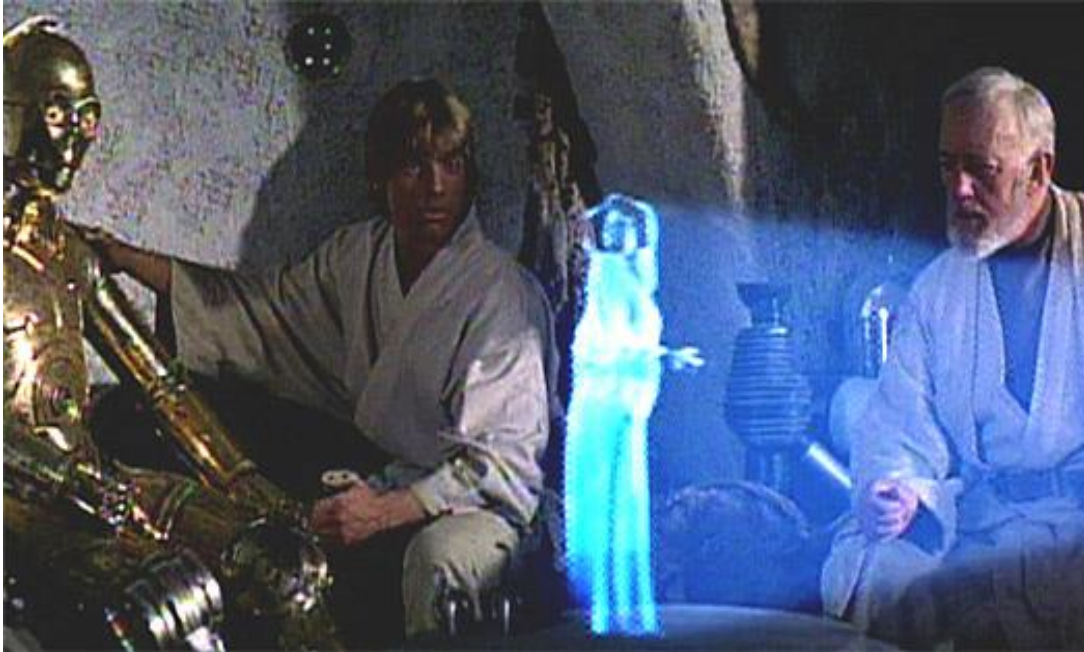


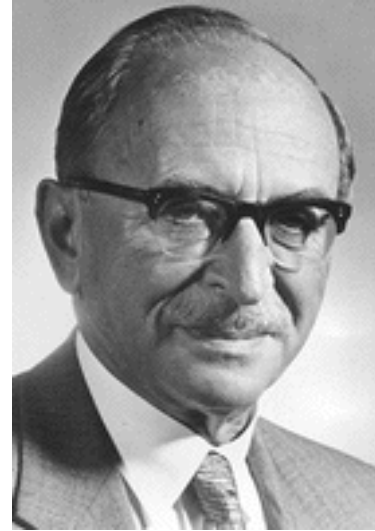
# Műszaki lézerfizika

11. előadás: A holográfia elve és alkalmazásai,  
informatikai lézeralkalmazások, lézeres fúzió és hűtés

# Holográfia



- **Nem ez a holográfia!**



**Gábor Dénes**  
(Dennis Gabor,  
született Günszberg)  
(Budapest, 1900 –  
London, 1979.)

A holográfia alapelveit Gábor Dénes találta ki még 1950 előtt, de megfelelően koherens fényforrás hiányában nem lehetett alkalmazni.

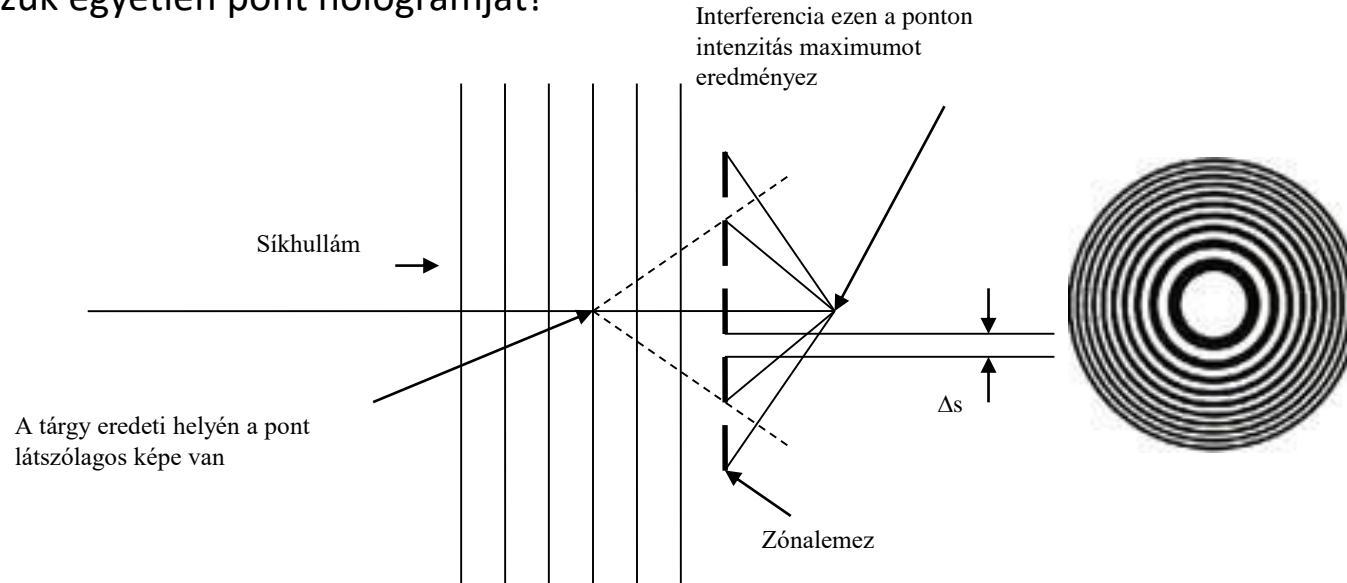
A módszer a lézerek elterjedése után vált használhatóvá, érte 1971-ben Nobel-díjat kapott.

# A holográfia elve

Hologram = "teljes kép": nem csak az intenzitás viszonyok, hanem a fázisviszonyok is rögzítve vannak

Alapelv: -fázisviszonyokat interferenciával rögzíti, az interferencia a tárgyról visszavert hullám és az eredeti (referencia) hullám között van.

Nézzük egyetlen pont hologramját!



A monokromatikus síkhullám beérkezik, a pontszerű akadályról gömbhullámok indulnak ki, sík és gömbhullám interferenciája adja a pontszerű akadály hologramját a Gábor-féle zónalemez. Ha az ernyő fényképezőlemezről van, akkor a kép előhívható. Rögzítődik az intenzitás eloszlása mellett a fázis eloszlás is. A fényképező lemez ott feketedik meg a leginkább, ahol a sík hullám és a gömbhullám interferenciája intenzitás maximumot eredményez.

Ha nem egy, hanem 2 db pont van, akkor a 2. zónalemez egymásra szuperponálódik, ahol átfednek, ott pöttyök lesznek. Igen sok leképezett pont esetén lemez igen sok apró pontból fog állni.

A pontok távolsága  $\lambda$  nagyságrendű ( $\lambda < 1 \mu\text{m}$ ). Hogy pontosan mennyi, az elsősorban a két hullám (a tárgyról érkező és a referencia) szögétől függ. Az LDA fejezetben bemutatott képlet itt is érvényes:

$$d_f = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

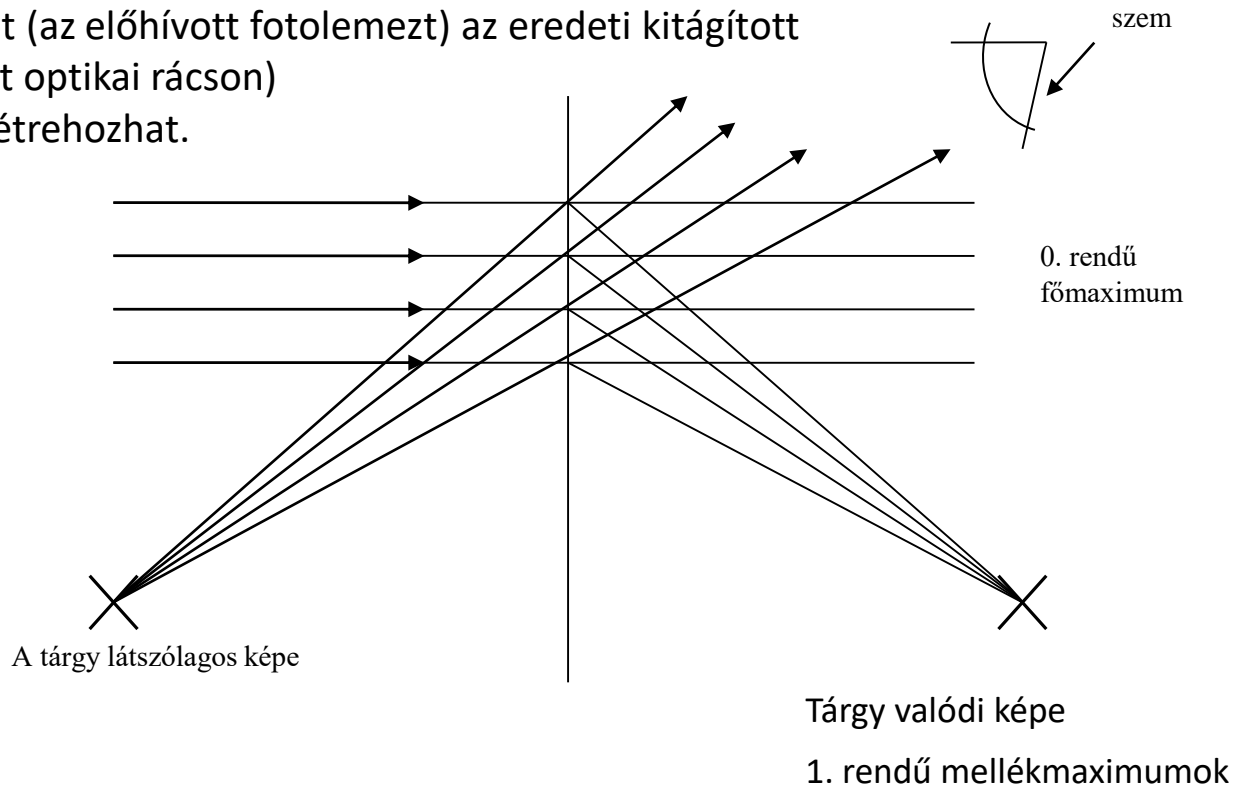
Az első hologramok készítése idején még csak rosszabb felbontású ( $d \sim 10 \mu\text{m}$ ) fényképező lemezek voltak.

Ez  $\lambda \sim 0,5 \mu\text{m}$  esetén legfeljebb 3 fokos szöget enged meg a két fénysugár között. (Ennél nagyobb szögű diffrakciót a fotolemez nem képes rögzíteni.)

# A kép rekonstrukciója

A kép rekonstrukciója úgy történik, hogy a hologramot (az előhívott fotolemezt) az eredeti kitágított lézersugárral megvilágítjuk. A hologram pontjain (mint optikai rácson) interferáló fény valódi és látszólagos képet is létrehozhat.

A látszólagos kép az ábra szerint megfigyelhető, a képpontok – a tárgy pontok elhelyezkedésének megfelelően – a 3 dimenziós térben vannak. (Másképpen: a két szem máshelyen van, így azokban másképp teljesülnek az interferencia feltételek. A két különböző képből az agy képes visszaállítani a térbeliség érzetét.)



Ezek a hologramok egyrészt **Sík hologramok**, mivel két dimenzió történik az információ tárolás. Másrészt a hologram (és a rekonstruált kép is) a beérkező síkhullámban – tehát lényegében a tengelyen – keletkezik, ezért szokás ezt a technikát **on-axis holográfiának** is nevezni.

Egyébként a régi fotolemezek néhány mikronos szemcsemérete nagyságrendileg egyezik a modern képalkotó eszközök pixel méretével. Ezért **ma az on-axis holográfia másodvirágzását éli**, természetesen a mai technika által lehetővé tett **valós idejű digitális jelfeldolgozás** mellett.

# Az off-axis síkholográfia

Az, hogy a hologram és a rekonstruált kép is a beérkező síkhullámban vannak igen sok kényelmetlenség forrása, látványként ezek a hologramok élvezhetetlenek. A beeső nyalábból a kép csak nagyobb szögű interferencia révén tud kikerülni (off axis holográfia). Ehhez egyrészt javítani kellett a fotoanyagok felbontását legalább a hullámhossz méretig. Másrészt nagyobb koherenciahosszú lézerekre volt szükség.

Az eredeti (kitágított) lézernyalábot egy nyalábosztóval (beam splitter) kettéosztjuk (nagy szögben). Akár az amplitúdót (mint a következő ábrán), akár a hullámfelületet is oszthatjuk. A tárgyról visszavert sugarak és az eredeti nyaláb egyes részei interferálnak a fényképező lemezen. Így interferencia csíkok millói alakulnak ki ezt kell a fototechnikával rögzíteni (a hologram akkor van kész, ha a fotolemezt elő is hívjuk).

2 súlyos nehézség:

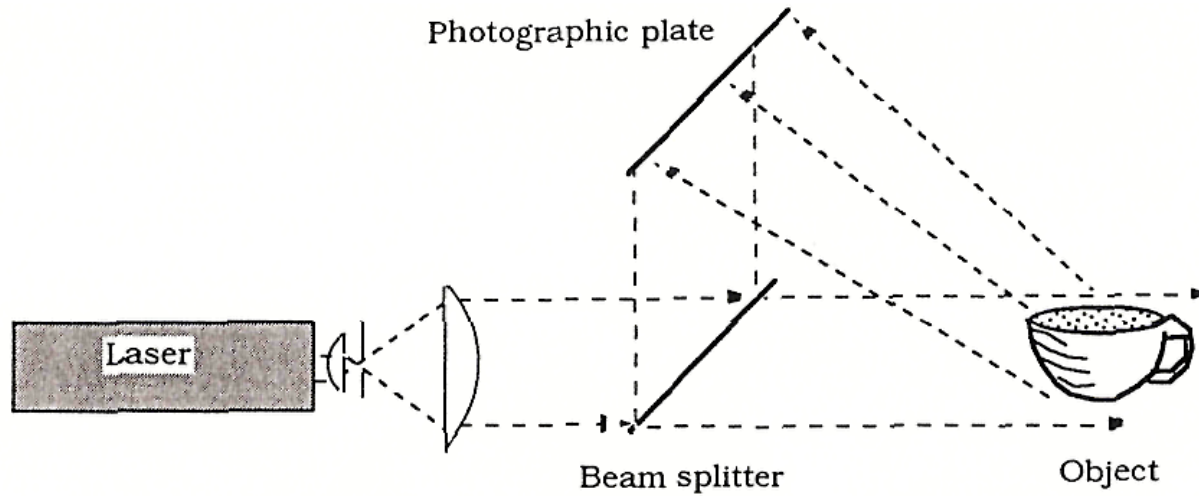
- a szubmikronos fényképező lemez felbontáshoz igen kicsi fényérzékenység tartozik, ehhez pedig hosszú expozíciós idő kell.
- Rezgés mentes körülményeket kell biztosítani, hosszú időn át.

**Olyan fénysugárra van szükség, aminek nagy a térbeli és időbeli koherenciája.**

Nehézségek folytatása

- fotoanyag zsugorodása → a vékony emulziót vastag hordozóra tesszük
- a referencia sugarak és a tárgyon szóródott sugarak között nagy az útkülönbség → nagy koherenciahossz szükséges
  - nagy időbeli koherencia szükséges (1 db longitudinális módus lehetséges)
  - nagy térbeli koherencia → TEM<sub>00</sub> alapl módus
  - ezek igen kis teljesítményű lézerek → hosszú idő kell a készítéshez

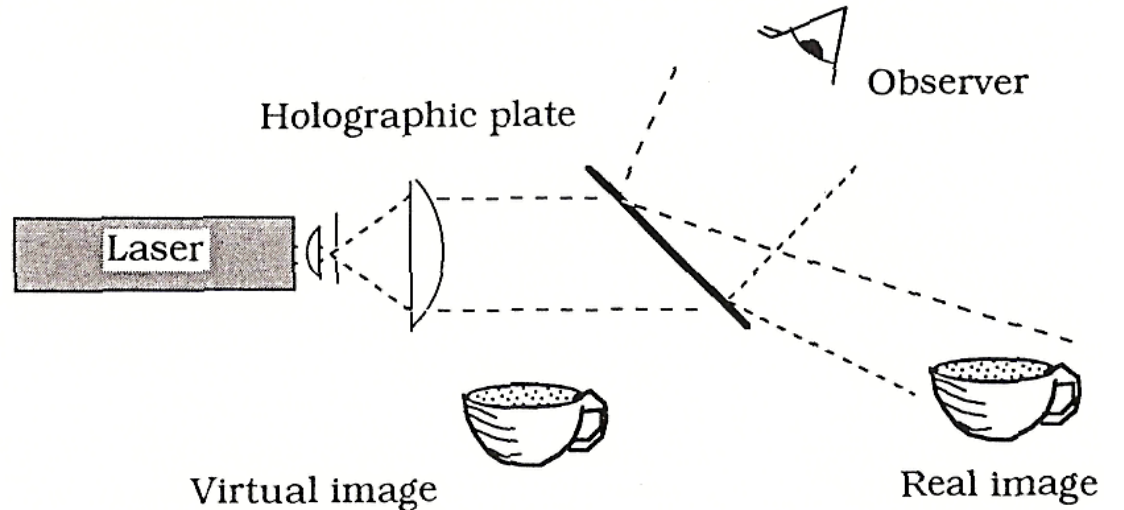
## Off-axis síkhologram készítése



Hologram készítése: a kettéosztott lézersugár egyik fele a tárgyon szóródik, a szóródott lézerfény a fotolemezen találkozik és interferál a másik félel, a referencia sugárral.

Síkhologram rekonstrukciója: az előhívott fotolemezt az eredeti lézernyalábbal megvilágítva annak környezetében a tárgy térbeli képe megjelenik. A valós képet természetesen csak úgy láthatjuk, ha van ott valami „ernyőszerűség”.

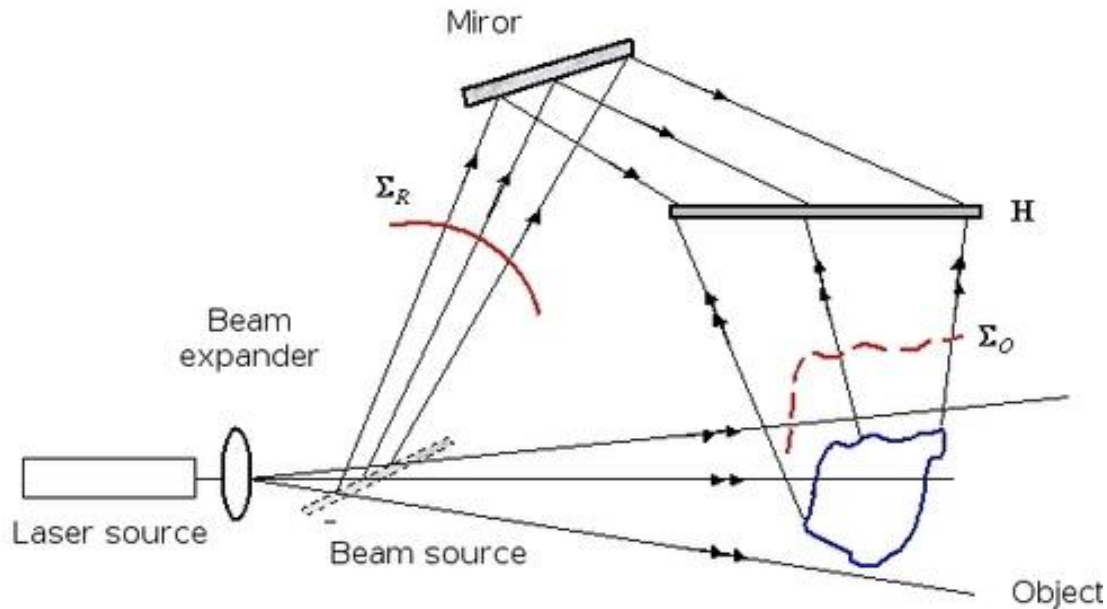
## Síkhologram rekonstrukciója



# Fehér fény hologramok

(egyéb elnevezések: vastag hologram, térfogati hologram, Denisyuk hologram)

A kép rögzítése nem egy sík felületen, hanem az emulzió teljes térfogatában történik. A beeső és visszavert fénysugár interferenciája állóhullámokat eredményez a vastag ( $d \sim 10 \mu\text{m}$ ) fotolemez térfogatában.



A vastag emulzió zsugorodása alig kerülhető el az előhívás alatt.

A rekonstrukció során a vastag hologramban maga választja ki a megfelelő frekvenciájú komponenst a fehér fényből. Ez a zsugorodás miatt kisebb frekvenciájú, mint az eredeti lézer fényéé.

Különböző lézerfény (kék, sárga, vörös) esetén 3 térfogatbeli leképezés a 3 alap lézerfény színes hologramot hozhat létre, a zsugorodás miatt azonban hamisak lesznek a színek

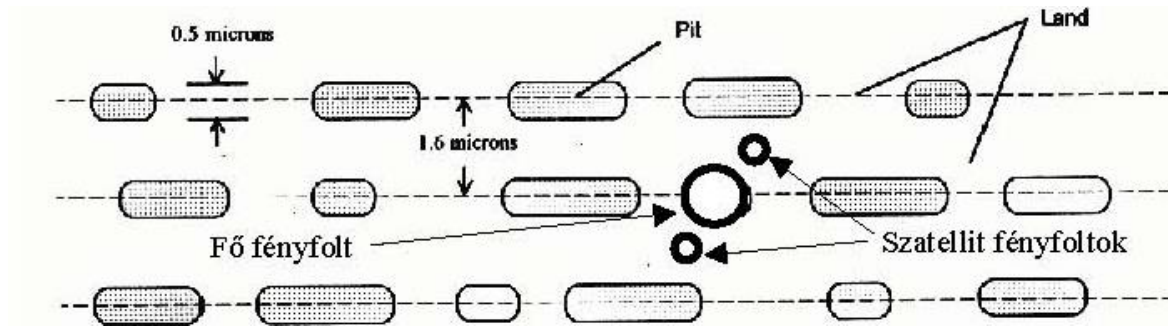
A ma gyártott hologramok többsége nem fotolemez alapú, hanem nyomdatechnikai úton papírra felvitt domborzat, ill. festék (préselt hologramok). Tehát legfeljebb a nyomóformájuk látott lézert. Mivel ezeken a „képeken” a pontok távolsága hullámhossznyi, így fénymásolóval nem másolhatók. A színeket nem festék, hanem a pontokon történő interferencia eredményezi. Ma a hologramok többsége nem fénymásolható biztonsági elem.



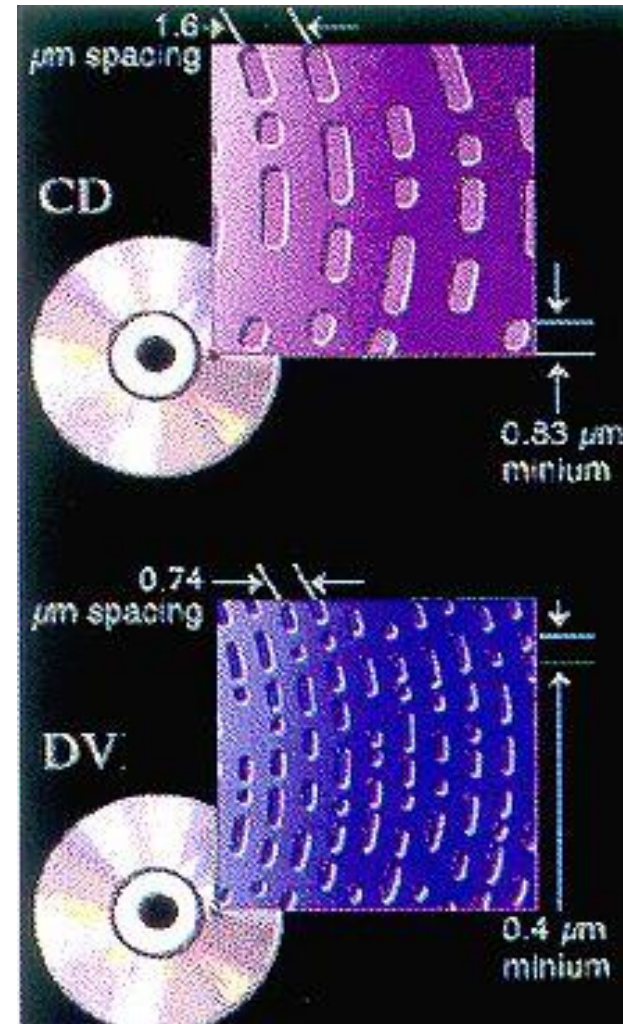
# Informatikai lézeralkalmazások

## 1, CD/DVD lemez

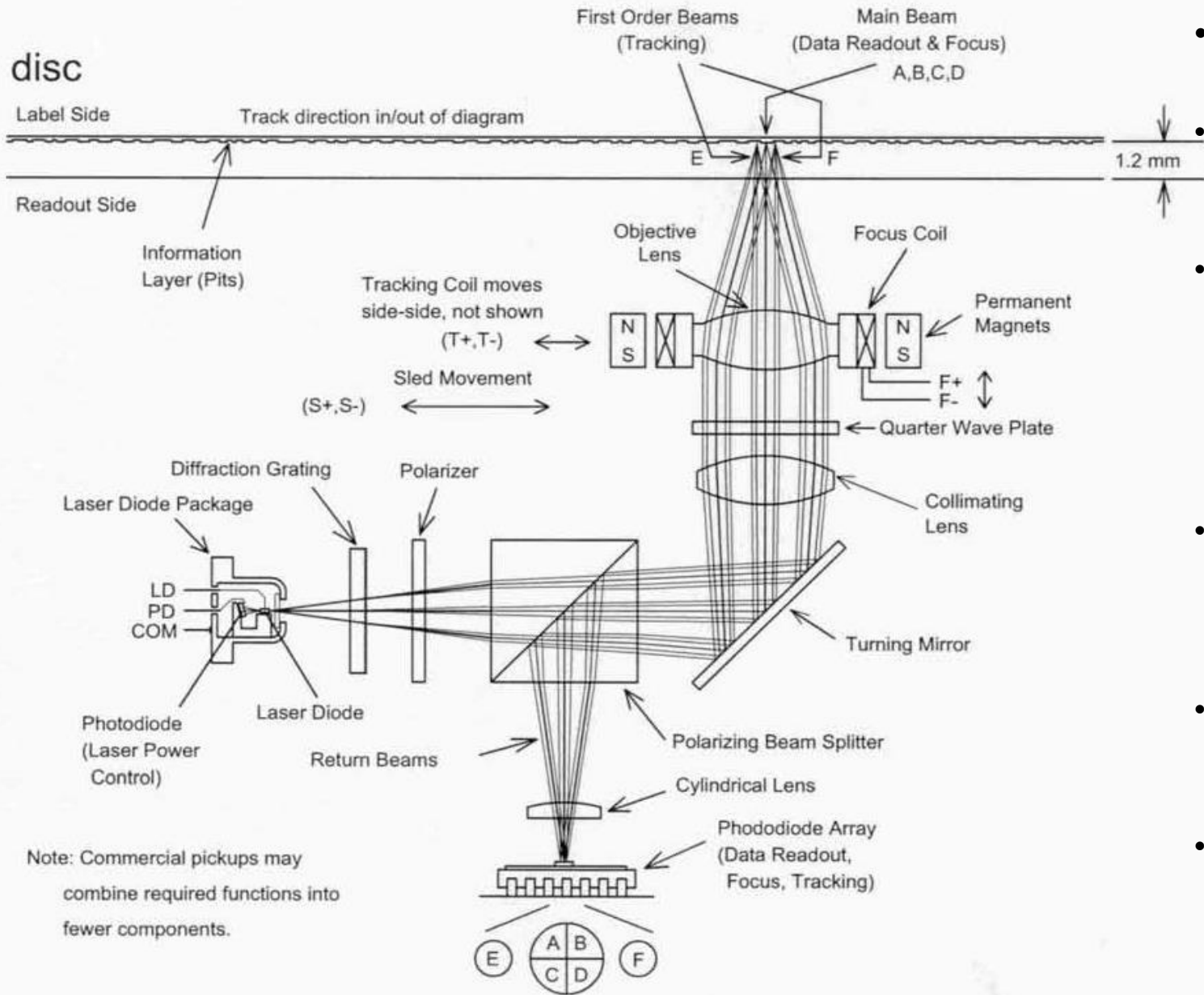
A lemezek a digitálisan kódolt videó és audió információt „gödrök”-ben tárolja. Ezek a gödrök („pits”) a lemezen spirálisan helyezkednek el a központból kiindulva a szélek felé.



A pit-eken a reflexió kisebb, mint máshol. Oka: fázis (kristályosodás) eltérés vagy domborzati. Szatellit vonalak: igyekeznek a főfoltot a track-en tartani.

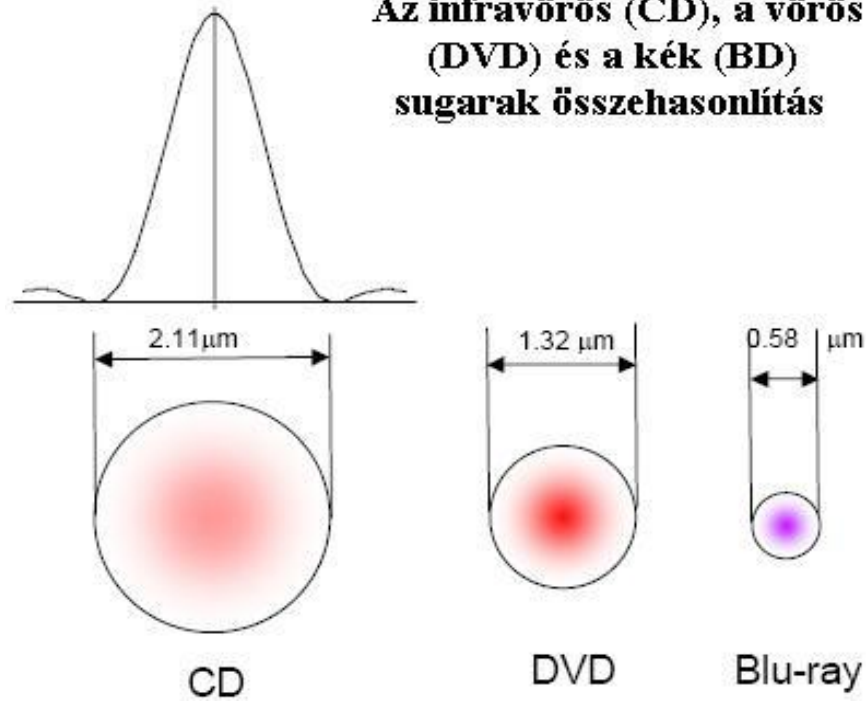




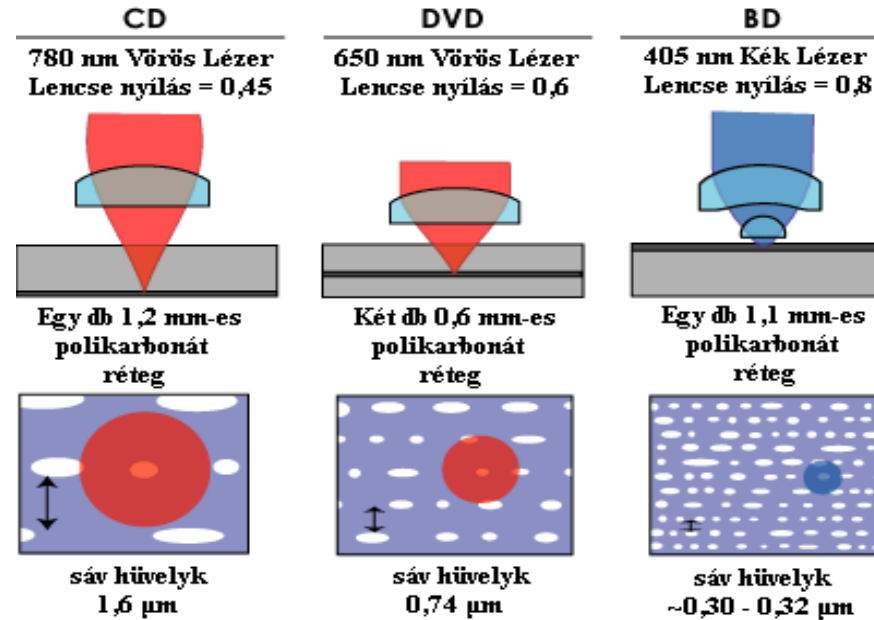


- 1, A két szatellit nyalábot egy diffrakciós rács állítja elő (1. rendű diffrakciós maximum)
- 2, a polarizátor olyan polarizált fényt csinál (pl.: függőlegesen polarizált fényt), amelyet az osztóprizma átenged, ekkor a határrétegen nincs reflexió
- 3, a  $\lambda/4$  lemez: a lineárisan poláros fényből cirkulárisan polárosat csinál visszafelé a cirkulárisan poláros fényből újra lineárisan poláros, de  $90^\circ$ -kal elforgatva. Azaz az eredetileg a tábla síkjával párhuzamos poláris irányból a tábla síkjára merőleges polarizációs irányút
- 4, a polarizációs osztóprizma a beeső és visszavert fénysugarat a polarizációk alapján szét tudja választani, a visszavert fénysugarat a detektorra irányítja
- 5, kvadráns detektor: úgy vezérli az automatika a lézernyalábot, hogy a detektor 4 negyedre egyforma intenzitású fényt essen
- 6, a szatellit detektorok a lézernyaláb track-en tartását segítik

**Az infravörös (CD), a vörös (DVD) és a kék (BD) sugarak összehasonlítás**



**CD - DVD - BD írás**



Egyre kisebb hullámhossz → egyre kisebb lézerfolt → egyre sűrűbb track-ek

A hullámhossz kb. felére csökkent → a trackek távolsága kb. a negyedére csökkent (mert az optika is jobb lett)

→ az adatsűrűség kb. 16-szorosára ( $4^2$ ) növekedett

Ugyanaz az optika használható az írásra is, de akkor sokkal nagyobb teljesítmény kell. pl.: olvasás 0,7mW

írás 15mW

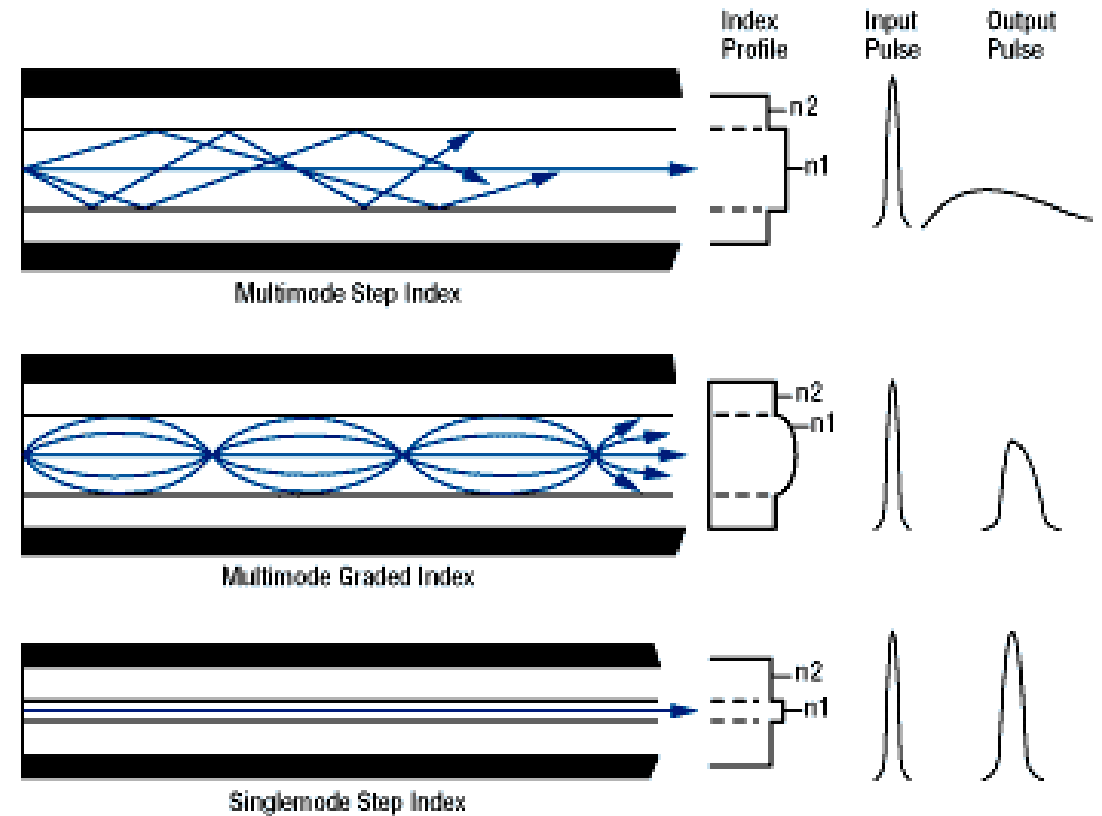
törlés 20mW

# Optikai jelátvitel

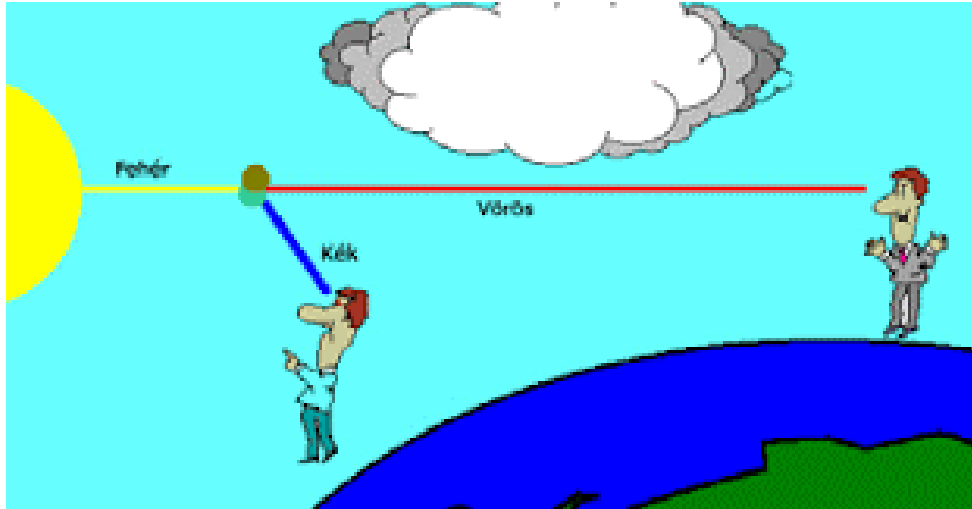
Korábban láttuk, hogy a határszögnél laposabban beeső fénysugár nem tud kilépni az üvegből, a határfelületen **teljes visszaverődést** szenved. Az üvegszálaban a fény nagy távolságra is eljuthat kilépés nélkül, de a **jel erősen torzulhat**. Ugyanis a tengelyirányú fénysugár gyorsabban célhoz ér, mint a cikkcakkban haladó.

Ezen a problémán sokat segít, ha az üvegszál törésmutatóját a tengelyétől kifelé haladva fokozatosan csökkentjük. Ekkor a terjedési idők kiegyenlíődhetnek, mert a tengelyirányú fénysugár nagyobb törésmutatójú üvegben halad, mint a „cikkcakkos”. (Ami ekkor már hullám alakú.) **gradiens szál**

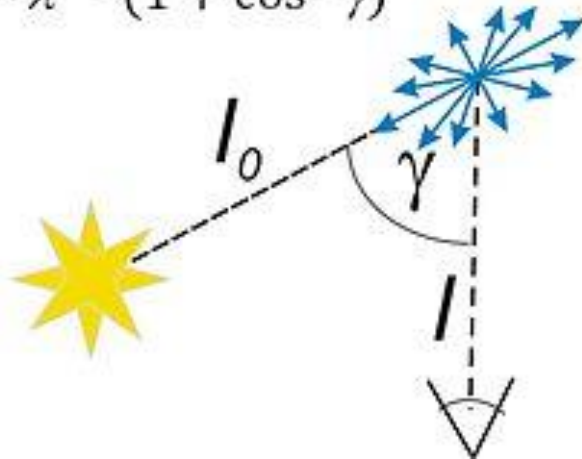
Nagyon vékony üvegszál ( $d \sim \lambda$ ) hullámvezetőként tárgyalható, amiben **egyetlen módus** terjedhet (vö.  $TEM_{00}$ ). Ekkor a geometriai optika már nem is használható.



# Optikai jelek terjedése közegekben

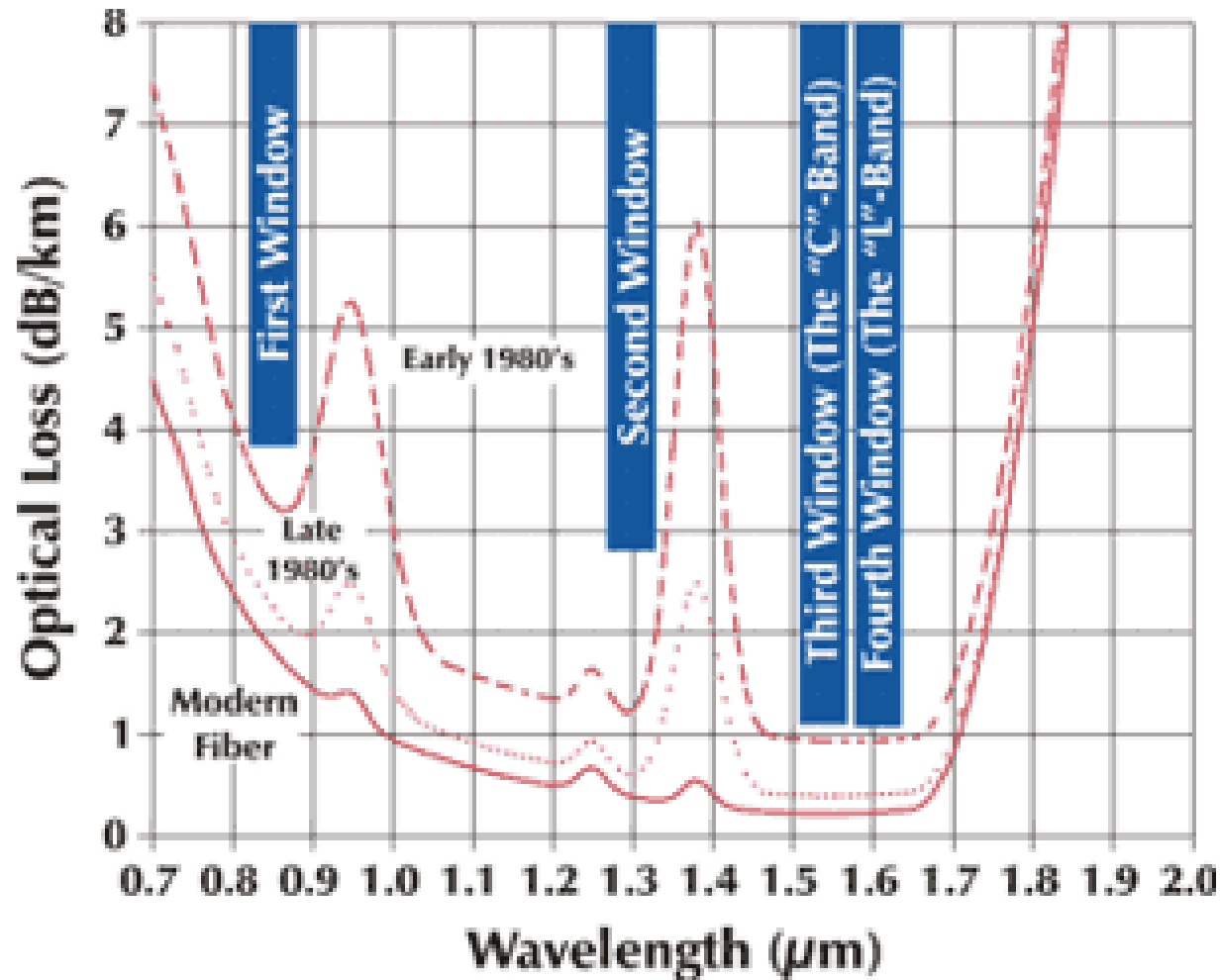
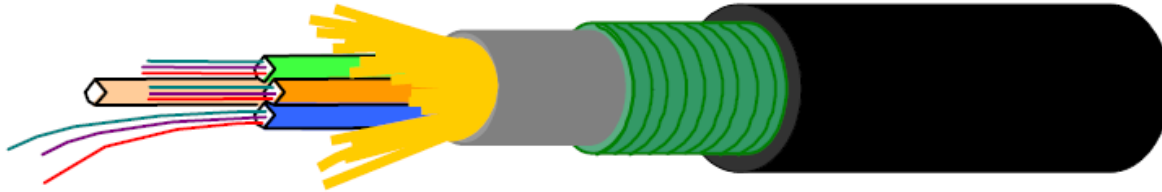


$$I \sim \lambda^{-4} \cdot (1 + \cos^2 \gamma)$$



- A jelek továbbítását – a **diszperzió miatt** – **monokromatikus fény** (tehát lézernyel) célszerű végezni. No de milyen színűvel?
- Elemi tapasztalatunk, hogy a vörös fény a színtelen átlátszó közegekben jobban terjed, mint a kék, amelyik könnyebben kiszóródik a nyalábbból.
- A vörös fényt távolabbról érzékeljük, a lenyugvó Nap is vörös. A Nap fényéből a kék jobban kiszóródik, ezért kék az ég.
- Ezt a jelenséget **Lord Rayleigh** (Báró John William Strutt) magyarázta meg a klasszikus elektrodinamika segítségével. (Az 1904-es fizikai Nobel-díját nem ezért kapta.)
- **Rayleigh-szórás**nak nevezett jelenség akkor lép fel, ha a fény a hullámhosszánál jóval kisebb méretű részecskéken szóródik, a mérethatár nagyjából a hullámhossz tizede.
- A Rayleigh-szórással magyarázható az ég kék színe is, erőssége a hullámhossz negyedik hatványával fordítottan arányos.

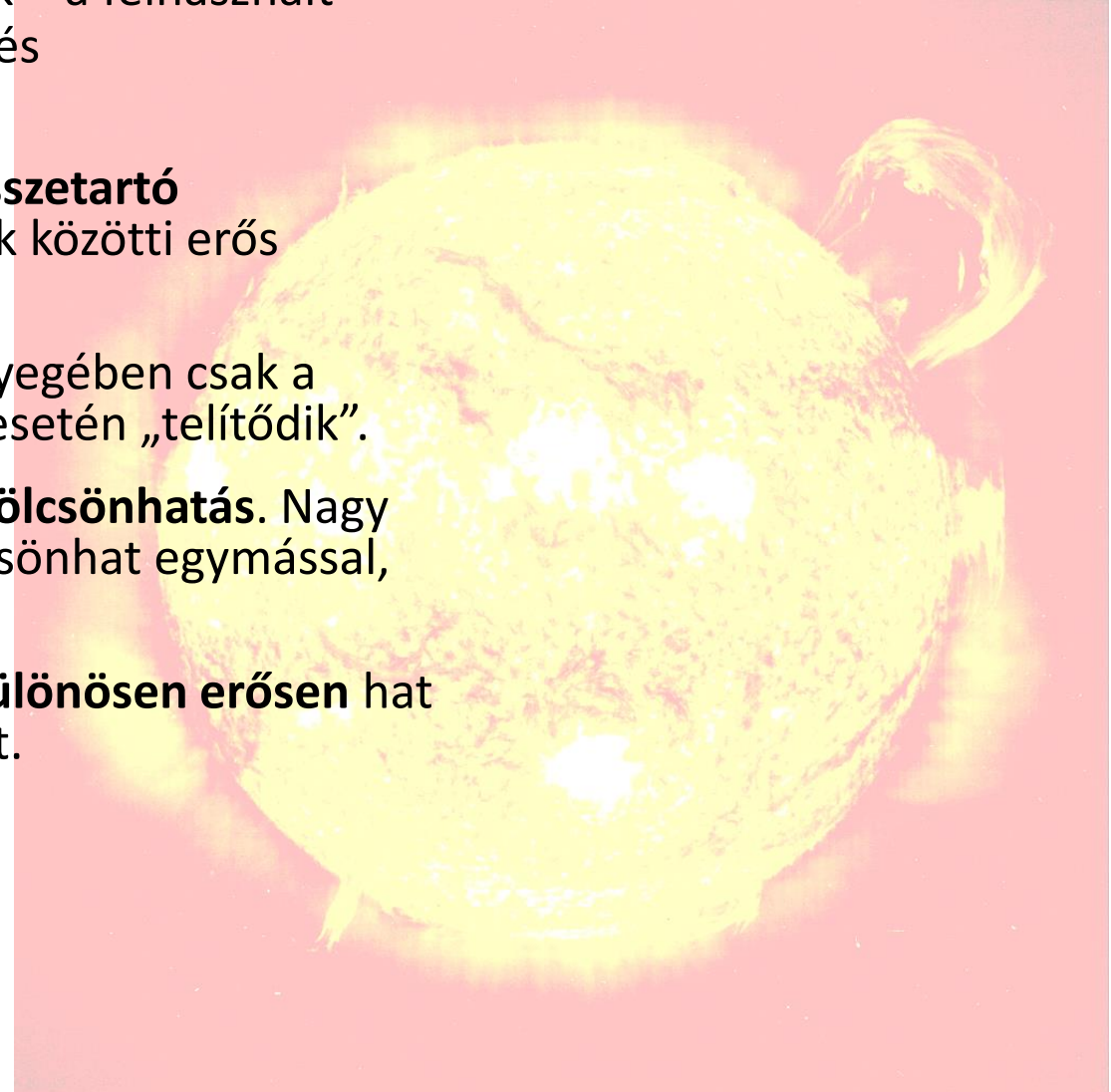
# Optikai jelátvitel



- A látható fény tartományában érvényes  $1/\lambda^4$  tendencia folytatódik az infravörös tartományban is.
- A Rayleigh-szórás miatt az üvegben tehát kisebb veszteséggel terjed a közeli infravörös fény, mint a látható. Így a **közeli IR-ben célszerű a jeleket továbbítani az üvegekábelben.**
- Tehát az optikai jelátvitel a valóságban nem is az eredeti optikai tartományban (a látható fény tartományában) történik.
- **Az üveg az 1,5 – 1,6 μm-es IR számára a legátlátszóbb,** a korszerű módszerek ezt a tartományt használják adatátvitelre.

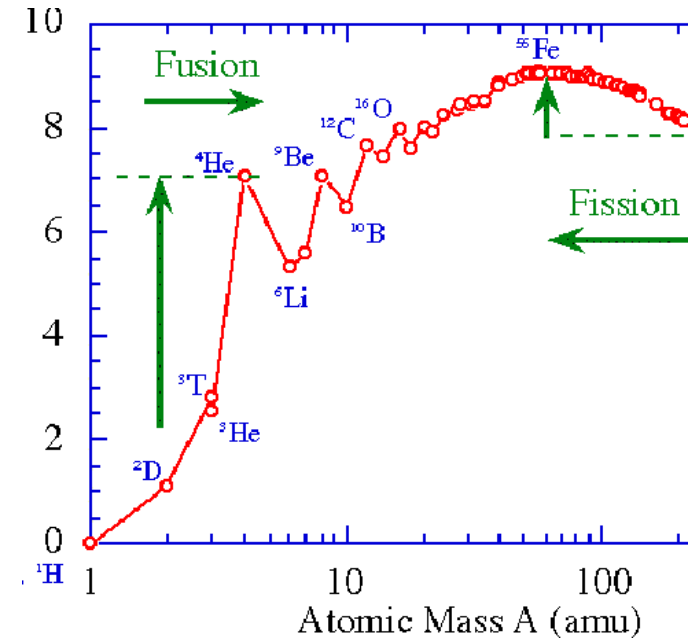
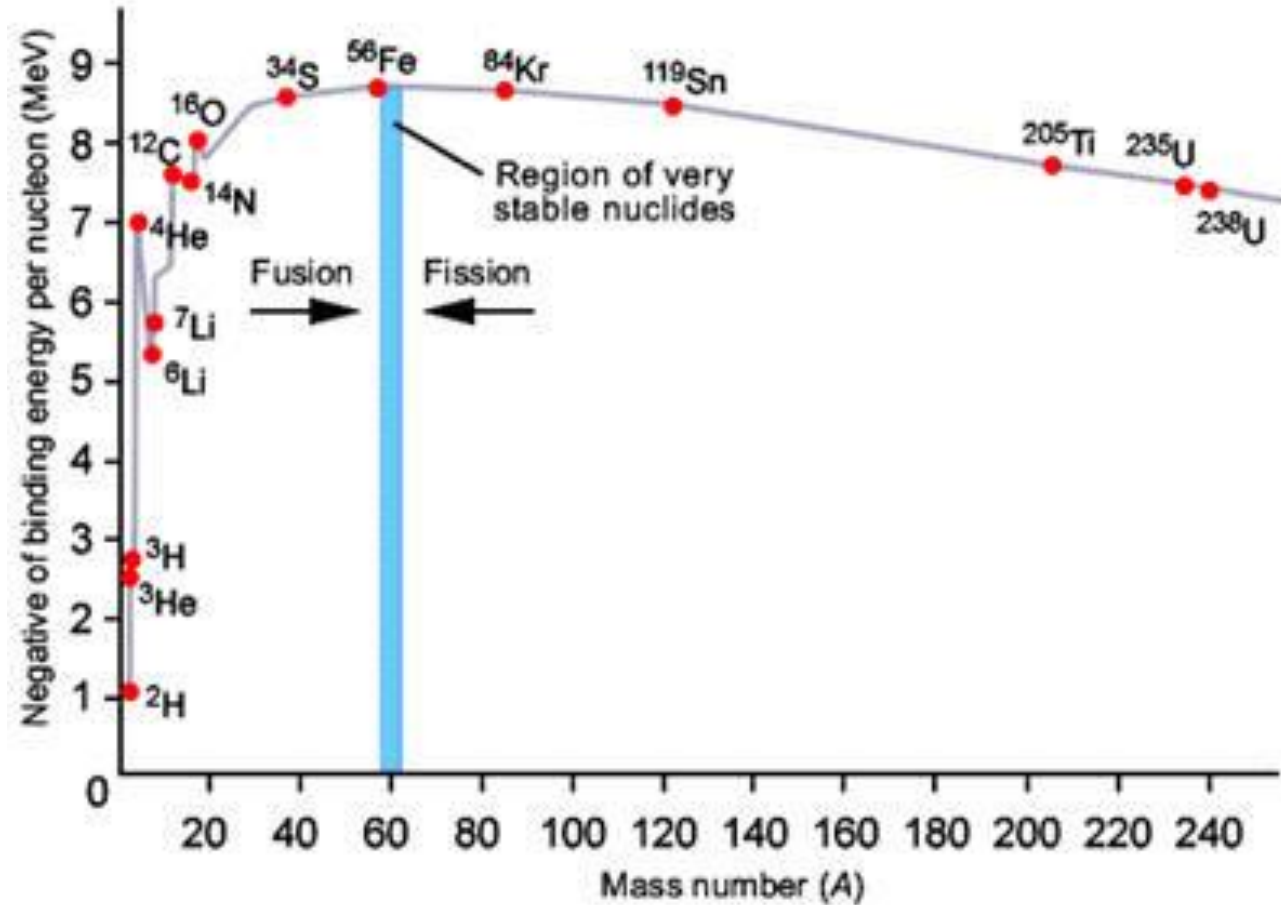
# A fúziós energiatermelés

- A fúziós energia – tekintve, hogy a Nap is ezzel működik – a felhasznált energiáink többségének őszija, tehát a legfontosabb és legtermészetesebb energiaforrás
- A fúziós energia forrása az atommag. Az atommagot **összetartó kölcsönhatás** a **nukleáris kölcsönhatás**, amely a kvarkok közötti erős kölcsönhatás maradéka.
- Rövid hatótávolsága miatt a nukleáris kölcsönhatás lényegében csak a „szomszédos” nukleonok között hat, azaz nagy magok esetén „telítődik”.
- A kötést lazítja a protonok közötti **taszító elektromos kölcsönhatás**. Nagy hatótávolsága miatt a magon belül minden proton kölcsönhat egymással, nagy magokban válik jelentőssé.
- Kvantummechanikai okok miatt a nukleon **a párjával különösen erősen** hat kölcsön. A páros nukleonszám igen erőssé teszi a kötést.



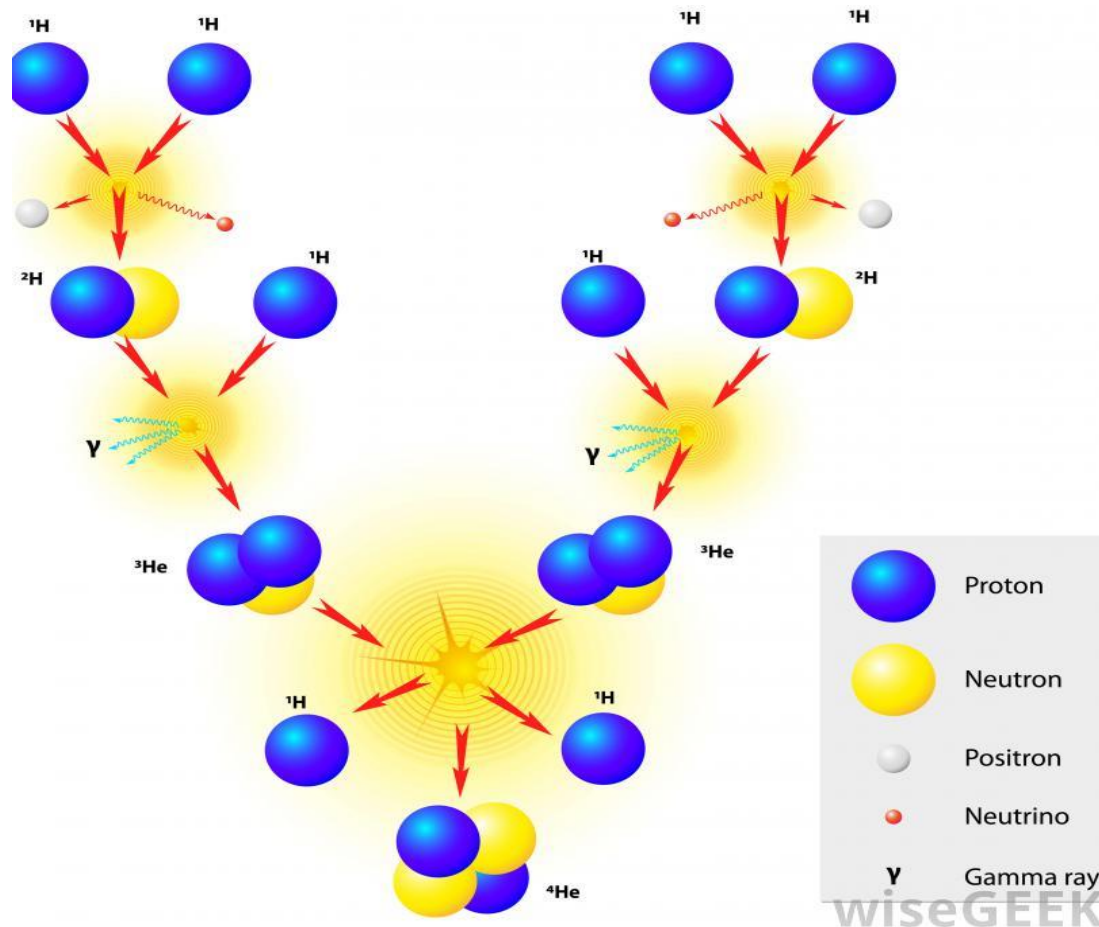


# Az atommagok energiája



Tömegszám (A)

**Magfúzió:** könnyű atommagok egyesülnek egy nehezebb atommaggá. A megnövekedő nukleáris kölcsönhatás miatt megnövekszik a végtermék(ek) mozgási energiája. (Felszabadul a nukleáris energia)

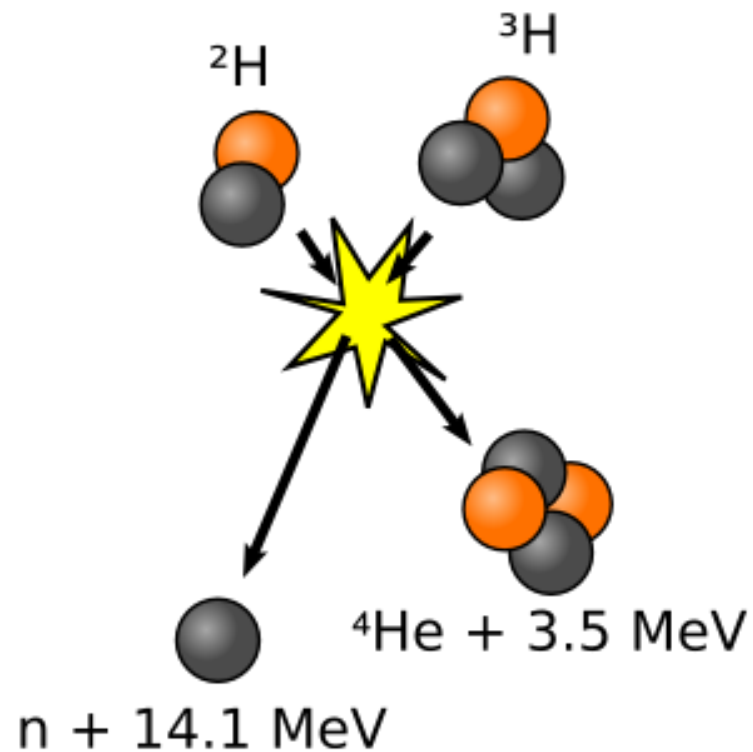


Az ábrán a Napban lejátszódó hidrogén ciklus látható.

Megjegyzés: a p-n átalakulás ritkán következik be, sokat kell rá várni.

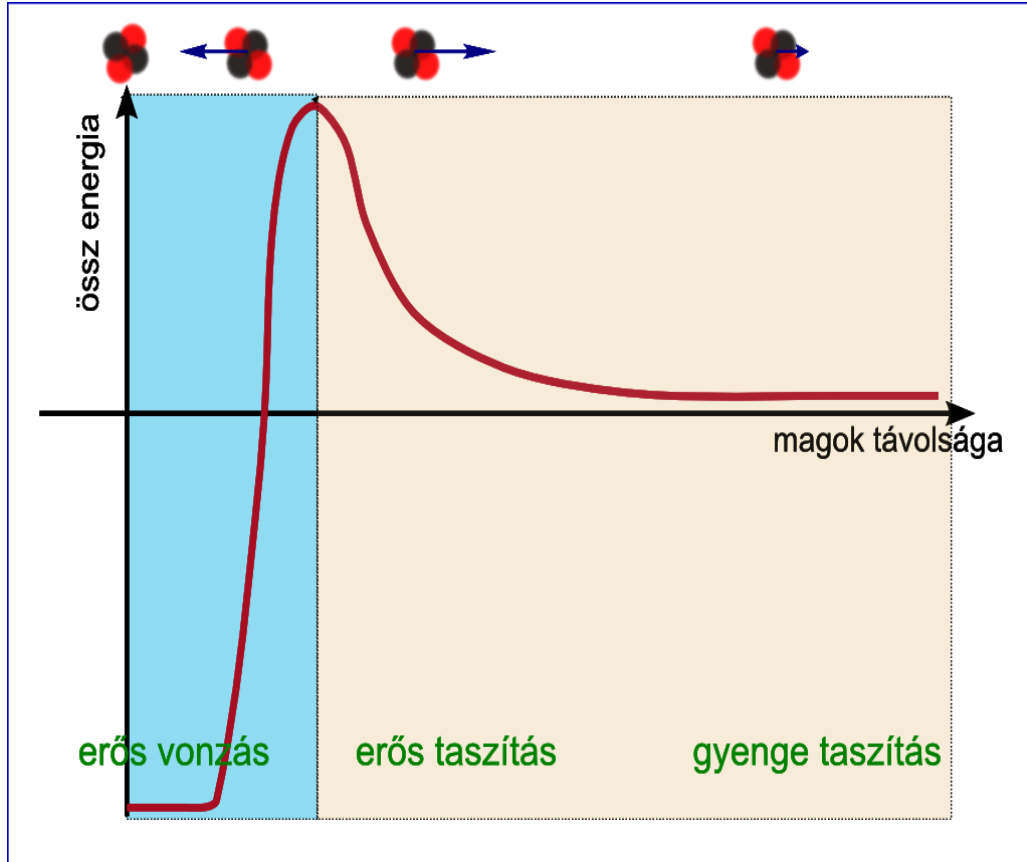
A többire nem.

## A legkedvezőbb energiamérlegű: a D + T fúzió



- A deutérium a tengervízből is könnyen előállítható (1 literből 33 mg)
- A tríciumot helyben termelik a neutronok lítiumból** (a lítium nem ritka a földkéregben, egy 5 g-os ércéből 50 mg trícium állítható elő)
- A keletkezett 17,6 MeV mozgási energián a reakciótermékek a tömegükkel fordított arányban osztoznak (a 83 mg nehézhidrogén annyi energiát termel, mint két és fél hordó benzin elégetése)
- Idővesztés nélkül végbemegy

# A problémák forrása: a Coulomb-gát



A protonok a Coulomb-taszítás miatt csak akkor tudnak a nukleáris kölcsönhatás hatótávolságán belül kerülni, ha kellően nagy sebességgel találják el egymást.

A szükséges sebesség 1000 km/s nagyságrendű, ami kb. 10 keV energiának felel meg.

(vö.: igen kis sebességű neutron is bejuthat a magba, mert az nem taszítja)

**Hőmozgással legyőzhető a Coulomb-gát, ha a hőmérséklet legalább 100 millió kelvin.**

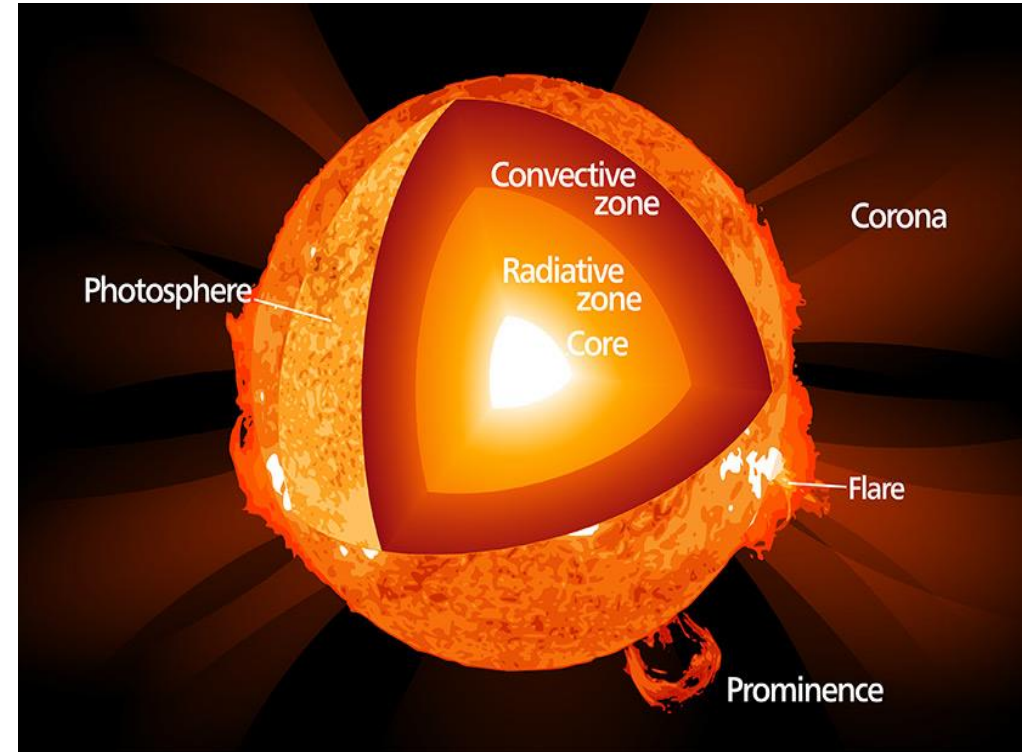
Ennél kisebb hőmérsékleten a fúzió nem indul be (kivéve a csillagokat)

Ezen a hőmérsékleten az anyag plazma állapotú (nincsenek atomok, csak ionok és elektronok)

Ezt a hőmérsékletet (de még az ezredrészét sem) semmiféle anyag nem viseli el.

# A Nap energiatermelése

- A Napot a keletkezésekor a gravitációs energia melegítette fel
- Amikor a Nap közepe elérte a 15 millió kelvines hőmérsékletet a fúzió alagút-effektussal (igen lassan) beindult (főleg a H-ciklus)  
(Gamow, Teller Ede, Hans Bethe)
- A keletkező fotonok felfújják a Napot. Ez csökkenti a sűrűséget és a hőmérsékletet, ezért a fúzió nem tud begyorsulni.
- A Napunk kb. 10 milliárd év alatt igen lassan, önszabályzó módon „égeti el” a hidrogénjét héliummá (teljesítménysűrűsége csak  $\sim 0.2$  mW/kg, miközben az emberi testé: 1.3 W/kg).
- Nyilvánvaló, hogy a Napot a Földön nem lehet leutánozni



# A fúziós plazma összetartása

A fúzió akkor lehet önfenntartó, ha a megfelelő hőmérsékletű,  $n$  sűrűségű plazmát legalább  $\tau$  ideig egyben tartjuk, úgy, hogy teljesül az ún. **Lawson kritérium**

$$n \cdot \tau \geq 10^{20} \text{ sm}^{-3}$$

Gyakorlatban a két szélsőséges eset valósítható meg könnyebben:

- **Tehetlenségi összetartás (Inertial confinement, ICF).**

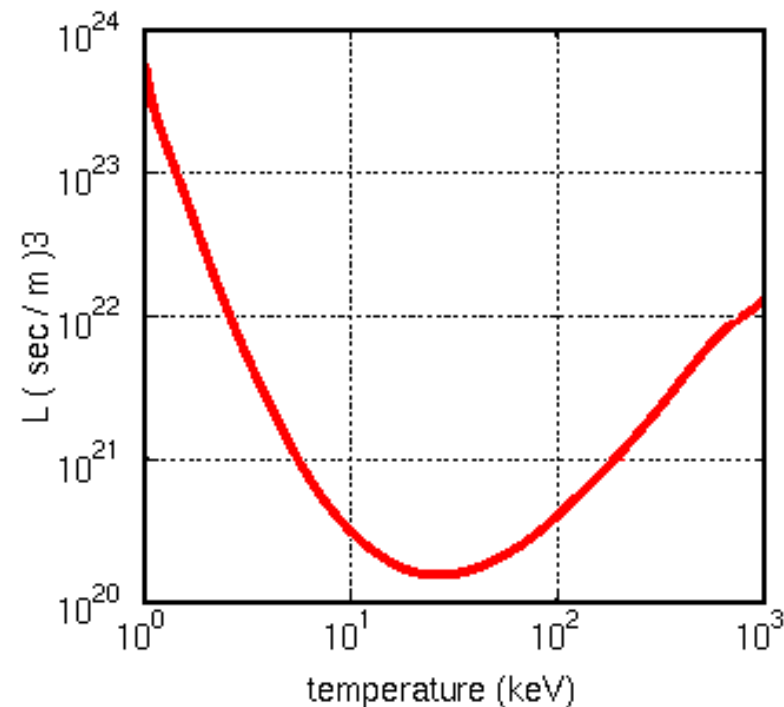
A plazma szabadon tágul, a Lawson kritérium teljesüléséhez egy kritikus sűrűséget kell elérni, rövid ideig

( $n$  igen nagy,  $\tau$  igen kicsi)

- **Mágneses összetartás (Magnetic confinement, MCF).**

A plazmát mágneses térrel tartjuk össze. A sűrűséget az alkalmazott mágneses tér szabja meg, az energia termeléshez egy kritikus energia összetartási időt kell elérni alacsony sűrűség mellett

( $n$  igen kicsi,  $\tau$  igen nagy)





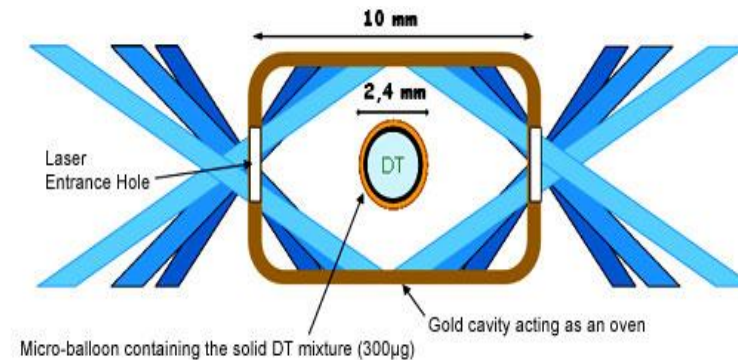
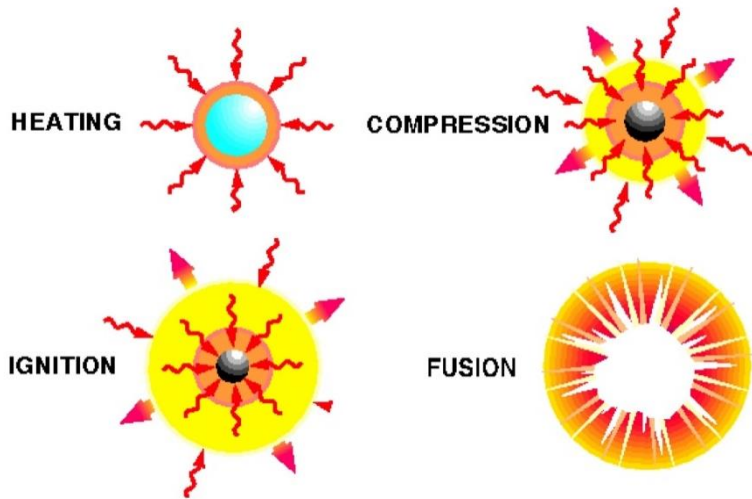
# A tehetetlenségi összetartás (ICF) elve

- A plazmát valójában semmi se tartja össze, az szabadon tágul.
- Bár az anyag igen nagy sebességgel tágul, a részecskék a tehetetlenségük miatt egy igen rövid ideig mégis egymás közelében lesznek.
- A kezdeti nyomásnak és sűrűségnek igen nagyoknak kell lennie, hogy a Lawson-kritérium teljesülhessen, tehát robbantásról van szó
- A sűrűség a robbantásban főleg akkor emelkedhet, ha az befelé történik (implózió)
- A hidrogén bomba is ICF-fel működik, ott a gyutacs egy atombomba
- A fúziós erőműben ennél sokkal kisebb robbanások kívánatosak, tehát az üzemanyag is kis térfogatú
- A kicsi üzemanyag felrobbantása főleg **lézerekkel** lehetséges



# Lézerek az ICF-ben

- Egyetlen lézersugárból indulnak ki, ezt több sugárra bontják, majd ezeket egyenként milliárdszorosukra erősítik
- A felerősített sugarakat tükrökkel a reakció-kamrába vezetik úgy, hogy egyenletesen világítsák meg a céltárgy felületét (**direkt fűtés**), vagy a céltárgyat befoglaló üreg belső felületét (**indirekt fűtés**)

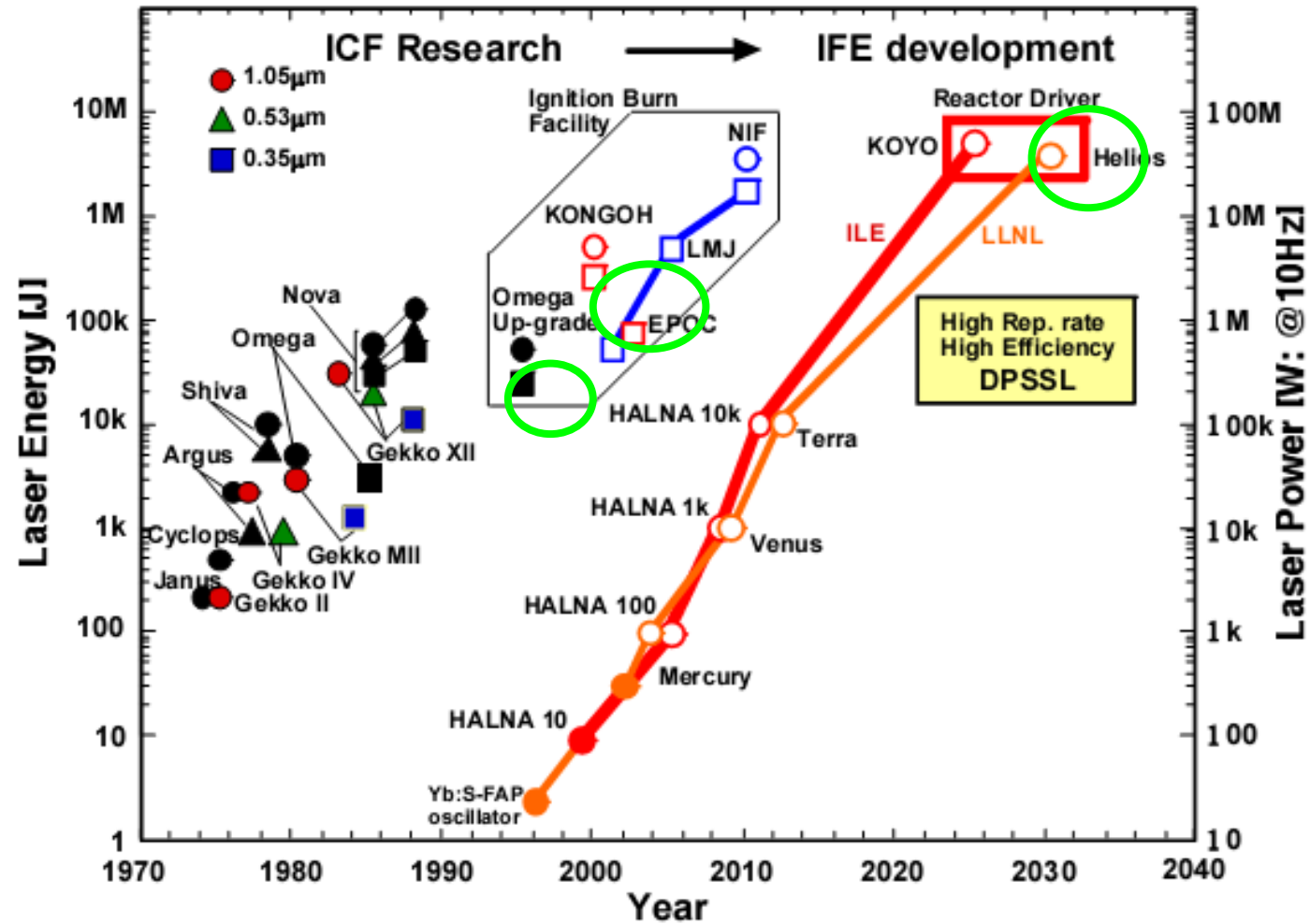


A begyűjtés pillanatára jellemző adatok:

$$T = 100\,000\,000\text{ K}, \rho = 1\,000\,000\,000\text{ atm}, \rho = 300\text{ g/cm}^3$$

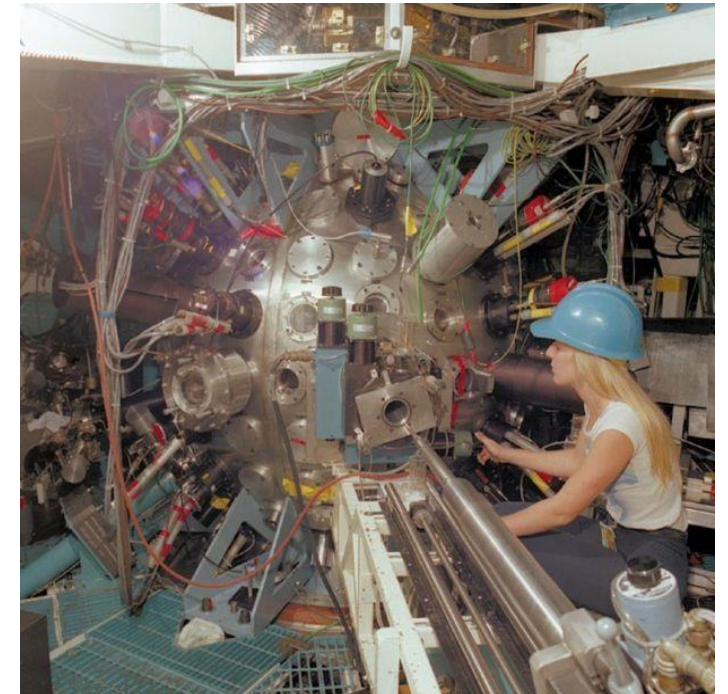
# Lézerek az ICF-ben

HALNA (High Average-power Laser for Nuclear Fusion Application) at ILE, Osaka University



## Shiva lézer

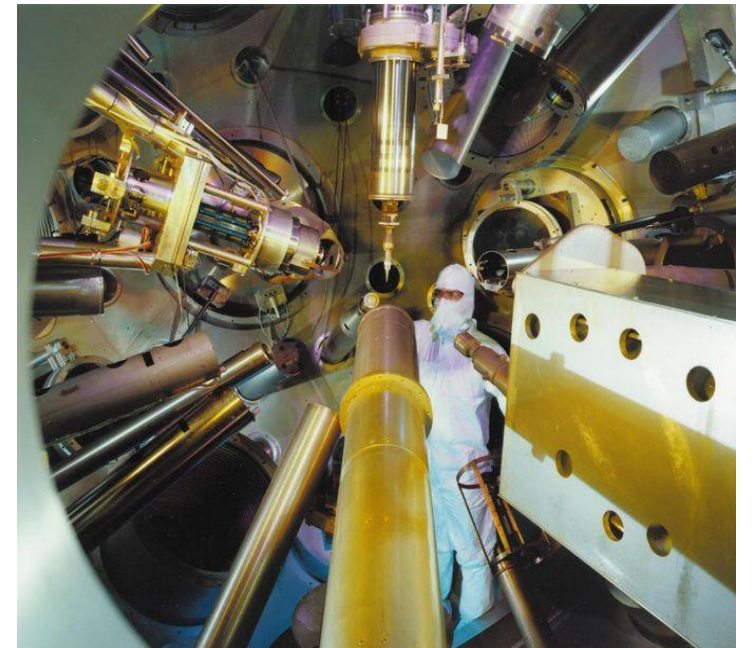
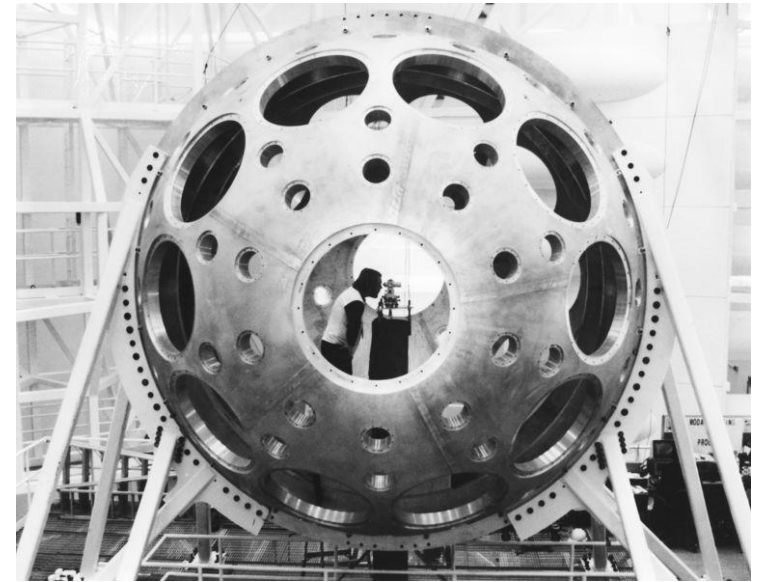
1977, 20 sugár, Nd:üveg,  
1062 nm, 10 kJ/imp.





# NOVA lézer

1984 – 1999, 100 kJ 1054 nm, 40-45 kJ 351 nm, 2-4 ns impulzusok ,  
~10 TW a céltárgyon, ~ $10^{13}$  neutron lövésenként





# Lézerek az ICF-ben

## National Ignition Facility, NIF, LLNL

- Ez ma a világ legnagyobb lézere (Nd:üveg, 1062 nm, frekvencia háromszorozással 354 nm)
- 192 sugaras rendszer
- összesen 2MJ UV sugárzási energia egy 1 ns-os impulzusban ( $2 \cdot 10^{15}$  W pill. telj.)
- 2010 a kísérletek kezdete

National Ignition Facility (NIF),  
Lawrence Livermore  
National Laboratory LLNL



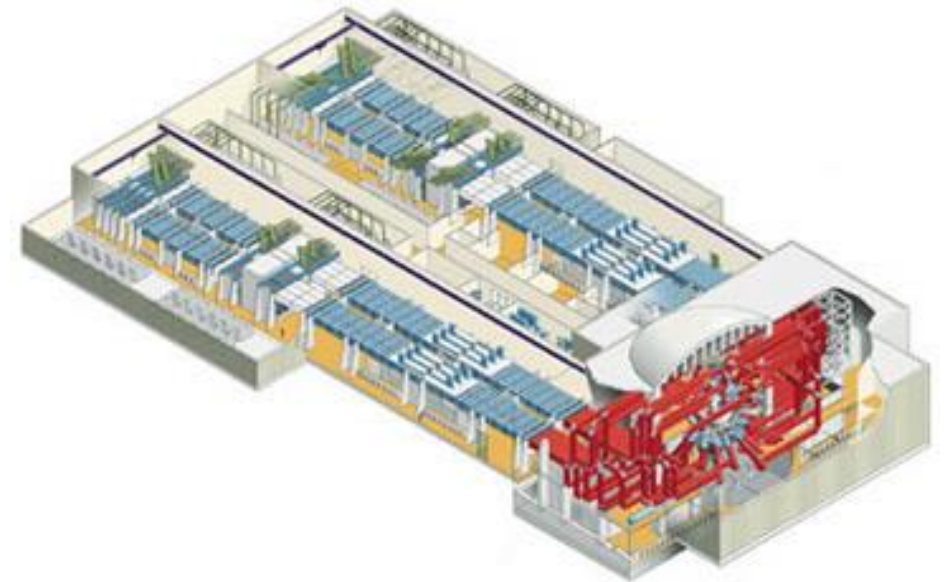


**Lézerek a jobb oldalon (2×12×4 = 96 db)**

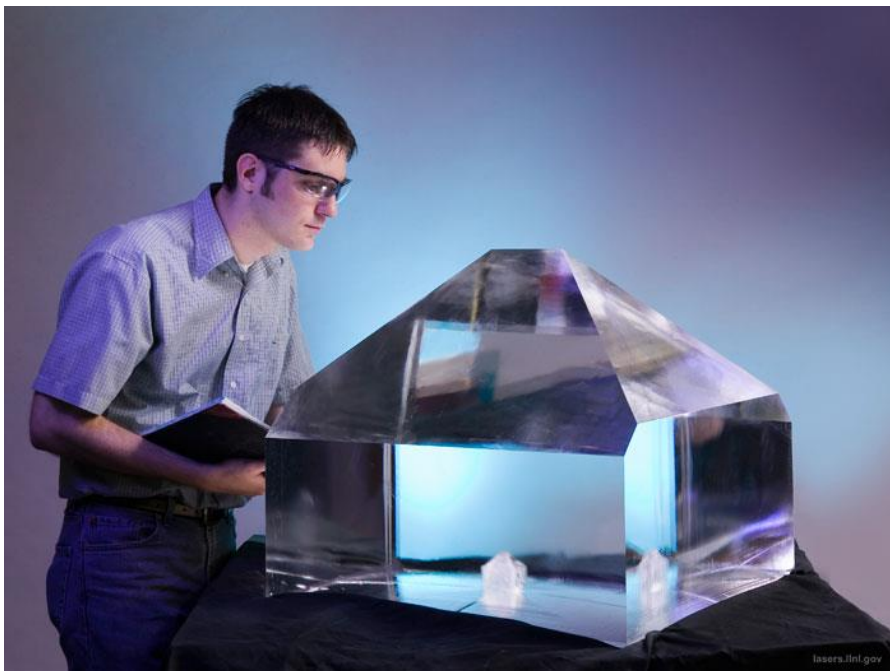


7500 darab 2 méteres villanólámpával (amelyeket hatalmas kondenzátorokkal táplálnak) gerjesztett üvegbe ágyazott Nd atomok koherens sugárzása erősíti az eredeti gyenge, 192 részre osztott lézerimpulzust.

Végül a 192 nyaláb mindegyike 20000 J impulzusenergiájú lesz. A lézerimpulzusok hossza 1 ns, amelyek 20 ps-on belül, 50  $\mu\text{m}$  pontossággal érkeznek a céltárgyra.

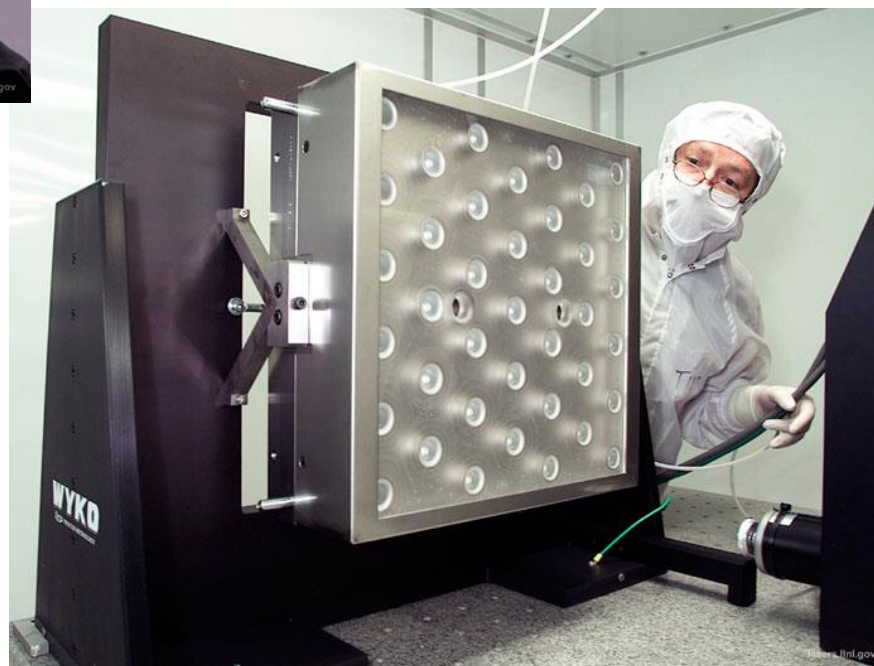






KDP (kálium dihidrogén foszfát) kristályokkal teszik át a lézerfényt az infravörösből az ultraibolyába

Számítógéppel vezérelt deformálható tükrökkel fókuszálják a lézernyalábokat

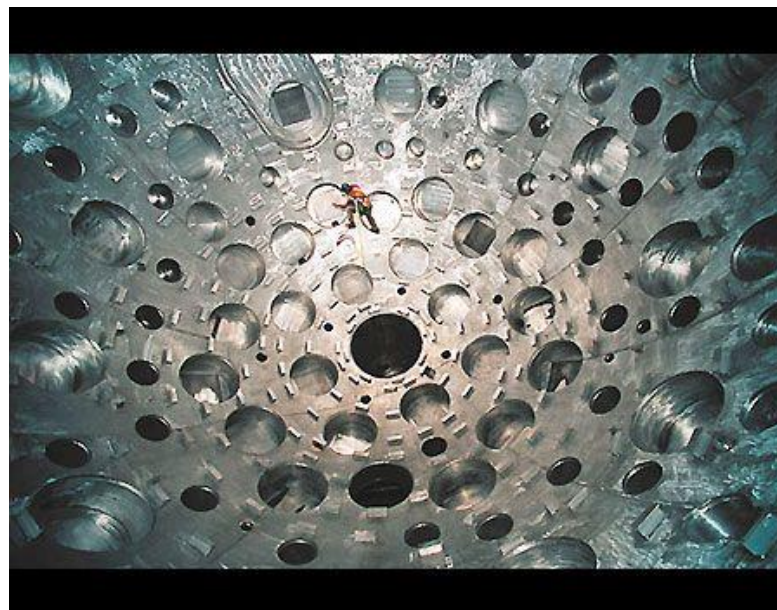




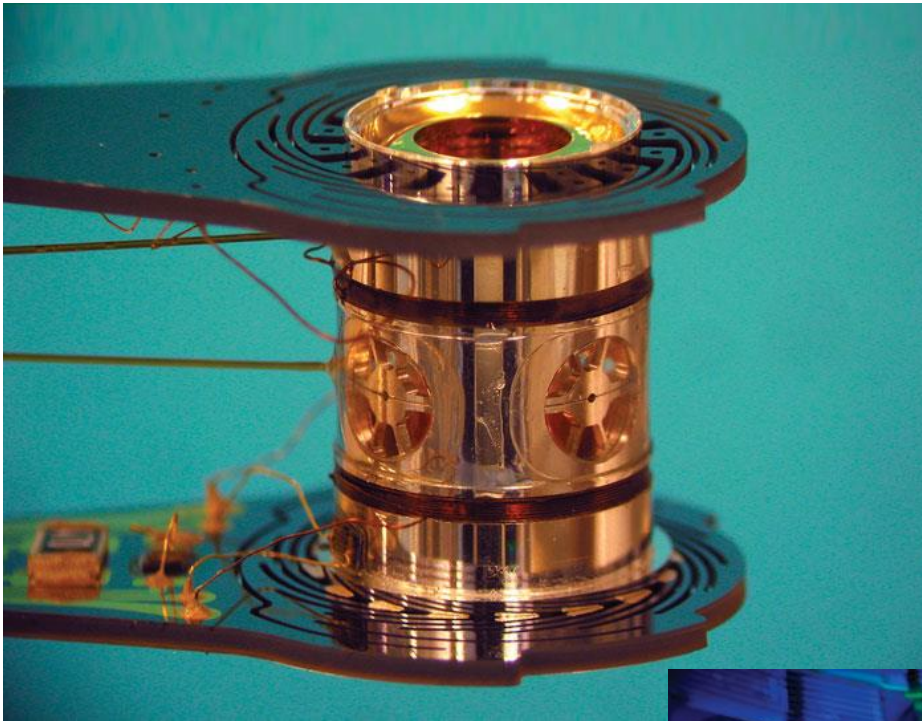
The National Ignition Facility target chamber. 192 laser beams converge on a fusion-fuel-filled target.

Photo: Lawrence Livermore  
National Laboratory

A 192 lézernyalábot a  
**targetkamrában** lévő  
céltárgyra vezetik



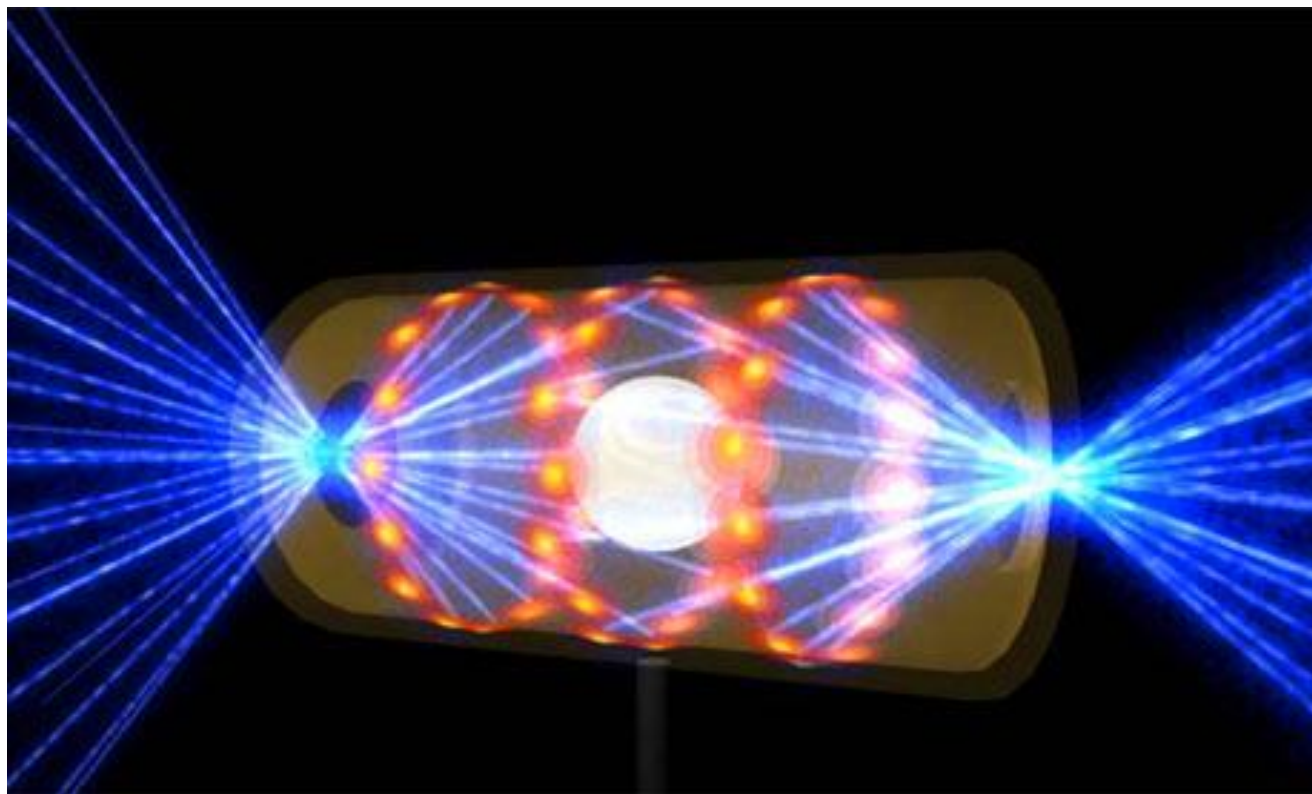




**A hidrogén target** a fúzió megindulásakor 100 millió fokos, a nyomása egymilliárd atmoszféra. Ekkor a hidrogén százszor sűrűbb az ólomnál.

Ezt csak úgy érhetjük el, ha kezdetben a hidrogén folyékony, azaz a hőmérséklete kb.  $-250\text{ °C}$ -os

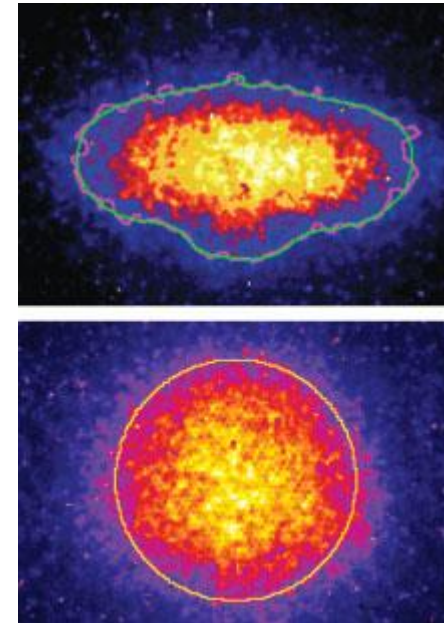
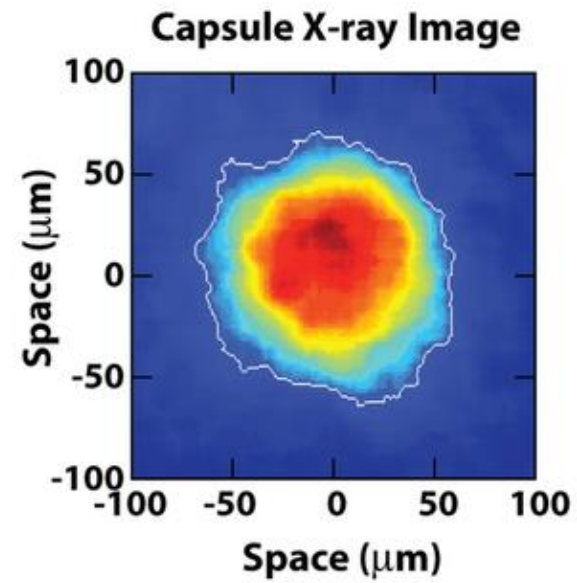
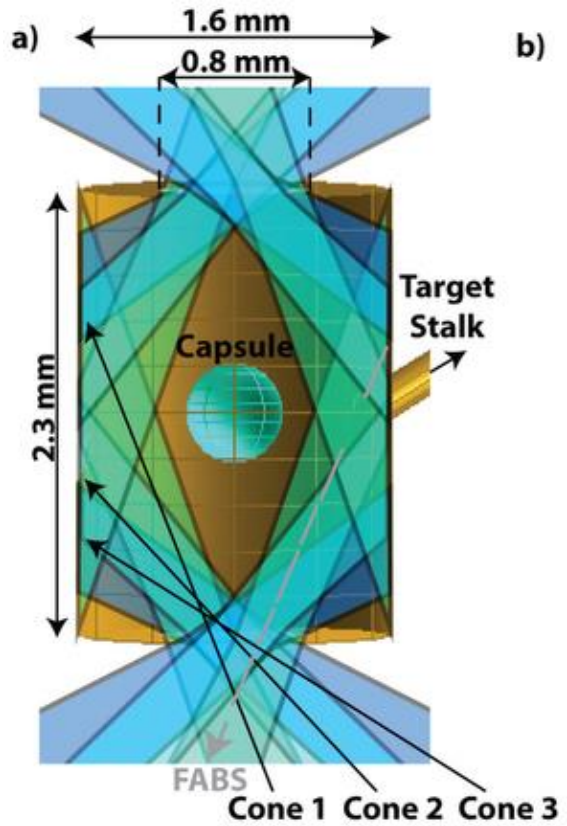




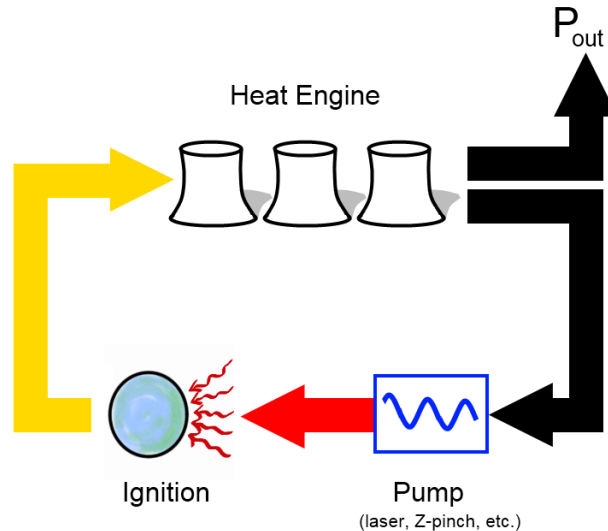
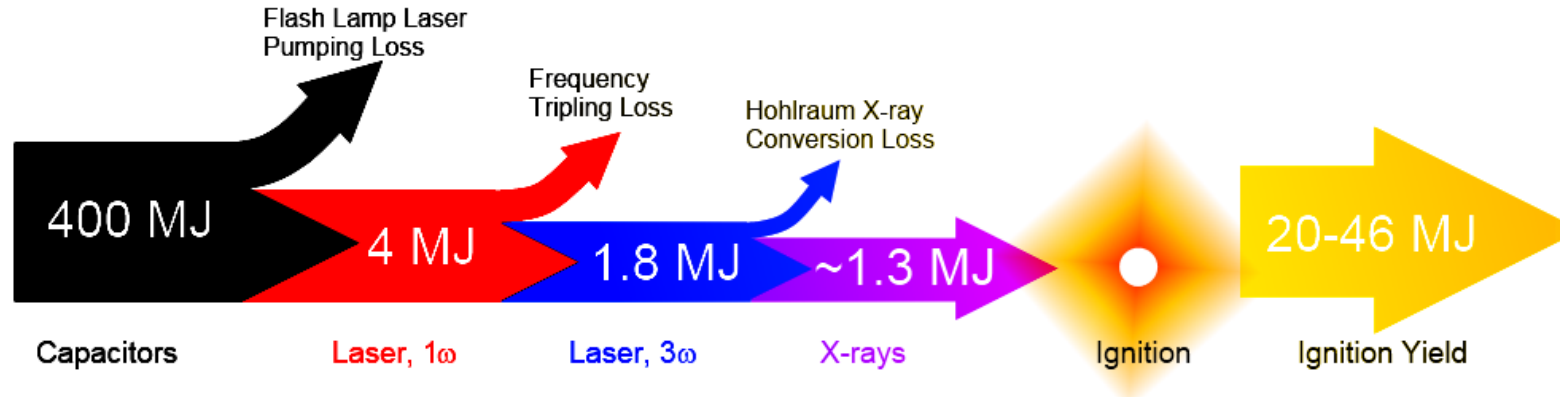
A NIF lézernyalábjai elérik a deutérium-trícium céltárgyat tartalmazó üreg belső falát. A keltett röntgen lökéshullámok a következő milliszekundumban majd összepréselik és felhevítik a céltárgyat és beindítják a fúziót.

...és a fúzió beindult.

A hatásfok javítható...



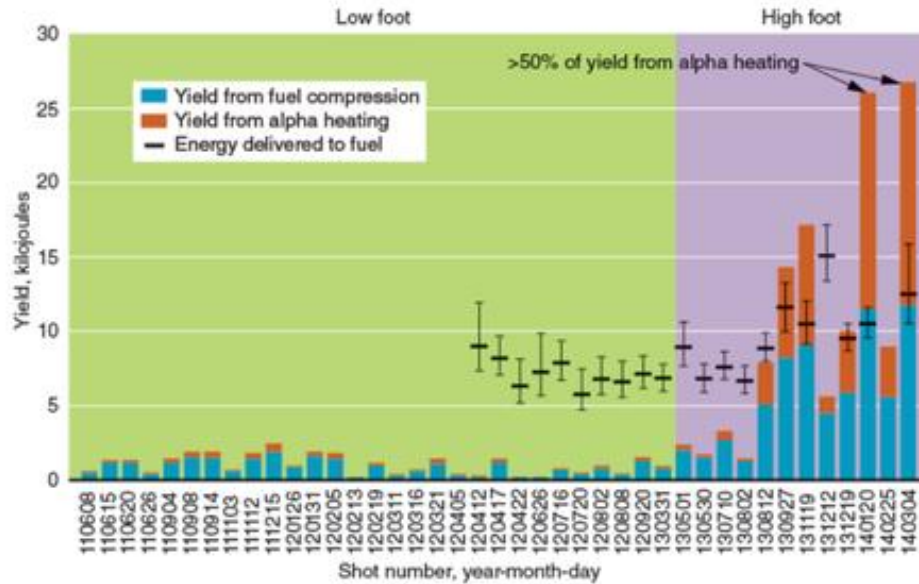
# A NIF energiamérlege




- Legalább 25-30-szor több fúziós energiát kellene kinyerni (1 GJ/imp), hogy energiatermelésről beszéljünk
- 10 imp/sec a kívánatos tempó
- Az árról egyelőre ne essen szó!

→ **Az ICF-es fúziós erőmű még nincs belátható közelségben**



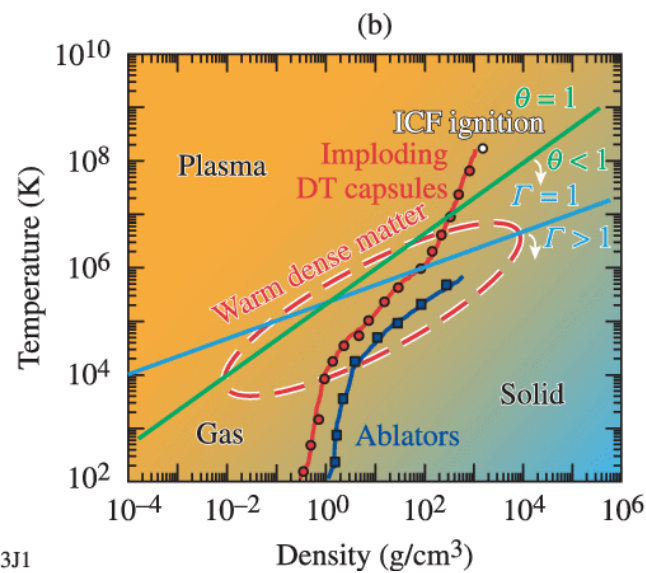
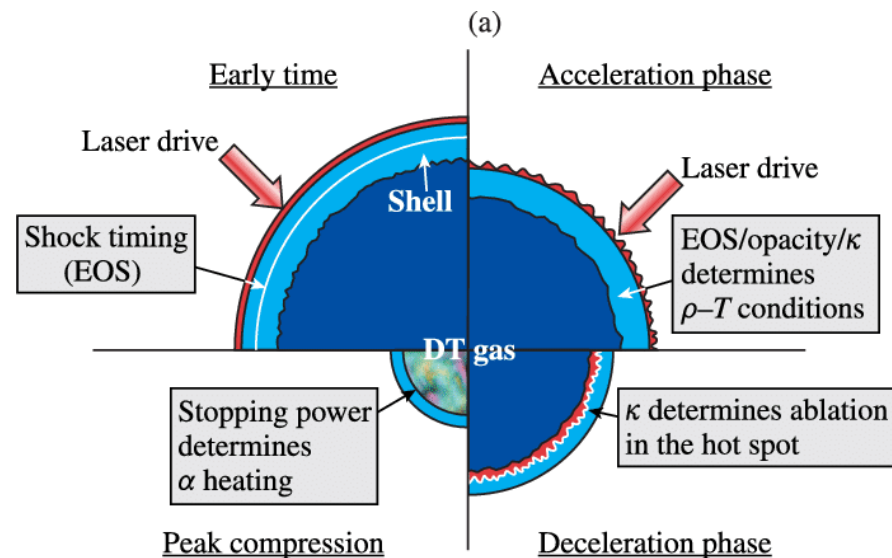
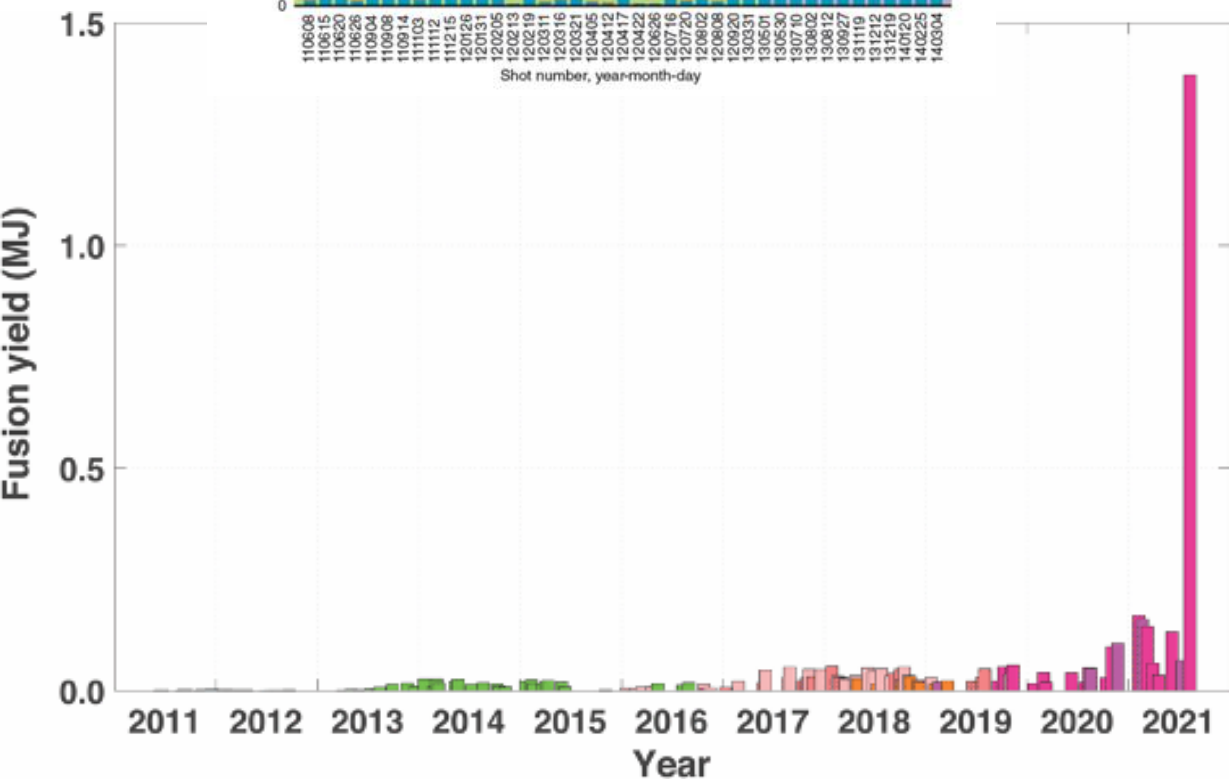
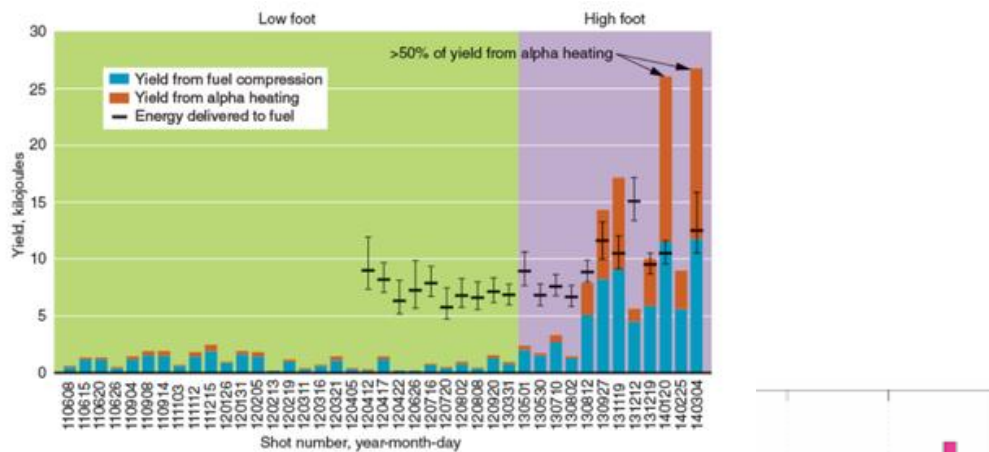


Sajnos bizonyos instabilitások miatt a NIF program egyelőre nem sikeres.

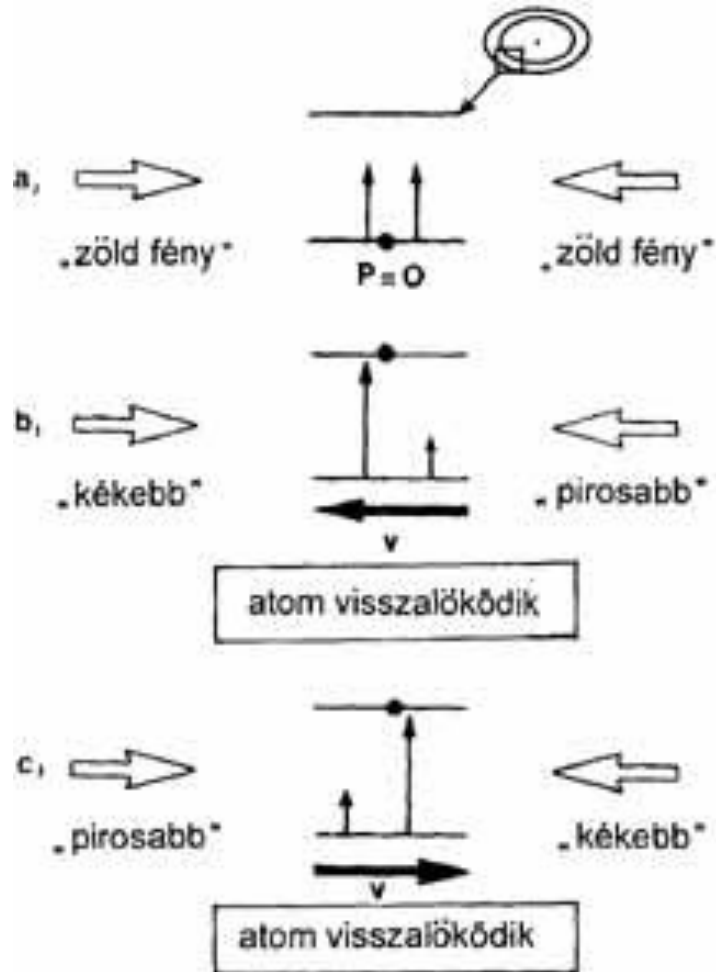
- Jelenleg az anyagtudomány használja a világ legnagyobb lézerét: az anyag viselkedését lehet tanulmányozni az atombomba közepén úgy, hogy nem is robbantunk atombombát...
- De az ICF-es fúziós erőmű  még nincs belátható közelségben



Az áttörés a teljesítményben 2021 végén következett be. A megoldás az üzemanyag golyócska „felöltöztetése” volt.

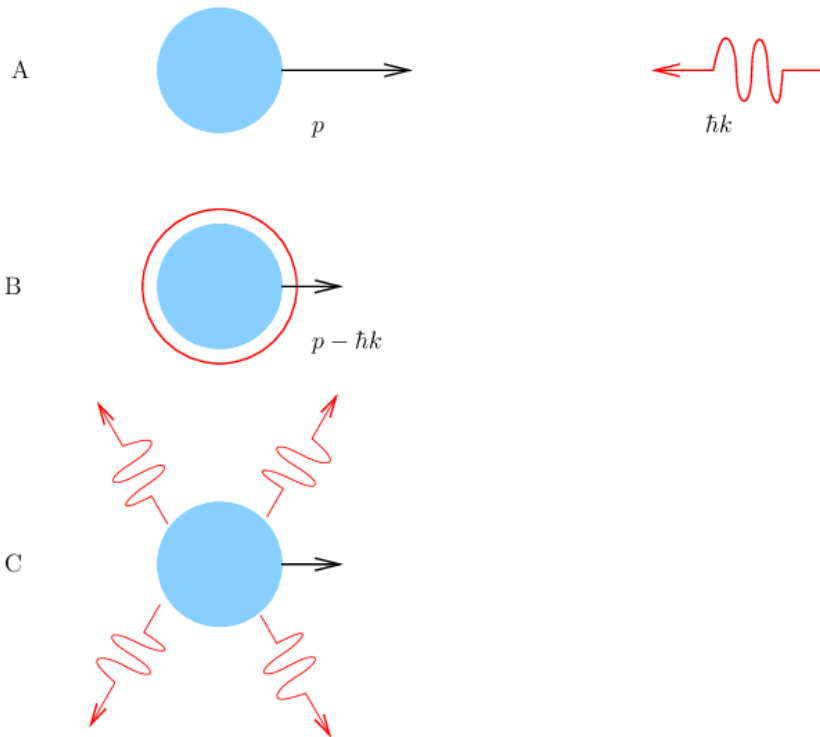


# Atomok lézeres hűtése



- Képzeljük el, hogy egy lézersugarat egy picivel kisebb kvantumenergiára hangolunk annál, amit az adott álló atomok el tudnak nyelni (az ábrán zöld fény).
- A lézersugárral **szembe haladó atom** a Doppler-effektus miatt azonban **nagyobbnak érzékeli a frekvenciát és elnyelheti a fotont** (az ábrán a „kékebb” fény).
- A **lézersugár irányába haladó atom** a Doppler-effektus miatt még kisebbnek érzékeli a frekvenciát és **egyáltalán nem tudja elnyelni a fotont** (az ábrán a „pirosabb” fény).
- **Ha egy adott irányba mozgó atom elnyel egy pontosan ellenkező irányból érkező fotont, akkor az atom visszalökődik, sebessége csökkenni fog.**

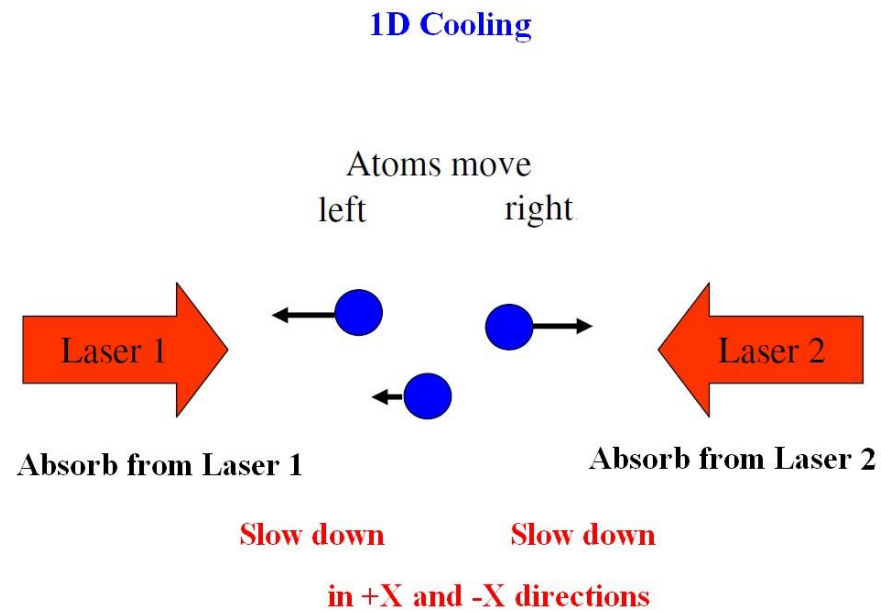
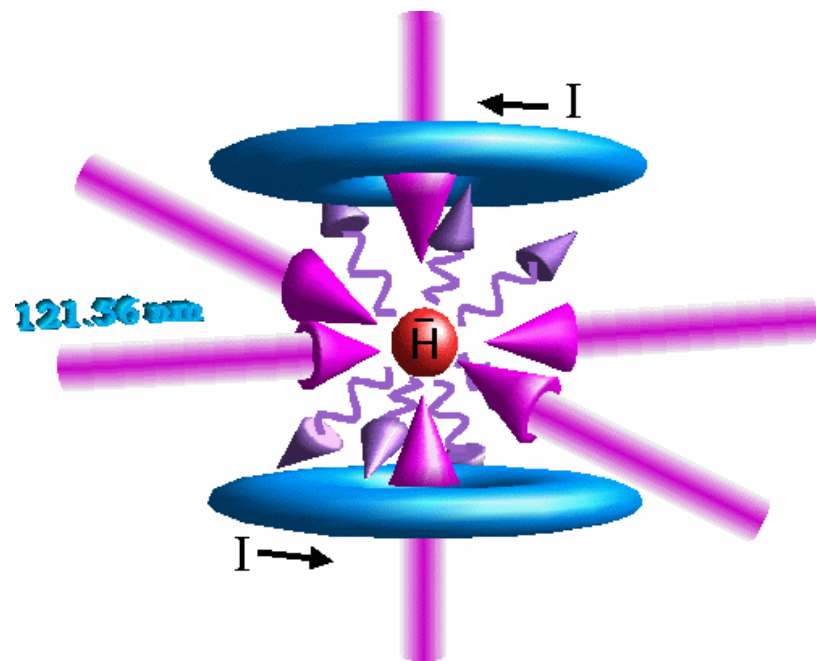
## Atomok lézeres hűtése/2



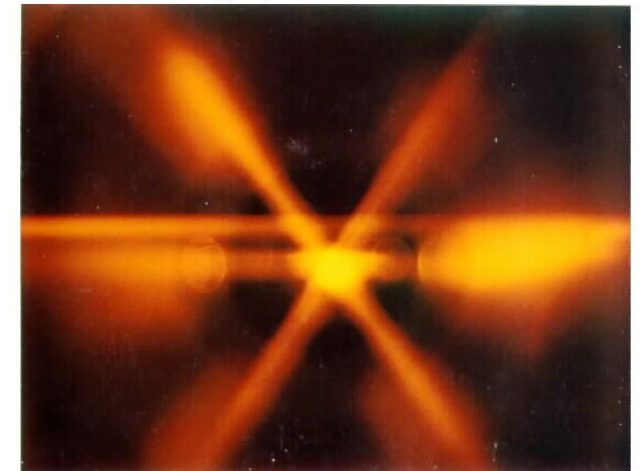
- Tehát ha egy adott irányba mozgó **atom elnyel egy pontosan ellenkező irányból érkező fotont, akkor az atom visszalökődik, sebessége csökkenni fog.**
- Az ily módon gerjesztett állapotba kerülő atom természetesen spontán emisszió során később kibocsátja magából a fotonokat, ám az emisszió iránya véletlenszerű, így ezek miatti sebességváltozások nullára átlagolódnak.
- A **gerjesztési eljárás**, s az eztán bekövetkező emissziós folyamat **ismétlésével jelentősen csökkenthető egy atom sebessége, s így a mozgási energiája is, magyarul az atom idővel „lehűl”.**

# Atomok lézeres hűtése/3

A hűtés akkor működik, ha mind a 6 irányú ( $\pm x, \pm y, \pm z$ ) sebességet csökkentjük. Ehhez mind a 6 irányból át kell vezetni a lézernyalábot az atomhalmazon.



**3D Cooling**  
Counter-propagating 3 pairs of beams  
along X, Y and Z axes



Slow down in all directions

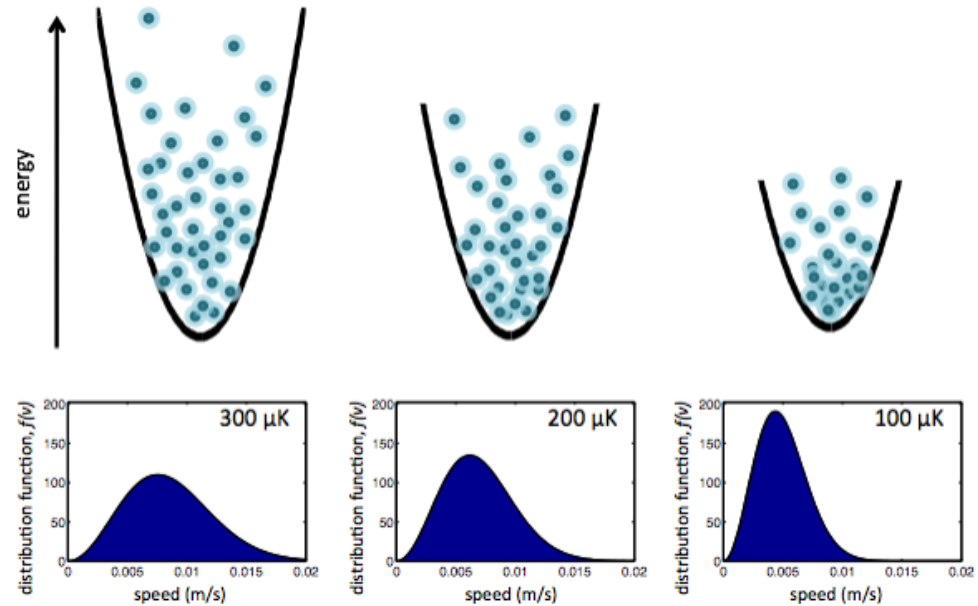
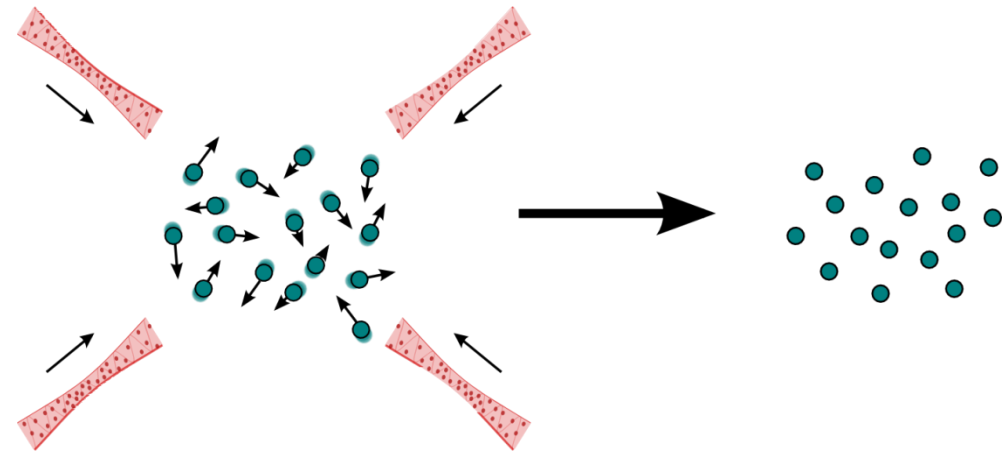


# A lézeres hűtés ötlete és megvalósítása Nobel-díjat ért.



W. D. Phillips, S. Chu, and C. Cohen-Tannoudji: Nobel Prize for Laser Cooling

1997



## Ellenőrző kérdések

A kép rekonstrukciója úgy történik, hogy a hologramot (az előhívott fotolemezt) az eredeti kitágított lézersugárral megvilágítjuk. Igaz-e ez az állítás?

- a) Ez csak a vékony hologramokra igaz, a vastagokra nem
- b) Igen, ez mindenféle hologramra igaz
- c) Ez nem igaz, a képet a hologramból mindig fehér fénnel rekonstruáljuk
- d) Ez csak az on axis hologramokra igaz, az off axis hologramokra nem

Válogassuk ki azokat az eszközöket (3 db), amelyek megtalálhatók egy CD/DVD olvasóban!

- a) reflexiós optikai rács
- b) Q-kapcsoló
- c)  $\lambda/4$  lemez
- d) polarizációs nyalábosztó
- e) polarizátor
- f) Bragg-cella

Megoldás: c, d, e