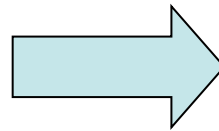
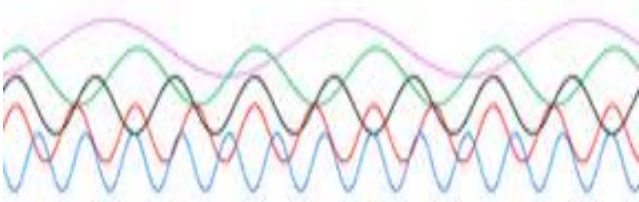


Koherens fény (miért is különleges a lézernyaláb?)

Inkoherens fény

Atomok egymástól függetlenül sugároznak ki különböző hullámhosszon sugároznak ki elektromágneses hullámokat



Pl: Termikus sugárzó



Koherens fény

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



Pl: Lézer



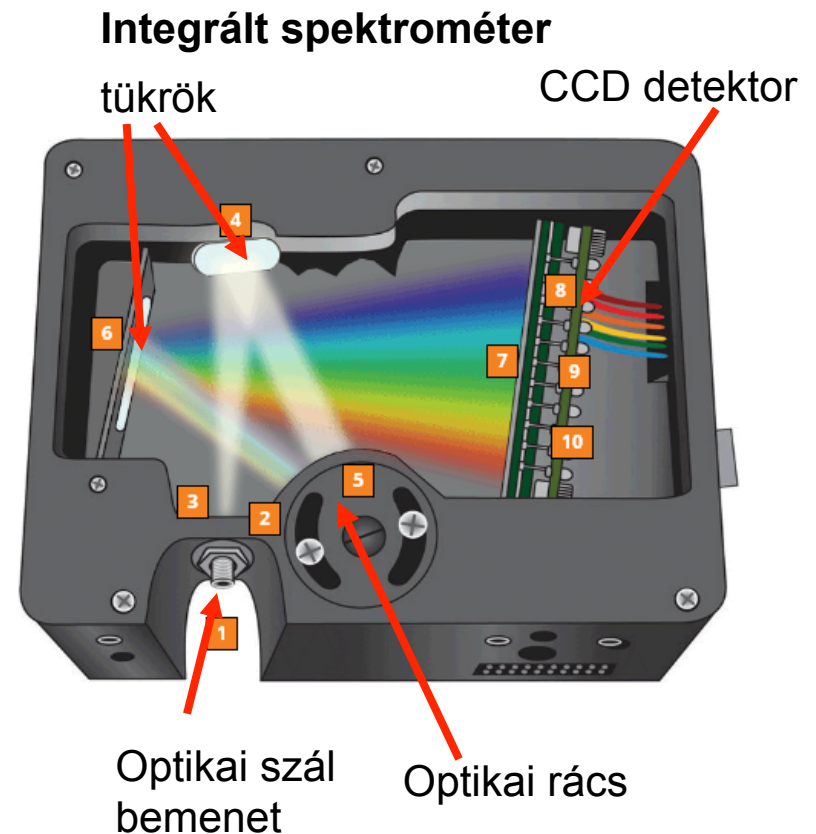
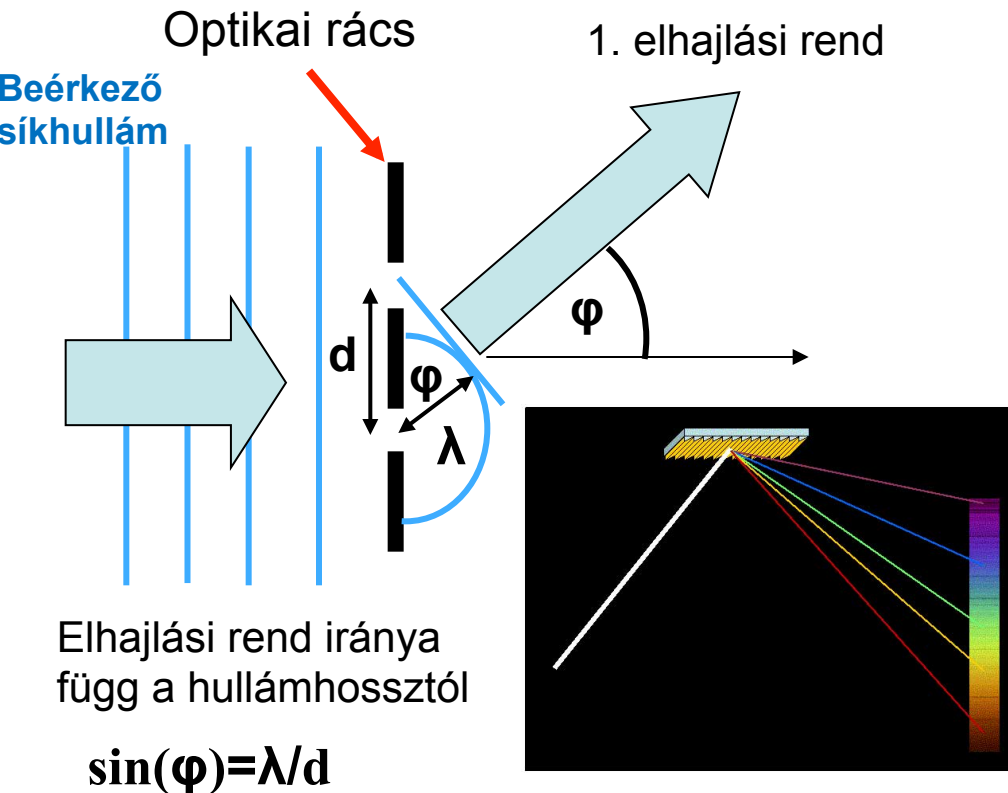
Spektrométer

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.



Termikus sugárzás

Planck-féle sugárzási törvény

Hullámhossz szerint:

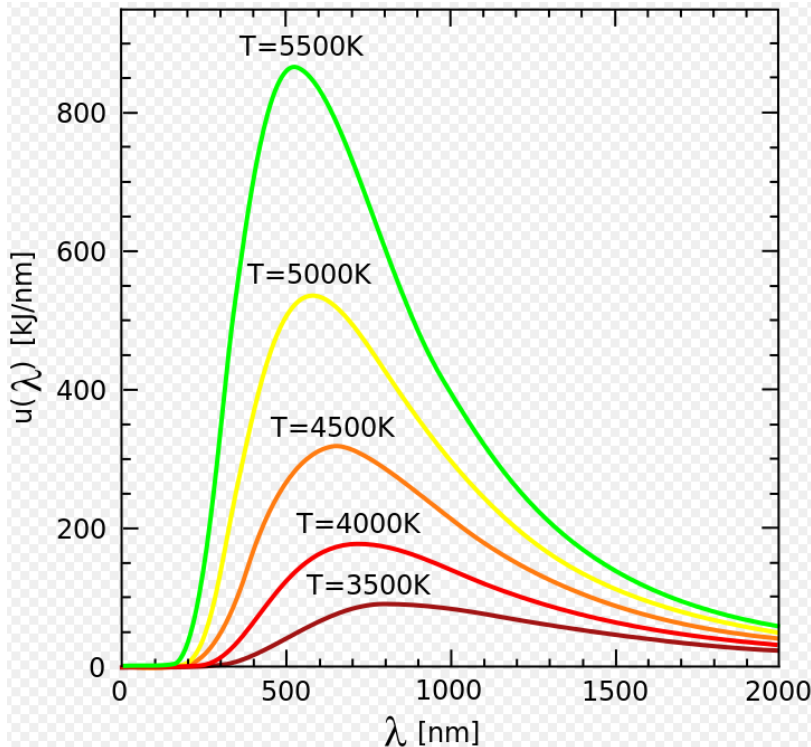
$$g(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left\{\frac{hc}{\lambda kT}\right\} - 1}$$

Frekvencia szerint:

$$g(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3} \cdot \frac{h\nu^3}{\exp\left\{\frac{h\nu}{kT}\right\} - 1}$$

Planck-állandó: h

Boltzmann-állandó: k



Összes kisugárzott intenzitás

$$J(T) = \int_0^{\infty} I(\lambda, T) d\lambda$$

Stefan-Boltzmann törvény

$$J(T) = \sigma T^4$$

Wien-féle eltolódási törvény

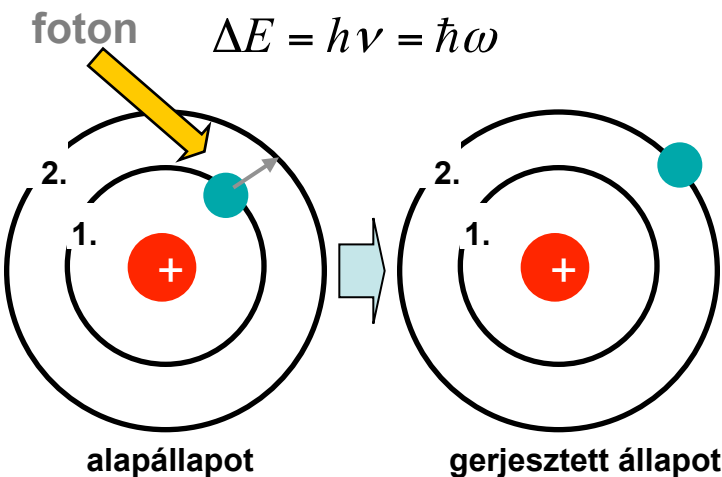
$$\lambda_{\max} T = \text{állandó}$$

Minél nagyobb a sugárzó T hőmérséklete, annál rövidebb az a $\lambda_{\max}$ hullámhossz, amely hullámhosszon a sugárzás spektrális teljesítménysűrűsége a legnagyobb.

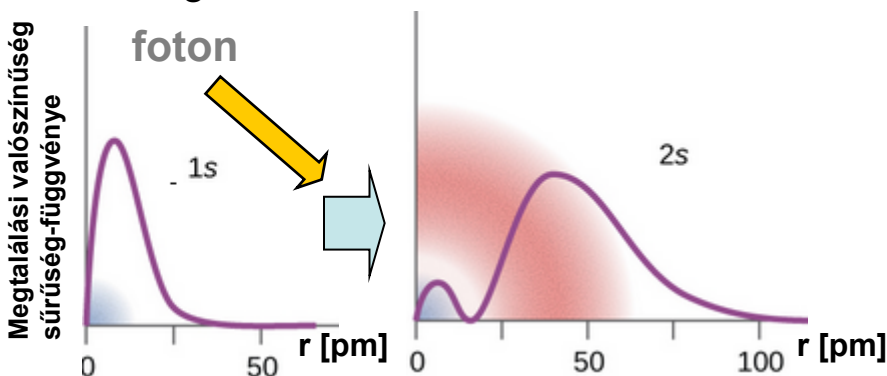
Atomok fénykibocsátása, fényelnyelése

abszorpció

Bohr-modell:



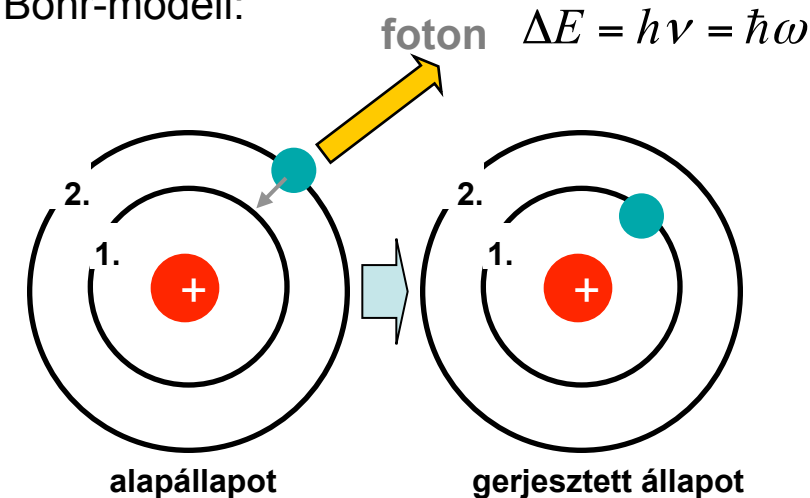
Schrödinger-modell:



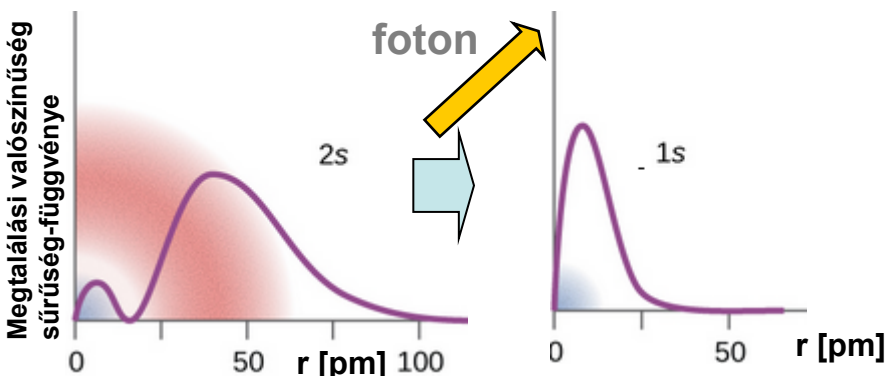
A foton **abszorpciója** során az atom elektronja elnyel egy fotont, miközben egy magasabb energiaszintre kerül. Az elnyelt foton energiája megegyezik az elektron két állapota közti energiakülönbséggel: $\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$.

emisszió

Bohr-modell:



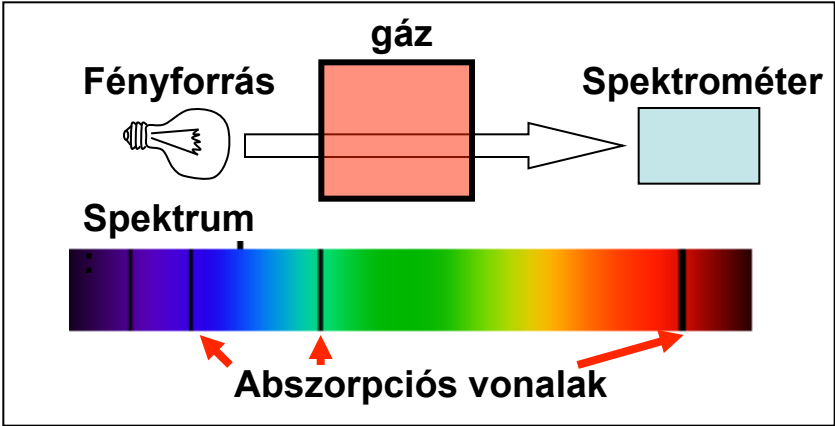
Schrödinger-modell:



Az **emisszió** során az elektron egy magasabb energájú állapotból alacsonyabb energájú állapotba kerül, miközben kisugároz egy, a két állapot energia-különbségének megfelelő energájú fotont.

Az Einstein együtthatók 1.

Abszorpció (fényelnyelés)



Kétnívós atom modell:

Az atomot kétnívós rendszernek tekintjük.

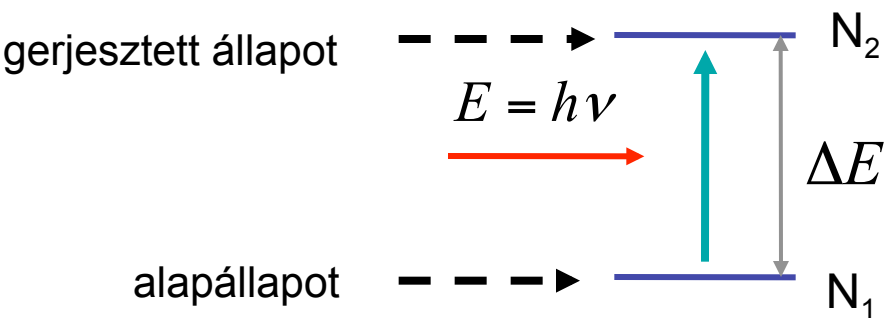
Az egységnyi térfogatban található alapállapotú atomok száma: N_1 .

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.

A az abszorpcióra jellemző Einstein együttható.
 g_ν a fekete test sugárzás leírásából ismert foton-sűrűség frekvencia szerinti eloszlása.



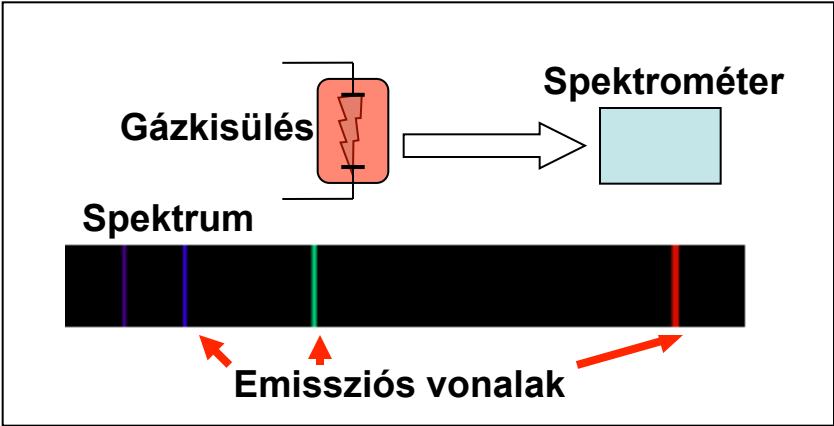
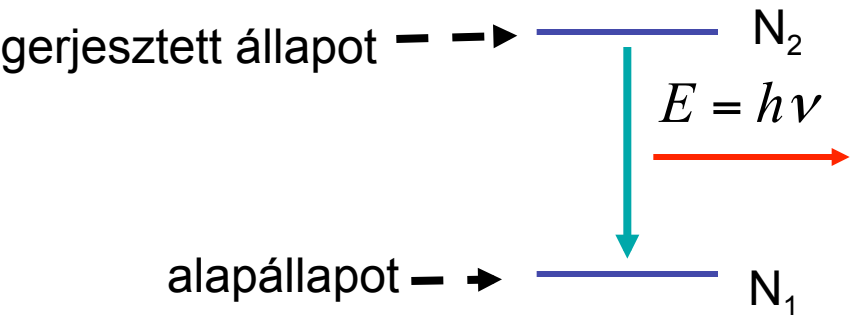
abszorpció

$dN_{12} = Ag_\nu N_1 dt$

Einstein együttható Foton sűrűség

Az Einstein együtthatók 2.

Spontán emisszió



spontán emisszió

$$dN'_{21} = B_s N_2 dt$$

Einstein együttható

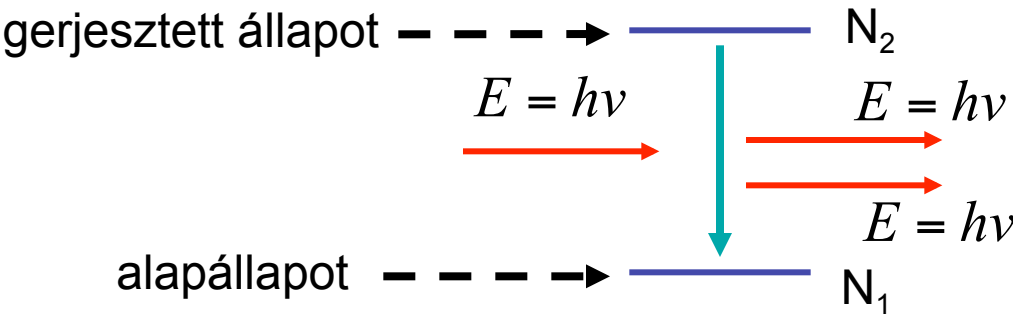
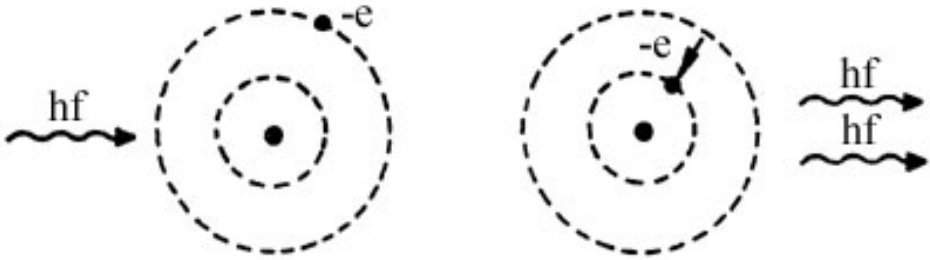
dN'_{21} adja meg a dt időtartam alatt a spontán folyamattal gerjesztettségét elvesztő (alapállapotba jutó) atomok számát. A spontán emisszió alatt az atom egy $h\nu$ energiájú foton kisugárzásával csökkenti energiáját.

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

$$dN''_{21} = B_i g_\nu N_2 dt$$

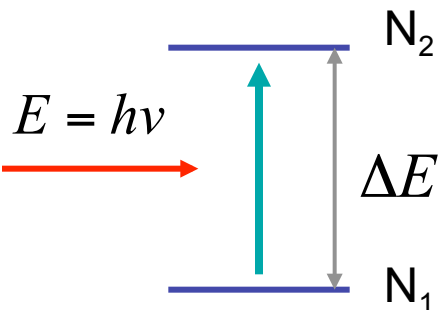
Einstein együttható Foton sűrűség:

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)

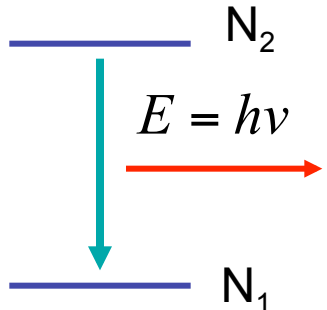
dN''_{21} adja meg a dt időtartam alatt indukált emisszióval legerjesztődő (alapállapotba jutó) atomok számát. Ez értelemszerűen arányos a gerjesztett atomok számával és a fotonok számával (sűrűségével) is.

Két állapotú atom és foton kölcsönhatásai



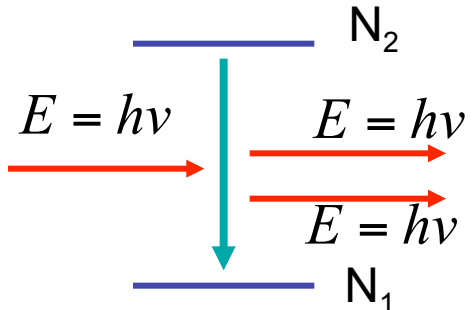
abszorpció

$$dN_{12} = Ag_{\nu} N_1 dt$$



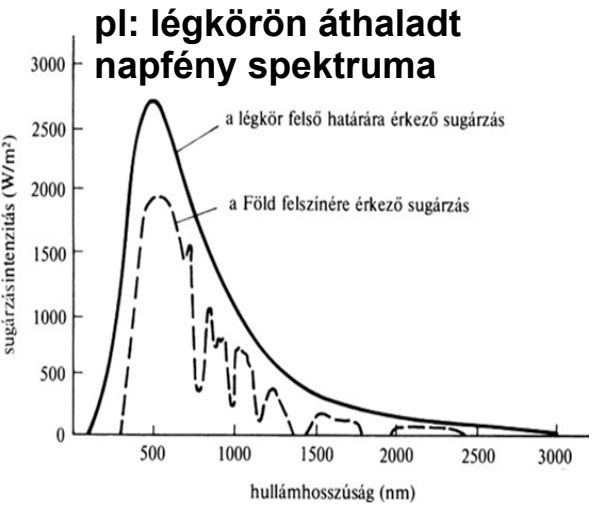
spontán emisszió

$$dN'_{21} = B_s N_2 dt$$



indukált emisszió

$$dN''_{21} = B_i g_{\nu} N_2 dt$$



Spektrum:



Abszorpciós vonalak



pl: kisülő lámpák spektruma



Spektrum:



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: $dN_{12} = Ag_{\nu} N_1 dt$

spontán emisszió: $dN'_{21} = B_s N_2 dt$

indukált emisszió: $dN''_{21} = B_i g_{\nu} N_2 dt$

Kifejezve a fotonsűrűséget:

$$g_{\nu} = \frac{B_s / A}{\frac{N_1}{N_2} - \frac{B_i}{A}}$$

$$g_{\nu} = \frac{B_s / A}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - \frac{B_i}{A}}$$

A két kifejezés csak akkor lehet egyenlő, ha:

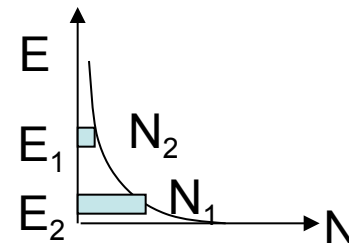
1) $A = B_i$ 2) $\frac{B_s}{A} = \frac{8h\nu^3 \pi}{c^3}$

Vagyis az indukált emisszió Einstein együtthatója nem nulla!

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

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

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



Kétnívós, termodinamikai egyensúlyban lévő rendszerre:

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) = \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) \quad \leftarrow E_2 - E_1 = h\nu$$

Termodinamikai egyensúlyban a fotonsűrűség:

$$g_{\nu} = \frac{8\pi}{c^3} \cdot \frac{h\nu^3}{\exp\left\{\frac{h\nu}{kT}\right\} - 1}$$

Lásd: (hőmérsékleti sugárzás)

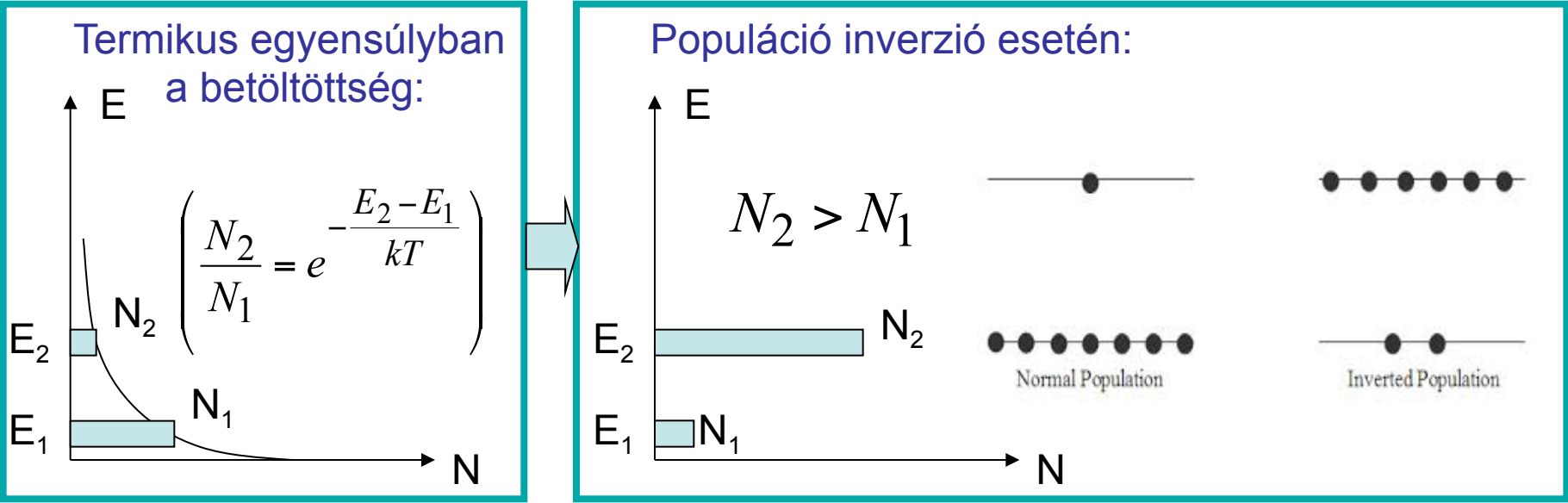
A spontán emisszió és az indukált emisszió gyakoriságának aránya: ($\lambda=10\mu\text{m}$, $T=300\text{K}$)

$$\frac{dN'_{21}}{dN''_{21}} = \frac{B_s}{gB_i} = 125$$

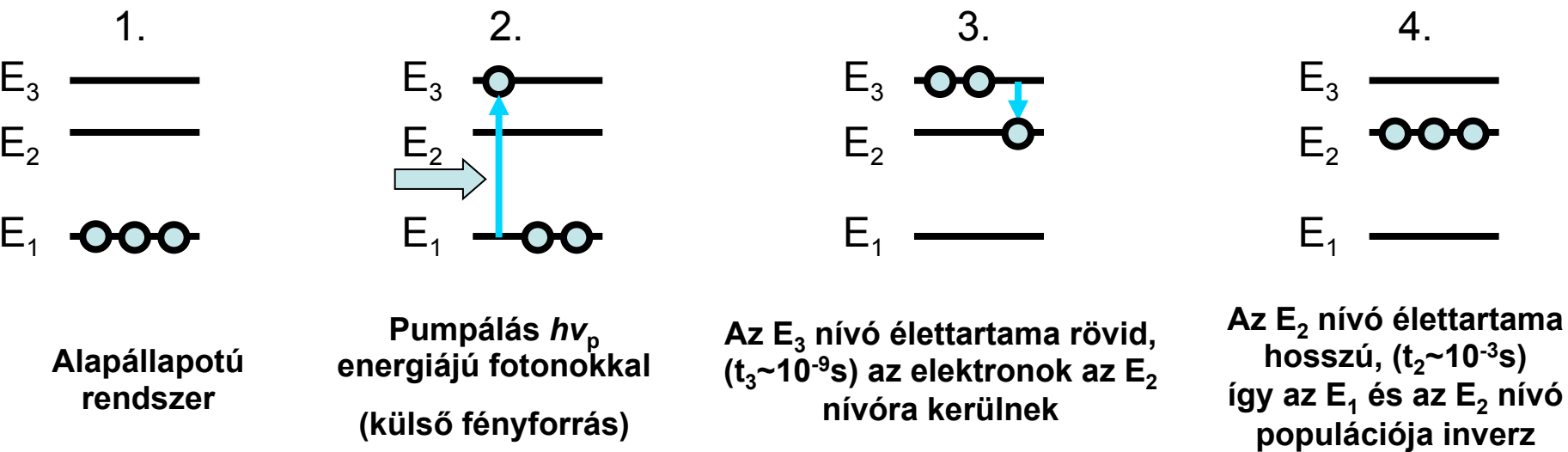
Szobahőmérsékleten, közeli infravörös tartományban a spontán emisszió 125x gyakoribb, mint az indukált emisszió!

Indukált emisszió valószínűségének növelése

Populáció inverzió megvalósításával:



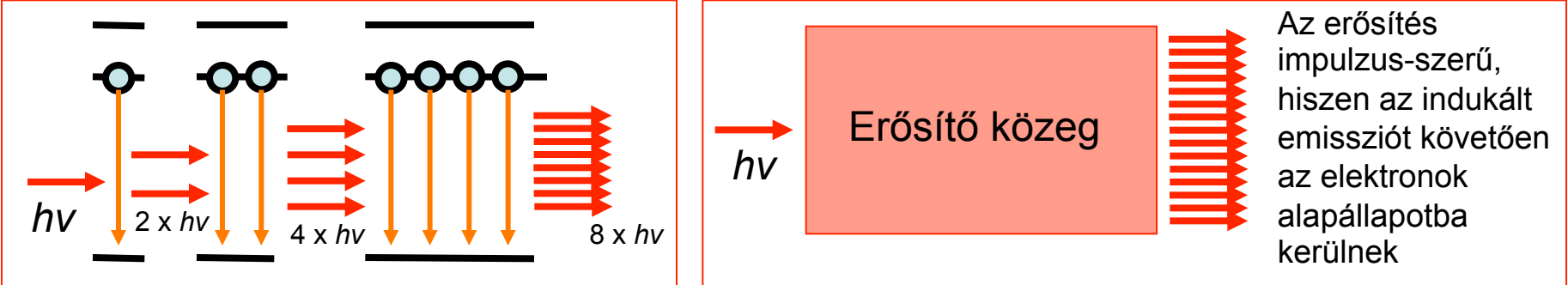
A populáció inverzió megvalósításához legalább 3 nívó szükséges:



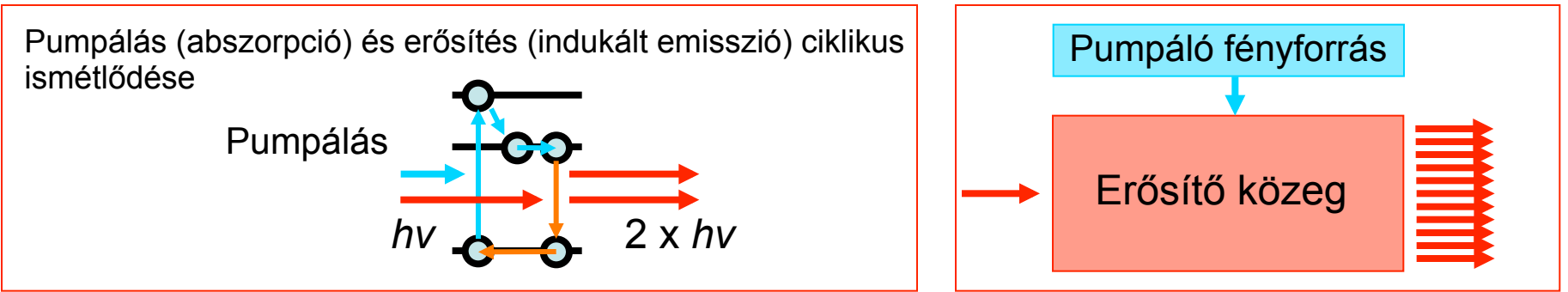
Fényerősítés indukált emisszióval

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

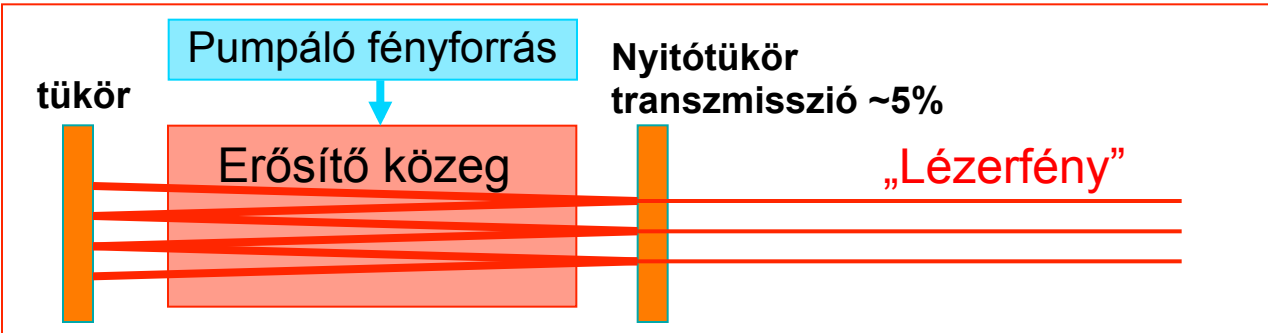
Indukált emisszó inverz populációjú közegben:



Folytonos erősítés fenntartása pumpálással:

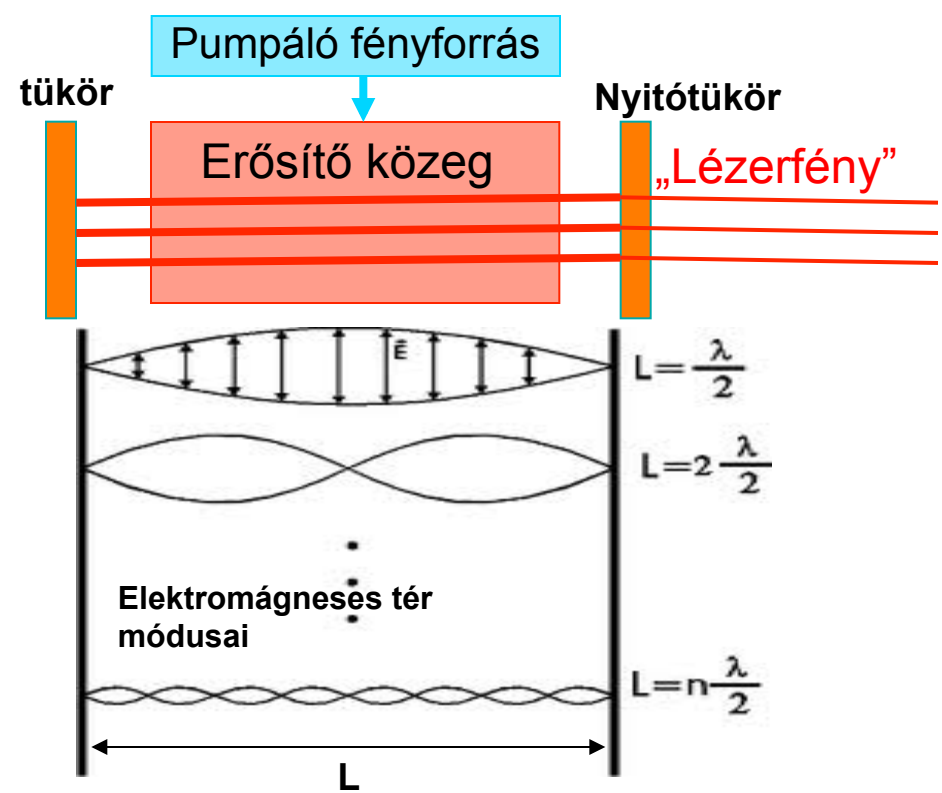


Visszacsatolás tükrökkel: optikai rezonátor



Optikai rezonátor

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

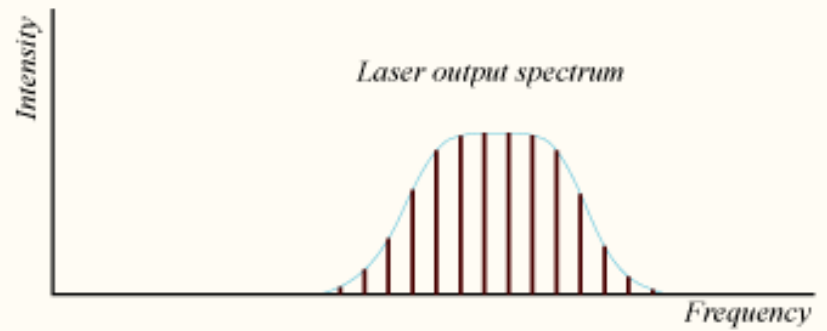
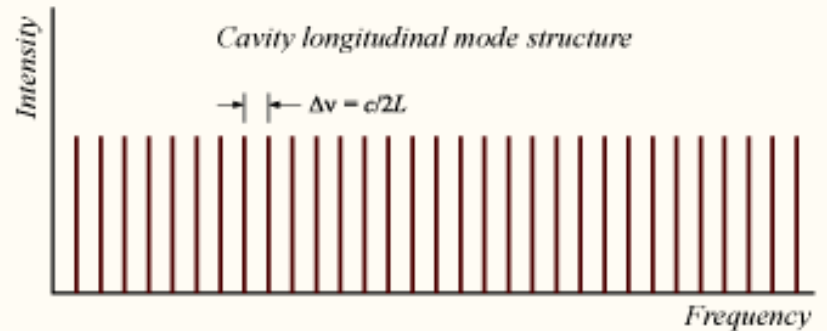
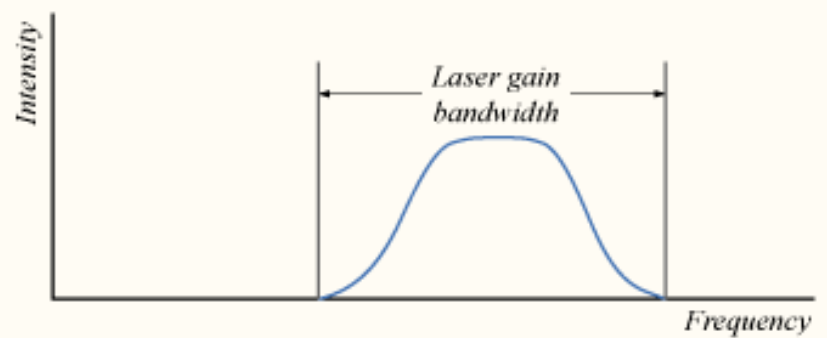


Rezonátor módusok távolsága:

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

A rezonátor elősegíti, hogy az elektromágneses térnek csak egy (vagy csak néhány) módusa gerjesztődjön, miáltal a rezonátorból kilépő fény koherens lesz.

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
- Pumpálással
- Rezonátor tükrök segítségével

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.)

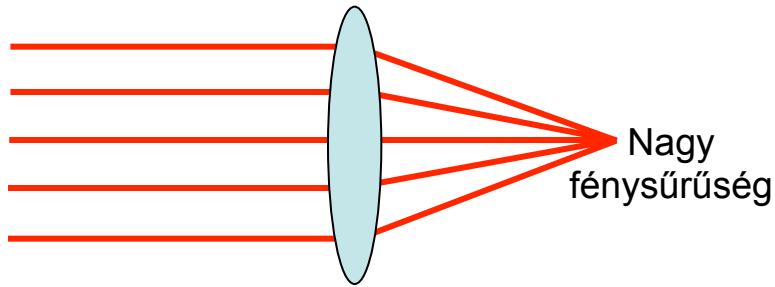
(A koherencia csak egy bizonyos távolságtartományon belül igaz, ezt a távolságtartományt koherencia hosszának nevezzük. Néhány mm-től akár km-ig terjedhet)

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

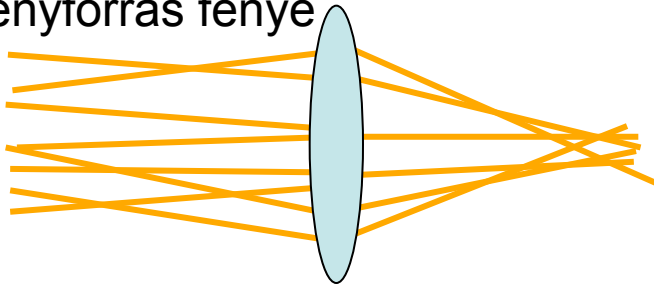


Fókuszálhatóság

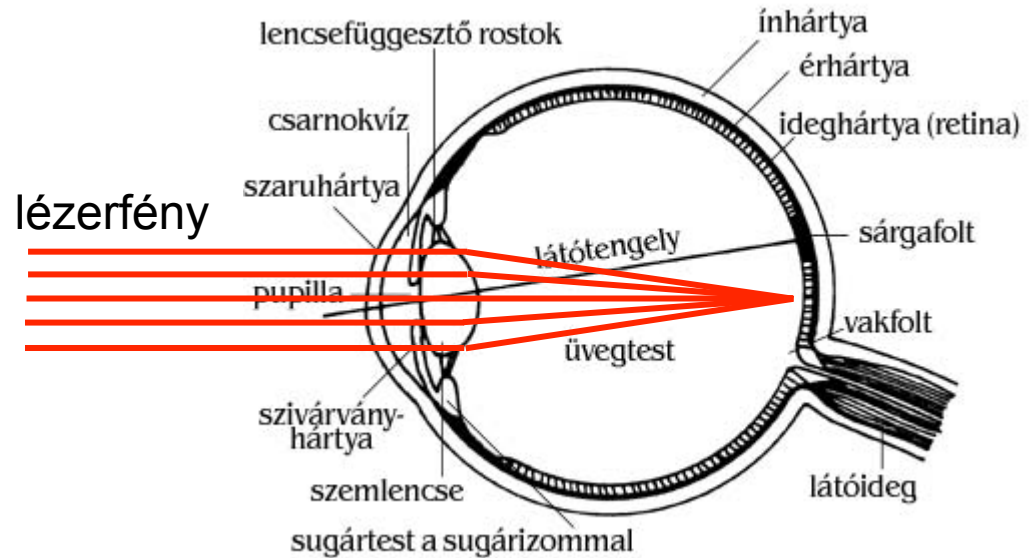
Kollimált lézernyaláb



Hagyományos
fényforrás fénye

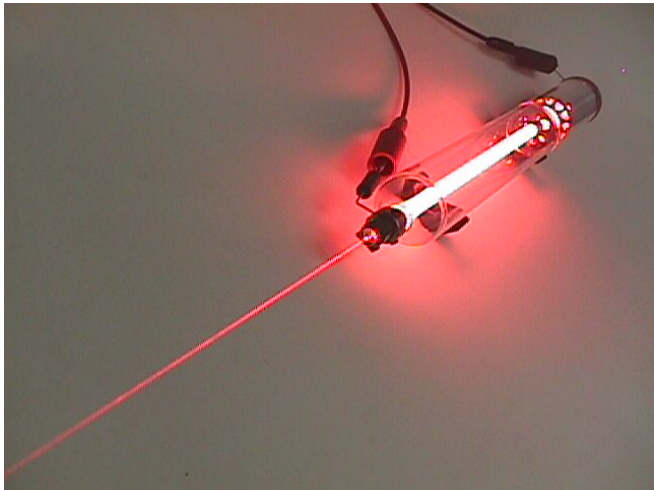


A lézerfény veszélyei



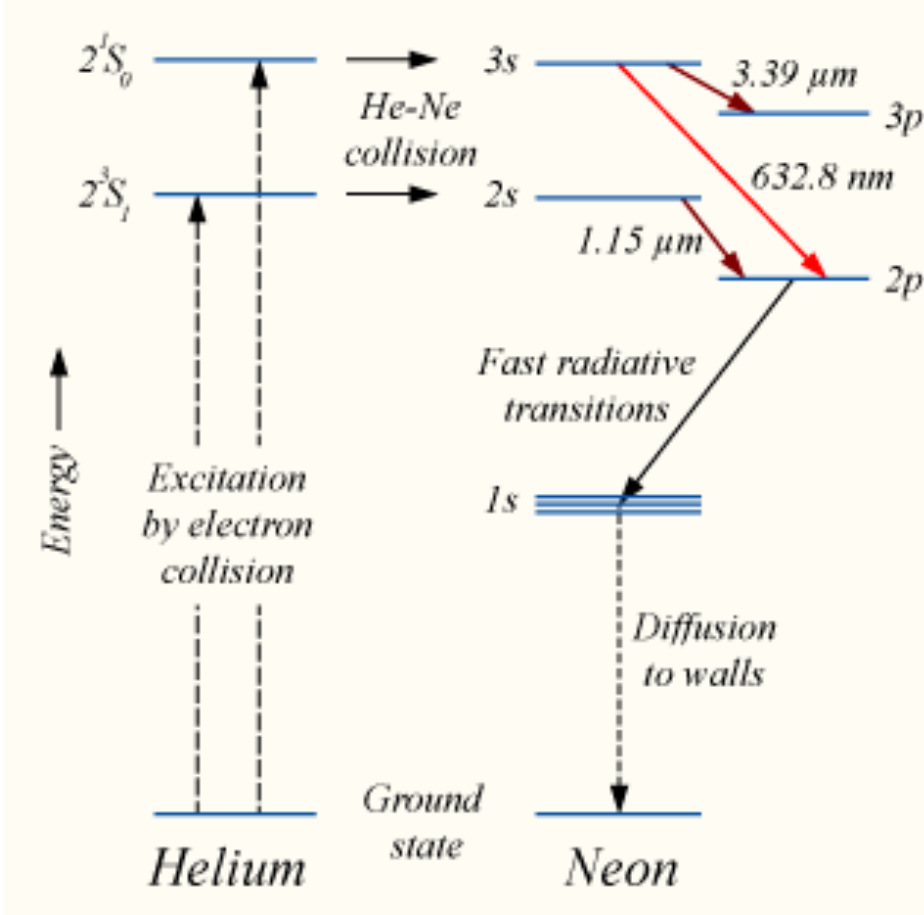
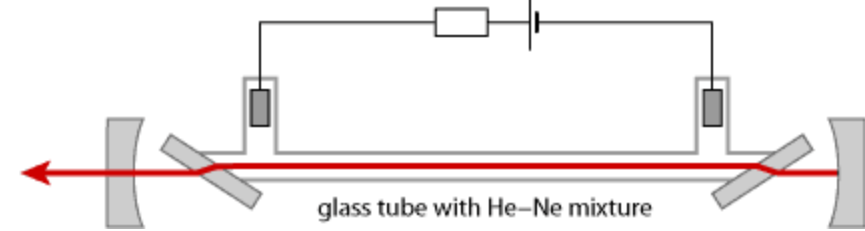
Ha $P < 1\text{mW}$ és $\Delta t < 0,25\text{s}$, nem
történik maradandó károsodás

Gázlézer (He-Ne)



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

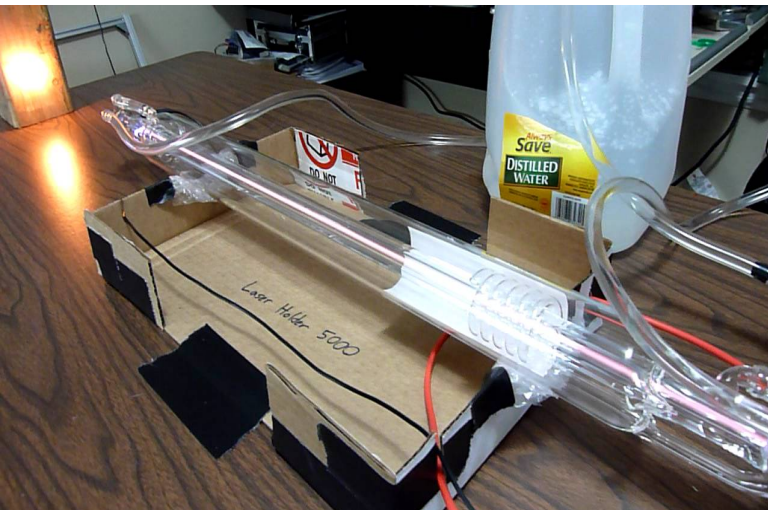
Egy gerjesztett hélium atom - ütközve egy neon atommal - átadhatja annak gerjesztési energiáját. A lézerműködés (indukált emisszió) a rezonátor tükröknek reflexiójától függően a neon atom két megengedett nívója között jöhet létre.



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

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

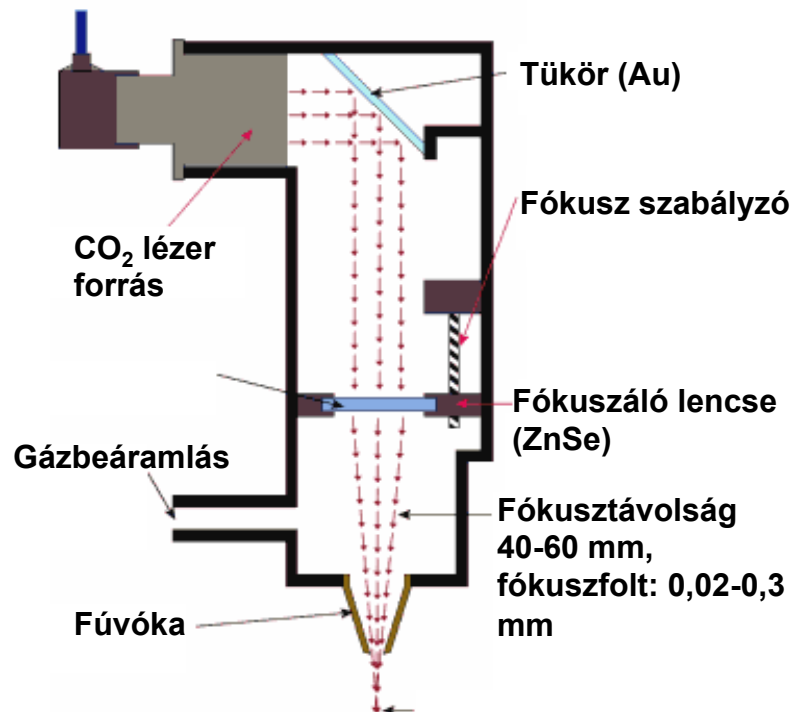
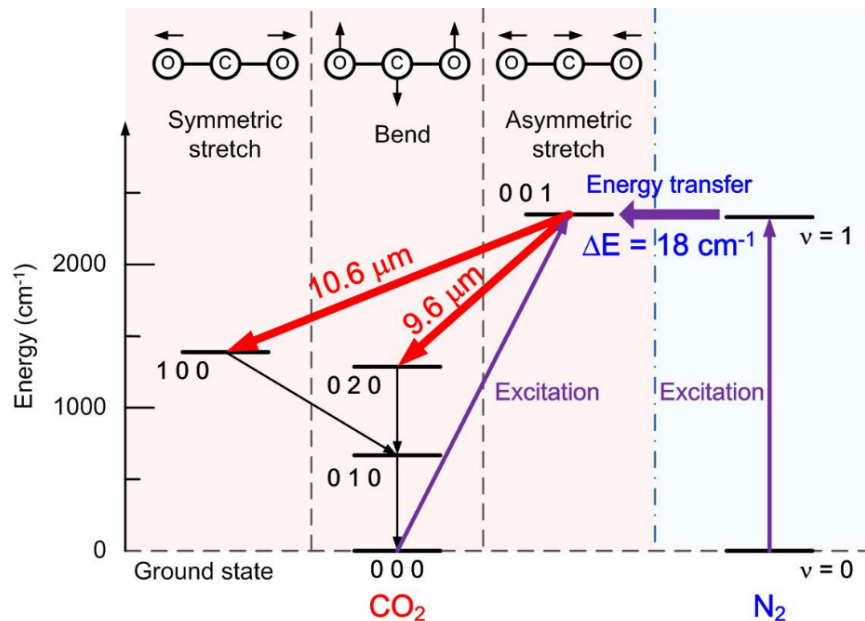
Gázlézer (CO₂)



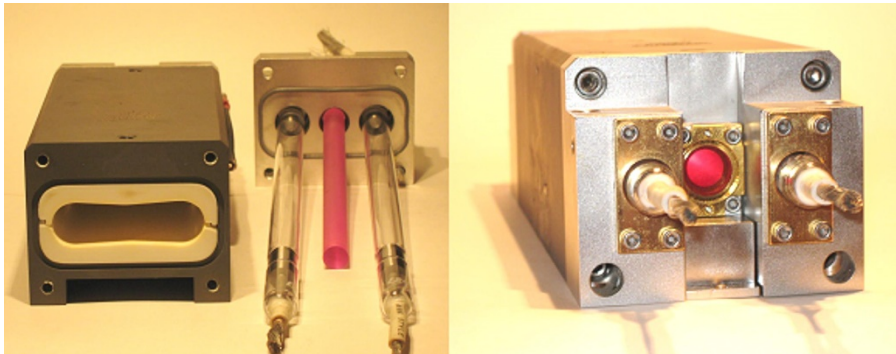
$$\lambda = 10,6 \mu\text{m}$$

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

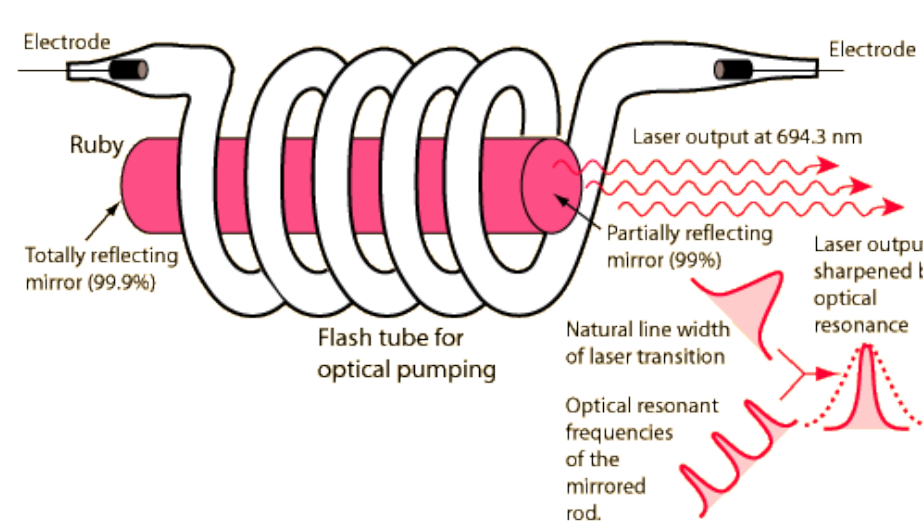
- CO₂ molekula rezgési módusai közti átmenetek
- Gerjesztése: elektromos kisüléssel
- Hatásfok ~10-20%
- Nagy teljesítmény
- Felhasználása: ipari megmunkálás, sebészet



Szilárdtest lézer (rubin)



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

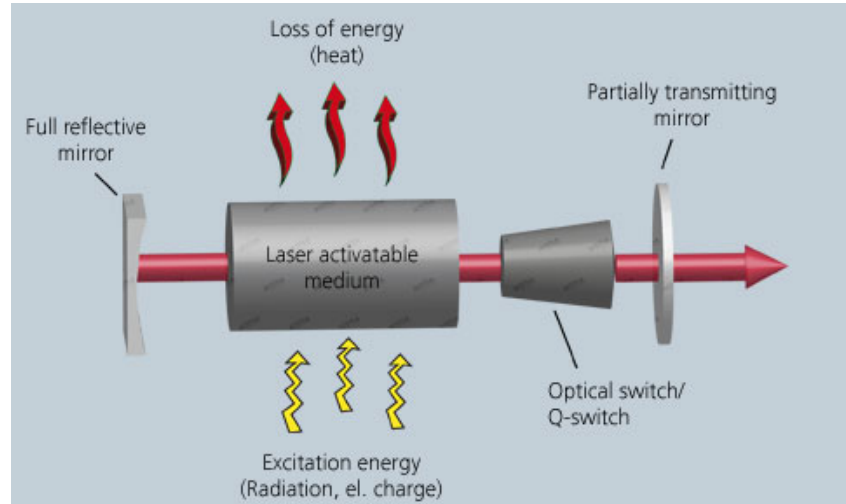
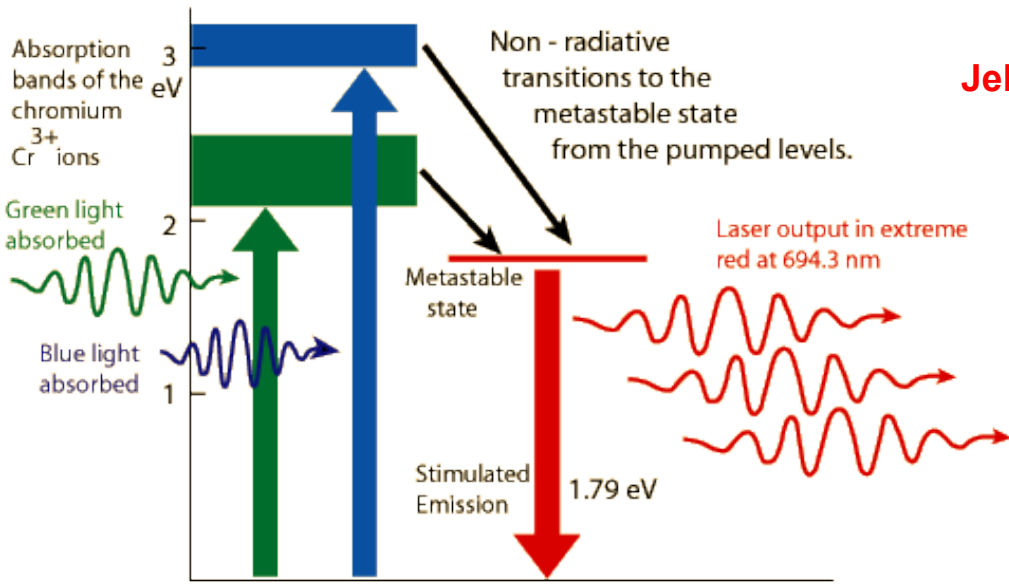


$\lambda=694,3 \text{ nm}$

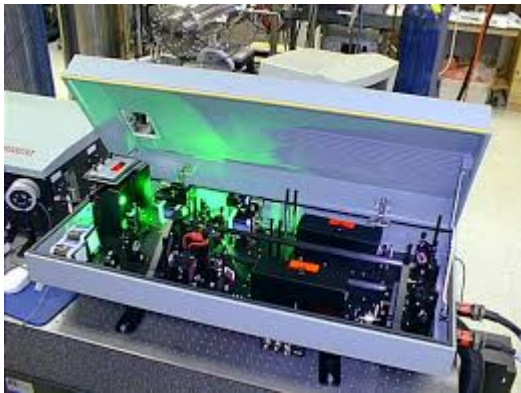
P=1-2 mW impulzus üzemű

Felhasználása: laboratóriumi eszközök,
lézeres radar

Jellemző koherencia-hossz: néhány mm



Szilárdtest lézer (Nd:YAG)



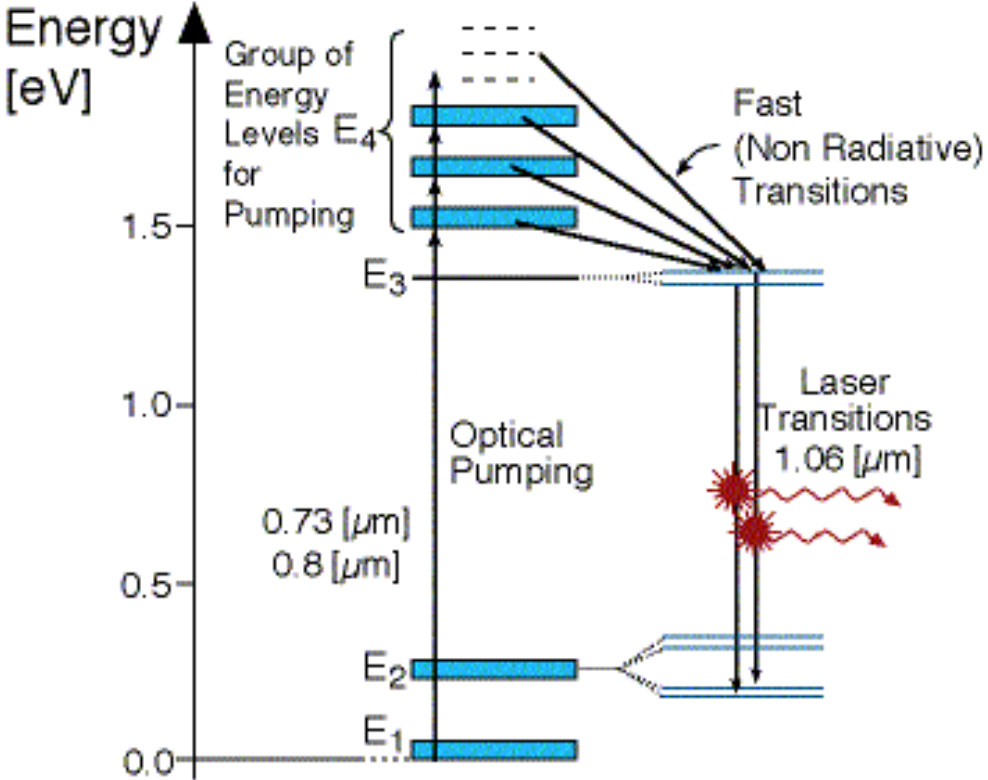
$\lambda=1064\text{ nm}, 532\text{ nm}$ (frekvencia kétszerezve)

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

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



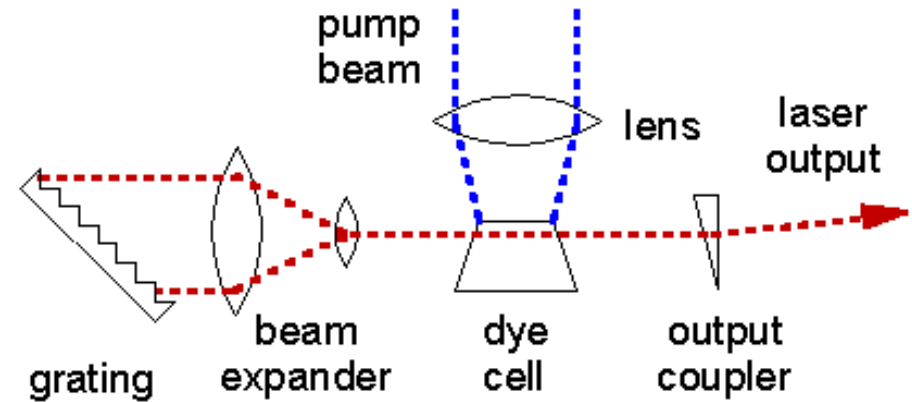
Neodímium atomok
Ittrium-alumínium-gránát kristályban



Festék lézer

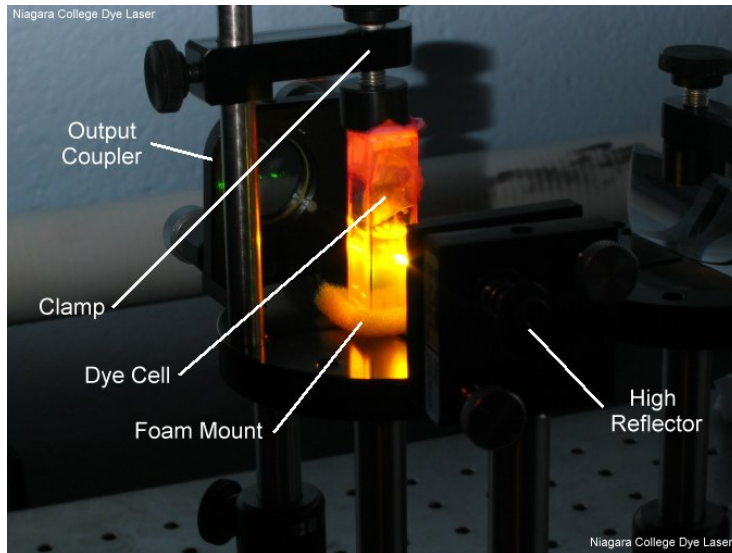
Lézeraktív anyag: szerves fluoreszcens festékek

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

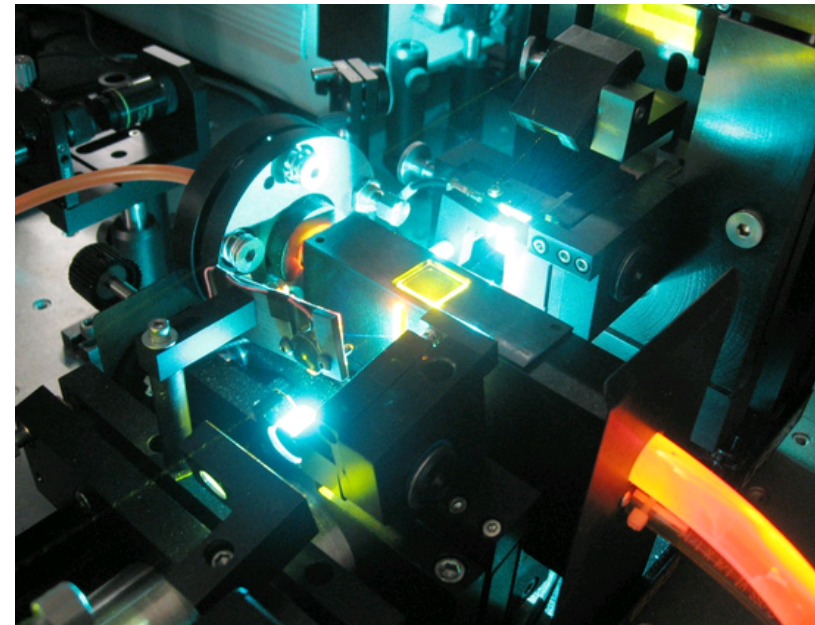


$\lambda \sim 1000 \text{ nm} - 400 \text{ nm}$ (festéktől függően)

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



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



További alkalmazások

Vágás, hegesztés,
forrasztás, felületkezelés



Hologram készítés



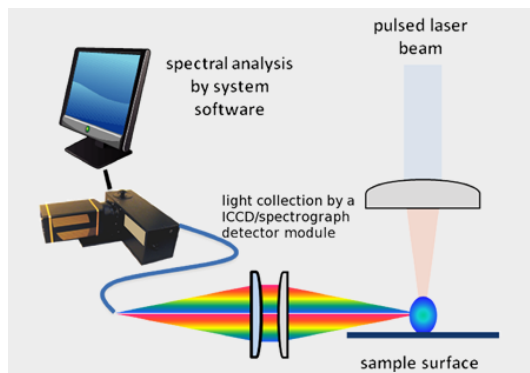
„Traffipax”



Áramlástanai vizsgálatok



Anyagvizsgálati
módszerek



Interferometria, alakmérés

