

A lézerfúzióhoz nem vezet királyi út

Földes István

Wigner Fizikai Kutatóközpont
Részecske- és Magfizikai Intézet

Az előadás anyagának nagy része megtalálható a

<http://www.rmki.kfki.hu/~foldes/index.html>

honlapon

A fúziós energiatermelés

Előnyök és hátrányok

Nincs spontán reakció

Coulomb-ütközések valószínűsége sok nagyságrenddel nagyobb, mint a magreakcióé.

Jelentős kezdeti energiabefektetés kell.

Nincs láncreakció (reakciótermékek nem vesznek részt a reakcióban)

Nincsenek hosszú felezési idejű nukleáris hulladékok

Kezdetek: 50-es évek

1960: lézer (Maiman)

John Nuckolls, Ray Kidder (Teller)

Magfúziós reakciók

- A szóhajövő magfizikai folyamatok jól ismertek gyorsítóval végzett kísérletekből:

- **D-T reakció:**



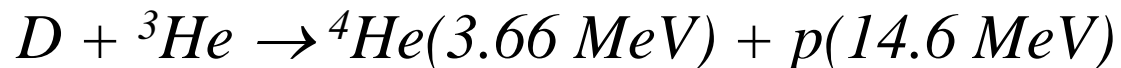
- D-D n reakció:



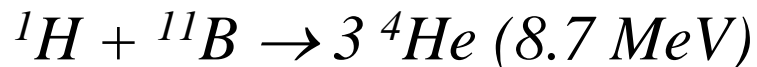
- D-D p reakció:



- 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

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

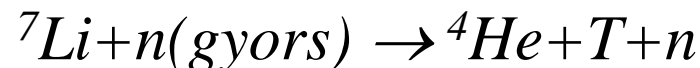
σ a hatáskeresztmetszet, v a sebesség.

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

10 keV \approx 10^8 Kelvin hőmérsékleten kell összetartani.

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

T előállítható Li-ból fúziós neutronokkal:



Zárt ciklus, minimális trícium mennyiség. Rövid bomlásidejű termékek.

Mikrorobbantásos fúzió

- Alapvetően két fő eljárás van (mágneses és mikrorobbantásos), mindkettővel az ún. Lawson-kritériumot kell teljesíteni ($n\tau > 10^{20} sm^{-3}$)

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 röntgensugárzás. A külső héj lerobbantásával (abláció) a rakéta-effektus, azaz a tehetetlenség nyomja össze. Rövid idő, nagy sűrűség.

Itt a lézerfúziót tárgyaljuk.

Ahhoz, hogy reaktort építsünk, a fűtőanyagot magas hatásfokkal kell elégetni.

A fúziós hatásfok: ha már sikerült felfűteni

- Tegyük fel, hogy elég sűrű és forró a gömb, és a termikus c_s hangsebességgel tágul!
- n : időegység alatti termonukleáris reakciók száma, $c_s \sim \sqrt{T}$.

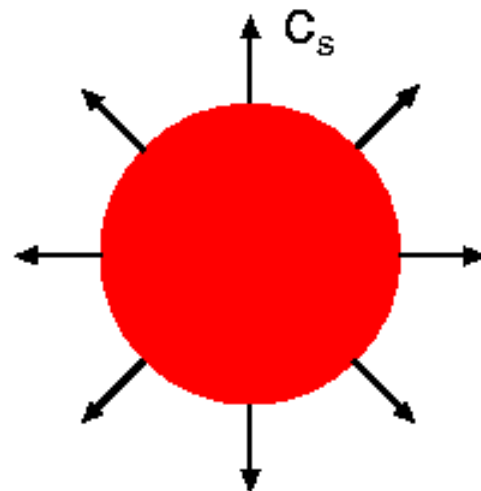
Maxwell-eloszlásra átlagolva:

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

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

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.: τ 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

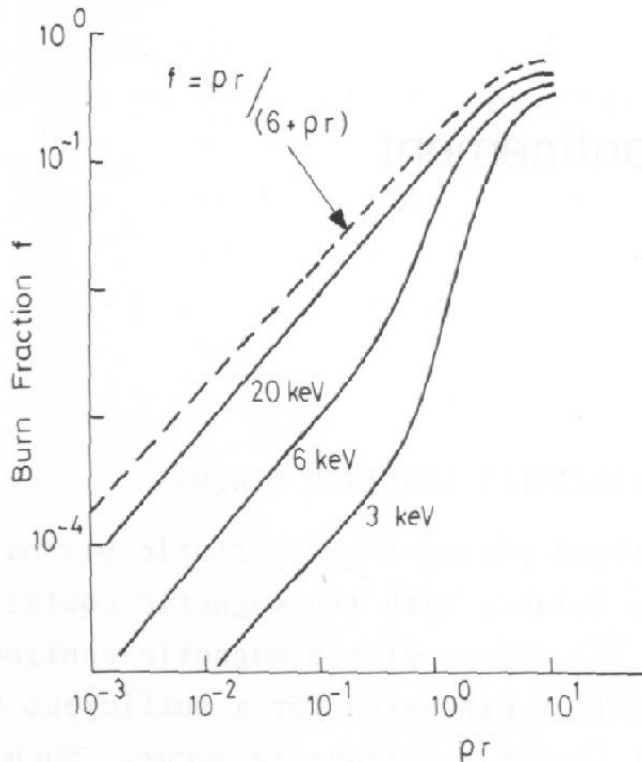
$$\tau \approx \frac{r}{3c_s},$$

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

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

$$\phi = \frac{\rho r}{\rho r + 6(g/cm^2)}$$

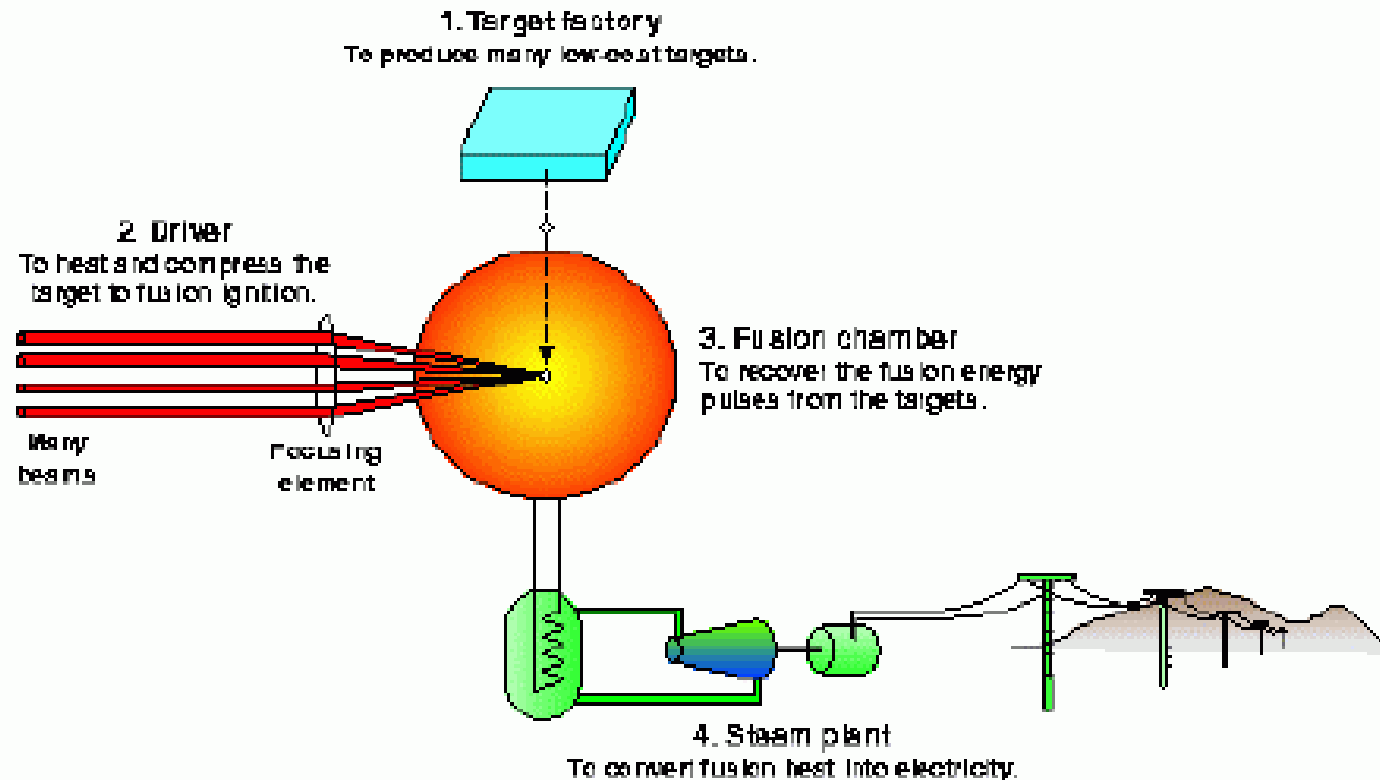
Lawson kritérium.



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

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

Mekkora hozam kell? Milyen energianyereség ?



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 ρr -hez $1/\rho^2$ -tel skálázódik.

Folyadéksűrűség: 0.21 g/cm^3 ,

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

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

Összenyomás nélküli fúzió végbemegy a hidrogénbombában.

De komprimálva 400 g/cm^3 -re egy $r/2$ vastag, r sugarú gömbhéj már 5 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!

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 keletkező α -részecskék energiáját!

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

A gömb közepén keletkezett α részecske ütközéseinek száma:

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

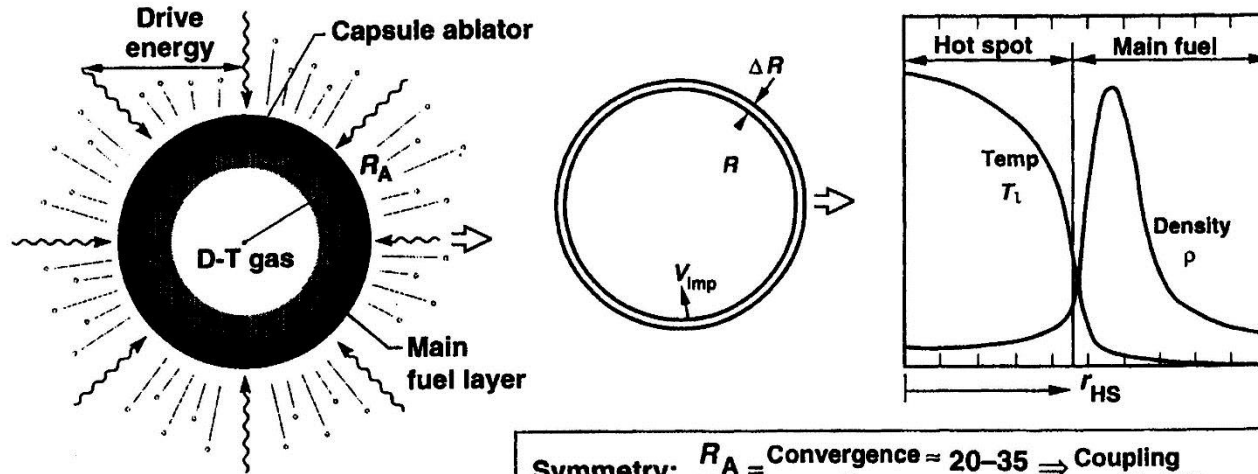
Ez ismét a ρr -től függ,
akkor lesz egy terjedő égési front, ha $\rho r > 0.3 \text{ g/cm}^2$
(propagating burn).

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

Begyújtás forró foltban (hot spark ignition)

Megoldás: Egy központi forró foltban való begyújtás, ahonnan az égés a körülvevő sűrű fűtőanyagban történik, amelyet az α 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 ~ 200 lesz.

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



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

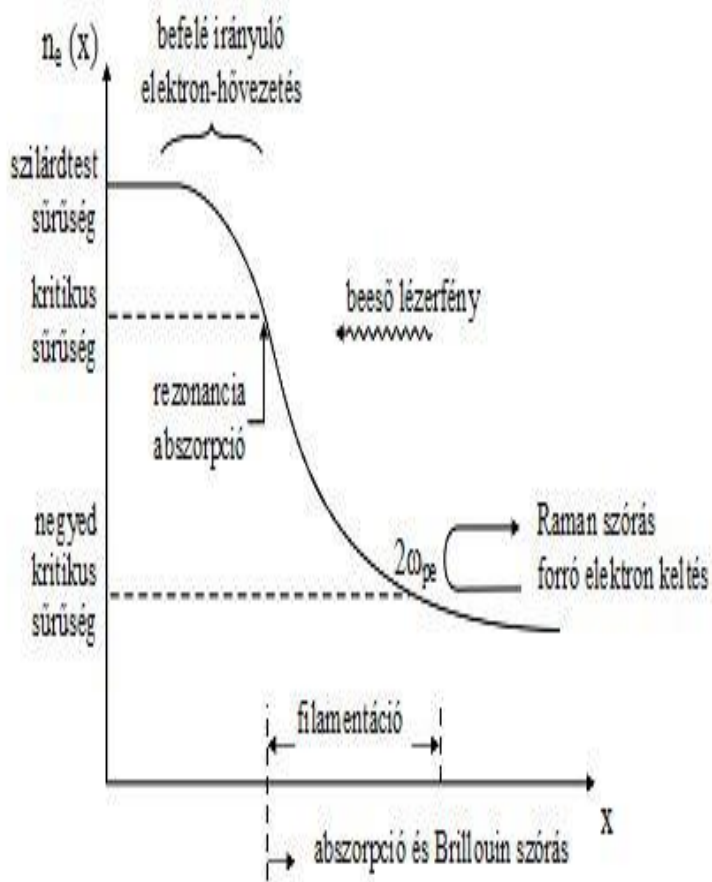
Driver-target coupling
 $\Rightarrow I_i \leq 10^{15} \text{ W/cm}^2$ or $\leq 300 \text{ eV}$
 To control:

- 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 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 lézerfény nem hatol be a sűrű plazmába



Valódi lézerplazma kölcsönhatásokkor a sűrűségprofil valahogy így néz ki. Adott hullámhosszú lézerre:

$$n = \sqrt{1 - \frac{n_e}{n_c}}$$

$$n_c = 1.1 \cdot 10^{21} \left(\frac{1 \mu\text{m}}{\lambda} \right)^2 \text{cm}^{-3}.$$

Lézerrel nem lehet „bulk matter”, azaz szilárdtestet felfűteni, a fény a koronában elnyelődik. A fűtés hővezetéssel és lökéshullámmal történik. A nem közvetlenül fűtött anyagot az ablációs nyomás gyorsítja.

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**.

Ha nem kívánjuk összenyomni, csak felfűteni a targetet, a magas hőmérséklet eléréséhez olyan intenzitással kell meglőni, ami mindenképpen plazmát kelt. Ezért a target belsejébe nem jut be az elektromágneses tér. A térfogati szennyezéseket, microdotot, nanogömböt stb csak a hővezetés, illetve lökéshullám fűtheti fel.

A 80-as évek első feléig próbálkoztak rövid impulzusú, pikoszekundumos lézeres fűtéssel, de nem működött, csak forró elektronokat keltett.

A meghajtás rakétaelve

Megmaradási tételek, feltételezve, hogy a kifelé áramlás sebessége a koronában a hangsebesség, az $m(t)$ tömeg (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:

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

Stabilitás

Paraméterek: **aspect ratio** a kezdeti $R/\Delta R \approx 25-35$

konvergencia-arány kezdeti/komprimált sugár $C_r \approx 30-40$

tipikus sebesség: $3-4 \times 10^7 \text{ cm/s}$

kezdeti g gyorsulás δg perturbációja a robbanáskor a gömbszimmetriától való eltérést okoz:

$$\delta R = \frac{1}{2} \delta g t^2 = \frac{\delta g}{g} r (C_r - 1)$$

Ez legyen kisebb a végső r sugár negyedénél, különben a Rayleigh-Taylor instabilitás elrontja a szimmetriát!

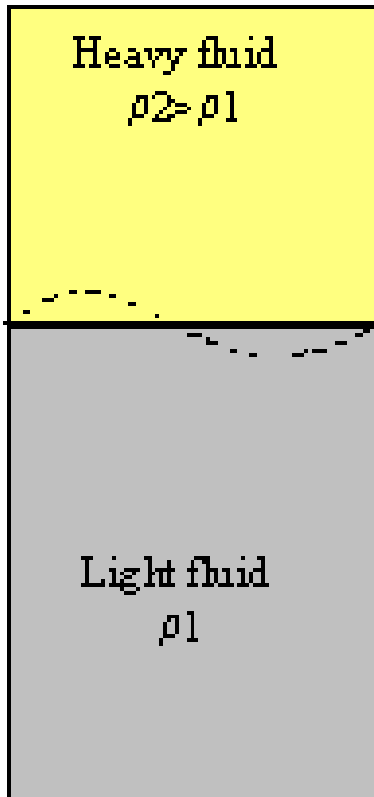
Ha a könnyű folyadékra nehezet rakunk, akkor az RT instabil.

Ez van a nyomás alatt gyorsuló felület esetén is.

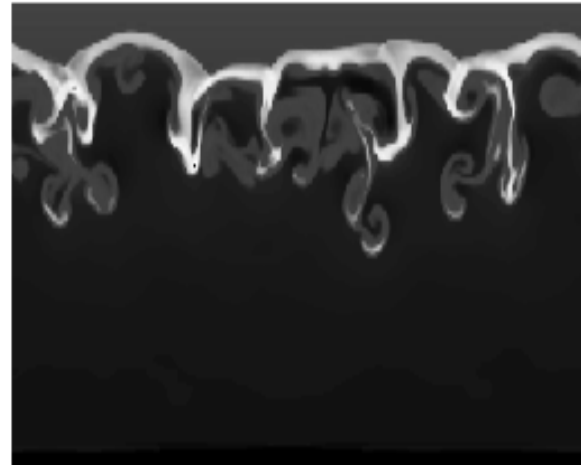
$\frac{\delta g}{g} \approx \frac{\delta v}{v} < \frac{1}{4(C_r - 1)}$ Gyorsulás és szimmetria 1%-nál homogénebb kell legyen a teljes idő alatt.

A Rayleigh-Taylor instabilitás

Ha nehezebb folyadékot helyezünk könnyebb folyadékra, a helycsere nem simán megy. Ha lézerrel vagy sugárzással gyorsítunk, ugyanez lesz. A Rayleigh-Taylor instabilitás megnehezíti a fúziós kapszula szimmetrikus összenyomását.

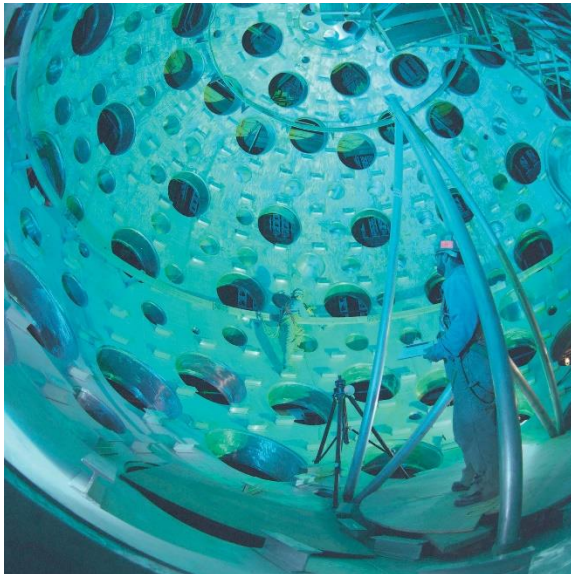
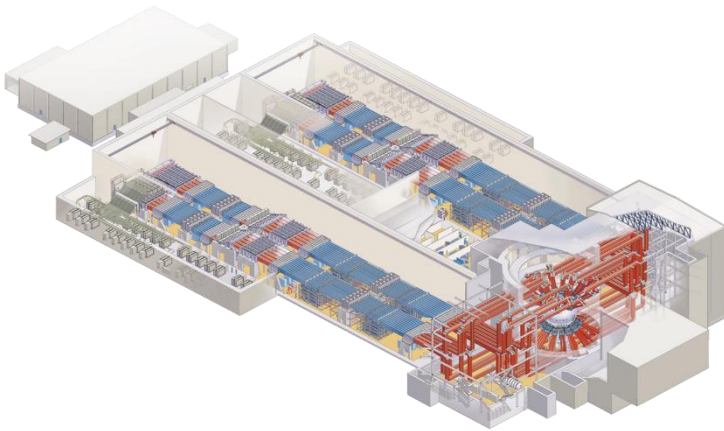


2.5in



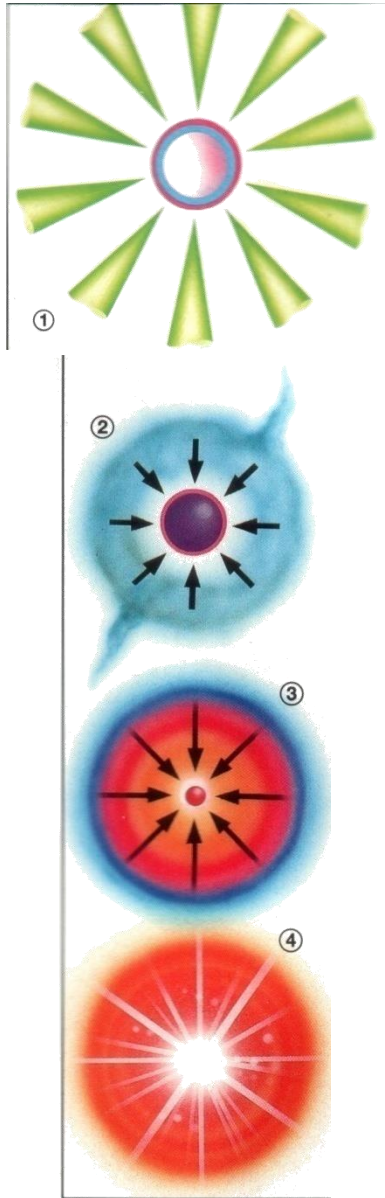
A NIF lézer (192 nyaláb 1.8 MJ)

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

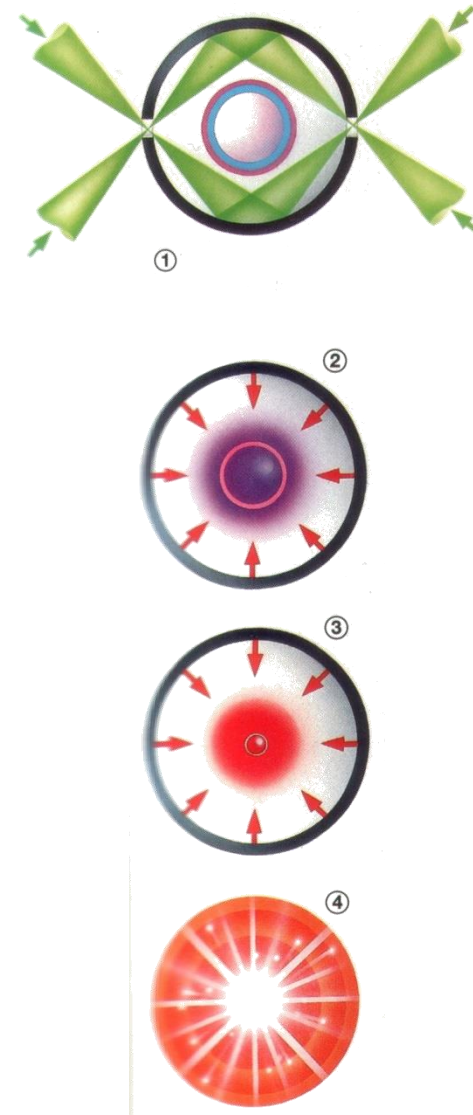


Fúziós elrendezések

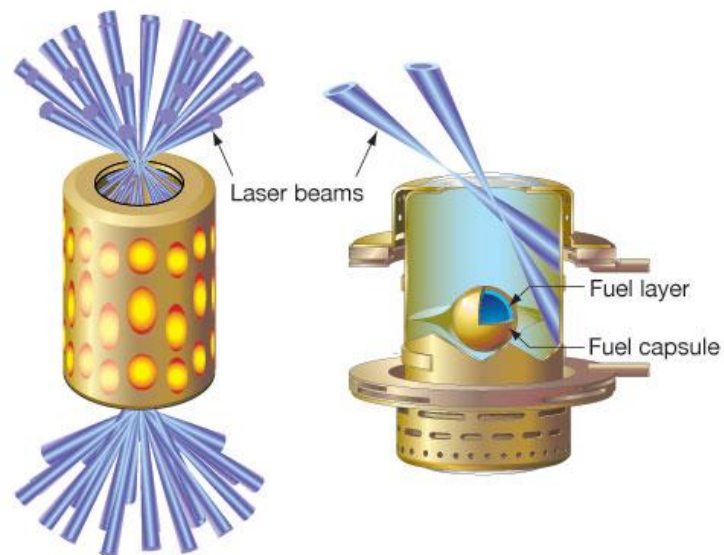
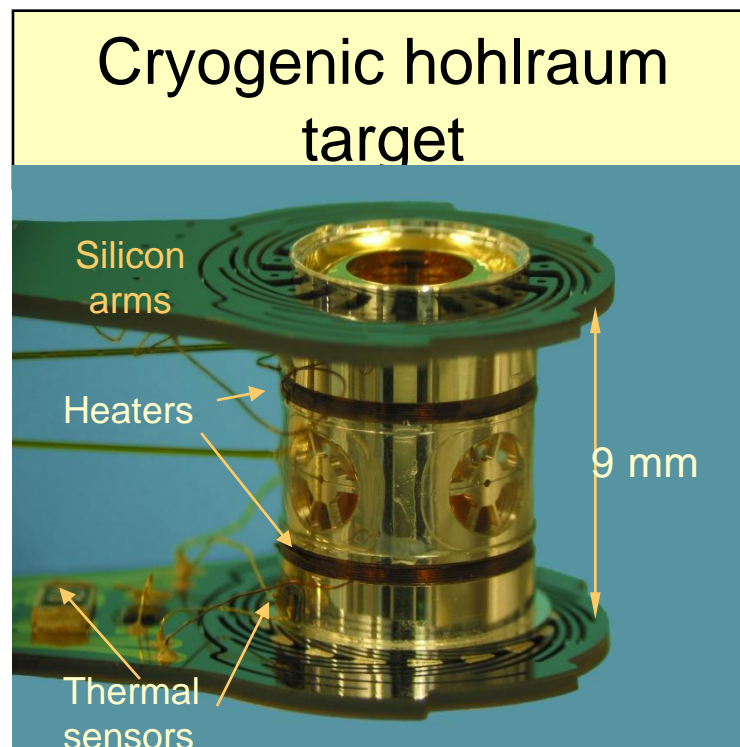
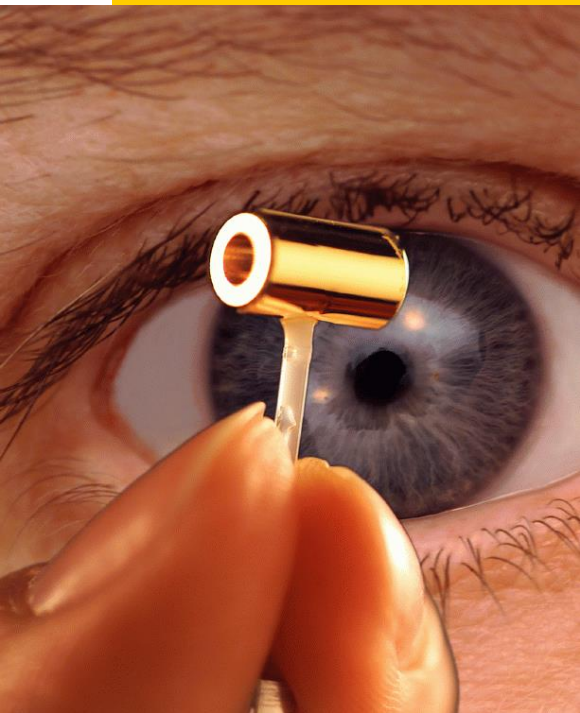
Direkt
összenyomás
lézerrel



Indirekt
összenyomás
röntgennel



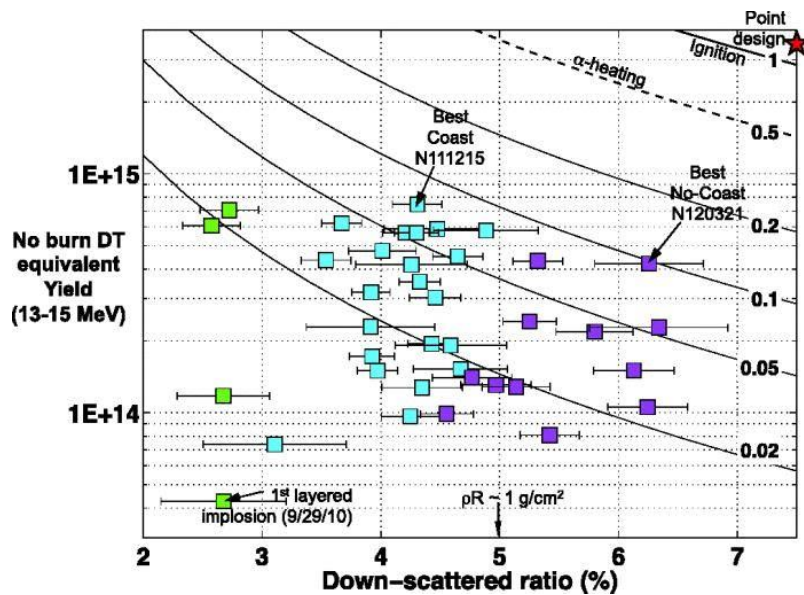
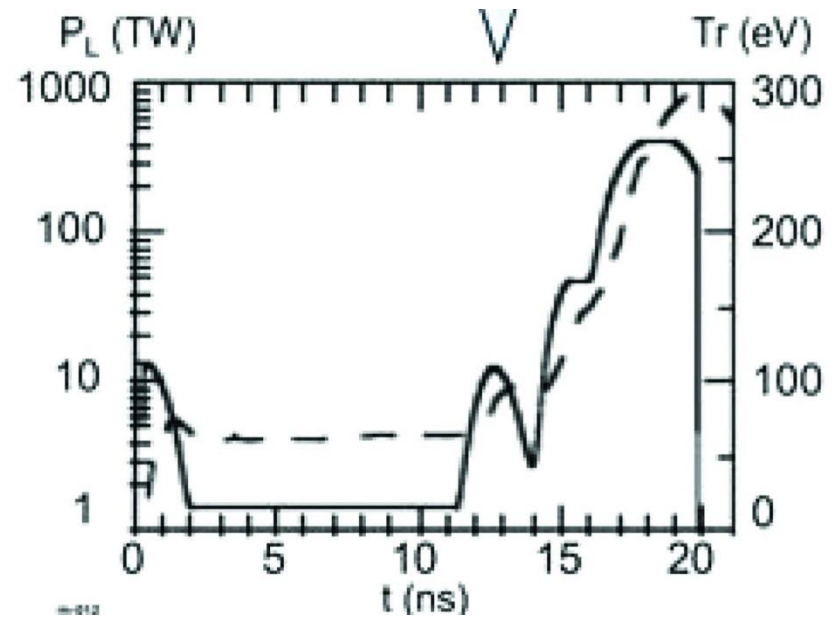
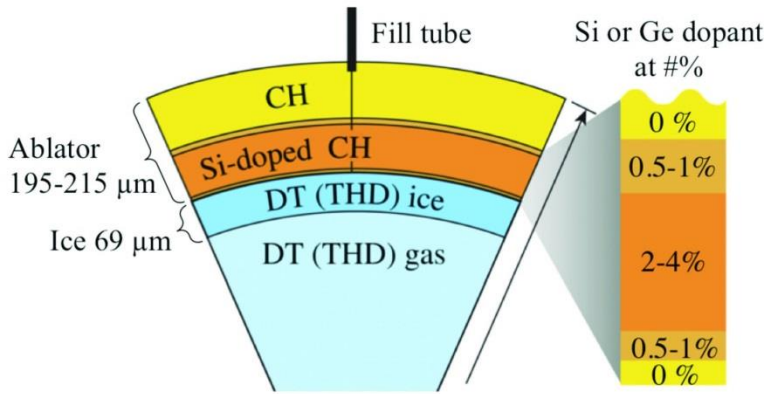
NIF Hohltraum



A falról és a pelletől 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

A kis sebességgel összenyomott targetek jobb minőségűek, kedvezőbbek (kis RT növekedés, nagy hozam, ha begyullad). De ezeket nehéz a standard „hot-spark” módszerrel begyújtani.

- kis sebesség = nagy hozam G

$$G = \frac{73.4}{I_{15}^{0.25}} \left(\frac{3 \times 10^7}{V_i \text{ (cm/s)}} \right)^{1.25} \left(\frac{\theta}{0.2} \right) \quad \theta = \frac{1}{1 + 7 / \rho r}$$

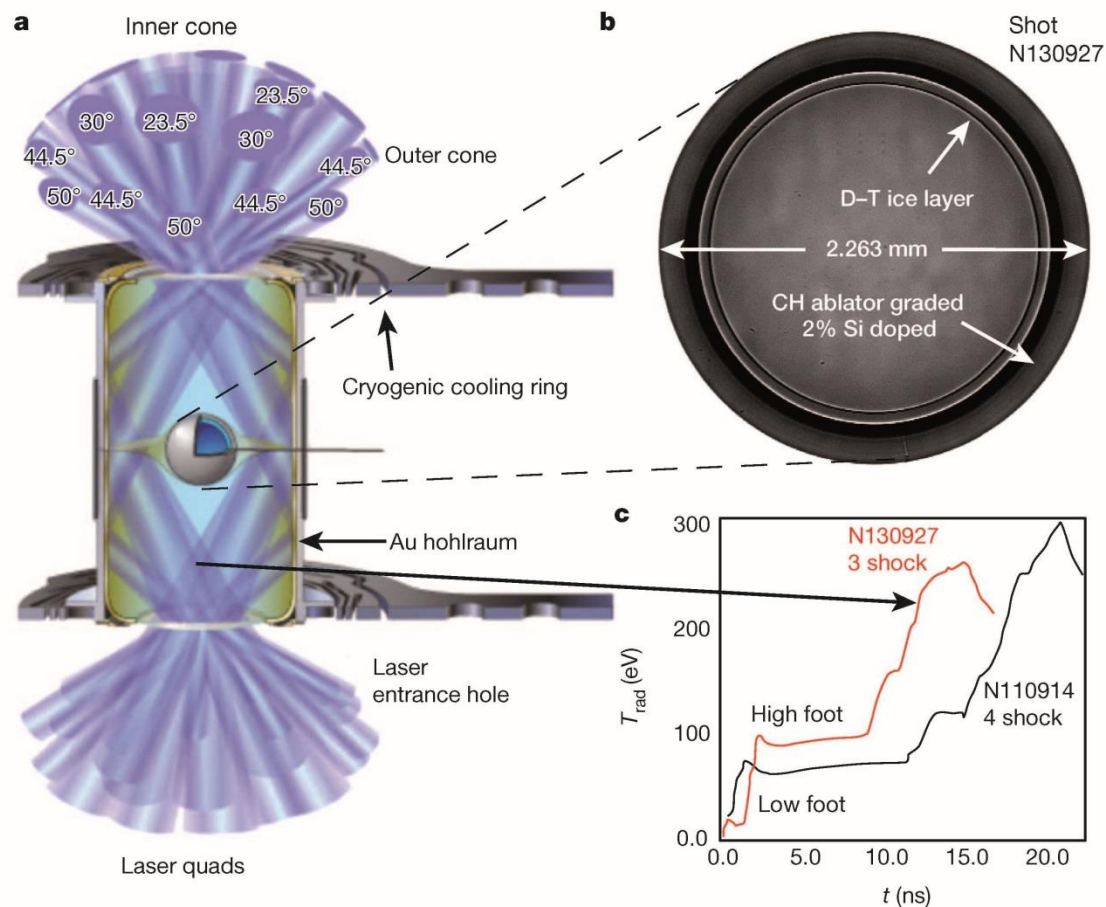
- kis sebesség = kis RT növekedés. $N_e = \text{RT e-szereződéseinek száma.}$

$$N_e(kd = 1) \approx \frac{V_i}{3 \times 10^7} \left[\frac{6.7}{I_{15}^{2/15} \alpha_{if}^{0.3}} \left(\frac{\lambda_L}{0.35} \right)^{2/15} - \frac{0.5}{I_{15}^{1/3}} \left(\frac{0.35}{\lambda_L} \right)^{2/3} \right]$$

- De, ha kis sebesség = sok energia a begyújtáshoz. E_{ign} a begyújtáshoz szükséges energia.

$$E_{ign} \approx \alpha_{if}^{1.8} V_i^{-6} P^{-0.8}$$

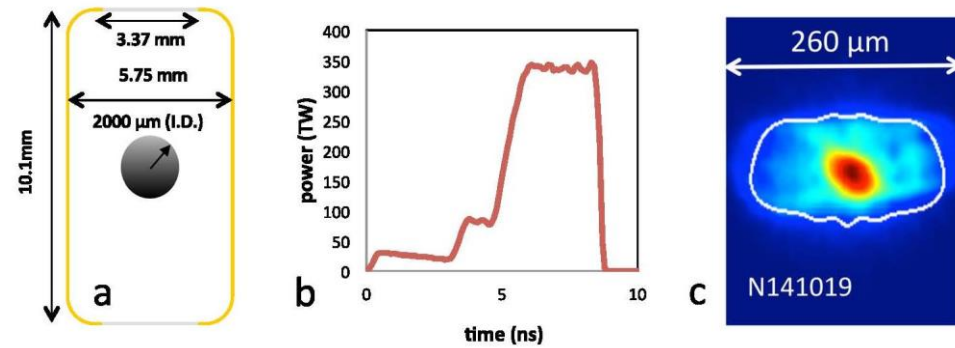
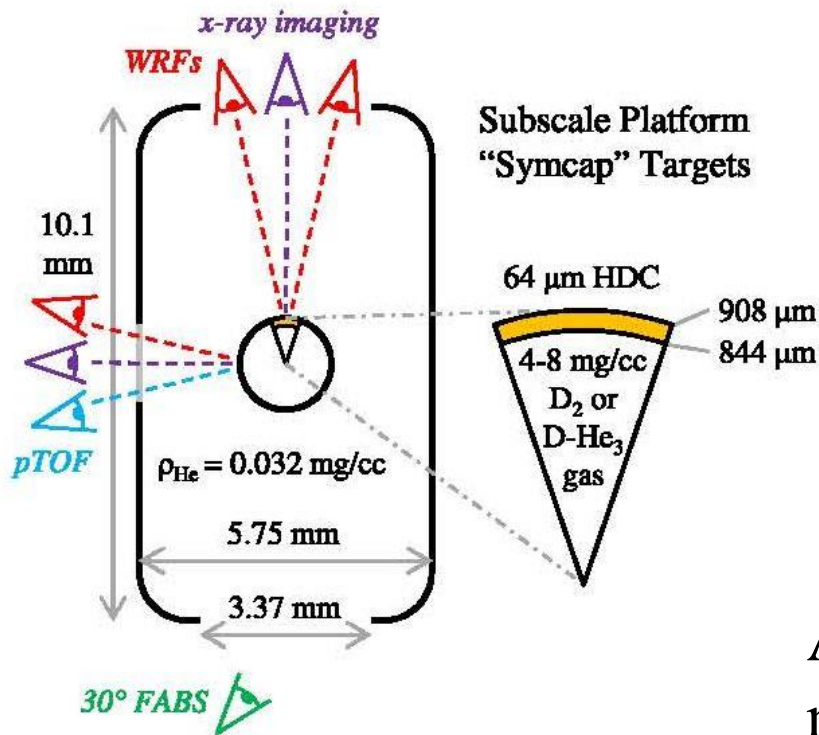
Hurrikán Livermore-ban 2014: egy lépés előre



A Hurricane kísérlet: 4 helyett 3 lökés hullám „high foot”. Több fúziós energia, mint kinetikus.
„Elméleti breakeven”: ~25 kJ fúzió. (2014)

Lassú fejlesztés

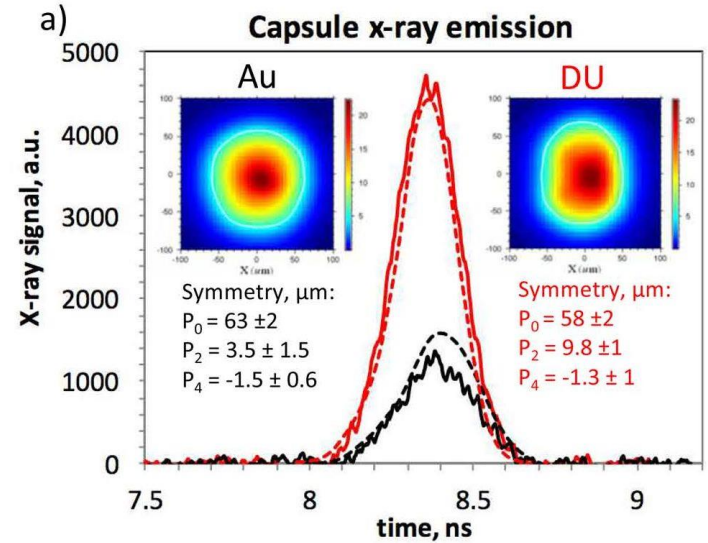
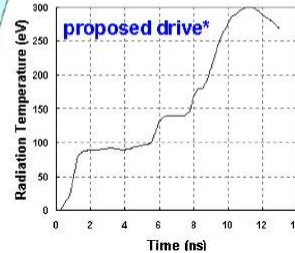
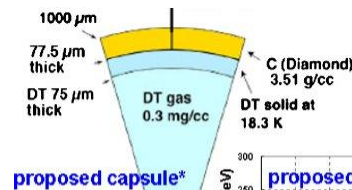
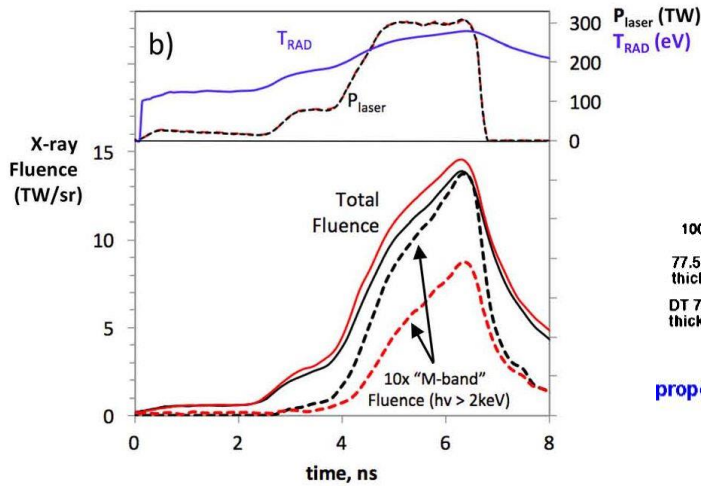
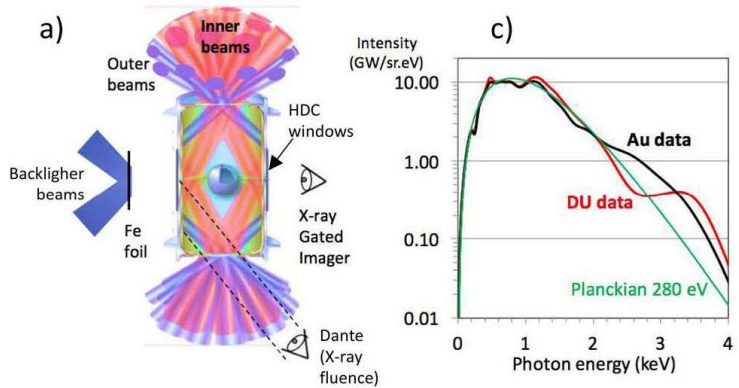
1. Lépés CH helyett gyémánt ablátor: Kevésbé ablálódik, üreg nem telítődik.
Rövidebb (9ns) impulzus, közel vákuum, kisebb üreg: $0.032 \text{ mg/cm}^3 \text{ He}$.
Turnbull, Le Pape 2016



Au-val megtelik, ezért a robbanás nem egészen gömbszimmetrikus

Lassú fejlesztés

2. Üregfal bevonata szegényített (U_{235} -ben) urán 7 μm 23 μm aranyon.
Nincs Au M-héj sugárzás (kapszula előfűtés), effektívebb összenyomás

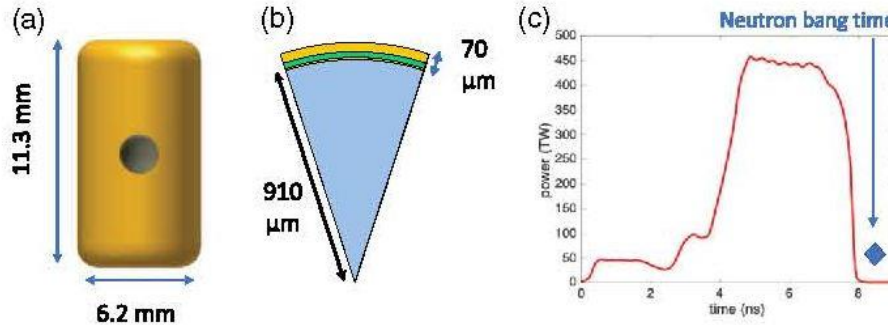


b)

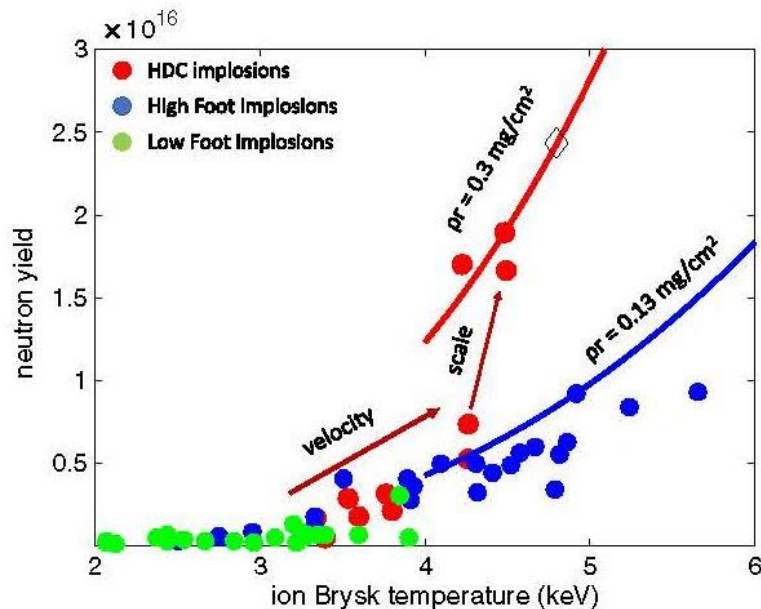
Data	Bang time, ns ± 0.02	Burn width, ps ± 20	T_{ion} , keV ± 0.1	DD-Yield $\pm 0.02 \text{ e}13$
Au	8.39	270	2.7	0.51
DU	8.36	238	3.14	1.01

Kétszeres fúziós hozam

Fúziós kísérlet (Le Pape 2018) alacsony nyomású héliummal töltött üregben:
 $E(\text{fúzió})=54 \text{ kJ} > 2 \cdot E(\text{kinetikus})=42 \text{ kJ}$.



1.7 MJ lézer
70 μm HDC kapszula,
30 μm 0.3% W árnyékolás
kemény röntgenre.
0.3 mg/cm^3 He töltés: nagyságrenddel
kisebb, mint Hurricane és korábban.

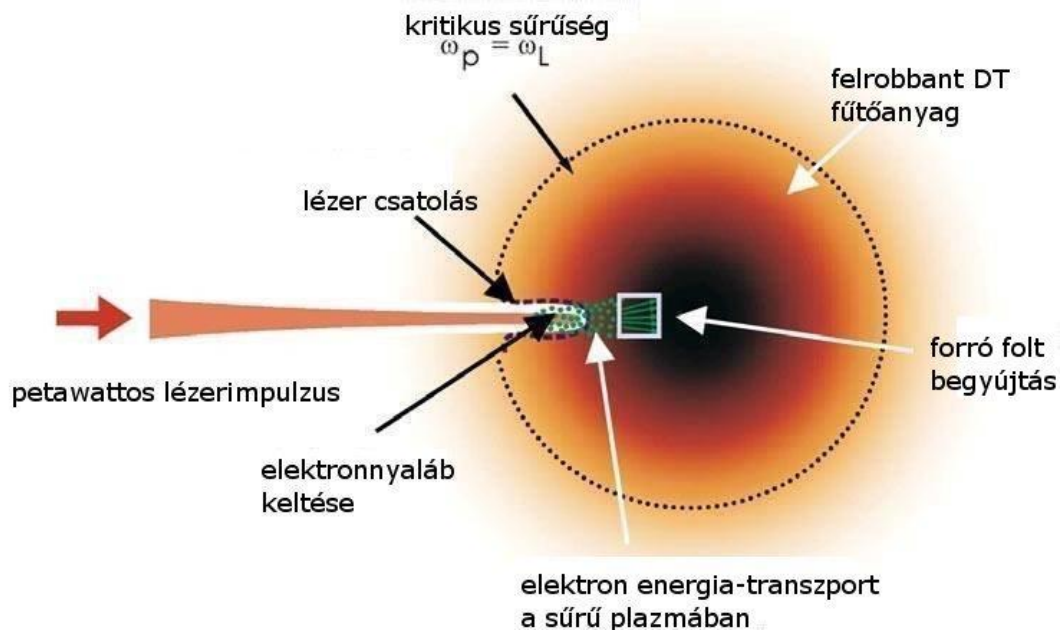


Az ionhőmérséklet növelésével nő a hozam.
Az ionhőmérsékletet a robbanás sebességének
növelésével lehet növelni.

Remény:
150 kJ fúziós energia esetén önfenntartóvá válik-
Nagyobb lézereenergia: 1.9 MJ \rightarrow 2.15 MJ

A központi szikra alternatívája: A gyors begyújtás

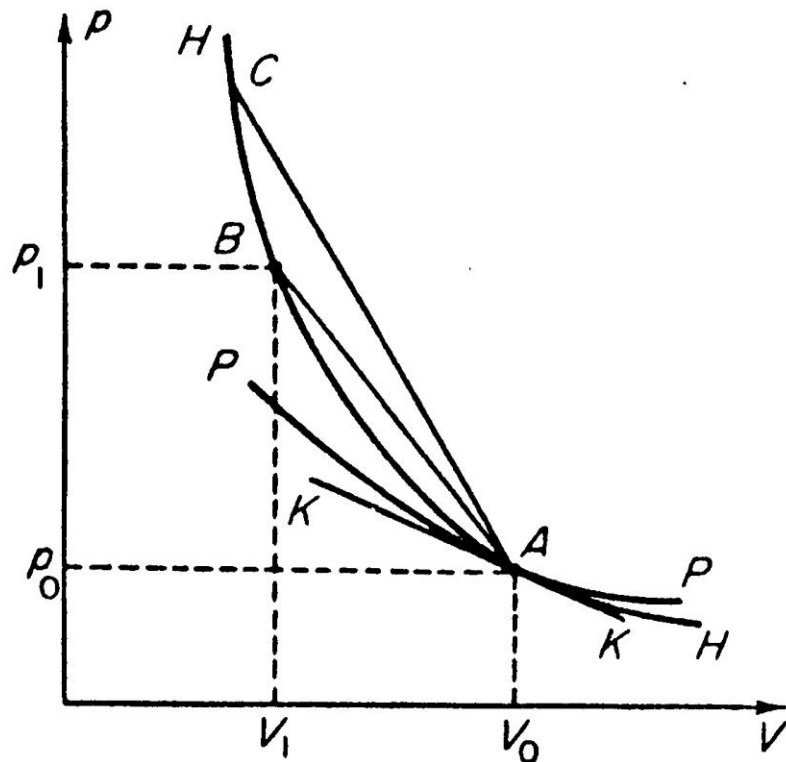
Tabak et al., 1994.: A csörpölt impulzusok erősítésével kapott lézertimpulzusok nagy, 10^{18} - 10^{21} W/cm² teljesítményei felhasználhatók a fúzió külső begyújtásához gyors, MeV energiájú részecskékkel. A gyors begyújtás direkt összenyomást, azaz lézeres fűtést követel, ilyen terv volt a (jegelt), békés HiPER lézer az ESFRI-ben.



Tipikus paraméterek:

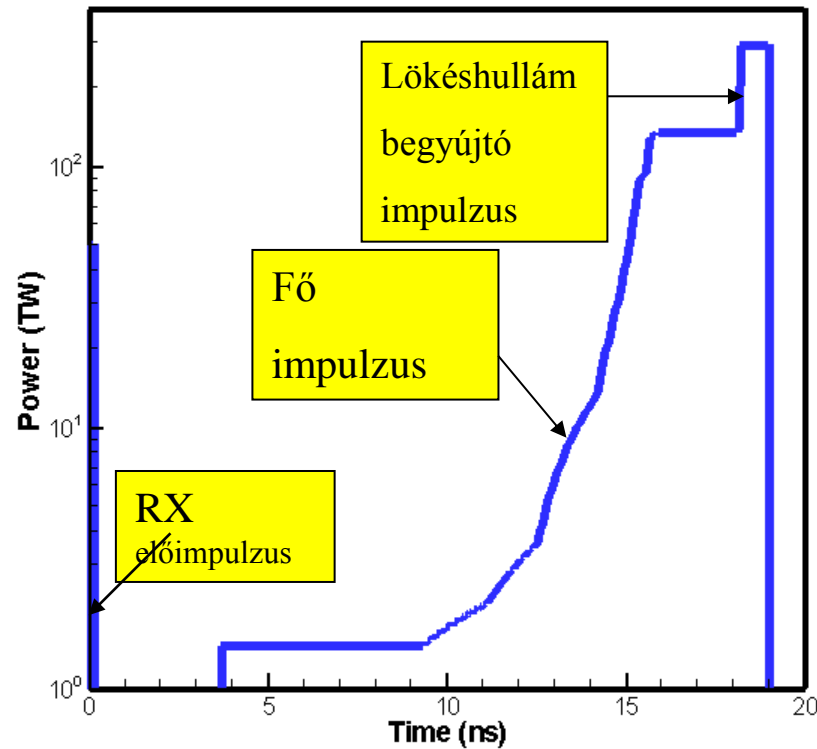
$$E \approx 50\text{-}100 \text{ kJ}, \Delta t \approx 10 \text{ ps}, E_{\text{fast}} \approx 1 \text{ MeV}$$

A legújabb egy régi ötlet: Begyújtás lökéshullámmal (shock ignition)



Közel izentropikus összenyomás nagyobb
sűrűséget eredményezhet, mint egy lökéshullám.
Formáljuk az impulzust!
A lassú összenyomás után gyújtunk be egy rövid
lökéshullámmal.

Nagy sűrűségű termonukleáris fűtőanyag gyors begyújtása lökeshullámmal



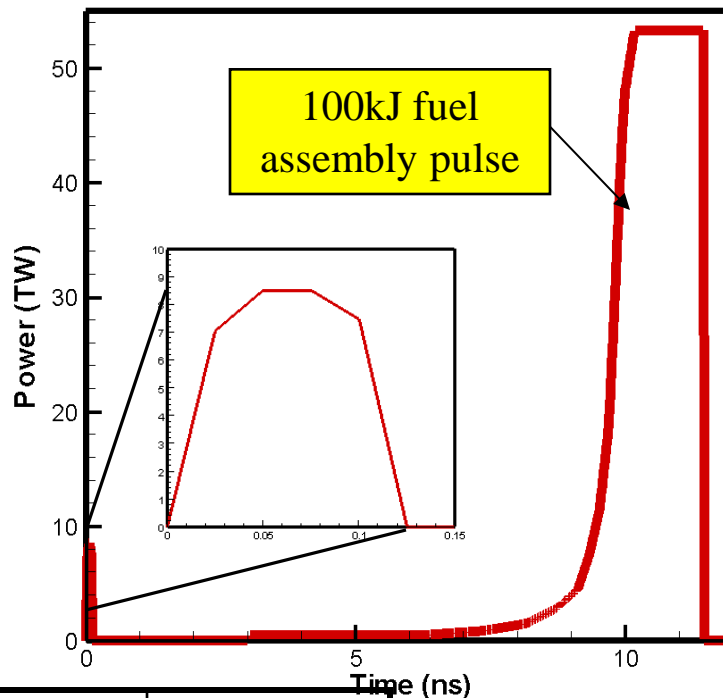
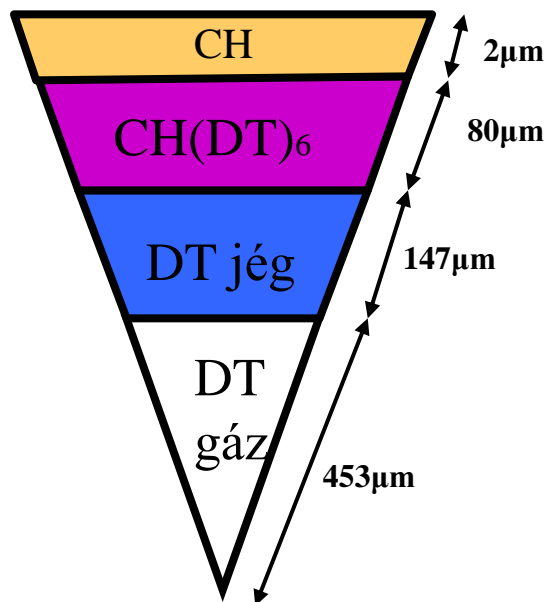
C. Zhou, R. Betti
LLE-University of Rochester
J. Perkins, LLNL

3rd FSC Meeting
January 26-27, 2006
Rochester, NY

Egy 100kJ megfelelően formált impulzus összszenyomja a fűtőanyagot $\rho R=1.6\text{g/cm}^2$ -re lassú ($V_i=2.5\times 10^7$ cm/s), kis adiabatájú implózióval ($\alpha=0.7$)



Meghajtó lézerpulzus

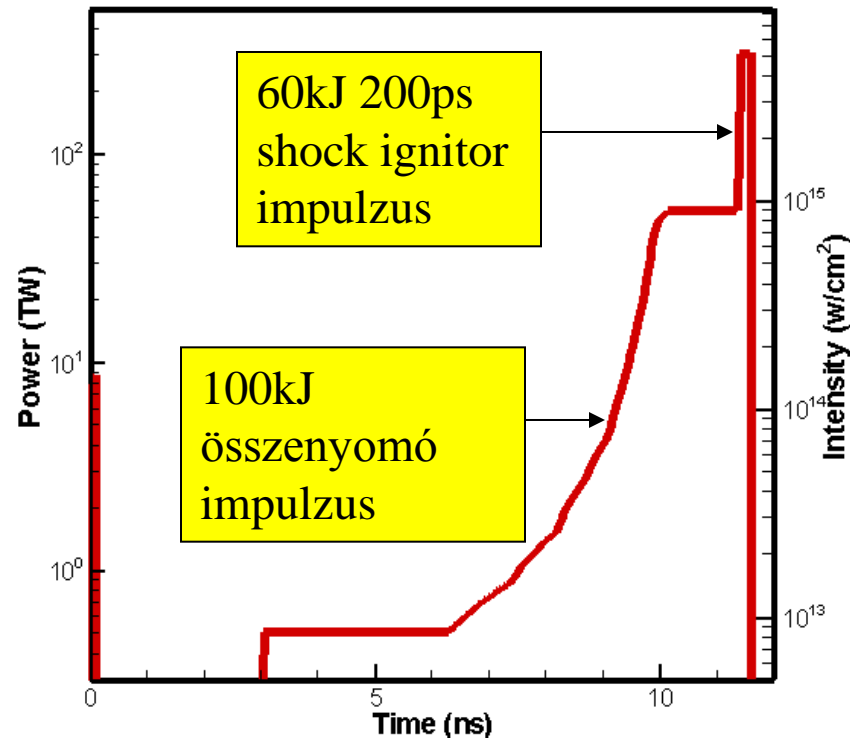


Energia	repülési aspect ratio	Max. felületi sűrűség (g/cm ²)	Implóziós sebesség (cm/s)	hozam (begyújtás nélkül)
100kJ	29	1.6	2.5×10^7	5%

Egy 60kJ rövid impulzussal keltett szférikusán konvergáló lökéshullám egy forró foltot kelthet a 100kJ energiával összenyomott kapszulában.



Lézer teljesítmény és intenzitás

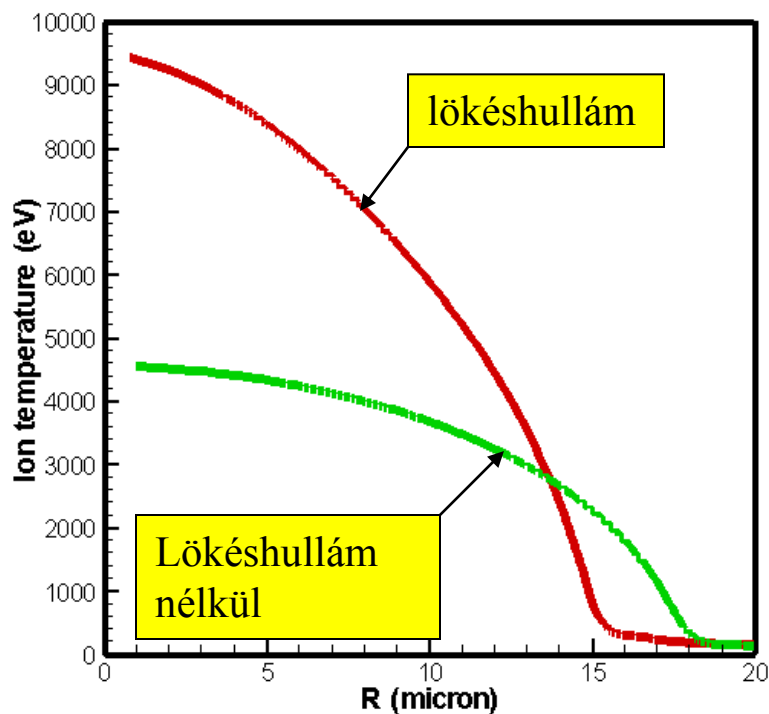


Energia hozam $n = 68$

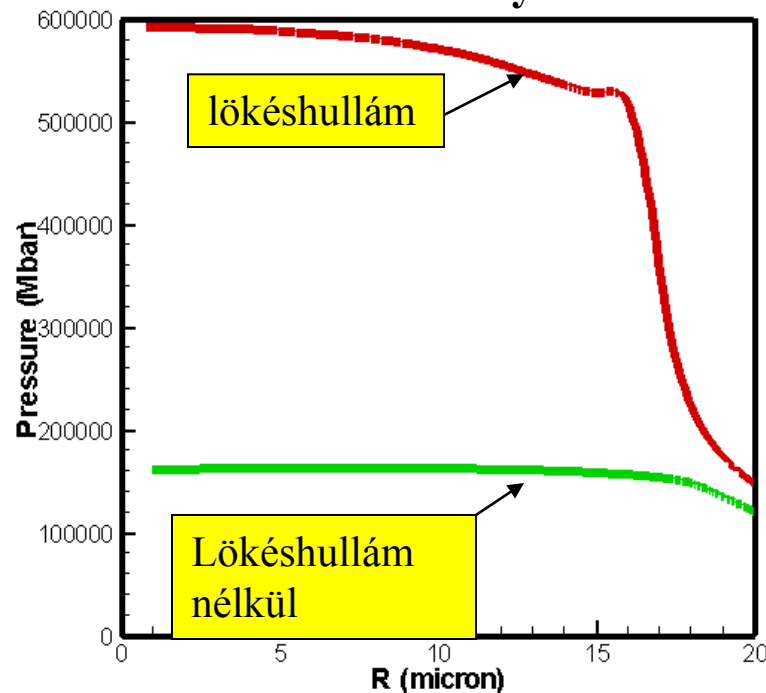
(1-D LILAC szimuláció, 3D ront rajta)

A nagynyomású lökéshullám fűti a forró foltot a begyújtási küszöb fölé.

Forró folt hőmérséklet



Forró folt nyomás



A fúziós erőmű követelményei

- 50-100-szoros energiasokszorozás a pelletből
- Meghajtó $\sim 10\%$ -os hatásfoka: diódával pumpált szilárdtest lézer vagy KrF lézer (7% -ot demonstráltak). Fiber lézer?
- 5-10 Hz-es működés
- Évente ~ 100 millió pellet gyártása, max 25 cent / db áron
- Mivel a kamra fala távol lehet a reakciótól, a sugárterhelés nem kritikus, mivel a fal nem fog ablálódni, mint a mágneses tárolás esetén, de az optikák sugárterhelése kérdéses. Megoldás: Tükrök? Cserélhető Fresnel zóna-lemezek?

Európai lökэшullám fűtési kísérletek, részvétel

- Eurofusion „enabling research” projekt 2017-2018.
- A forró elektronok elősegíthetik a lökэшullámos összenyomást.
- Forró elektronok és lökэшullámok vizsgálata az Omega lézerrel Rochesterben (angol és francia vezetéssel) 2018-20-ban.
- Új projektek 2019-2020-ban:
- Magyar részvétel a „Routes to High Gain for Inertial Fusion Energy” projektben: Röntgenspektrométer készítése plazmainstabilitások összehasonlítására (a Raman-szórás és a 2plazmon bomlás által felgyorsított elektronok hőmérséklete különböző).
- Lökэшullám-begyűjtés vizsgálata a HILL laboratórium (Szeged) KrF lézerével. Iongyorsítás, kritikus réteg rekord (makroszkopikus) gyorsulása (10^{18} g) ponderomotoros erővel.
- Tagság az EPS Plazmafizikai szekció Beam Plasmas & Inertial Fusion Boardban.

Köszönöm a figyelmet!