



# **NANOPLAZMONIKUS LÉZERES FÚZIÓS PROGRAM (NAPLIFE) II.**

**Csernai László P.  
Bergeni Egyetem, Norvégia és  
Wigner Fizikai Kutatóközpont**

**NEIF, Budapest, 2020.10.29**

- **II. A**

# **A Fenntartható Fejlődés**

**Nem fenntartható megrekedés  
vagy visszafejlődés! Fenntarthatóság**

**Brundtland Commission (1987):**

*“Sustainable development is development of the that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.”*

# Mennyiségi Definíció



- 3.8 milliárd éve jelent meg az élet a Földön prokaryotic egysejtűekben, baktériumokban. Azóta az anyag állandó fejlődésen megy keresztül, egyre növekvő komplexitású anyagi szervezetekben a biológiában és technológiában.
- *Erwin Schrödinger*, a kvantum-mechanika felfedezője, “*What is Life*” (1944), című könyvében írta le először, hogy a fejlődés csak a növekvő **Komplexitás** irányába lehetséges (ő az “**orderliness**”, *rendezettség* kifejezést használta). Azaz a fejlődés iránya a:
- Csökkenő **Entrópia**. (Ez precíz és számszerűen meghatározott!)
- Komplex anyagok → fejlődés → növekvő komplexitás
- **Csökkenő Entrópia:** Lehetséges ez és folytatódhat?

# Növekvő Komplexitás → Entrópia

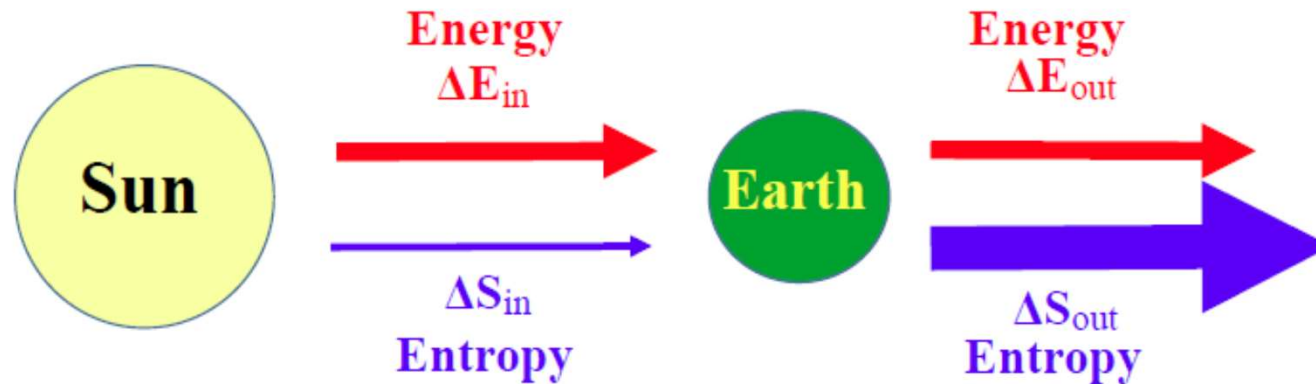
A kémiai és biológiai fejlődés:

Material or tissue	Entropy, S, for 1 kg [ J/K°]
H <sub>2</sub> – ideal gas hydrogen	58.3 · 10 <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> O – water vapor, ideal gas	8.24 · 10 <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> O – liquid water, T = 100 C°	4.43 · 10 <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> O – liquid water, T = 0 C°	3.12 · 10 <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> O – water ice, T = 0 C°	1900.2
UF <sub>6</sub> – Uranium-hexa-fluoride, ideal gas	513.2
C <sub>60</sub> – Fullerene, ideal gas	263.2
DNA molecule* of <i>Candidatus Carsonella ruddii</i> (CCr)	1.79 · 10 <sup>-96105</sup>
Human DNA	3.96 · 10 <sup>-1 974 000 000</sup>
One state of the Human brain tissue	~ 10 <sup>-301 000 000 000 000</sup>

\*DNA molecule of the smallest bacteria, with only N = 159 662 base pairs.

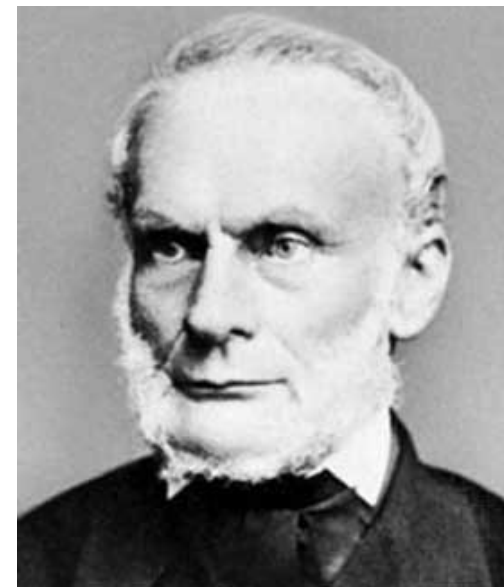
[ L.P. Csernai, S.F. Spinnangr, S. Velle, Quantitative assessment of increasing complexity, *Physica A* 473 (2017) 363–376, arXiv: 1609.04637.]

# A Föld Energiája & Entrópiája



- Entrópia változás:  $\Delta S = \Delta E / T$ .
- Az energia a Napból és a Földről kisugárzott energia közel azonos:  $\Delta E$ .
- A beérkező napsugárzás hőmérséklete magas:  $T_{in} \approx 6000 \text{ K}$
- A Föld viaszugárzása a világűrbe alacsonyabb:  $T_{out} \approx 300 \text{ K}$
- Így a Föld entrópiájának változása:  $\Delta S = \Delta E / T_{in} - \Delta E / T_{out} < 0$  !!!
- **Negatív  $\Delta S \rightarrow$  Növekvő Komplexitás**
- Ezt a Föld atmoszférája teszi lehetővé, különösen a benne lévő víz!
- A víz a Földön 3 fázisban van jelen: jég, víz, gőz  $\rightarrow$  **Termosztát !!!**

# Energia, Hő & Entrópia, Víz



1865 Rudolph Clausius

- A **Napról** érkező energia legnagyobb része **Hővé** alakul.
- A Földön a **Fejlődéshez** viszonylag magas hőmérsékletre,  $T \sim 300\text{K}$ , van szükség, hogy a kémiai és biológiai reakciók megfelelő **sebességgel** menjenek végbe.
- A **víz** mint **termosztát** (az olvadó jég látens hője) egyensúlyban tartja a hőmérsékletet az utóbbi 10000 – 30000 évben →
- A Föld nagy mennyiségű **Entrópiát sugároz ki**, és ez teszi lehetővé a **fenntartható fejlődést**.
- [ L.P. Csernai, I. Papp, S.F. Spinnangr and Yilong Xie, Physical Basis of Sustainable Development, *Journal of Central European Green Innovation*, 4, 39-50 (2016), arXiv: 1612.06439. ]

# Fenntartható fejlődés - Energia & Entrópia

- A fenntartható fejlődéshez **Csökkenő Entrópia** kell, mert komplexebb állapotokat kell létrehozni. Ehhez pedig **Energia szükséges (!)**.
- Ezt az energiát a lehető **legkisebb Entrópia** **produkcióval** kell előállítani. →  
**Maximális hatásfok!**
- Például **vízenergia**

# Vízerőmű

- Three Gorges Dam **22.5 GW**  
(103 TWh/yr) 2014 Kína →
- The largest hydropower turbines (Enclosed turbines.):
- P= **767 MW** Francis turbina  
**Hatásfok:**  $\eta \sim 94\%$ .  
Veszteség:  $\sim 6\%$  →  
Hő (Entrópia)
- A legjobb **energiatároló**





# Szélerőmű Statoil HyWind pilotpark, Skócia

- **Egy turbina = 6MW**
- **Torony: 2200 tonna acél** ← 30.4 GWh |
- **Ballaszt: 8100 tonna beton** ← 6.3 GWh |
- ~3.5 év termelés
- **Merülés: 78 m**

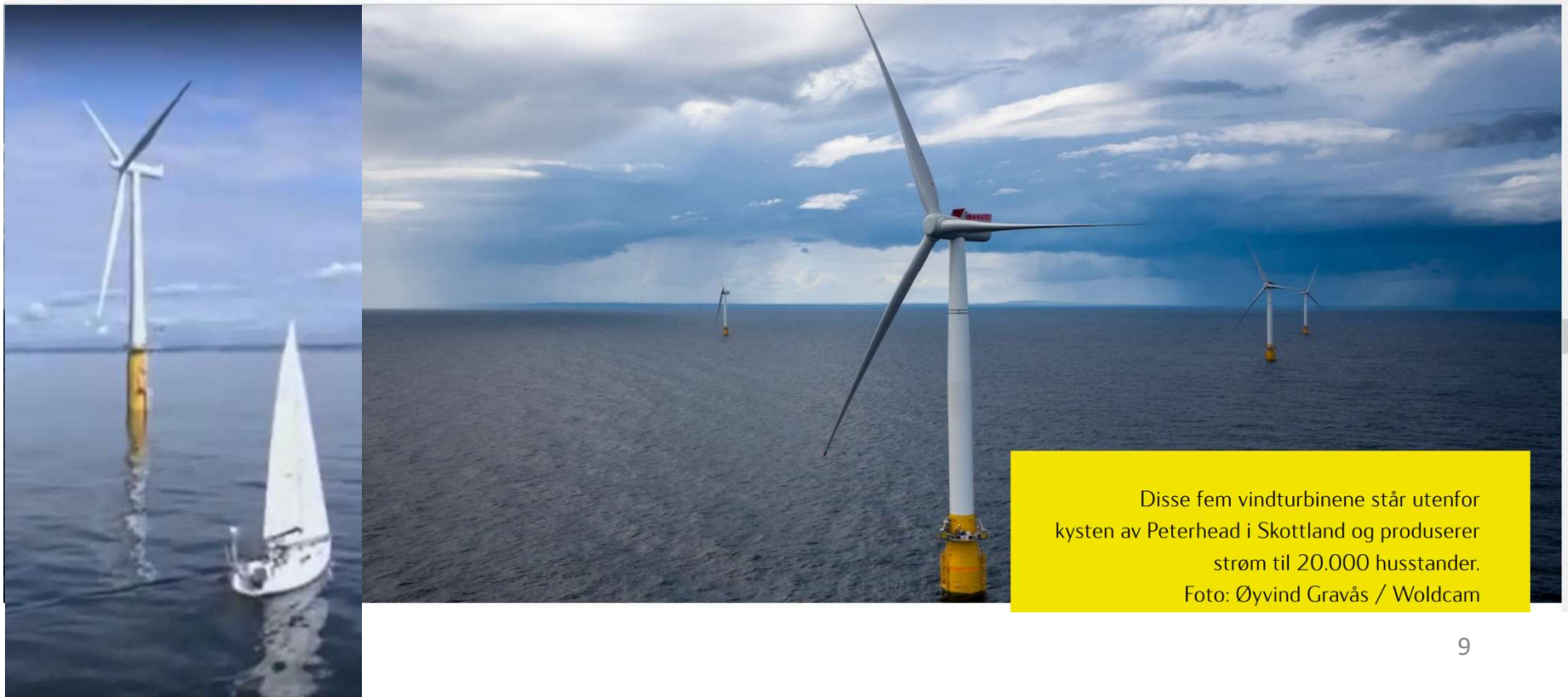
H= 253 m,  
Turbina Ø : **d=154 m**,  
30 MW: (5x 6 MW turb.)



Statoil

ANNONSØRINNHOLD

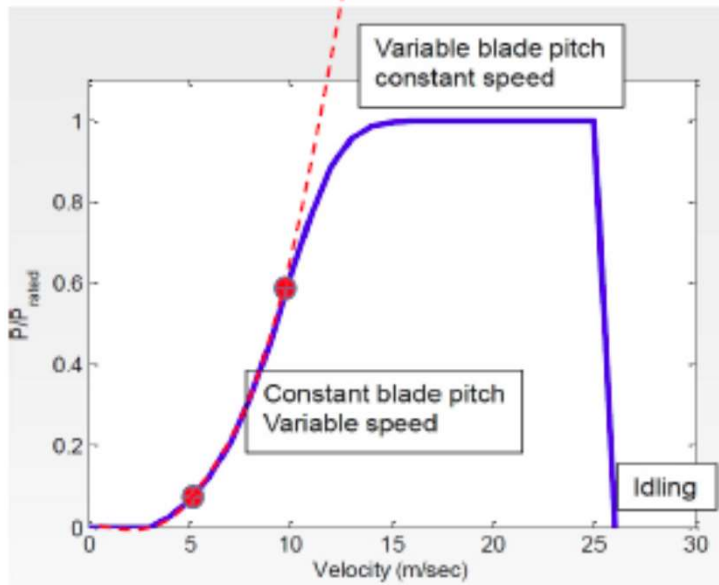
Aftenposten



Disse fem vindturbinene står utenfor kysten av Peterhead i Skottland og produserer strøm til 20.000 husstander.  
Foto: Øyvind Gravås / Woldcam

# Szélerőmű hatásfoka (HyWind)

- A szél mozgási energiaja/s:  
 $P = E_k/s = M v^2/2$
- Az átáramló levegő tömege:  
 $M = \rho r^2 \pi v \rightarrow P \sim v^3 !$
- $E_k = 32.6 - 185.6 \text{ MW}$  -- 14–25 m/s szél-sebességnél
- De  $P_{\max} = 6 \text{ MW}$  constant !
- **A hatásfok változik:**
  - $\eta = 18.4 \%$  -- 14 m/s (max)
  - $\eta = 3.2 \%$  - 25 m/s szél-sebességnél



← [ Finn G. Nielsen, UoB GFI, 2017 ]

# Szélerőmű – Entrópia termelés



Turbulens áramlás →

Látható kondenzáció

A látens hő melegíti a léggömböt

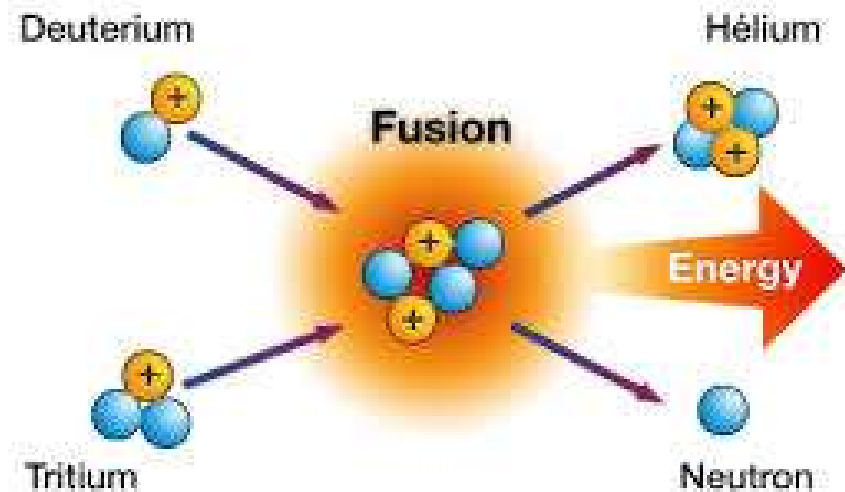
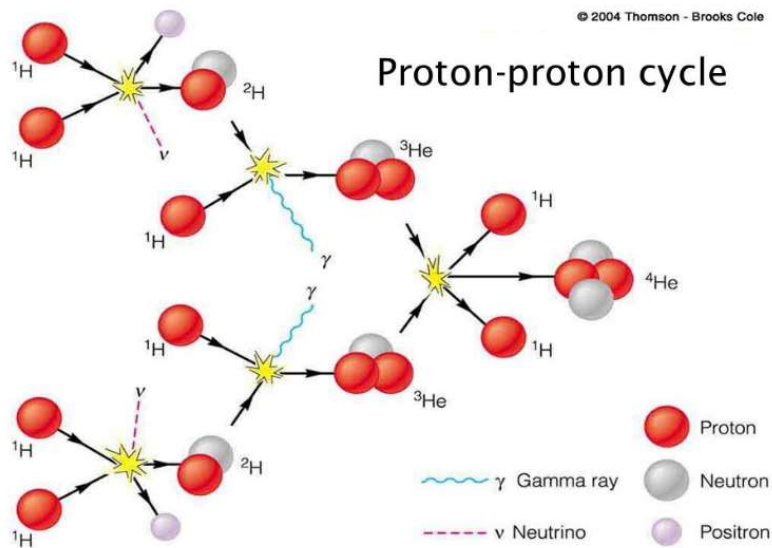
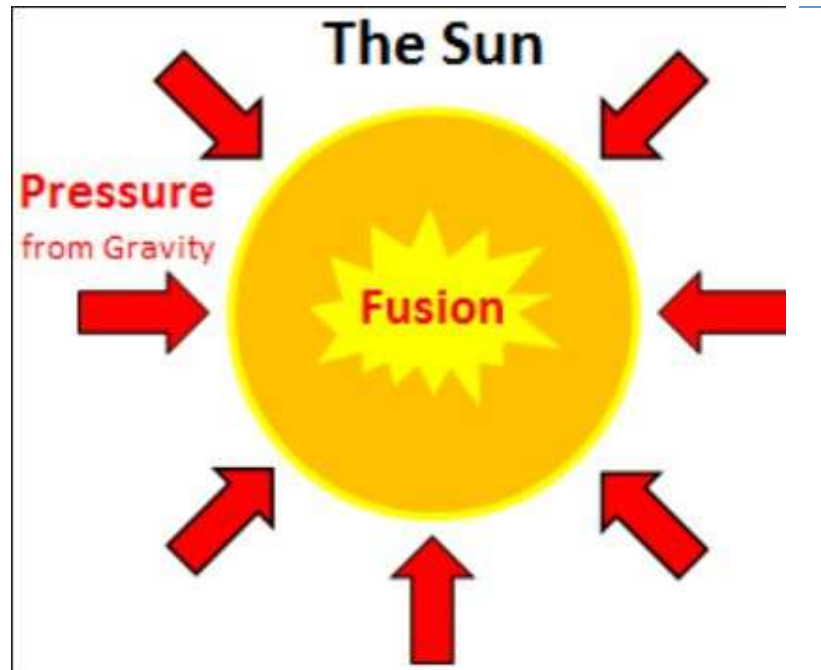
Kis energia termelés

Nagy entrópia termelés

→ Nem fenntartható

→ Felület igényes

# Atommag Fúzió



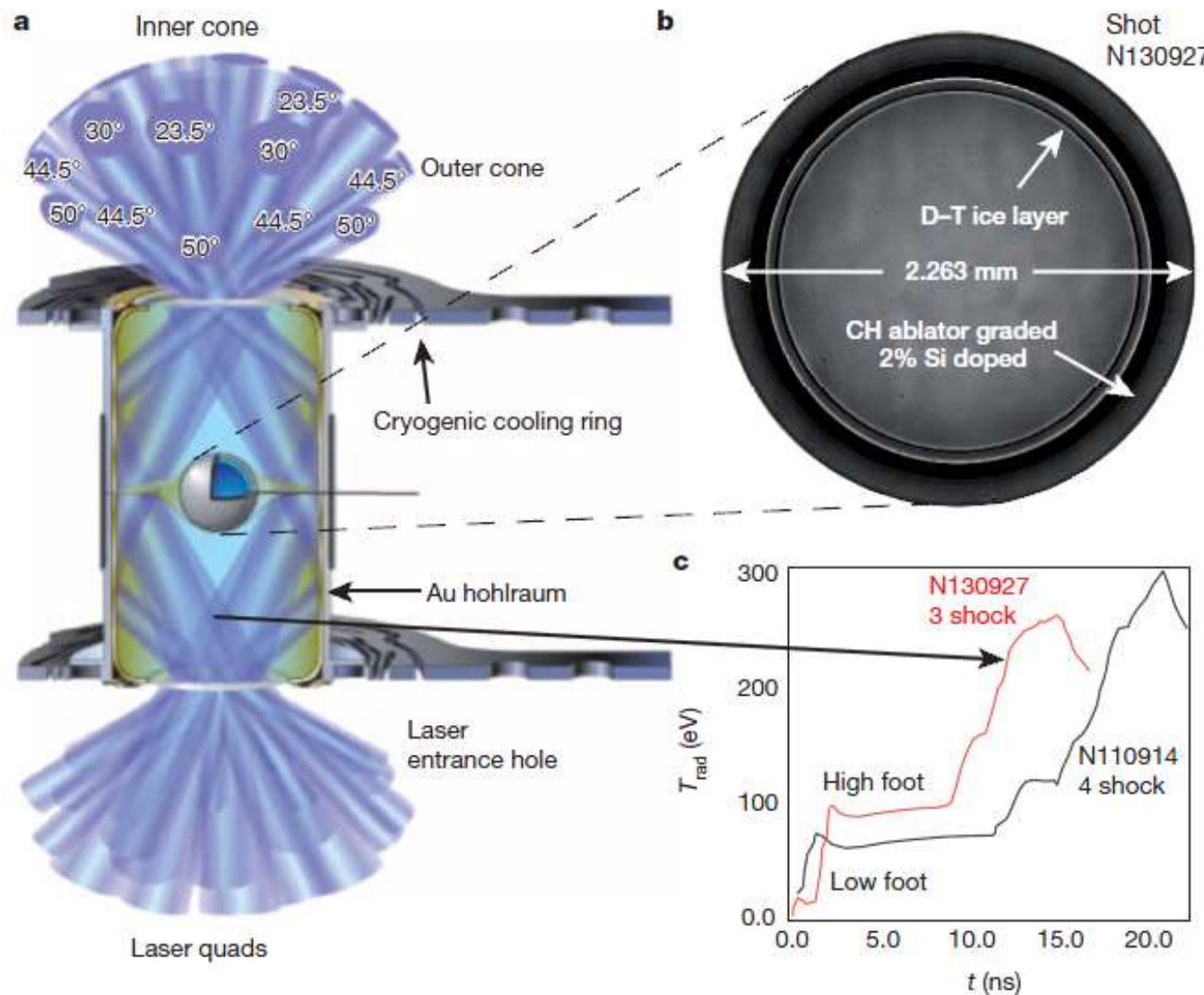
## NANOPLAZMONIKUS LÉZER FÚZIÓ (NAPLIFE PROGRAM)

- A fúzió lézeres **Egyidejű begyűjtása** a céltárgy egész térfogatában (**saját és új ötlet**, az előadás tárgya)
- **Nanoantennák** gyűjtik össze a lézer energiát, a céltárgy belsejében (**saját és új ötlet**, öt nagyságrenddel rövidebb, ~100fs lézerimpulzusokkal)
- *Lassú termikus égés helyett a lézerbelövés energiáját direkt használjuk.  
(nincs termikus egyensúly !)*
- *Nagy teljesítményű belövések az ELI-ALPS berendezéseivel (csak 2 nyaláb, 10 lövés/sec, 32J, szembe ütköző pl. H és D nyalábok)*
- **Fúziós energia = legtisztább energia és korlátlan üzemanyag**





# Indirekt begyújtás 192 lézer, NIF



Lézer besugárzás időfüggése:

Kezdeti összenyomás:  
→  $800 \text{ g/cm}^3$   
~ **10 ns**,

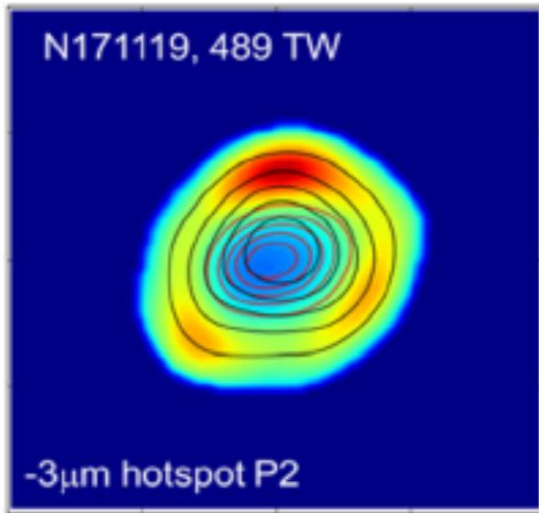
→ Középponti begyújtás:  
~ **15/5 ns**

→ **2018**  
**Be: 422 MJ**  
**Ki: 54 kJ**

[O.A. Hurricane et al., Nature, 506, 343 (2014), doi:10.1038/nature13008 ]

# LLNL – NIF 2019 Április

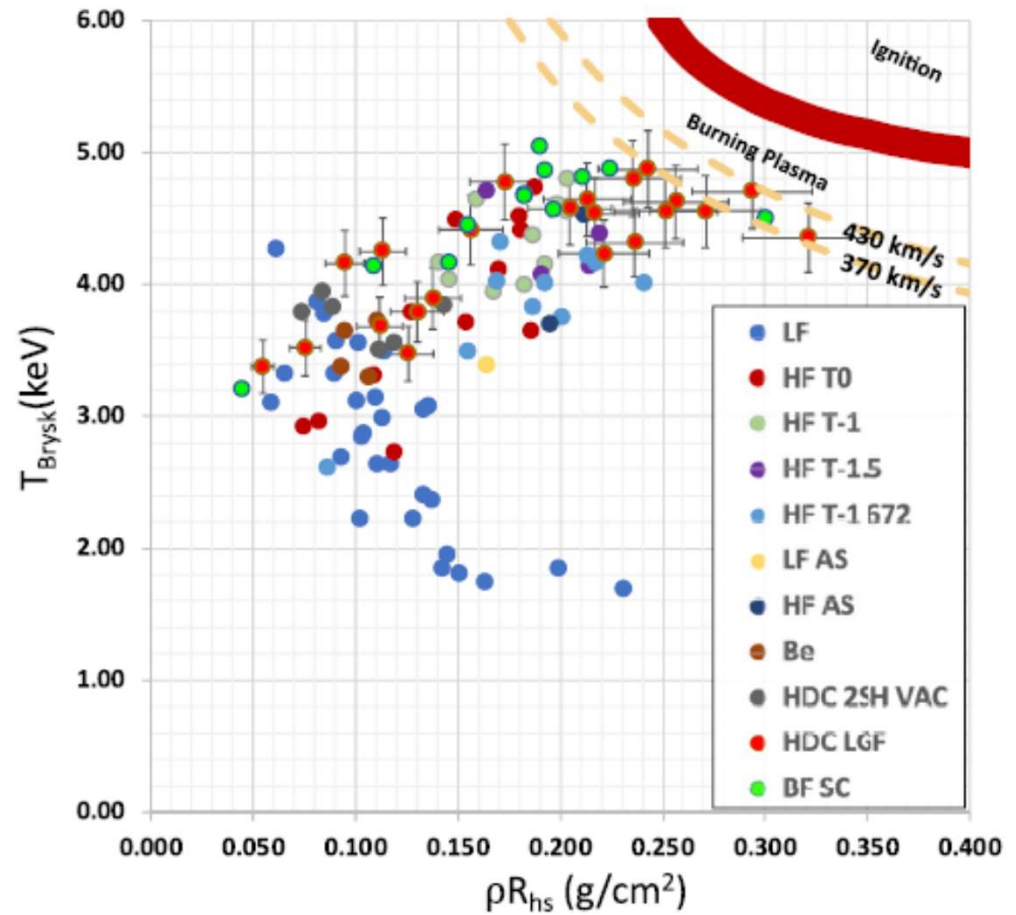
N171119



Hot-spot, 3 $\mu$ m, burning spreads by  $\alpha$ -heating: boundary is approached.

[O.A. Hurricane et al., Phys. Plasmas 26, 052704 (2019) April.]

$c = 300\,000$  km/s



# [ A.H. Taub (1948) ]

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 74, NUMBER 3

AUGUST 1, 1948

## Relativistic Rankine-Hugoniot Equations

A. H. TAUB

*University of Illinois, Urbana, Illinois and Institute for Advanced Study, Princeton University, Princeton, New Jersey\**

Next we suppose that the three-dimensional volume is a shell of thickness  $\epsilon$  enclosing a surface of discontinuity  $\Sigma$  whose three-dimensional normal vector is  $\Lambda_i$ . If we choose our coordinate system so that the discontinuity is at rest, then since

$$\underline{\lambda_\alpha \lambda^\alpha = 1}, \quad \sum_{i=1}^3 \Lambda_i^2 = 1,$$

we have

$$\lambda_i = \Lambda_i \quad \text{and} \quad \underline{\lambda_4 = 0.}$$

Hence Eqs. (7.1) and (7.2) become, as  $\epsilon$  goes to zero,

$$[\rho^0 u^i \Lambda_i] = 0, \quad (7.3)$$

$$[T^{\alpha i} \Lambda_i] = 0, \quad (7.4)$$

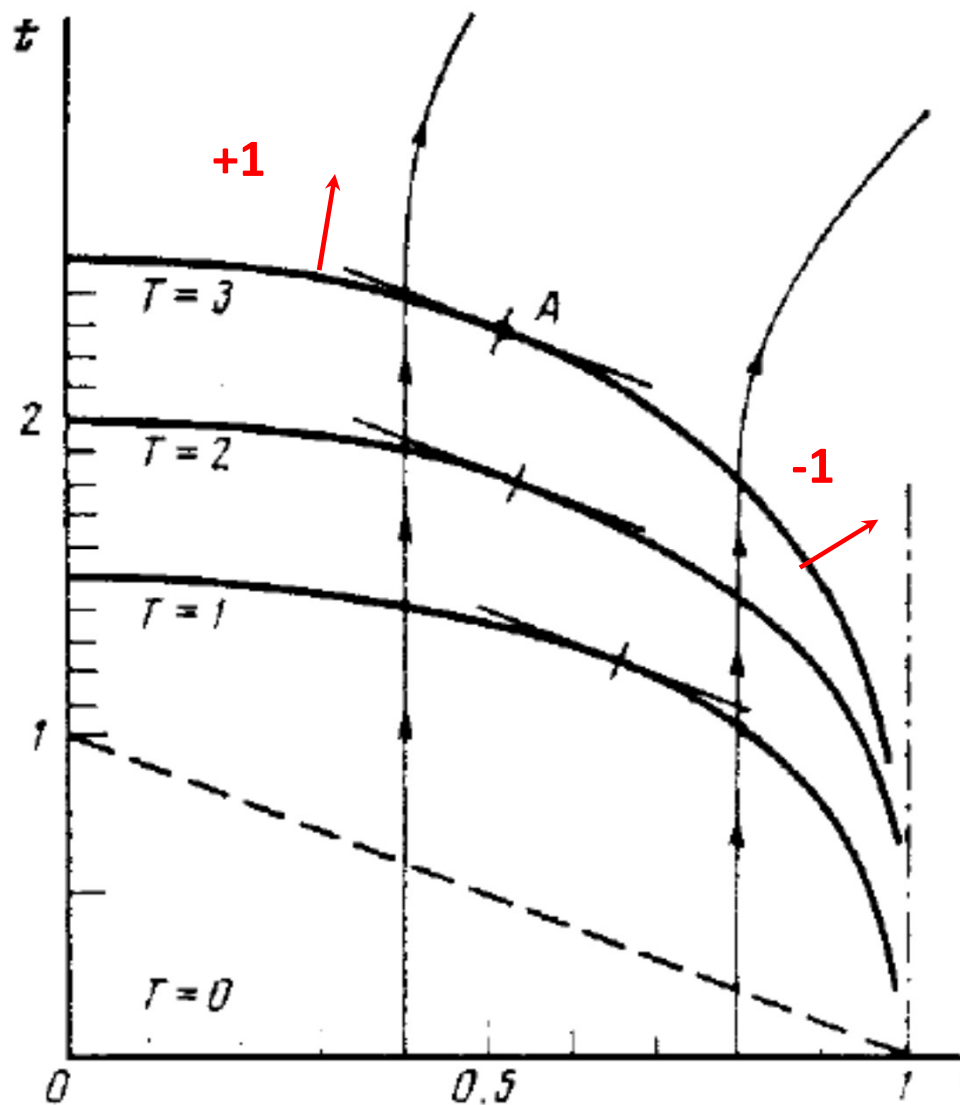
where

$$[f] = f_+ - f_-$$

Taub assumed that (physically) **only slow space-like shocks or discontinuities** may occur (with space-like normal,  $\lambda_4=0$ ).

This was then taken as standard, since then (e.g. LL 1954-)





[ L. P. Csernai, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 92, 379-386 (1987) & Sov. Phys. JETP 65, 216-220 (1987) ]

corrected the work of [ A. Taub, Phys. Rev. 74, 328 (1948) ]

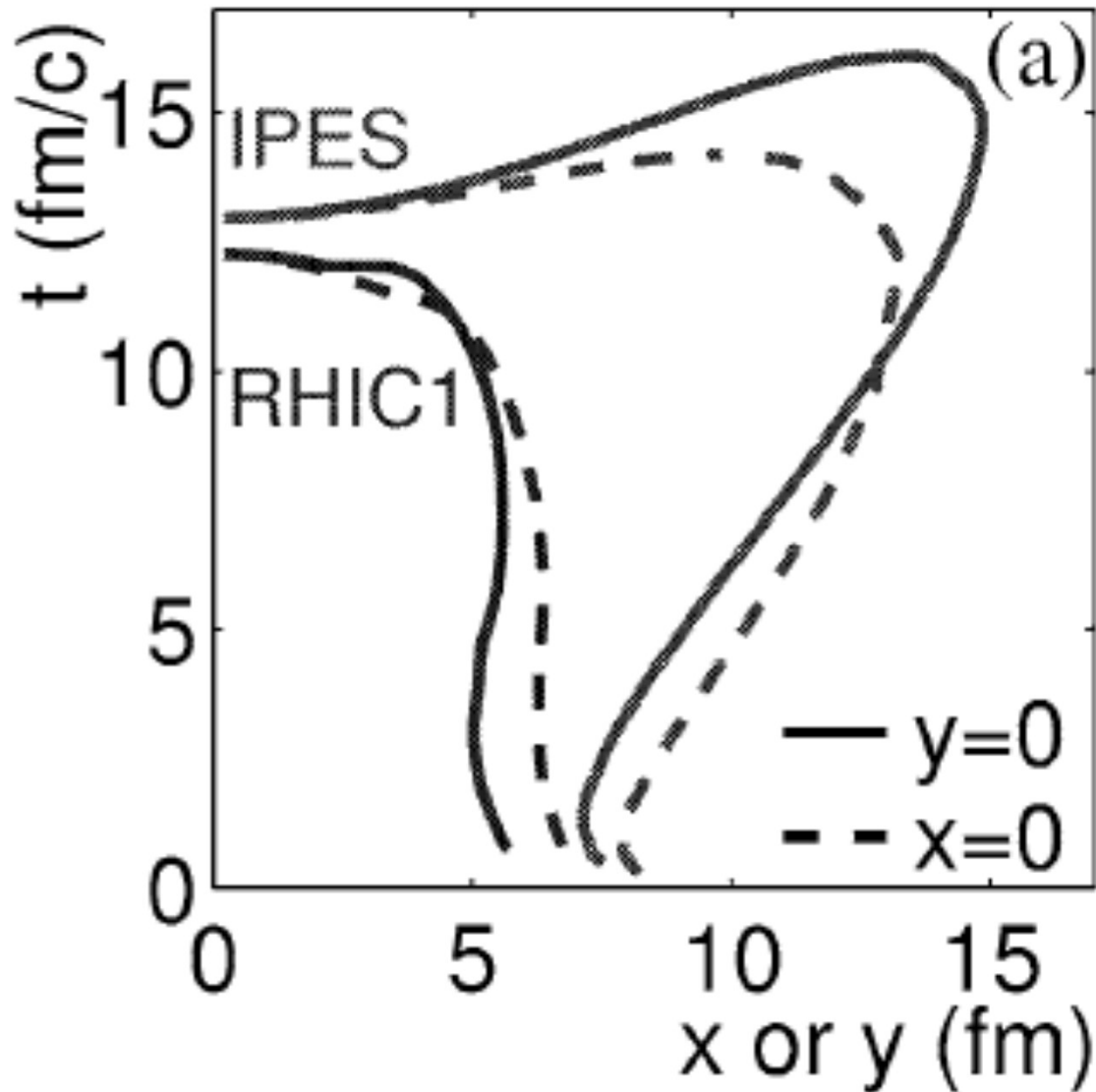
$$\lambda_{\alpha} \lambda^{\alpha} = \pm 1$$

Л. П. Чернаи

ДЕТОНАЦИЯ НА ВРЕМЕНИПОДОБНОМ ФРОНТЕ  
ДЛЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ СИСТЕМ

Журнал экспериментальной и теоретической физики

# Relativisztikus Quark-Gluon Plasma égés (hadronizáció)



Discovery of QGP:

2000 CERN

2001 BNL

[U.W. Heinz and P.F. Kolb, Phys. Lett. B 542, 216 (2002)]

## Gömbszimmetrikus Fúziós Reakció:



Konstans abszorptivitás

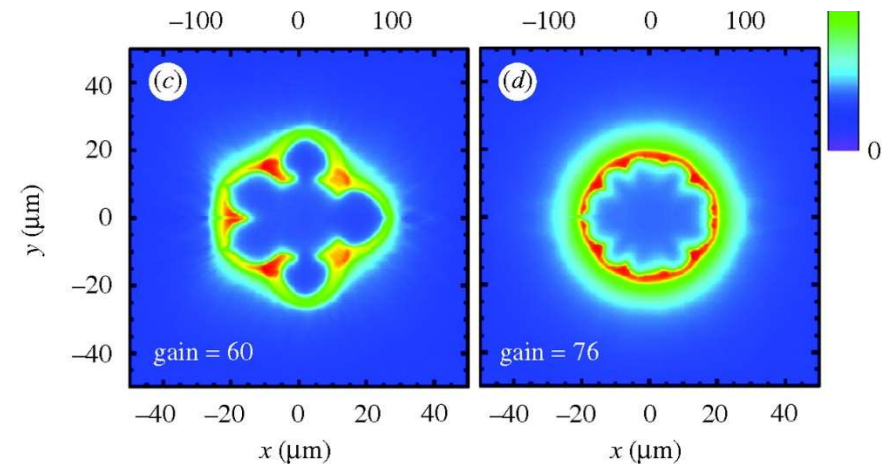
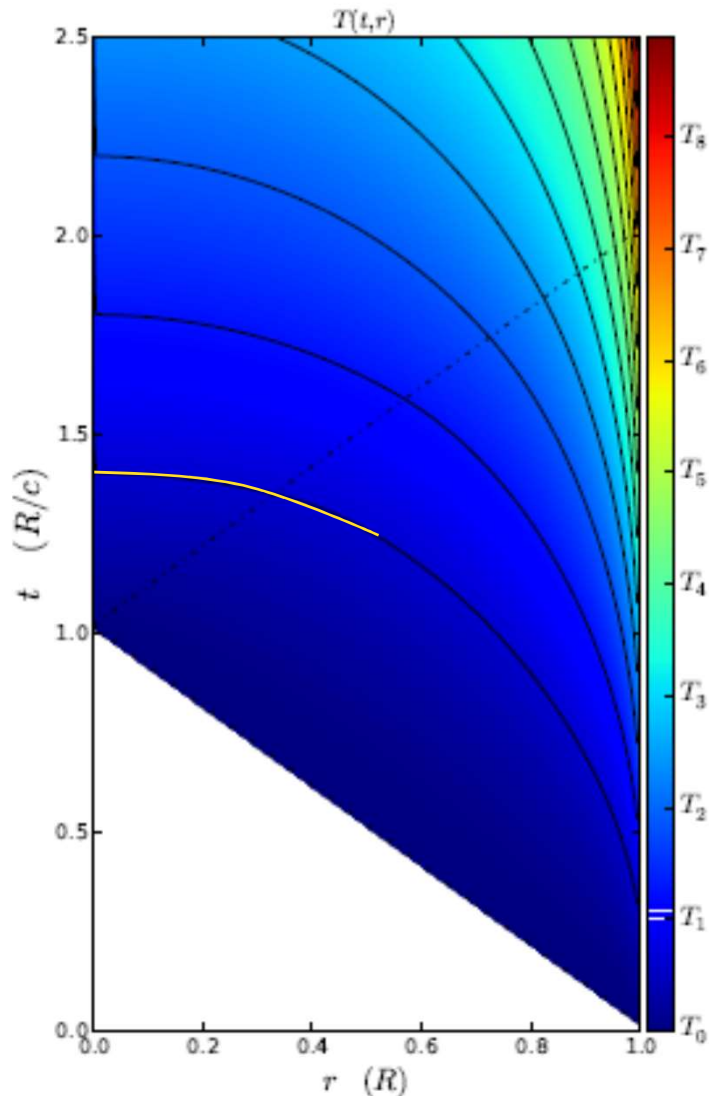
Gömbszimmetrikus besugárzás

Gyulladási hőmérséklet =  $T_1 \rightarrow$

Szimultán térfogati begyújtás:  $[0, R/2]$

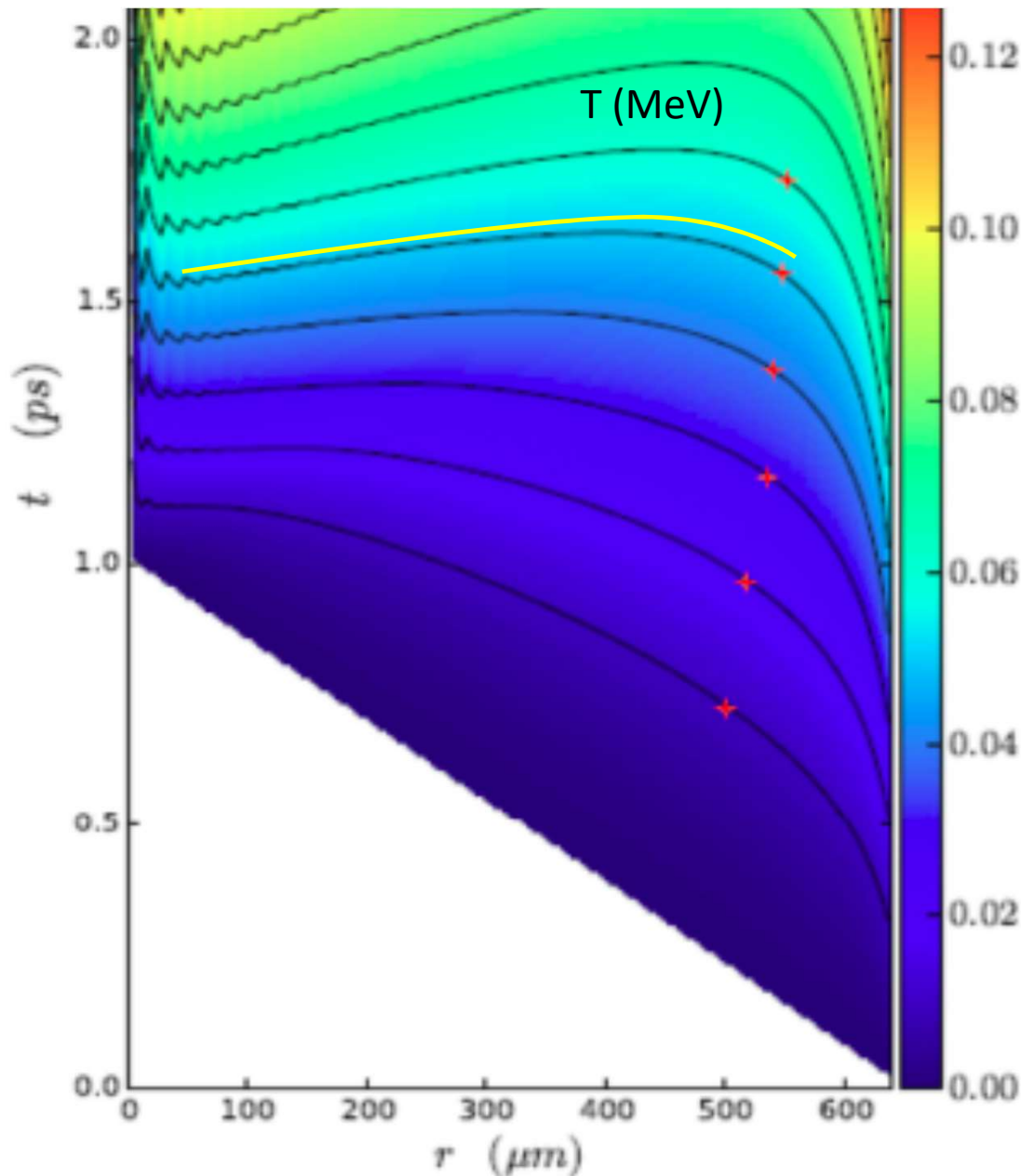
(i.e. **12%** of the volume).

Nem job mint a NIF / Rayleigh-Taylor Instab.



[ L.P. Csernai & D.D. Strottman,  
Laser and Particle Beams 33, 279 (2015).]

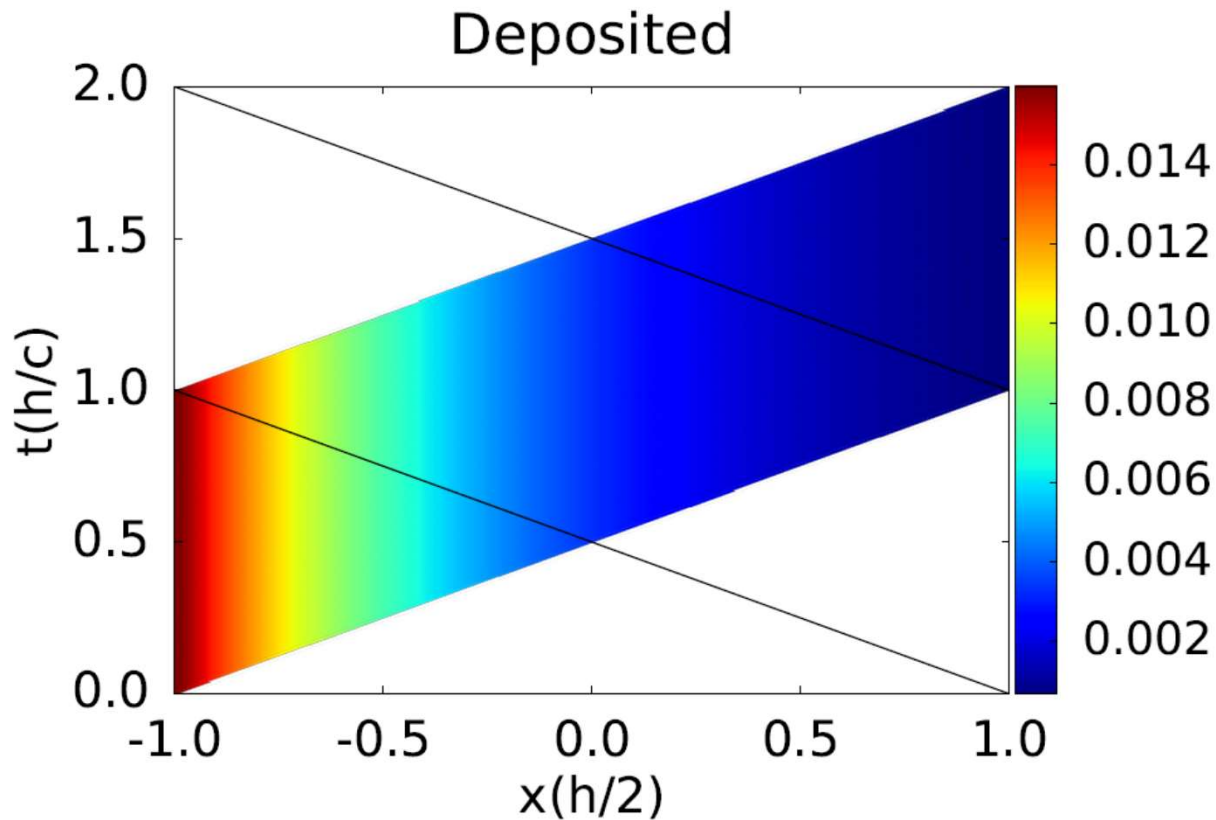
L.P. Csernai, N. Kroo, I. Papp:  
[ *Patent* # P1700278/3 (2017) &  
*Laser and Particle Beams*, 32,  
171-178 (2018). ]



Változó abszorbtivitás  
Gömb-szimmetrikus besugárzás  
Gyulladási hőmérséklet =  $T_1 \rightarrow$

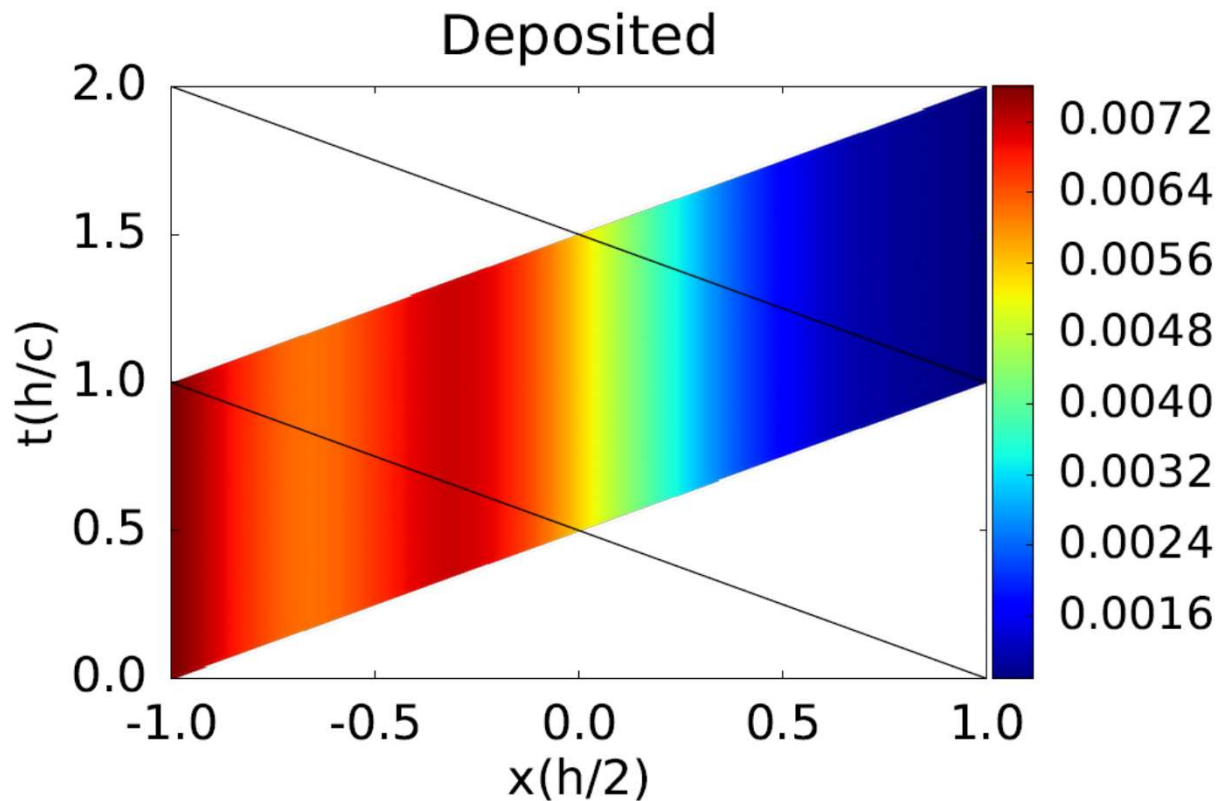
Szimultán térfogati begyűjtés:  
[0, 0.9R]  
(i.e. **73%** of the volume).  
,  $r = 0$ ,  $\alpha_K = 30 \text{ cm}^{-1}$   
 $r = R$ ,  $\alpha_K = 8 \text{ cm}^{-1}$ .

Gyulladási hőmérséklet  
 $T_1 = 272 \text{ keV}$



## Nanoantennák nélkül

Az egy oldalról való lézer besugárzásból elnyelt energia. Az abszorpció konstans. Ez befelé exponenciálisan csökkenő energia elnyelésre vezet úgy, hogy csak elhanyagolható energia éri el a target túloldalát.



## Implantált nanoantennákkal

Az abszorptivitás növekszik a target közepe felé, az implantált nanoantennák miatt.

Az egy oldalról való lézer besugárzásból elnyelt energia. Az abszorpció befelé növekszik. Ez konstans energia elnyelésre vezet a target közepéig. Azután csökken úgy, hogy csak elhanyagolható energia éri el a target túloldalát.



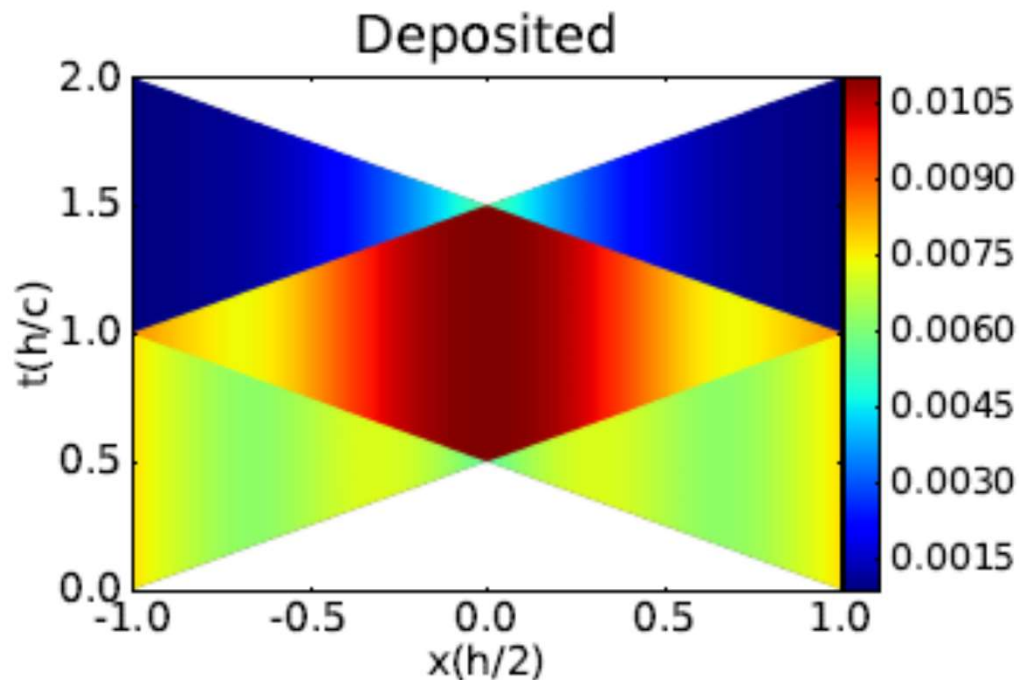


Figure 2: (color online) Deposited energy per unit time in the space-time across the depth,  $h$ , of the flat target. The time is measured in units of  $(h/c)$ , where  $c$  is the speed of light in the material of the target. The irradiation lasts for a period of  $\Delta t = h/c$  the time needed to cross the target. The irradiated energy during this time period is  $Q$  from one side, so it is  $2Q$  from both sides together.

The color code indicates the deposited energy per unit time and unit cross section (a.u.). The deposited length is  $\Delta x = c\Delta t$ . Note! The absorptivity in this case  $\alpha_K \neq \text{const}$ . For more details please see Appendix B.

## Besugárzás két oldalról, implantált nanoantennákkal

Gyűjtési energia:  $Q_i/m$

pl. DT target esetén:  $Q_i/m = 27 \text{ kJ/g}$

→ ha  $Q = 100 \text{ J}$  energiánk van, akkor egy:

$m_{DT} = Q / Q_i \text{ g} = 3.703 \text{ mg}$

tömegű DT targetet tudunk begyűjtani.

Ezekután adott  $m_{DT}$  és  $\rho_{DT}$  esetén a DT-target térfogata,  $V_{DT} = 16.5 \text{ mm}^3$

és  $h_{DT} = 2.67 \text{ mm}$ .

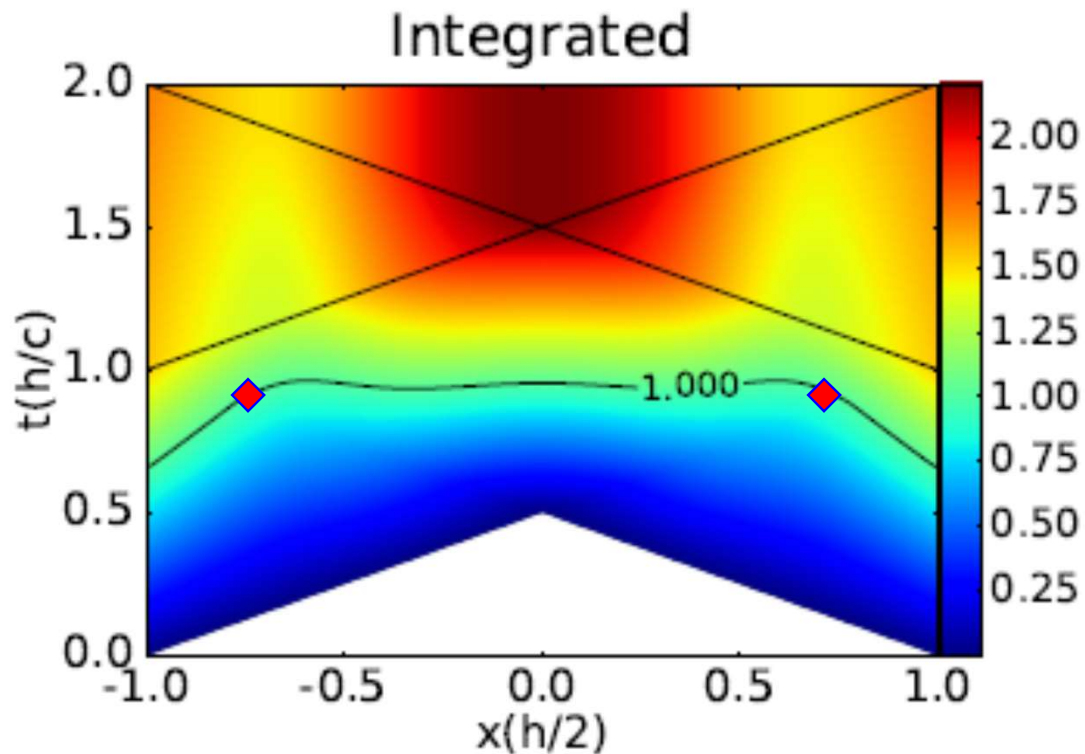


Figure 3: (color online) Integrated energy up to a given time in the space-time across the depth,  $h$ , of the flat target. The color code indicates the temperature,  $T$ , reached in a given space-time point, in units of the critical temperature, ( $T_c$ ). The contour line  $T = 1$ , indicates the critical temperature,  $T_c$  where the phase transition or the ignition in the target is reached. This contour line is almost at a constant time, indicating simultaneous whole volume transition or ignition. The irradiated energy,  $Q$  is chosen so that,  $1Q$  irradiation will achieve the critical temperature.

## With nano antennas

Gyulladás:  $T = T_c = 1$ .

[ L. P. Csernai, M. Csete, I. N. Mishustin, A. Motornenko, I. Papp, L. M. Satarov, H. Stöcker, N. Kroo, *arXiv:1903.10896*, *Submitted to MRE*]



# Kísérleti elrendezés

Ti-Si Hydra lézer, Wigner FK, RMI:

$\lambda_k = 800 \text{ nm}$ ,  $f_{\text{rep}} = 10 \text{ Hz}$ ,  $E_{\text{imp}} > 25 \text{ mJ}$ ,  $\tau = 40 \text{ fs}$

**Első feladat:**

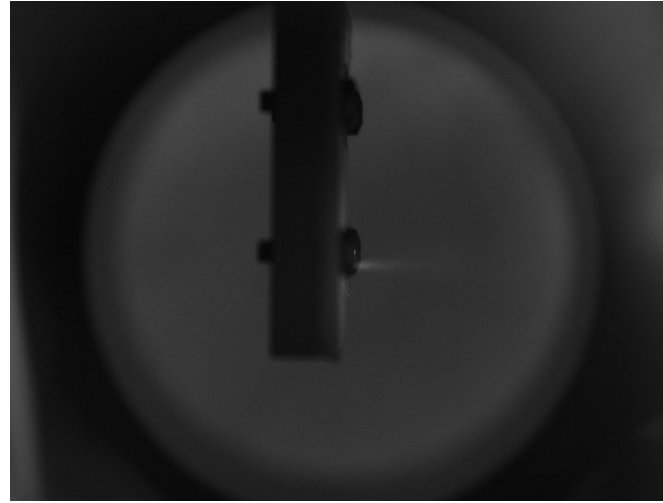
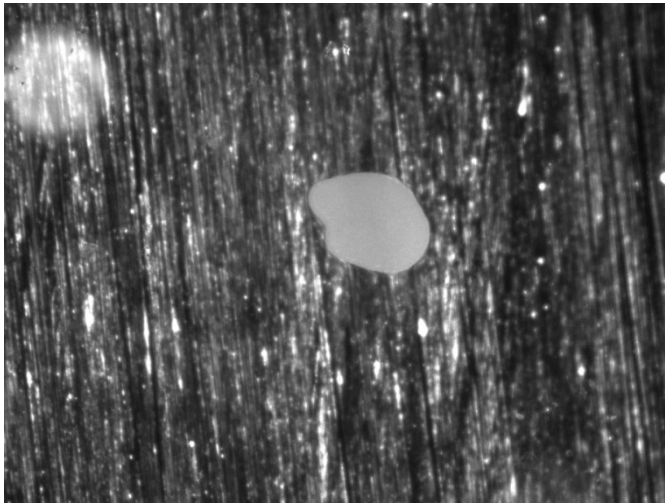
Igazolni  
a nano-  
antennák  
erősítését,

Cyclic Olefin  
Copolymer  
(COC) targeten.



# RÁCZ PÉTER

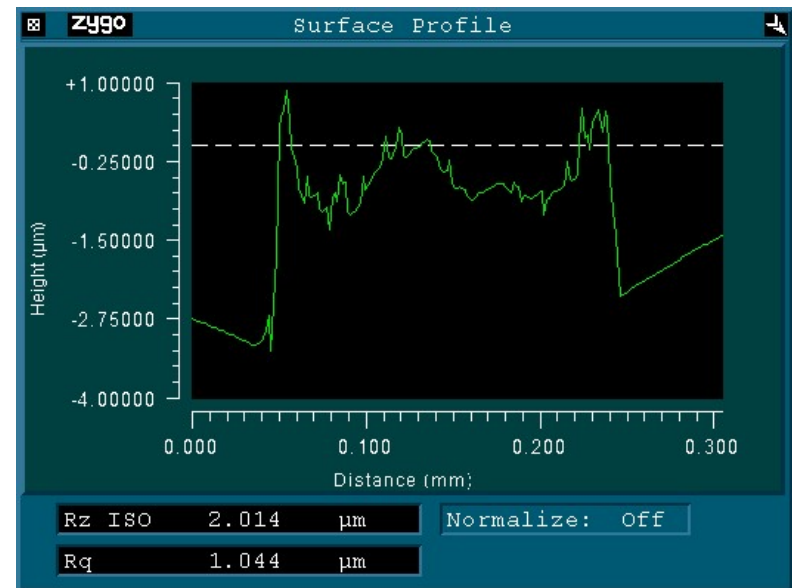
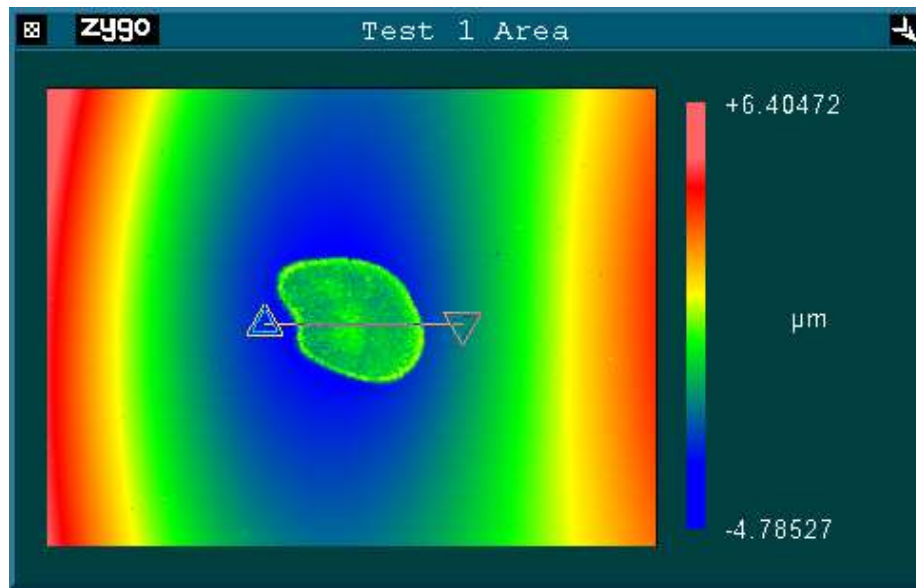
Nem dópolt, E = 3 mJ



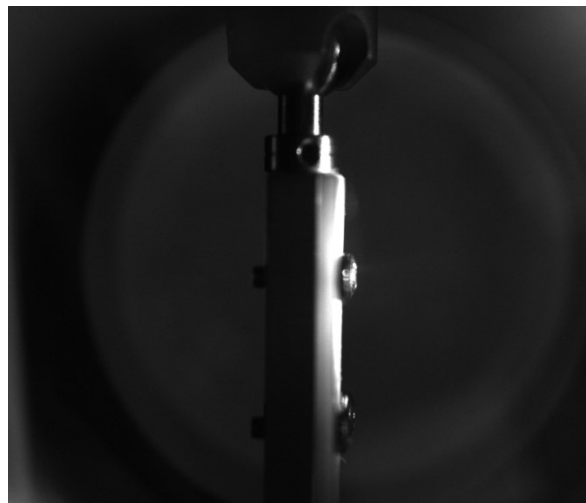
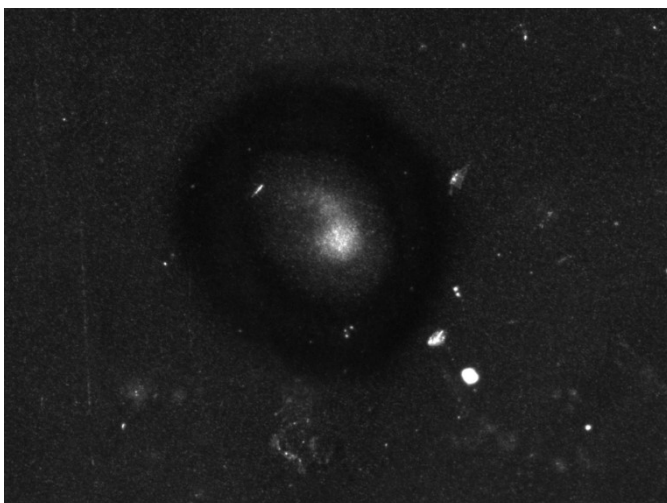
$H \sim 3 \mu\text{m}$

$D \sim 200 \mu\text{m}$

$V_2/V_1 \sim 5,3$



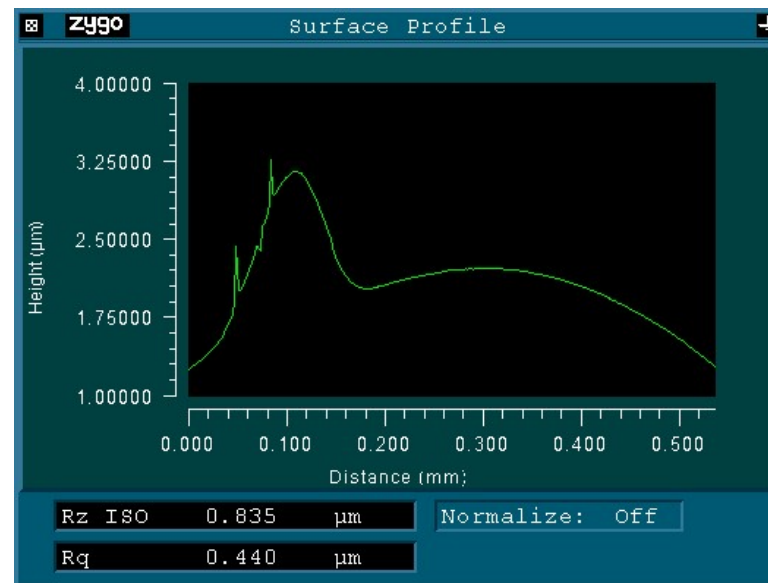
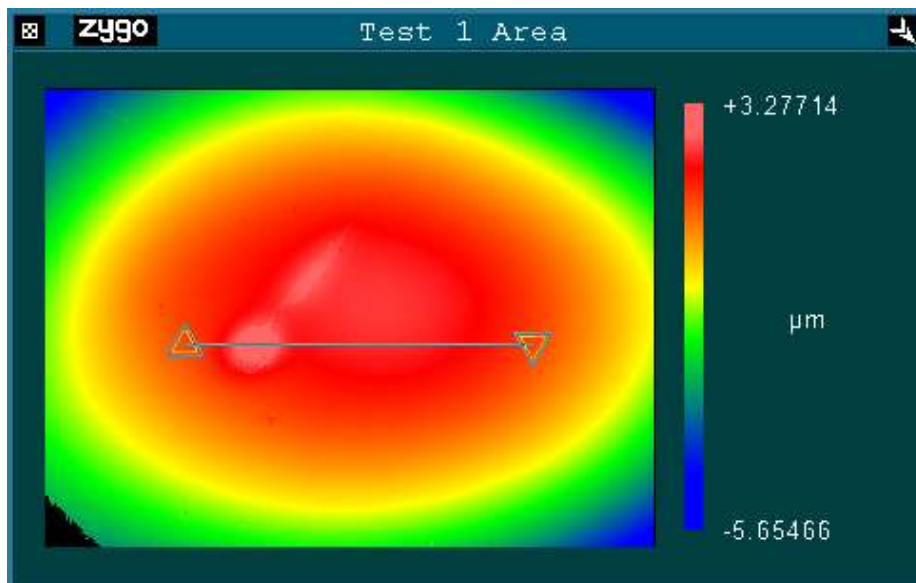
Dópoló, E = 1.1 mJ



$H \sim 2 \mu\text{m}$

Optikai leképezés alapján:

**$D \sim 520 \mu\text{m}$**





# Vastag érme alakú target - Új konfiguráció

Target vastagsága:  $h$

$h$  függ a pulzus energiától,  
a gyulladási energiától, a  
target tömegétől

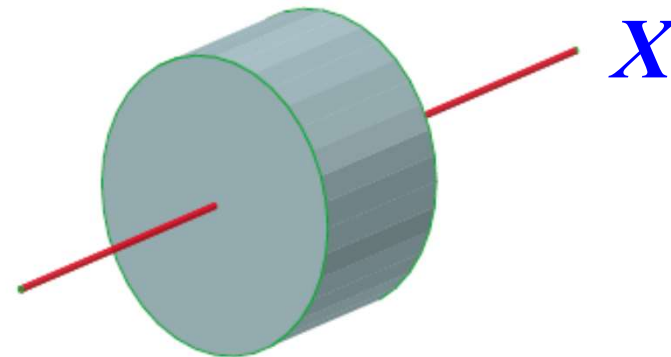


Figure 1: (color online) The target still should be compact to minimize the surface effects. The irradiation is performed along the  $x$ -axis from both sides towards the target. The laser beam should be uniform hitting the whole face of the coin shaped target.

## Második feladat:

Egyidejű begyújtás a teljes  
térfogatban

## Radiation dominated implosion with flat target

László P. CSERNAI<sup>1,3</sup>, Mária CSETE<sup>2</sup>, Igor N. MISHUSTIN<sup>3,7</sup>, Anton MOTORNENKO<sup>3</sup>,  
István PAPP<sup>4</sup>, Leonid M. SATAROV<sup>3</sup>, Horst STÖCKER<sup>3</sup>, and Norbert KROÓ<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Physics and Technology, Univ. of Bergen, Norway

<sup>2</sup> Dept. of Optics and Quantum Electronics, Univ. of Szeged, Hungary

<sup>3</sup> Frankfurt Institute for Advanced Studies, Frankfurt/Main, Germany

<sup>4</sup> Dept. of Physics, Babes-Bolyai University, Cluj, Romania

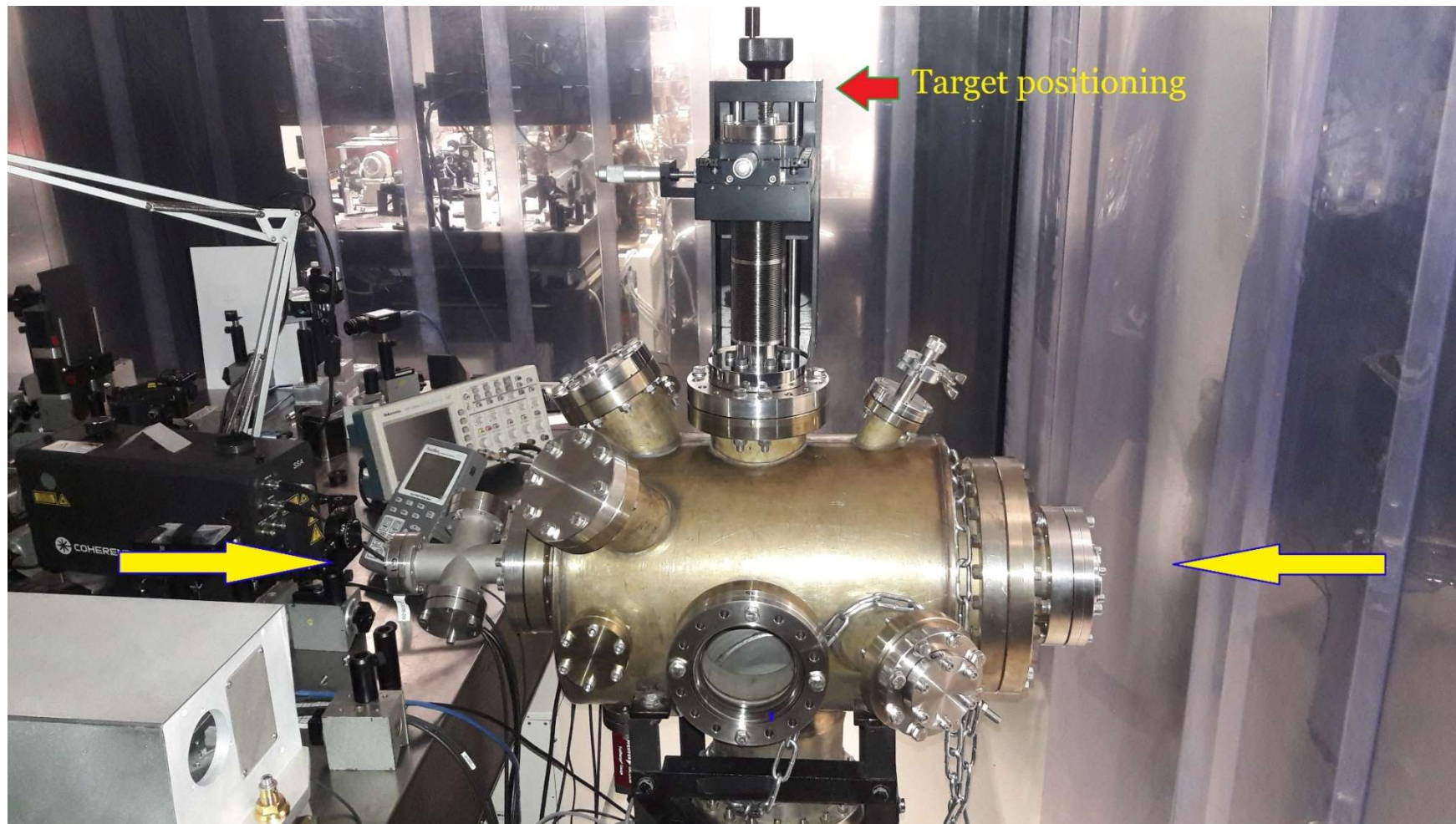
<sup>5</sup> Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungary

<sup>6</sup> Wigner Research Centre for Physics, Budapest, Hungary

<sup>7</sup> National Research Center "Kurchatov Institute" Moscow, Russia

[arXiv:1903.10896v3  
és *Physics of Wave  
Phenomena*, **28**, 187-  
199 (2020)]

## Kétoldali Besugárzás



Abszorpció eloszlás beállítása a nano-antennák sűrűség eloszlásával.  
UDMA targeten. *Csete Mária, Bonyár Attila et al.*

## Hasonló geometria @ ShenGuang-II Up, Shanghai :

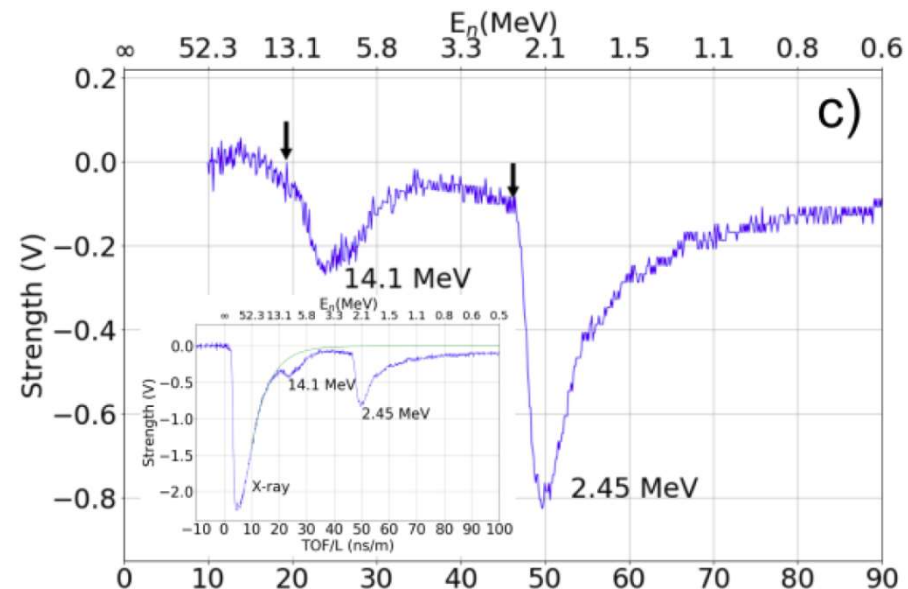
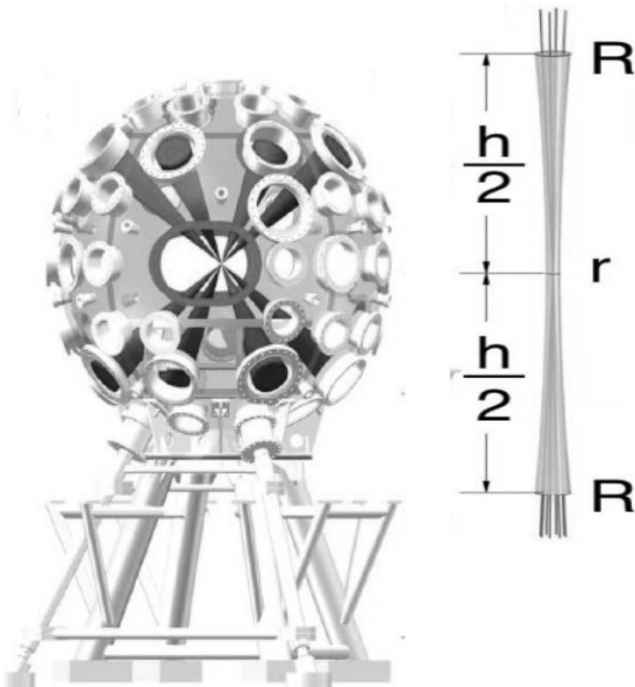
Nuclear probes of an out-of-equilibrium plasma at the highest compression  
**Phys. Lett. A 383 (2019) 2285-2289.**

G. Zhang<sup>a,b,\*</sup>, M. Huang<sup>c</sup>, **A. Bonasera<sup>d,e,\*</sup>**, Y.G. Ma<sup>f,b,i,\*</sup>, B.F. Shen<sup>g,h,\*</sup>, H.W. Wang<sup>a,b</sup>, W.P. Wang<sup>g</sup>, J.C. Xu<sup>g</sup>, G.T. Fan<sup>a,b</sup>, H.J. Fu<sup>b</sup>, H. Xue<sup>b</sup>, H. Zheng<sup>j</sup>, L.X. Liu<sup>a,b</sup>, S. Zhang<sup>c</sup>, W.J. Li<sup>b</sup>, X.G. Cao<sup>a,b</sup>, X.G. Deng<sup>b</sup>, X.Y. Li<sup>b</sup>, Y.C. Liu<sup>b</sup>, Y. Yu<sup>g</sup>, Y. Zhang<sup>b</sup>, C.B. Fu<sup>k</sup>, X.P. Zhang<sup>k</sup>

4 (up) + 4(down) lasers  
 Target thickness,  $h$  ( $3.6\mu\text{m}$ - $1\text{mm}$ )  
 & radius,  $R$ , ( $150$ - $400\mu\text{m}$ ) were varied.

Total pulse energy 1.2kJ (2ns) for 8 beams.  
 Shortest (250ps) pulses  $\rightarrow$  100s MeV ions  $>$  non-thermal distr. = directed ion acceleration

Typical fusion neutron energies were measured & used to extract the target density.





## Hasonló geometria @ ShenGuang-II Up, Shanghai :

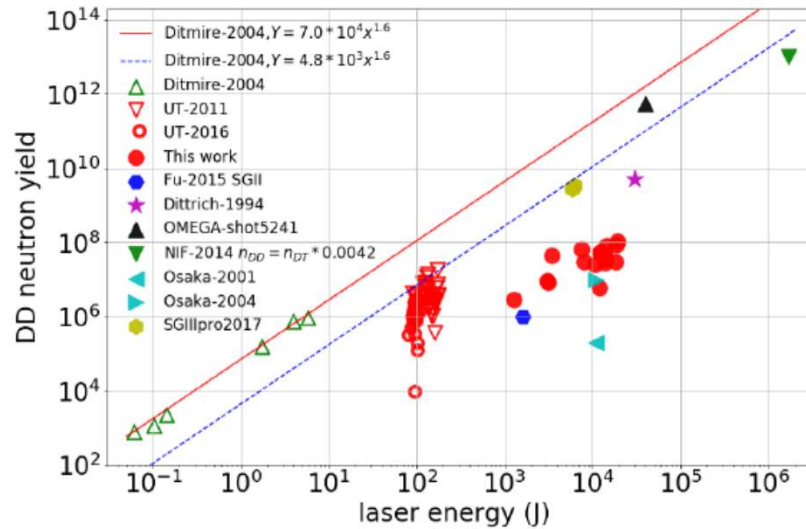


Figure 3: (color online) Fusion yield as function of laser energy. Different experimental results Ditmire-2004[40], UT-2011[20], UT-2016[19], Fu-2015 SGII[45], Dittrich-1994[49], NIF-2014[48], Osaka-2001[46], Osaka-2004[47], OMEGA-shot5241[41] and SGIIpro2017[42] are indicated in the inset.

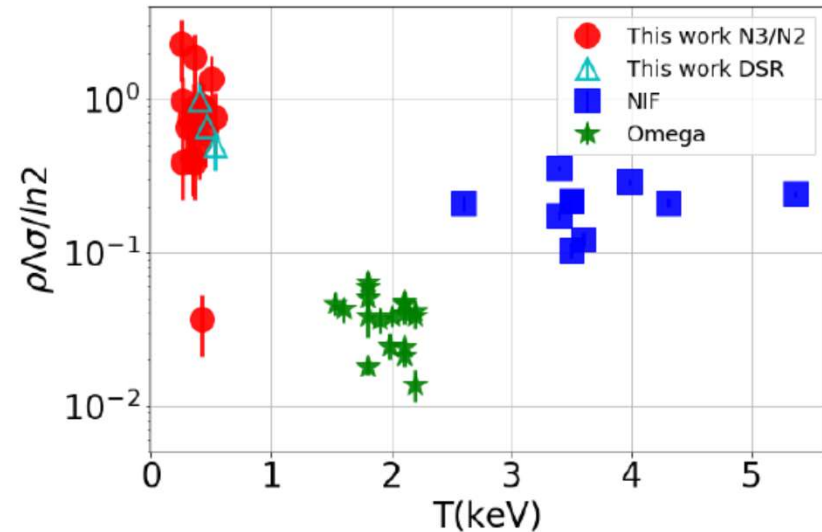
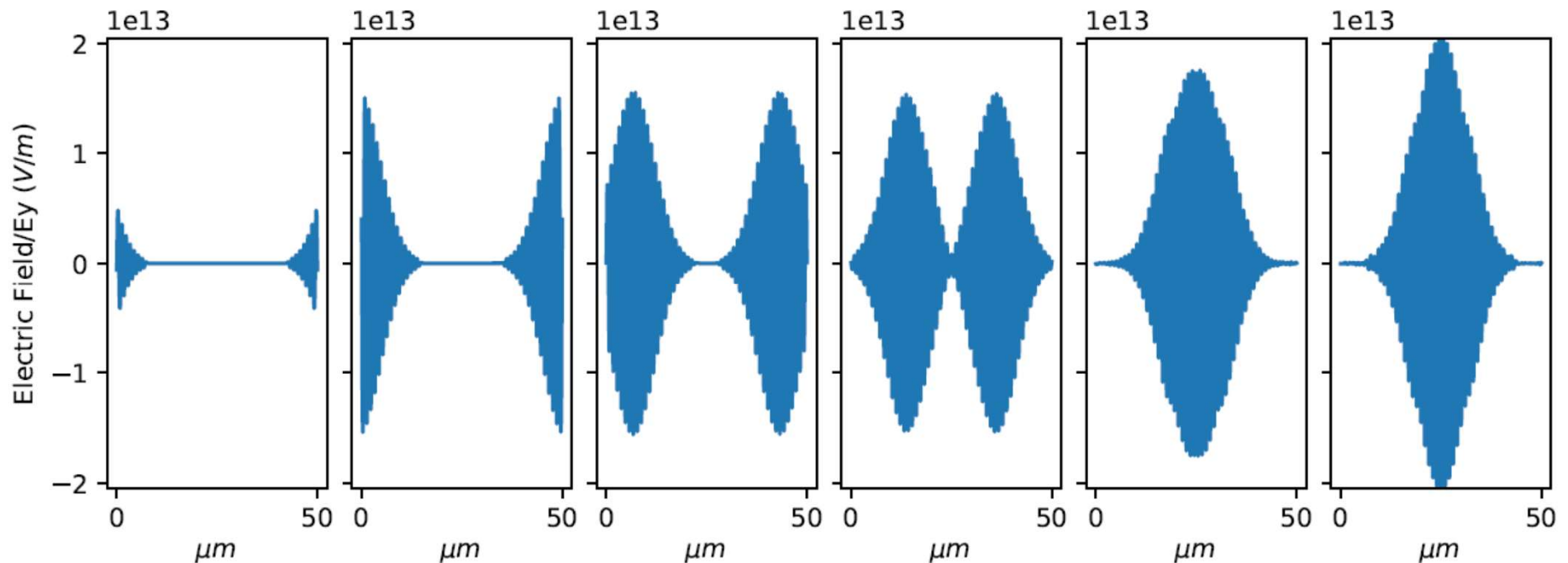


Figure 4: (color online)  $\Lambda\rho\sigma/\ln 2$  obtained from eq.(4) vs  $T$  from eq.(1). Omega and NIF data are derived from the experiments[25], using the Down Scatter Ratio[23, 21]. Our results using the DSR method ( $N_4/N_3$ ) are given by the open triangle symbols in good agreement with the  $N_3/N_2$  ratios.

. Stimulated by these considerations we decided not to fight non-equilibrium effects but rather enhance them, i.e. study plasmas highly compressed and completely out of equilibrium.

# Kétoldali Besugárzás – Lézer Űtköző Nyaláb



Lorentz kontrakció  $\rightarrow$  sűrűség:  $n = \gamma n_0$

Áthatolás egymáson  $\rightarrow$  sűrűség:  $n = 2 \gamma n_0$

[ **István Papp**, et al., (NAPLIFE Collaboration),

Laser Wake Field Collider, arXiv: 2009.0368 ]



# Európai Lézer Infrastruktúra – Szeged, HU



Még az idén **itt** is  
elindulnak a kísérletek!

ELI-ALPS Szeged:  
EU Extrém Fény Infrastruktúra  
Attosec. Impulzusú Fényforrás  
2PW extrém nagy térerősség  
10 Hz, <10fs, **20 J**