

A lézer alapjairól (az iskolában)

Dr. Sükösd Csaba

c. egyetemi tanár

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Tartalom

- Elektromágneses hullám (fény) kibocsátása
- Hogyan bocsát ki fényt egy atom?
 - A hullámmodell alapjai
 - Fénykibocsátás a húrmodellben
 - **Abszorpció és indukált emisszió**
- Energiaszintek betöltöttsége sokatomos rendszerekben (Boltzmann eloszlás)

ELMÉLET

- **Populáció inverzió**

- He-Ne gázlézer
 - Rubin lézer
 - „Szabad elektron” lézer
-
- Összefoglalás

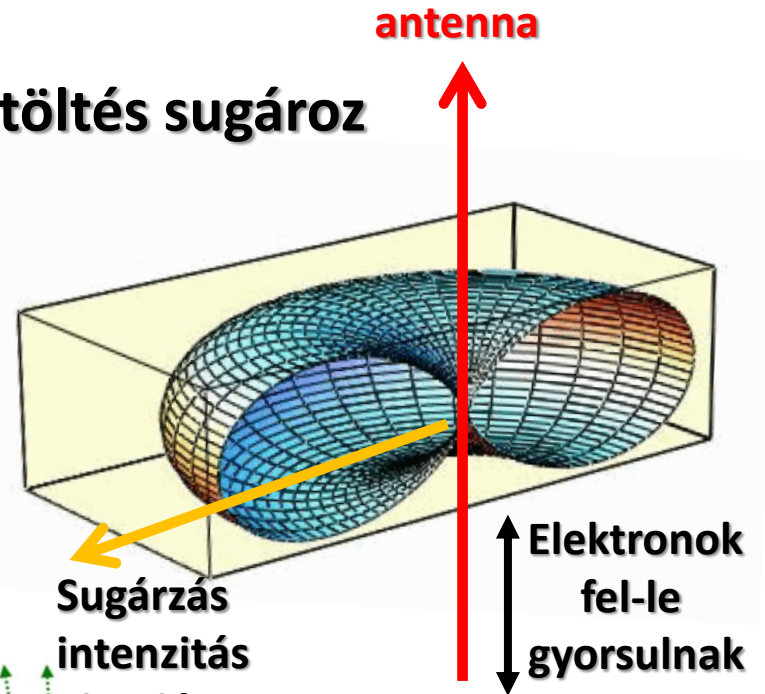
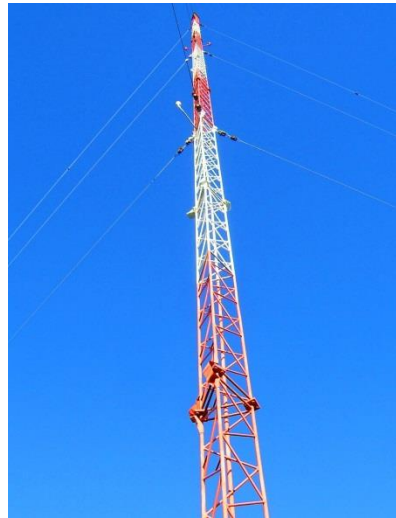
MEGVALÓSÍTÁS

Fény (elektromágneses hullám) kibocsátása

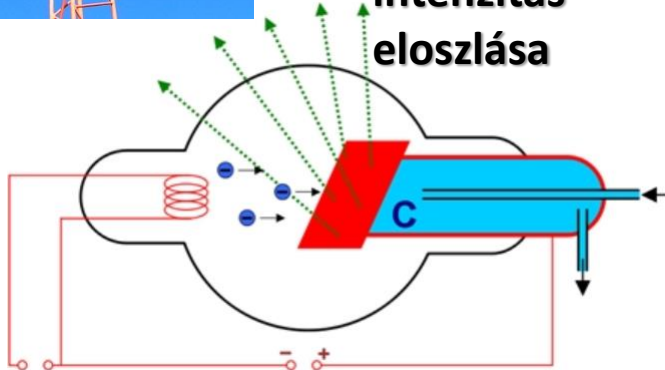
Legegyszerűbb hivatkozás: gyorsuló töltés sugároz

Példák:

- Dipól antenna



- Fékezési sugárzás (pl. Röntgen cső)



Fény (elektromágneses hullám)

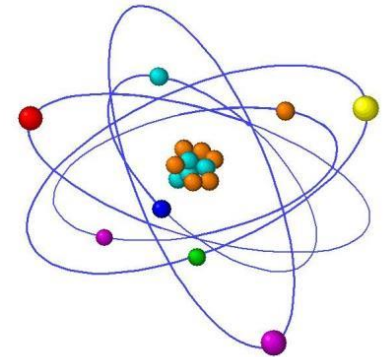
atomi kibocsátása

Hogyan bocsát ki fényt egy atom?

Itt is gyorsuló elektronoknak kell lenni!

Csakhogyz:

- Rutherford-modellben állandóan gyorsulnak (centripetális gyorsulás) → **nem jó**
- Állóhullám modellben nem gyorsulnak (miért is?) → **nem jó**



EMLÉKEZTETŐ az állóhullám modellre:

Atomi állapotok:

- $\Psi(\mathbf{r}, t) = \phi(\mathbf{r}) \cdot \cos(\omega t)$ írja le, ahol $E = \hbar \omega$
- A térbeli megtalálási valószínűség (hol van az elektron):
 $\rho(\mathbf{r}, t) = |\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 = \phi^2(\mathbf{r}) \cdot \cos^2(\omega t)$ („elektronsűrűség”)
- De ez nem lehet jó, mivel időnként „eltűnik” (cos miatt függ az időtől is!)

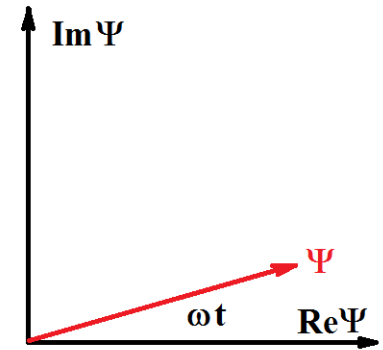
Fény (elektromágneses hullám)

atomi kibocsátása (folyt.)

Emiatt módosítunk:

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = \phi(\mathbf{r}) \cdot e^{i\omega t} = \begin{pmatrix} \text{Re } \Psi \\ \text{Im } \Psi \end{pmatrix} = \phi(\mathbf{r}) \cdot \begin{pmatrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \end{pmatrix}$$

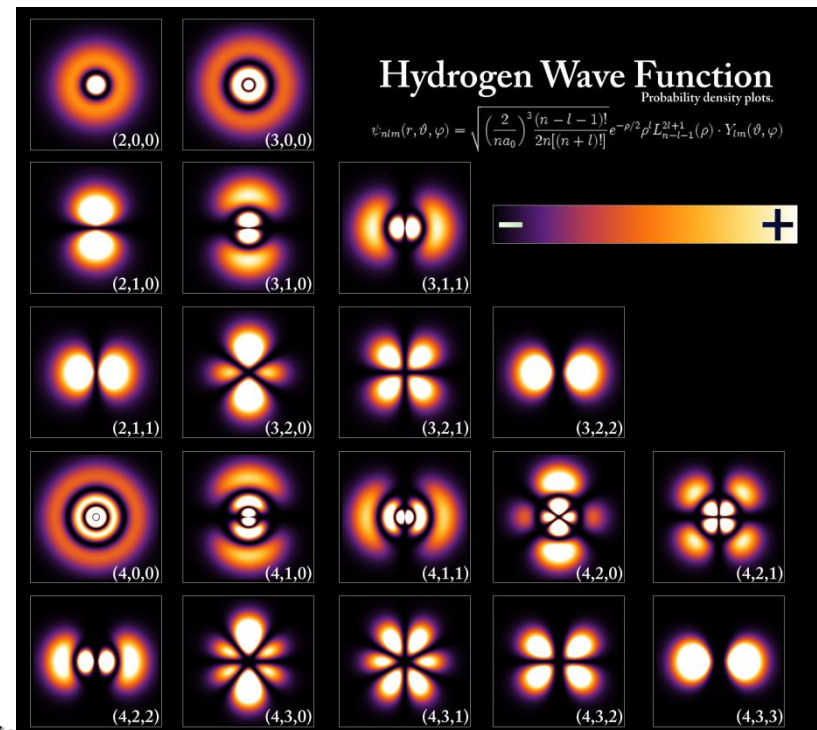
valós rész
képzetes rész



És ezzel: $\rho(\mathbf{r}) = |\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 = \phi^2(\mathbf{r}) \cdot [\cos^2(\omega t) + \sin^2(\omega t)] \equiv \phi^2(\mathbf{r})$

Időtől független (nem gyorsul)!

**Az állapotok térfüggése: $\phi^2(\mathbf{r}) =$
(csomógömbök, csomósíkok)**

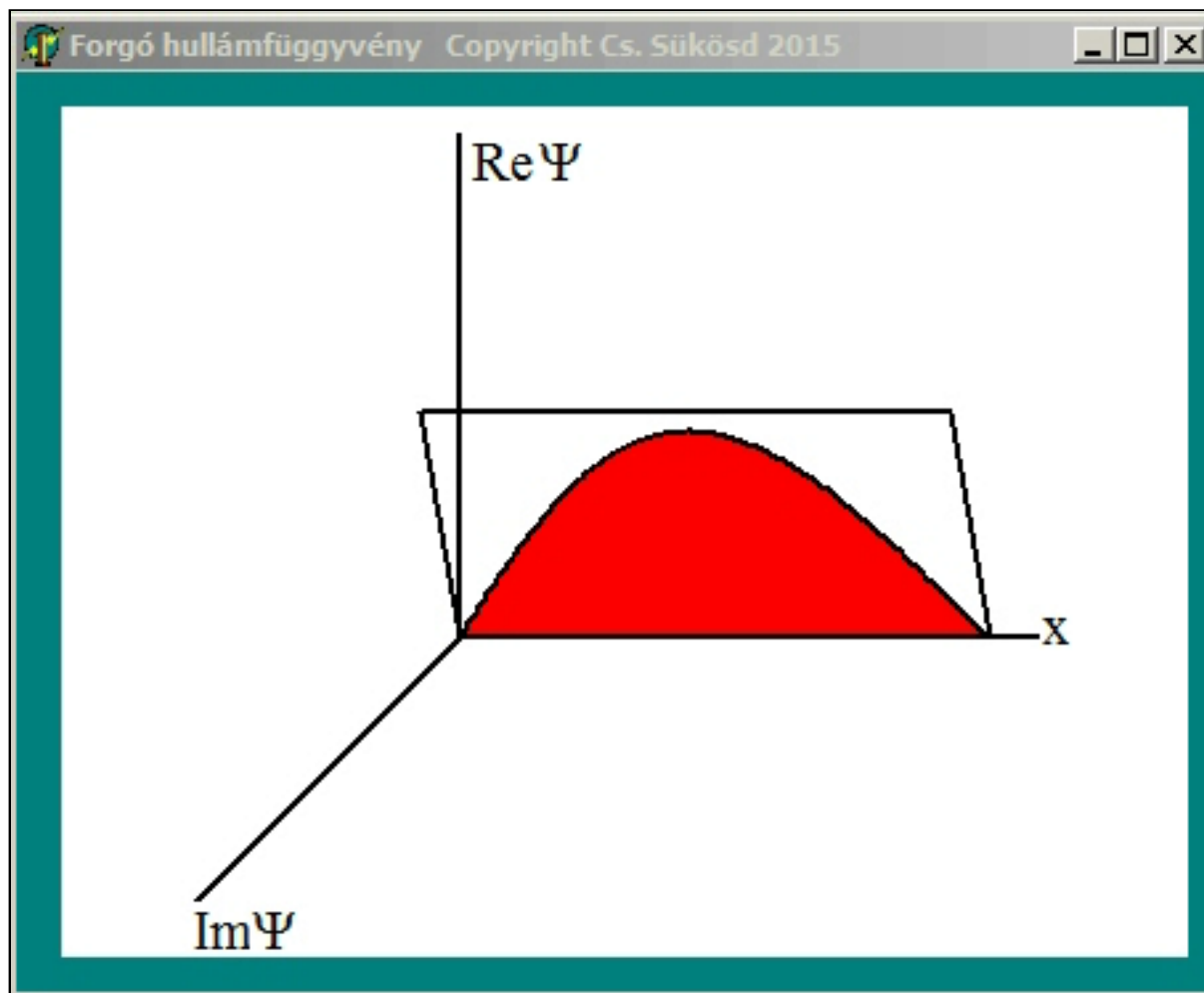


Fény (elektromágneses hullám) **atomi** kibocsátása

Egyszerűsítsünk: egydimenziós hullámfv. (húrra bezárt elektron)

$\phi(\mathbf{r}) = \phi(x)$ **Az időtől való függés még szemléltethető is!**

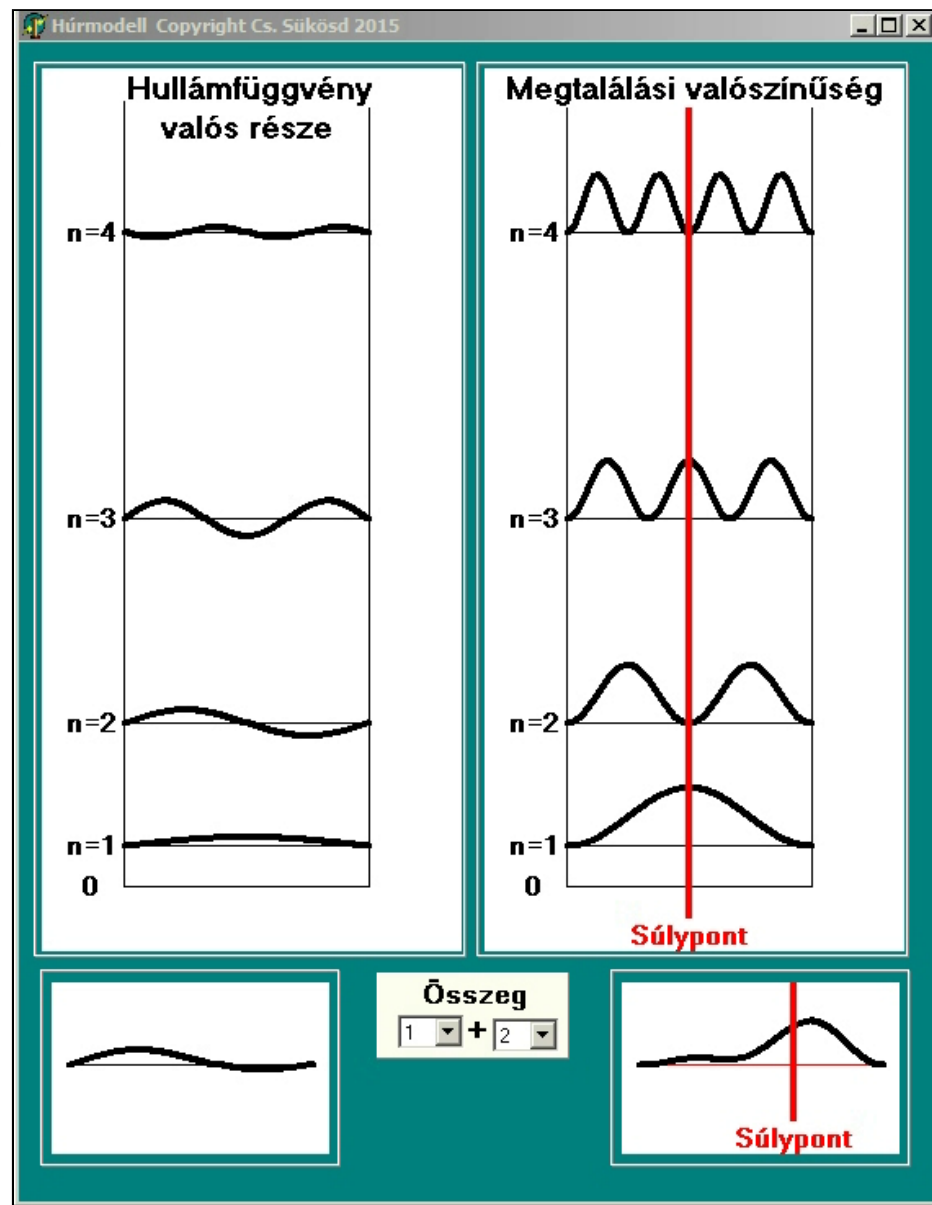
(Klikkelj a képre a videó lejátszásához!)



Fény (elektromágneses hullám) **atomi** kibocsátása

Hogyan lehet most már
„gyorsuló” elektront létrehozni?
Kvantummechanika: állapotok
szuperponálhatók:

(Klikkelj a képre a videó lejátszásához!)



Fény (elektromágneses hullám)

atomi kibocsátása (folyt.)

Egyszerűsítsünk: egydimenziós hullámfv. (húrra bezárt elektron)

$\phi(\mathbf{r}) = \phi(x)$ Az időtől való függés még szemléltethető is!

Hogyan lehet most már „gyorsuló” elektront létrehozni?

Kvantummechanika: állapotok szuperponálhatók:

Mekkora a szuperponált állapotban a rezgés frekvenciája?

Legyen T az az idő, amikor a két állapot fázisa ismét ugyanolyan, mint kezdetben volt (ez a szuperponált rezgés periódusideje).

A lassabb k periódust, a gyorsabb $(k+1)$ periódust tett meg.

$T = k \cdot T_1 = (k+1) \cdot T_2$ Ebből $\frac{1}{k} = \frac{T_1 - T_2}{T_2} = \frac{T_1}{T_2} - 1$ A frekvencia pedig:

$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{k \cdot T_1} = \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} = f_2 - f_1$ Azaz: $hf = hf_2 - hf_1 = E_2 - E_1$ (Bohr!)

Fény (elektromágneses hullám)

atomi kibocsátása (folyt.)

Hogyan jöhet ilyen létre a valóságban?

Pl. „besugározzuk” az atomot, és az elektromos tér megrángatja az elektront.

Amíg besugározzuk, addig **kevert állapot** jön létre.

Amint megszűnik a besugárzás → a két stabil állapot valamelyikében marad:

Kezdetben	Végén	Folyamat
Alacsonyabb energiájú	Alacsonyabb energiájú	semmi
Alacsonyabb energiájú	Magasabb energiájú	abszorpció (hf energia elnyelés)
Magasabb energiájú	Alacsonyabb energiájú	Indukált emisszió (hf energia kibocsátás)
Magasabb energiájú	Magasabb energiájú	semmi

(Van persze spontán emisszió is, amihez nem kell külső tér)

Fény (elektromágneses hullám)

atomi kibocsátása (folyt.)

A modell alapján néhány következtetést levonhatunk:

- „Érezhető” (a folyamat szimmetriájából), hogy **az abszorpció és az indukált emisszió valószínűsége ugyanakkora** (Einstein, 1916)
(Pontosabban: ez csak akkor igaz, ha a két állapot degenerációfoka egyenlő, de ettől most eltekintünk)
- Az indukált emissziónál a leadott foton **irány- polarizáció- és fázishelyesen** csatlakozik az indukáló elektromos térhez.

Ez a két dolog nagyon fontos a lézer működésének és a lézerfény tulajdonságainak a megértéséhez.

Sok atomból álló rendszer energia szerinti eloszlása

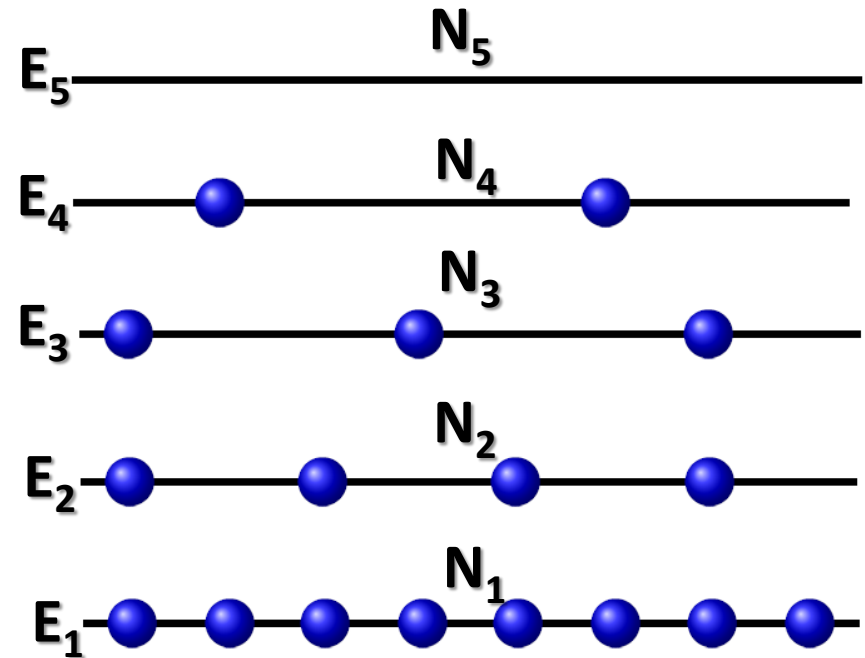
Egyensúlyi állapotban az anyagi részecskék (atomok, molekulák) a legalacsonyabb energiájú állapot felé törekednek („Energiaminimum elve”, második főtétele következménye).

A hőmozgás (és az abból származó energia) azonban megakadályozza, hogy az összes részecske a legalacsonyabb energiájú állapotban legyen.

Így a magasabb energiaszinteken is lesznek részecskék, de

kevesebben, mint az alacsonyabbakon.

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}$$



Boltzmann eloszlás

A lézer alapelve

Ha egy egyensúlyi anyagot besugárzunk $hf = E_2 - E_1$ frekvenciájú fénnel, több energiát nyel el, mint kisugároz.

(Mivel az abszorpció és az indukált emisszió valószínűsége azonos, és több részecske van az alacsonyabb energián)

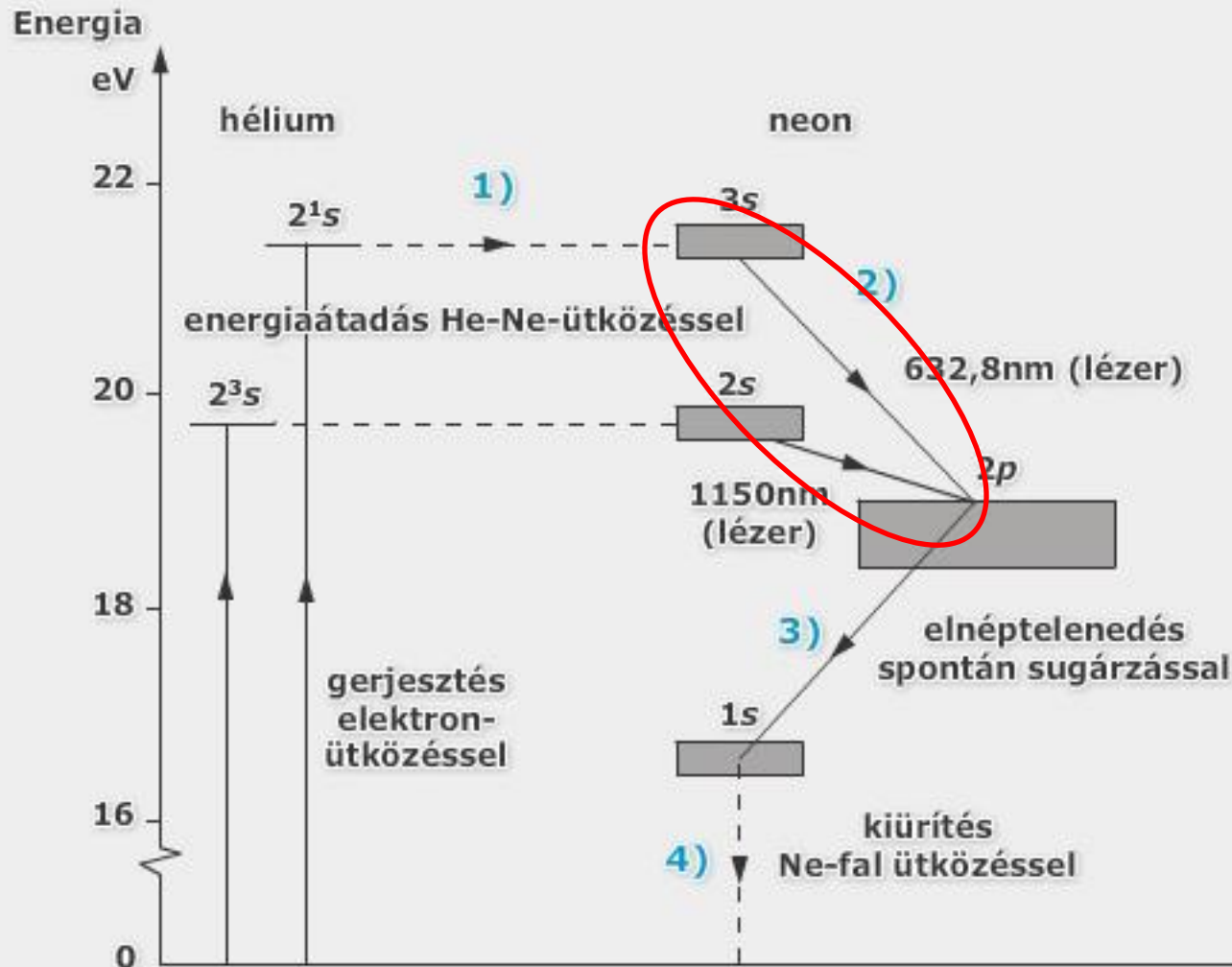
Fényerősítést csak akkor tudunk létrehozni, ha **az energiaszintek betöltöttségét megfordítjuk**: több részecske lesz az egyik magasabb energiájú állapotban, mint az alacsonyabban.

Populáció inverzió!

Valamilyen trükkös módon „felpumpáljuk” az atomokat a magasabb energiájú állapotba. (Nem-egyensúlyi állapot!)

A különböző lézerek abban térnek el, hogy hogyan hozzák létre a populáció inverziót .

A He-Ne gázlézer



Forrás: Füzesy Zoltán: Lézersugár fizika

(http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop412A/2010-0017_32_lezersugar_fizika/ch06s04.html)

A He-Ne gázlézer

Műszaki megvalósítás:



Reflexió:
>99,999%

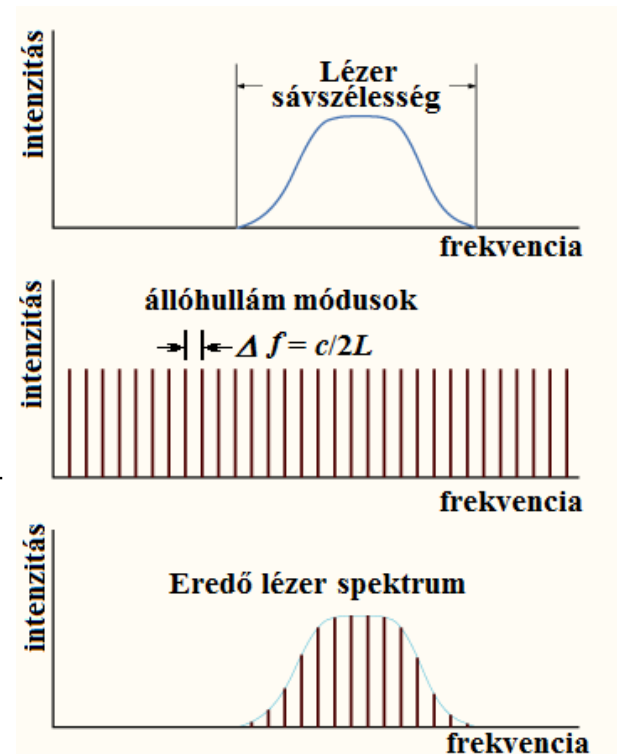
Reflexió:
~97-98%

A tükrök szerepe kettős:

- Az erősítés csak akkor áll fenn, ha a nyaláb sok atommal találkozik → megnövelik a sugár útját az aktív anyagban
- Optikai „rezonátort” hoznak létre. Állóhullám-módusok tudnak kialakulni.

$$L = n \frac{\lambda}{2} \Rightarrow f = n \frac{c}{2L}$$

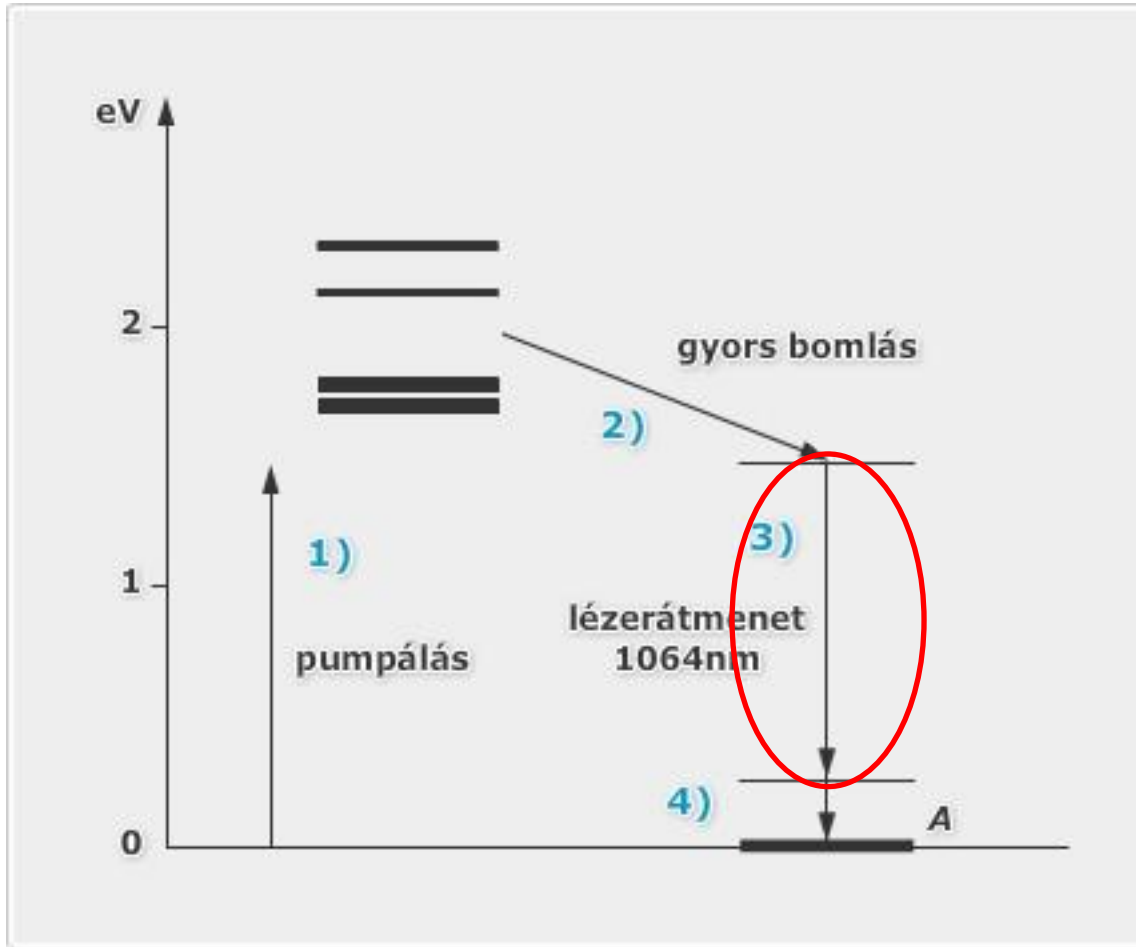
A „kiszóródó” sugarak nem erősödnek:
nagyon párhuzamos nyaláb



A rubin lézer

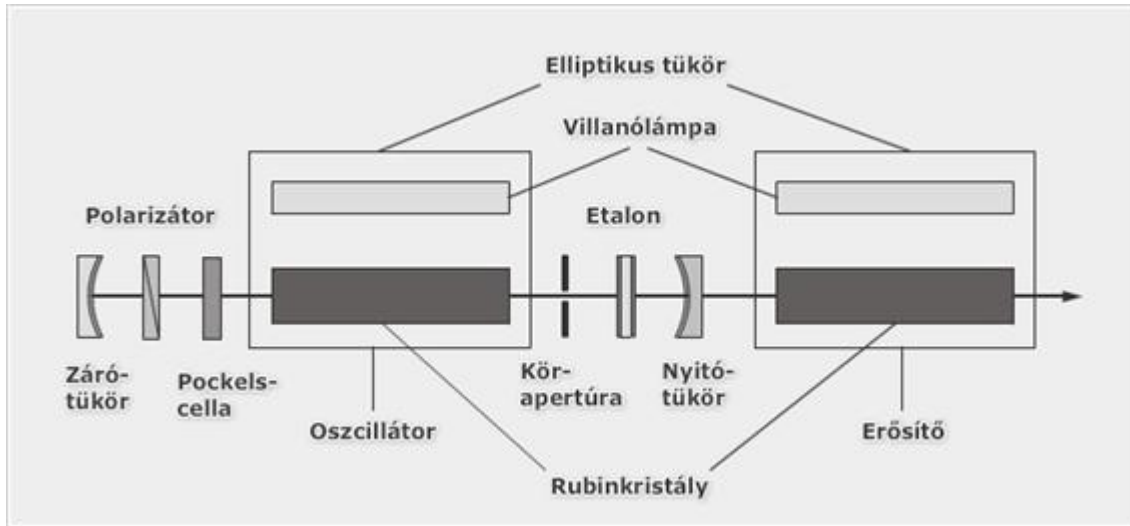
Rubin: alumínium-oxid kristály, a szép vörös színét a benne lévő „szennyező” króm atomoktól kapja.

Populáció inverzió létrehozása: „pumpálás” villanófénnyel

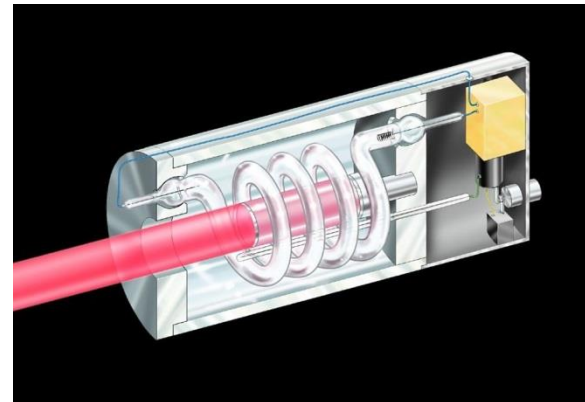


A rubin lézer

Műszaki megvalósítás

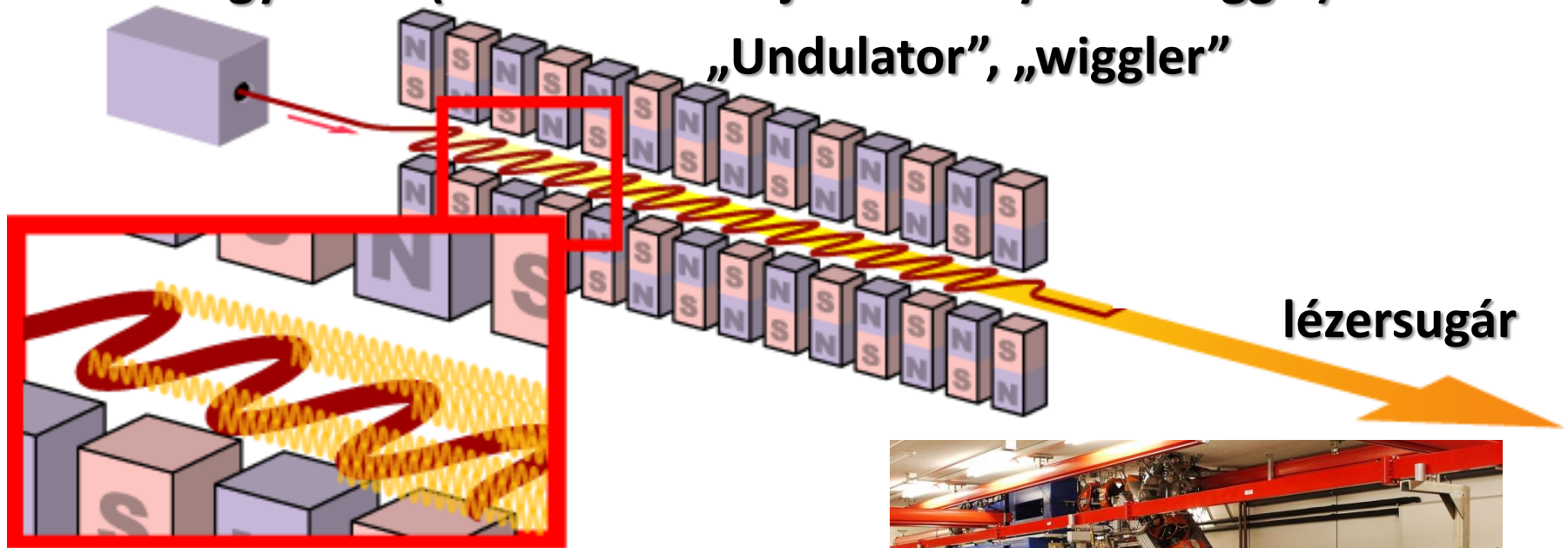


**Maiman eredeti rubin lézere
(1960)**

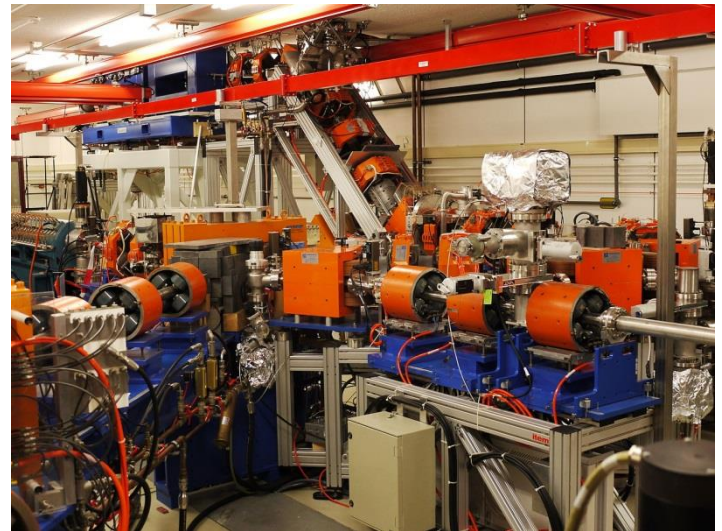


Szabad elektron lézer

Elektron gyorsító (elektronok majdnem fénysebességgel)



Gyorsuló elektron sugároz!
Sugárzási tér „visszahat” →
elektronok mikrocsomagokba
rendeződnek → koherens sugárzás.
Szabályozható frekvencia!
(mikrohullámtól röntgen tartományig)



FELIX (Nieuwegein, NL)

Összefoglalás

LASER = **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation
(Fényerősítés sugárzás indukált emissziójával)

- Gyorsuló töltés sugároz
- Húrmodellből
 - gyorsuló töltés szuperpozícióval hozható létre,
 - kijön: $hf = E_2 - E_1$;
 - „érezhető”, hogy az abszorpció és **indukált emisszió** valószínűsége azonos.
 - Az indukált emissziónál kibocsátott foton iránya, polarizációja, fázisa megegyezik az indukáló térével.
- Az egyensúlyi Boltzmann eloszlásból **populáció inverzió** keltése tudja létrehozni a sugárzás erősítését.
- Műszaki megvalósítás: „pumpálás” és optikai rezonátor alkalmazása



(Köszönöm a megtisztelő figyelmet!)