

# Mikrorobbantásos fúzió

Bevezetés a fúziós plazmafizikába  
BME 2022

Földes István  
Wigner Fizikai Kutatóközpont

A kurzus anyaga jórészt megtalálható a  
<http://www.rmki.kfki.hu/~foldes/index.html>  
honlapról, e-mail: foldes.istvan@wigner.hu

# Magenergia fissionból és fúzióból

## (Ismétlés)

- A magenergia felszabadításának két lehetséges módja:  
nehéz magok hasítása (fission)  
és könnyű magok egyesítése (fúzió).

A magok hasítására spontán reakció létezik, a magok egyesítését azok elektrosztatikus taszítása akadályozza, ezért nincs spontán reakció.

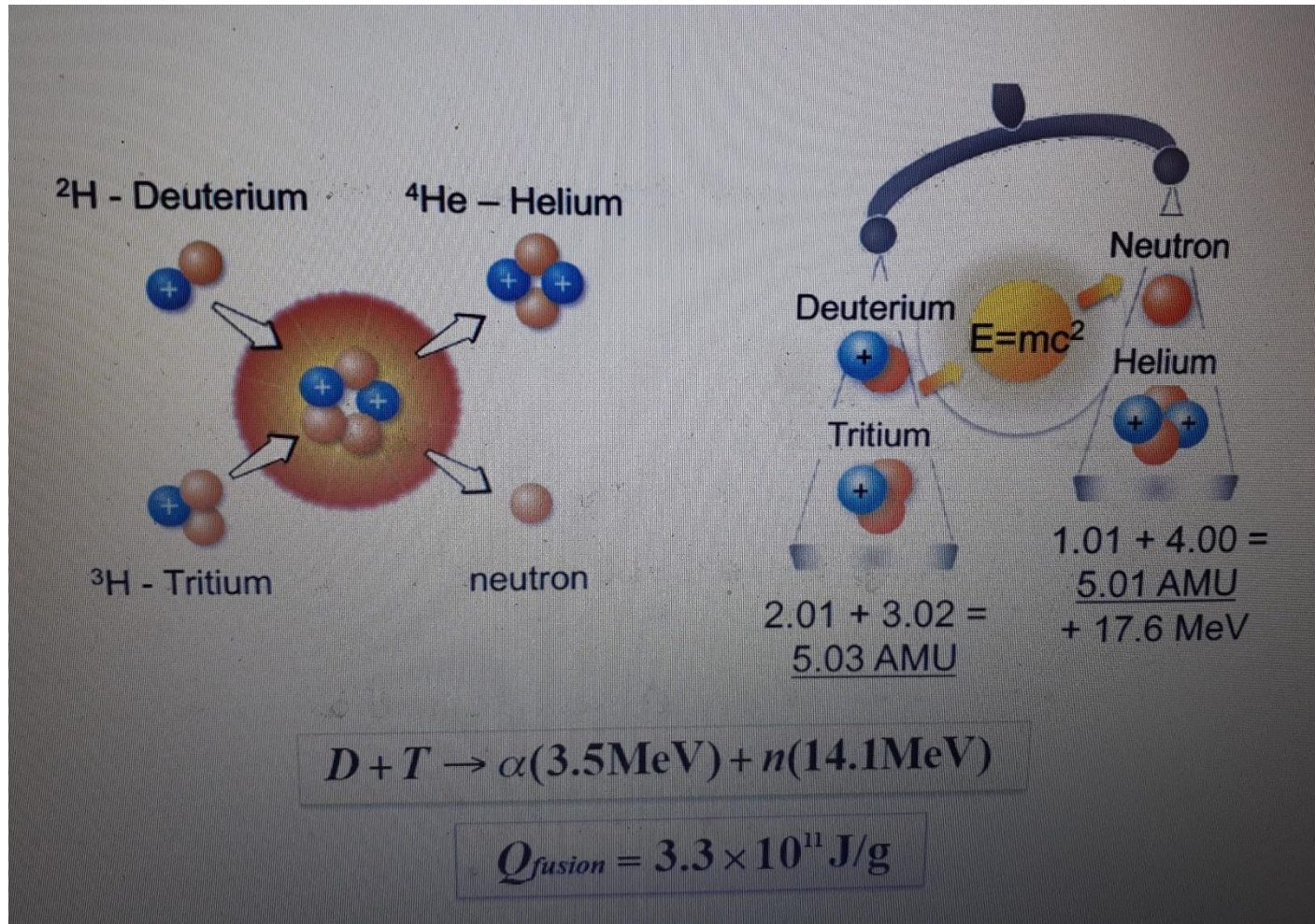
### Fission

Spontán reakció is van  
Nem igényel kezdeti befektetett energiát  
Láncreakció

### Fúzió

Nincs spontán reakció  
Jelentős kezdeti energiabefektetés kell  
Nincs láncreakció  
(reakciótermékek nem vesznek részt a reakcióban)

# Fúziós magreakció



# Magfúziós reakciók

- A szóbajövő magfizikai folyamatok jól ismertek gyorsítóval végzett kísérletekből:

- **D-T reakció:**



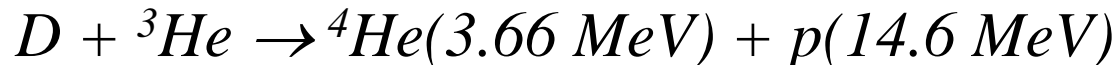
- D-D n reakció:



- D-D p reakció:



- D-He reakció:



- p-B reakció:



# Lehet-e gyorsítóval fúziós energiát termelni?

- Gyorsítsuk fel az egyik magot, és lőjük neki a másiknak!
- A magok először szóródnak egymás Coulomb-terében, és így energiát adnak át egymásnak. Mivel a **Coulomb-szórás hatáskeresztmetszete sokkal nagyobb, mint a fúzióé**, ezért az energia sok ütközés során szétszóródik a céltárgy atommagok között (termalizálódik). A termalizáció után lenne idő reakcióra, de ekkorra az energia már túl kicsi.
- **Fúziós energiát termelni csak termikus közegben lehet.**
- A reakciók viszont jól tanulmányozhatók gyorsítóval.

# Hatáskeresztmetszek

- Reakció valószínűsége termikus közegben:  $\langle \sigma v \rangle$  ráta
- 1 részecske  $n$  sűrűségű közegben másodpercenként

$$N = \langle \sigma v \rangle n \text{ reakciót szenved el,}$$

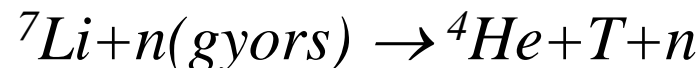
$\sigma$  a hatáskeresztmetszet,  $v$  a sebesség.

Legkönnyebben a DT reakció a megvalósítható, viszonylag legalacsonyabb hőmérsékleten legnagyobb hatáskeresztmetszet.

10 keV  $\approx 10^8$  hőmérsékleten kell összetartani, azaz 100 millió fokon.

Kiinduló anyagok (D-T): D sok van, T ritka

T előállítható Li-ból fúziós neutronokkal:



Zárt ciklus, minimális trícium mennyiség. Rövid bomlásidejű termékek.

# Fúziós plazma összetartása

- Alapvetően két fő eljárás van, mindkettővel az ún. Lawson-kritériumot kell teljesíteni ( $n\tau > 10^{20} \text{sm}^{-3}$ )
  1. **Mágneses fúzió:** A plazma sűrűségét az alkalmazott mágneses tér szabja meg. Az energiatermeléshez egy kritikus energia-összetartási időt kell elérni: tokamak, sztellarátor. Viszonylag kis sűrűség.
  2. **Tehetetlenségi összetartásos vagy mikrorobbantásos fúzió** (inertial confinement fusion=ICF, inertial fusion energy=IFE): Fúziós kapszulát (gömb) lézer- vagy részecskenyaláb fűti, esetleg egy ún. Z-pincs kisülésben keletkezett röntgen-sugárzás. A külső héj lerobbantásával (abláció) a rakéta-effektus, azaz a tehetetlenség nyomja össze. Rövid idő, nagy sűrűség.

# Fúziós feltételek (ICF)

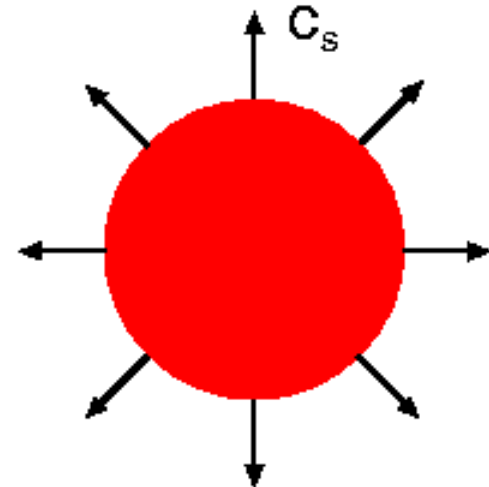
- Tegyük fel, hogy elég sűrű és forró a gömb, és a termikus  $c_s$  hangsebességgel tágul!
- $n$ : időegység alatti termonukleáris reakciók  
Maxwell-eloszlásra átlagolva:

$$\frac{dn}{dt} = N_D N_T \langle \sigma v \rangle$$

$$N_D = N_T = \frac{1}{2} N_0 - n$$

elégési ráta (burn fraction):  $\phi = \frac{2n}{N_0}$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{N_0}{2} (1 - \phi)^2 \langle \sigma v \rangle$$



Felt.: égés alatt a hatáskeresztmetszet állandó

Def.:  $\tau$  energia-összetartási idő. Integrálva:

$$\frac{d\phi}{(1 - \phi)^2} = \frac{N_0}{2} \langle \sigma v \rangle dt \quad \longrightarrow \quad \frac{\phi}{1 - \phi} = \frac{N_0 \tau}{2} \langle \sigma v \rangle$$



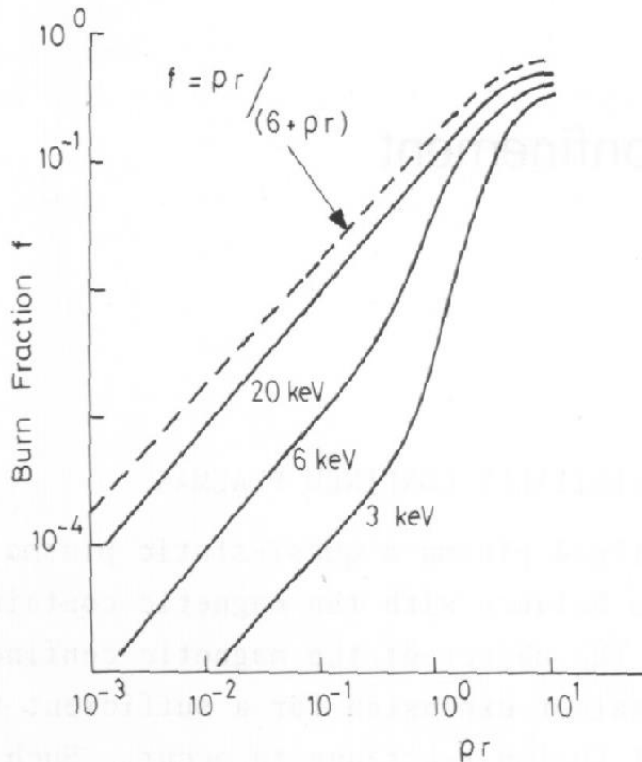
Ha a ritkulási hullám (égéskor) terjedési sebessége  $c_s$

$$\tau \approx \frac{r}{3c_s},$$

$$\frac{\phi}{1-\phi} = N_0 \langle \sigma v \rangle \frac{r}{6c_s}$$

D-T reakció esetén a  $c_s / \langle \sigma v \rangle$  arány  
20 és 40 keV között közel konstans. Ezért

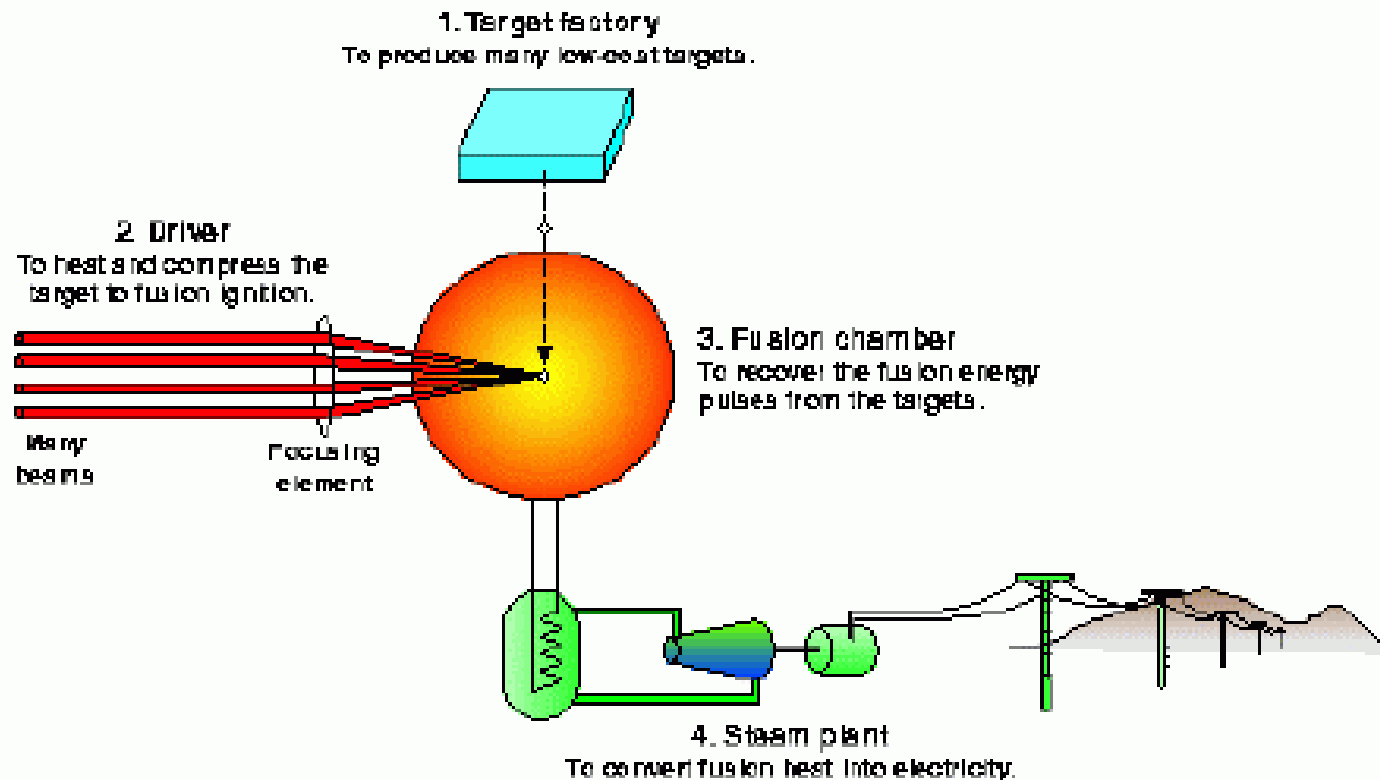
$$\phi = \frac{\rho r}{\rho r + 6.3 \left( \frac{g}{cm^2} \right)} \quad \text{Lawson kritérium.}$$



Nagy hozam ( $\rho r = 3 g/cm^2$ ) esetén  
33% ég el.

A szaggatott vonal a fenti becslés,  
A folytonos vonalak szimulációk  
eredményei.

# Mekkora hozam kell?



Mivel a lézerek és az összenyomás hatékonysága alacsony,  
a reaktorhoz nagy hozam,  
legalább 100-szoros energianyereség kell a targeten.

# Milyen sűrűség kell?

Gömb össztömege: 
$$M = \frac{4\pi}{3} \rho r^3 = \frac{4\pi}{3} \frac{(\rho r)^3}{\rho^2}.$$

Tehát a tömeg az adott  $\rho r$ -hez  $1/\rho^2$ -tel skálázódik.

Folyadéksűrűség:  $0.21 \text{ g/cm}^3$ ,

a 33% hatásfokhoz több, mint 2.5kg DT kell.

Ez  $3 \times 10^{14} \text{ J}$ -t azaz 70 kilotonnát adna.

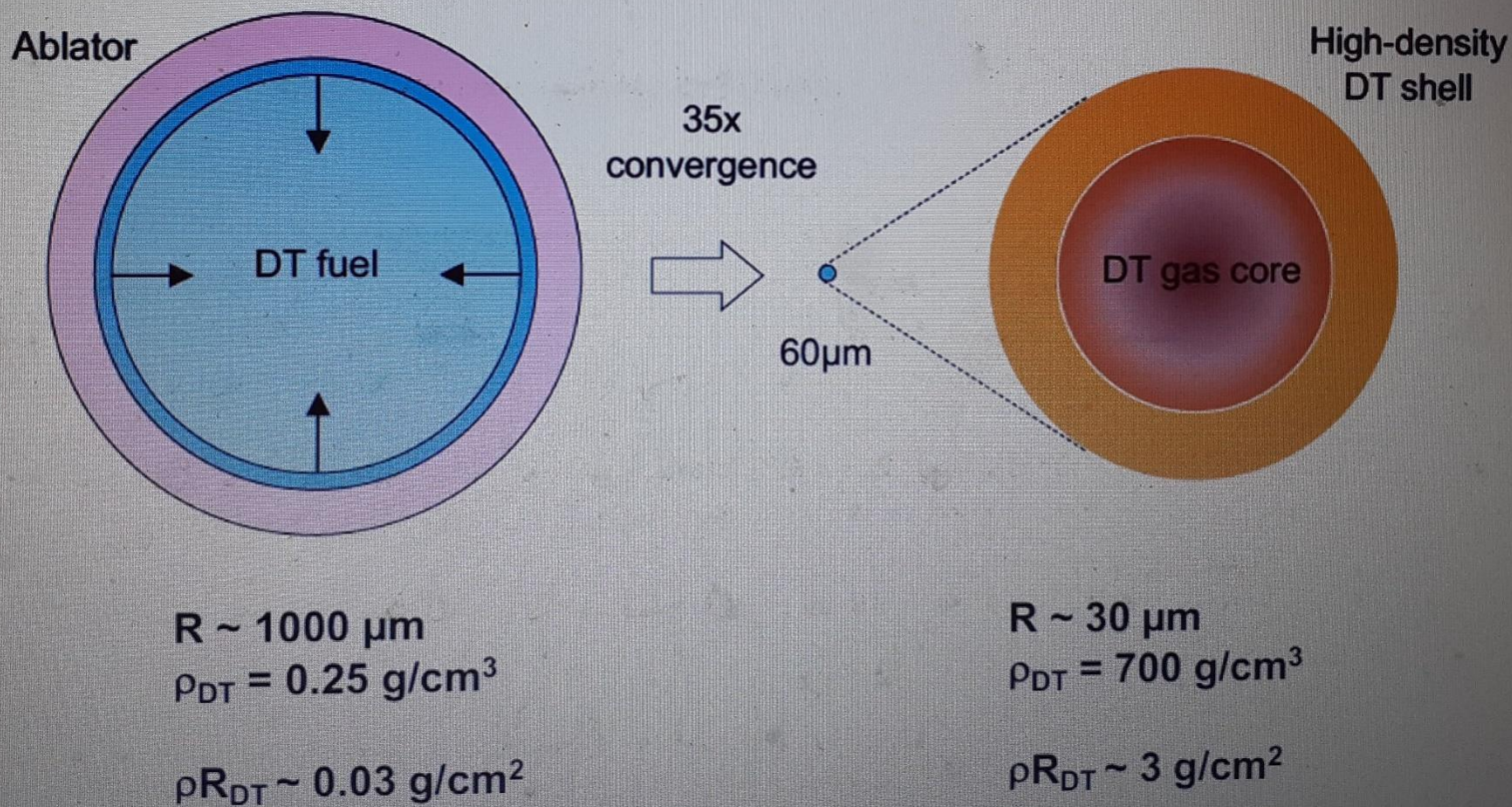
De komprimálva  $400 \text{ g/cm}^3$ -re egy  $r/2$  vastag,  $r$  sugarú gömbhéj már  $5 \text{ mg}$  tömeg esetén adna  $\rho r = 3 \text{ g/cm}^2$ -t. Ez  $6 \times 10^8 \text{ J}$  energiát adna.

5-6 ilyen impulzus másodpercenként 1 GW erőműre jó.

A mikrorobbantásos fúzióhoz erősen összenyomott pellet kell  
(a folyadéksűrűség 1000-szerese).

De a nagy fúziós hatáskeresztmetszethez magas hőmérséklet is kell!

# Fúziós energia szférikus kompresszióval



$$M = \frac{4\pi}{3} \rho_{\text{init}} R_{\text{init}}^3 = \frac{4\pi}{3} \rho_{\text{final}} R_{\text{final}}^3 \rightarrow \frac{\rho_{\text{final}}}{\rho_{\text{init}}} = \left( \frac{R_{\text{init}}}{R_{\text{final}}} \right)^3$$

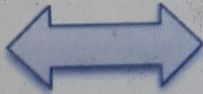
# Az effektív kompresszió izentropikus

From thermodynamics:

$$dU = Tds - PdV$$

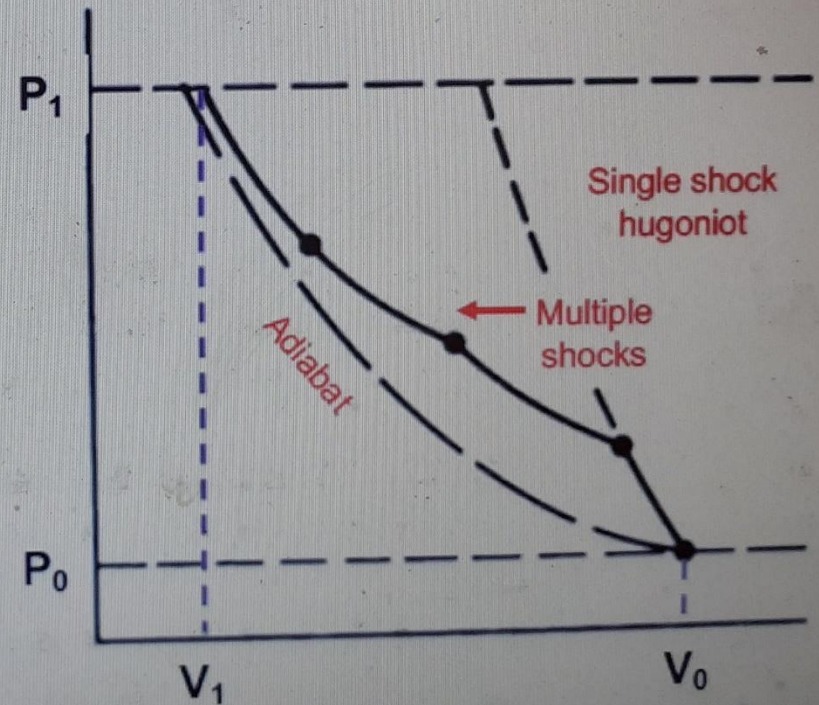
$$PdV = Tds - dU$$

Minimize  
work needed  
to compress



Minimize  
entropy  
generation

P-V Diagram



# Termikus energia és „hot spark ignition”

A fűtéshez a belső energiát legalább 5keV hőmérsékletre kell növelni:

$$\varepsilon_b = 4 \cdot \frac{3}{2} T / (m_D + m_T) \cong 6 \times 10^8 J / g$$

A kompresszióhoz csak  $6.5 \times 10^4 J$  kell, de az 5mg 5keV-re való fűtéséhez  $3 \times 10^6 J$ . Ha a mikrorobbantás hatásfoka pl. 5%-os, akkor ehhez  $6 \times 10^7 J$  meghajtóra van szükség. Ez borzasztó sok, a 33% égési hatásfok esetén csak 10-szeres lenne a hozam.

**Fel kell használni a magreakcióban keletkező  $\alpha$ -részecskék energiáját!**

Mivel  $E_\alpha = 3.5 \text{ MeV}$ , az energia 20%-át ezek viszik el. Ezzel kell fűteni!

A gömb közepén keletkezett  $\alpha$  részecske ütközéseinek száma:

$$N_c = \sigma_c r \rho.$$

Ez ismét a  $\rho r$ -től függ, akkor lesz egy terjedő égési front, ha  $\rho r > 0.3 \text{ g/cm}^2$  (propagating burn).

Azaz:  $\rho r > 0.3 \text{ g/cm}^2$  mellett kell begyújtani, és az  $\alpha$  részecskékkel az összenyomott  $\rho r > 3 \text{ g/cm}^2$  fűtőanyagot  $> 5 \text{ keV}$ -re felfűteni.

Általánosított Lawson kritérium:  $\rho r T_i > (0.3 \text{ g cm}^{-2}) \times (5 \text{ keV})$ .

Másképp:  $p \tau > 30 \text{ atm} \cdot \text{s}$ ,  $p$  a plazma nyomás,  $\tau$  az energia-összetartás.

# Ablációs gyorsítás

A pellet külső részét erősen fűtjük. A felforrósodott anyag lepárolog, a tehetetlenség nyomja össze a gömbhéjat (rakétaelv).

A lepárolgó anyag által kifejtett nyomás az **ablációs nyomás**.

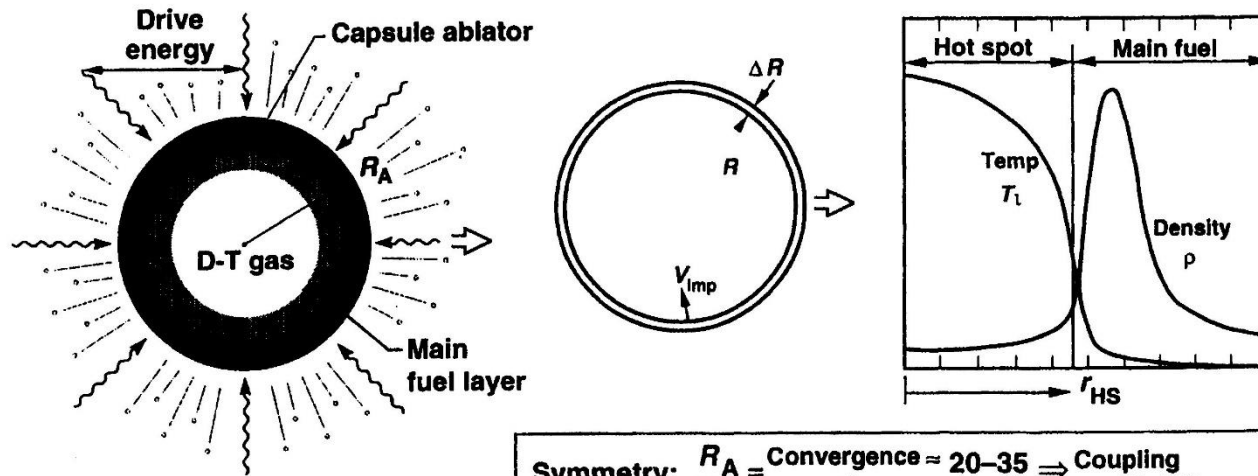
Fűtés lehetséges:

- lézerrel: jó fókusztólalás, homogén gömbszimmetrikus megvilágítás, alacsony konnektor hatásfok (<10%)
- könnyű ionokkal (proton, MeV energia, nagy áram, ezért nagy a tértöltés, rosszul fókusztálható)
- nehéz ionokkal (GeV energia, kis áram, de kevés nyaláb, rossz szimmetria)
- lágý röntgensugárzás (lézerrel, ionokkal vagy kisüléssel keltett)

# Begyújtás forró foltban (hot spark ignition)

Megoldás: Egy központi forró foltban kell begyújtani, ahonnan az égés a körülvevő sűrű fűtőanyagban történik, amelyet az  $\alpha$  részecskék és a hővezetés fűtenek fel. Elég a teljes tömeg 2%-val begyújtani, aminek felfűtéséhez elég  $6 \times 10^4 J$ , azaz a kompresszióval együtt összesen  $1.25 \times 10^5 J$ , ami  $2.5 \times 10^6 J$  meghajtót jelent. Ekkor a hozam  $\sim 200$  lesz.

Ekkora lézer a NIF (USA) és ilyen lesz az LMJ (Franciaország)!



Symmetry:  $\frac{R_A}{r_H} = \text{Convergence ratio} \approx 20-35 \Rightarrow \text{Coupling } \eta \approx 10-15\%$

Driver-target coupling  
 $\Rightarrow I_i \leq 10^{15} \text{ W/cm}^2$  or  $\leq 300 \text{ eV}$   
 To control:

- Absorption/preheat
- X-ray conversion
- Transport/drive

Stability:  $\frac{r}{\Delta R} = \text{In-flight aspect ratio} \approx 25-35 \Rightarrow I_i \geq 4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  or  $250 \text{ eV}$  surface  $< 1000 \text{ \AA}$

Ignition:  $T_i = 10 \text{ keV}$   
 $\rho r_{HS} \sim 0.3 \text{ g/cm} \Rightarrow V_{imp} 3-4 \times 10^7 \text{ cm/s}$  for  $E_{driver} = 1-2 \text{ MJ}$



# A meghajtás rakétaelve

Megmaradási tételek, feltételezve, hogy a kifelé áramlás sebessége a koronában a hangsebesség, az  $m(t)$  tömeg ( $\text{g/cm}^2$ ) gyorsul  $v(t)$  sebességre, azaz az  $m(t)$  a fűtőanyag tömege:

$$m(t) \frac{dv(t)}{dt} = P_a, \quad (\text{feltételezve, hogy } dm/dt \text{ konstans})$$

$$m(t) = m_0 - \int_0^t \left(\frac{dm}{dt}\right) dt = m_0 - \dot{m}t$$

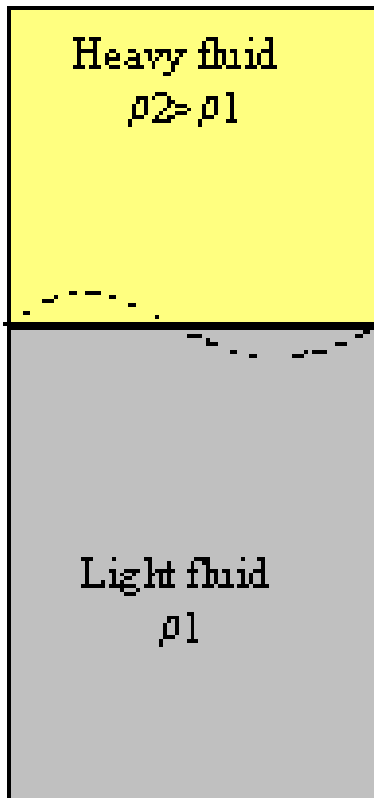
$$\text{AZ } (m_0 - \dot{m}t) \frac{dv}{dt} = P_a$$

egyenletet integrálva kapjuk a rakéta-egyenletet:

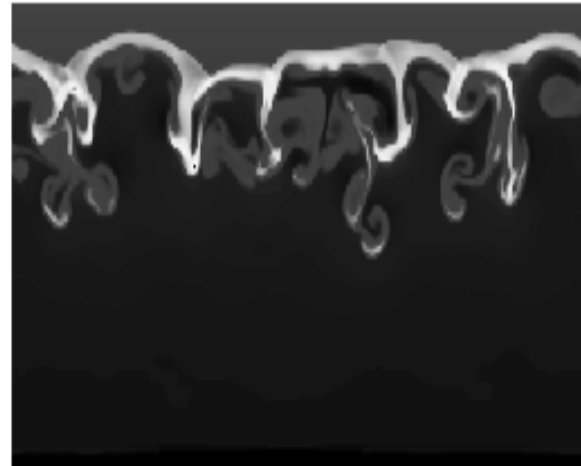
$$v(t) = \frac{P_a}{\dot{m}} \ln \left( \frac{m_0}{m(t)} \right)$$

# A Rayleigh-Taylor instabilitás

Ha nehezebb folyadékot helyezünk könnyebb folyadékra, a helycsere nem simán megy.  
Ha lézerrel vagy sugárzással gyorsítunk, ugyanez lesz.



2.5in



# A NIF lézer (192 nyaláb 1.9 MJ) helye

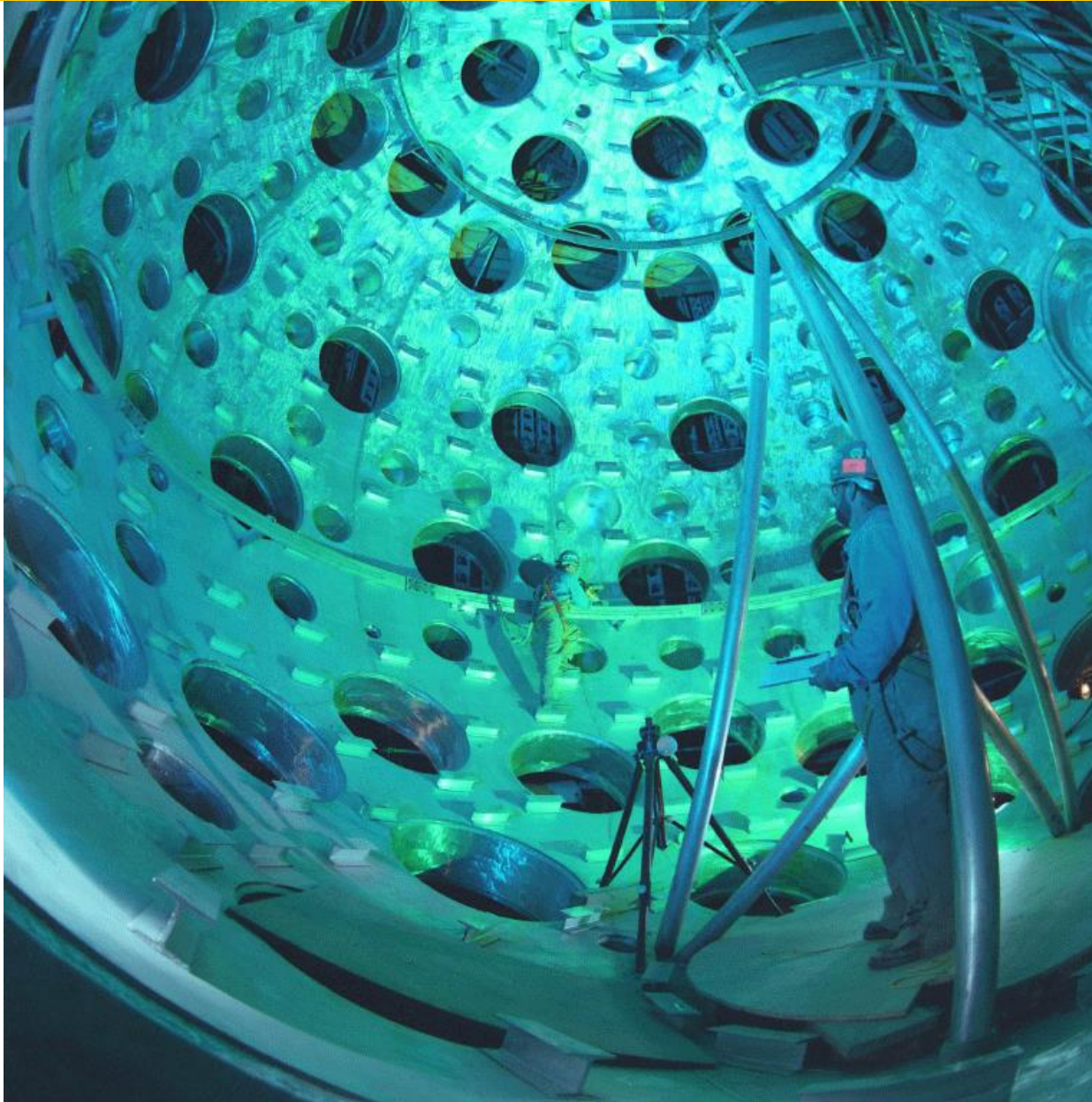
Paraméterek: 1.8MJ, 500TW, 20ns Nd-üveg lézer 3. harmonikusa a  $0.35\mu\text{m}$  hullámhosszon.



# Nd-üveg lézer

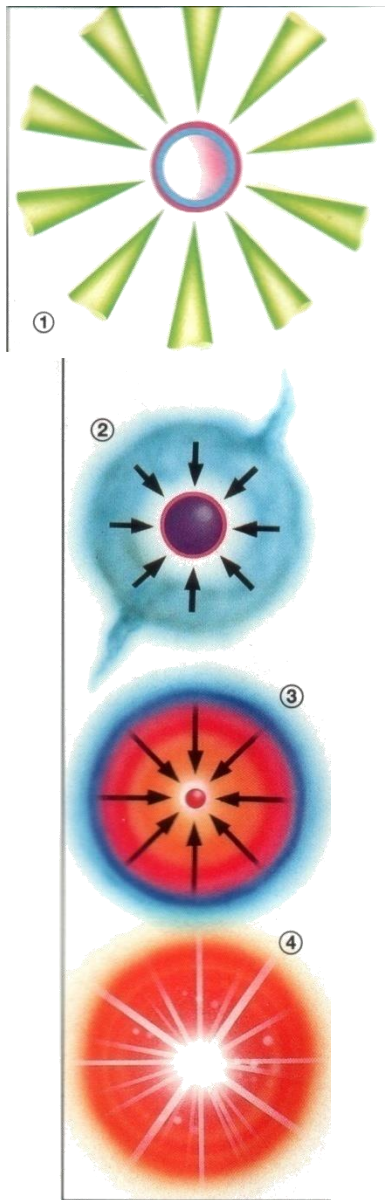


# NIF kamra

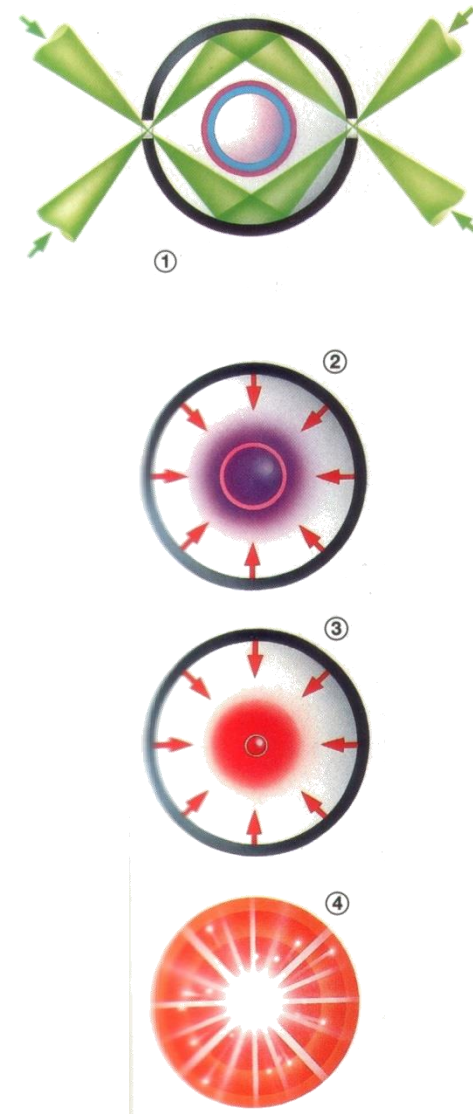


# Fúziós elrendezések

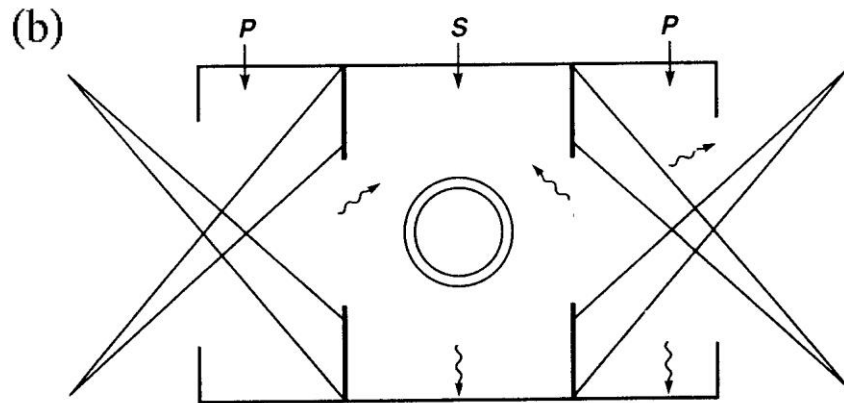
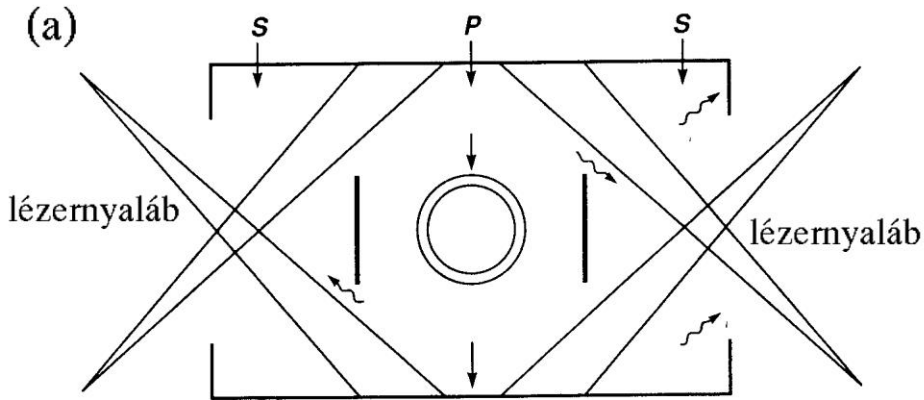
Direkt  
összenyomás  
lézerrel



Indirekt  
összenyomás  
röntgennel



# Elrendezések indirekt összenyomáshoz



LLNL, LMJ

Az indirekt összenyomás inkoherens röntgensugárzással történik, ezért a parametrikus instabilitásokat kiküszöböli.

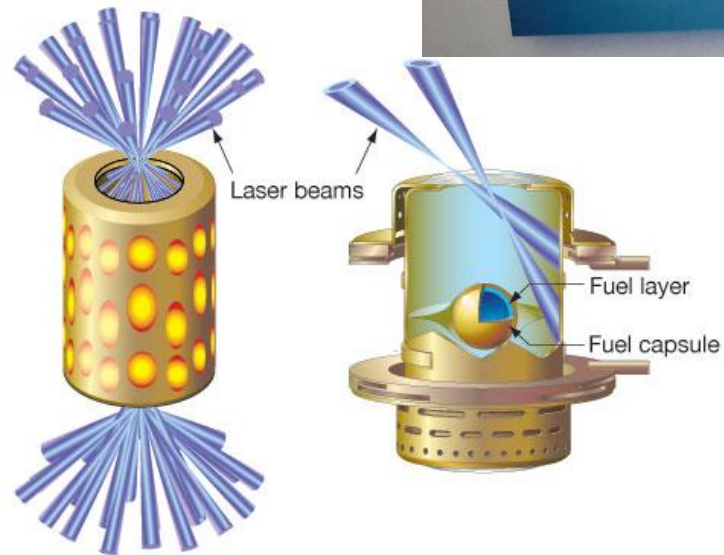
a röntgensugárzás az üregben elhelyezett kapszulát szimmetrikusan világítja meg.

Lézerfúzió=Nyalábfúzió

De: forró folt szükséges

RT nem teljesen kiküszöbölt,  
üregfal-effektusok

# NIF Hohltraum

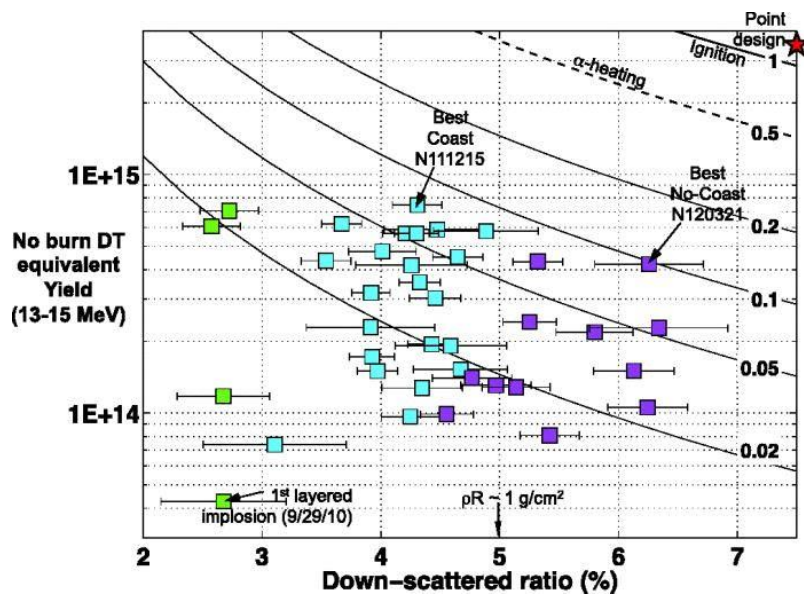
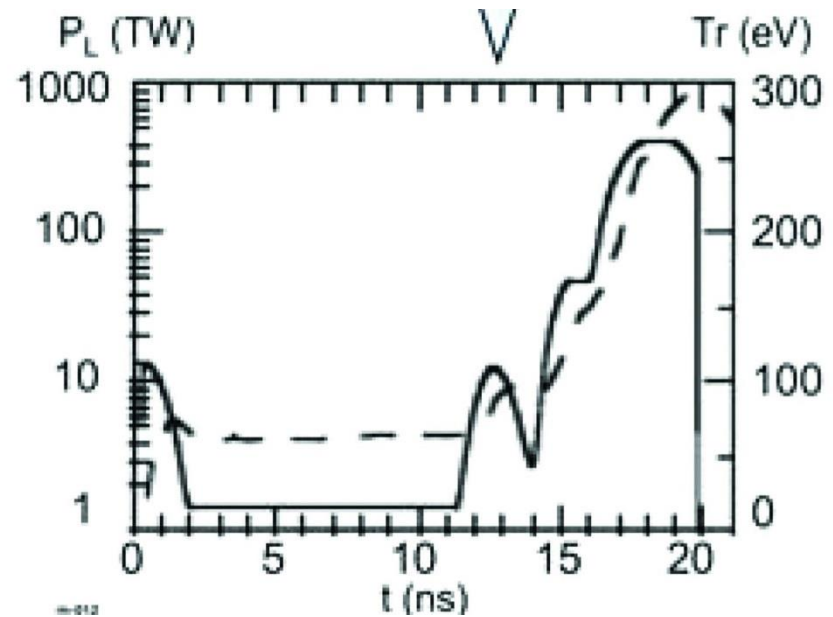
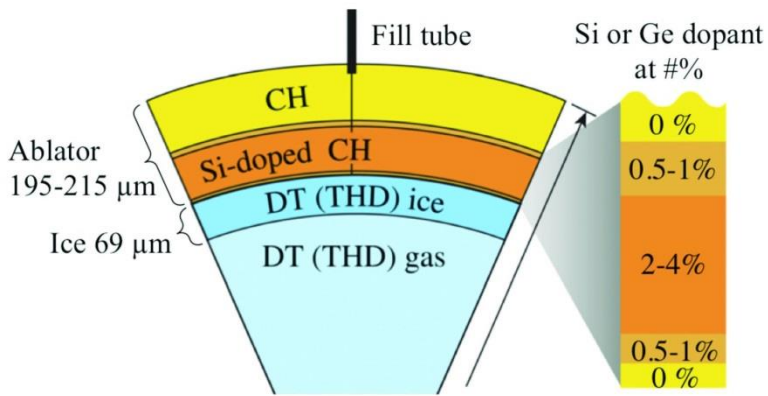


A falról és a pelletről lepárolgó anyag kitöltené az üreget, ezért megtöltik kis nyomású He gázzal. Belépő nyíláson fólia-ablak.

Várakozás: 2011-ben: >30-szoros hozam.



# 2010-2012: Sikertelen kísérletek



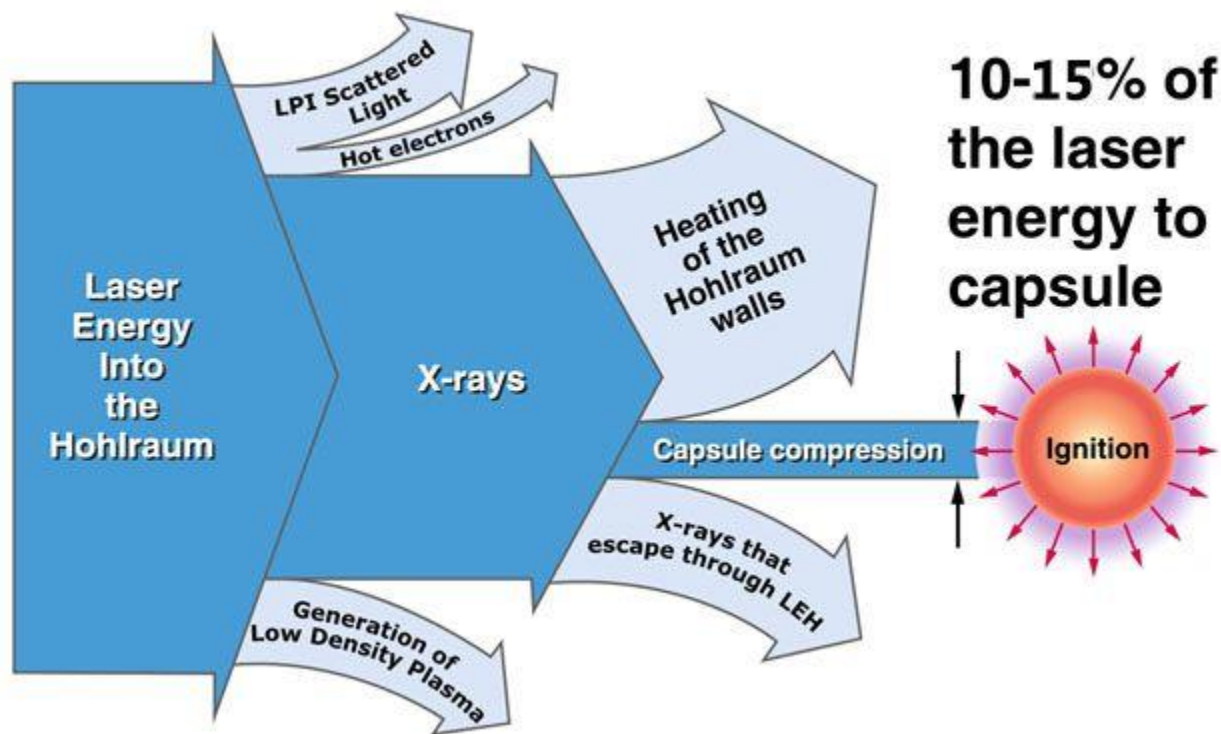
Nem gyújtott be: Az impulzus 4. csúcsa által keltett 4. lökéshullám kicsit lassabb volt a szimulációkbelinél.

Viszont a begyújtáshoz szükséges energia:

$E \sim v^{-6}$ , ezért az energia nem volt elég.

A lassulás oka: Rayleigh-Taylor instabilitás

# Egy objektív nehézség: Az indirekt összenyomás alacsony hatásfoka



Áttörés 2021-ben: 2021.08.08

Initial results from the HYBRID-E DT experiment  
N210808 with  $> 1.3$  MJ yield


IFSA 2021

A. Kritcher for the HYBRID-E and larger ICF team

September, 2021

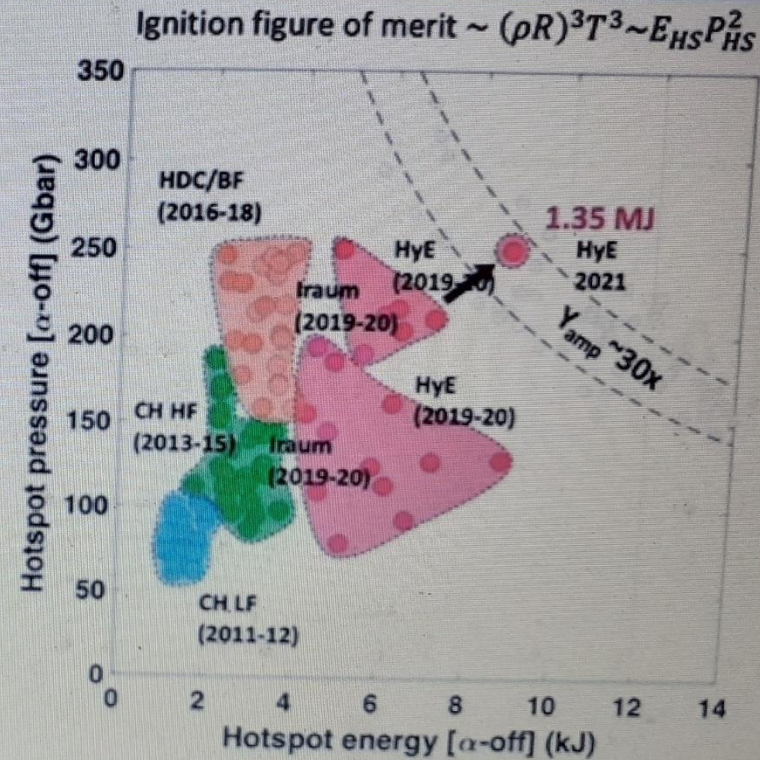
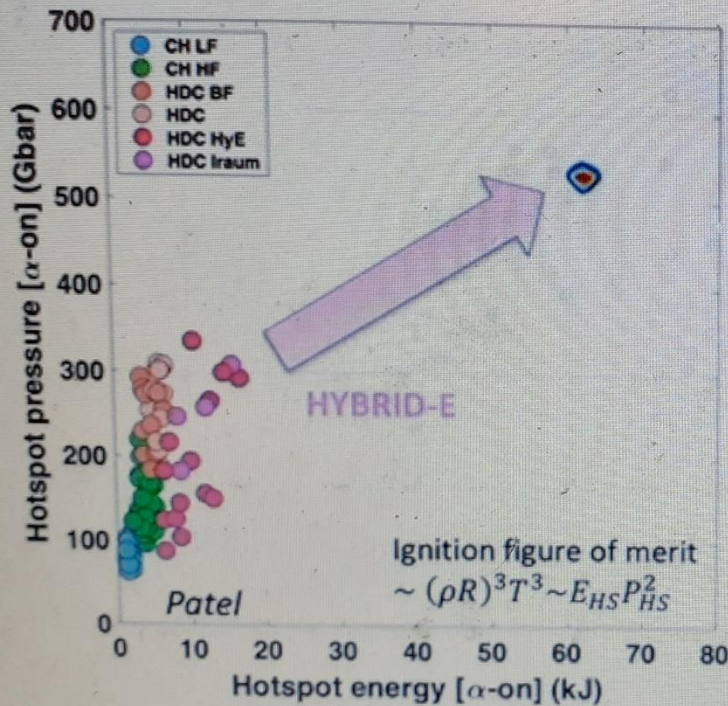
LLNL-PRES-826367

This work was performed under the auspices of the U.S. Department of Energy by Lawrence Livermore National Laboratory under contract DE-AC52-07NA27344. Lawrence Livermore National Security, LLC

 Lawrence Livermore  
National Laboratory

# A begyűjtás körül az $\alpha$ -fűtés nagy változást okoz

At the threshold of ignition, small changes in “no-alpha” space can lead to large changes in real “alpha-on” space



Much higher pressure and energy with small changes to input conditions indicates new regime