

FEHÉRJÉK SZERKEZETVIZSGÁLÓ MÓDSZEREI

LUMINESZCENCIÁS TECHNIKÁK

KELLERMAYER MIKLÓS

LUMINESZCENCIA

- 📌 Gerjesztett állapotból fényemisszióval járó relaxáció
- 📌 A hőmérsékleti sugárzáson felül kibocsátott sugárzás
- 📌 “Hideg fény”
- 📌 Fluoreszcencia és foszforeszcencia

LUMINESZCENCIA MINDENÜTT



Fotolumineszcencia

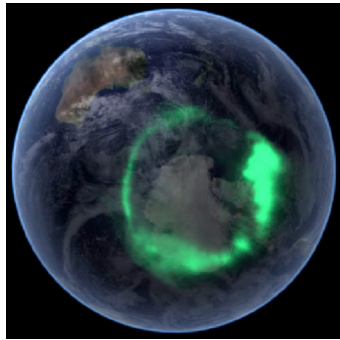
LUMINESZCENCIA MINDENÜTT



Radiolumineszcencia



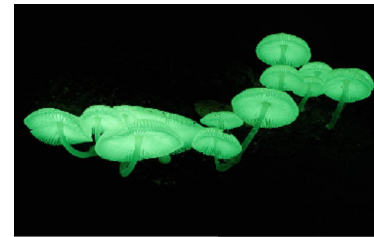
LUMINESZCENCIA MINDENÜTT



Radiolumineszcencia
Aurora borealis (sarki fény)



LUMINESZCENCIA MINDENÜTT

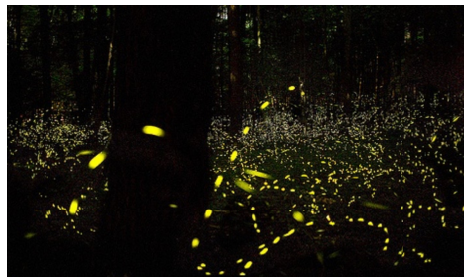


Biolumineszcencia

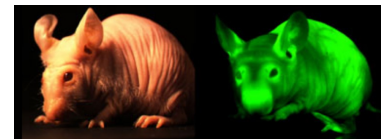
LUMINESZCENCIA MINDENÜTT



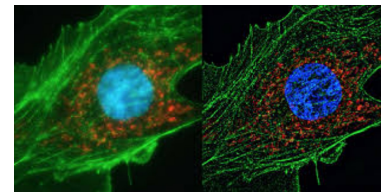
Biolumineszcencia
Szentjánosbogár



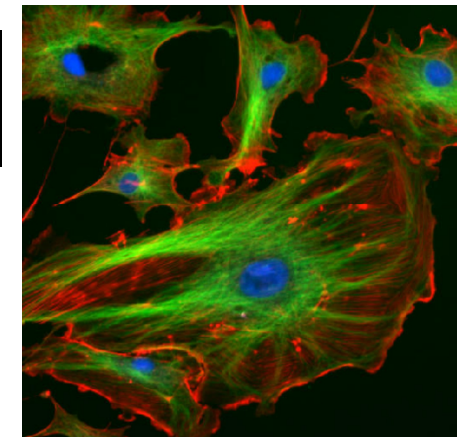
LUMINESZCENCIA MINDENÜTT



GFP-egér



Szuperrezolúciós mikroszkópia
(Nobel-díj 2014)



Epifluoreszcencia mikroszkópia
(citoszkeletális rendszer)

Fluoreszcencia

A LUMINESZCENCIA TÍPUSAI

Gerjesztés <i>módja</i> szerint	Lumineszcencia típusa
abszorpció	fotolumineszcencia
kémiai reakció	kemilumineszcencia, biolumineszcencia
termikusan aktivált ion-rekombináció	termolumineszcencia
töltés injekció	elektrolumineszcencia
nagyenergiájú radioaktív sugárzás	radiolumineszcencia
súrlódás	tribolumineszcencia
hanghullámok	szonolumineszcencia
Gerjesztett <i>állapot</i> szerint	Lumineszcencia típusa
első gerjesztett szingulett állapot	fluoreszcencia
legalsó (gerjesztet) triplett állapot	foszforeszcencia

EGY GERJESZTETT MOLEKULA EMISSZIÓJA BONYOLULTABB...

...MERT **ENERGIANÍVÓI** ÖSSZETETTEK.

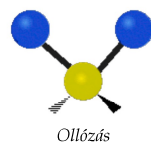
Molekula: kovalens kötéssel összekapcsolt atomok
Legegyszerűbb eset: kétatomos molekula (pl., hidrogénmolekula)



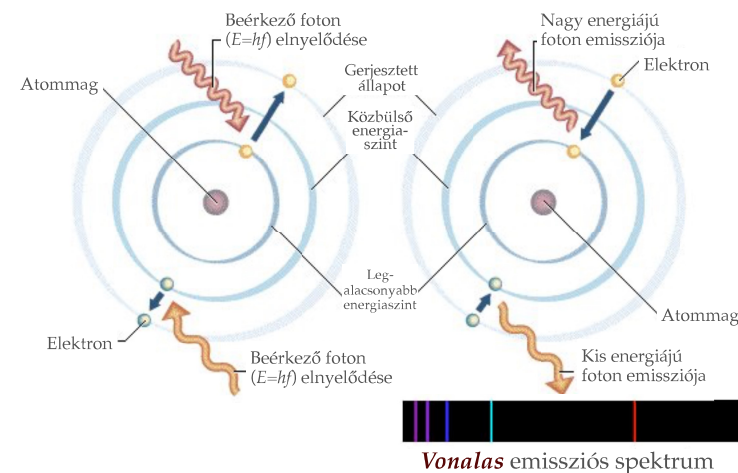
A molekulák **vibrációs** és **rotációs** mozgásokat végeznek!

Vibráció: kovalens kötés *mentén* történő periodikus mozgás
Rotáció: kovalens kötés *tengelye körül* periodikus mozgás

Példák a vibrációs mozgásra háromatomos (metilén) csoportban ($-CH_2-$):



FÉNYEMISSZÓ GERJESZTETT ATOM ÁLTAL



MOLEKULA ENERGÁJA



Max Born
(1882-1970)



J. Robert Oppenheimer
(1904-1967)

Born-Oppenheimer - közelítés:

$$E_{total} = E_e + E_v + E_r$$

Fontos megjegyzések:

- Energia állapotok egymástól függetlenek (csatolás elhanyagolható).
- Állapotok energianívói kvantáltak.
- Átmenetek "energiacsomag" (kvantum) elnyelésével/kibocsátásával járnak.
- Energiaszintek közötti különbségek nagyságrendje különbözik:

$$E_e \sim 100 \times E_v \sim 100 \times E_r$$

$$\sim 3 \times 10^{-19} \text{ J } (\sim 2 \text{ eV}) > \sim 3 \times 10^{-21} \text{ J} > \sim 3 \times 10^{-23} \text{ J}$$

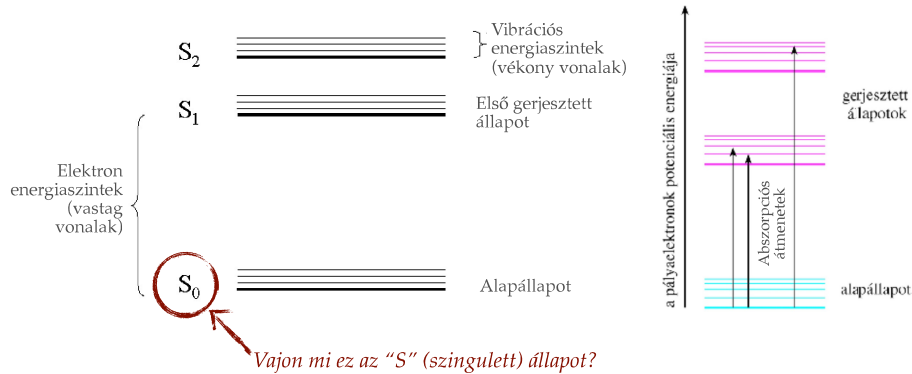
("Ökölszabály": ultraibolya > látható > infravörös)

ENERGIA ÁLLAPOTOK ÁBRÁZOLÁSA

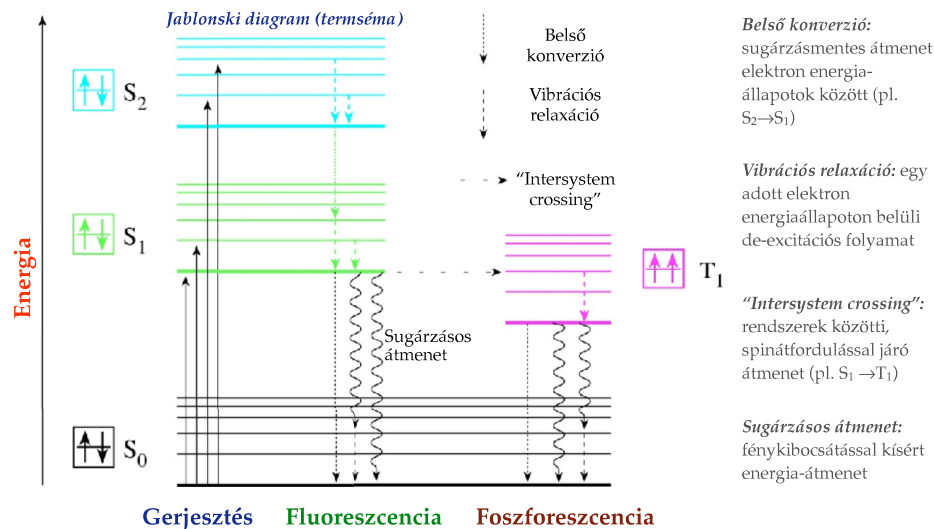
Jablonski-féle termséma:
egy molekula elektronállapotait, és a közöttük
végbemenő átmeneteket (nyilakkal) mutatja



Alexander Jablonski
(1898-1980)



A LUMINESZCENCIA FOLYAMATAI



Belső konverzió:
sugárzásmentes átmenet
elektron energia-
állapotok között (pl.
 $S_2 \rightarrow S_1$)

Vibrációs relaxáció: egy
adott elektron
energiaállapon belüli
de-excitációs folyamat

"Intersystem crossing":
rendszerek közötti,
spinátfordulással járó
átmenet (pl. $S_1 \rightarrow T_1$)

Sugárzásos átmenet:
fénykibocsátással kísért
energia-átmenet

SPINÁLLAPOTOK



Wolfgang Pauli
(1900-1958)

Pauli-elv:

- Minden kvantumállapotot csak egyetlen elektron tölthet be.
- Egy atomon belül nem létezhet két olyan elektron, amelynek mind a négy kvantumszáma megegyezik.



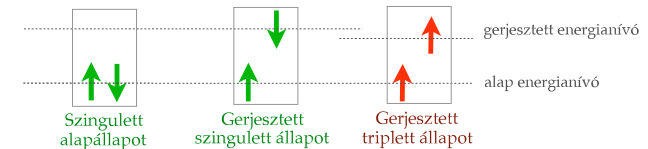
betöltött alhéj: spin párosítás
(ellentétes spinű elektronok párosodnak)

Szingulett és triplett állapotok:

az eredő spinállapothoz rendelt mágneses momentum **orientációinak száma** (mágneses térben) $= 2S+1 = 1$ (szingulett) vagy 3 (triplett). (S = eredő spin, pl. betöltött alhéj esetén $(+1/2) + (-1/2) = 0$)

S: szingulett állapot: ellentétes spinű párosított elektronok, eredő spin (S) = 0, **orientációk száma** $= (2S+1) = 1$.

T: triplett állapot: a molekulában azonos spinállapotú elektronok vannak, eredő spin = 1 (pl. $(+1/2) + (+1/2) = 1$), **orientációk száma** $= (2S+1) = 2+1 = 3$.

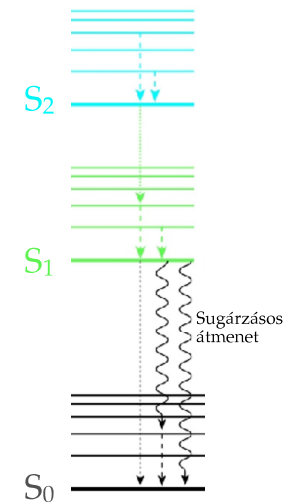


KASHA-SZABÁLY

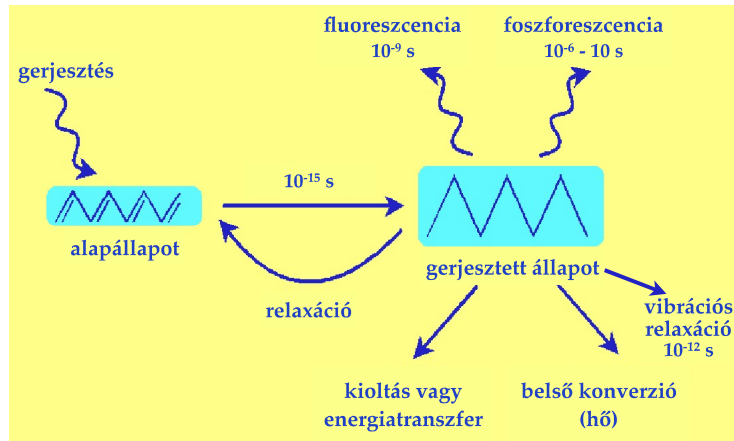
Fotonemisszió (fluoreszcencia vagy foszforeszcencia) a legalacsonyabb gerjesztett elektron-energiaállapot (S_1 , T_1) legalacsonyabb vibrációs szintjéről történő átmenet során lép fel.



Michael Kasha (1920-)
Amerikai fizikus

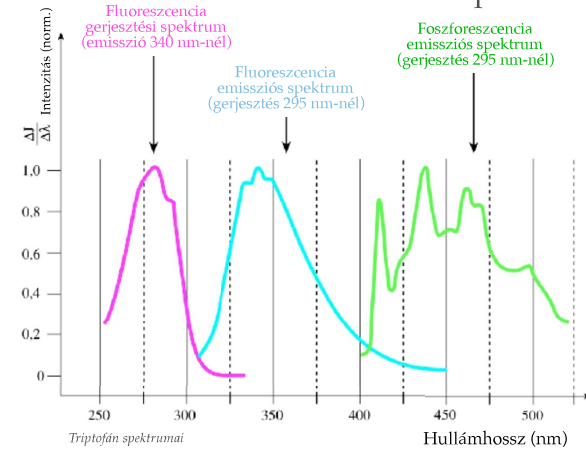


AZ ÁTMENETEK SEBESSÉGE (IDŐSKÁLÁJA)



A LUMINESZCENCIA TULAJDONSÁGAI I.

Lumineszcencia spektrumok



- Sávos színekép
- Gerjesztési és emissziós spektrumok tükörszimmetrikusak
- "Stokes shift"



George Stokes
(1819-1903)

Fluoreszcens festékmolekulák: "fluorofórok"

Fluorofórok célzott bekötésével nem fluoreszkáló molekulák is vizsgálhatóvá válnak ("fluoreszcens jelölés")

A LUMINESZCENCIA TULAJDONSÁGAI II.

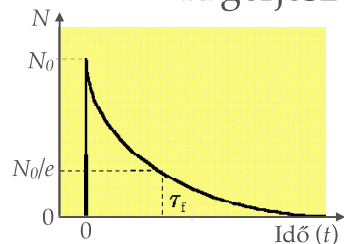
Kvantumhatásfok (Φ)

$$\Phi = \frac{\text{emittált fotonok száma}}{\text{abszorbeált fotonok száma}} \leq 1$$

$$\Phi = \frac{k_f}{k_f + k_{ic} + k_{isc} + k_Q}$$

k_{nr} = nem sugárzásos átmenetek sebességi állandói

A gerjesztett állapot élettartama (τ)



$$N = N_0 e^{-(k_f + k_{nr})t}$$

N = gerjesztett állapotú molekulák száma
 t = idő

k_f = fluoreszcencia sebességi állandó

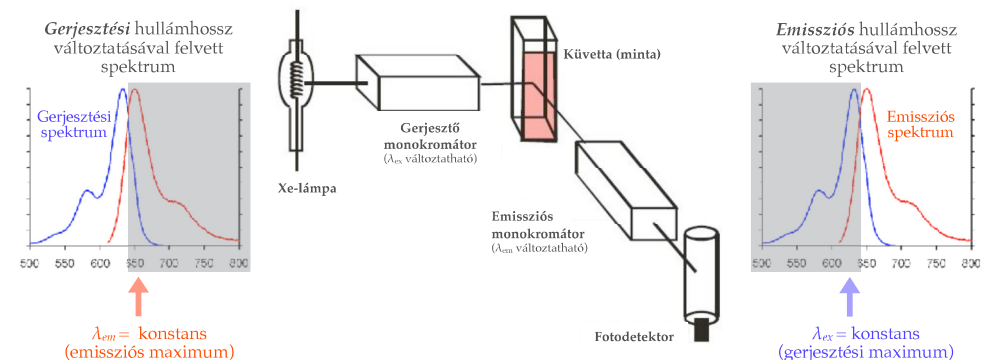
k_{nr} = nem-sugárzásos átmenetek sebességi állandója

τ = fluoreszcencia élettartam

$$\tau = \frac{1}{k_f + k_{nr}}$$

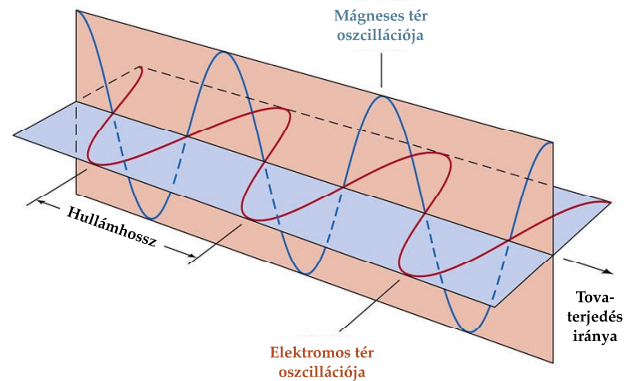
A FLUORESZCENCIA MÉRÉSE

Fluoreszcencia spektrométer (“Steady-state” spektrofluoriméter)

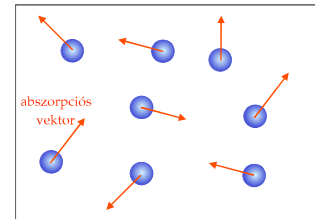


A FÉNY ELEKTROMÁGNESES HULLÁM

- Térben tovaterjedő elektromágneses zavar.
- Transzverzális hullám.
- Polarizálható.



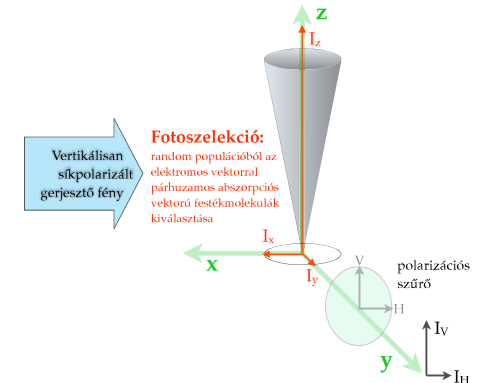
POLARIZÁCIÓ, ANIZOTRÓPIA



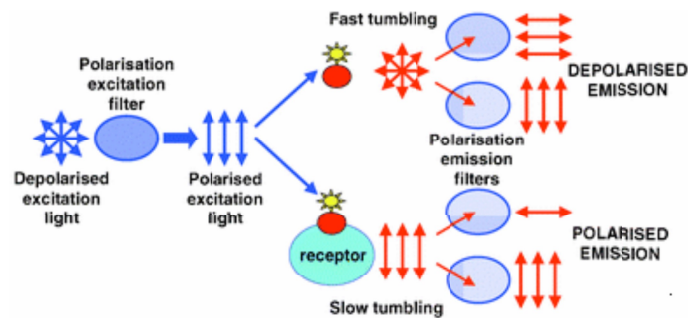
Fluorofórokhoz rendelhető **abszorpciós és emissziós vektor**: megszabja a foton abszorpció és emisszió valószínűségét.

Abszorpció maximális, ha absz. vektor és a fény elektromos vektora párhuzamos.

Abszorpció képessége függ $\cos^2\alpha$ -tól (α az absz. vektor és a fény elektromos vektora közötti szög).



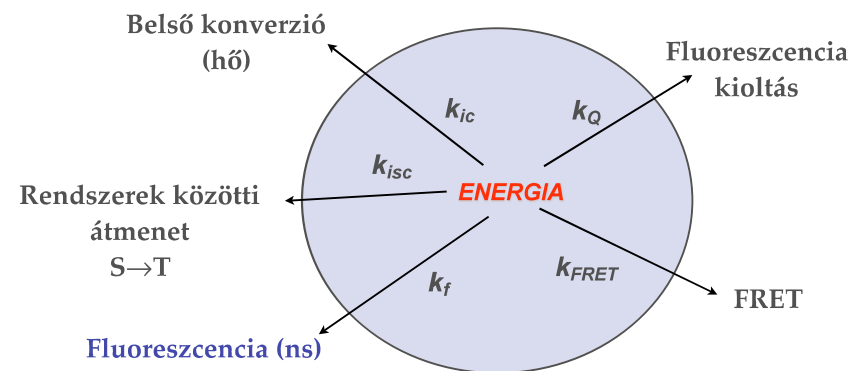
POLARIZÁCIÓ, ANIZOTRÓPIA



Polarizáció:
$$p = \frac{I_{VV} - I_{VH}}{I_{VV} + I_{VH}}$$

Anizotrópia:
$$r = \frac{I_{VV} - I_{VH}}{I_{VV} + 2I_{VH}}$$

GERJESZTÉS SORÁN ELNYELT ENERGIA SORSA



Fluoreszcencia (ns)
Foszforeszcencia (ms)

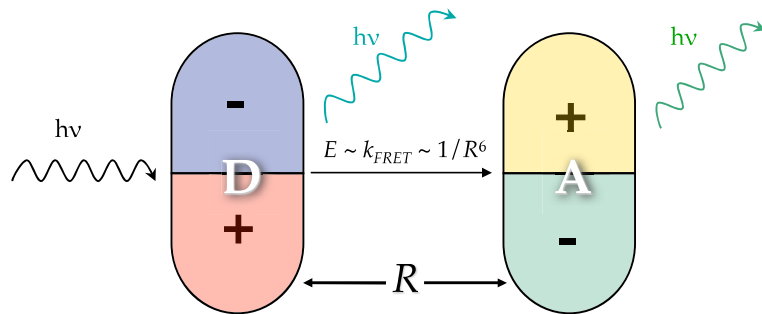
Sugárzásos v. nem sugárzásos átmenetek!

Förster Rezonancia Energia Transzfer (FRET)

- A gerjesztett állapotban lévő molekula (**donor**), valamint egy megfelelő spektroszkópiás követelményeket kielégítő molekula (**akceptor**) között **dipól-dipól** kölcsönhatás révén, **sugárzás nélküli** energiaátadás formájában jön létre.
- Fluoreszcencia Rezonancia Energia Transzfer (FRET)**: ha az energiatranszfer szereplői fluorofórok.

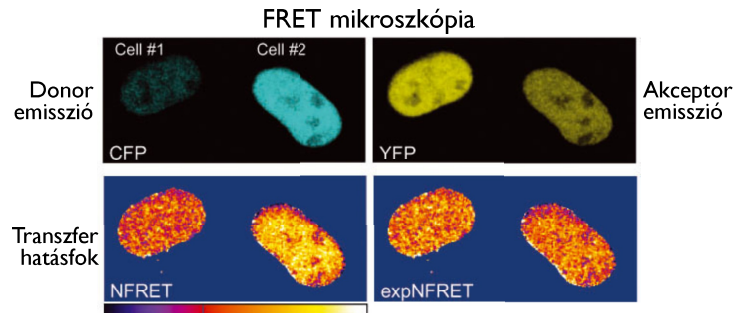


Theodor Förster
(1910-1974)



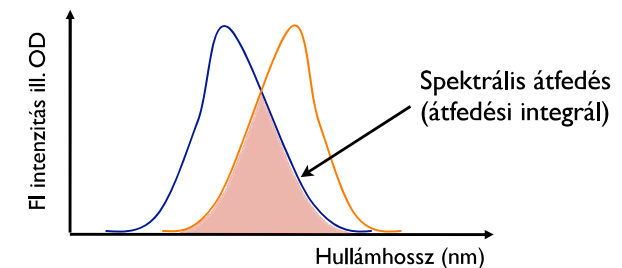
A FRET alkalmazása

- Molekuláris mérőszalag**: távolságmérés a nm-es (10^{-9} m) tartományban.
- Nagyon érzékeny (lásd hatvány összefüggés)!
- Alkalmazás**:
 - Molekulák közötti **kölcsönhatások** tanulmányozása.
 - Molekulákon belüli **szerkezeti** változások tanulmányozása.



A FRET feltételei

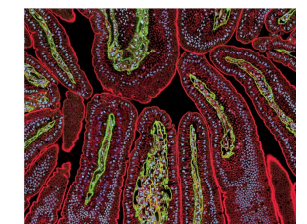
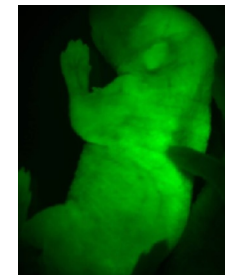
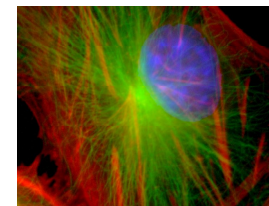
- Fluoreszcens** donor (D) és akceptor (A) molekula.
- A donor és akceptor molekula közötti **távolság (R)** 2-10 nm!
- Átfedés** a **donor emissziós spektruma** és az **akceptor abszorpció spektruma** között.



A fluoreszcencia orvosi-biológiai alkalmazásai

Néhány példa:

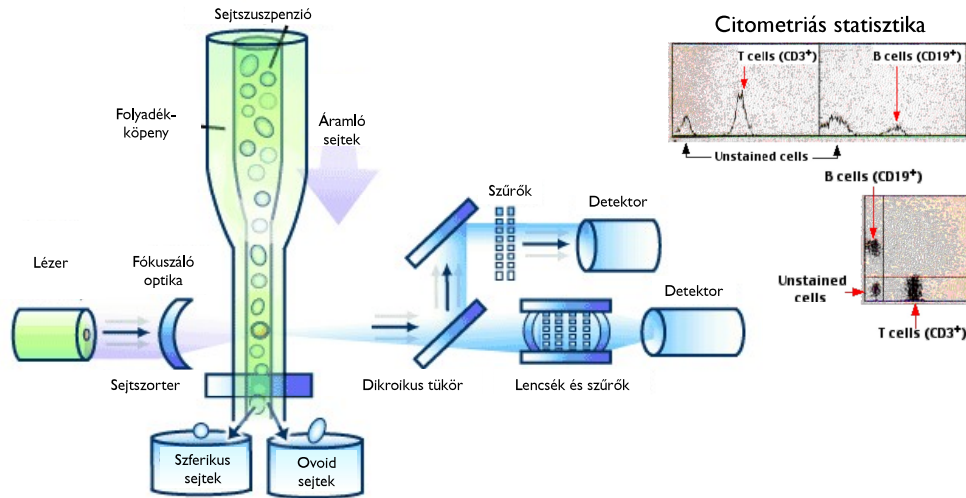
- Fluoreszcencia mikroszkópia
- DNS szekvenálás (lánc terminációs módszer)
- DNS festés (EtBr)
- DNS microarray technológia
- Immunfluoreszcencia
- Fluoreszcencia-aktivált sejt válogatás (FACS)
- Förster rezonancia energia transzfer (FRET)
- "Fluorescence recovery after photobleaching" (FRAP)
- Fluoreszcens fehérje-konjugációs technikák
- Jelölés kvantum pontokkal (quantum dots)
- stb...



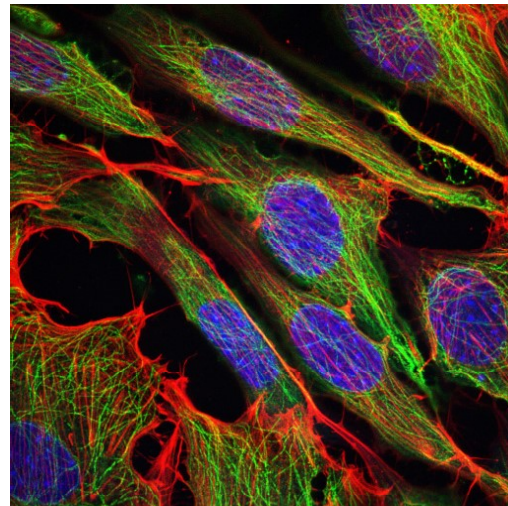
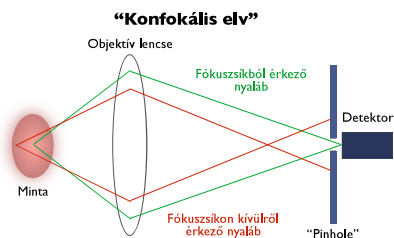
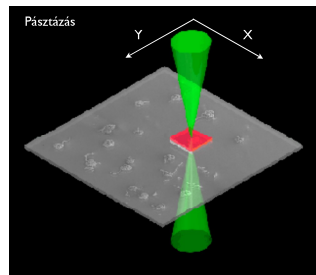
Fluorescence activated cell sorter (FACS)

Fluoreszcencia aktivált sejtválogatás; Áramlási citometria (flow cytometry)

- Fluoreszcensen fajlagosan megjelölt sejtuszpenziót sejtenként analizálunk
- Sok paramétert mérünk (fluoreszcencia intenzitás különböző hullámhosszon, kis- és nagyszögű szórás)
- Statisztikai analízist végzünk
- Szükség esetén a sejteket szétválogathatjuk a paraméterek alapján

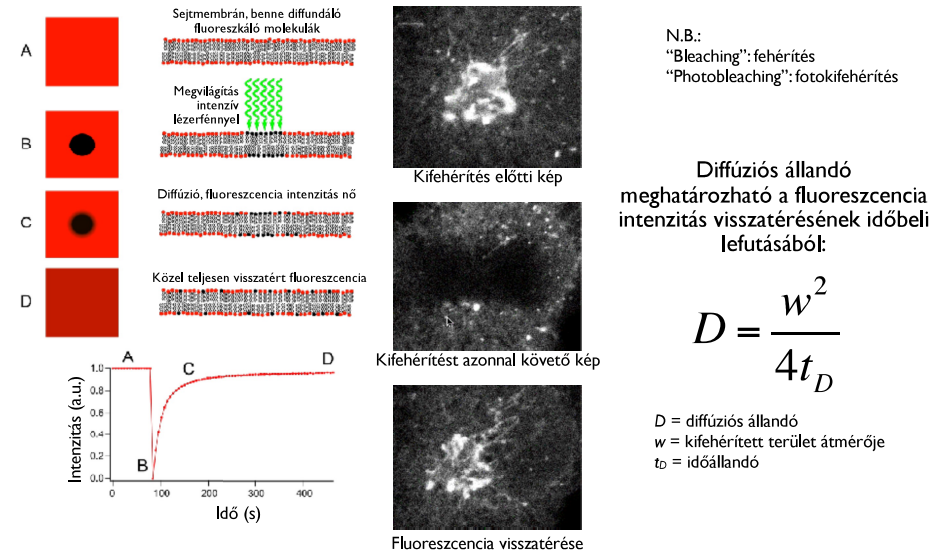


Lézer pásztázó konfokális mikroszkópia



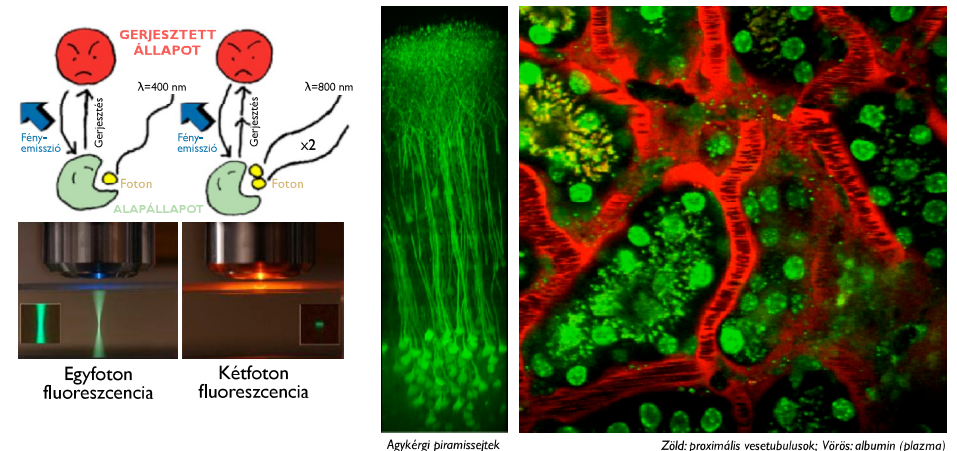
Zöld: mikrotubulusok; Vörös: aktin; Kék: sejtmag

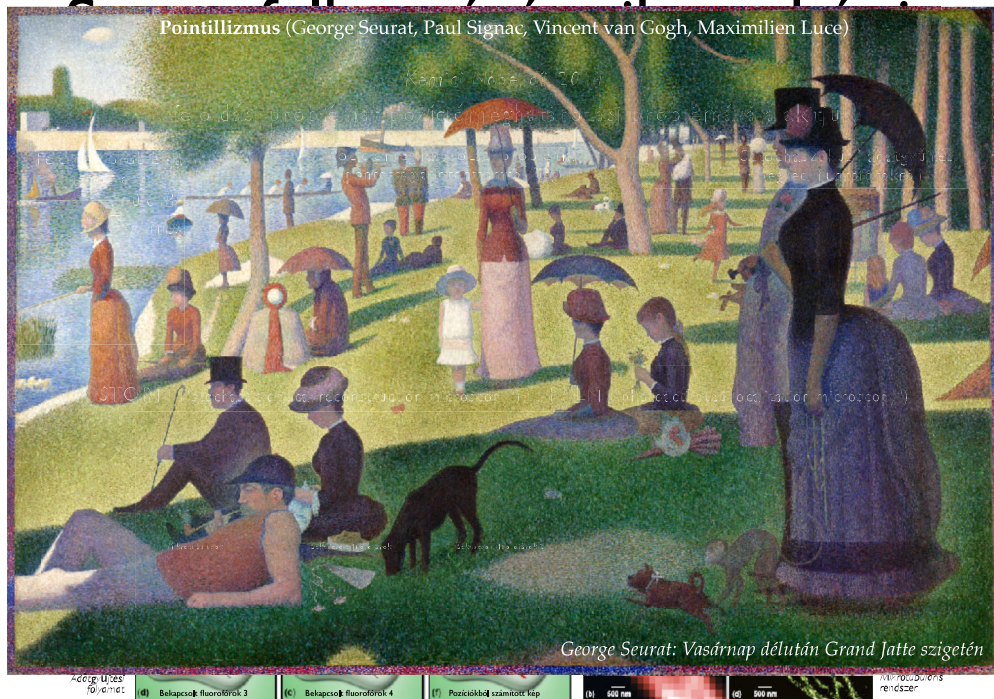
Fluorescence Recovery After Photobleaching (FRAP)



Multifoton mikroszkópia

- Két (vagy több) foton energiája összeadódik a gerjesztéskor
- Gerjesztés (következésképp emisszió) csak a fókuszpontban (limitált fotokárosítás)
- Gerjesztés nagy (közel IR) hullámhosszú, rövid (fs) fényimpulzusokkal
- Nagy hullámhossz miatt mély optikai behatolás (akár 2 mm)





Fluoreszcens jelölési technikák

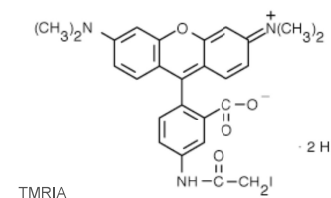
1. Natív oldalláncok jelölése
2. Célzott pontmutagenézis
3. Peptid ligáció
4. C-terminális jelölés puromicin-származékokkal
5. Nem természetes aminosavak pontmutagenézise
(egyedi fluorofór analízisre nem igazán alkalmas)
6. Fehérjekomplexek rekonstitúciója előre megjelölt alegységekből
7. Fluoreszcens fehérjékkel való konjugálás
8. Kvantumpontok

Fehérjefluoreszcencia forrása

- **Intrinsic fluorofórok**
triptofán, tirozin
- **Extrinsic fluorofórok**
kívülről bevitt festékmolekulák,
"fluoreszcens jelölés"
kémiai specificitás?
térbeli specificitás?

Fluoreszcens jelölési technikák

1. Natív oldalláncok jelölése



Fluorofór:
festékmolekula +
kémiai keresztkötő

Relatív kémiai specificitás (SH, NH₂)

Relatív térbeli specificitás

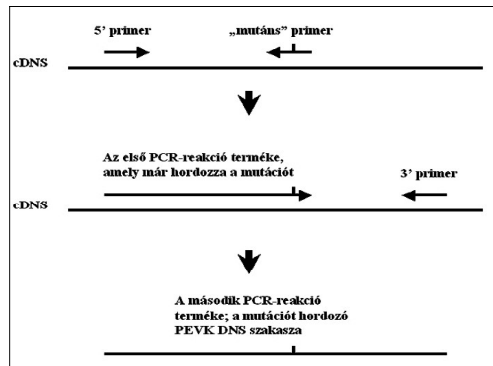
Lépések:

- moláris arány számítása
- inkubálás
- nem kötődött festék eltávolítása (dialízis, kromatográfia)

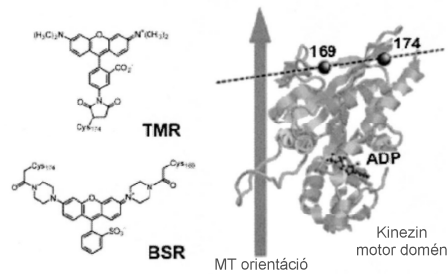
Fluoreszcens jelölési technikák

2. Célzott pontmutagenézis

Cisztein aminosav célzott elhelyezése



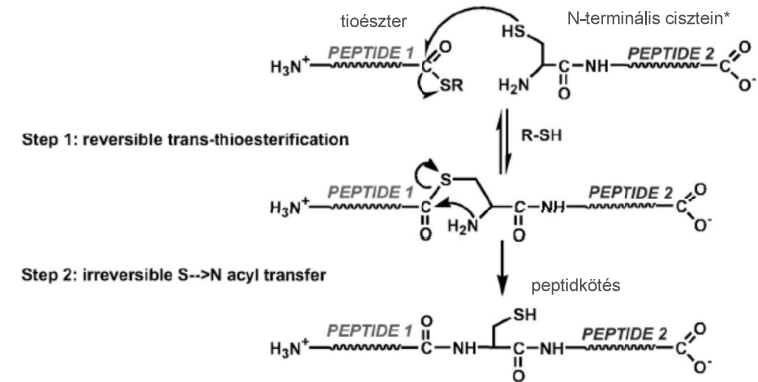
Bifunkcionális fluorofór



Fluoreszcens jelölési technikák

3. Peptid ligáció

Fehérje "összeállítása" szintetikus, fluoreszcensen jelölt peptidekből



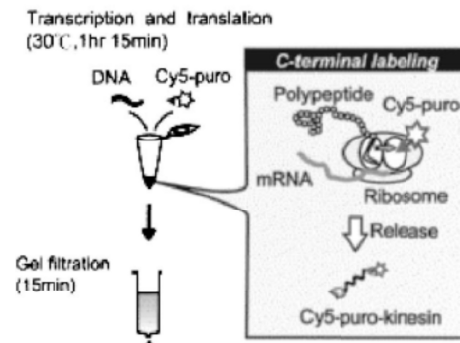
*Csak N-terminális cisztein vesz részt a reakcióban

Fluoreszcens jelölési technikák

4. C-terminális jelölés puromicin-származékokkal

Puromicin:

- riboszóma A helyére, az aminoacyl tRNS helyére kötődő antibiotikum
- fehérjeszintézist gátol
- kovalensen kapcsolódik a már megszintetizálódott fehérje C-terminálisához
- fluoreszcens konjugátumai fehérjelöelésre használhatók



Fluoreszcens jelölési technikák

5. Nem természetes aminosavak pontmutagenézise

1. Direkt: intrinzip fluorofór származékok (pl. 7-aza-triptofán)
2. Indirekt: nem proteinogén reaktív csoportokat (pl. keto) tartalmazó aminosavak

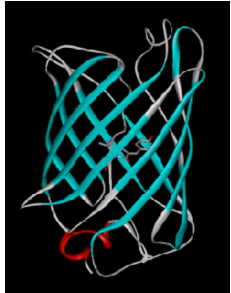
6. Fehérjekomplexek rekonstitúciója előre megjelölt alegységekből

Multi-subunit (alegység) fehérjék, fehérjekomplexek esetén

Fluoreszcens jelölési technikák

7. Fluoreszcens fehérjékkel való konjugálás

1. Zöld fluoreszcens fehérje (Green Fluorescent Protein, GFP)



Méret: ~27 kDa, 238 aa

Szerkezet: 11-szálú β -hordó

Kromofór: a központi hélix Ser65-Tyr66-Gly67 oldalláncából

Fluoreszcencia 3D szerkezet intaktaságától függ

Tandem fúziós konstrukció a GFP és a vizsgált fehérje génjeiből

Előnyök: *in vivo* mérések, mutánsokból spektrális variánsok állíthatók elő, melyek több különböző konstrukció együttes vizsgálatát is lehetővé teszik.

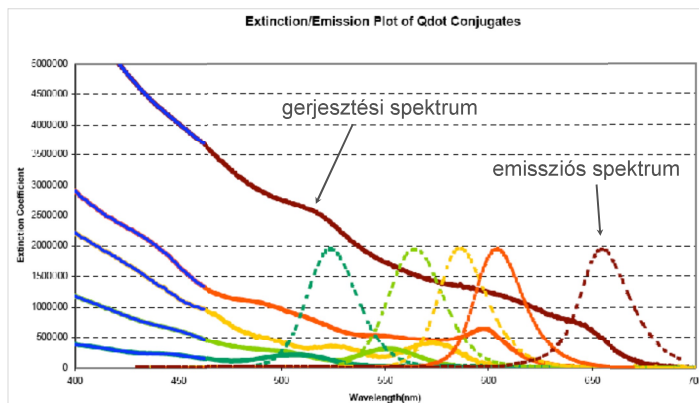
Hátrányok: pislogás, csak terminális (N vagy C) jelölés, a GFP a célfehérje működését szterikusan befolyásolhatja.

2. A GFP egyéb színű (kék, sárga, vörös) mutánsai

3. Fotoaktiválható GFP analóg

4. Kaede: korallból származó fluoreszcens fehérje, mely UV-indukálható zöld-vörös fotokonverziót mutat

Kvantumpont jelölés



Előnyök:

széles gerjesztési spektrum

hangolható emissziós spektrum

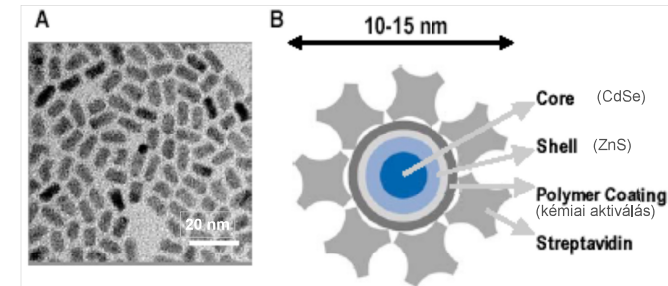
fotokiféledéssel szemben rendkívül ellenállóak

Fluoreszcens jelölési technikák

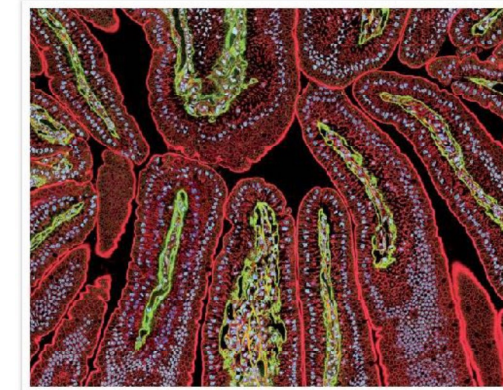
8. Kvantumpontok

Félvezető nanokristályok

Emissziós spektrum a méret függvénye



Kvantumpont jelölés



Vörös: aktin
Zöld: Laminin
Kék: sejtmag

A mouse intestinal section visualized using fluorescent Qdot nanocrystal conjugates. Actin was labeled with a mouse anti-actin monoclonal antibody and visualized using red-fluorescent Qdot 655 goat F(ab')₂ anti-mouse IgG. Laminin was labeled with a rabbit anti-laminin polyclonal antibody and visualized using green-fluorescent Qdot 525 goat F(ab')₂ anti-rabbit IgG. Nuclei were stained with blue-fluorescent Hoechst 33342.

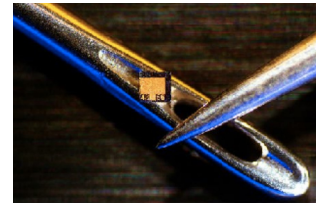
LUMINESZCENCIÁN ALAPULÓ FÉNYERŐSÍTÉS: LÉZER

ALAPOK, TULAJDONSÁGOK, ALKALMAZÁSOK

LÉZER

1. Mi a lézer?
2. Rövid lézertörténet
3. A lézerműködés alapjai
4. A lézerfény tulajdonságai
5. A lézerek típusai
6. A lézer orvosi és biológiai alkalmazásai

LÉZEREK MINDENÜTT



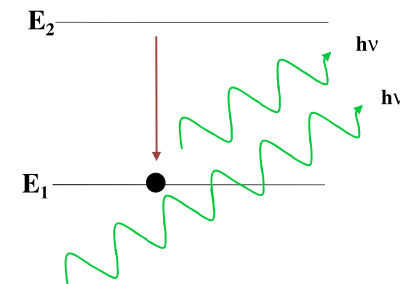
5 mW diódalézer
néhány mm



Terawattos NOVA lézer - Lawrence Livermore Laboratories
Futballpálya méret

LÉZER:

“LIGHT AMPLIFICATION BY STIMULATED EMISSION OF RADIATION”



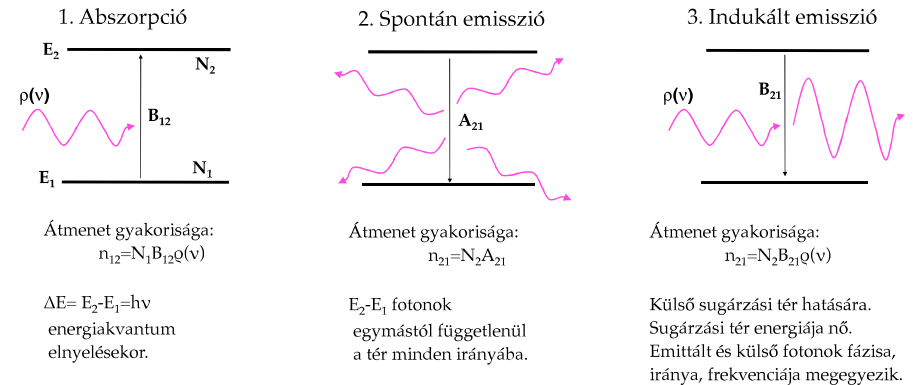
Fényerősítést megvalósító lumineszcens fényforrás.
MASER: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LÉZERTÖRTÉNET DIÓHÉJBAN



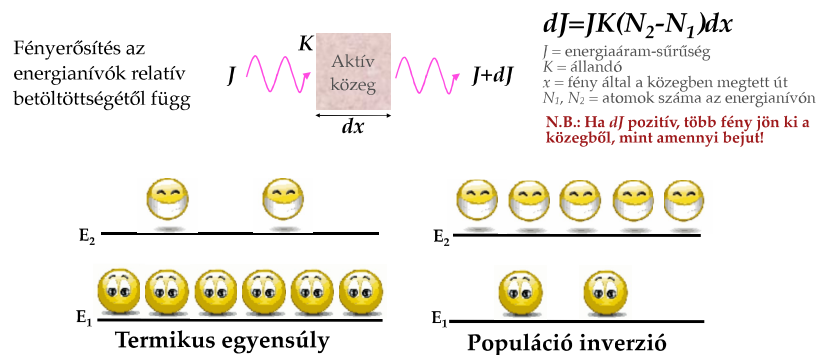
- **1917** - *Albert Einstein*: indukált emisszió elméleti predikciója.
- **1946** - *G. Meyer-Schwickerather*: első szemműtét fénnyel.
- **1950** - *Arthur Schawlow és Charles Townes*: az emittált fotonok a látható tartományba eshetnek.
- **1954** - *N.G. Basov, A.M. Prochorov, és C. Townes*: ammónia mézer
- **1960** - *Theodore Maiman*: első lézer (rubin lézer)
- **1964** - *Basov, Prochorow, Townes (Nobel-díj)*: kvantum elektronika
- **1970** - *Arthur Ashkin*: lézercsipesz
- **1971** - *Gábor Dénes (Nobel-díj)*: holográfia
- **1997** - *S. Chu, W.D. Phillips és C. Cohen-Tanoudji (Nobel-díj)*: lézeres atomhűtés.
- **2013. október 8** - *NIF (National Ignition Facility, USA)*: magfúzió beindítása 192 lézernyalábbal, pozitív energiamérleg.
- **2017** - *ELI (Extreme Light Infrastructure)* indulása, Szeged. Attoszekundumos (10^{-18} s) fényimpulzusok előállítás.

A LÉZER ALAPJAI I. INDUKÁLT (STIMULÁLT) EMISSZIÓ

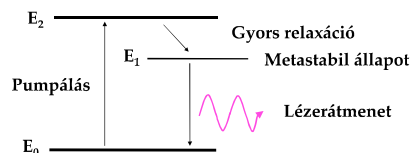


Magyarázat: kétállapotú atomi vagy molekuláris rendszer
 E_1, E_2 : energianívók, $E_2 > E_1$
 $Q(\nu)$: sugárzási tér spektrális energiasűrűsége
 N_1, N_2 : adott energianívón levő atomok, molekulák száma
 B_{12}, A_{21}, B_{21} : energianívók közötti átmeneti valószínűségek (Einstein-féle együtthatók), $B_{12} = B_{21}$

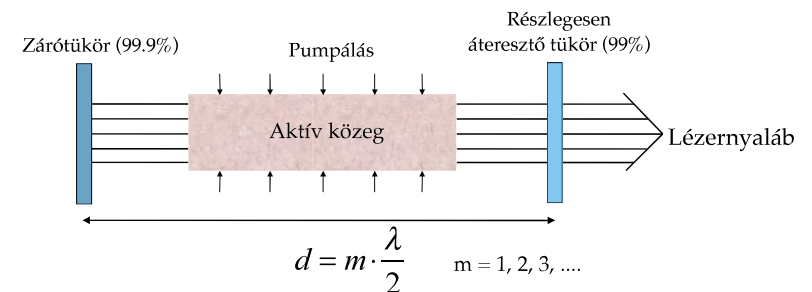
A LÉZER ALAPJAI II. POPULÁCIÓ INVERZIÓ



- Populáció inverzió csak többállapotú rendszerben!
- Pumpálás: elektromos, optikai, kémiai energia



A LÉZER ALAPJAI III. OPTIKAI REZONANCIA



Rezonátor:

- két párhuzamos sík (vagy homorú) tükör
- a kimenő fényt eljuttatja a közegbe
- pozitív visszacsatolás -> öngerjesztés -> rezonancia

• Optikai zár a rezonátorban: Q-csatolás, impulzus üzemmód

A LÉZERFÉNY TULAJDONSÁGAI I.

1. Kis divergencia

Párhuzamos nyaláb

2. Nagy teljesítmény

Folytonos üzemmódban több tíz, akár száz W (pl. CO₂ lézer)

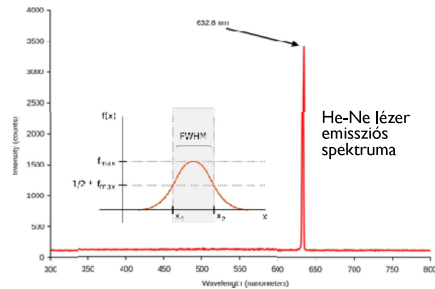
Q-csatolású üzemmódban a pillanatnyi teljesítmény hatalmas (GW)

Kis divergencia miatt óriási térbeli teljesítménysűrűség

3. Kis spektrális sávszélesség

“Monokromaticitás”

Nagy spektrális energiasűrűség



4. Polarizáltság

5. Rendkívül rövid impulzusok lehetősége

ps, fs

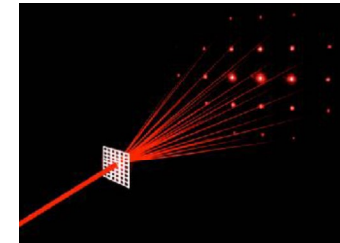
A LÉZERFÉNY TULAJDONSÁGAI II.

6. Koherencia

Fázisazonosság, interferenciaképesség

Időbeli koherencia (különböző időpontokban emittált fotonok fázisazonossága)

Térbeli koherencia (nyalábkeresztmetszet menti fázisazonosság)



Alkalmazás: holográfia, optikai koherencia tomográfia

LÉZERTÍPUSOK

Fényerősítő közeg alapján:

1. Szilárdtest lézerek

Kristályokba v. üvegyanyagokba bevitt fémszennyeződések; Rubin, Nd-YAG, Ti-zafir

Vörös-infravörös spektrális tartomány; Folytonos, Q-kapcsolású üzemmód, nagy teljesítmény

2. Gázlézerek

Legismertebb: He-Ne lézer (10 He/Ne). Kis energia, Széleskörű használat

CO₂ lézer: CO₂-N₂-He keverék; λ -10 μ m; Óriási teljesítmény (100 W)

3. Festéklézerek

Szerves festékek (pl. rodamin, kumarin) híg oldata; Pumpálásra más lézer használt

Nagy teljesítmény (Q-kapcsolt módban); Hangolható

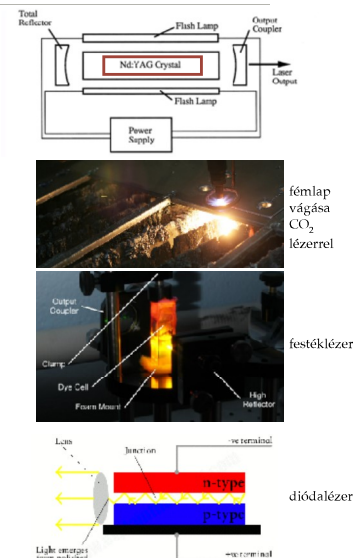
4. Félvezető lézerek

Összekevert p- és n-típusú, szennyezett félvezetők határán.

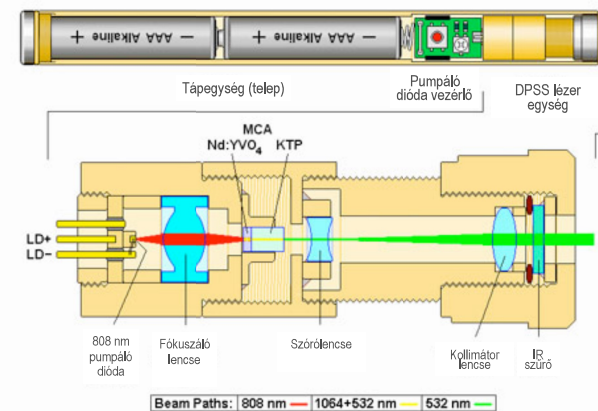
Rezonátor tükrökre nincs szükség (belső visszaverődés)

Vörös, IR spektrális tartomány. Nagy kontinuos üzemmódú teljesítmény (akár 100W)

Nyalábkarakterisztika nem túl jó. Kis méret miatt széleskörű alkalmazás.



A ZÖLD LÉZERMUTATÓ



Lépések:

1. Diódalézer (808 nm) pumpál
2. Szilárdtest-lézer (Nd:YVO₄: neodimiummal szennyezett yttrium-vanadát) 1064 nm-es fényt állít elő
3. KTP (kálium titánil-foszfát) kristály frekvenciát dupláz (hullámhosszt felez): 532 nm (zöld)

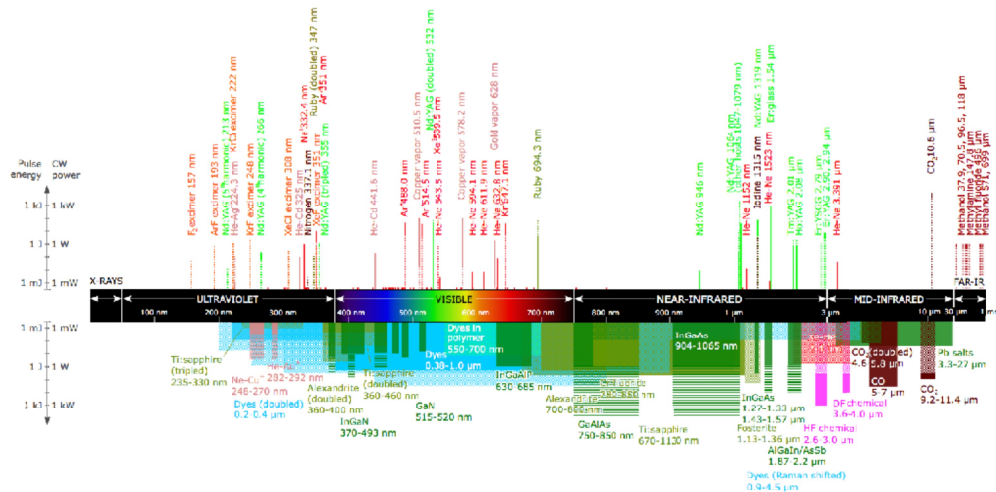
*Megjegyzések:

DPSS: diode-pumped solid state

MCA: multiple crystal assembly

LD: laser diode

LÉZEREK, SPEKTRÁLIS VONALAK ÉS SÁVOK



A röntgentől az infravörösig rendelkezésre állnak lézervonalak.

LÉZERALKALMAZÁS SZEMPONTJAI

- Irányíthatóság
- Teljesítmény
- Monokromaticitás
- Koherencia

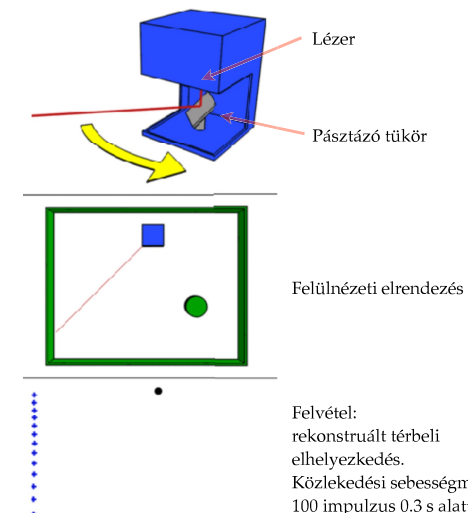
LÉZEREK ALKALMAZÁSA TELJESÍTMÉNY ALAPJÁN

- 5 mW – CD-ROM meghajtó
- 5–10 mW – DVD lejátszó vagy DVD-ROM meghajtó
- 100 mW – Nagysebességű CD-RW író
- 250 mW – DVD-R író
- 1–20 W – szilárdtest-lézer mikromegmunkálásra
- 30–100 W – sebészeti CO₂ lézer
- 100–3000 W – ipari CO₂ lézer (lézervágó)
- 1 kW – 1 cm diódlézer rúd

Irányíthatóság

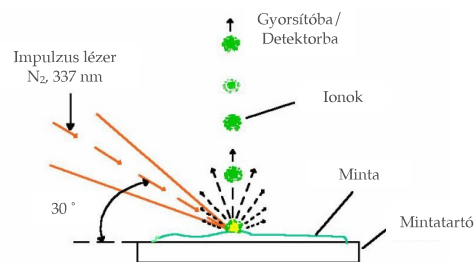
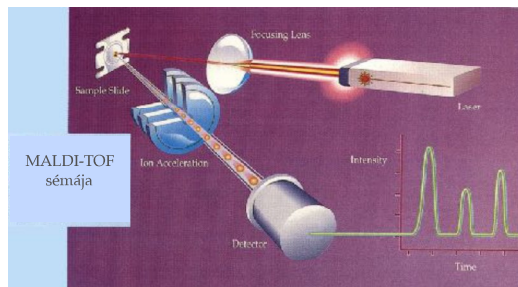
SEBESSÉGMÉRÉS LÉZERREL

LIDAR: “LIGHT DETECTION AND RANGING”

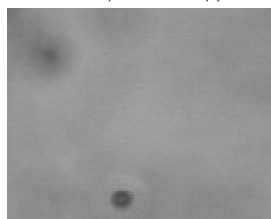
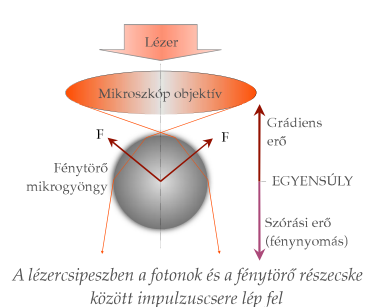


MALDI-TOF:

MATRIX-ASSISTED LASER DESORPTION/IONIZATION
TIME OF FLIGHT MASS SPECTROMETRY



LÉZERCSSIPESZ



Baktérium sejt

manipulálása

lézercsipesszel

00-03-10-02

STED mikroszkópia (STimulated Emission Depletion)

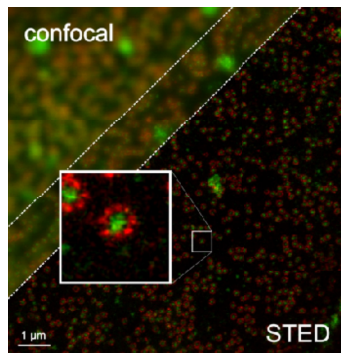
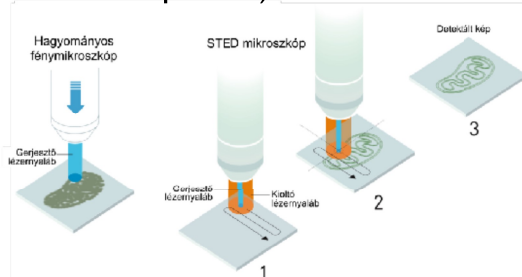
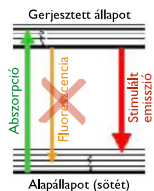
Lézer alapjelenség,
monokromaticitás,
teljesítmény, irányíthatóság



Stefan Hell
(Nobel-díj 2014)

Hell: $d = \frac{\lambda}{2 \cdot NA \sqrt{1 + I/I_s}}$

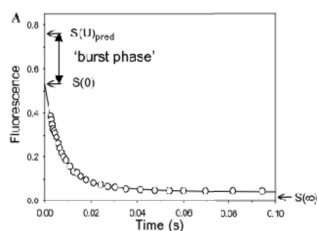
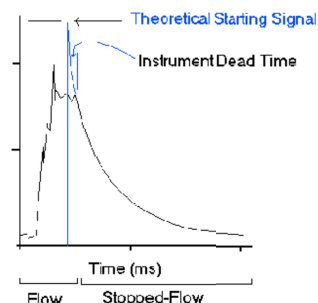
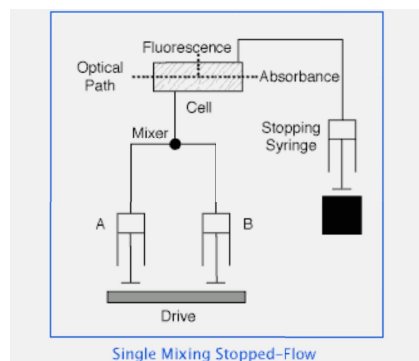
Abbé: $d = \frac{\lambda}{2 \cdot NA}$



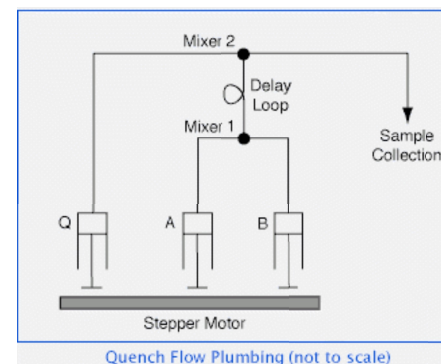
Maghártya pórus
komplexek STED
mikroszkópos képe

Depletáló lézer intenzitás (I) növelése

FEHÉRJEGOMBOLYODÁS VIZSGÁLATA: STOPPED-FLOW



FEHÉRJEGOMBOLYODÁS VIZSGÁLATA: QUENCH-FLOW



Analitika kémiai módszerekkel (SDS-PAGE, stb.)