

Mikrorobbantásos fúzió

Bevezetés a fúziós plazmafizikába
BME 2019

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.mta.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)

Magfúziós reakciók

- A szóhajövő magfizikai folyamatok jól ismertek gyorsítóval végzett kísérletekből:

- **D-T reakció:**



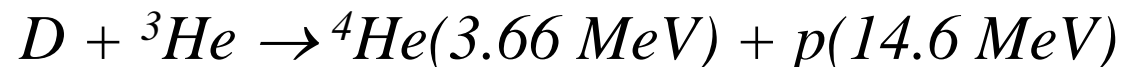
- D-D n reakció:



- D-D p reakció:



- D-He reakció:



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

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

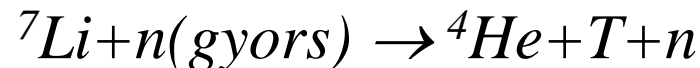
σ a hatáskeresztmetszet, v a sebesség.

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

10 keV $\approx 10^8$ 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. **Tehetlenségi 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 tehetlenség nyomja össze. Rövid idő, nagy sűrűség.

Fúziós feltételek (ICF)

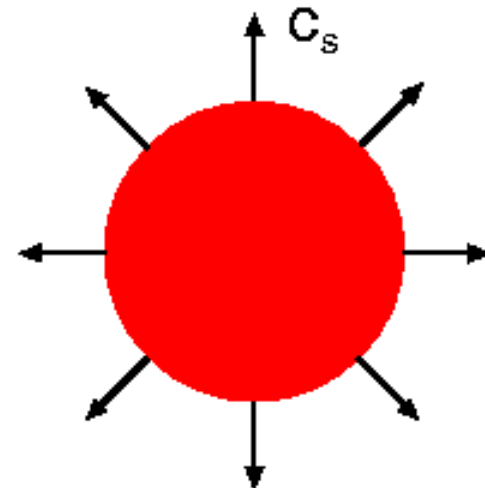
- Tegyük fel, hogy elég sűrű és forró a gömb, és a termikus c_s hangsebességgel tágul!
- n : időegység alatti termonukleáris reakciók
Maxwell-eloszlásra átlagolva:

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

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

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.: 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

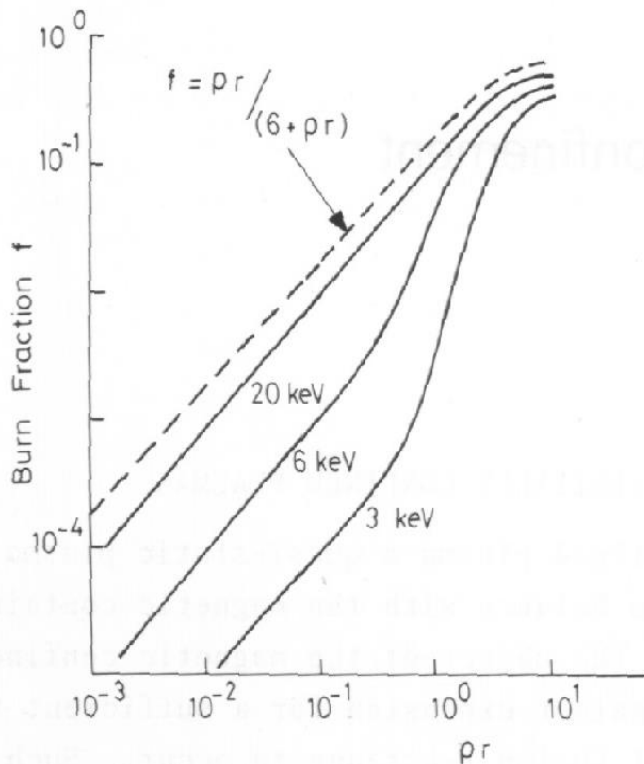
$$\tau \approx \frac{r}{3c_s},$$

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

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

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

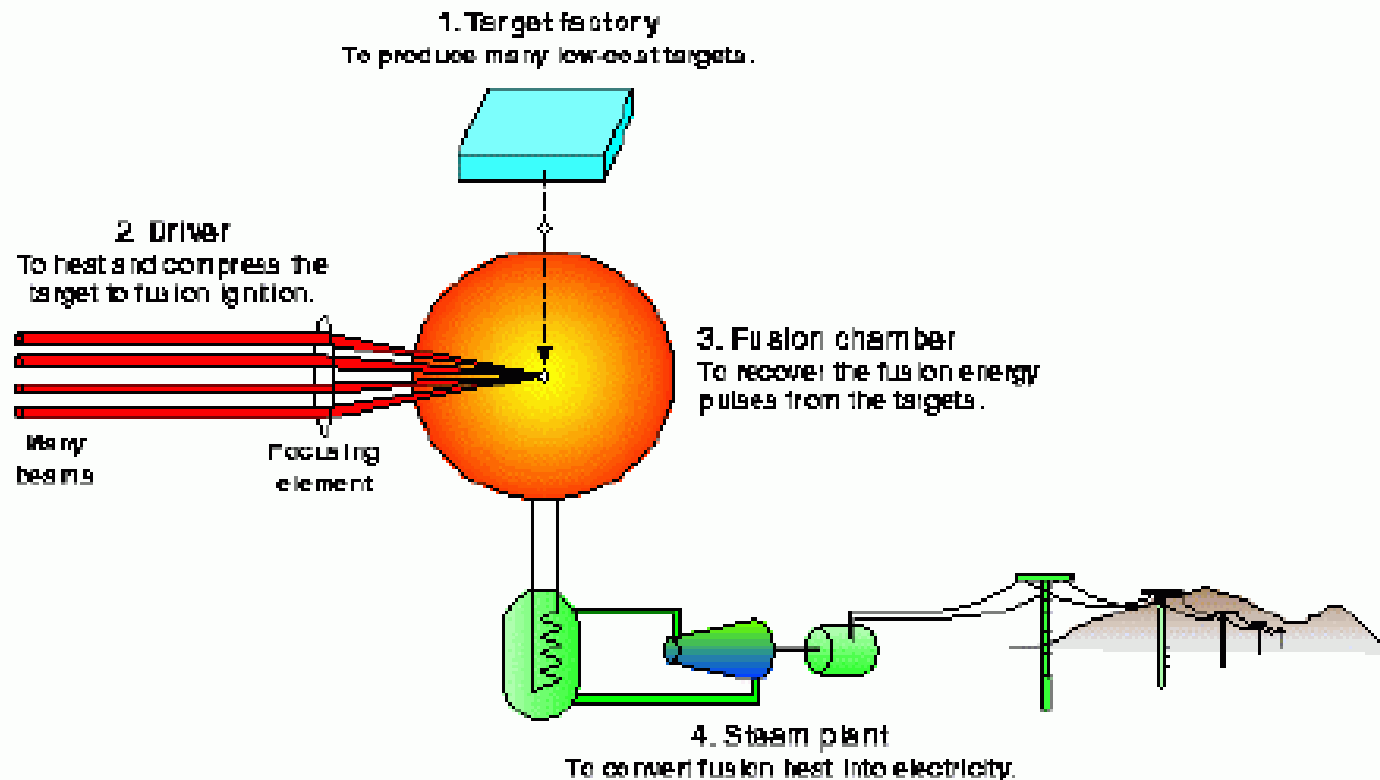
Lawson kritérium.



Nagy hozam ($\rho r = 3 g/cm^2$) 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 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.

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 magreakcióban 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:

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

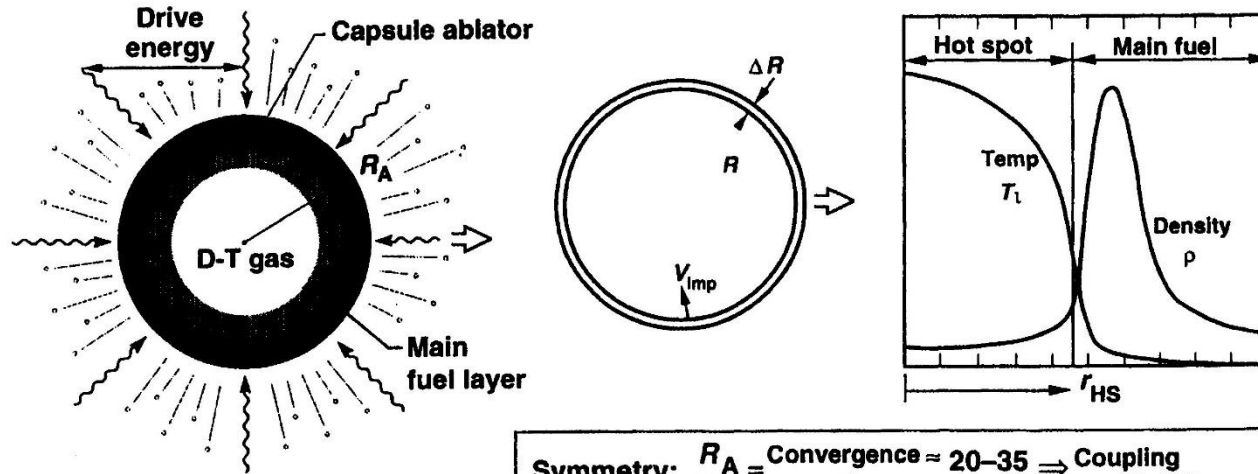
Ez ismét a ρr -től függ,
akkor lesz egy terjedő égési front, ha $\rho r > 0.3 \text{ g/cm}^2$
(propagating burn).

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 kell begyújtani, 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 $E_{driver} = 1-2 \text{ MJ}$

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 fókusztálás, 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)
- lágy röntgensugárzás (lézerrel, ionokkal vagy kisüléssel 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!

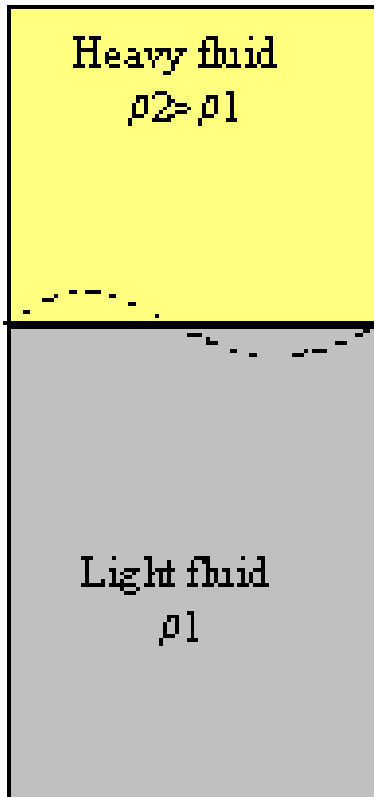
Ha a könnyű folyadékra nehezet rakunk, akkor az RT instabil.

Ez van a nyomás alatt gyorsuló felület esetén is.

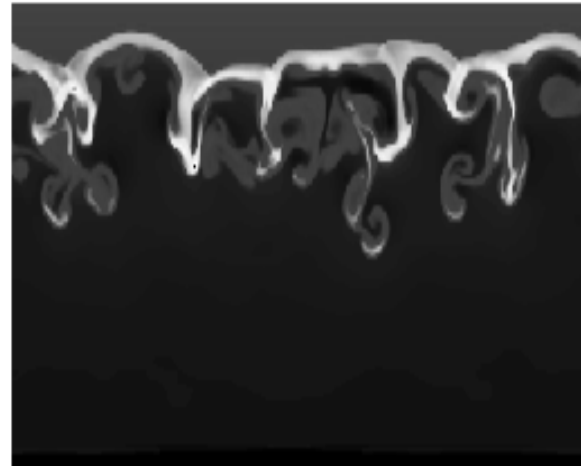
$\frac{\delta g}{g} \approx \frac{\delta v}{v} < \frac{1}{4(C_r - 1)}$ Gyorsulás és szimmetria 1%-nál homogénebb kell legyen a teljes idő alatt.

A Rayleigh-Taylor instabilitás

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



2.5in



Instabilitások rontják a hatásfokot

A nemlineáris, parametrikus lézer-plazma kölcsönhatások hatása csökkenthető, ill. kontrollálható az intenzitás korlátozásával, valamint rövid hullámhosszú lézerek választásával (frekvencia-sokszorozás, KrF lézer).

A szimmetrikus összenyomást viszont megnehezítik a nem parametrikus, folyadék-instabilitások.

- összekeverhetik a hideg DT-t a középső forró folttal

Ezek:

- Rayleigh-Taylor instabilitás: ha nehéz folyadékot teszünk a könnyebbre vagy ha könnyebb folyadékkal gyorsítunk nehezebbet.
- Richtmyer-Meshkov: ha lökéshullám halad át 2 különböző sűrűségű folyadék nem egészen sima határán.
- Kelvin-Helmholtz: ha 2 párhuzamosan áramló folyadék sebessége különbözik a kontakt felület mentén.

A NIF lézer (192 nyaláb 1.8 MJ) helye

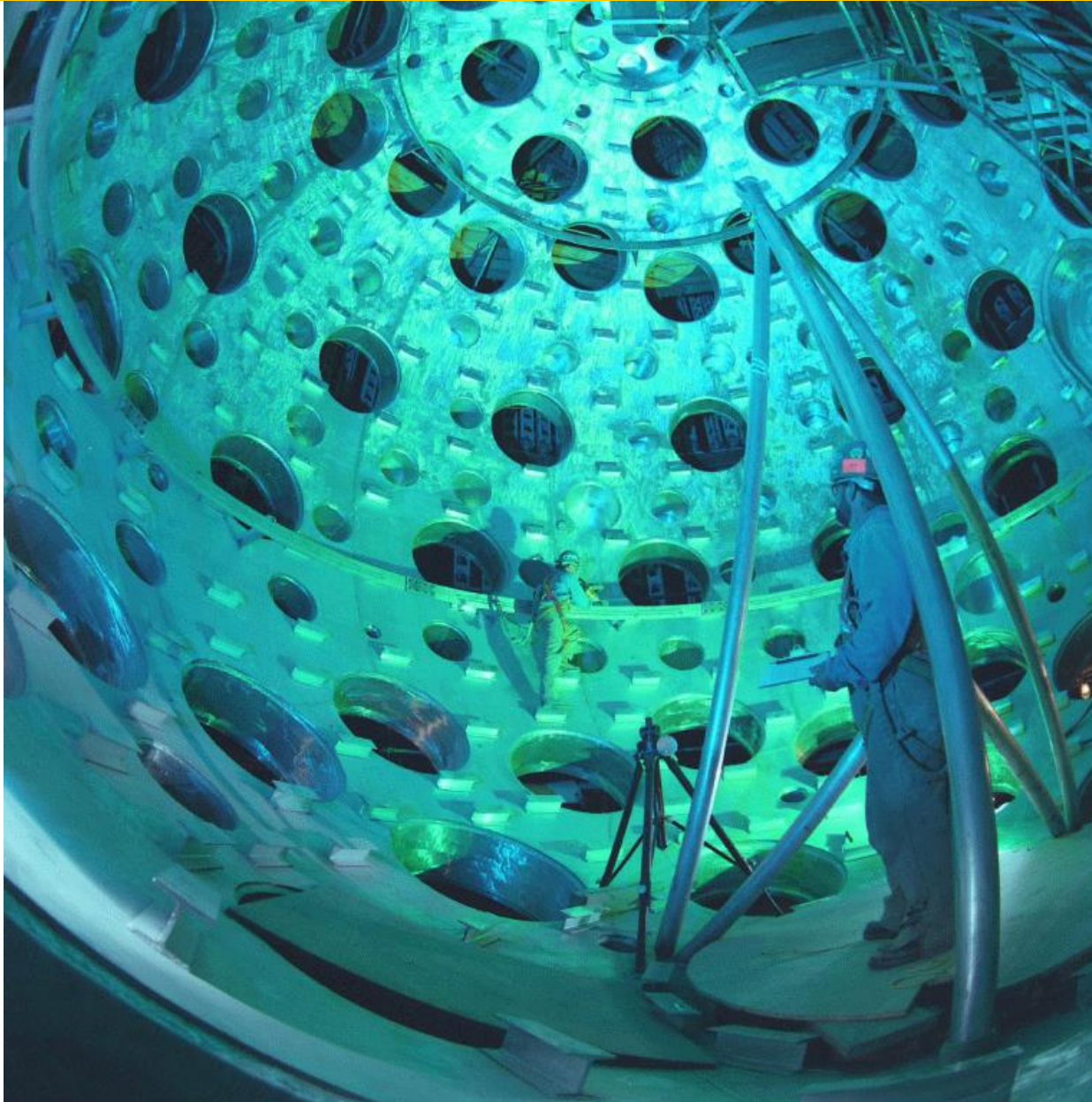
Paraméterek: 1.8MJ, 500TW, 20ns Nd-üveg lézer 3. harmonikusa a $0.35\mu\text{m}$ hullámhosszon.



Nd-üveg lézer



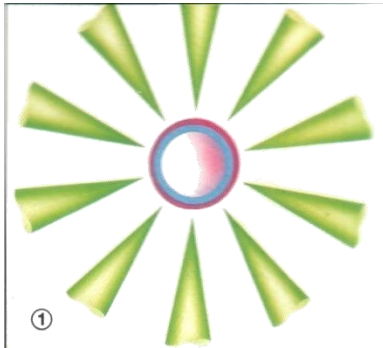
NIF kamra



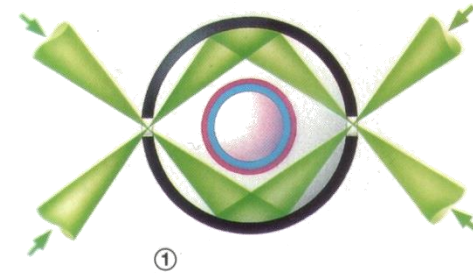
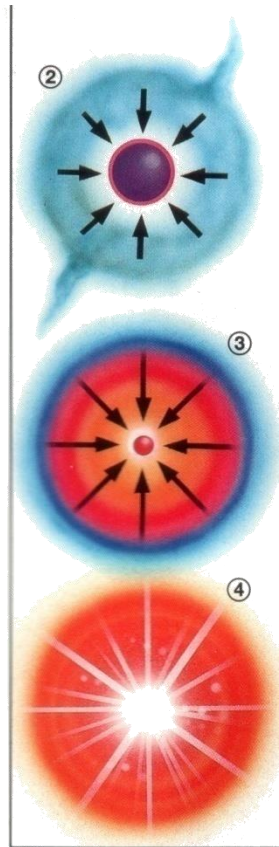
Teller Ede a NIF-nél



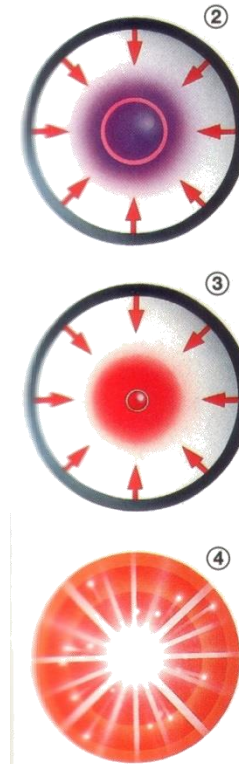
Fúziós elrendezések



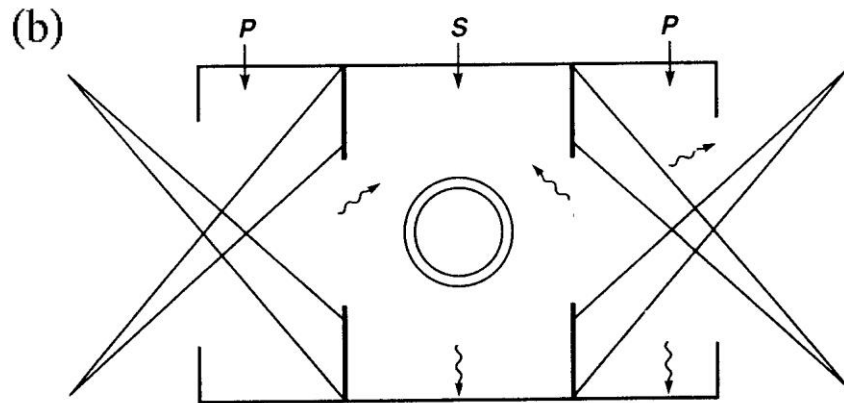
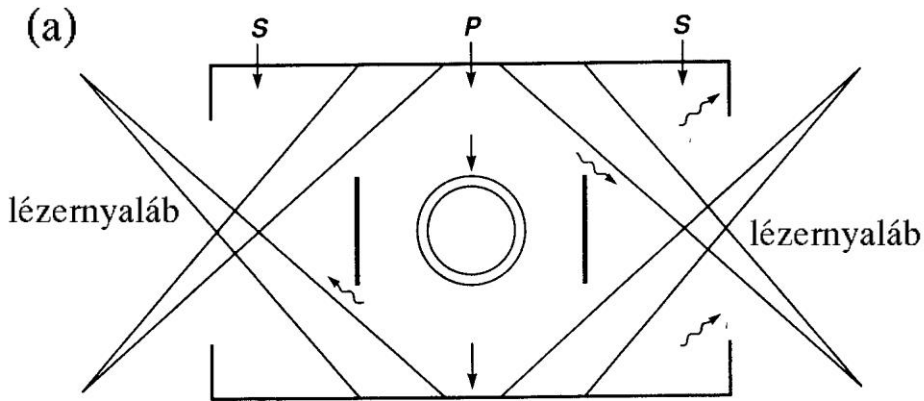
Direkt
összenyomás
lézerrel



Indirekt
összenyomás
röntgennel



Elrendezések indirekt összenyomáshoz



LLNL

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

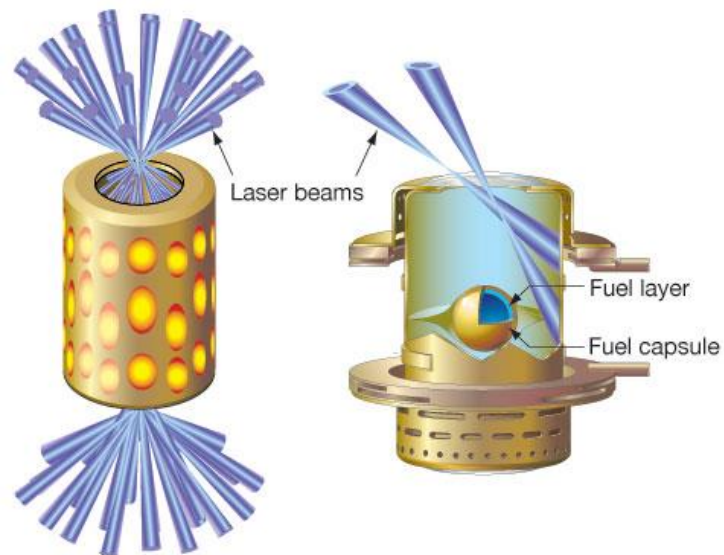
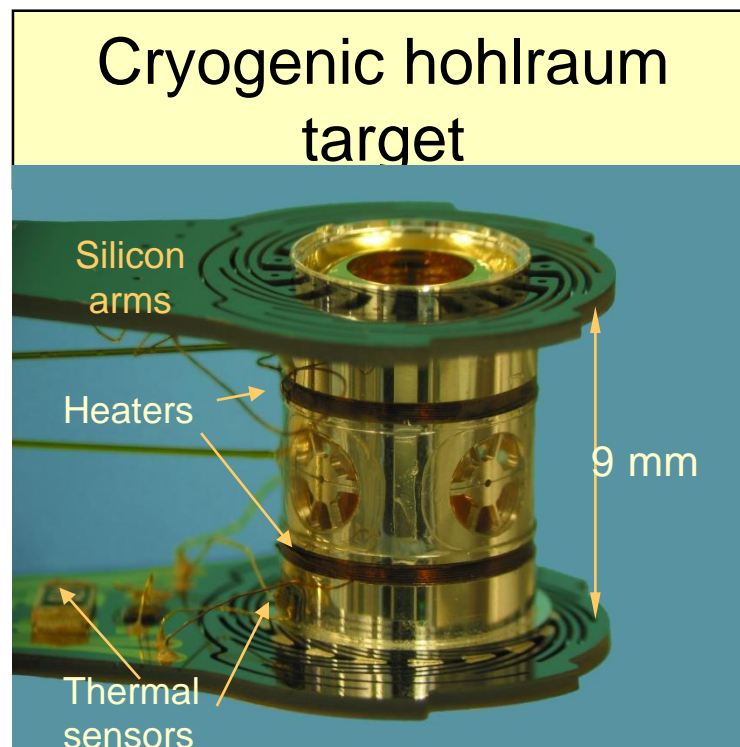
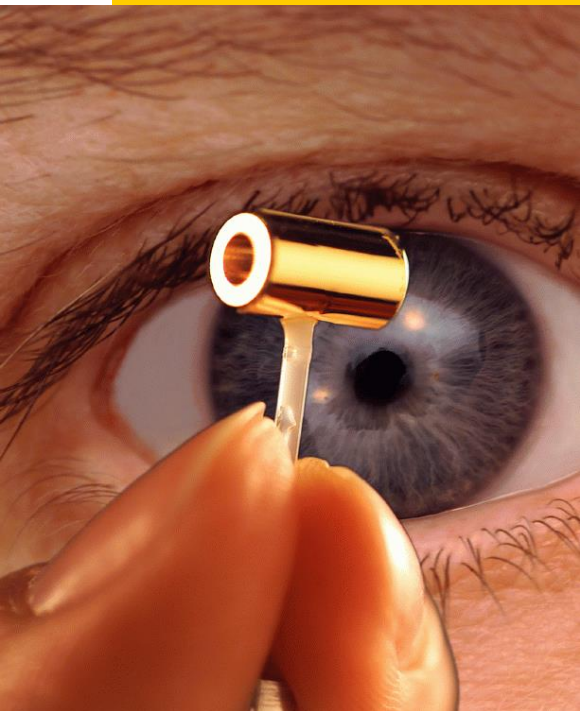
a röntgensugárzás az üregben elhelyezett kapszulát szimmetrikusan világítja meg.

Lézerfúzió=Nyalábfúzió

De: forró folt szükséges

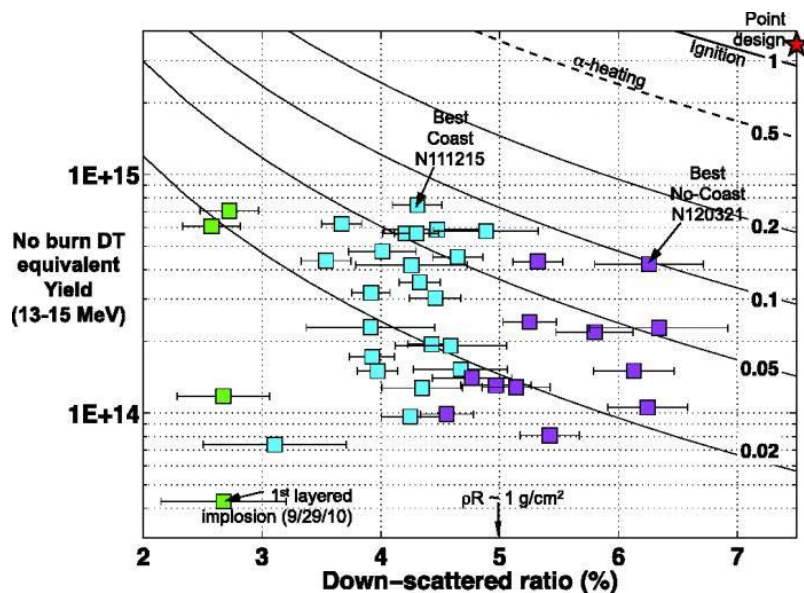
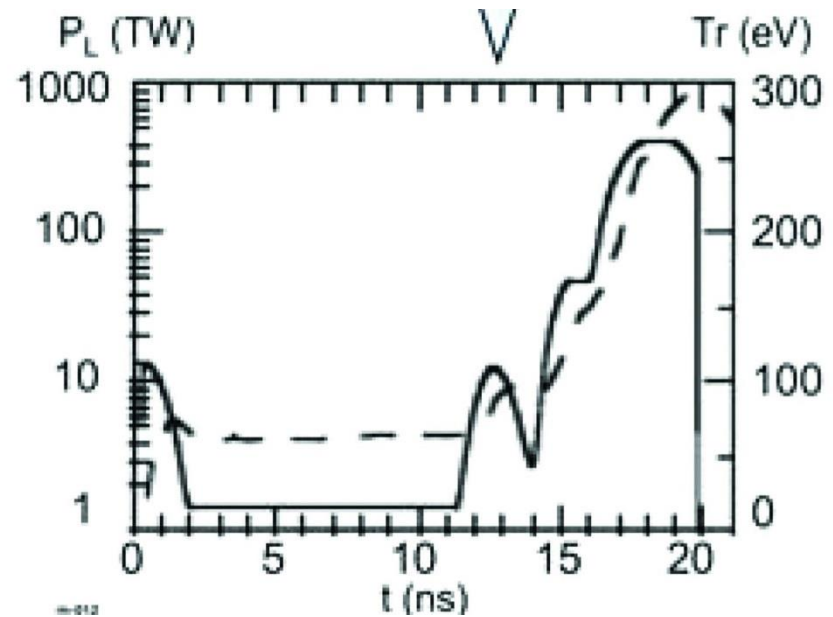
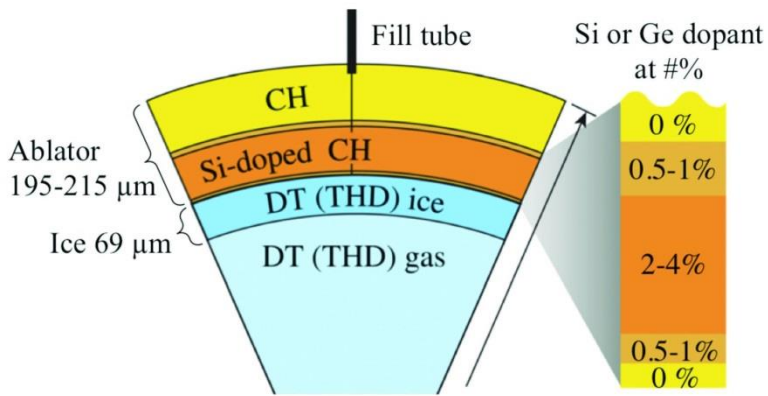
RT nem teljesen kiküszöbölt,
üregfal-effektusok

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

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

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

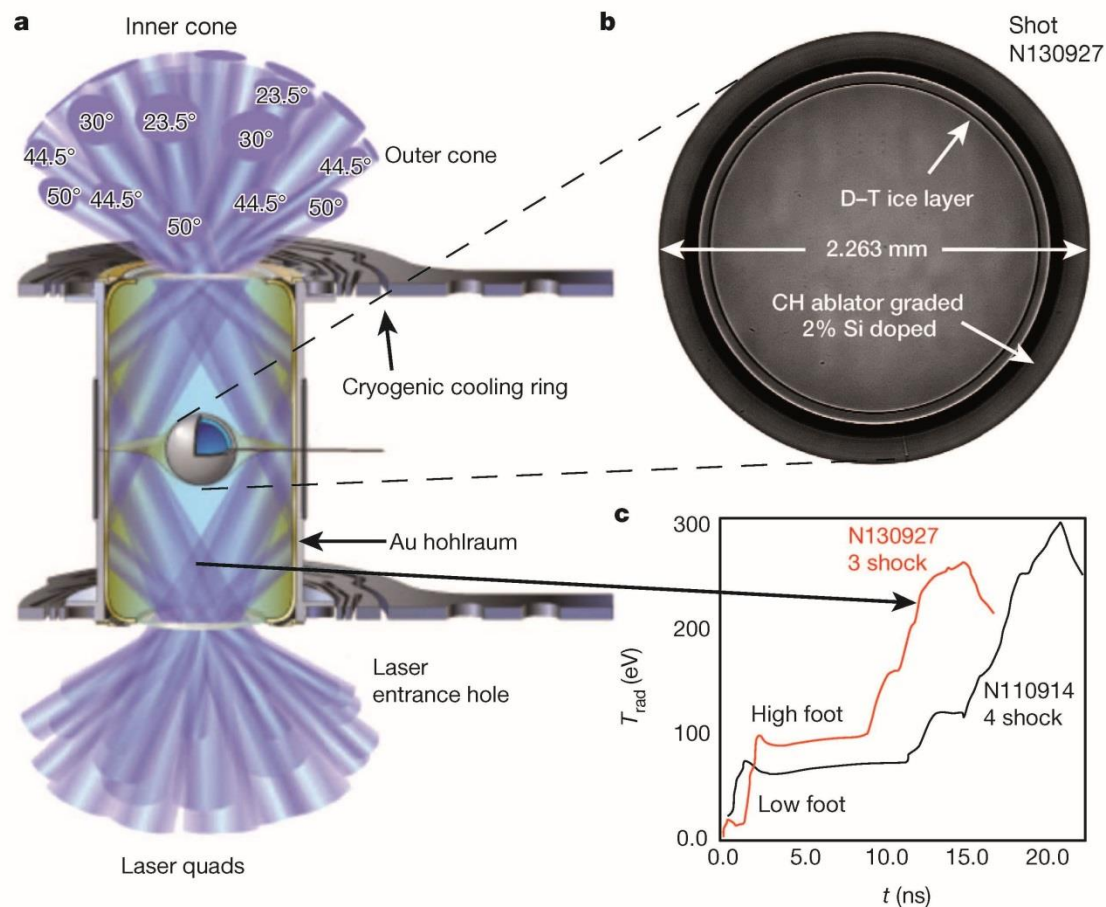
- kis sebesség = kis RT növekedés. $N_e = \text{RT e-szereződéseinek száma.}$

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

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

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

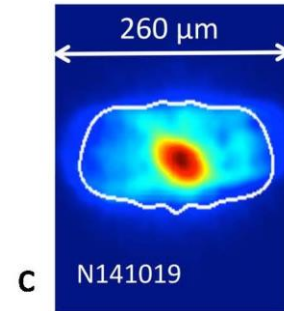
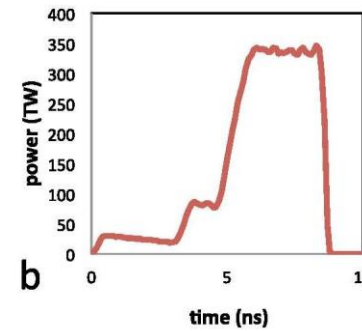
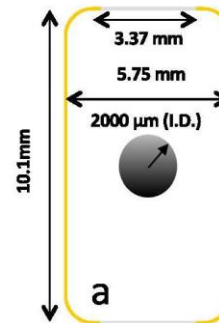
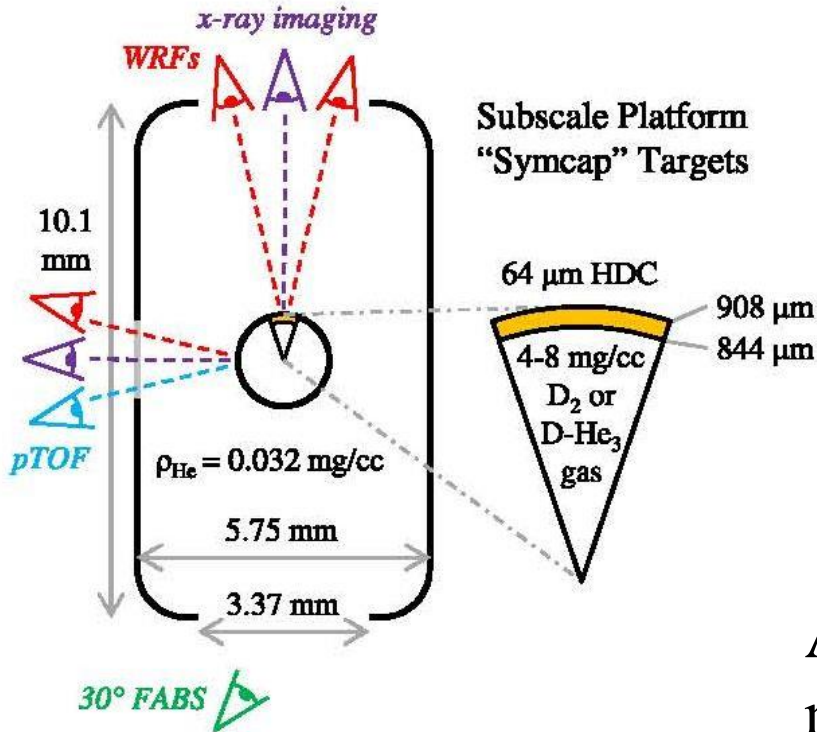
Hurrikán Livermore-ban 2014: egy lépés előre



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

Lassú fejlesztés

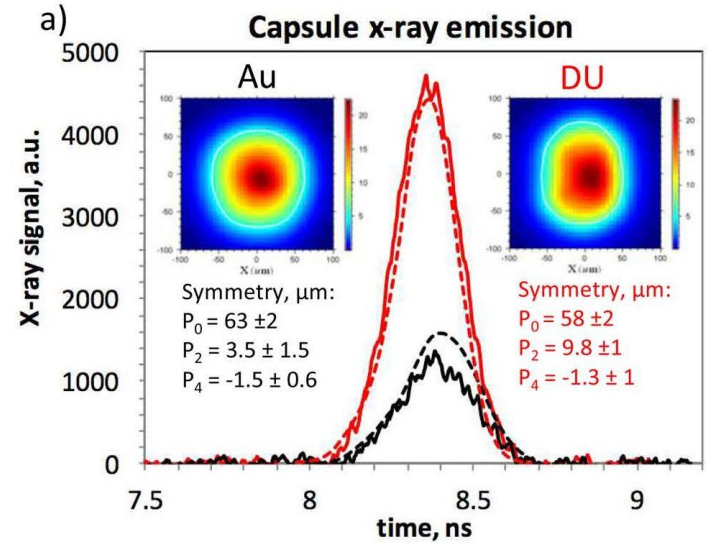
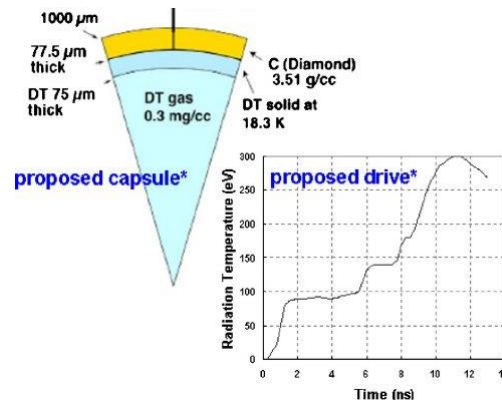
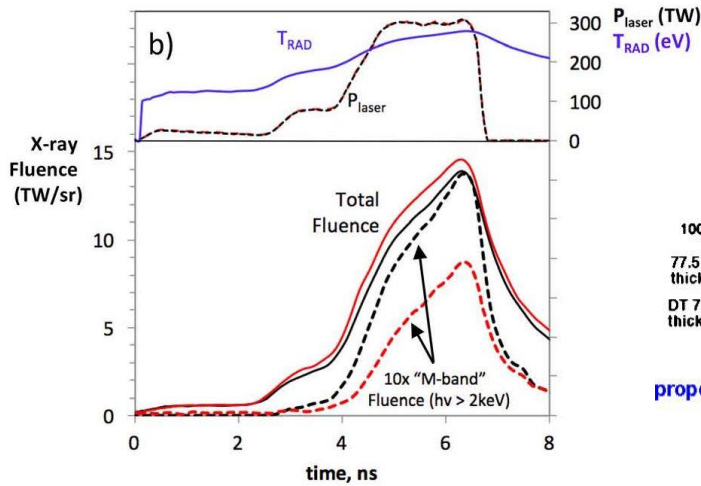
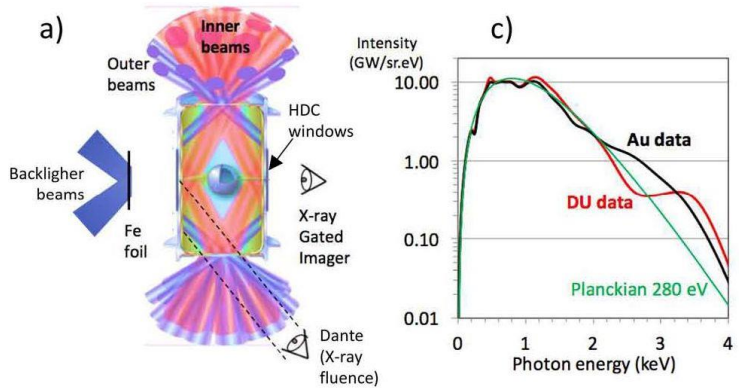
1. Lépés CH helyett gyémánt ablátor: Kevésbé ablálódik, üreg nem telítődik.
Rövidebb (9ns) impulzus, közel vákuum, kisebb üreg: $0.032 \text{ mg/cm}^3 \text{ He}$.
Turnbull, Le Pape 2016



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

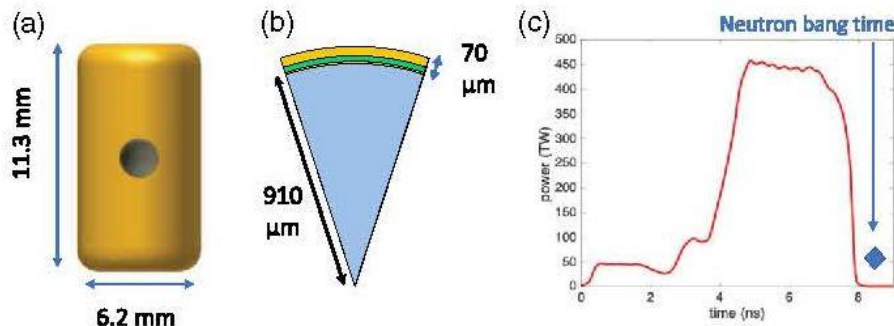


b)

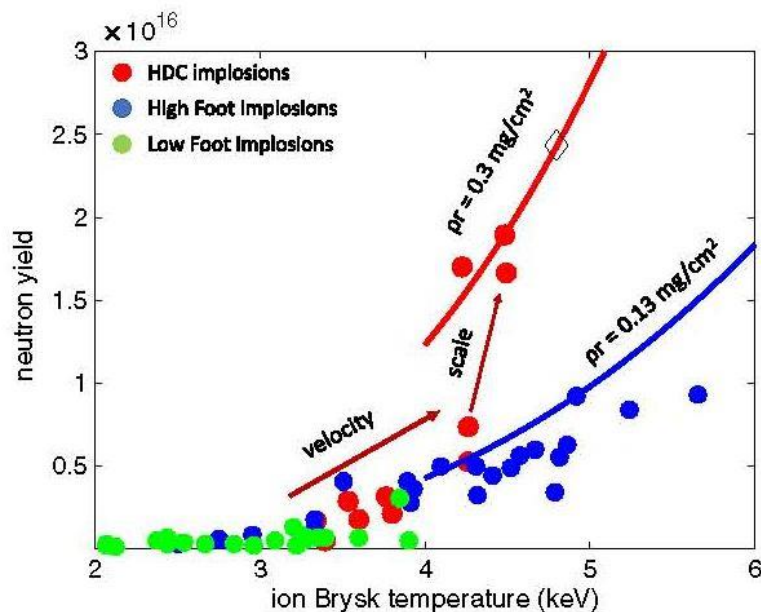
Data	Bang time, ns ± 0.2	Burn width, ps ± 20	T_{ion} , keV ± 0.1	DD-Yield $\pm 0.2 \text{ e}13$
Au	8.39	270	2.7	0.51
DU	8.36	238	3.14	1.01

Kétszeres fúziós hozam

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



1.7 MJ lézer
70 μm HDC kapszula,
30 μm 0.3% W árnyékolás
kemény röntgenre.
0.3 mg/cm³ He töltés: nagyságrenddel
kisebb, mint Hurricane és korábban.

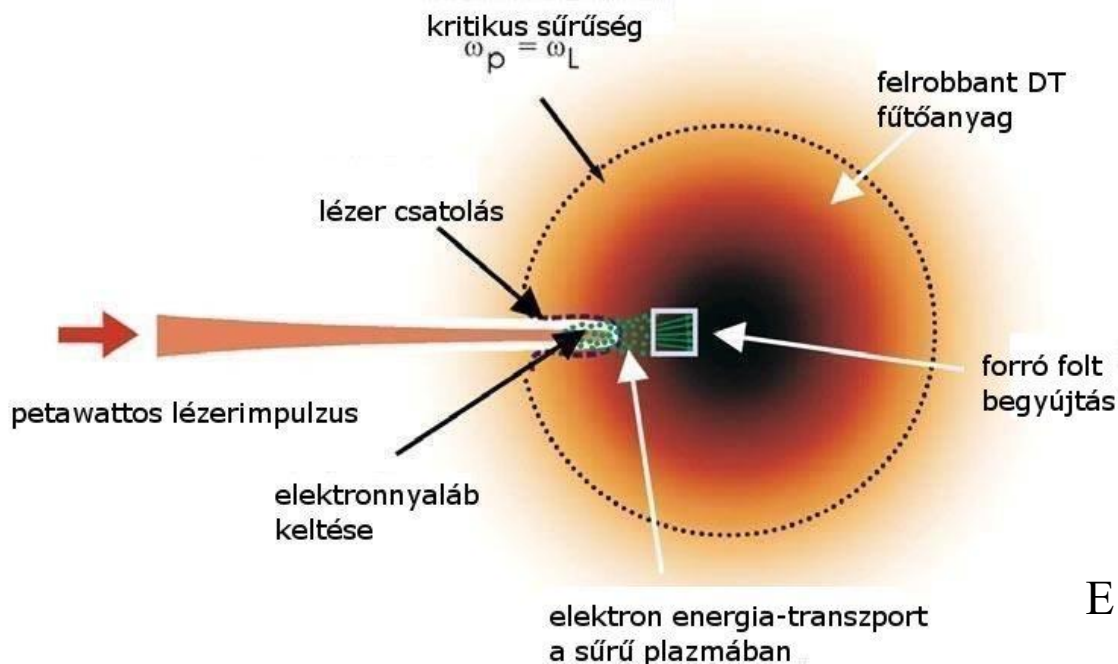


Az ionhőmérséklet növelésével nő a hozam.
Az ionhőmérsékletet a robbanás sebességének
növelésével lehet növelni.

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

A központi szikra alternatívája: A gyors begyűjtés

Tabak et al., 1994.: A csörpölt impulzusok erősítésével kapott lézerimpulzusok nagy, 10^{18} - 10^{21} W/cm² teljesítményei felhasználhatók a fúzió külső begyűjtéséhez gyors, MeV energiájú részecskékkel.

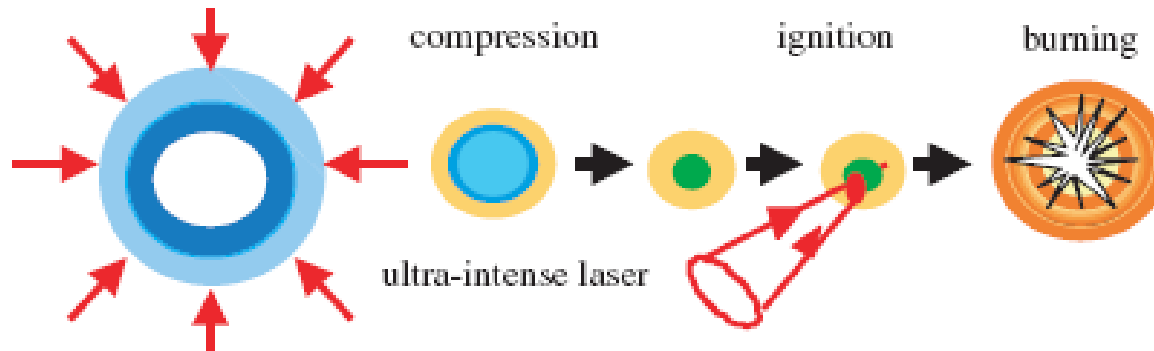


Tipikus paraméterek:

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

A gyors begyújtás vagy “Fast Ignition” módszere

A hagyományos begyújtás alternatívája lehet a fűtőanyag közvetlen begyújtása egy sok PW-os lézerrel keltett elektron- vagy protonnyalábbal.

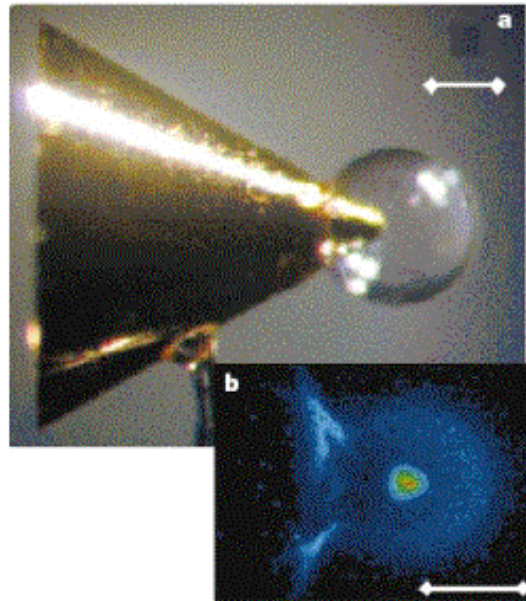
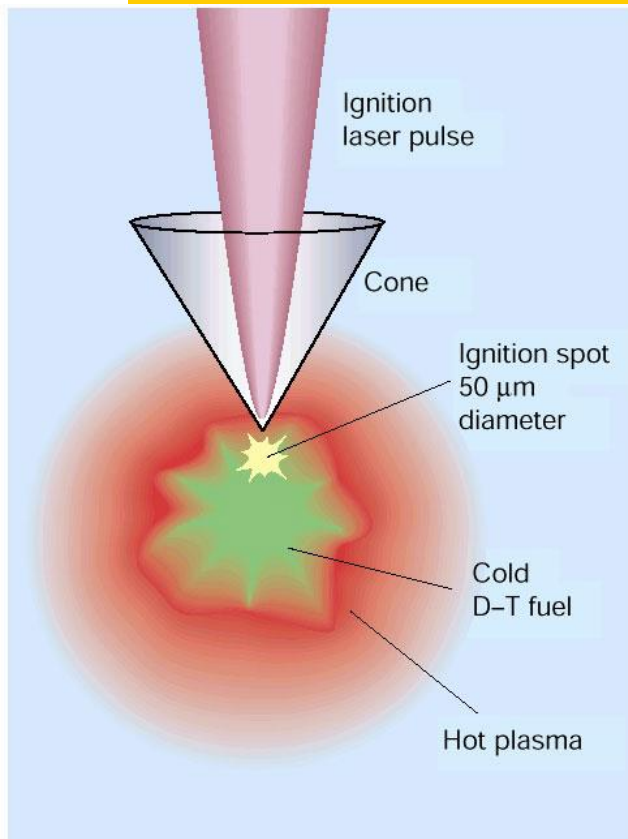


A petawattos impulzussal a pellet maximális összenyomásakor kell rálőni a fűtőanyag begyújtásához

Mike Dunne ábrája

- **A HIPER lézer terve: Európai nagyberendezés**
- **Nem sugárzásos robbantás, azaz nincs hadi alkalmazás**
- **Véges anyagi eszközökkel létrehozható**
- **HALOTT PROJEKT!**

Gyors begyújtás kúppal ?



A gyors begyújtáshoz egy Au kúp használható, amely a rövid impulzust eljuttatja a sűrű fűtőanyaghoz. A kúp szétválasztja a rövid impulzus és a keltett elektronnyaláb terjedését a pellettől. Csak a kilépő gyors elektronok találkoznak a sűrű plazmával, begyújtva azt.

Osaka, 2002: 0.5 PW/0.5ps teljesítménynél
3 nagyságrend neutronhozam-növekedés.

Kúp? Befúró lézer? KrF!?

A gyors begyújtás kúppal:

- Nem jó erőműnek: - bonyolult target \leftrightarrow több Hz frekvencia
- elpárolgó anyag (Au) bevonja a targetkamra falát és az optikát.

Rövid hullámhossz kell a gyors begyújtáshoz is!? **KrF-lézer:** már önmagában is 1 nagyságrenddel mélyebbre hatol be, mint az infravörös lézer.

Hidrodinamikai szimulációk (R. Betti):

A fúziós hozam több mint kétszeresére is nőhet, 1MJ fő lézernél 50-ről 130-ra.

Gyors begyűjtés és hullámhossz

A gyors elektronok energiája, a ponderomotoros erővel skálázható, a behatolási mélység energiafüggő:

$$\langle E_{hot} \rangle = \left(\frac{I(\lambda / 1.054 \mu m)^2}{10^{19} W cm^{-2}} \right)^{1/2} MeV$$

$$R = 0.6 \times \langle E_{hot} \rangle g / cm^2$$

Ha $E \gg 1 MeV$, az elektron energia sokkal nagyobb lesz a gyors begyűjtés optimumánál, alacsony lesz a hatásfok. A lézer hullámhosszának csökkentése csökkenti az elektronok átlagos energiáját, a fékeződési távolságot és a minimális begyűjtő energiát.

A skálatörvények szerint $1.8 \times 10^{20} W/cm^2$ szüksége 1 MeV elektronokhoz ($\lambda=248nm$). Ez elérhető, a miénkhez hasonló lézerrel már $10^{19} W/cm^2$ -et is produkáltak.

Gyors begyűjtés és hullámhossz

A gyors elektronok energiája, a ponderomotoros erővel skálázható, a behatolási mélység energiafüggő:

$$\langle E_{hot} \rangle = \left(\frac{I(\lambda / 1.054 \mu m)^2}{10^{19} W cm^{-2}} \right)^{1/2} MeV$$
$$R = 0.6 \times \langle E_{hot} \rangle g / cm^2$$

Ha $E \gg 1 MeV$, az elektron energia sokkal nagyobb lesz a gyors begyűjtés optimumánál, alacsony lesz a hatásfok. A lézer hullámhosszának csökkentése csökkenti az elektronok átlagos energiáját, a fékeződési távolságot és a minimális begyűjtő energiát.

A skálatörvények szerint $1.8 \times 10^{20} W/cm^2$ szüksége 1 MeV elektronokhoz ($\lambda=248nm$). Ez elérhető, a miénkhez hasonló lézerrel már $10^{19} W/cm^2$ -et is produkáltak.

KrF erősítőkben 100fs és 10-20 ps között a kijövő energia

impulzushossz-független. →Lehetséges a 48 kJ energiát ~1ps-ben megkapni.

Nyalábok interferometrikus multiplexelése szükséges!

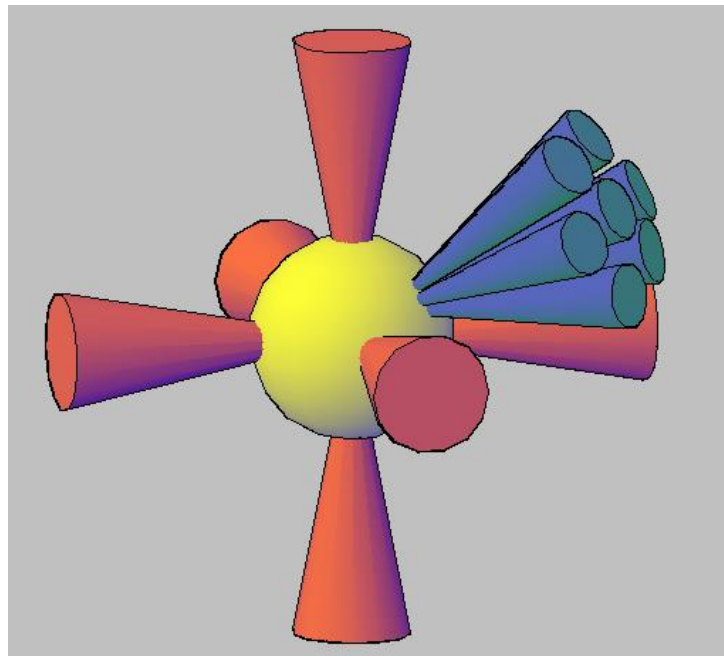
Az alternatíva: soknyalábos gyors begyűjtés

Az erősítő 1m^2 kimenetén 2 nyaláb interferometrikus multiplexelésével
1ps impulzushosszal: 120J.

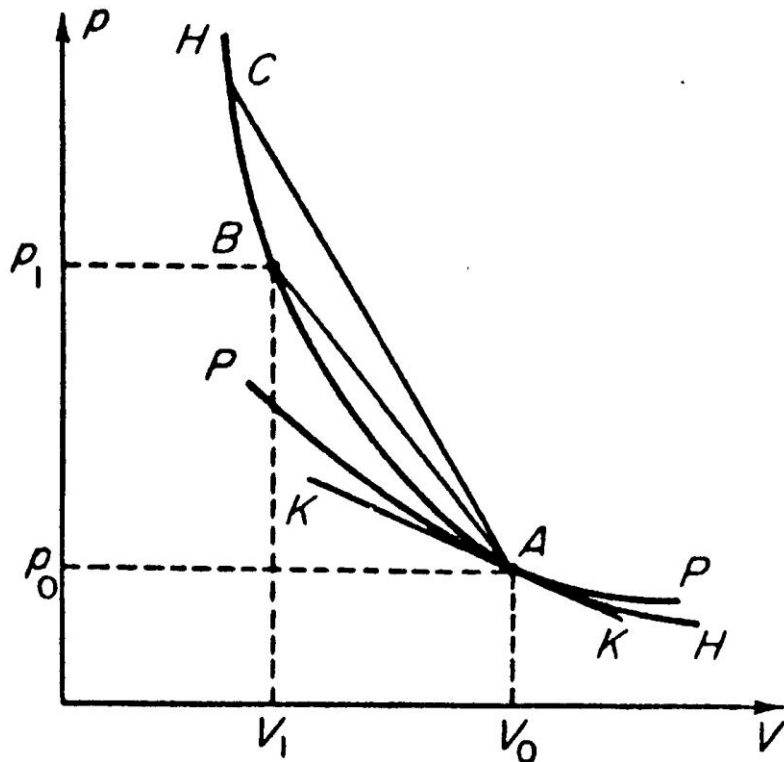
Fókuszálás:

$r=8\mu\text{m} \rightarrow I=2\times 10^{20}\text{ W/cm}^2$. Ez elegendő 1MeV elektronokhoz.

400 külön fókuszált nyaláb kielégíti az energia- és intenzitás-követelményeket!

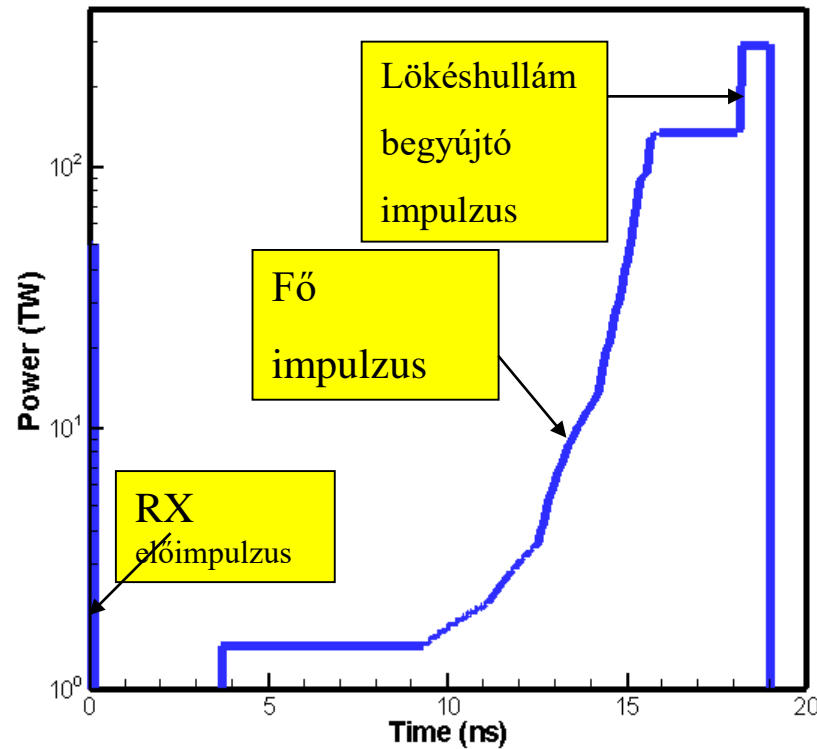


A legújabb egy régi ötlet: Begyújtás lökéshullámmal (shock ignition)



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 begyűjtása lökeshullámmal



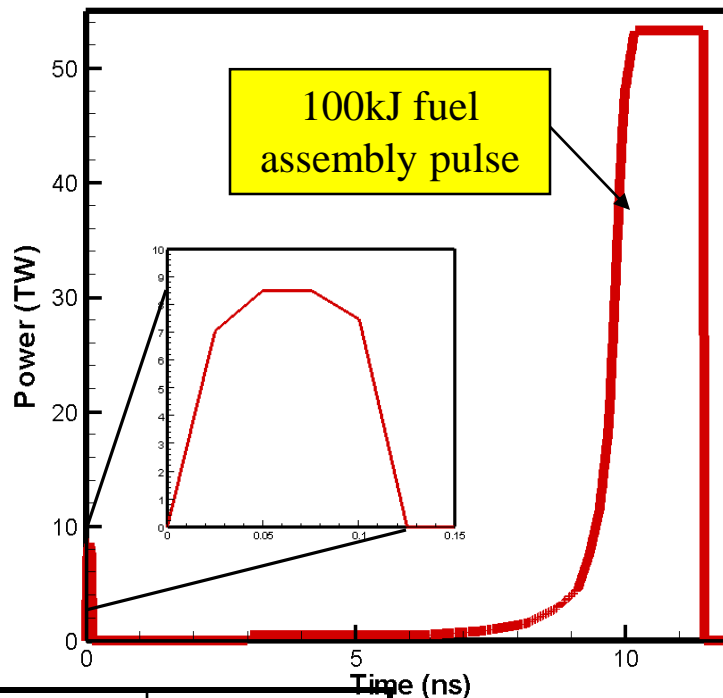
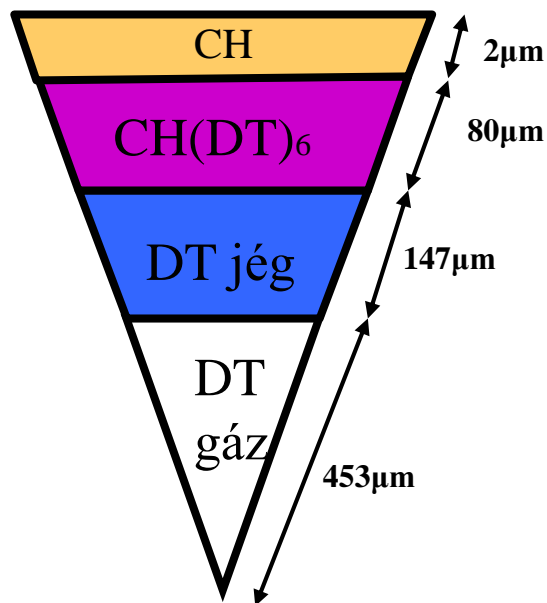
C. Zhou, R. Betti
LLE-University of Rochester
J. Perkins, LLNL

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

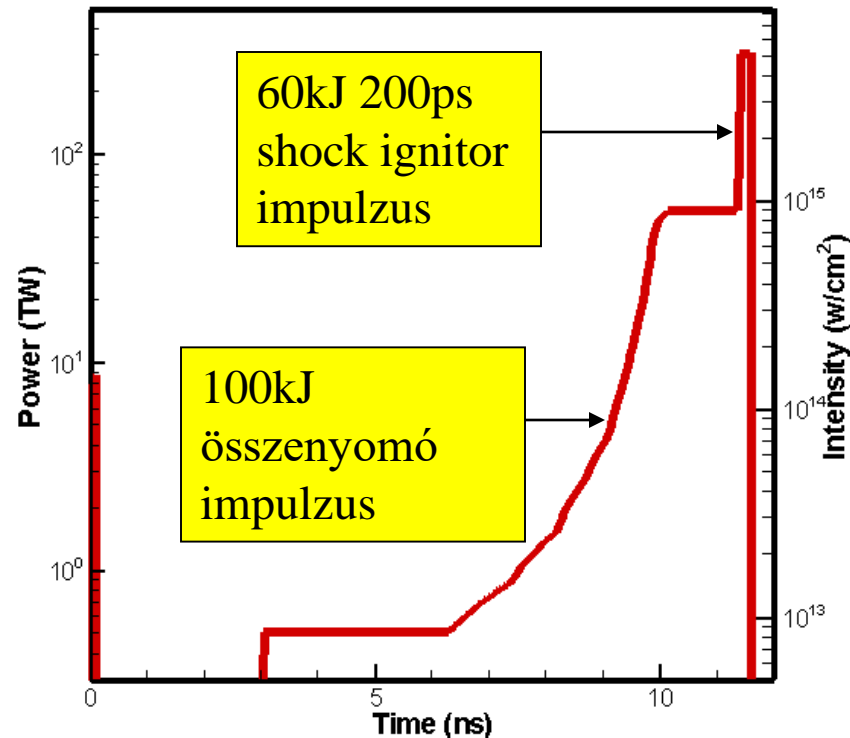


Energia	repülési aspect ratio	Max. felületi sűrűség (g/cm^2)	Implóziós sebesség (cm/s)	hozam (begyűjtés nélkül)
100kJ	29	1.6	2.5×10^7	5%

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



Lézer teljesítmény és intenzitás

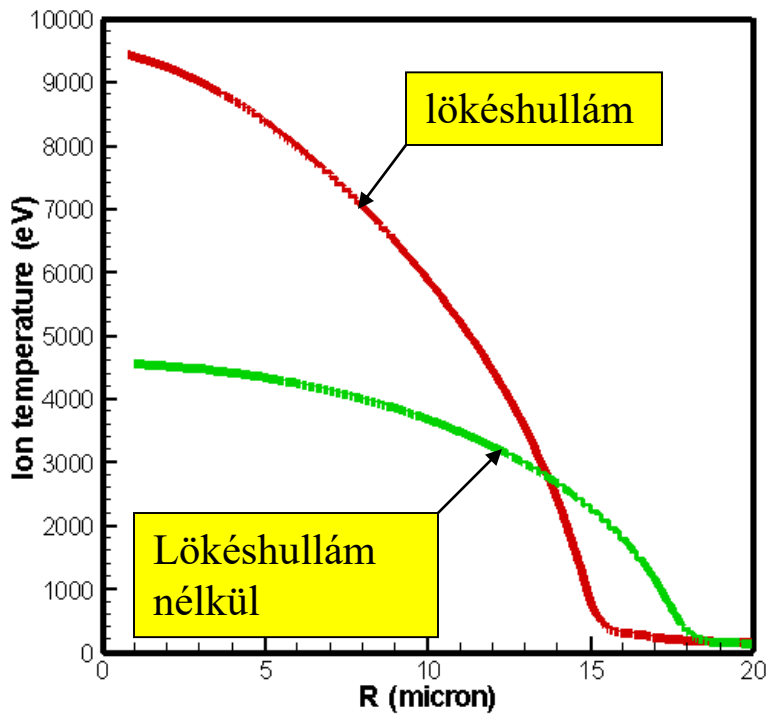


Energia hozam $n = 68$

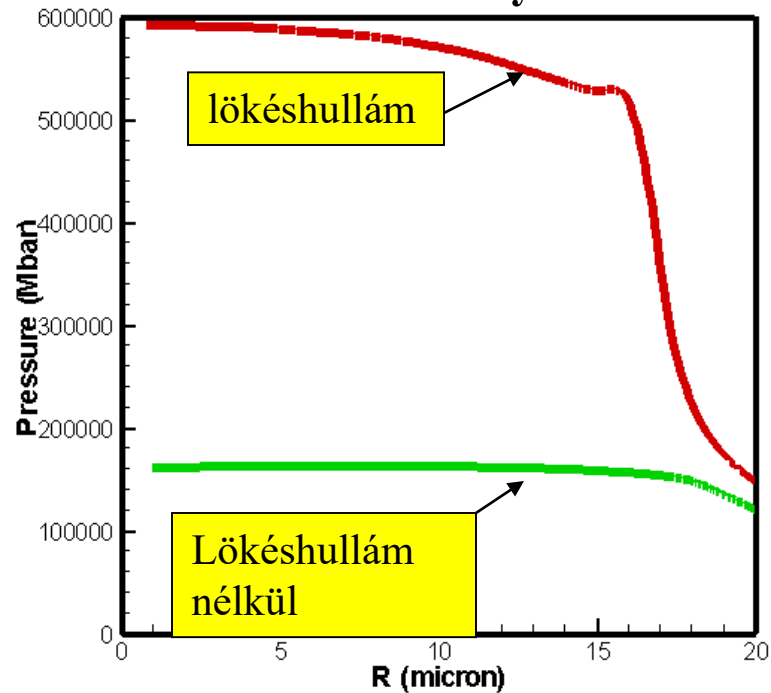
(1-D LILAC szimuláció, 3D ront rajta)

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

Forró folt hőmérséklet



Forró folt nyomás



Európai lökeshullám fűtési kísérletek

- Eurofusion „enabling research” projekt 2017-2018
- A forró elektronok elősegítik a lökeshullámos összenyomást.
- Forró elektronok és lökeshullámok vizsgálata az Omega lézerrel Rochesterben (angol és francia vezetéssel) 2018-20-ban.
- Új projektek 2019-2020-ra.

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 / 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?

Hazai kutatások, lehetséges részvétel

Lézerplazma kutatások itthon és külföldön:

- Lökéshullám-kutatások:
 - Lökéshullám-begyűjtés vizsgálata a HILL laboratórium (Szeged) KrF lézerével. Iongyorsítás, kritikus réteg rekord (makroszkopikus) gyorsulása (10^{18} g) ponderomotoros erővel.
- Röntgenspektrométer készítése plazmainstabilitások összehasonlítására (a Raman-szórás és a 2plazmon bomlás által felgyorsított elektronok hőmérséklete különböző).
- Kísérlet nagyberendezésen 2020-ban: PALS vagy LULI?

Érdeklődő diákok: foldes.istvan@wigner.mta.hu