

LÉZERFÚZIÓS KUTATÁSOK: ENERGIATERMELÉS MIKRO- HIDROGÉNBOMBÁKKAL

Dr. Rácz Ervin

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Villamosenergetikai Intézet

egyetemi docens

Tartalom

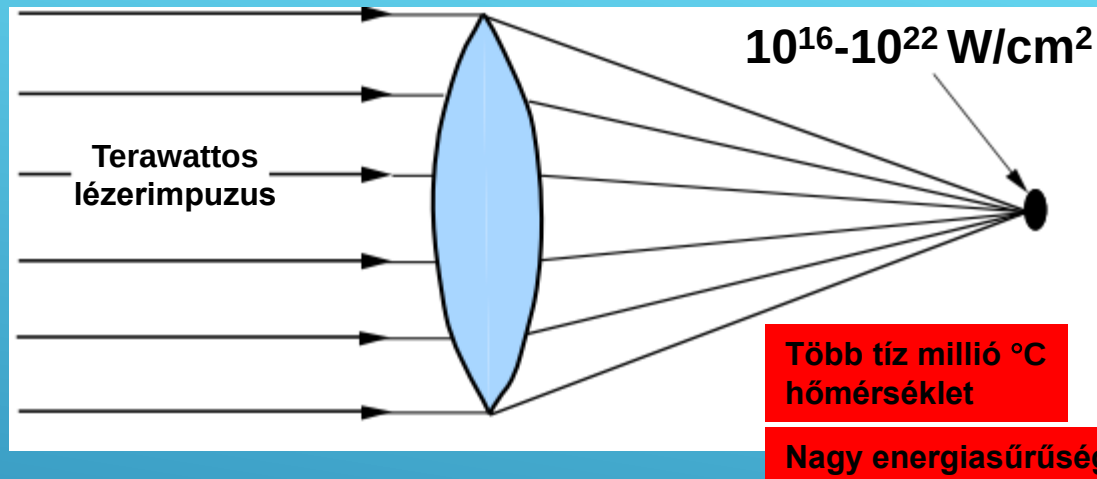
- ▶ Rövid lézerplazma történelem
 - ▶ Nagy intenzitás keltése lézerekkel
 - ▶ Lawson-kritérium
 - ▶ Lézerfúziós-módszerek
 - ▶ Közvetlen begyújtás direkt összenyomással
 - ▶ Gyors begyújtás
 - ▶ Indirekt begyújtás
 - ▶ Céltárgy dizájn
 - ▶ Lézerfúziós berendezések
- 
- A series of white diagonal lines of varying lengths and thicknesses, located in the bottom right corner of the slide, serving as a decorative element.

Rövid lézerplazma történelem

- **1960: Theodore Harold Maiman:** az első lézer (rubinlézer)
- **1963: Maker, Terhune, Savage:** Rubinlézer fókuszálásakor lézerplazma keltése levegőben
- **1963: Basov, Krokhn:** Lézeres termonukleáris fúzió ötlete
- **1985: Matthews, Hagelstein,...Rhodes,...:** röntgenlézer
- **1992: Asztrofizika laboratóriumban**
- **1994: Max Tabak:** A lézerfúzió gyors begyűjtés elve
- **1995: Relativisztikus ionok, protonok, elektronok keltése lézerrel**

Nagy intenzitás keltése lézerekkel

Húú, jó nagy intenzitás!



$$I = \frac{E}{A \cdot \tau}$$

E: energia
A: felület
 τ : időtartam

Nagy intenzitás akkor kelthető, ha
a.) a számláló nagyon nagy a nevezőhöz képest

b.) a nevező nagyon kicsi a számlálóhoz képest

Lézerfizikában nagyon nehéz elérni

Megoldható:

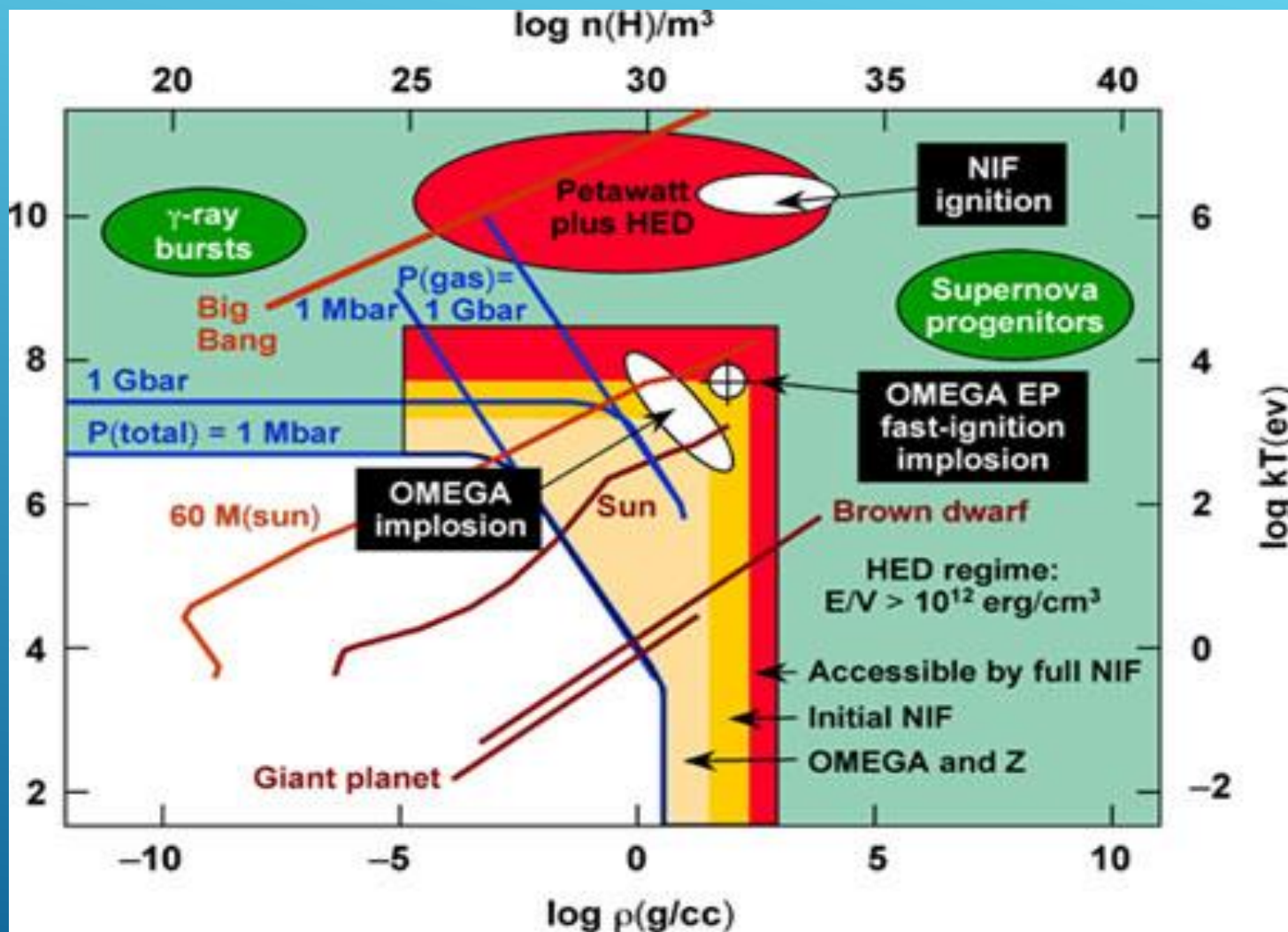
- impulzusüzemű lézerekkel
- jó, „éles” fókuszálással

Fizika nagy energiasűrűség mellett (HED)

A HED fizika e tudomány sok fontos területét tartalmazza. Pl.:

- HED asztrofizika
- nyaláb-plazma kölcsönhatások
- állapotegyenletek fizikája
- sugárzások és anyag kölcsönhatása
- atomfizika
- lézer és plazma kölcsönhatásai
- nyaláb-lézer kölcsönhatások
- nagy áramú kisülések
- tehetetlenségi összetartású fúzió
- hidrodinamikák és lökéshullámok

Fizika nagy energiasűrűség mellett (HED) – III.



A Lawson-kritérium

Feltétel:

D-T reakcióra, 50% fúziós hatásfokot feltételezve, amelyet a veszteségek ellensúlyoznak optimális hőmérsékleten:

Lawson-kritérium:

$$n\tau_E > 10^{20} [sm^{-3}]$$

n : sűrűség
 τ_E : energia-
összetartási idő

Kis n , nagy τ

Nagy n , kis τ

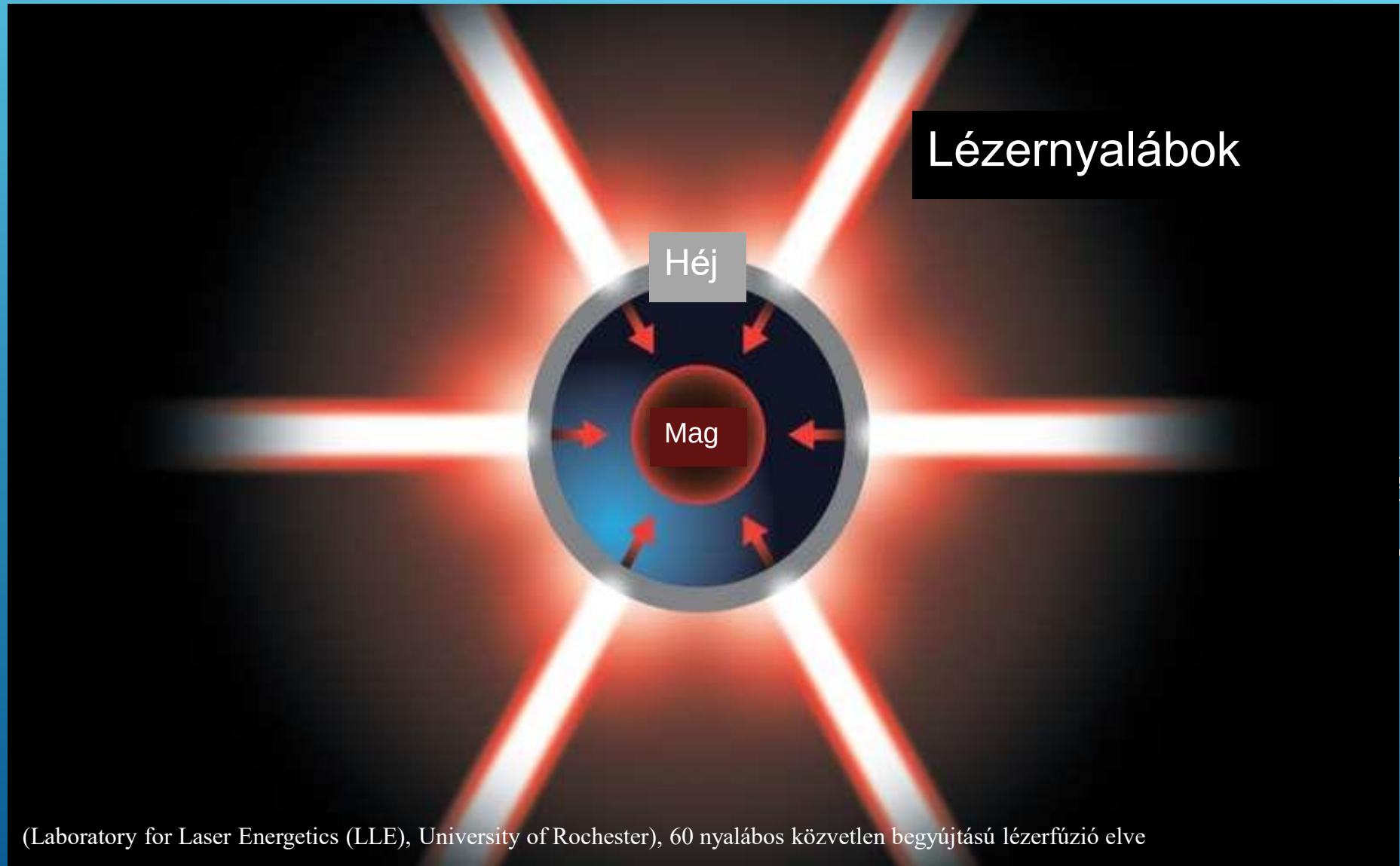
Fúzió mágneses összetartással

- tokamakok
- sztellarátorok

Tehetetlenségi összetartású,
vagy
mikrorobbantásos fúzió

- lézerfúzió

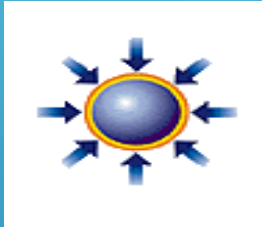
Lézeres fúzió alapelve



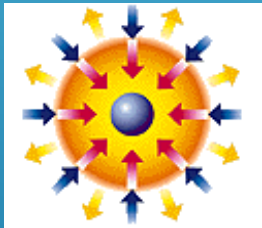
(Laboratory for Laser Energetics (LLE), University of Rochester), 60 nyalábos közvetlen begyűjtású lézerfúzió elve

Mikrorobbantásos fúziós módszerek – I/1.

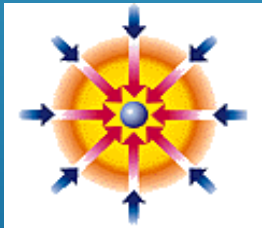
Mikrorobbantásos fúzió közvetlen összenyomással – Direct Drive ICF



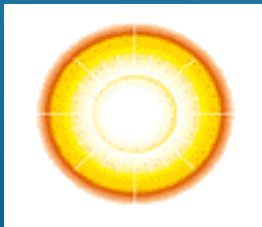
1. Nagyintenzitású lézernyalábokkal „izobár módon” és nagyon szimmetrikusan besugározzák a fúziós céltárgy felületét, ami által a pellet külső burka gyorsan felmelegszik.
BESUGÁRZÁS



2. A pellet külső burka ablálódik és eközben a rakétaelv szerint a belső üzemanyag (DT) összenyomódik.
ÖSSZENYOMÁS



3. A lézer impulzus időtartamának végén az üzemanyag mag a sűrűségét tekintve az ólom sűrűségének kb. 20-szorosára nyomódik össze, majd kb. 100.000.000 °C-on ég.
BEGYÚJTÁS



4. A mag kompressziója miatt termonukleáris égés indul ki a magból, ami szétterjed. A bevitt energia sokszorosa szabadul fel.
ÉGÉS

Mikrorobbantásos fúziós módszerek – I/2.

Milyen lézer kell??



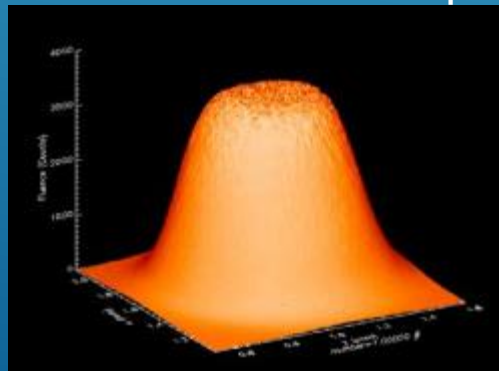
ELECTRA, KrF excimer lézer (NRL)
 $\lambda = 248 \text{ nm}$, 300-700 J, 1 Hz-5 Hz rep. rate
gáz lézer

- Nagyon jó nyalábminőség
- Nagyon jó fókuszálhatóság
- ns impulzushossz



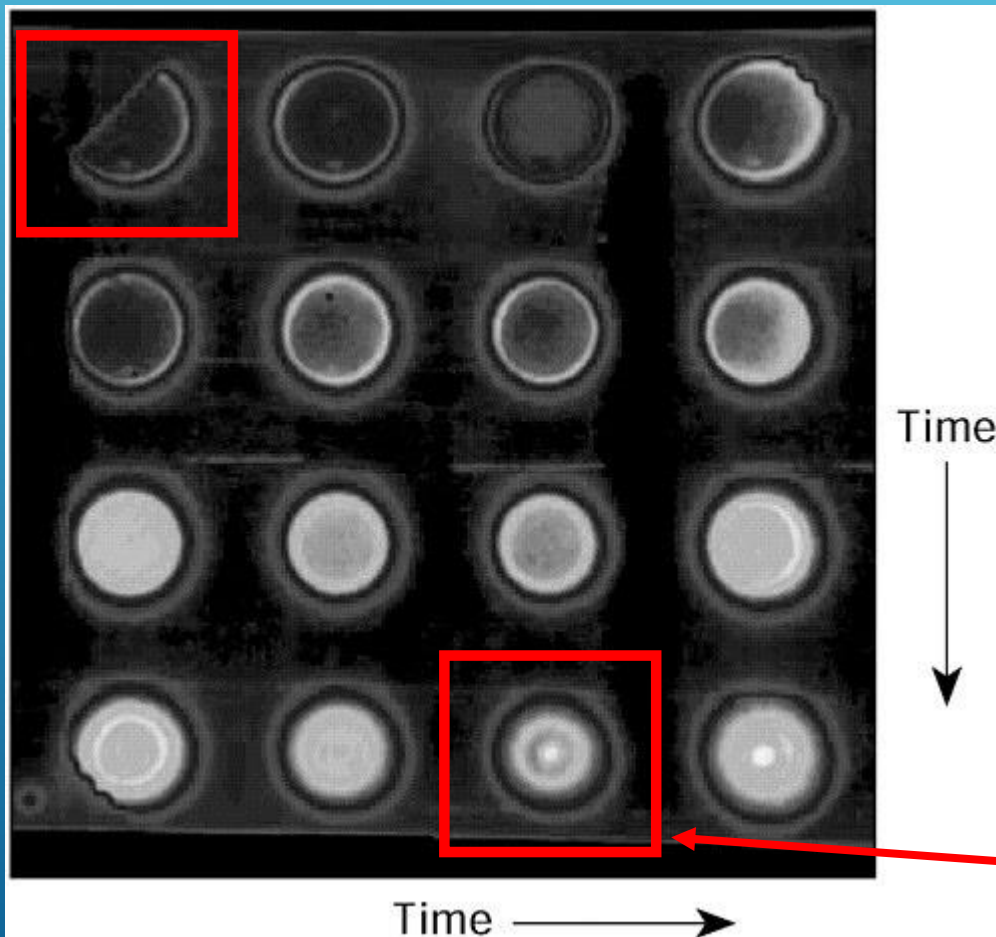
MERCURY (LLNL) DPPSL lézer
 $\lambda = 351 \text{ nm}$
dióda pumpált szilárdtest lézer

- nagy energia
- jó nyalábminőség



Mikrorobbantásos fúziós módszerek – I/3.

Mikrorobbantásos fúzió közvetlen összenyomással – Direct Drive ICF



Az OMEGA lézer egyik kísérletéről röntgen lyukkamerával készült felvétel a lézerrel való besugárzástól a pellet belsejében képződő forró folt megjelenéséig.

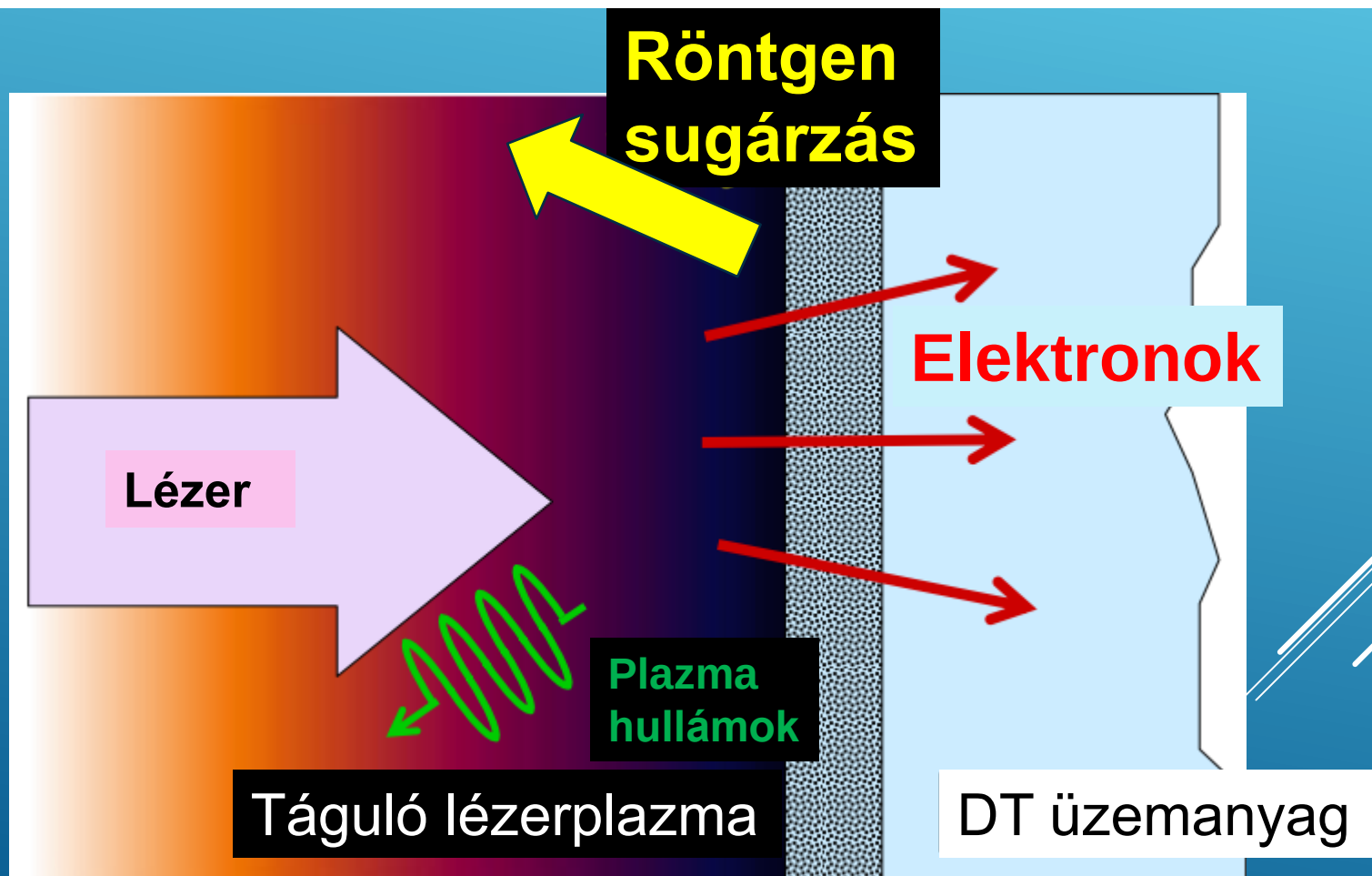
A képek 50 ps-onként készültek. (A „teljes mozi hossza” 3,2 ns.)

A céltárgy átmérője kezdetben ~1 mm, míg az összenyomott mag átmérője $< 100 \mu\text{m}$.

Mikrorobbantásos fúziós módszerek – I/4.

A lézerfény – anyag kölcsönhatása során instabilitások lépnek fel:

- a.) nagyenergiás elektronok keletkeznek, és „előfűtik” a DT anyagot
- b.) a lézernyalábok egy része szóródik, így a lövés hatásfoka csökken

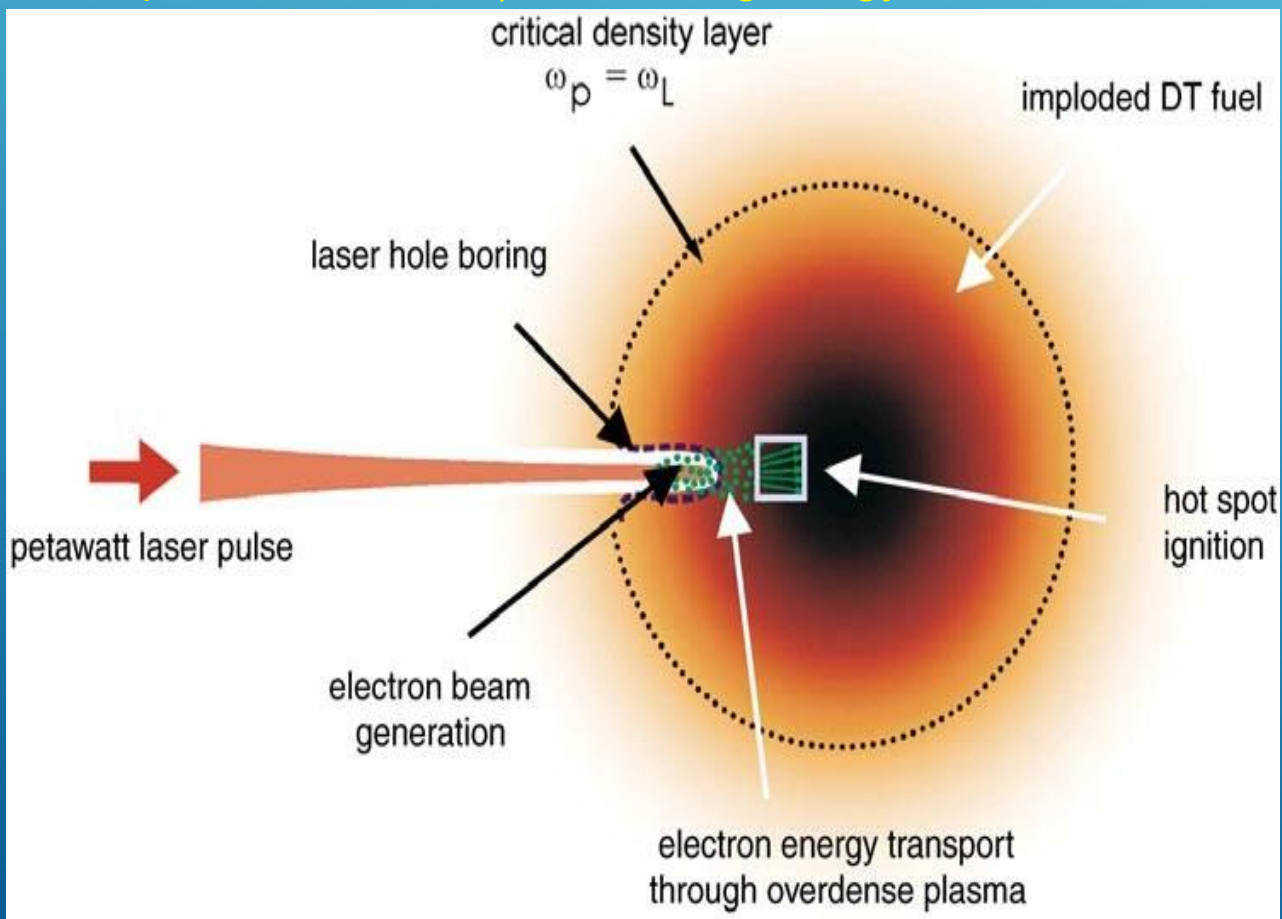


Mikrorobbantásos fúziós módszerek – II/1.

Közvetlen, gyors begyújtásos lézerfúzió – Fast Ignition ICF

„Egy vad ötlet!”

M. Tabak és mtsai., 1994.: Nagyteljesítményű ultrarövid lézerimpulzusokkal (10^{18} - 10^{21} W/cm²) MeV energiára gyorsított részecskék hozhatók létre...



Közvetlen összenyomás mellett ultraintenzív lézernyalábot fókuszálnak a target felületére.

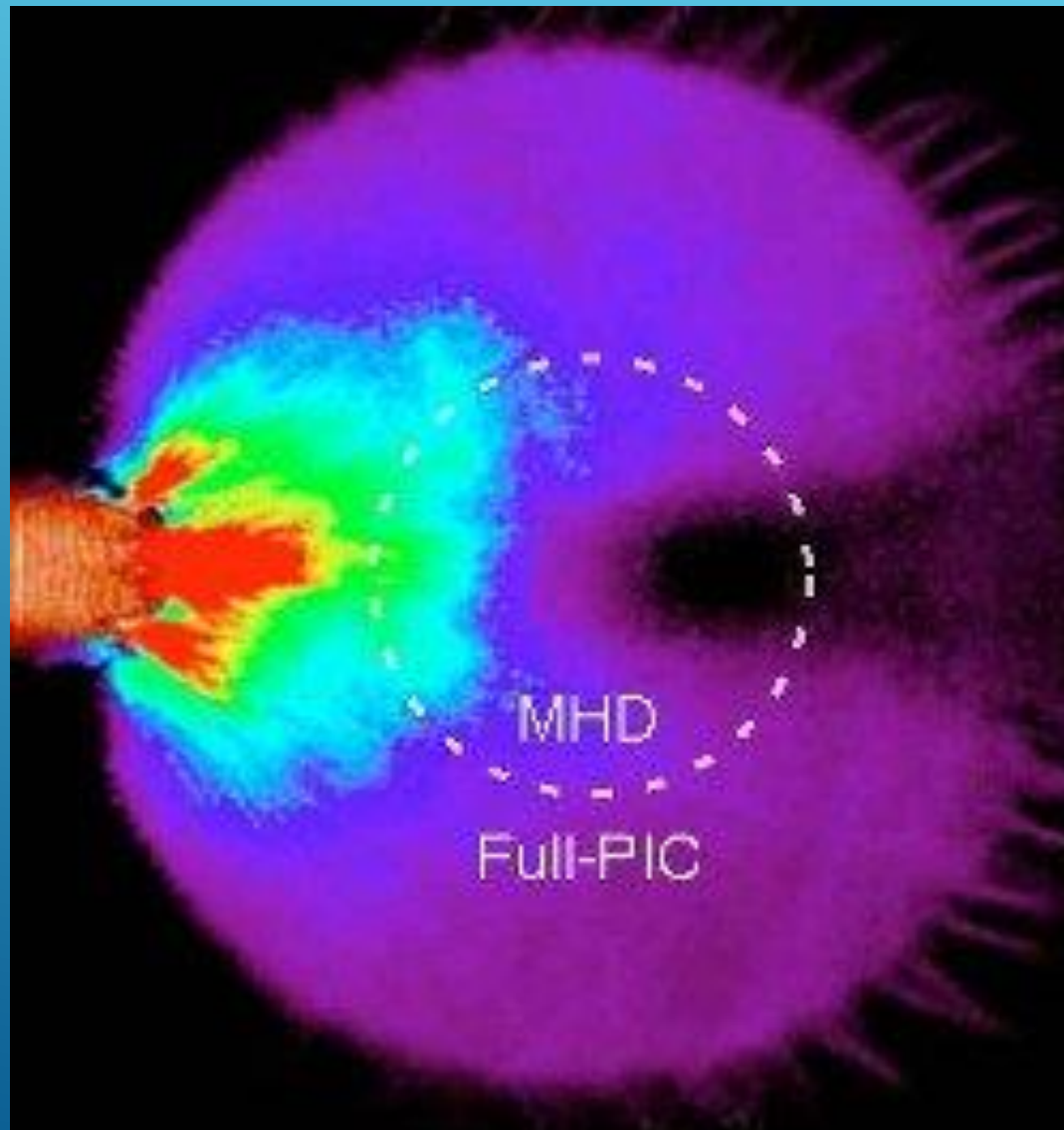
A plazmacsatornában gyorsuló elektronok izochor fűtés segítségével fűtik fel a céltárgyat, és a gyors elektronok, mint egy „külső szikra” gyújtják be a fúziót.

Kisebb szimmetria követelmények vannak az összenyomásra.

Kisebb pumpáló energia szükséges. Energia takarítható meg.

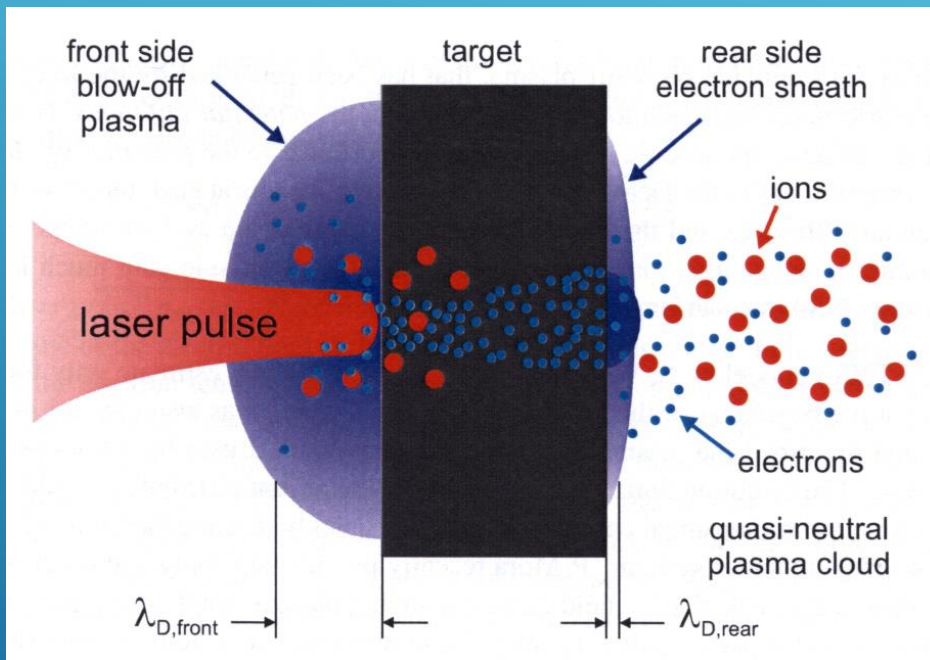
Mikrorobbantásos fúziós módszerek – II/1.

Közvetlen, gyors begyújtásos lézerfúzió – PIC szimuláció



A lézerfúzióhoz köthető fontosabb alapkutatási területek

Gyors töltött részecskék keltése és töltött részecskék gyorsítása lézerplazmákban



(M. Kaluza, Ph.D. értekezéséből)

Az anyag belsejében terjedő gyors elektronok az anyagban jól kollimáltan terjednek.

Az intenzív lézerimpulzust a mintán keltett előplazmába fókuszálják.

Az elektronok gyorsulnak a lézer fókuszában, majd

keresztülhaladnak a céltárgyon. Eközben töltés-szeparáció révén elektromos tér épül fel.

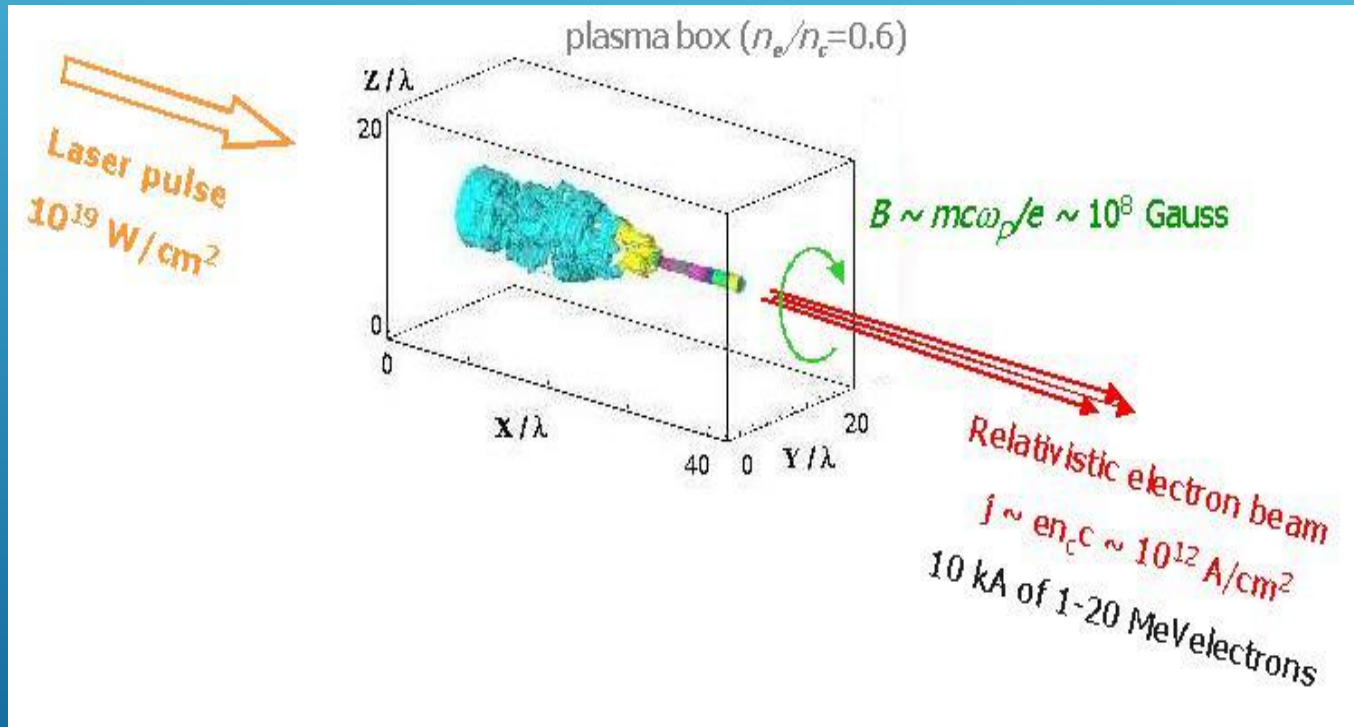
Az elektronok a minta hátoldalán kilépnek az anyagból és eközben a hátoldalon vékony elektron burok keletkezik.

Az így keletkezett elektromos mező ionizálja az atomokat a minta hátoldalán, majd gyorsítja azokat a céltárgy normálisának irányában.

A lézerfúzióhoz köthető fontosabb alapkutatási területek

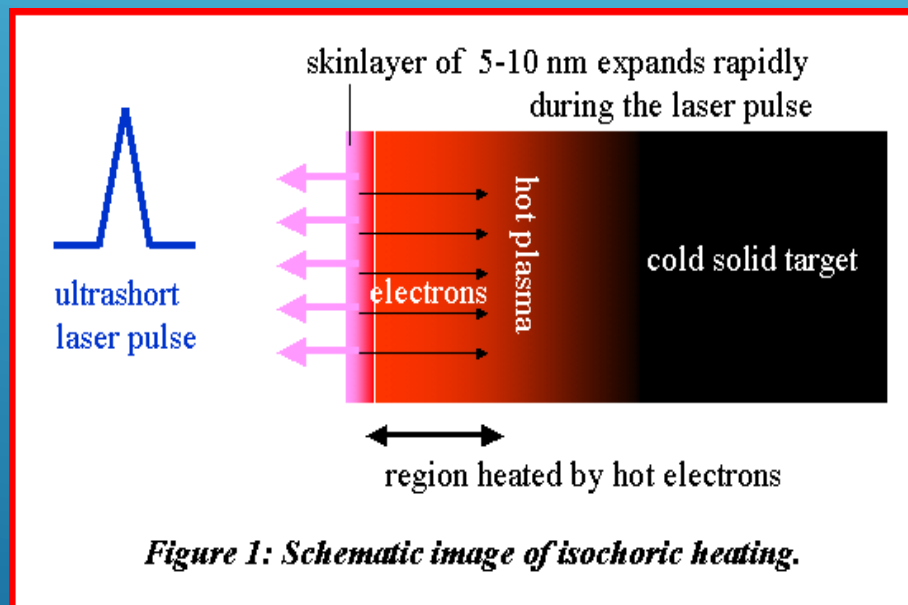
Plazmacsatornák, filamentek keltése lézerplazmákban

Particle-In-Cell (PIC) szimuláció a lézerfény relativisztikus önfókuszálódása következtében létrejött plazmacsatornához, filamenthez.



A közvetlen gyors begyújtás motorja: izochor fűtés

Izochor fűtés



K. Eidmann et. al.

Gyors begyújtás esetén a forró elektronok rövid idő alatt viszik be az energiát a sűrű anyagba. Az nem tágu, a fűtés izochor.

Izochor fűtés egyszerű lézerplazmában:

A lézerenergia az 5–10 nm vastag szkin-réteg előtt elnyelődik.

Az energiát a koronában keletkezett forró, ~20keV elektronok viszik a sűrű szilárdtestbe, akár 400 nm mélységbe.

Jelentőség még: csillagok belsejének modellezése,

Vizsgálati módszer:
röntgenspektroszkópia

A „gyors begyújtás” a gyors elektronok izochor fűtésén alapul.

A lézerfúzióhoz köthető fontosabb alapkutatási területek

Relativisztikus önfókuszálás

Lézerfény fókuszálása során az intenzitás a fókuszsíkbán:
(A: a fókuszolt keresztmetszete, τ : a lézer impulzushossza)

$$I = \frac{E}{A \cdot \tau}$$

Relativisztikus lézerintenzitásról beszélünk, ha a lézerplazma elektronjai az adott intenzitású hely közelében relativisztikus sebességgel mozognak.

Relativisztikus sebességgel mozgó elektronok tömege megnő (relativisztikus tömegnövekedés).

A plazma törésmutatója:

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_L^2}} = \sqrt{1 - \frac{4\pi n_e e^2}{m_e \omega^2}}$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}$$

Azaz a relativisztikus sebességgel mozgó elektronok környezetében a plazma törésmutatója megváltozik; itt a fény terjedésekor egyfajta gyűjtőlencse hatás lép fel, azaz a plazmában terjedő fény fókuszálódik.

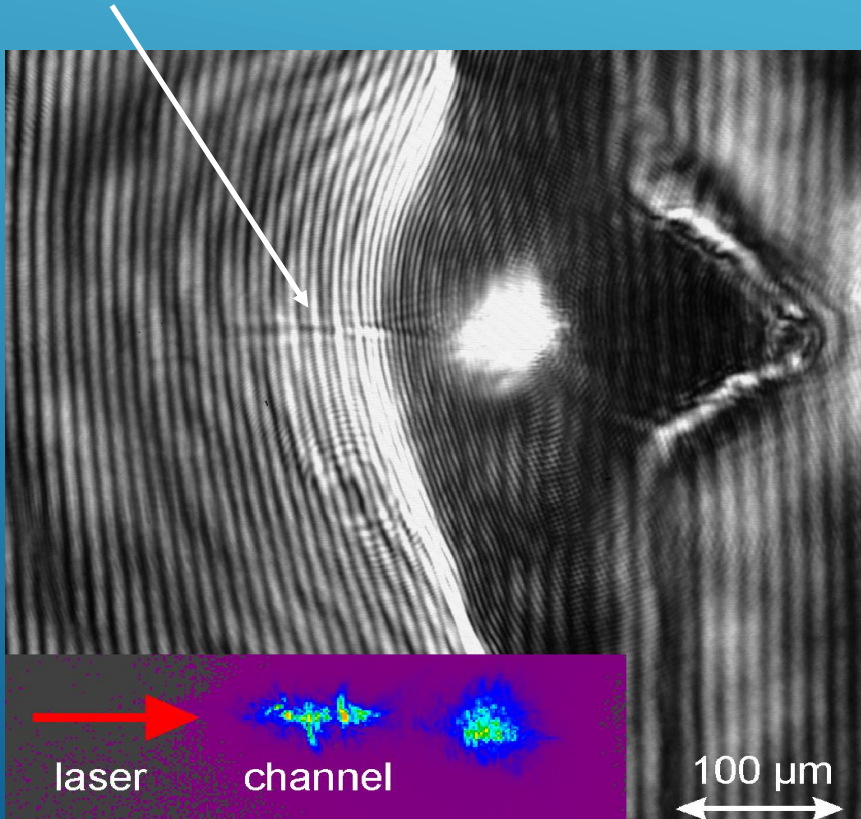
A jelenséget relativisztikus önfókuszálódásnak nevezzük.

A lézerfúzióhoz köthető fontosabb alapkutatói területek

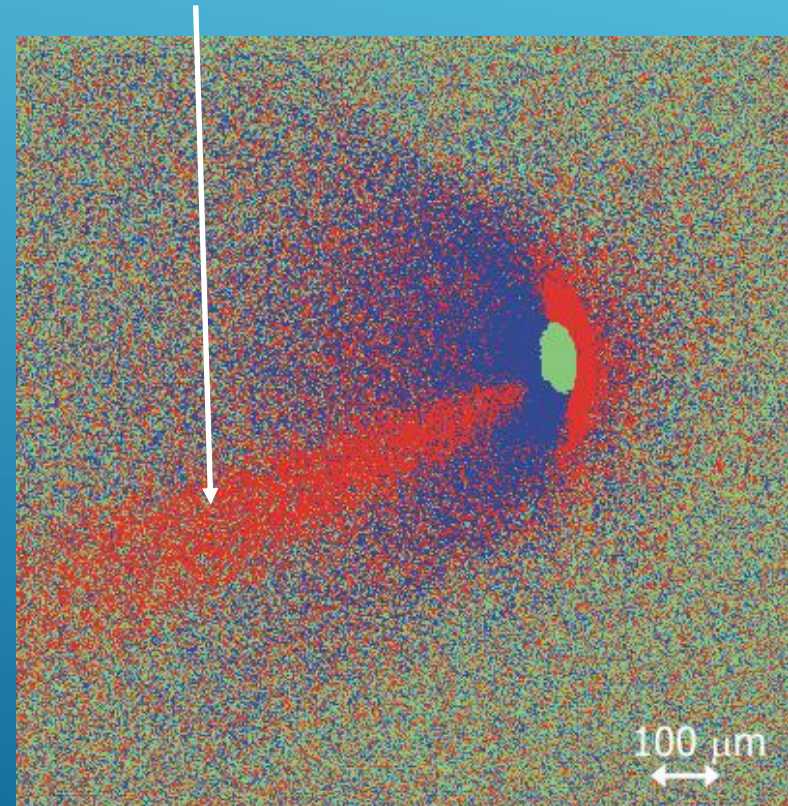
Plazmacsatornák, filamentek képzése lézerplazmákban

A lézerfény relativisztikus önfokuszálódásának következménye.

Plazmacsatorna, filament



Röntgen emisszió



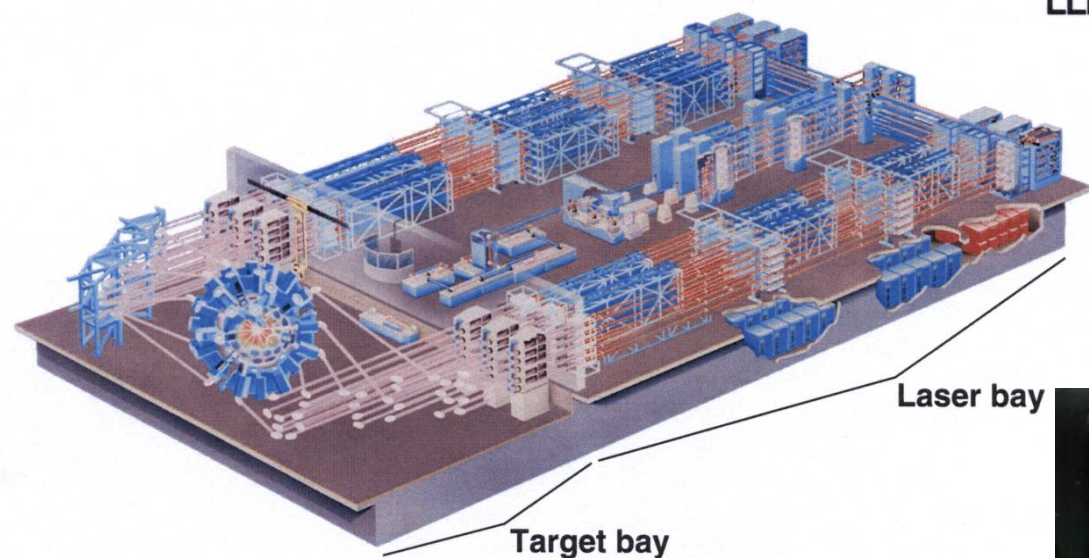
Röntgen lyukkamerás felvétel

interferogram (látható hullámhossztart.)

Mikrorobbantásos fúziós módszerek

Mikrorobbantásos fúzió közvetlen összenyomással – Direct Drive ICF

The OMEGA laser is the most powerful UV laser for fusion research in the world



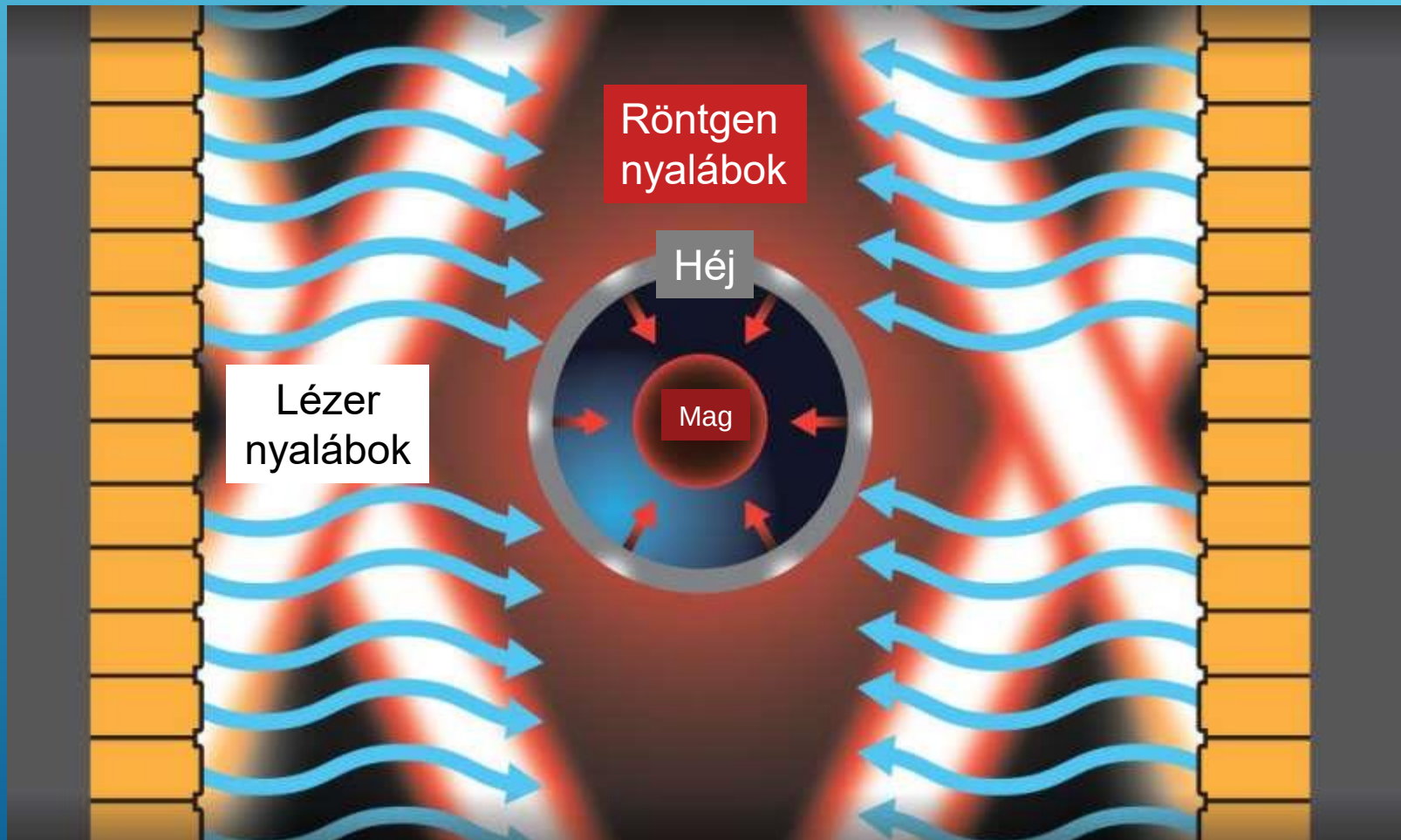
- 60 nyaláb
- >30 kJ UV a targeten
- 1–2% besugárzási egyenetlenség
- impulzusformálás
- rövid lövési ciklus (1h)

University of Rochester,
OMEGA lézer



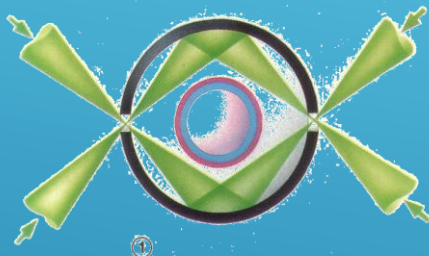
Mikrorobbantásos fúziós módszerek

Mikrorobbantásos fúzió indirekt összenyomással– Direct Drive ICF

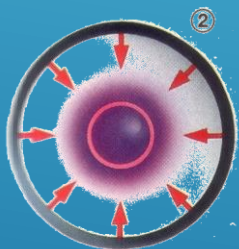


Mikrorobbantásos fúziós módszerek

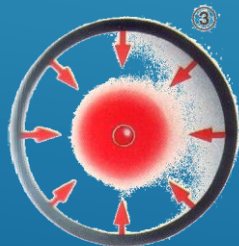
Mikrorobbantásos fúzió indirekt összenyomással– Direct Drive ICF



1. A céltárgy egy belül üreges, nagy rendszámú anyagból készített (pl. arany) tartóban helyezkedik el. **Hohlraum** céltárgy A gerjesztő lézerekkel a Hohlraum falát lövik meg.



2. A Hohlraum falán a beérkező lézersugárzás nagy hatásfokkal (kb. 60–80%-ban) röntgensugárzássá konvertálódik. Ez a röntgensugárzás a tartó közepe felé tart,

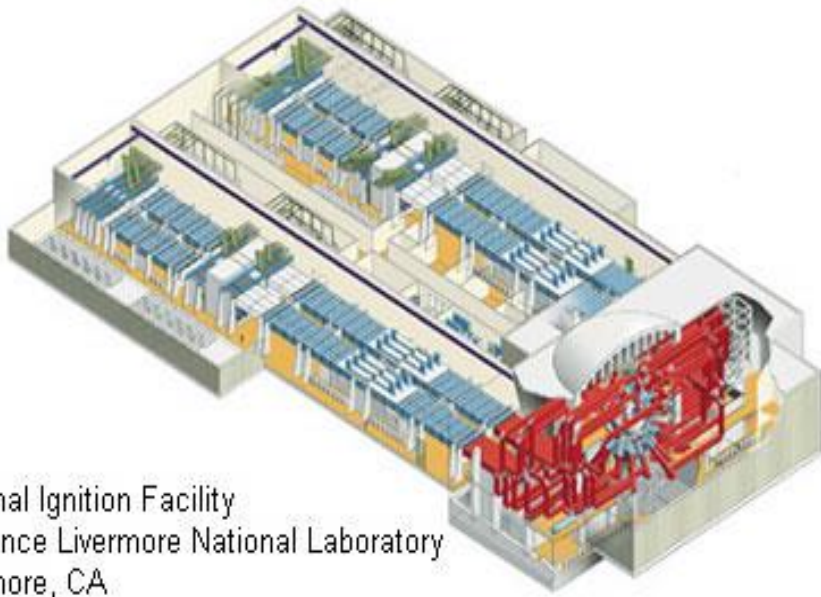


3. majd ez a röntgensugárzás nyomja össze a tartó közepén elhelyezett fúziós kapszulát.

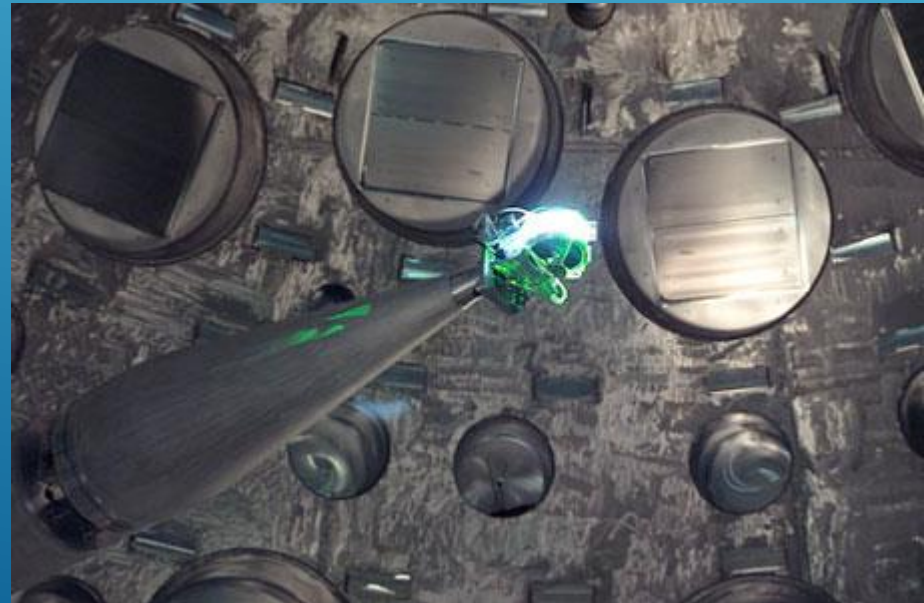


4. Végül a kapszula megfelelő sűrűségénél létrejön az üzemanyag begyújtása, majd a fúziós égés.

NIF – 192 lézernyaláb (2 MJ)



National Ignition Facility
Lawrence Livermore National Laboratory
Livermore, CA



Mikrorobbantásos fúzió: target dizájn – I.

Inertial Fusion Targets 2005

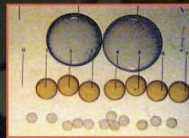
Fabrication, Characterization, and Production of Equipment and Targets
Produced and Manufactured by General Atomics and Schafer Corporation

Capsules — Glass and Polymer

NIF – 2 mm

Omega – 1 mm

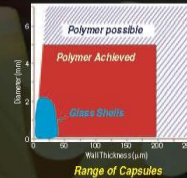
Nova – 0.5 mm



Typical Capsules



Foam Shells



Micromachined Components



Witness Plates



NIF Cryo Hohraum

Coatings



GDP Coater



Multiple GDP (Glow Discharge Polymer) Layers Doped with Si, Ga, Ti, Cl, Cu, or D

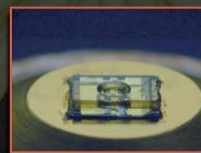
Targets



Target for Z (Radiograph of Shell Embedded in Foam)

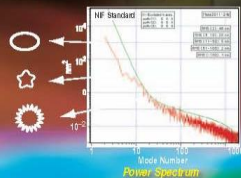


Fast Ignition Target



NRL EOS Target

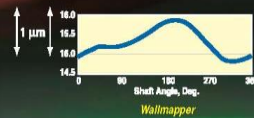
Target Characterization



Power Spectrum



Spheremapper/Wallmapper



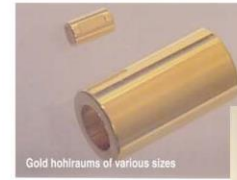
Wallmapper

GENERAL ATOMICS

Schafer

GENERAL ATOMICS

EXAMPLES OF MICROMACHINED COMPONENTS



Gold hohlraums of various sizes



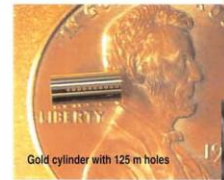
Gold cylinders with flat flanges



Gold cones



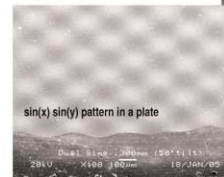
Epoxy hohlraums



Gold cylinder with 125 m holes



Square tubes

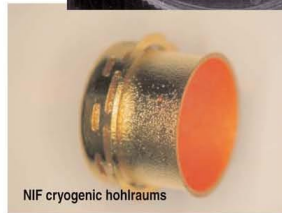


sin(x) sin(y) pattern in a plate

Mikrorobbantásos fúzió: target dizájn – II.



EXAMPLES OF MICROMACHINED COMPONENTS (Cont.)



For more information please contact:

Dr. Jim Kaae
Head, Center for Target Component Fabrication Development
James.Kaae@gat.com
Phone: (858) 455-2575

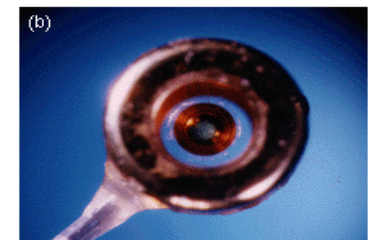
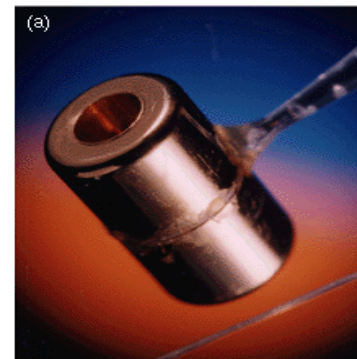
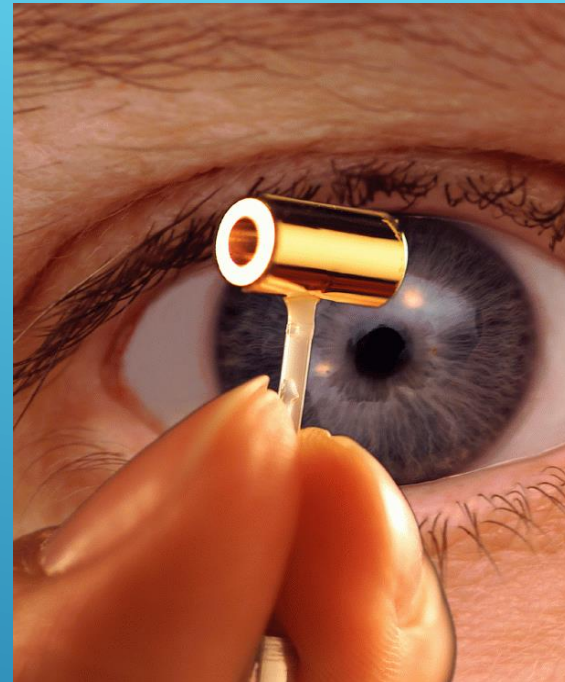
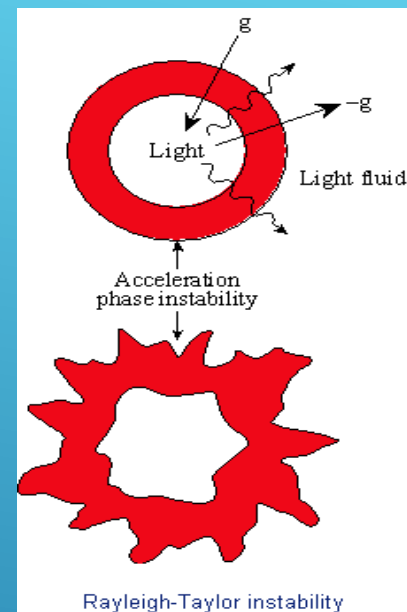
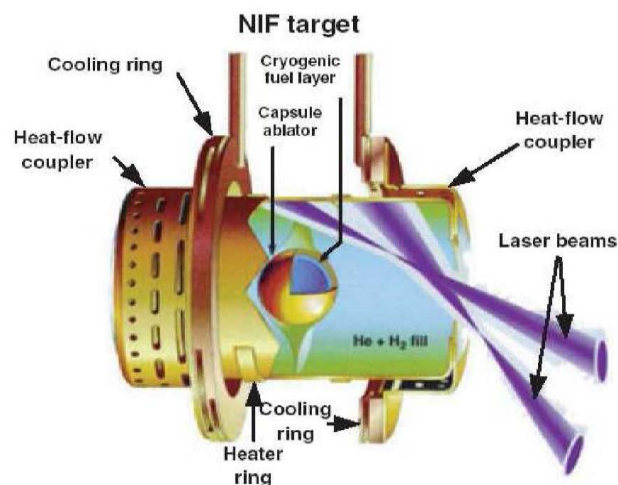
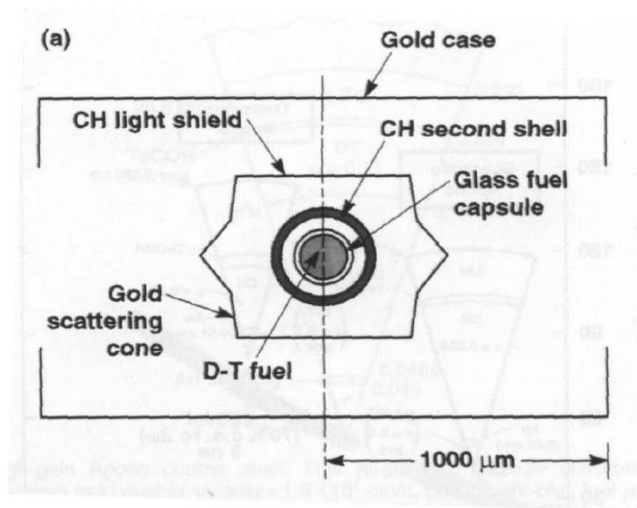
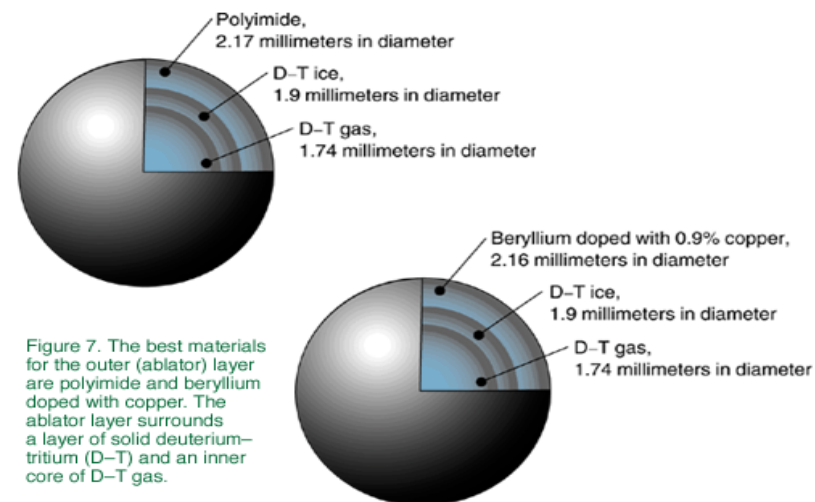


Figure 3. (a) Side view of a typical Nova hohlraum shown next to a human hair. (b) The end-on view shows a target within the hohlraum. Hohlraums for the National Ignition Facility will have linear dimensions about five times greater than those for Nova.

Mikrorobbantásos fúzió: target dizájn – II.



A Rayleigh-Taylor instabilitásnak fontos szerep jut!



Előnyök, hátrányok

Mikrorobbantásos fúzió:

Mivel korábban (részben ma is) a katonai alkalmazások miatt támogatták, kevesebb publicitást kap, pedig várhatóan az önfenntartó kisülésnek megfelelő nagy hozam megvalósulása küszöbön áll. A korábbi bombatesztek sikere miatt ez nem nagyon kétséges. A mikrorobbantásos fúzió előnye, hogy az első fal a kamra fala, ami távol van, így kisebb a terhelése.

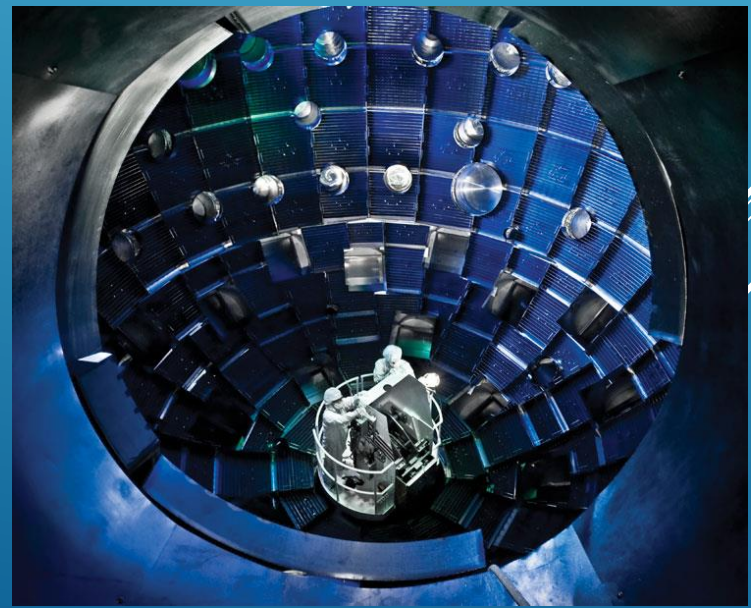
Reaktorséma problematikája:

Pillanatnyilag nincs olyan driver, ami több Hz-cel működne.

→ Diódával pumpált szilárdtestlézer (melegedés?), excimerlézer (összlövényszám, technológia), ionnyaláb (fókuszálás), Z-pincs (felrobbanó kábelek). Hűtött targetek nagy ismétlődési frekvenciával való beinjektálása: Különösen az indirekt fúziónál és a kúpos gyors begyújtásnál nem tűnik kivitelezhetőnek, továbbá ott a szétszóródó anyag terhelése a falra nagy lesz.

A szabályozott termonukleáris fúzió több sémája is működni látszik, demonstrációk a közeljövőben várhatók. Az energiatermelő reaktor megvalósításáig még számos problémát meg kell oldani. Ma még nem tudni, mi lesz a nyerő módszer.

NATIONAL IGNITION FACILITY



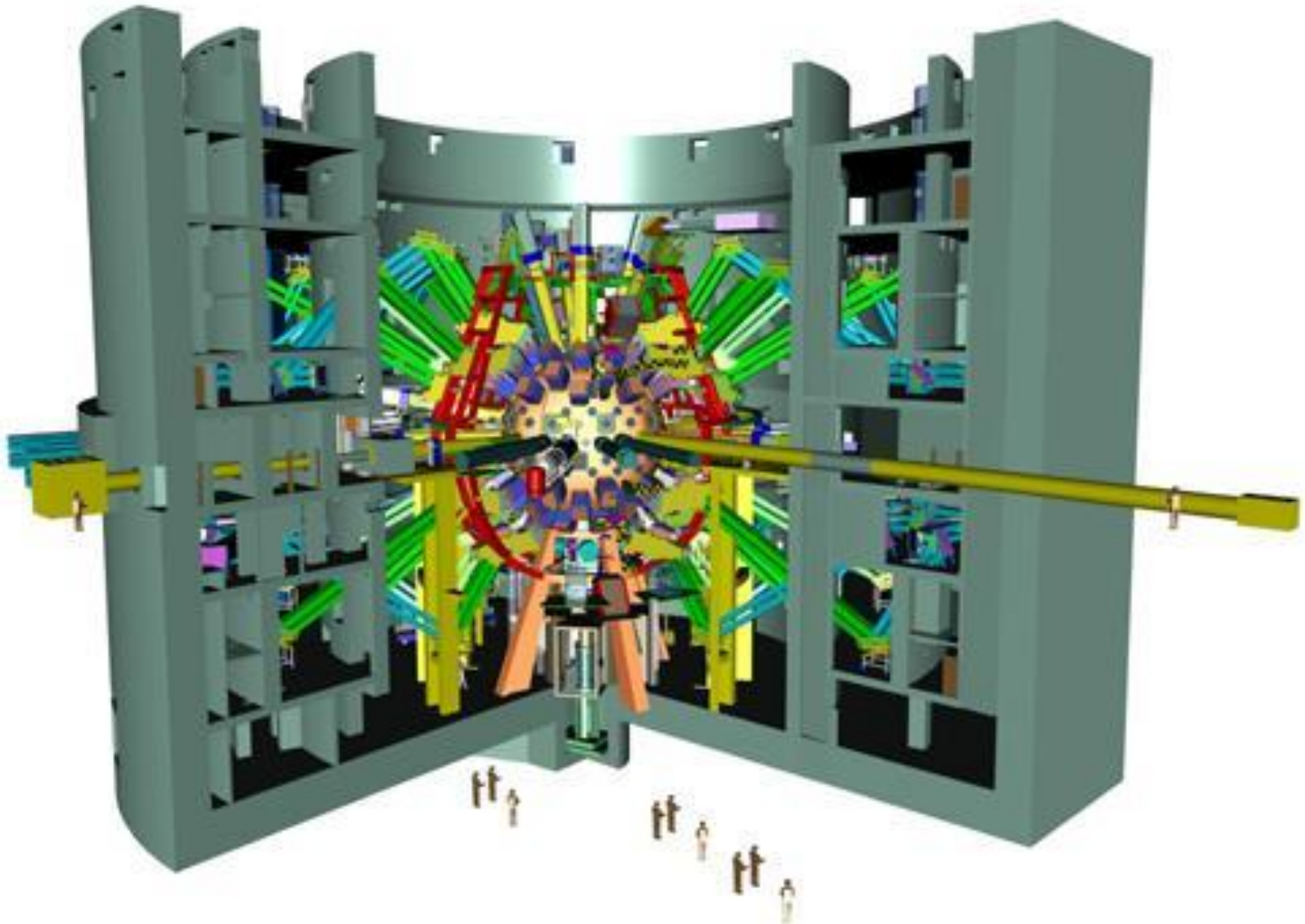
NIF



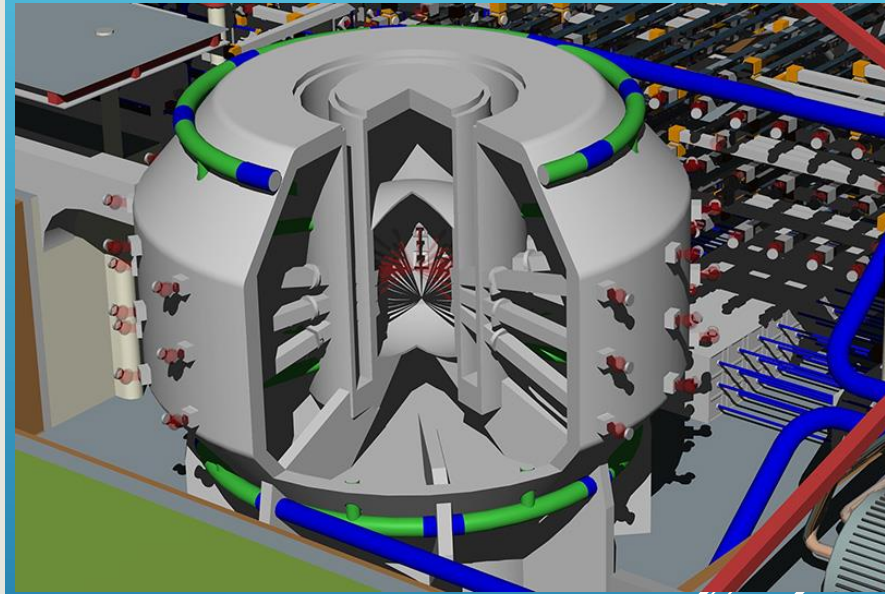
LASER MEGAJOULE (FRANCIAORSZÁG)



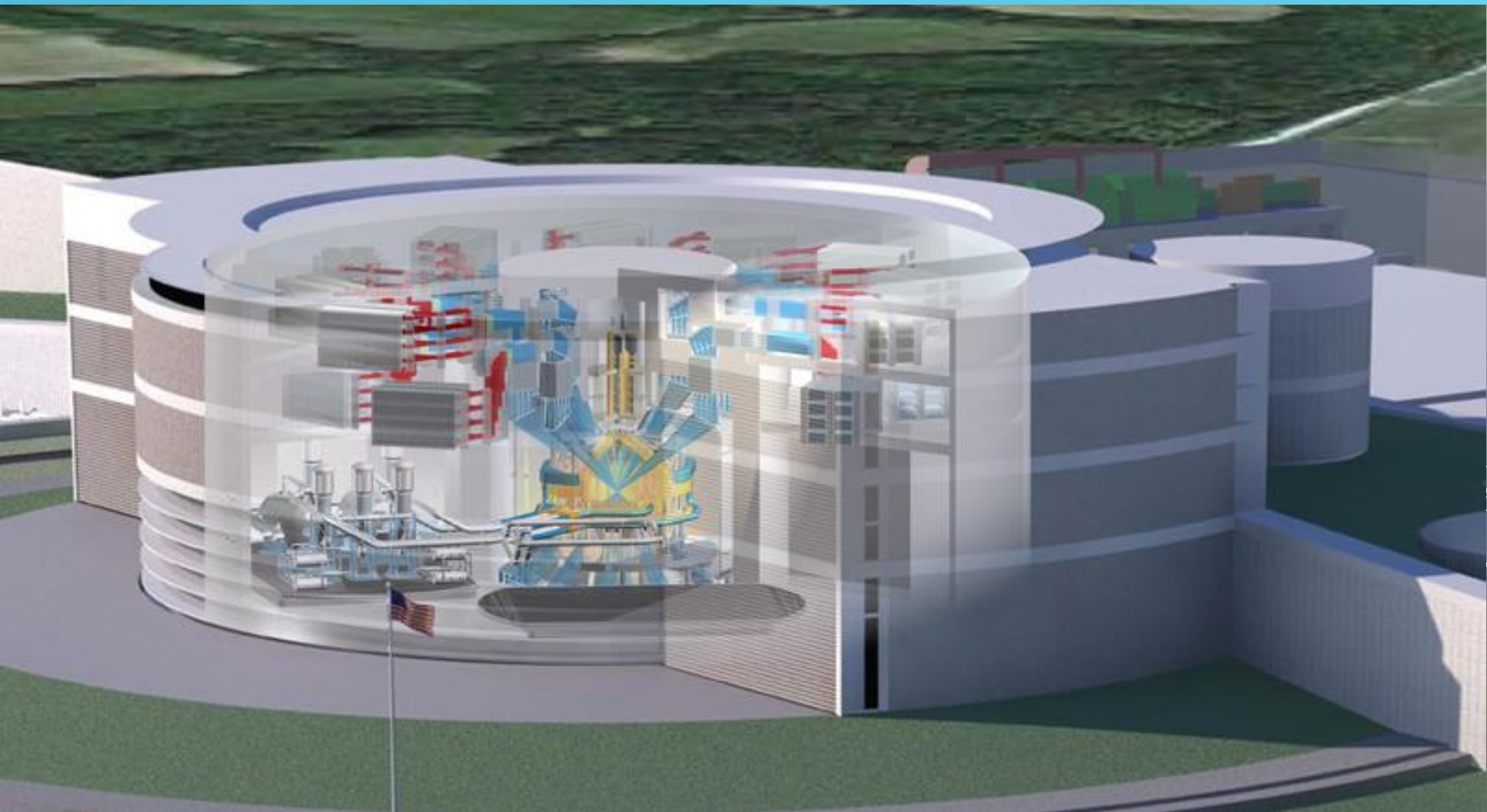
LASER MEGAJOULE (FRANCIAORSZÁG)



HIPER HIGH POWER LASER ENERGY RESEARCH FACILITY



LASER INERTIAL FUSION ENERGY



Mire elég??? -- Mire ég el???



100 tonna szén elégetésével kb 1 GWe-os erőmű 10 percreg működtethető.
Ugyanennyi mennyiségű lézerfúziós céltárgy elégetésével működő 1 GWe-os erőmű 7 évig működhet!

Köszönöm szépen a megtisztelő figyelmet!

OMEGA lézer és a hozzá kötődő projektek

www.lle.rochester.edu

NIF lézer és a hozzá kötődő projektek

www.llnl.gov/nif

NOVA lézer és a hozzá kötődő kísérletek

www.llnl.gov/str/Remington.html

LASER MEGAJOULE és a kapcsolódó projektek

www-lmj.cea.fr/html/cea.htm

Saját honlap

<http://uni-obuda.hu/users/racz.ervin/>