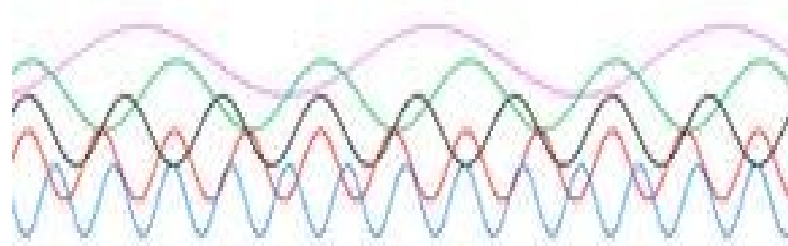
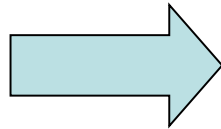


Koherens fény (miért is különleges a lézernyaláb?)

Inkoherens fény

Atomok egymástól függetlenül sugároznak ki különböző hullámhosszon, különböző fázissal fotonokat.

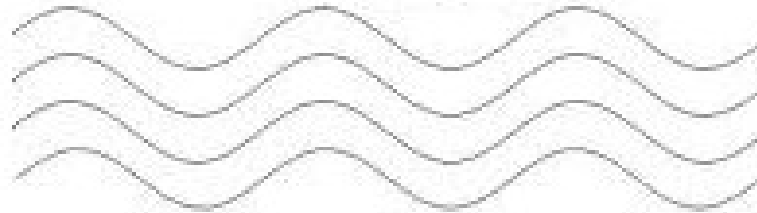
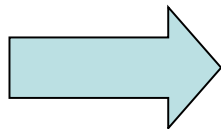
Pl: Termikus sugárzó



Koherens fény

Atomok kollektív sugárzása: az atomok azonos energiájú és azonos impulzusú fotonokat bocsátanak ki.

Pl: Lézer



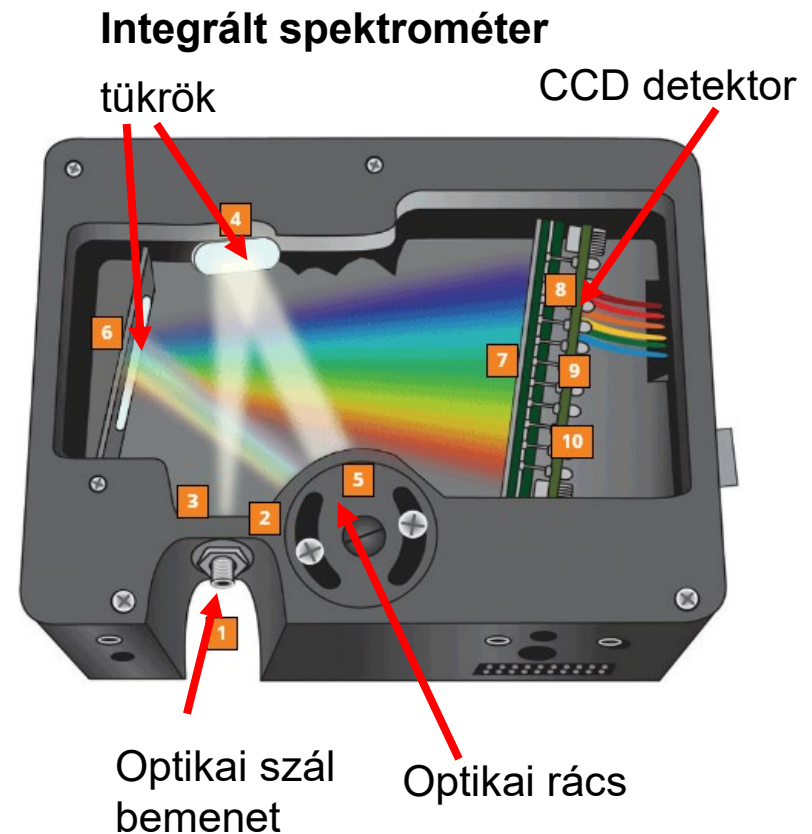
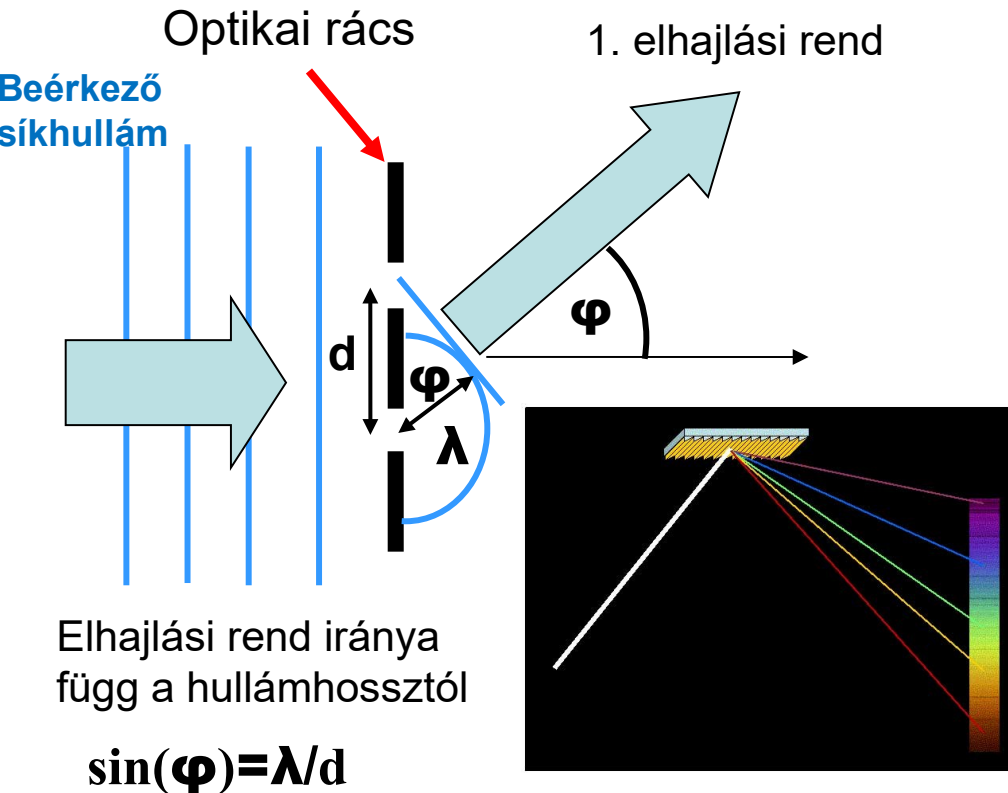
Spektrométer

Spektrum: Elektromágneses sugárzás hullámhossz szerinti felbontása.

A spektrumok mérésére szolgáló eszköz a **spektrométer.**

A fény spektruma alapján következtethetünk arra, milyen anyag bocsátotta ki az adott elektromágneses sugárzást, vagy arra, hogy a hullám milyen anyagokkal lépett kölcsönhatásba. Spektrumok mérésével megállapíthatjuk vegyi anyagok, élelmiszerek, vagy akár távoli csillagok anyagi összetételét, tanulmányozhatjuk az atomok elektronszerkezetét.

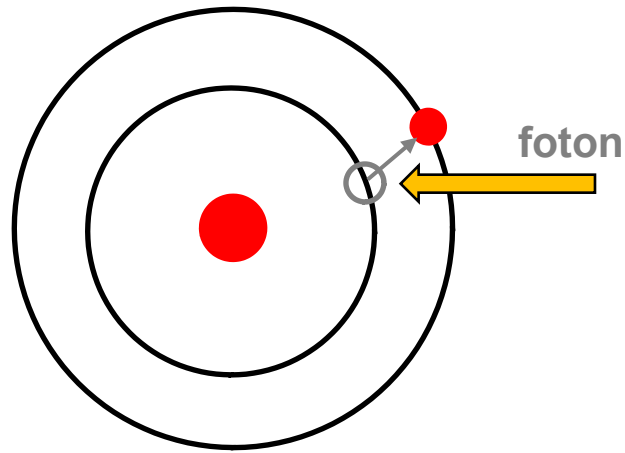
A spektrométerekben a hullámhossz szerinti felbontást prizma, vagy optikai rács valósítja meg.



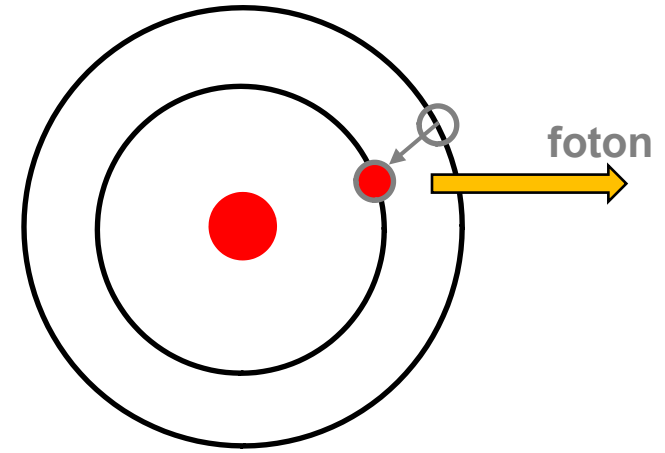
Atomok fénykibocsátása, fényelnyelése

Bohr-modell:

abszorpció



emisszió



$$\Delta E = h\nu = \hbar\omega$$

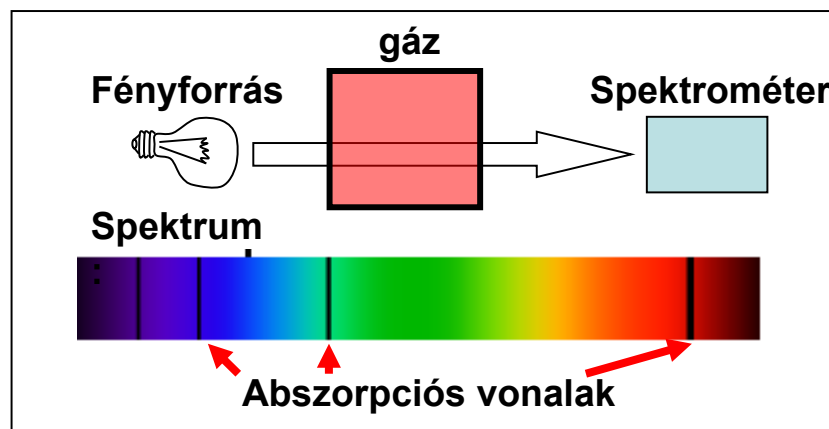
A Bohr-féle atommodellben az elektronok meghatározott energiájú pályákon létezhetnek (keringenek) az atommag körül. A foton **abszorpciója** során az atom elektronja elnyel egy fotont, miközben egy magasabb energiaszintre, egy külsőbb pályára kerül. Az elnyelt foton energiája éppen az elektronnak a két pályára meghatározható energiának a különbsége:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu.$$

Az **emisszió** során egy magasabb energianívójú pályáról az elektron visszaugrik egy belsőbb, azaz kisebb energiájú pályára, miközben az atom kisugároz egy, a két nívó energia-különbségének megfelelő energiájú fotont. A Bohr-féle atommodell alkalmazásával magyarázható az emissziós és az abszorpciós spektrum vonalas szerkezete.

Az Einstein együtthatók 1.

Abszorpció (fényelnyelés)



Kétnívós atom modell:

Az atomot kétnívós rendszernek tekintjük.

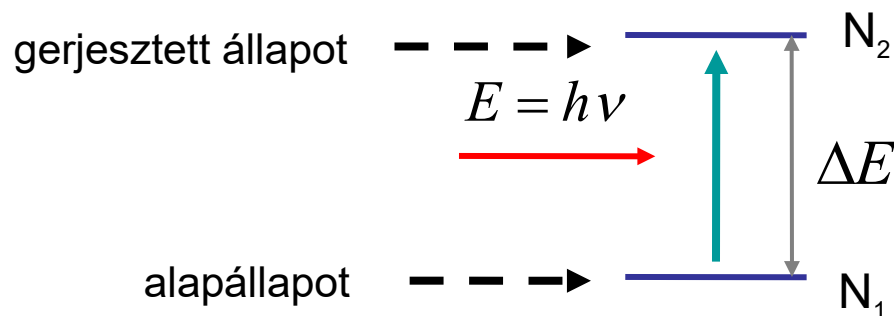
Az egységnyi térfogatban található alapállapotú atomok száma: N_1 .

Az egységnyi térfogatban található gerjesztett (magasabb energiájú) atomok száma: N_2 .

$$N_1 + N_2 = N = \text{állandó.}$$

dN_{12} adja meg a dt időtartam alatt gerjesztett (alapállapotból gerjesztett állapotba jutó) atomok számát.

B_{12} az abszorpcióra jellemző Einstein együttható.
 g_ν a fekete test sugárzás leírásából ismert foton-sűrűség frekvencia szerinti eloszlása.



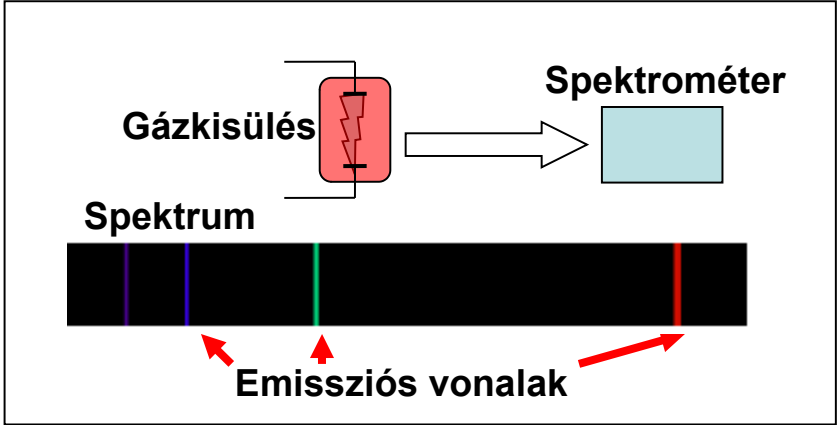
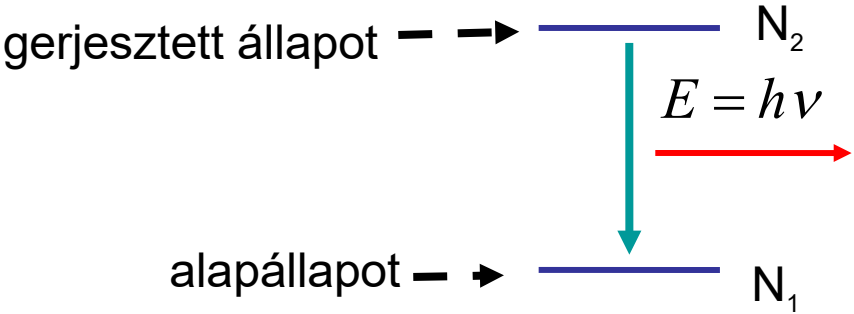
$$dN_{12} = B_{12} g_\nu N_1 dt$$

Einstein együttható

Foton sűrűség

Az Einstein együtthatók 2.

Spontán emisszió



spontán emisszió

$$dN'_{21} = A_{12} N_2 dt$$



Einstein együttható

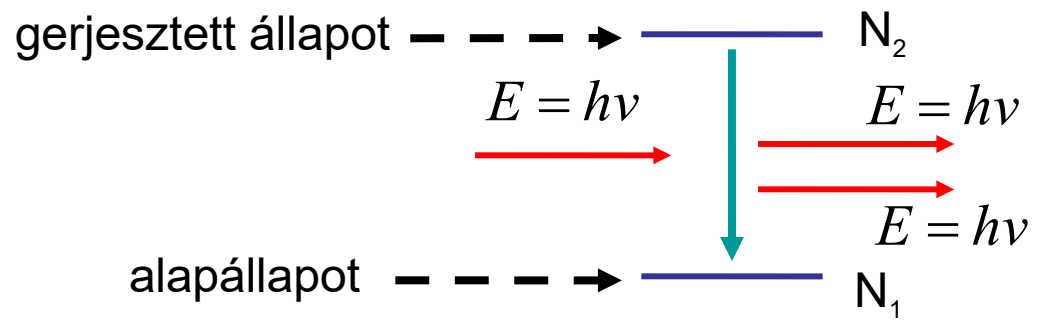
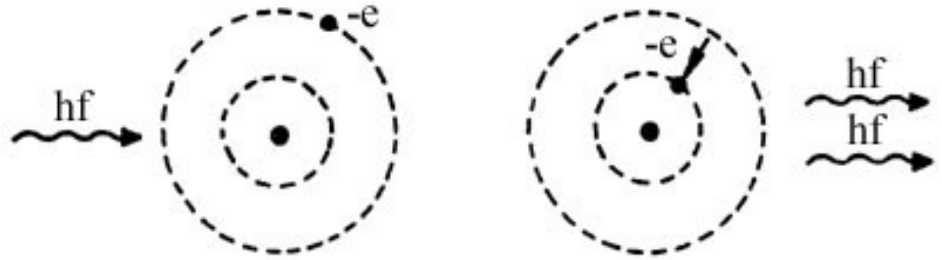
dN'_{21} adja meg a dt időtartam alatt a spontán folyamattal gerjesztettségét elvesztő (alapállapotba jutó) atomok számát. A spontán emisszió alatt az atom egy $h\nu$ energiájú foton kisugárzásával csökkenti energiáját.

A spontán emisszió külső behatás nélkül jön létre (hasonló a bomlási folyamatokhoz): a gerjesztett állapotnak van egy átlagos élettartama. A sugárzás iránya nem meghatározott, fázisa véletlen.

Az Einstein együtthatók 3.

Indukált emisszió

Az indukált emisszió modelljét Einstein javasolta 1917-ben.



indukált emisszió

$$dN''_{21} = B_{21}g_{\nu}N_2dt$$

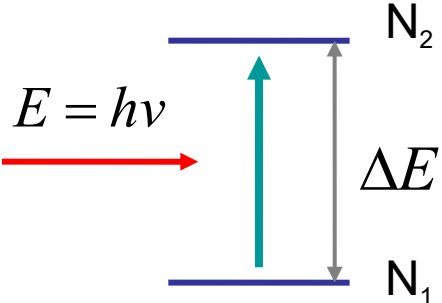
Einstein együttható **Foton sűrűség:**

Külső behatásra jön létre: Egy "külső" foton kölcsönhatásba lép az atommal. Az indukált emisszió során a beeső fotonnal azonos energiájú (hullámhosszú), azonos irányú és fázisú foton kibocsájtásával gerjesztődik le az atom.

A folyamat fényerősítésre használható. (Pl: Erbiummal adalékolt optikai szálak a távközlésben)

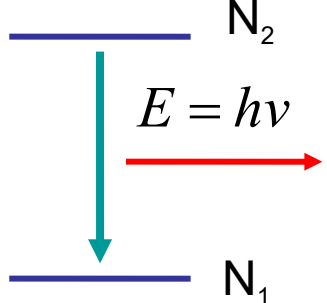
dN''_{21} adja meg a dt időtartam alatt indukált emisszióval legerjesztődő (alapállapotba jutó) atomok számát. Ez értelemszerűen arányos a gerjesztett atomok számával és a fotonok számával (sűrűségével) is.

Két állapotú atom és foton kölcsönhatásai



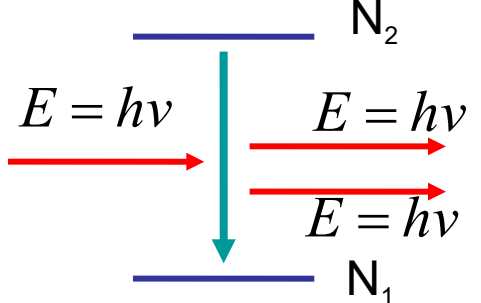
abszorpció

$$dN_{12} = B_{12}g_{\nu}N_1dt$$



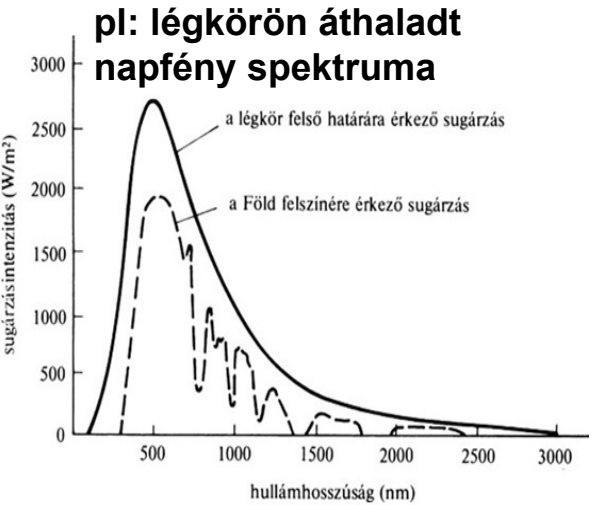
spontán emisszió

$$dN'_{21} = A_{12}N_2dt$$



indukált emisszió

$$dN''_{21} = B_{21}g_{\nu}N_2dt$$



Abszorpciós vonalak



pl: kisülő lámpák spektruma



Emissziós vonalak

Honnan tudta Einstein, hogy létezik indukált emisszió?



Einstein együtthatók meghatározása termodinamikai egyensúlyban

Ha a rendszer termodinamikai egyensúlyban van, akkor az időegység alatt gerjesztődő és a foton-emisszióval alapállapotba jutó atomok száma megegyezik.

$$dN_{12} = dN'_{21} + dN''_{21}$$

abszorpció $dN_{12} = B_{12}g_v N_1 dt$
 spontán emisszió $dN'_{21} = A_{12}N_2 dt$
 indukált emisszió $dN''_{21} = B_{21}g_v N_2 dt$

Kifejezve a fotonsűrűséget: $g_v = \frac{A_{12} / B_{12}}{\frac{N_1}{N_2} - \frac{B_{21}}{B_{12}}}$

$$g_v = \frac{A_{12} / B_{12}}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - \frac{B_{21}}{B_{12}}}$$

Termodinamikai egyensúlyban a fotonsűrűség:

$$g_v = \frac{8\pi}{c^3} \cdot \frac{h\nu^3}{\exp\left\{\frac{h\nu}{k_B T}\right\} - 1}$$

Lásd: (hőmérsékleti sugárzás)

A két kifejezés csak akkor lehet egyenlő, ha:

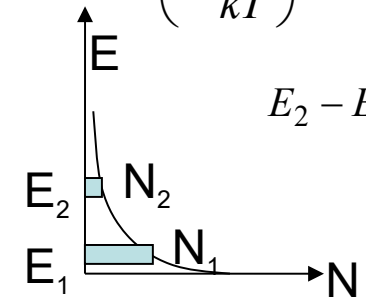
1) $B_{12} = B_{21}$

Vagyis az indukált emisszió Einstein együtthatója nem nulla!

2) $\frac{A_{21}}{B_{12}} = \frac{8h\nu^3\pi}{c^3}$

Termodinamikai egyensúlyban lévő rendszerben az energia-eloszlás Boltzmann-statisztikát mutat:

$$N_1 \approx \exp\left(-\frac{E_1}{kT}\right) \quad N_2 \approx \exp\left(-\frac{E_2}{kT}\right)$$



Kétnívós, termodinamikai egyensúlyban lévő rendszerre :

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\frac{h\nu}{kT}$$

A spontán emisszió és az indukált emisszió gyakoriságának aránya:

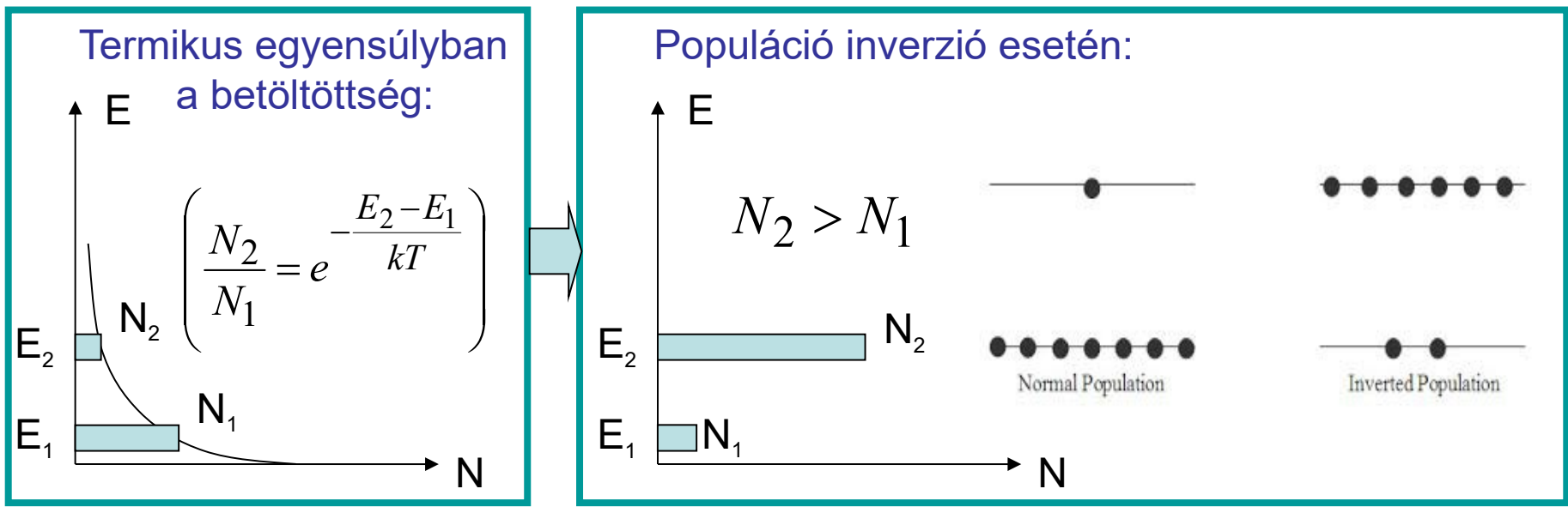
($\lambda=10\mu\text{m}$, $T=300\text{K}$)

$$\frac{A_{21}}{gB_{12}} = 125$$

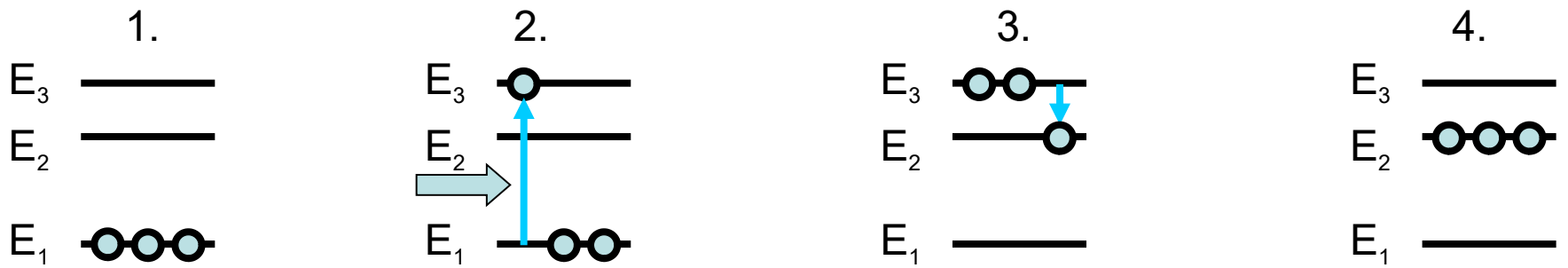
Szobahőmérsékleten, közeli infravörös tartományban a spontán emisszió 125x gyakoribb, mint az indukált emisszió!

Indukált emisszió valószínűségének növelése

Populáció inverzió megvalósításával:



A populáció inverzió megvalósításához legalább 3 nívó szükséges:



Pumpálás $h\nu_p$ energiájú fotonokkal (külső fényforrás)

Az E_3 nívó élettartama rövid, ($t_3 \sim 10^{-9}s$) az elektronok az E_2 nívóra kerülnek (nem sugárzó átmenet)

Az E_2 nívó élettartama hosszú, ($t_2 \sim 10^{-3}s$) így az E_1 és az E_2 nívó populációja inverz

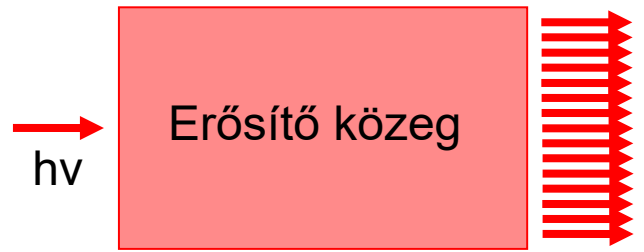
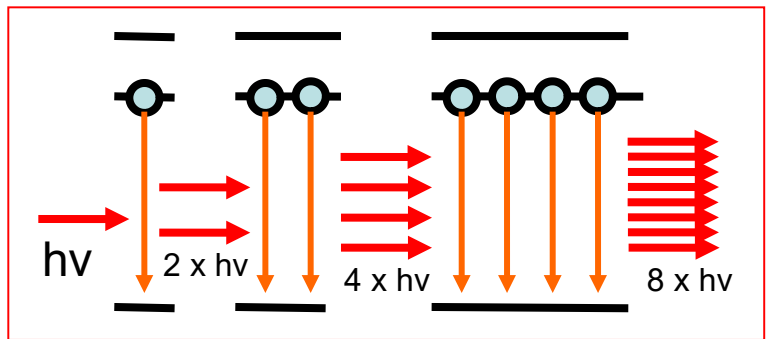
A

rendszer

Fényerősítés indukált emisszióval

Laser: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

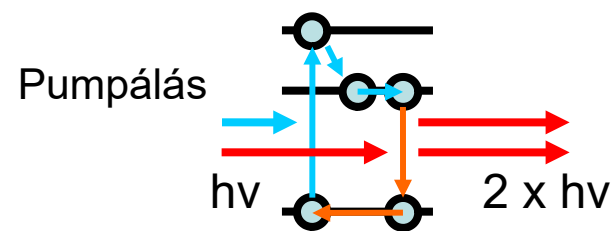
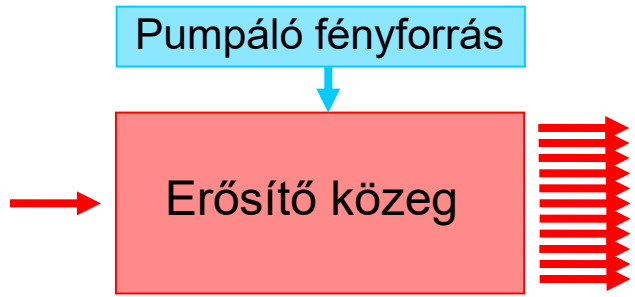
Populáció inverzió esetén:



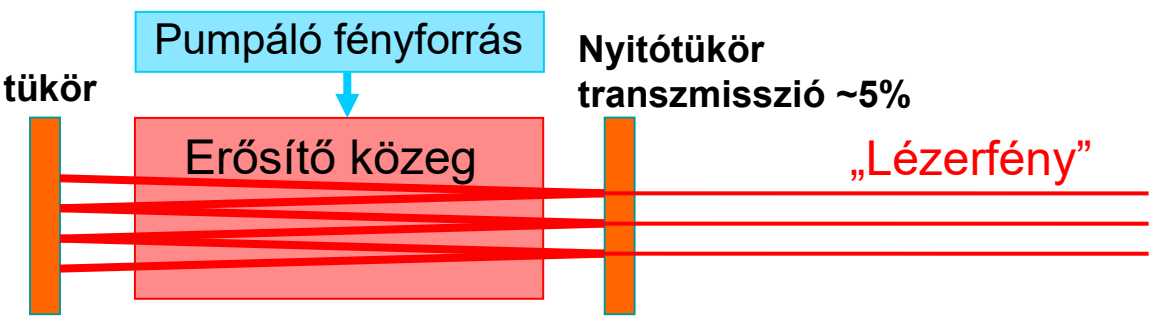
Az erősítés impulzus-szerű, hiszen az indukált emissziót követően az elektronok alapállapotba kerülnek

Pumpálás (abszorpció) és erősítés (indukált emisszió) ciklikus ismétlődése

Folytonos erősítés fenntartása pumpálással:

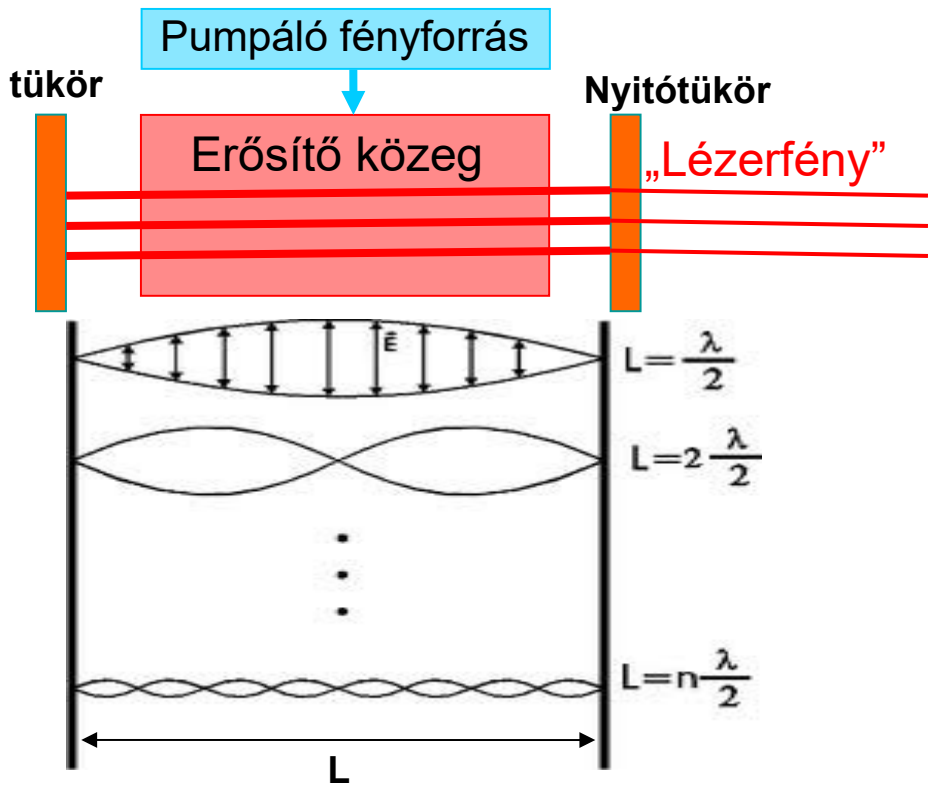


Visszacsatolás tükrökkel: optikai rezonátor



Optikai rezonátor

Laser: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

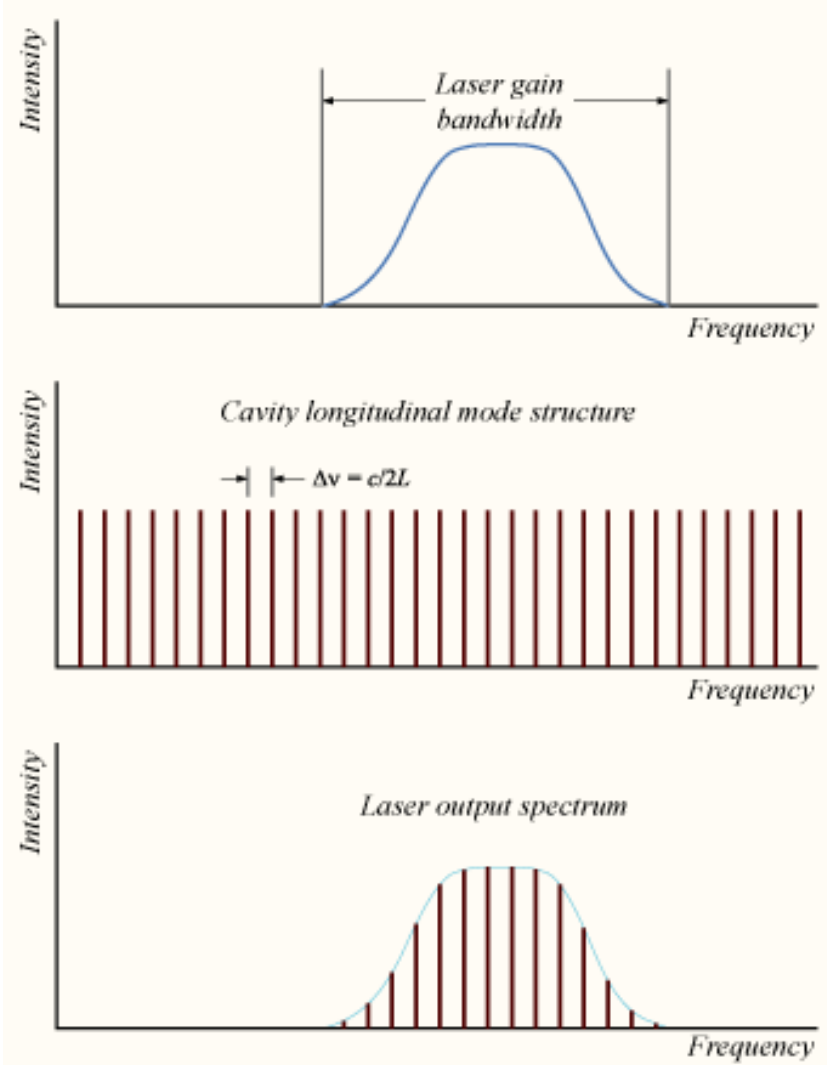


Rezonátor módusok távolsága:

$$\Delta f = \frac{c}{2L}$$

A rezonátor egyrészt elősegíti, hogy a fotonyaláb többször áthaladva a lézeraktív anyagon az indukált emisszióval "felerősödjön", másrészt növeli a fény koherenciáját

A rezonátor által meghatározott frekvenciák és a lézeraktív anyag erősítési görbéje együttesen határozzák meg a lézer fényének spektrumát.



A lézerműködés feltételei, lézerfény tulajdonságai

Lézerműködés feltételei

- Populáció inverzió
- Indukált emisszió
- Optikai erősítés

Megvalósítható

Alkalmasan megválasztott erősítő közeggel és pumpálással

Rezonátor tükrök

Lézerfény tulajdonságai:

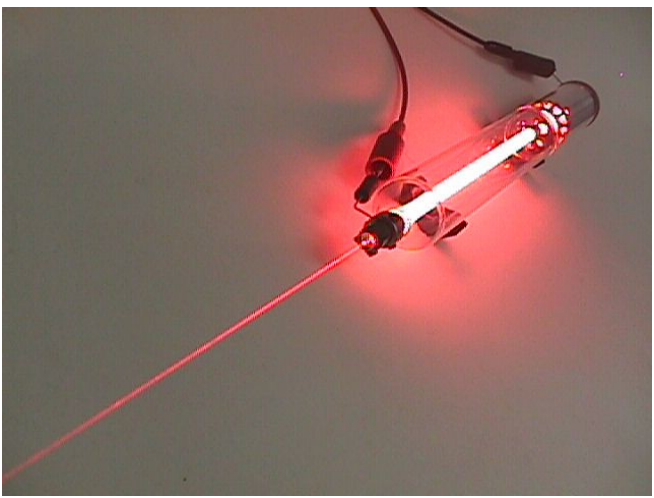
- Monokromatikus
(egyszínű; jellemző, stabil hullámhossza van)
- Kollimált (a nyalábnak kis nyílásszöge van)
- Koherens (a hullámtér két eltérő pontjában az elektromágneses rezgés fázisa időben állandó.)

(A koherencia csak egy bizonyos távolságtartományon belül igaz, ezt a távolságtartományt koherencia hosszának nevezzük. Néhány mm-től akár km-ig terjedhet)

Ezen tulajdonságok közös oka, hogy a lézerben indukált emisszió segítségével keltjük a fényt, ellentétben más fényforrásokkal, ahol a fény spontán emisszió útján jön létre.

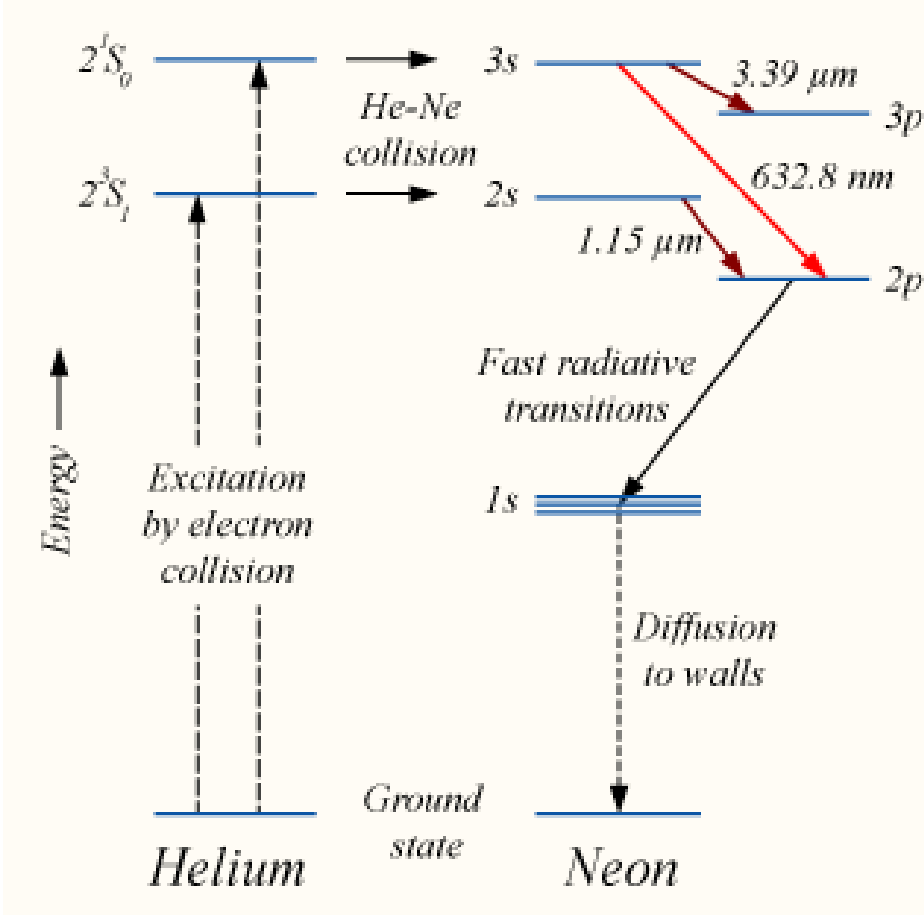
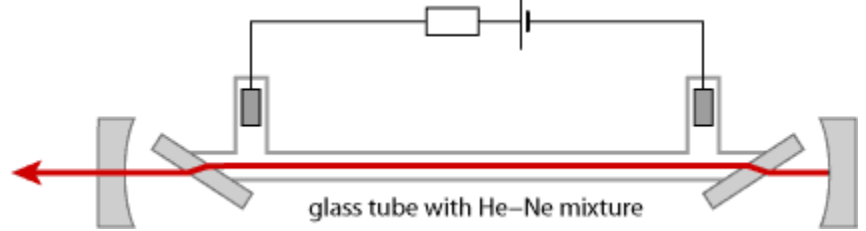


Gázlézer (He-Ne)



A gáztérben lévő plazmában (amelyben szabad elektronok és pozitív ionok is vannak) a hélium atomok a rugalmatlan ütközések során gerjesztődhetnek.

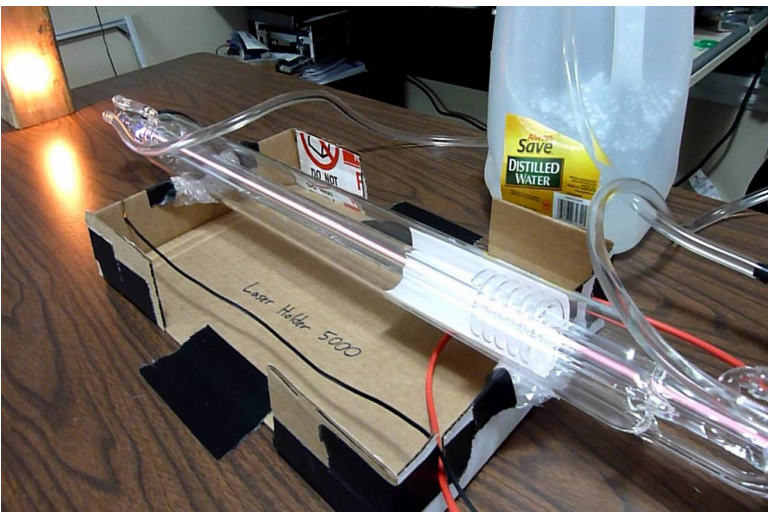
Egy gerjesztett hélium atom - ütközve egy neon atommal - átadhatja annak gerjesztési energiáját. A lézerműködés (indukált emisszió) a rezonátor tükrök reflexiójától függően a neon atom két megengedett nívója között jöhet létre.



$\lambda=632,8 \text{ nm}$
P=1-10 mW

- Jellemző koherencia hossz: $l \sim 30 \text{ cm}$
- Hatásfok $\sim 5\%$
- Felhasználása: laboratóriumi eszközök, interferométerek

Gázlézer (CO₂)

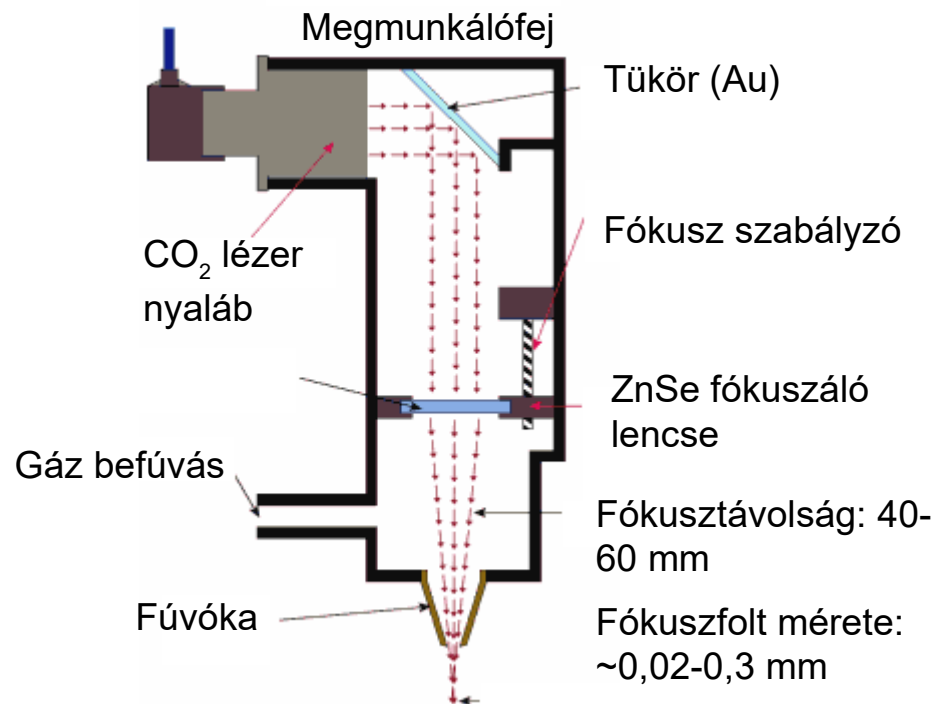
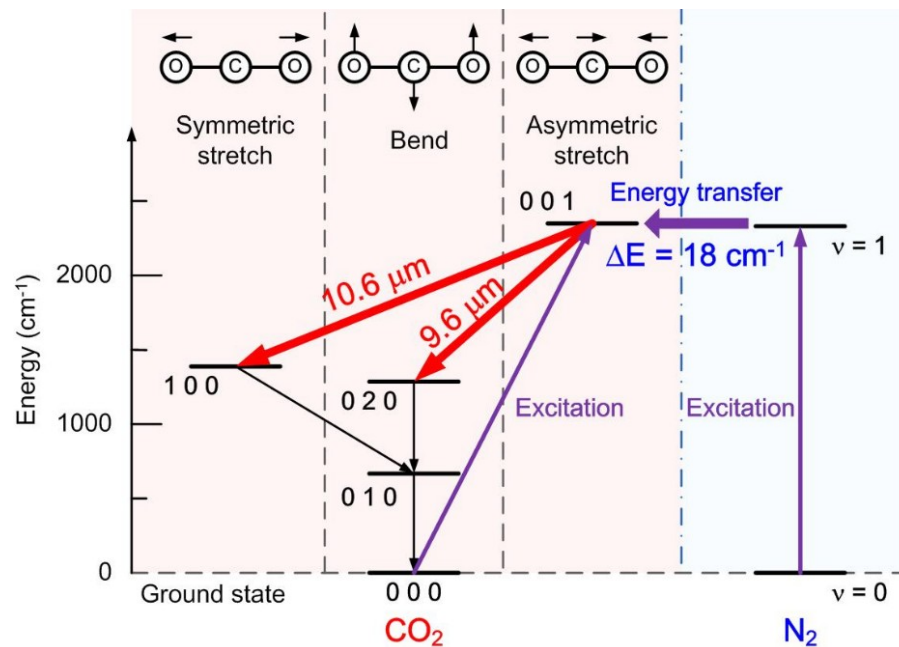


$\lambda=10,6 \mu\text{m}$

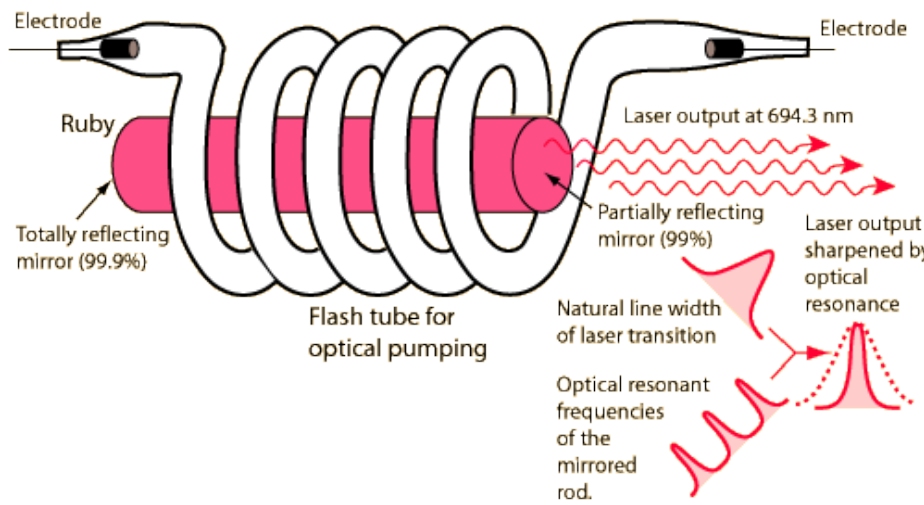
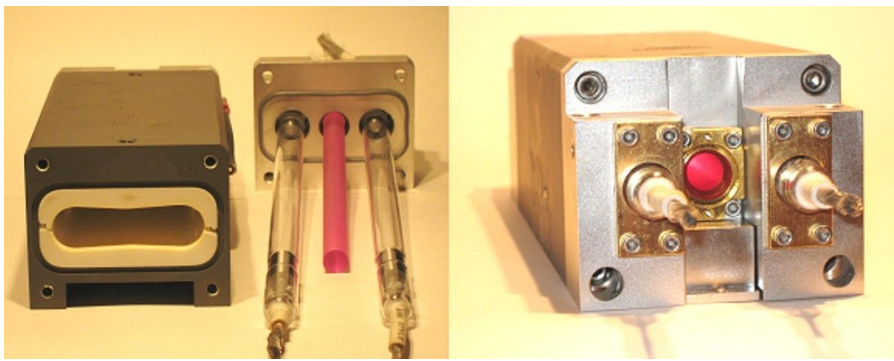
$P=10-10000 \text{ W}$

CO₂ molekula rezgési módusai közti átmenetek

- Gerjesztése: elektromos kisüléssel
- Hatásfok ~10-20%
- Nagy teljesítmény
- Felhasználása: ipari megmunkálás, sebészet



Szilárdtest lézer (rubin)



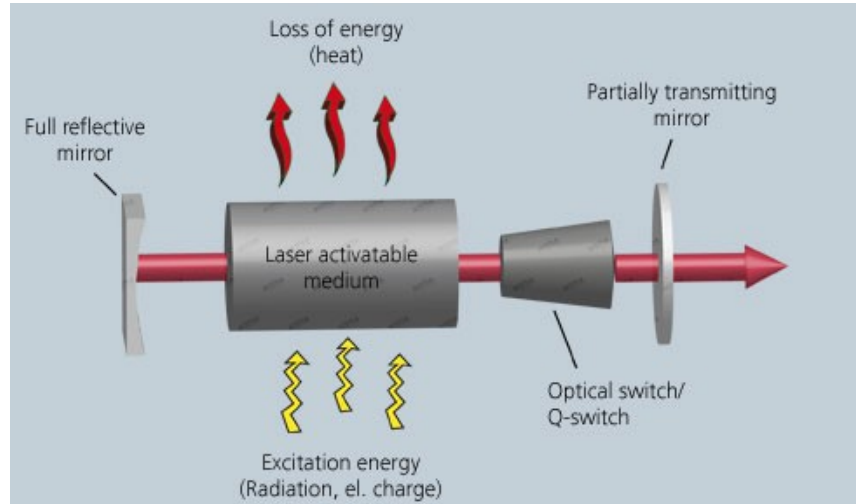
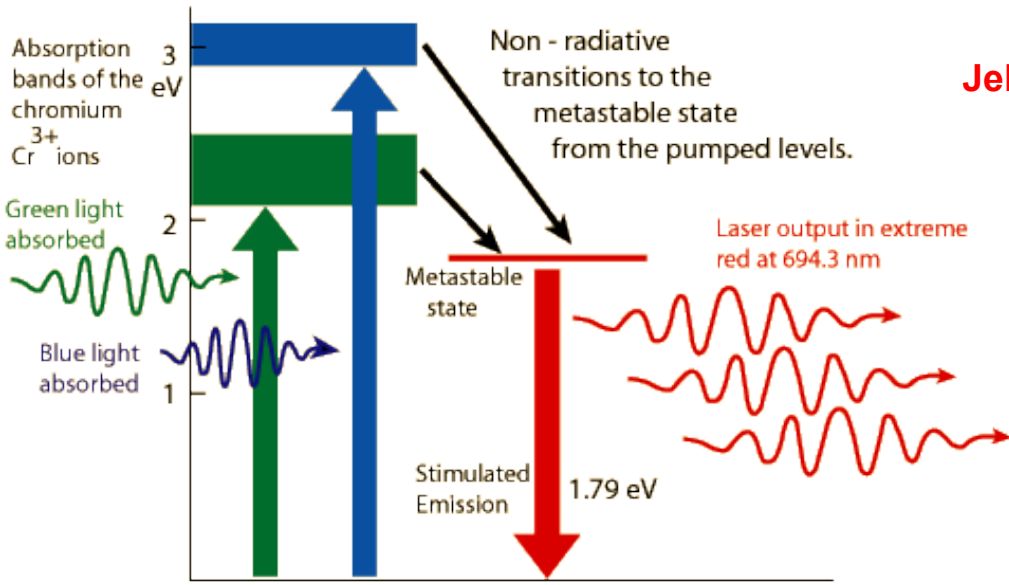
Rubin lézer: 1960. Nobel-díj **1964**-ben.
(N. G. Basov, A. Prokhorov, C. H. Townes)

$\lambda=694,3 \text{ nm}$

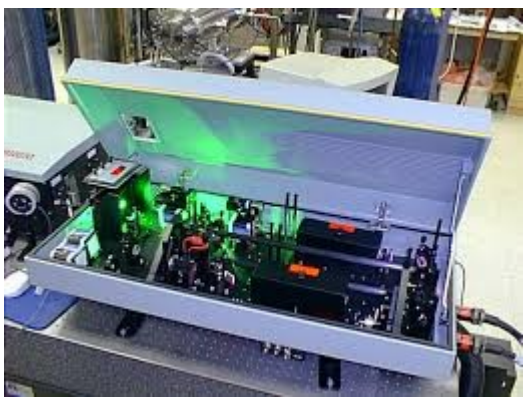
P=1-2 mW impulzus üzemű

Felhasználása: laboratóriumi eszközök,
lézeres radar

Jellemző koherencia-hossz: néhány mm



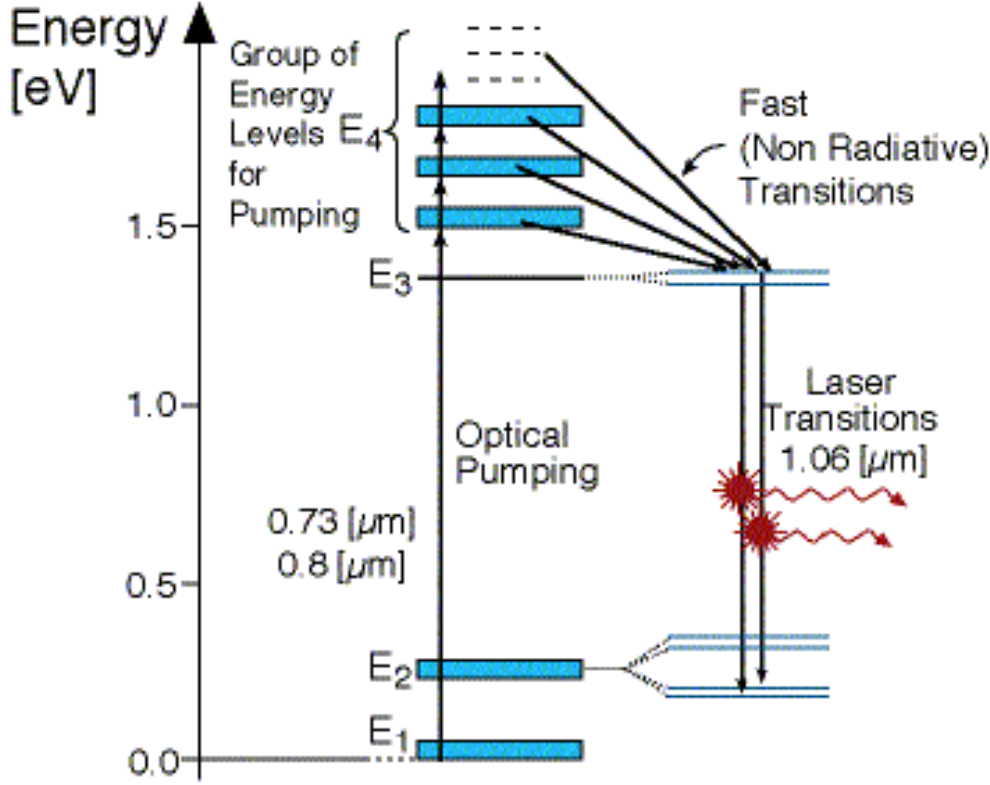
Szilárdtest lézer (Nd:YAG)



$\lambda=1064 \text{ nm}, 532 \text{ nm}$ (frekvencia kétszerezve)

$P=1 \text{ mW}-5000 \text{ W}$

- Gerjesztése: kisülőlámpával, LED-del, lézertiódával
- Felhasználása: laboratóriumi eszközök, lézer pointer, ipari megmunkálás, sebészet (finomabb megmunkálást tesz lehetővé, mint a CO_2)



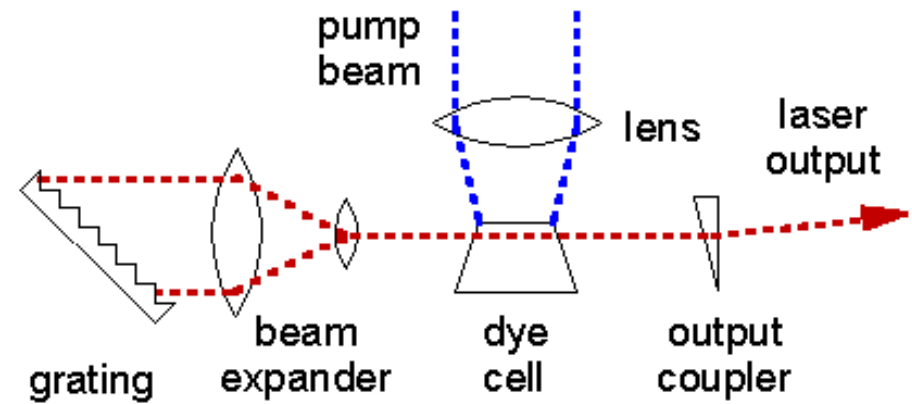
Neodímium atomok
Ittrium-alumínium-gránát kristályban



Festék lézer

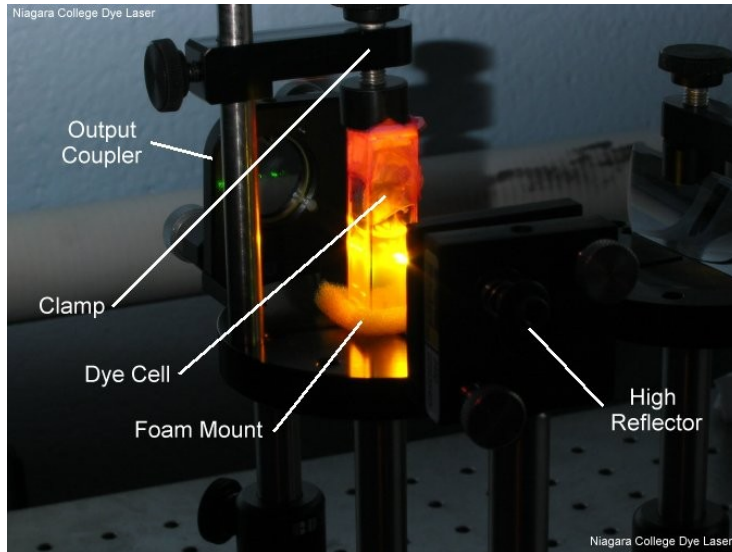
Lézeraktív anyag: szerves fluoreszcens festékek

Rezonátorban elhelyezett diszperzív optikai elem segítségével a lézer hullámhossza széles (~100 nm-es) tartományban hangoltató:

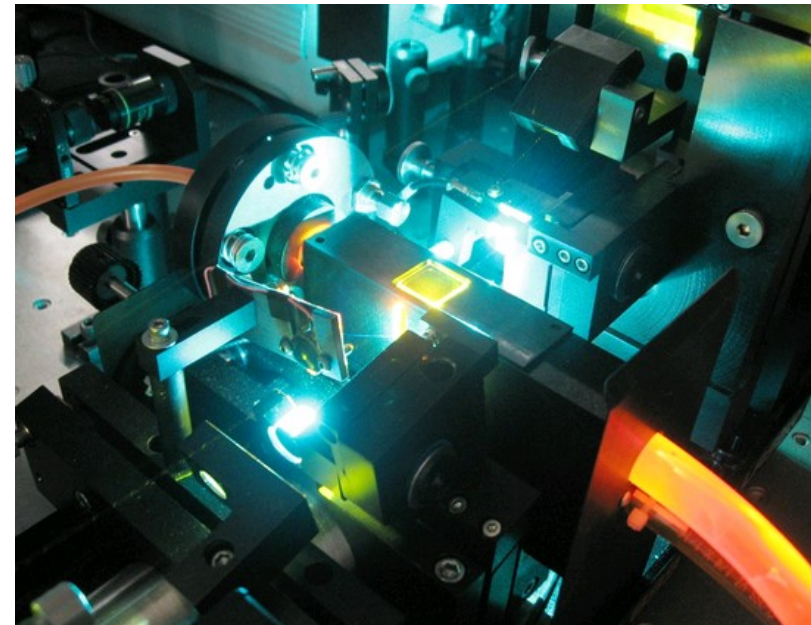


$\lambda \approx 1000 \text{ nm} - 400 \text{ nm}$ (festéktől függően)

$P = 1 \text{ mW} - 5000 \text{ W}$



- Gerjesztése: kisülőlámpával, másik lézerrel
- Felhasználása: spektroszkópia, ipari megmunkálás, sebészet, bőrgyógyászat.



További alkalmazások

Vágás, hegesztés,
forrasztás, felületkezelés



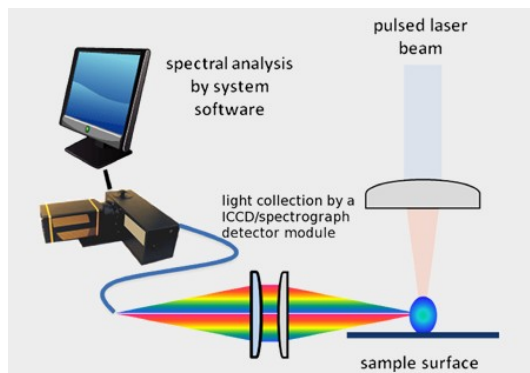
Hologram készítés



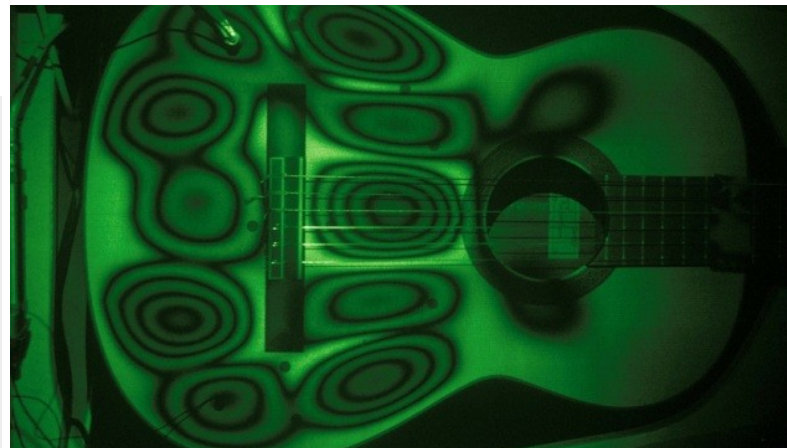
„Traffipax”



Anyagvizsgálati
módszerek



Interferometria, alakmérés



Áramlástanai vizsgálatok

