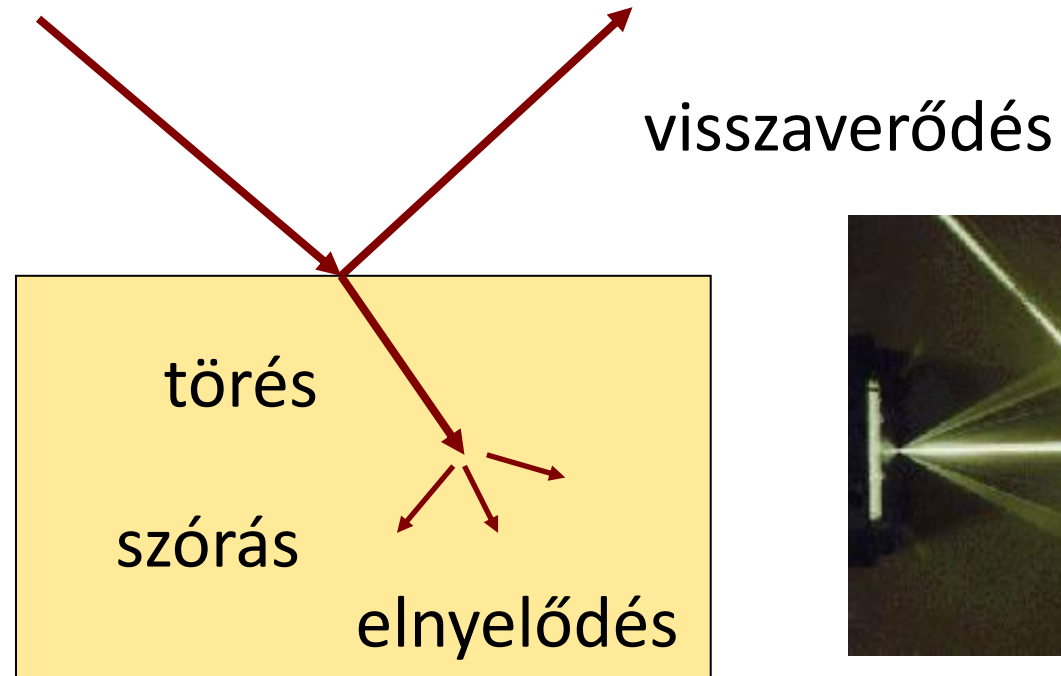
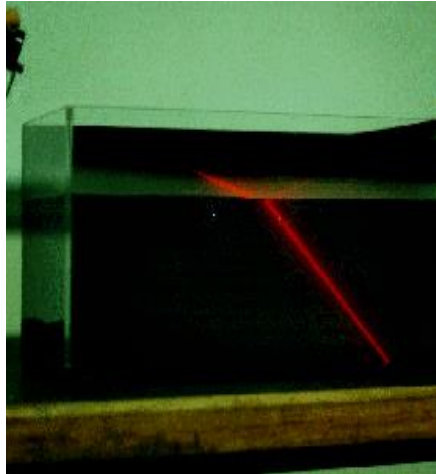
## **Einstein – magyarázata a kvantumelmélet alapján:**

- 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:

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

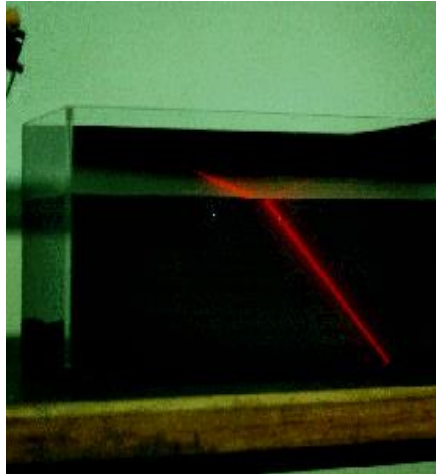


# A fény kölcsönhatása az anyaggal

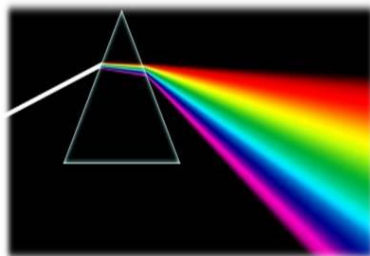




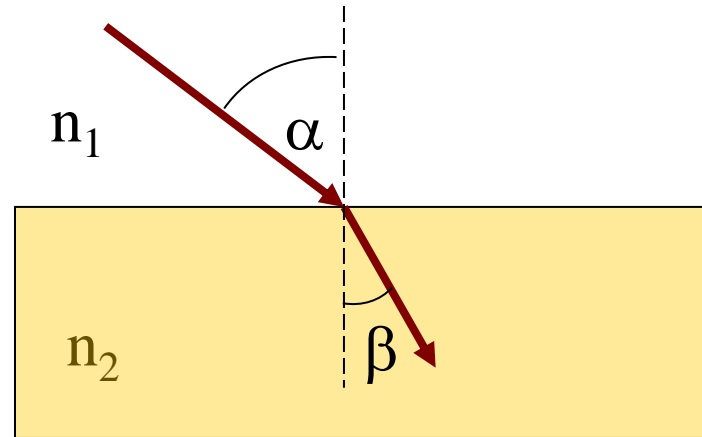
# Fénytörés



Fehér fény felbontása



Fermat-elv a legrövidebb időről



$$n_1 < n_2$$

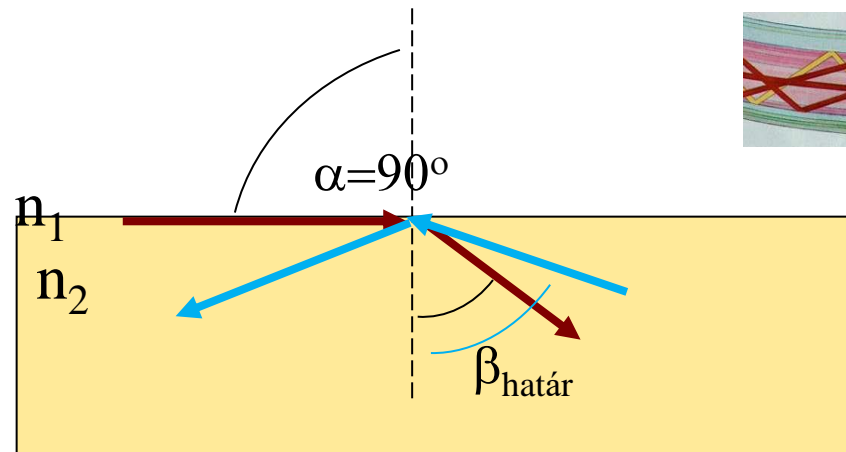
$$\alpha > \beta$$

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

## Snellius –Descartes törvény

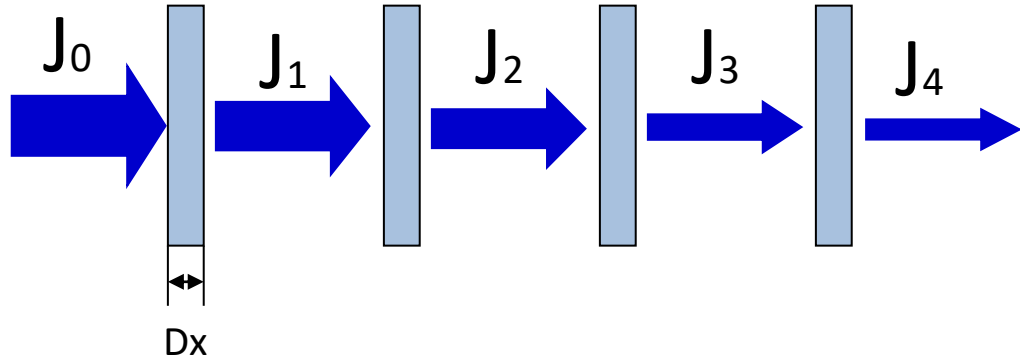
Határszög – **teljes visszaverődés**

$$\beta > \beta_{\text{határ}}$$



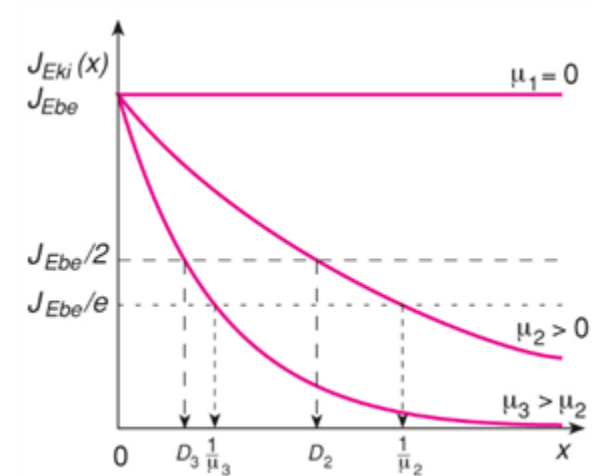
Optikai szál

# Az intenzitás gyengülésének törvénye



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

megoldása



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

**Integrált alak**

A közegen áthaladó sugárzás intenzitása a rétegvastagság exponenciális függvénye

**A gyengítési állandó (lineáris gyengítési együttható) függ:**

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

$J_0$ : a rétegbe belépő intenzitás [ $\text{W/m}^2$ ]  
 $J$ : intenzitás  $x$  [m] rétegvastagság után  
 $\mu$ : gyengítési állandó [ $1/\text{m}$ ]

# 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.

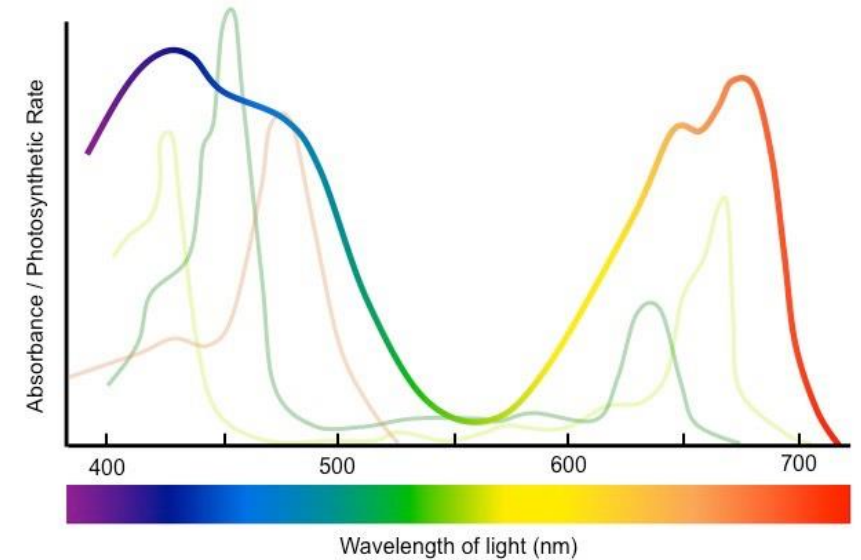
Optikai denzitás

dekadikus

molaris extinkciós állandó

[l mol<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>]

moláris koncentráció



**Diagnosztikában kiemelt  
jelentőség!!!  
Pl.: Élő szervezetből  
származó folyadék minták  
koncentráció  
meghatározása**

# Szóródás

Spektrális szóródási tényező

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

Rugalmas szóródás:  $\lambda$ ,  $f$ ,  $\varepsilon$  változatlan

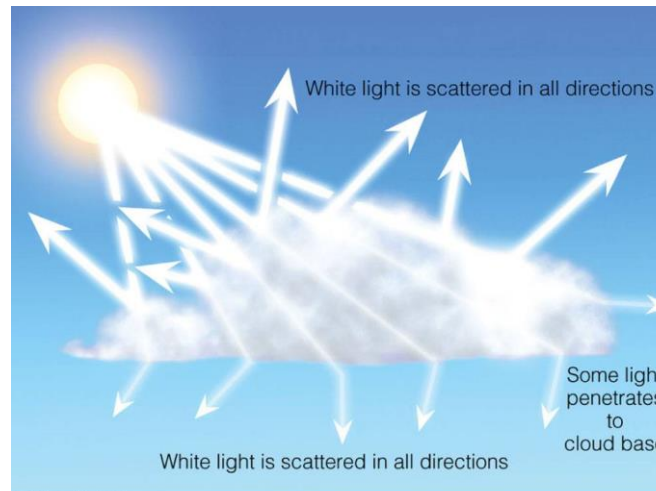
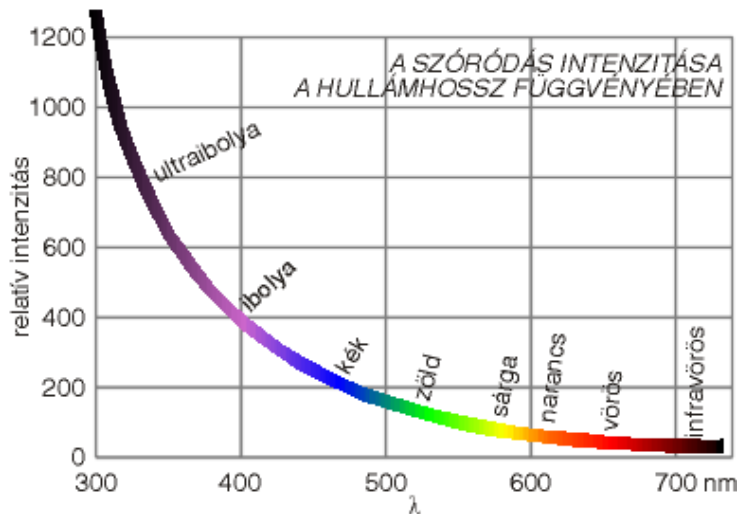
Rayleigh-szóródás

$$d \ll \lambda$$

$$d \geq \lambda$$

Mie-szóródás  
 $\sigma$  független  $\lambda$

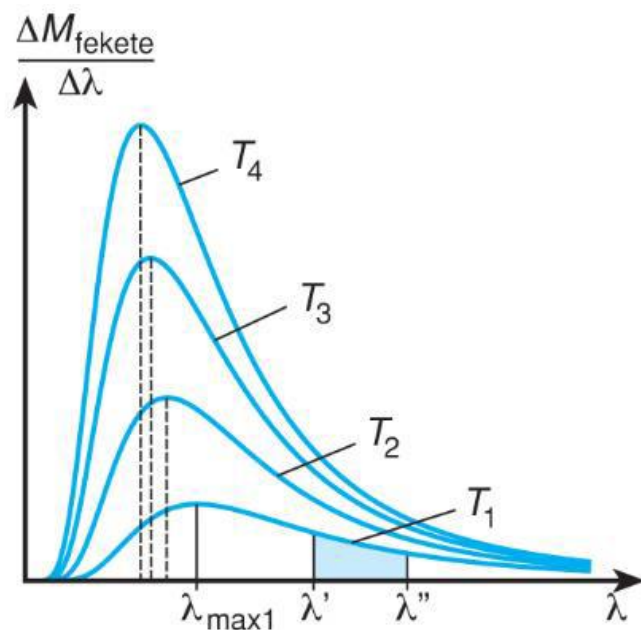
$$\sigma(\lambda) \sim \frac{d^6}{\lambda^4}$$



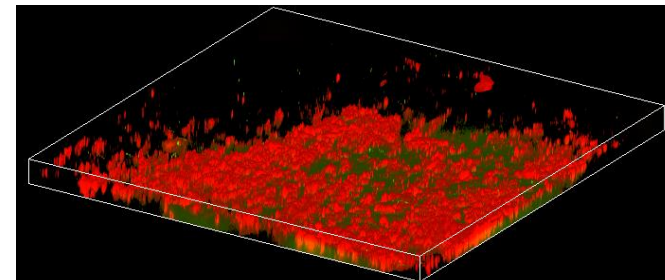
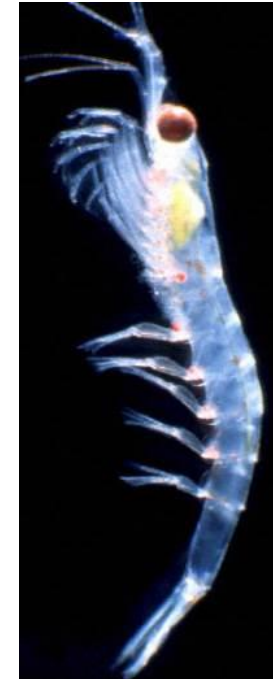
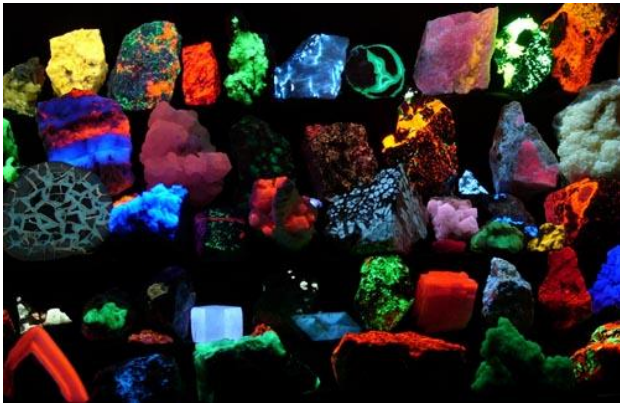
**Diagnosztika!!**  
(sejtszámlálás,  
azonosítás-áramlási  
citometria -  
**GYAKORLAT,**  
nanorészecskék  
karakterizálása)

# Fényemisszió formái

- Hőmérsékleti (feketetest) sugárzás → múlt heti előadásban
- Lumineszcencia
- Lézer fény létrehozása



# Lumineszcencia



<https://www.youtube.com/watch?v=7RxnIriKLRk>

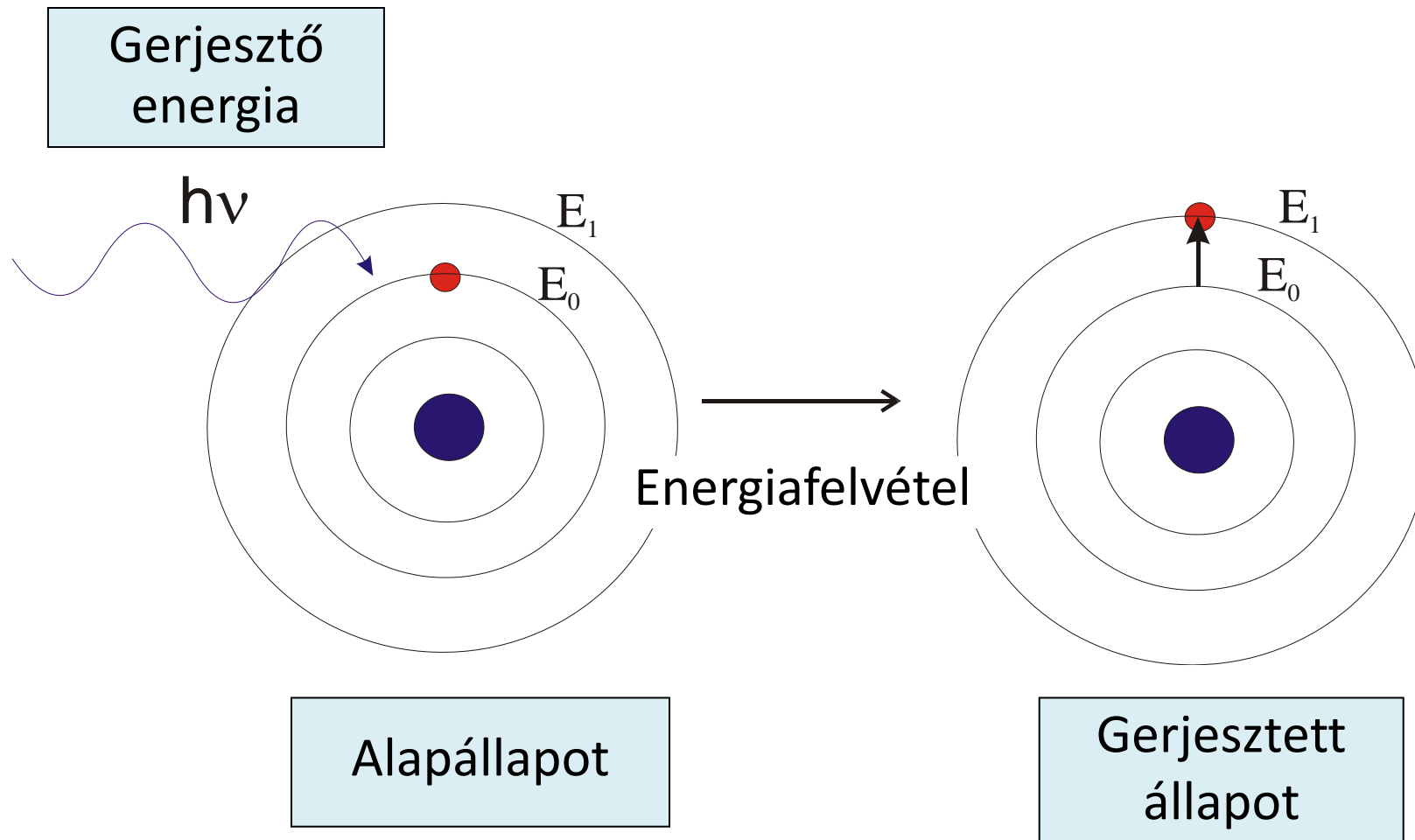


# Ismétlés

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

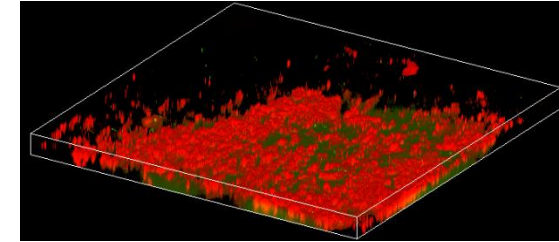
Egy atomon belül nem létezhet két olyan kötött elektron, amelynek mind a négy kvantumszáma megegyezik.

# Tekintsünk egy atomot



# Gerjesztés sokféleképpen lehetséges

-(fény) foton elnyelése: *fotolumineszcencia*



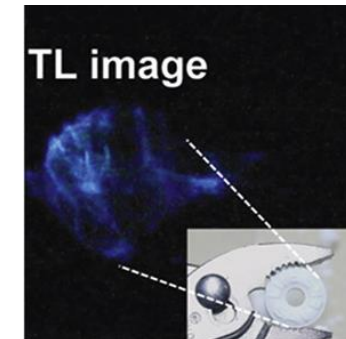
-kémiai reakció energiája: *kemo/bio-lumineszcencia*



-ütközés elektromos térrel gyorsított töltésekkel: *elektrolumineszcencia*



-mechanikai deformáció: *tribolumineszcencia*



-hőközlés: *termolumineszcencia*



$E_1$

$E_0$

külső héjon lévő  
elektron gerjesztése

$E_1$

$E_0$

elektron visszatérése  
alapállapotba

Spontán, külső  
hatás nélkül!!!!

## Lumineszcencia:

spontán fényemisszió gerjesztett elektron  
energiájának a rovására

$E_1$

$E_0$



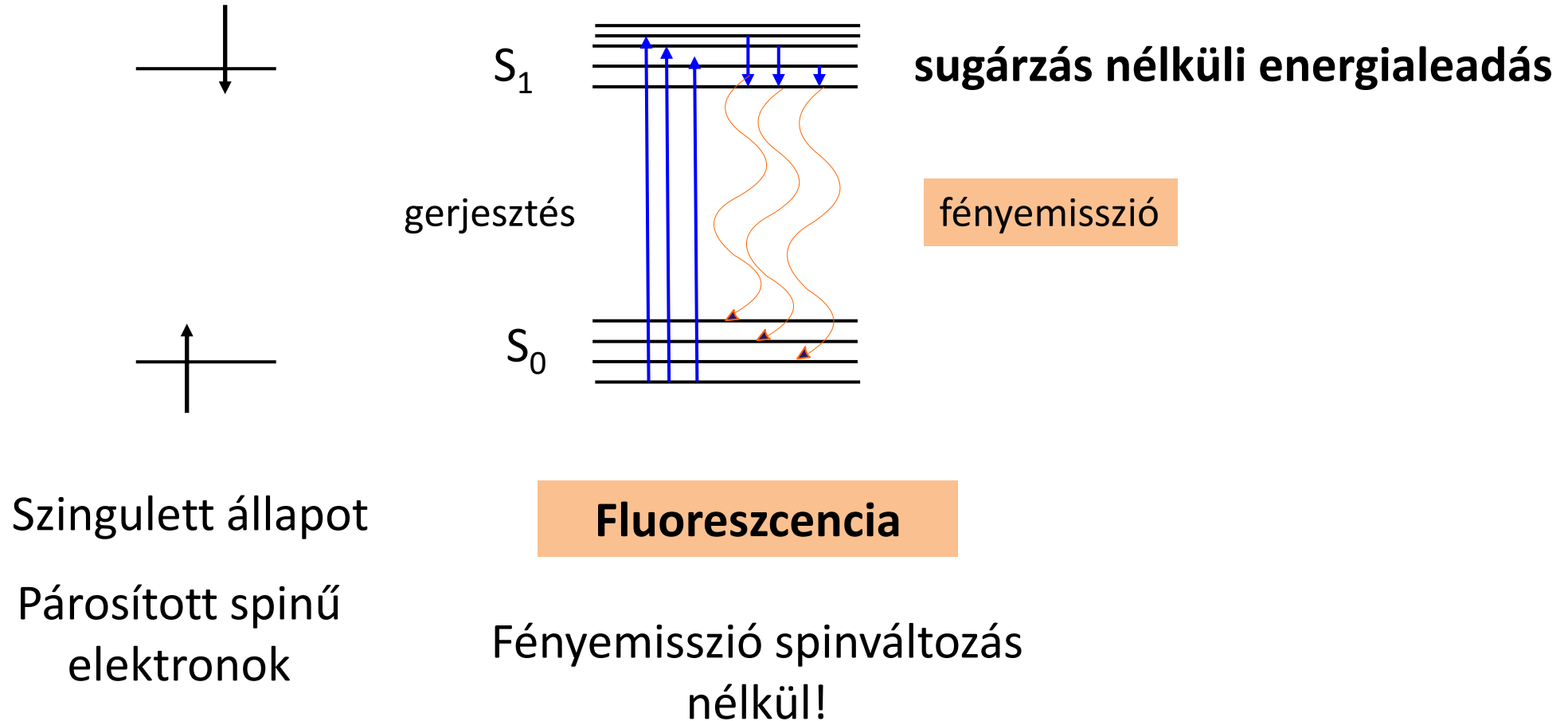
fényemisszió

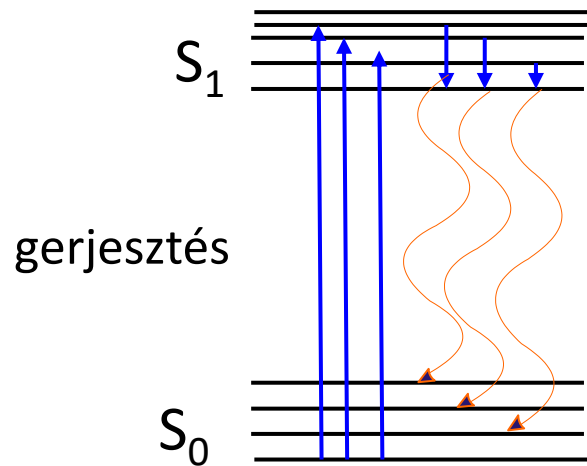
### Lépései:

- külső héjon lévő elektron gerjesztése
- elektron spontán visszatérése alapállapotba

$$hf = E_1 - E_0$$

# Tekintsük az atomok sokaságát kölcsönhatásban egymással és a környezetükkel





gerjesztés

## Kasha-szabály:

a fényemisszió a legalsó  
gerjesztett elektronállapot  
legalsó rezgési nívójáról történik



## Fluoreszcencia

Fényemisszió spinváltozás  
nélkül

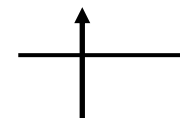
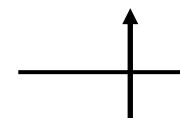
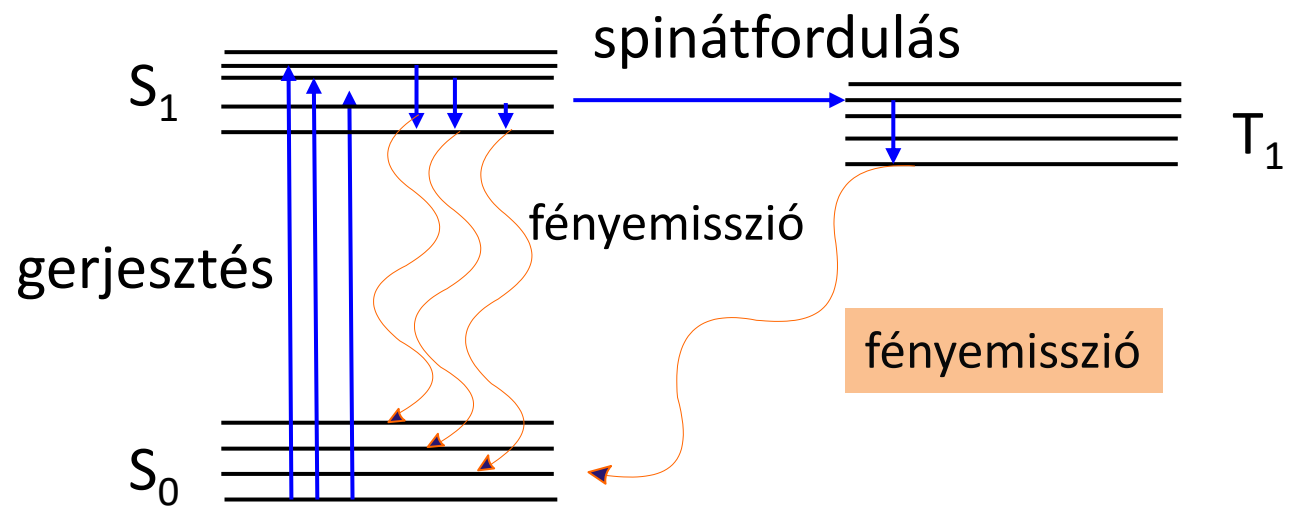
$$E_{\text{gerjesztés}} \geq E_{\text{fluoreszcencia}}$$

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

## Stokes-eltolódás







**Foszforeszcencia**

Fénymisszió spinváltozás  
után

Triplett állapot

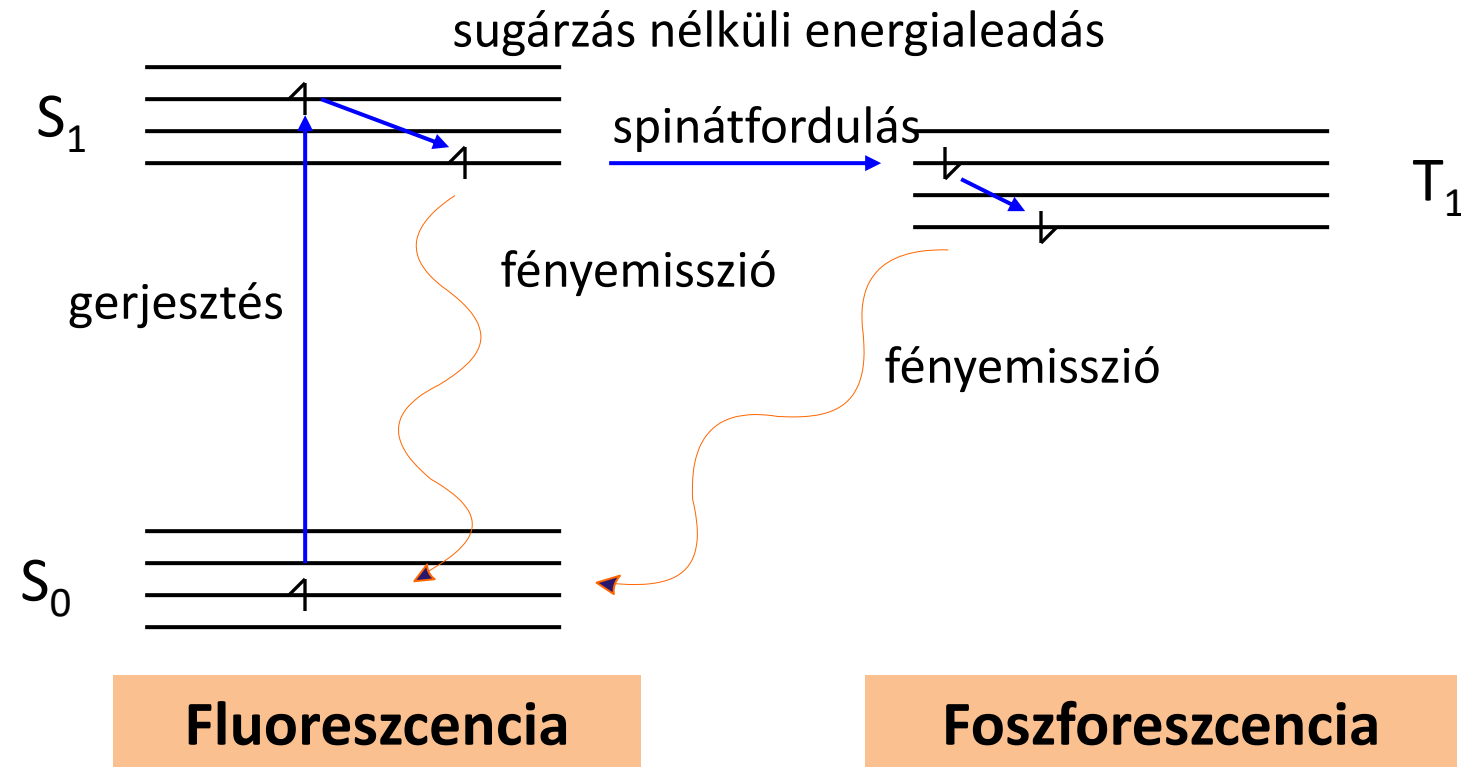
Párosítatlan  
spinű elektronok

**Metastabil állapot**

hosszú élettartamú, közbülső állapot

**Jablonski diagramm**

# Emittált foton energiájának jellemzése



## Stokes-eltolódás

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

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

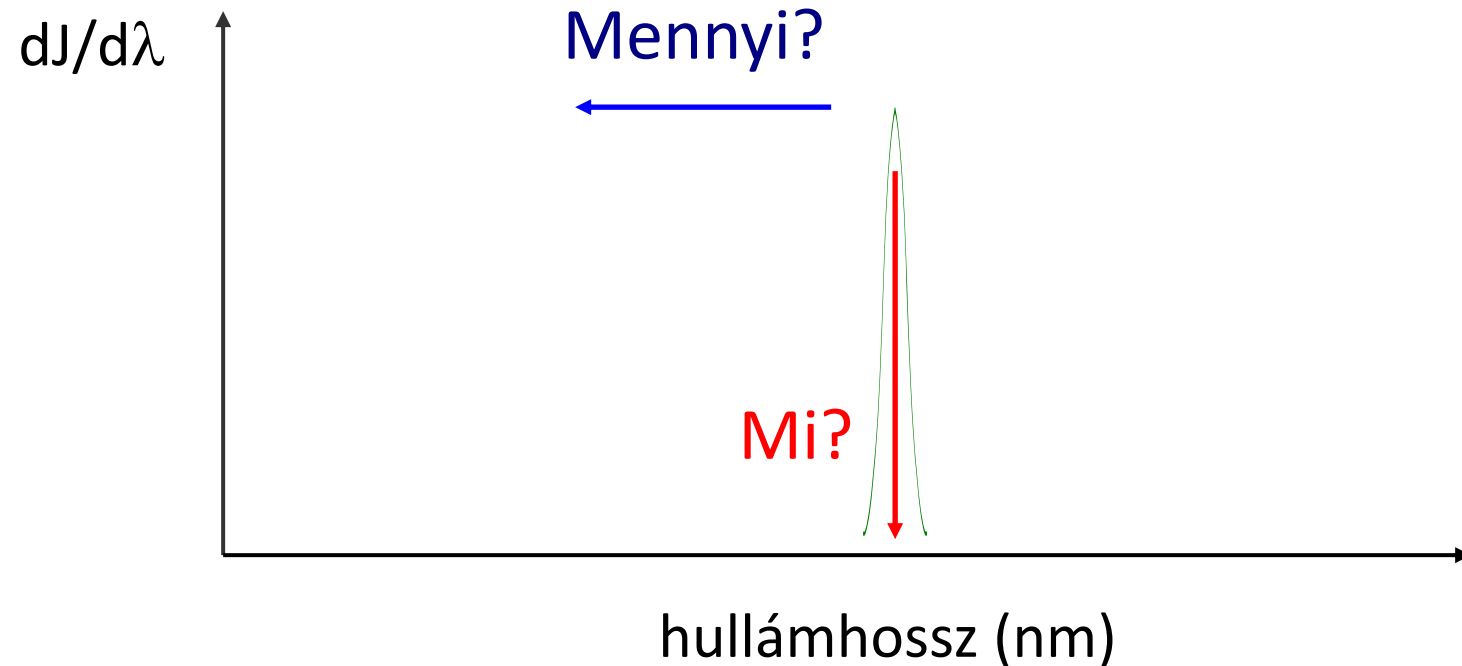
# Emisszió jellemzése

Emittált intenzitás hullámhossz szerinti eloszlása

Emissziós spektrum

Atomok esetében:

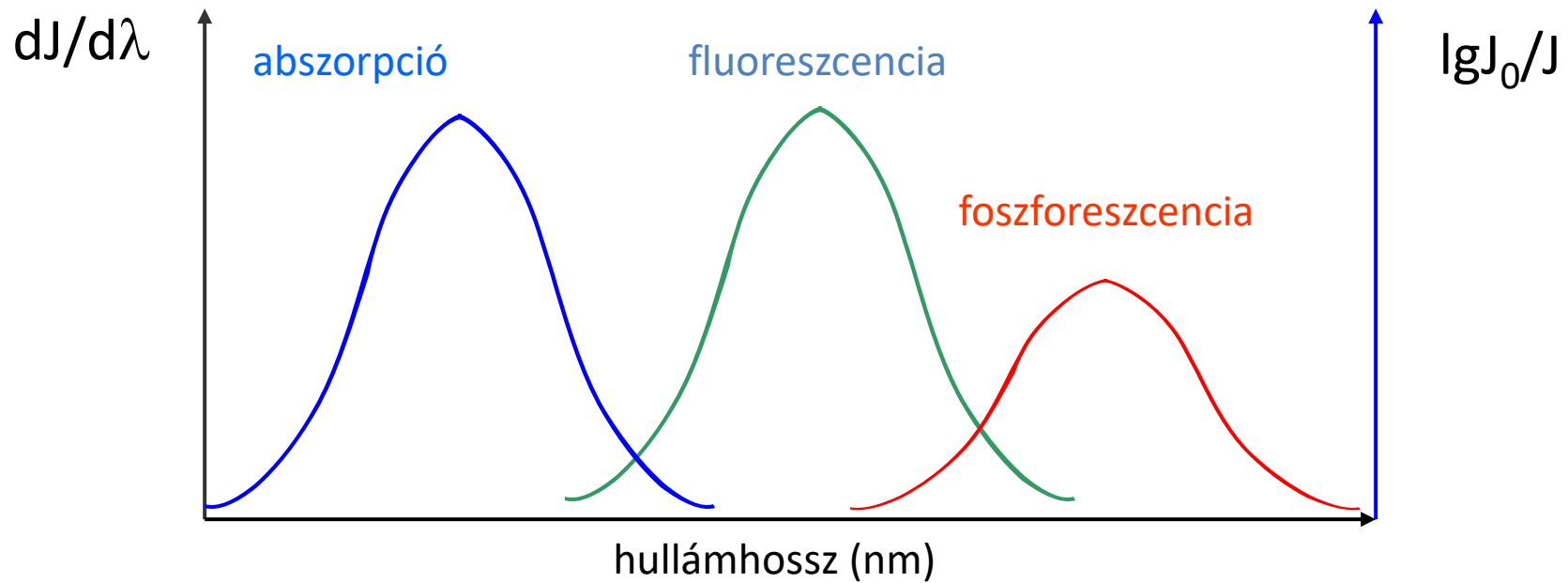
vonalas spektrum



# 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

77 K

Fluoreszcencia  
gerjesztési spektrum

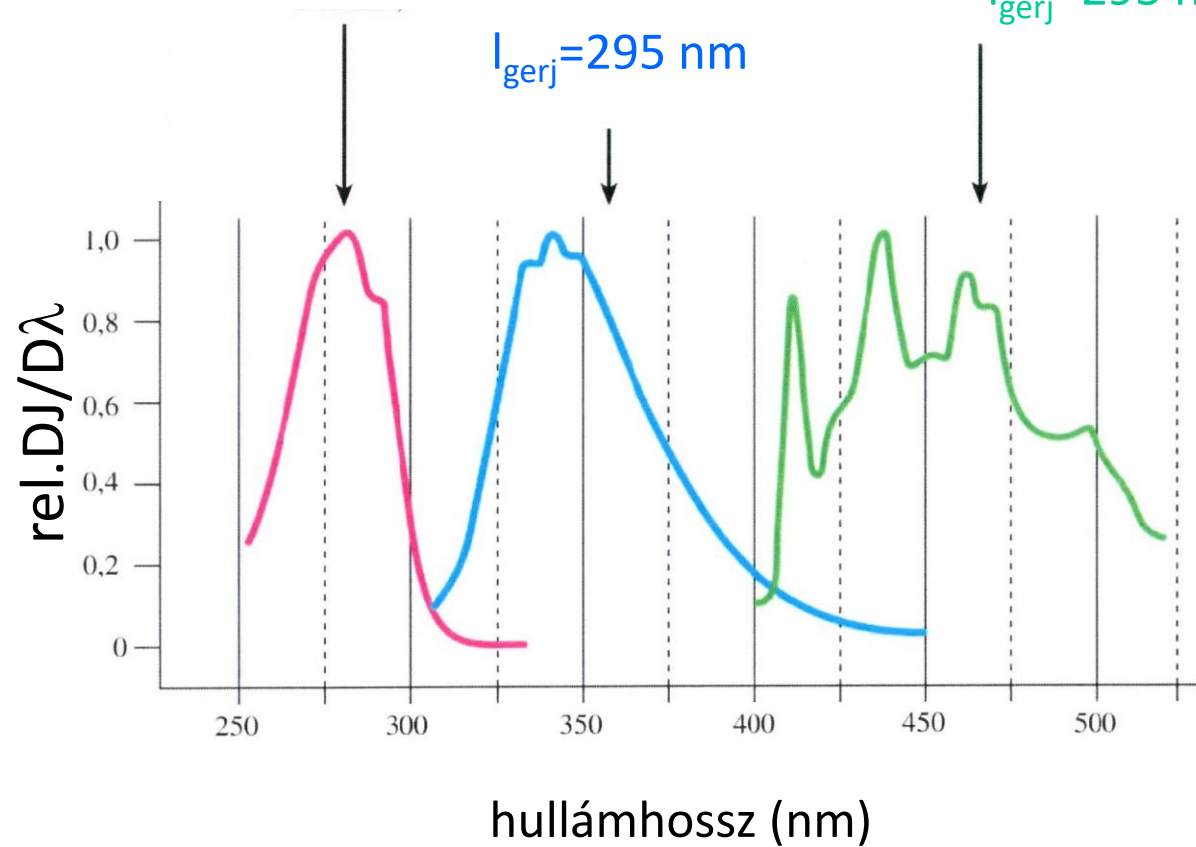
$I_{em}=340$  nm

Fluoreszcencia  
emissziós spektrum

$I_{gerj}=295$  nm

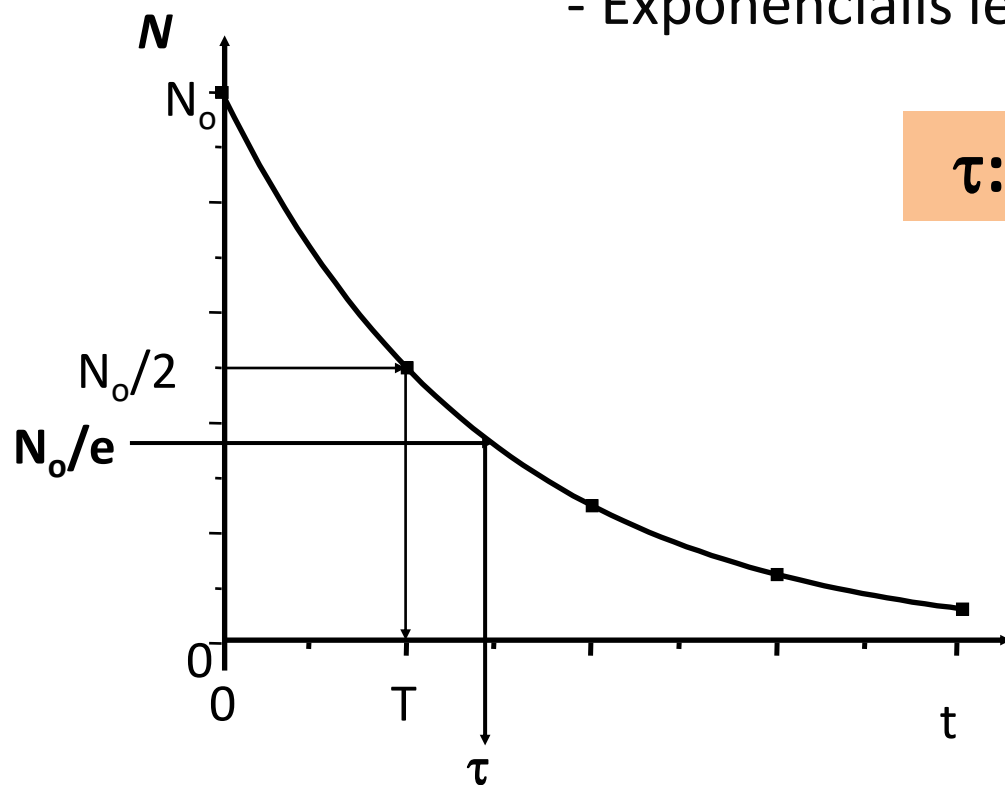
Foszforeszcencia  
emissziós spektrum

$I_{gerj}=295$  nm



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

- Exponenciális lecsengés



**$\tau$ : Élettartam**

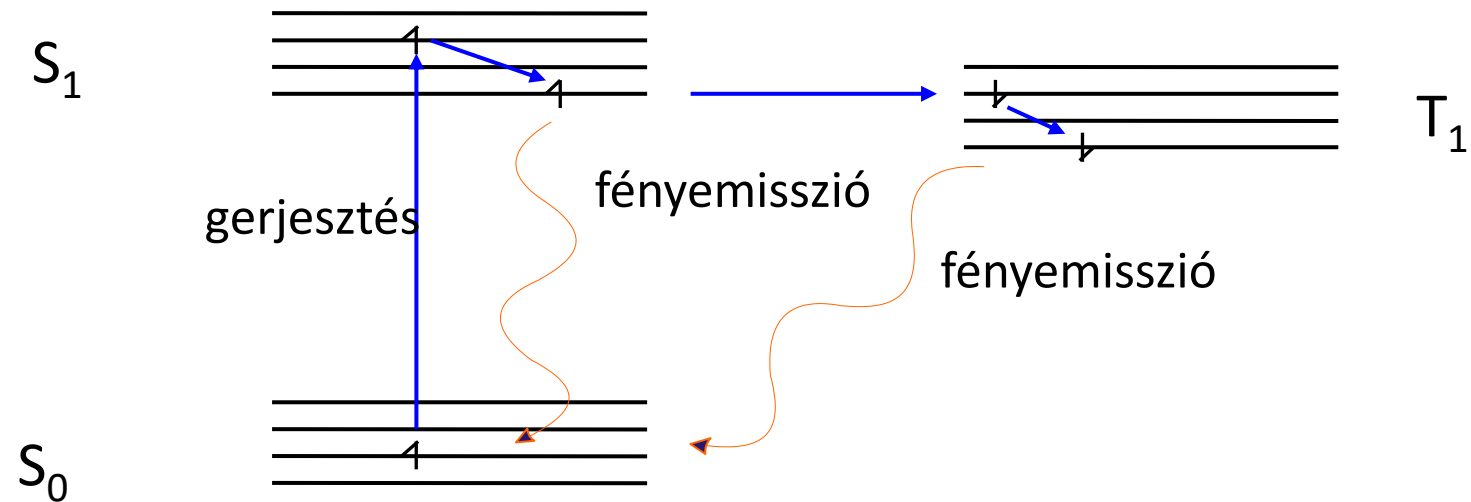
az az idő, ami alatt a gerjesztett elektronok száma a gerjesztés megszűnése után  $e$ -ed részére csökken



# Gerjesztett állapot időtartamának jellemzése

## Élettartam

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



**Fluoreszcencia**

rövid

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

**Foszforeszcencia**

hosszú

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

# Minden gerjesztést fényemisszió követ?

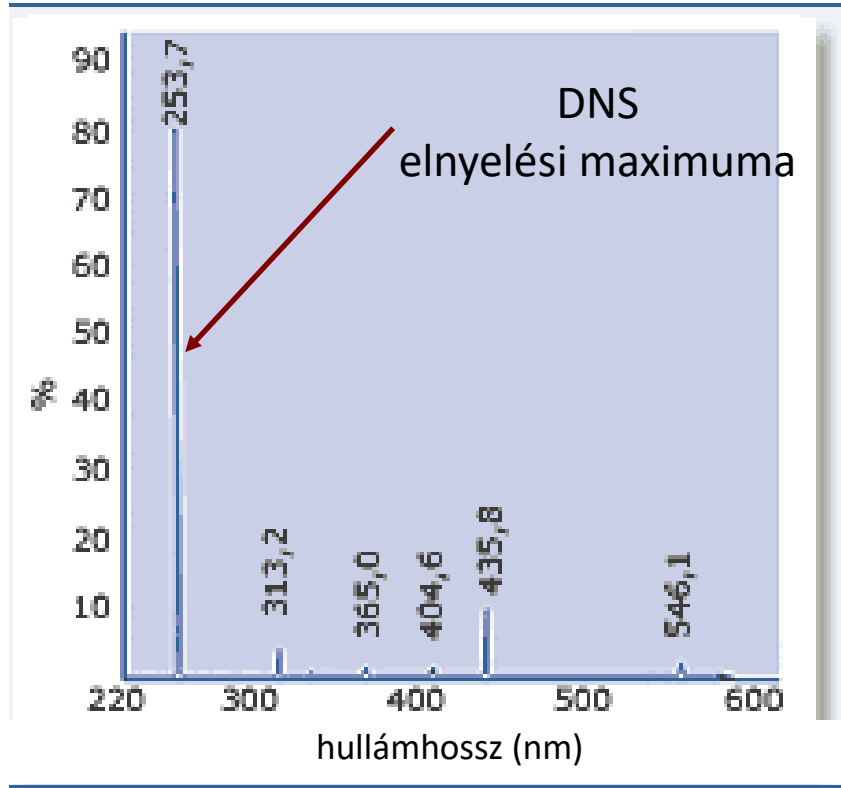
- Környezetükkel kölcsönhatásban levő molekulák (oldatban, sejtekben, szövetekben) elektronjai igen ritkán adják le *fotonemisszióval* a gerjesztéskor felvett energiájukat.
- Sokkal valószínűbb, hogy az energialeadás sugárzás nélkül, vagyis hő keltésével vagy kémiai reakciók útján történik.

## A lumineszcencia alkalmazási területei

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

# Fényforrások

Kisnyomású Hg-gőz lámpa



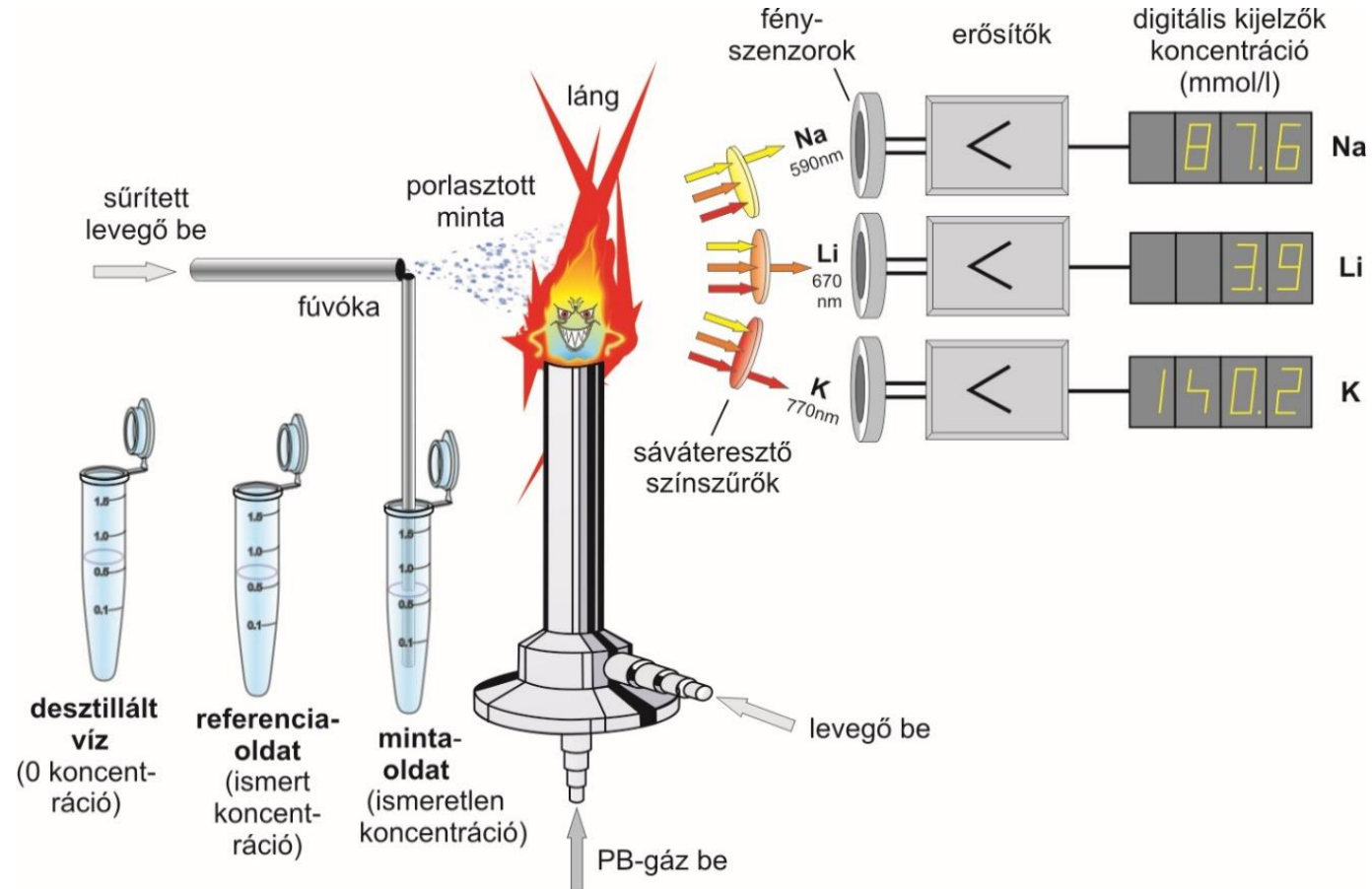
emissziós  
spektruma



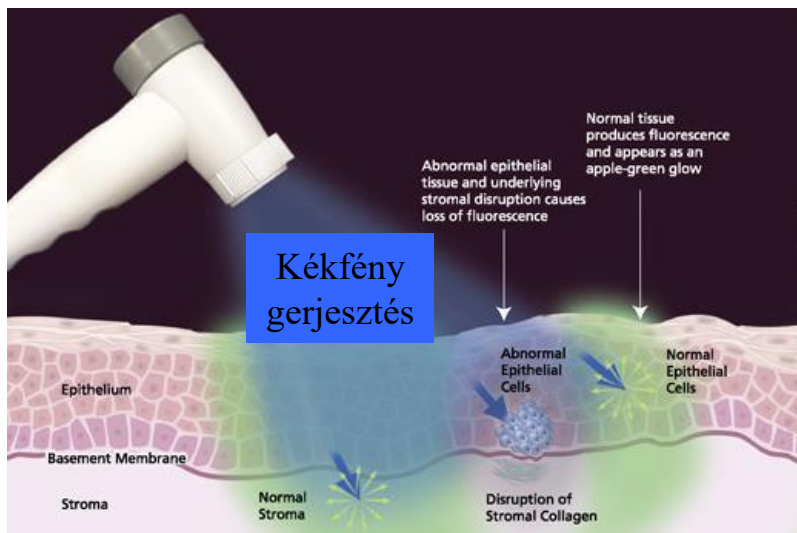
Sterilizálás  
„germicid lámpa”



# Diagnosztika-Lángfotométer



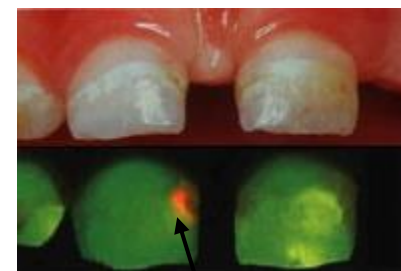
$K^+$ ,  $Li^+$  és  $Na^+$  mennyiségi meghatározása



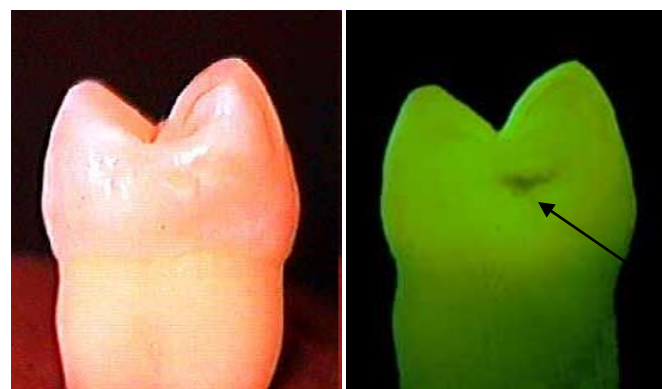
Egészséges és malignus szövetek eltérő fluoreszcens tulajdonságai

## Diagnosztika

Tejfogak felszíne  
natív állapotban és fluroescens  
festés után



*Aktív caries*



Fog felszíne  
natív állapotban és fluroescens festés után

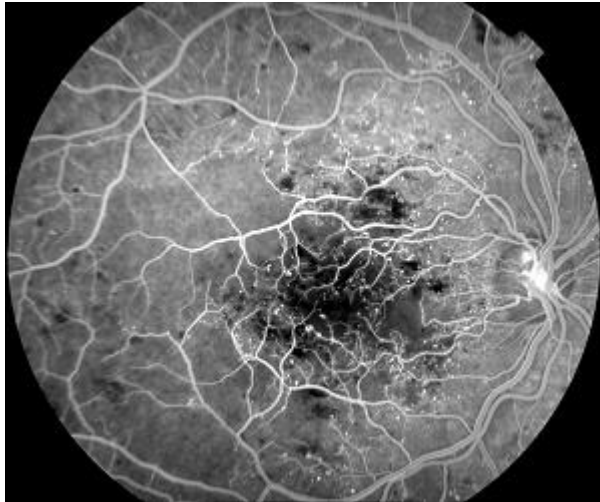
*Kezdődő  
caries*

# ***Fluoreszcencia az orvosi gyakorlatban***

Fluoreszcens jelzés lehetősége

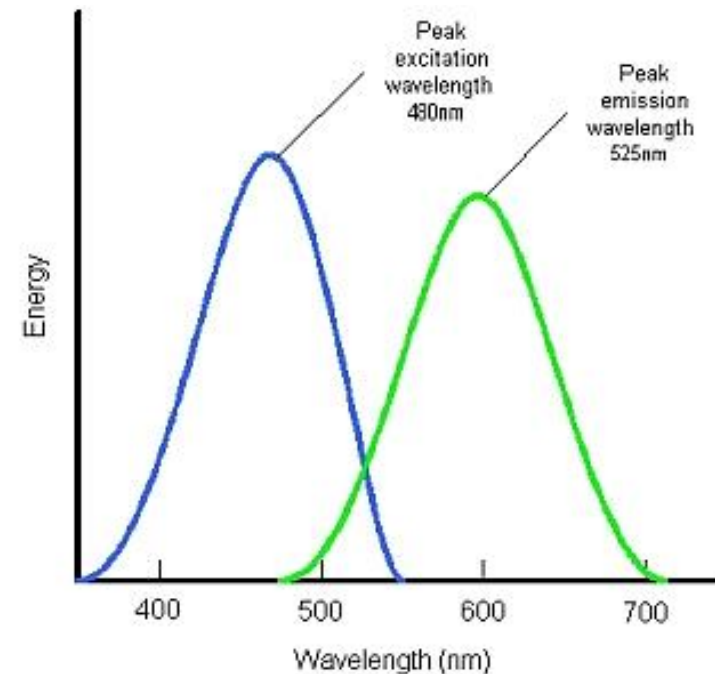
- Alapja: a szövetekben igen kevés fluoreszkáló molekula van → szelektíven kötődő fluoreszcens festés után a kötődés helyét fluoreszcencia alapján leképezhetjük
- A festék gerjesztéséhez megfelelő fotonenergiájú (hullámhosszú) fényforrás szükséges

## ***Angiográfia fluoreszcens festéssel***



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

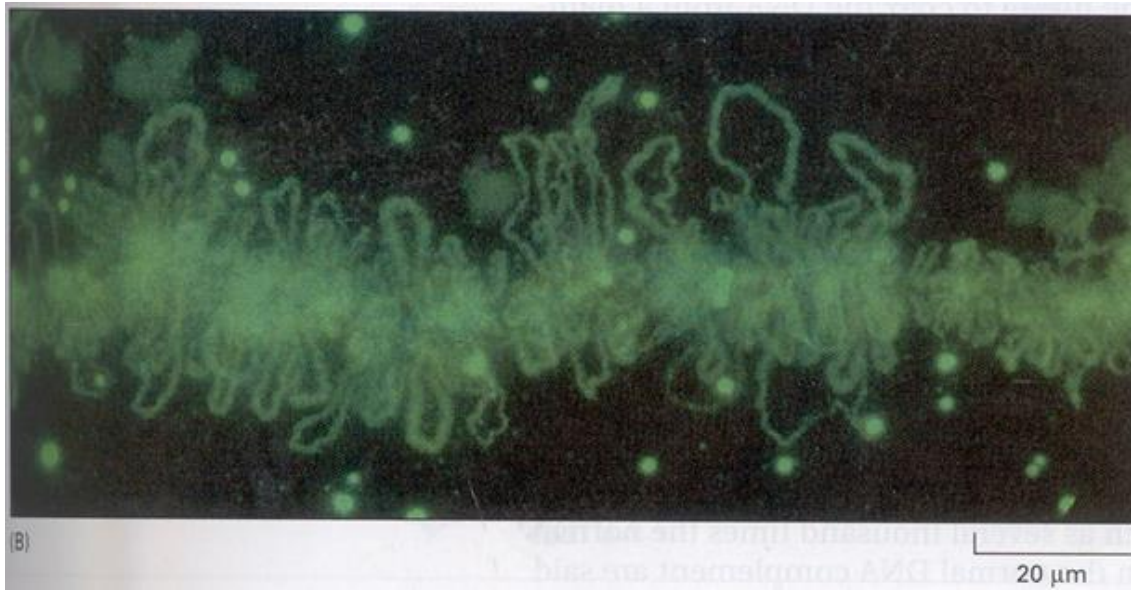
Fluoreszcein abszorpciós és emissziós spektruma





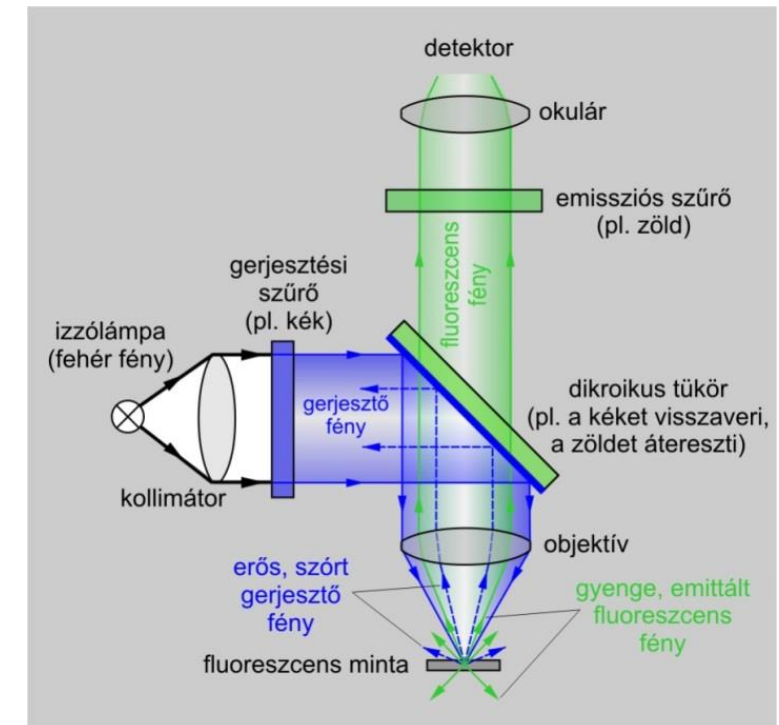
# Fluoreszcencia-mikroszkópia → élettudományi kutatások

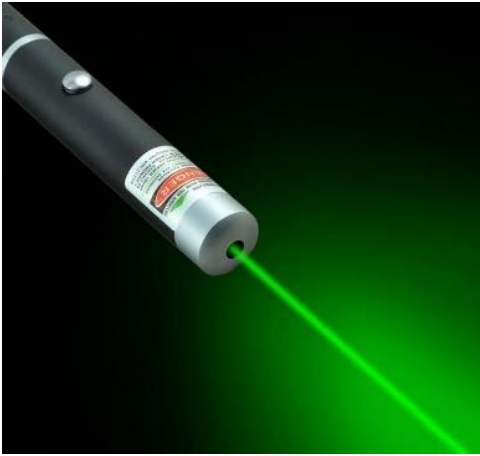
*Kellermayer professzorúr előadása*



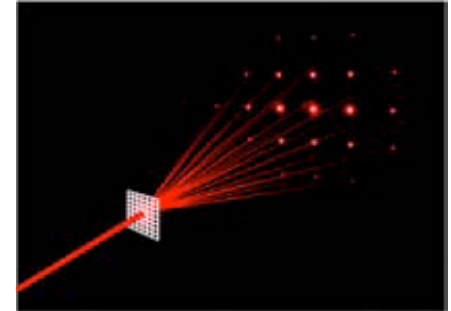
A gén-expresszió egy állapota: az RNS-re kötődő fehérjék zöld fluoreszcenciája alapján az RNS kirajzolódik.

Konfokális Mikroszkóp: mélységbeli felbontás





# Laser / lézer

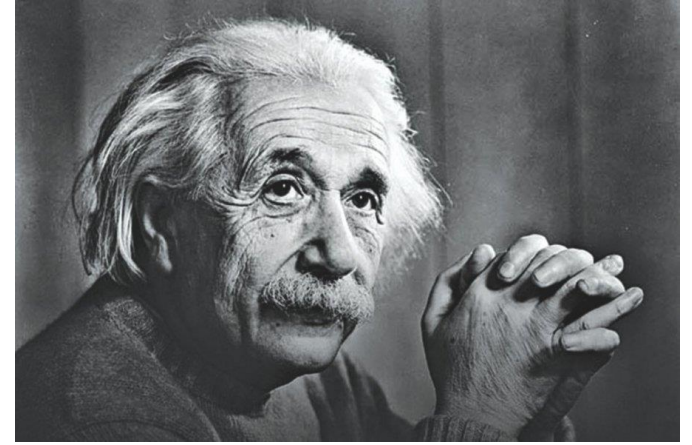


light **a**mplification by **s**timulated **e**mission of **r**adiation

**Fényerősítés a sugárzás indukált emissziója révén**

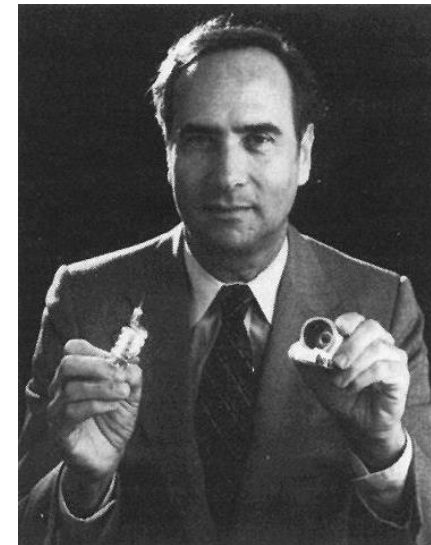
# Egy kis történelem

**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**



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



**Zhores Ivanovich Alferov**



**Herbert Kroemer**

Fizikai Nobel-díj 2000  
A félvezető lézardiódákért

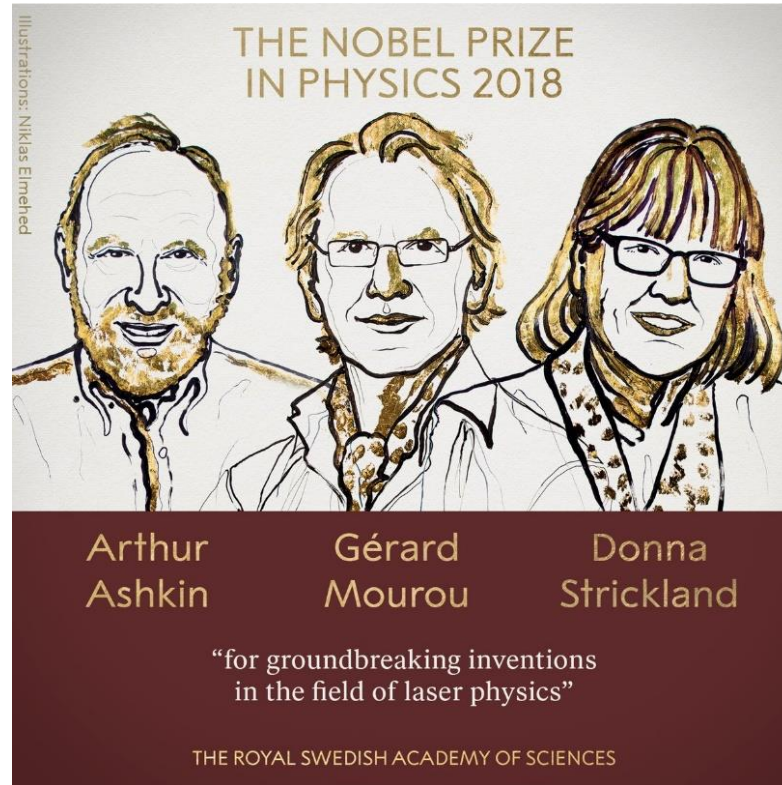


## Nobel díj 2018

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

Ashkin,

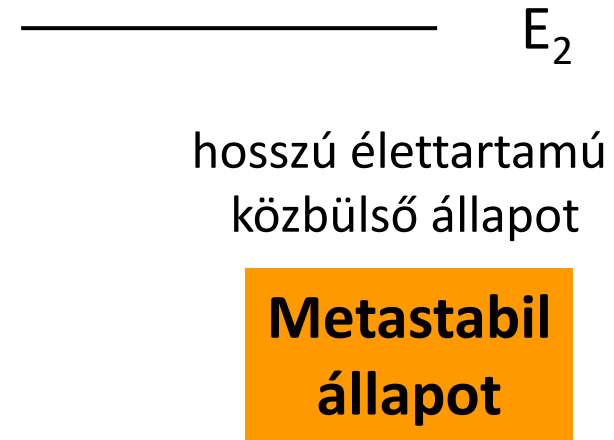
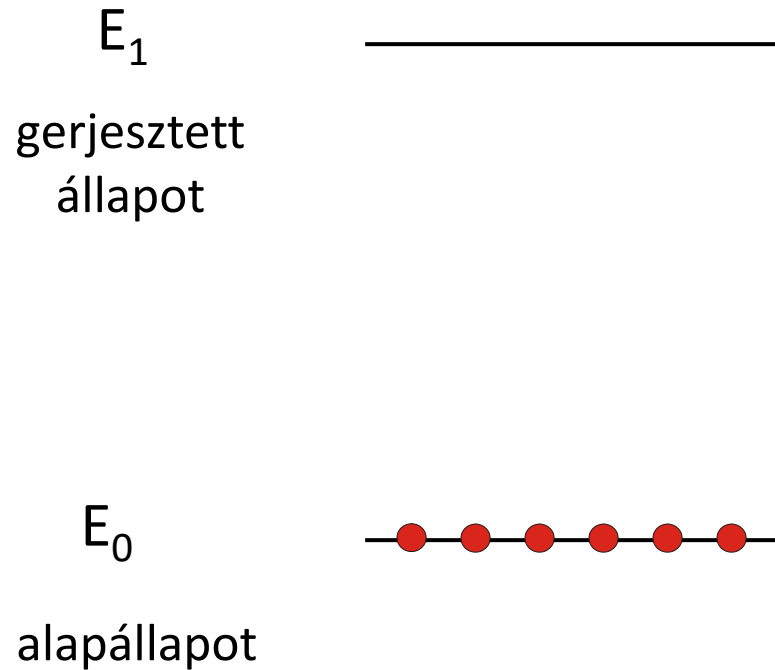
az optikai csipeszek létrehozásáért, illetve azok biológiai rendszerekben történő alkalmazásáért kapta meg az elismerést. Az optikai csipesz különlegessége, hogy lézerujjaival képes megragadni az apró részecskéket, például az atomokat.



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 bevéágásokat ejteni és lyukakat fúrni a különböző anyagokon.

# A lézerfény előállításának feltételei és lépései

# Speciális elektron energia állapotok



Kicsi az átmeneti valószínűség



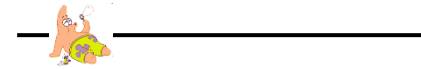
# Elektronállapotok betöltöttsége



*Termikus egyensúly*

Boltzmann eloszlás szerint:

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

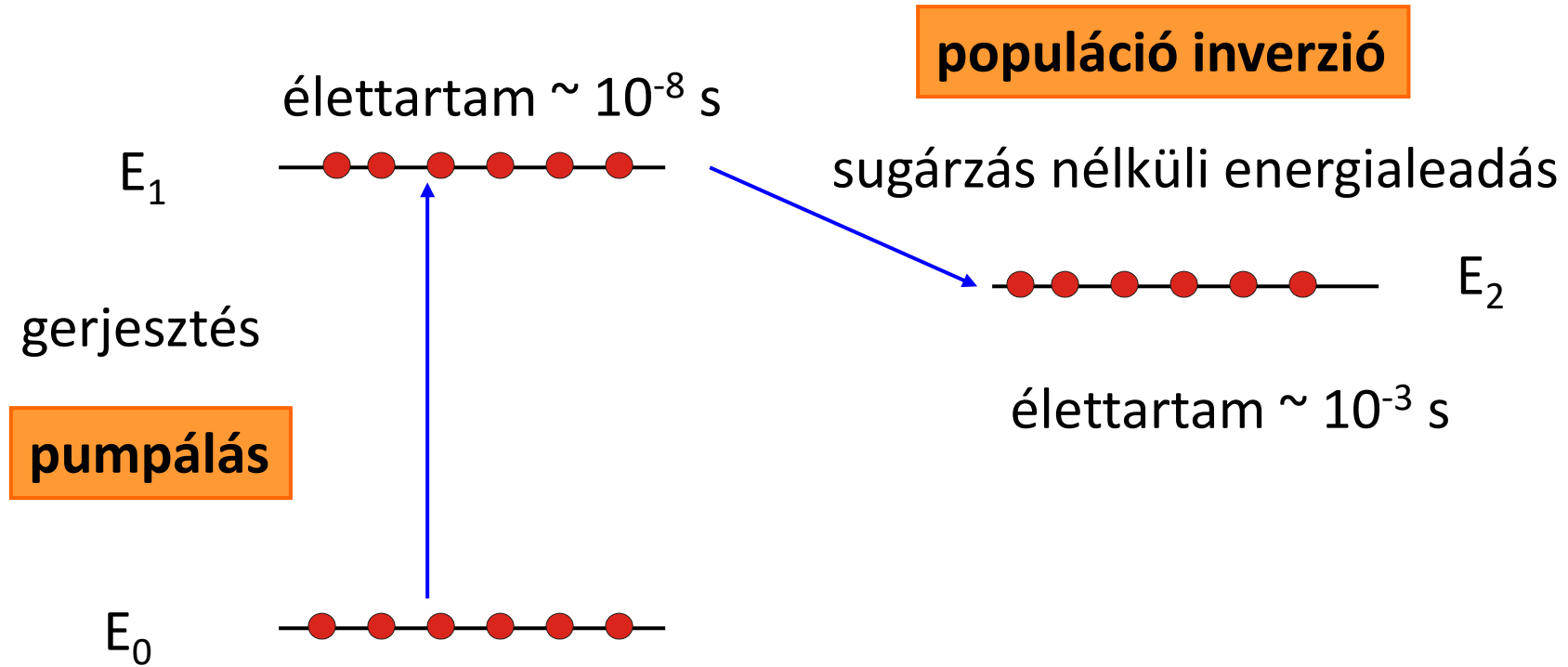


***Populáció inverzió***

“fordított” betöltöttség

Boltzmann eloszlásról részletesebben jövőheti előadáson.

# A lézerfény keletkezésének lépései



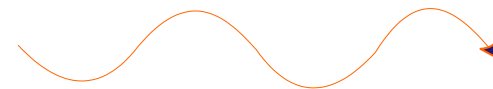
## Spontán emisszió

$E_1$  \_\_\_\_\_

$E_0$  \_\_\_\_\_●

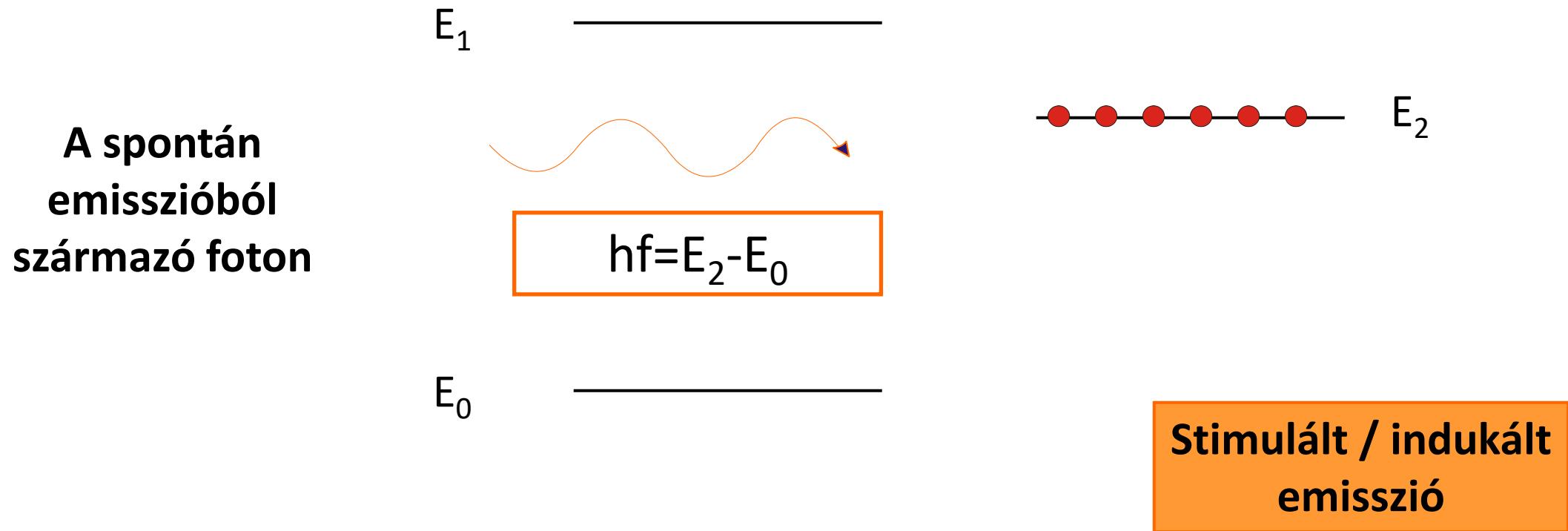
●●●●●●

$E_2$

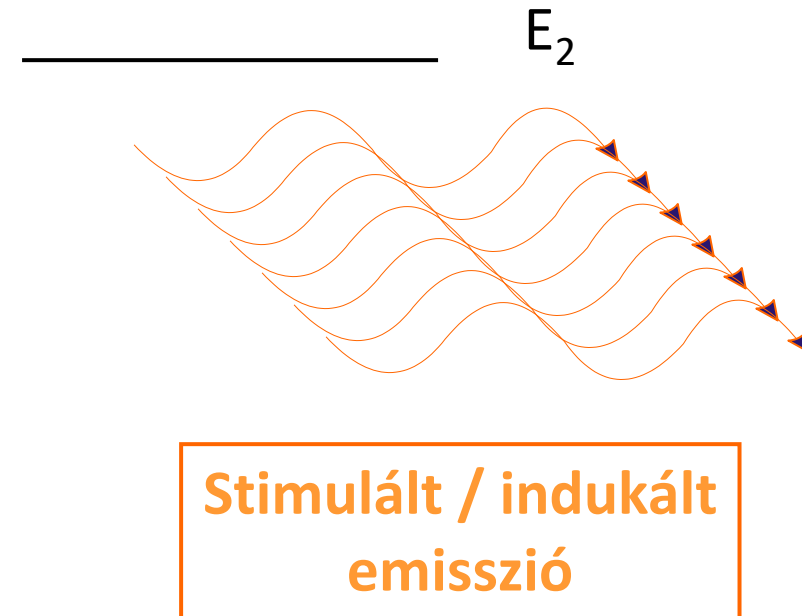
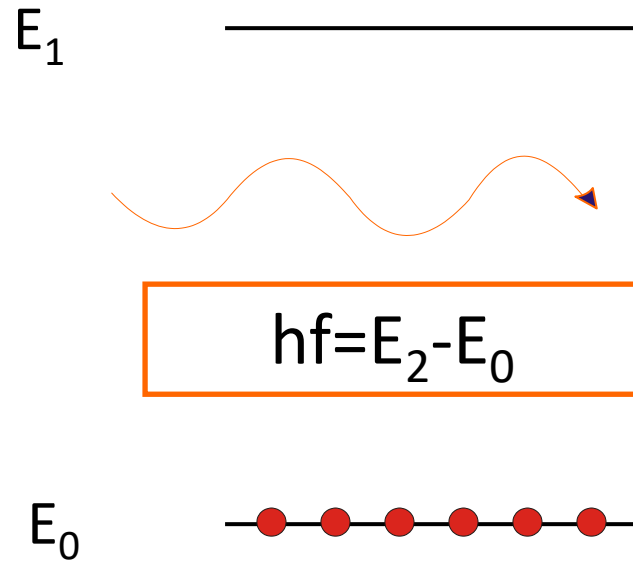


spontán  
fényemisszió  
*kis valószínűséggel*

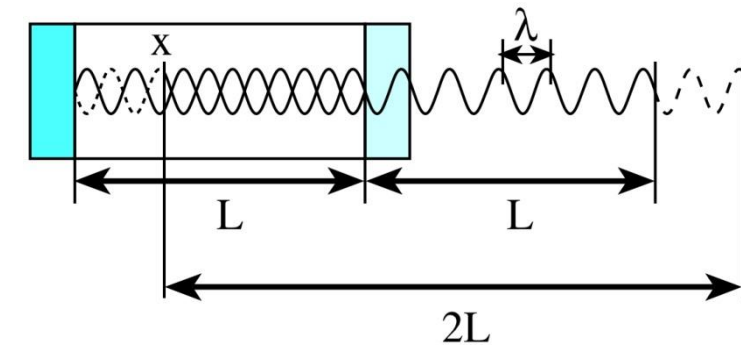
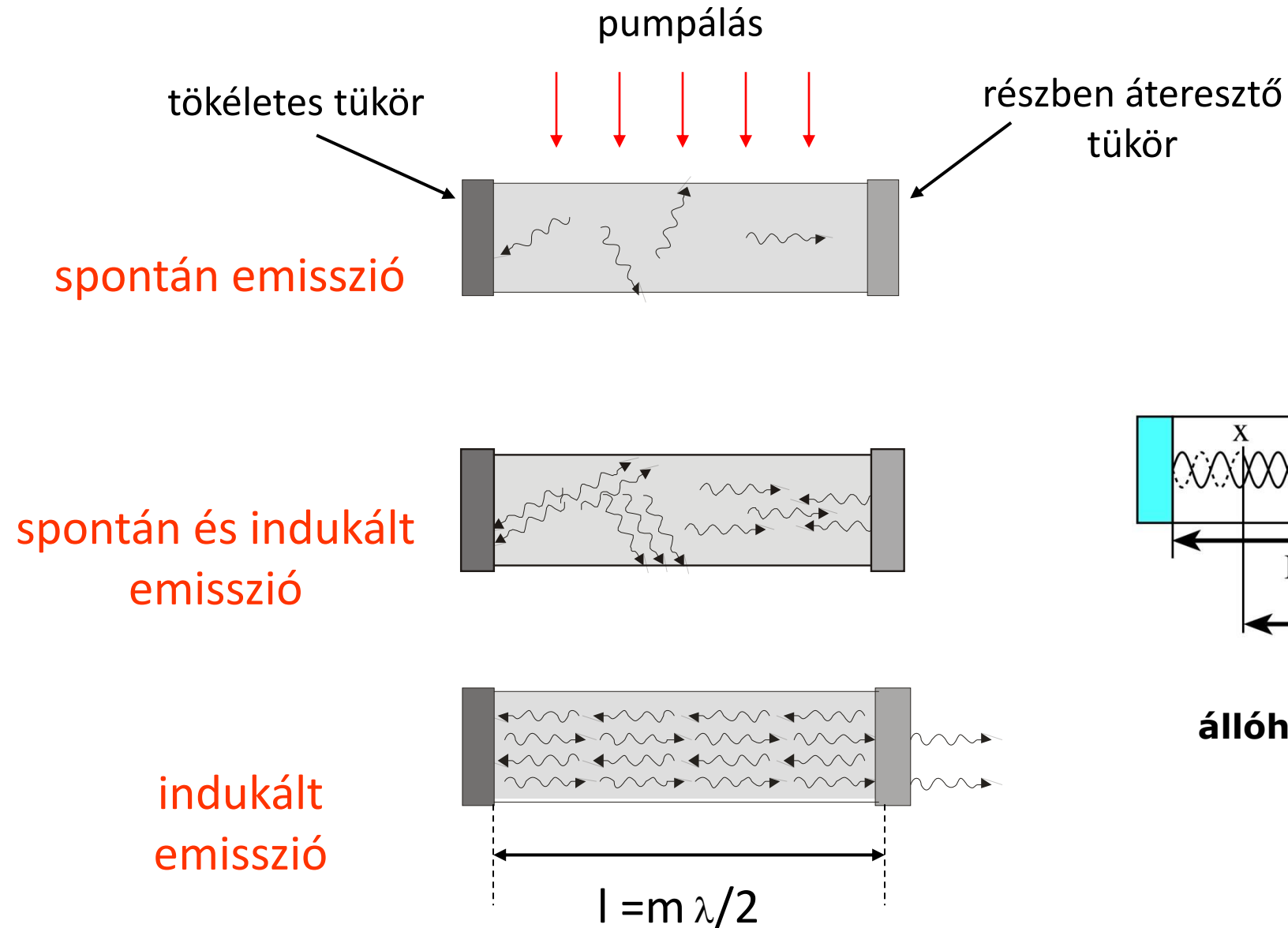
# A metastabil nívón lévő elektronok relaxációjának stimulálása



# A metastabil nívón lévő elektronok relaxációjának stimulálása



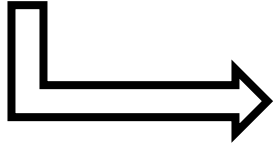
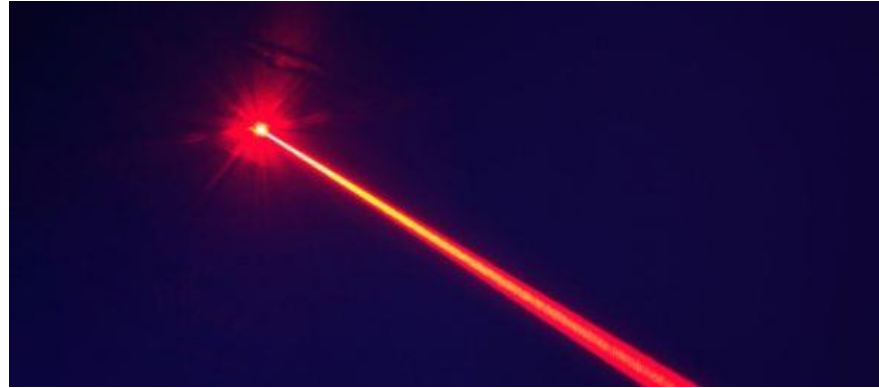
# Lézerek működéseinek feltétele: Lézercső – optikai rezonátor



**állóhullámok kialakulása**

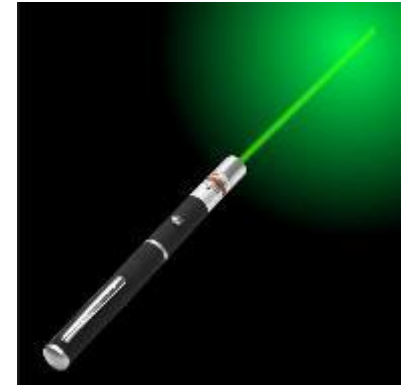
Az indukáló és az indukált emisszió révén keletkezett fotonoknak azonos az:

- energiája
- fázisa
- rezgési síkja
- terjedési iránya.



Ezért az indukált emisszióval keletkezett fény:

- Monokromatikus
- koherens
- poláros
- jól fókuszálható



Rövid impulzusidő lehetséges –  $ps$ ,  $fs$

Nagy teljesítmény érhető el–  $kW$  -  $GW$

Nagy teljesítménysűrűség lehetséges

# A lézerek típusai

## Anyaguk szerint:

szilárd  
gáz  
festék  
félvezető

## Működésük szerint:

impulzus  
folyamatos

## Teljesítményük szerint:

nagy teljesítményű  
kis teljesítményű

*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

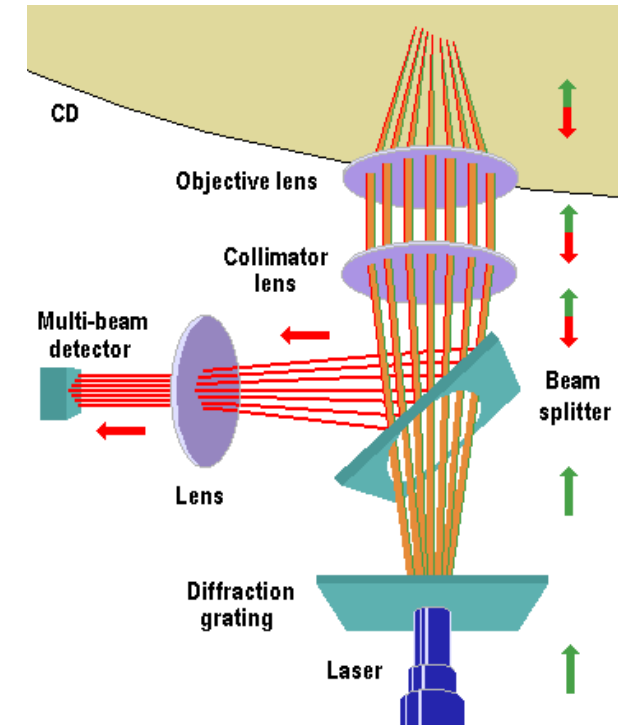
5 - 10 mW – DVD lejátszó

100 mW – CD-író

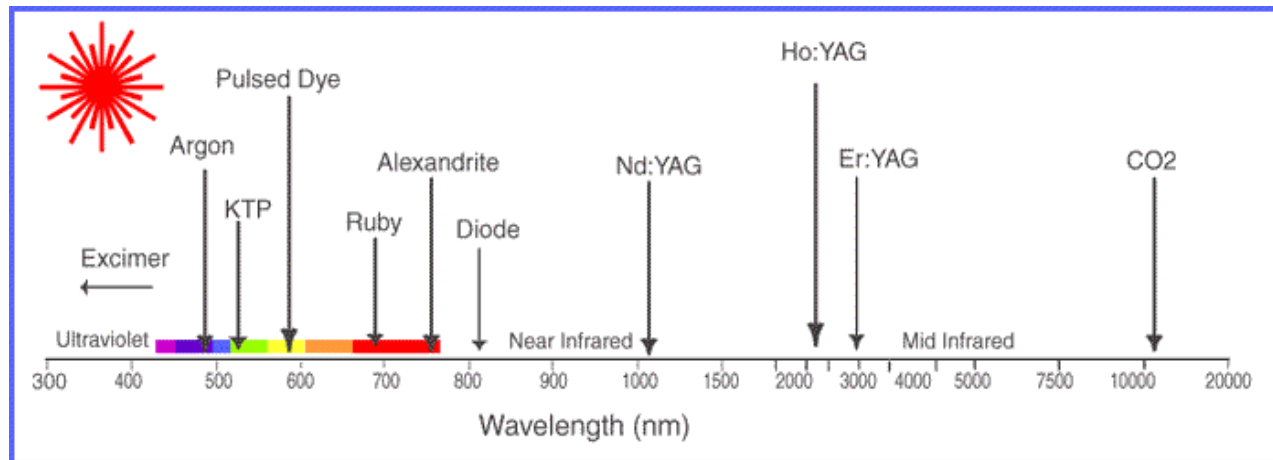
250 mW – DVD-író

1-20 W – mikro-megmunkálásban használt szilárdtest lézerek

**30-100 W – tipikus sebészeti lézerek**



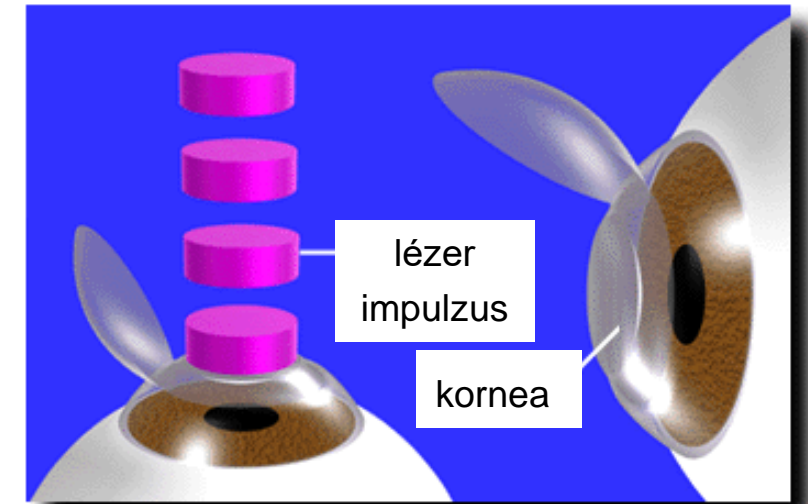
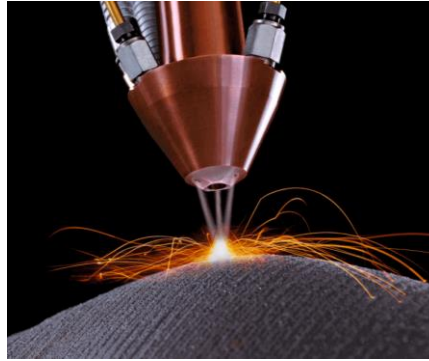
<https://www.youtube.com/watch?v=j0T8Fd9iQqs>



# A lézerek alkalmazása

*A kiválasztás szempontjai:*

hullámhossz  
teljesítmény  
üzemmód



## Felhasználási területek

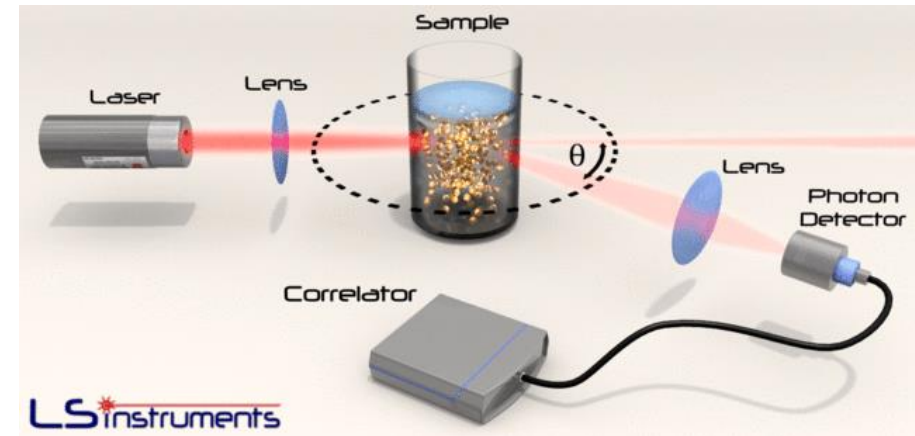
orvos gyakorlat – sebészet, szemsebészet, bőrgyógyászat,  
kozmetika, fogászat, biostimuláció, reumatológia  
fotodinamikus terápia

technika, ipar

jelátvitel, kommunikáció

**kutatás**, szerkezetvizsgálat

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

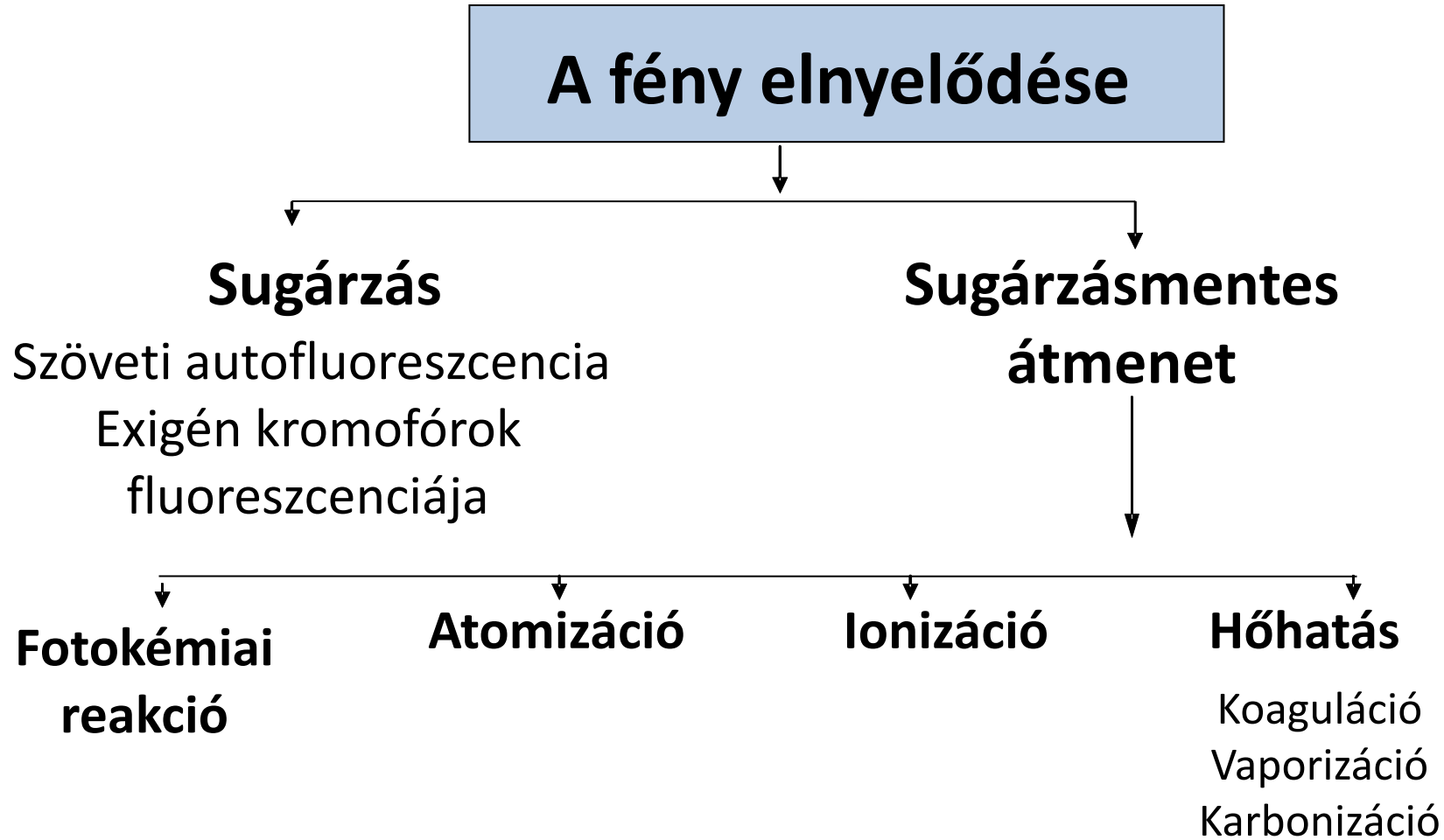




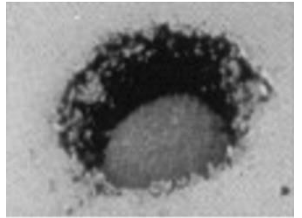
## Leggyakoribb lézerek az orvosi gyakorlatban

Típus	$\lambda$ 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

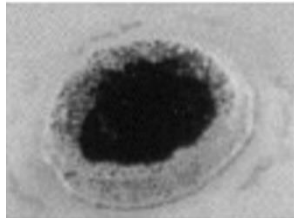
# Fény által indukált folyamatok a szövetekben



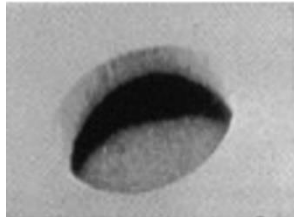
vaporizáció



karbonizáció

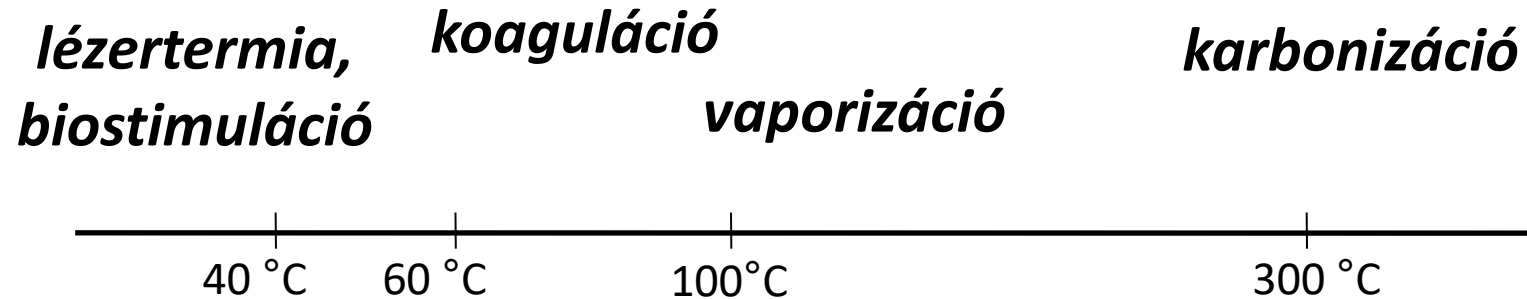


Atomizáció  
távoli UV  
fénnyel

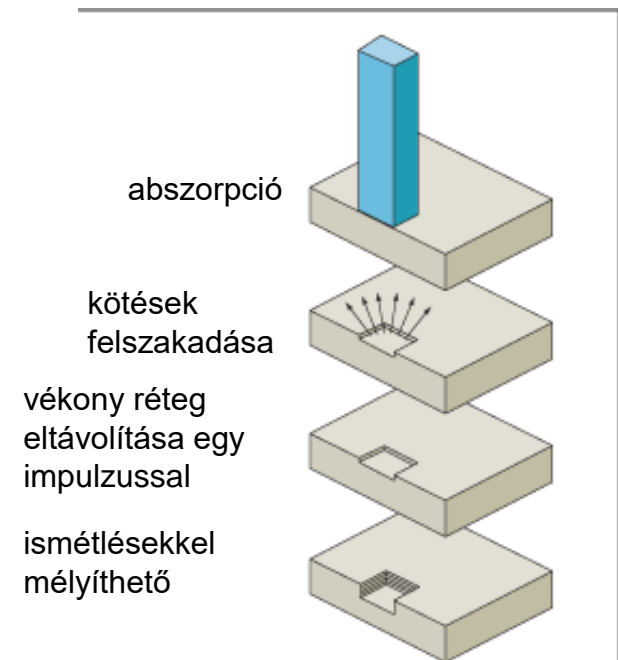


**Fénynek el kell nyelődnie**

# Termikus hatások



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



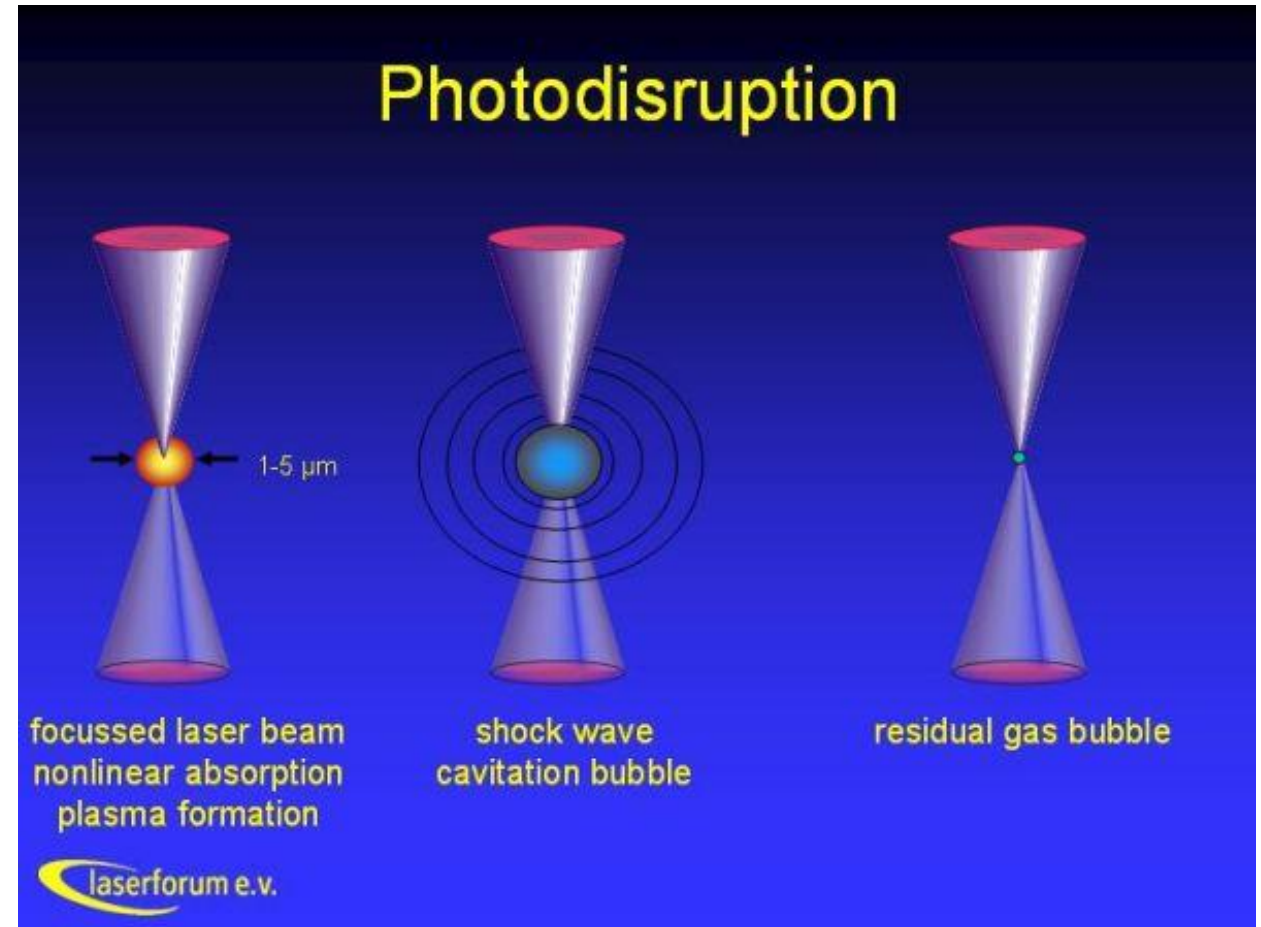


# Fotodiszrupció

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

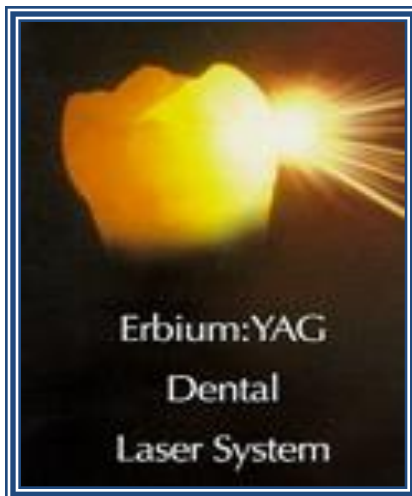


- Lökéshullám roncsolja a szöveteket
- Kavitáció
- Vízgőz és CO<sub>2</sub> tölti ki az üreget
- A lökéshullám következtében ez szétáramlik a környező szövetekbe



Er:YAG lézer

2940 nm



Maximális elnyelődés a vízben és  
a hidroxiapatitban



Vaporizáció és mechanikai hullám



caries eltávolítása

kemény szövetek módosítása

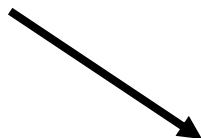
lágyszövetek módosítása



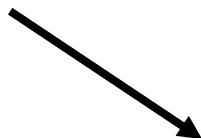




Argon lézer



fogfehérítés



Er:YAG lézer

2940 nm

vagy

CO<sub>2</sub> lézer

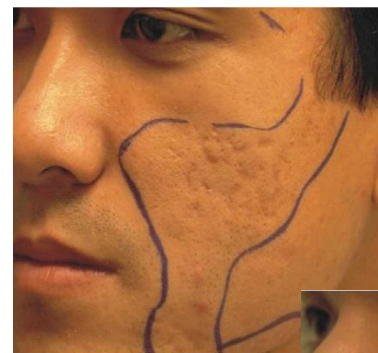
10600 nm

„resurfacing” – ablációs technika

az epidermisz megújítására



Ráncok,  
sérülések,  
aknék stb.  
kezelésére



# Nd:YAG lézer

1064 nm

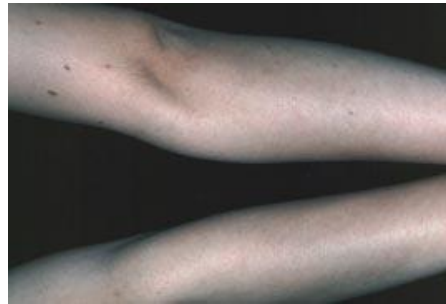
Felszíni erek fotokoaguláción alapuló  
korrekciója



Vénák fotokoaguláción  
alapuló korrekciója

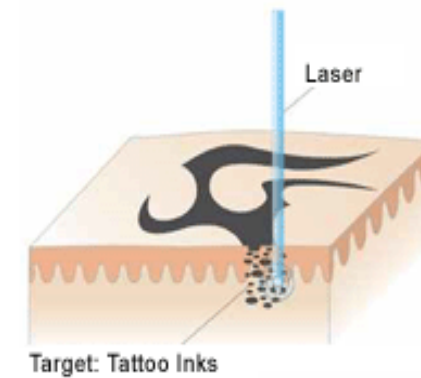


# Esztétikai megoldások



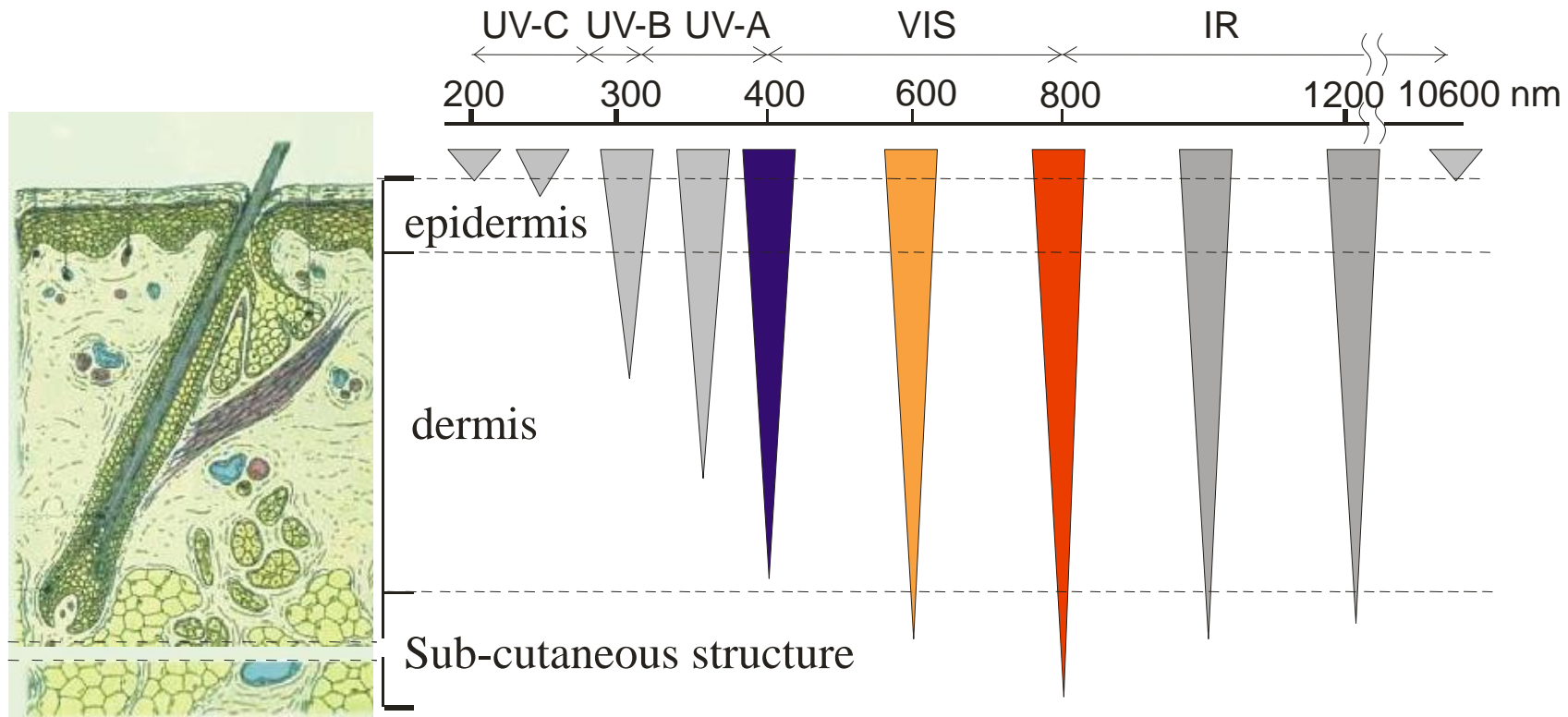
before

after





# Fény behatolási mélysége a bőrbe

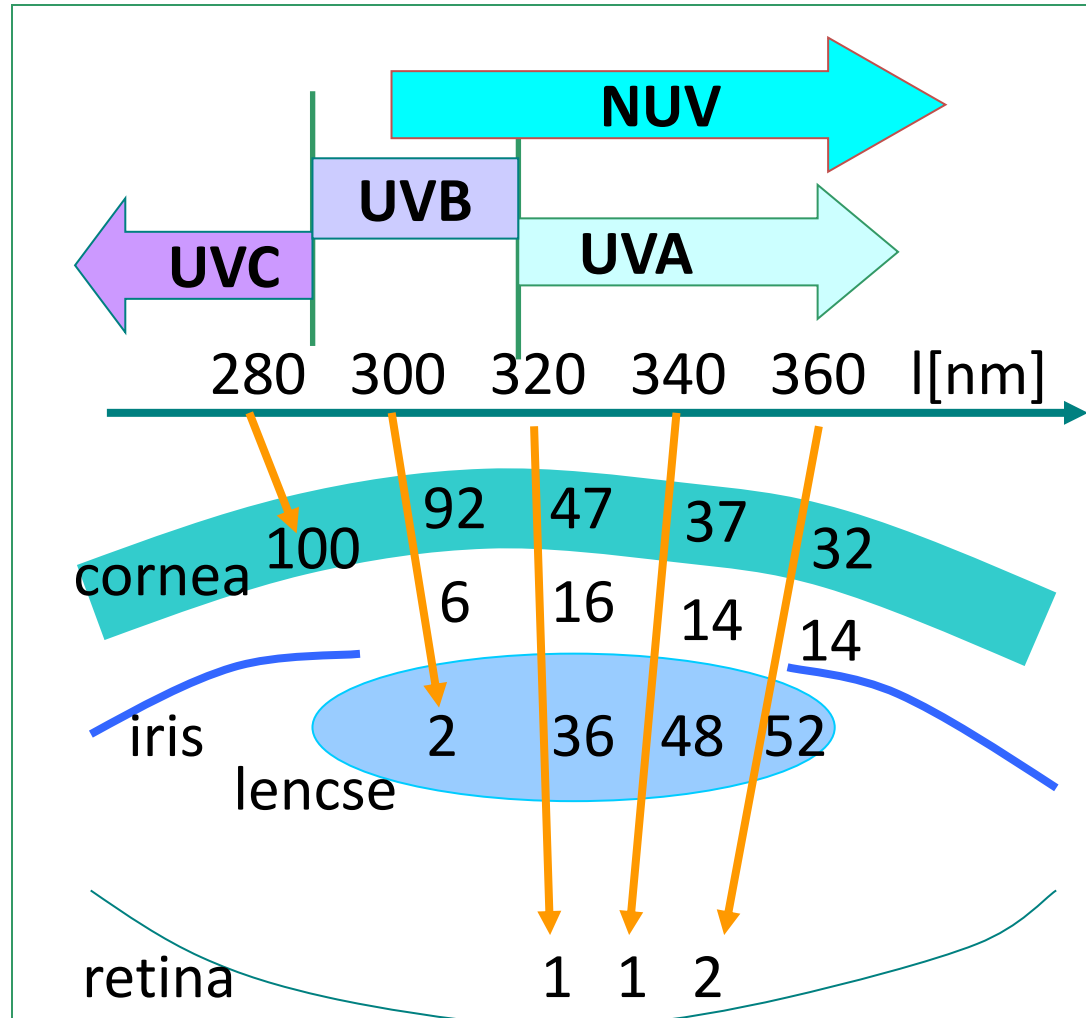


A fény intenzitás gyengülése elnyelődés, fénytörés és visszaverődéssel egyaránt megvalósul.

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

## *Behatolási mélység?*

Szem: fontos szempont az UV sugárzás  
káros hatásának elkerülése



1. A közeli UV-A tartományú fény a szemlencsében nyelődik el → cataracta
2. A távoli UV-C tartomány a szemfelszínen hat → látáskorrekciós műtétek a szaruhártyán

## Kapcsolódó fejezetek:

*Damjanovich, Fidy, Szöllősi: Orvosi Biofizika*

II. 2.2

2.2.5

2.2.7

2.2.8

IX. 1.1

IX. 1.2

<https://www.youtube.com/watch?v=ztkT9tOryAw>

<https://www.youtube.com/watch?v=KXkqIr7YFU4>

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

<https://www.youtube.com/watch?v=NW6XI5JvGsE>