

## ❑ Proč je jaderná syntéza (fúze) tak atraktivní ?

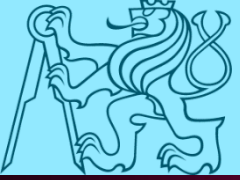
- Může garantovat prakticky neomezený zdroj energie
- Ekologická rizika jsou podstatně nižší než u jaderného štěpení
- Žádné problémy s materiálem pro jaderné zbraně

## ❑ Proč lidstvo potřebuje nový zdroj energie

- Zdroje fosilních paliv a štěpných materiálů jsou omezené
- Ekologické problémy spalování fosilních paliv a štěpení
- Omezení obnovitelných zdrojů energie

## ❑ Globální bilance energie

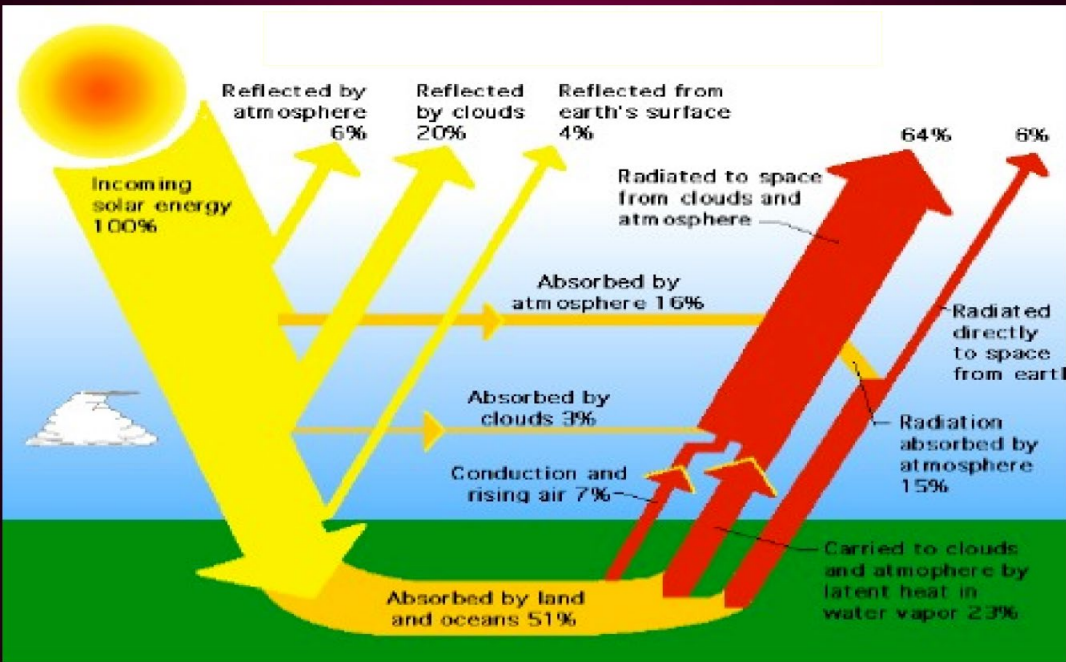
- Slunce dodává na zem  $2 \times 10^{24}$  J/rok, globální spotřeba  $5.7 \times 10^{20}$  J = 13700 Mtoe (toe = ekvivalent tuny ropy)
- Nízká koncentrace je nevýhodou sluneční energie



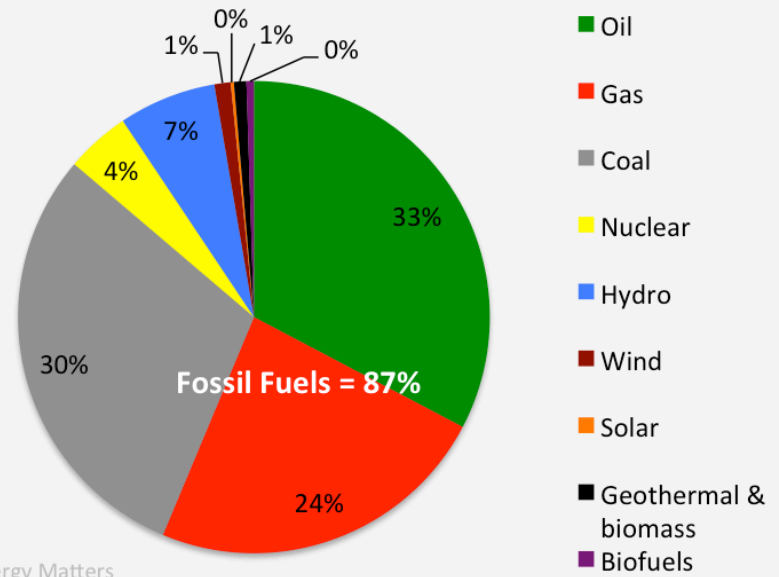
# Globální grafy



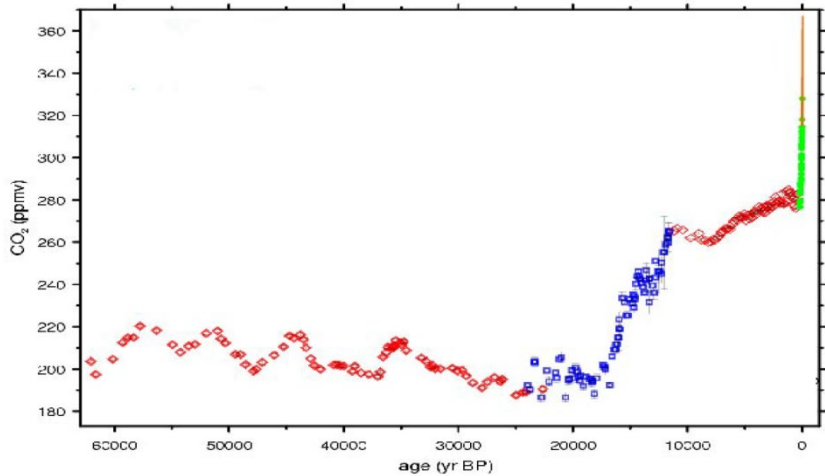
## The earth's energy budget



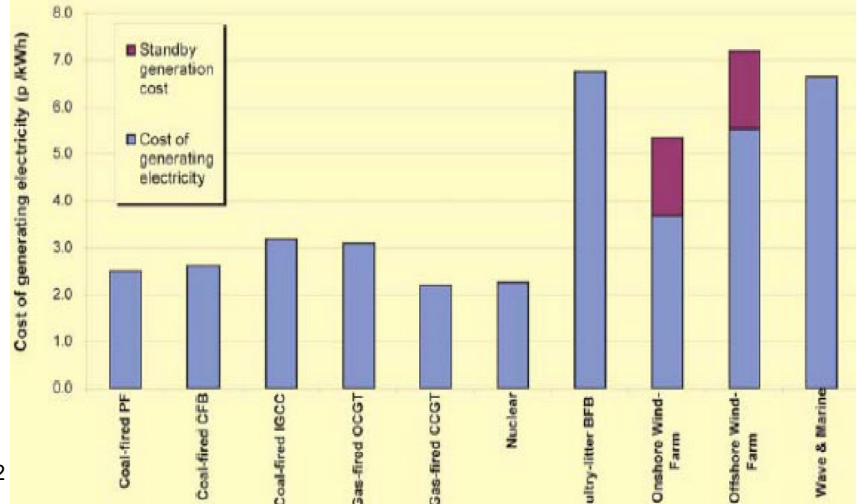
## Global energy consumption 2013

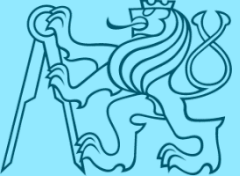


Energy Matters  
euanmearns.com  
BP 2014 data

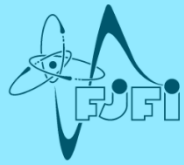


CO<sub>2</sub> od roku 2000 zpět 60 tisíc let  
Cena generace elektřiny  
\*bez započtení ceny emisí CO<sub>2</sub>

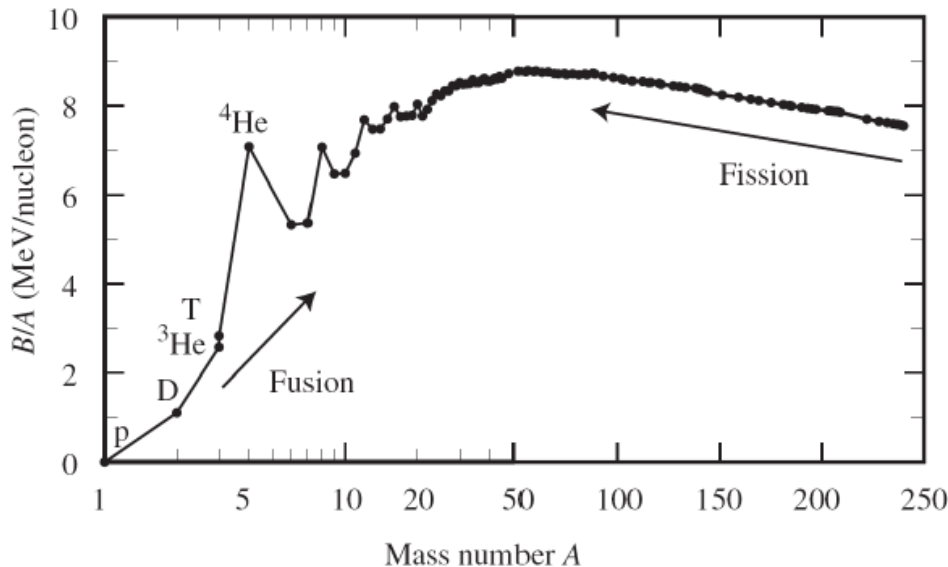




# Jaderná energie

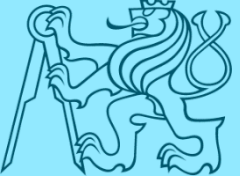


Rozdíly ve vazebné energii na nukleon ( $B/A$ ) jsou využívány k výrobě energie

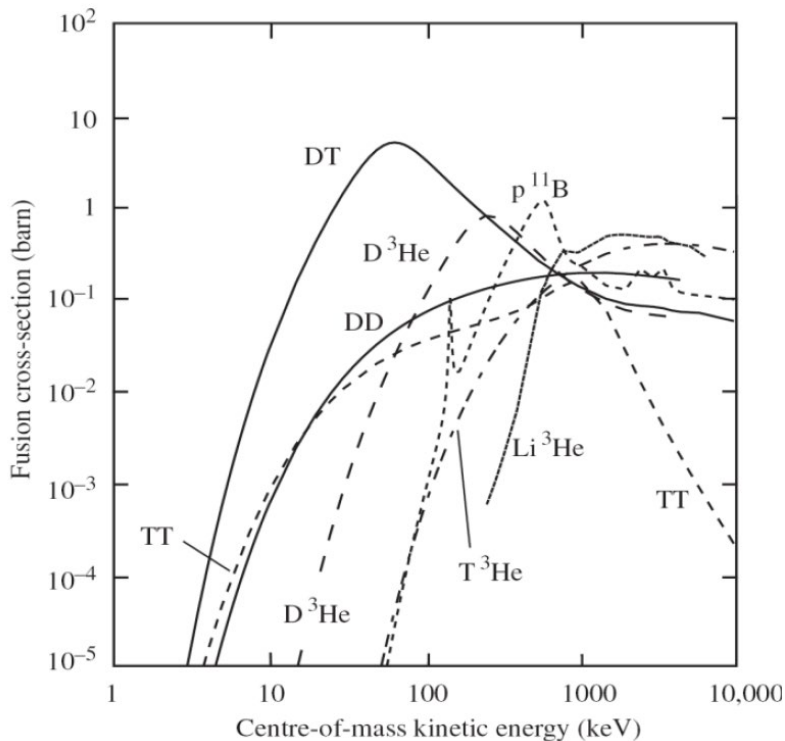


- Nejstabilnější jádro je  ${}^{56}\text{Fe}$  ( $Z=26$ ,  $A=56$ )
- Energie je získávána buď štěpením těžkých jader
- nebo slučováním lehkých jader
- $\alpha$  částice ( ${}^4\text{He}$ ) – velké  $B/A$

- Coulombovo odpuzování brání slučování – bariera  $\sim 1$  MeV
- Naštěstí kvantové tunelování umožňuje fúzi při nižší energii
- Fúzní účinný průřez je  $\sim 10^6\times$  menší než pro pružné srážky  $\Rightarrow$  interakce svazku s terčem nemůže vést k energetickému zisku



# Fúzní reakce



- Reakce  $D + T \rightarrow n + {}^4\text{He} + 17.6 \text{ MeV}$   
max účinný průřez při nízkých energiích  
vysoký zisk energie  $340 \text{ GJ/g}$  of paliva  
 $1 \text{ g DT} \cong 4.5 \text{ g } {}^{235}\text{U} \cong 10 \text{ t uhlí}$
- Tritium v přírodě chybí, ale může být vyrobeno z hojného Li  
 $n + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} (2.1 \text{ MeV}) + T (2.7 \text{ MeV})$   
 $n + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + n + T - 2.47 \text{ MeV}$
- **Ideální zápalná teplota** (fúzní energie = radiačním ztrátám)  $T_{id} = 4.3 \text{ keV}$

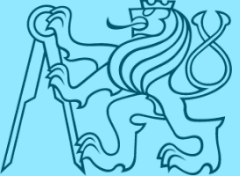
DT nevýhoda - energetické n (*jak je energie rozdělena mezi n a  ${}^4\text{He}$  ?*)

DD reakce – jen pomalé neutrony, vyšší práh, nižší zisk

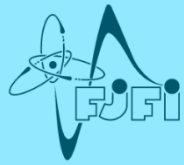
2 kanály  $D + D \rightarrow p + T + 4 \text{ MeV}$  ;  $D + D \rightarrow n + {}^3\text{He} + 3.27 \text{ MeV}$

Bezneutronová fúze – nabitě produkty (žádná radioaktivita),  $T_{id} \sim 100$

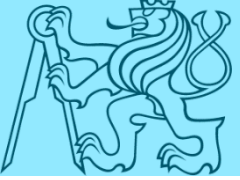
keV -  $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 \times {}^4\text{He} + 8.7 \text{ MeV}$  ;  $p + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He} + 4 \text{ MeV}$



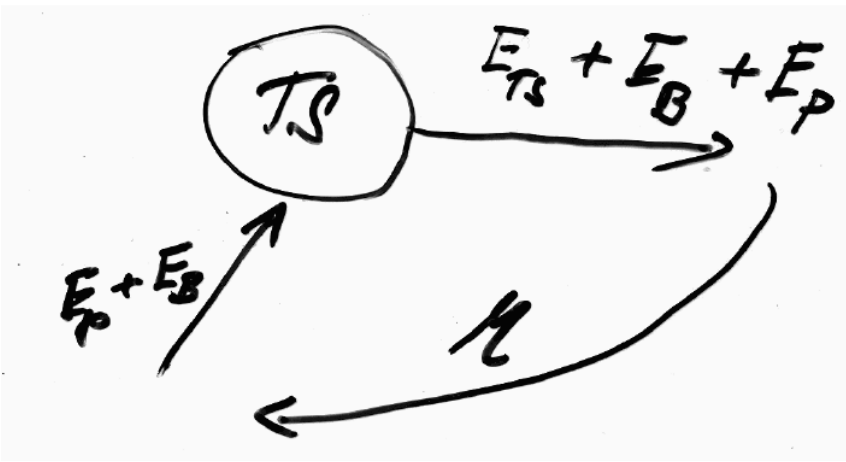
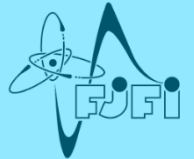
# Alternativa - mionová katalýza fúze



- Mion – 207x těžší než elektron, jinak velmi podobné vlastnosti, ale poločas rozpadu  $\tau_{1/2}^{\mu} \cong 2.2 \mu\text{s}$
- Zmenšení potenciální bariery v mezomolekule  $\text{DT}\mu$ , fúze probíhá při pokojové teplotě
- Potřebná intenzita zdroje  $5 \times 10^{14} \mu/\text{s}$  - v budoucnu je možné dosáhnout této intenzity
- Problémy – **počet syntéz na 1  $\mu$** , při syntéze zůstane 0.8%  $\mu$  vázáno na  $\alpha$  částici a je ztraceno, tento problém se přes mnohaleté úsilí nepodařilo vyřešit
- Energie potřebná ke generaci  $\mu$  je dnes 6 GeV (ač  $m_{\mu}c^2 = 105 \text{ MeV}$ ), při daných ztrátách  $\mu$  by bylo třeba ji zmenšit na 1.5 GeV, a to se také nepodařilo



# Bilance fúzní energie



$$Q = \frac{E_F}{E_B + E_p}$$

$E_B$  – ztráty brzdým zářením =  $\alpha_B n^2 T^{1/2} \tau$

$E_p$  – energie plazmatu =  $2(3/2 n k_B T)$

$$\eta (E_{FS} + E_B + E_p) \geq E_p + E_B \Rightarrow$$

$$Q \geq 1/\eta - 1 = 1/(1/3) - 1 = 2$$

Lawson předpokládal účinnost navrácení uvolněné energie do plazmatu  $\eta = 1/3$  (typická účinnost parního cyklu)

Získaná fúzní energie  $E_{TS} = 1/4 n^2 \langle \sigma v \rangle \varepsilon_S \tau$

$$Q = \frac{n \tau \left( \frac{1}{4} \langle \sigma v \rangle_T \varepsilon_S \right)}{3k_B T + \alpha_B T^{1/2} n \tau} = f(n \tau, T)$$

$$T \cong 10 \text{ keV } (1.16 \times 10^8 \text{ K})$$

$$\Rightarrow n \tau \geq 10^{14} \text{ cm}^{-3}\text{s}$$

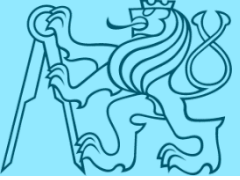
Lawsonovo kritérium <sup>(1)</sup>

2 základní možnosti –  $n \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\tau \sim 1 \text{ s}$  – magnetické udržení

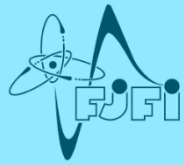
–  $n \sim 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\tau \sim 10^{-9} \text{ s}$  - inerciální udržení

(méně častá střední možnost –  $n \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\tau \sim 10^{-4} \text{ s}$  – pinč – husté zmagetované plazma) – historicky první studovaná možnost

<sup>(1)</sup>Lawsonovo kritérium odvozené z argumentů pro výrobu energie (původní odvození)



# Bilance fúzního výkonu



- Fúzní produkty – neutrony uniknou z paliva, ale  $\alpha$ -částice se zčásti zastaví v palivu a ohřívají ho, necht'  $\eta_\alpha$  je část energie  $\alpha$  částic ohřívající palivo, pak výkon ohřevu je

$$S_\alpha = \frac{1}{4} \eta_\alpha E_\alpha n^2 \langle \sigma v \rangle = \frac{1}{16} \eta_\alpha E_\alpha \frac{P^2}{(k_B T)^2} \langle \sigma v \rangle$$

- Výkon radiačních ztrát (brzdné záření) a výkon ztracený kvůli konečnému času  $\tau_E$  udržení energie jsou

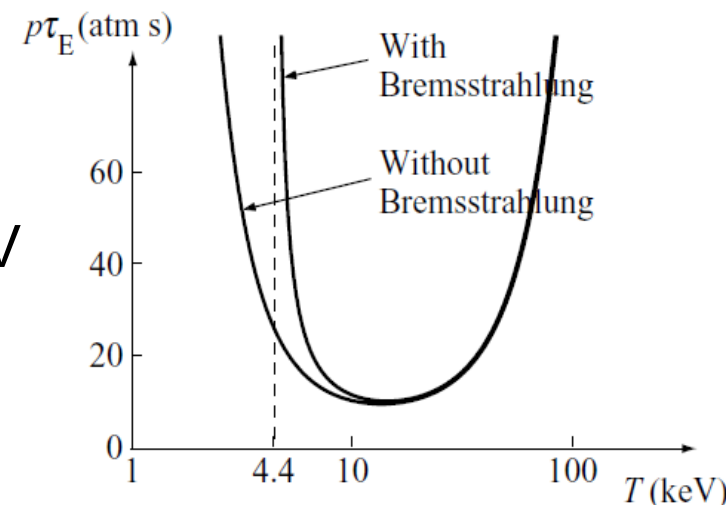
$$S_B = C_B Z_{eff} n^2 T^{1/2} \cong C_B n^2 T^{1/2} = C_B \frac{P^2}{k_b^2 T^{3/2}}$$

$$S_C = \frac{3}{2} \frac{P}{\tau_E}$$

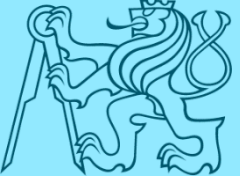
- Práh samostatného hoření je  $S_\alpha = S_B + S_C$ . Pro  $\eta_\alpha = 1$  je práh kreslen v závislosti na teplotě  $T$

- Minimum  $P\tau_E \cong 8.3$  bar.s při  $T = 15$  keV odpovídá  $n\tau_E = 1.7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}\text{s}$  (1)

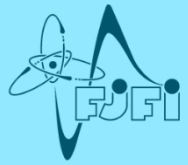
- Při 5 keV je práh  $P\tau_E \cong 36$  bar.s



(1) Lawsonovo kritérium odvozené z bilance výkonu



# Udržení a hoření



- Horké palivo musí být drženo po dostatečný čas  $\tau$ , aby shořela významná část  $\Psi$  paliva

Nechť  $n_f$  je kumulativní počet fúzních reakcí v jednotce objemu, nechť  $n_D$ ,  $n_T$  je hustota deuteria a tritia, potom

$$\frac{dn_f}{dt} = n_D n_T \langle \sigma v \rangle \quad \text{pro } t=0 \quad n_D = n_T = n_0/2 \text{ a } n_f = 0$$

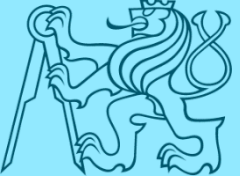
$$n_f(t) = \Psi(t) \times n_0/2 \quad \text{a} \quad \frac{n_0}{2} \frac{d\Psi}{dt} = \frac{n_0^2}{4} \langle \sigma v \rangle (1 - \Psi)^2$$

pro konstantní rychlost reakce ( $T_i \approx 20 \text{ keV} = 2.32 \times 10^8 \text{ K}$ ) dostaneme

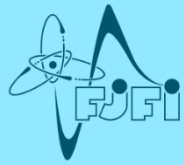
$$\Psi(\tau) = \left( 1 + \frac{2}{n_0 \langle \sigma v \rangle \tau} \right)^{-1} \quad \text{a k dosažení } \Psi = 1/3 \Rightarrow n_0 \tau \geq \langle \sigma v \rangle^{-1} \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}\text{s}$$

- Udržení
  - Gravitační (hvězdy) – p-p cyklus (Sun); CNO cyklus ( $\uparrow T$ ); CC reakce (WD)
  - Magnetické (tokamaky, stellarátory,  $n_0 \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,  $n_0 \tau_E \geq 10^{14} \text{ cm}^{-3}\text{s}$ ,  $\tau > \tau_E$ )
  - Inerciální (přímo hnaná fúze, nepřímo hnaná fúze) -  $\tau = \tau_E$



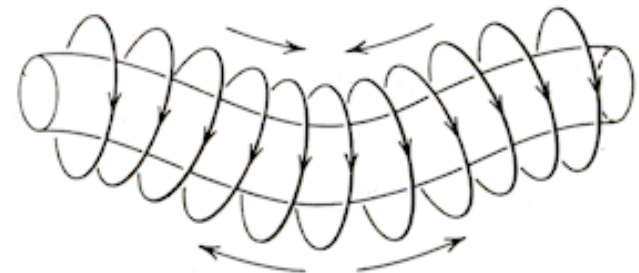


# Magnetické udržení



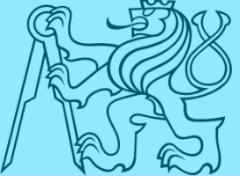
Existuje mnoho systémů magnetického udržení

- Uzavřené systémy
  - **Stelarátory**
  - **Tokamaky**
  - Multipóly
  - Zařízení s relativistickým elektronovým svazkem (ASTRON)
- Magnetická zrcadla
  - Magnetická vstříčná zrcadla
  - Basebalová cívka
- Pinče
  - z-pinč
  - $\theta$ -pinč

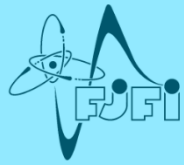


(a) Kink instability

Problémy – stabilita – typicky **smyčková (kink)**

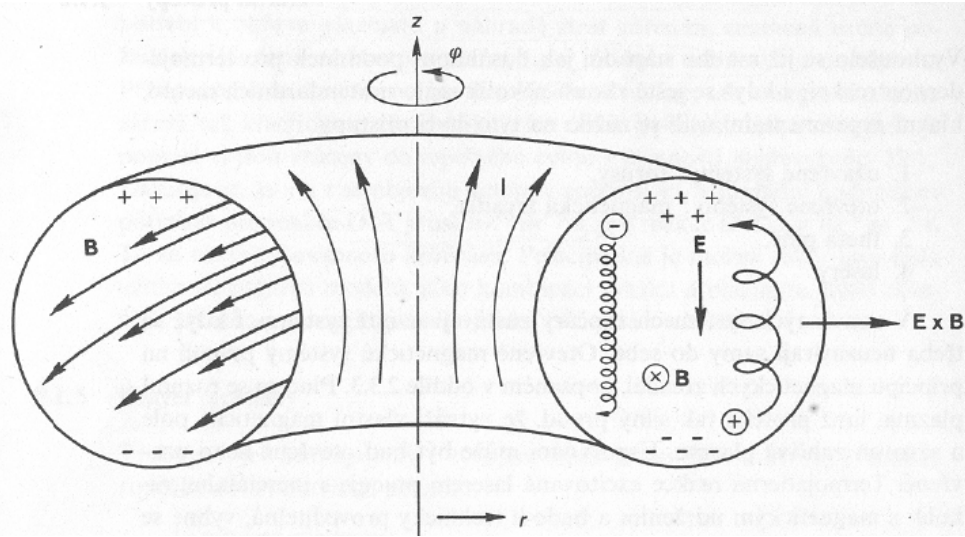


# Uzavřené systémy



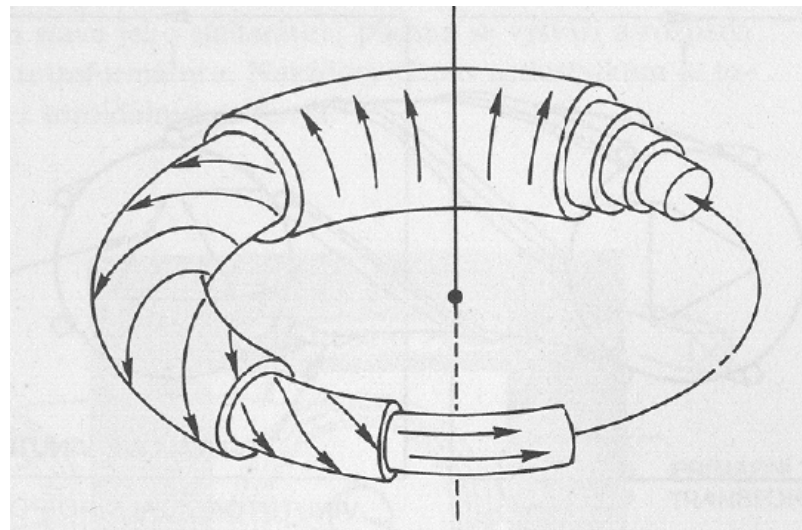
## Jednoduchý torus je nestabilní

- Drift zakřivení a  $\text{grad}B$  drift způsobí drift elektronů a iontů na opačné strany
- Prostorový náboj  $\Rightarrow$  pole  $E$
- $E \times B$  drift vyžene plazma ven

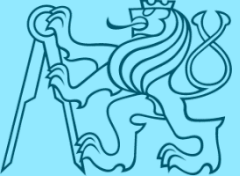


## Stabilizace

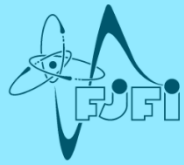
- Střižné (sheared) magnetické pole
- Magnetické pole s minimem uvnitř
- Dynamická stabilizace



Střižné magnetické pole v torusu

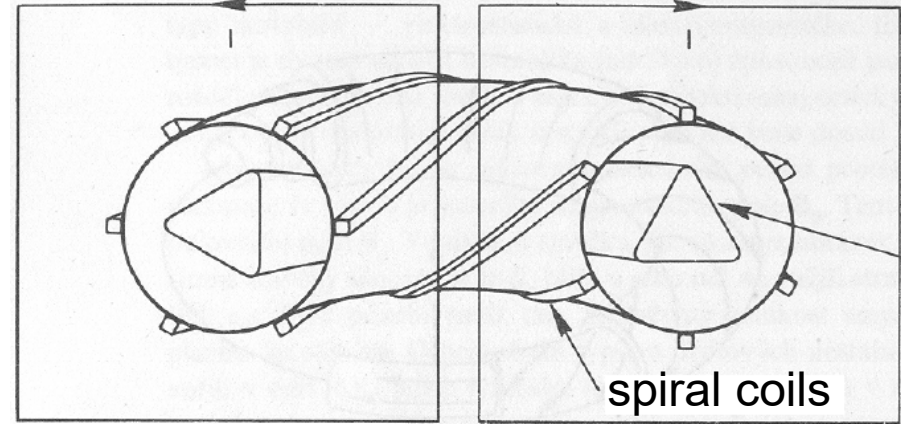
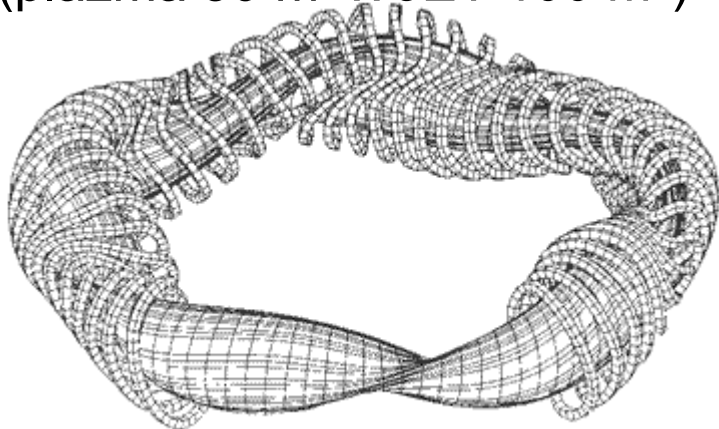


# Stelarátor

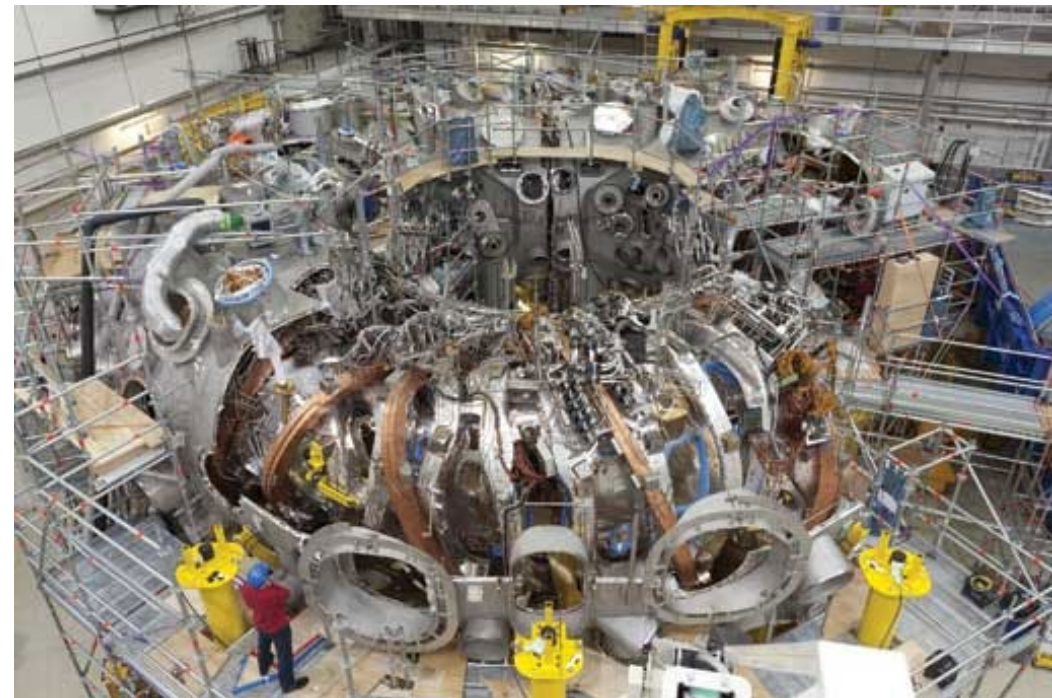


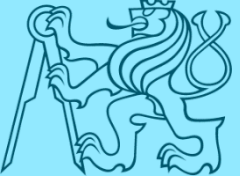
Toroidální systém se stacionární rovnováhou – externí ohřev  
Magnetické pole vytvářejí pouze externí cívky, siločáry pole se obrací na téměř konstantním malém poloměru.

Silocháry tvoří magnetické povrchy a neopouštějí je. V 2015, začaly fyzikální experimenty na novém supravodivém stelarátoru Wendelstein-7X v Německu (plazma 30 m<sup>3</sup> x JET 100 m<sup>3</sup>)

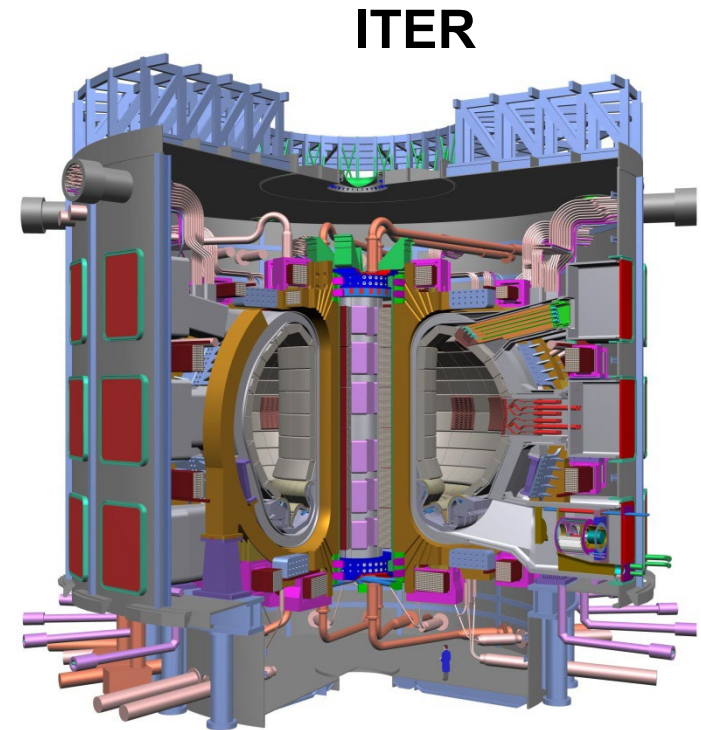
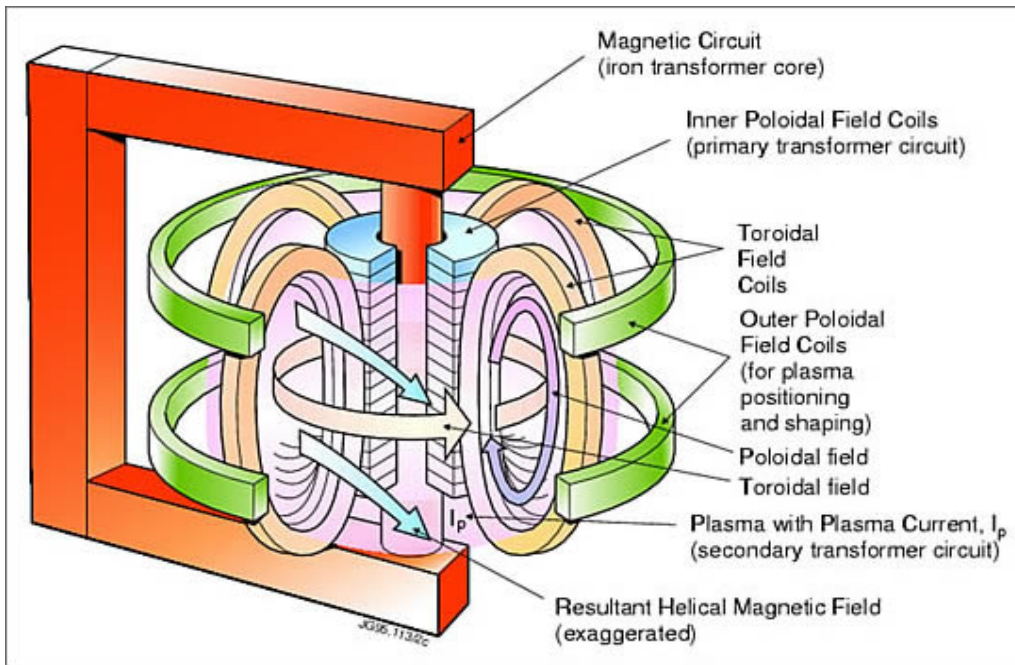
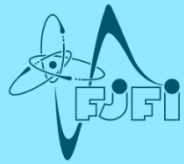


coils of toroidal field





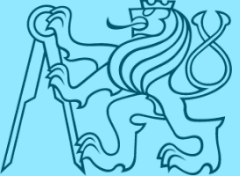
# Tokamak



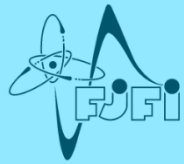
Tokamak (z ruštiny – toroidální komora s magnetickými cívkami) – v podstatě transformátor, kde toroidální plazma tvoří sekundární obvod, proud plazmatu vytváří poloidální pole. Vedle toroidálního pole vytvářeného externími cívkami, třetí vertikální (poloidální) magnetické pole je také zapotřebí (externí cívky)

Pracuje v pulzním režimu, primární ohmický ohřev nemůže dosáhnout fúzní teploty, sekundární ohřev – svazky neutrálních částic či RF antény

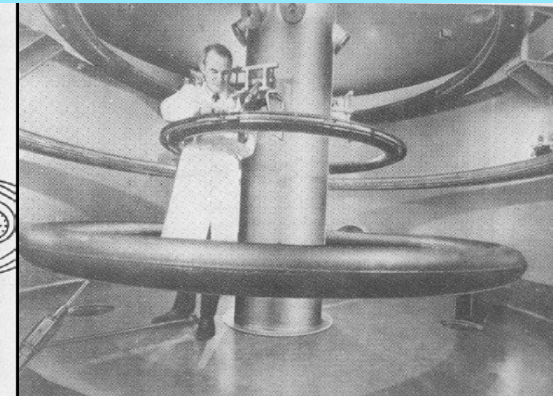
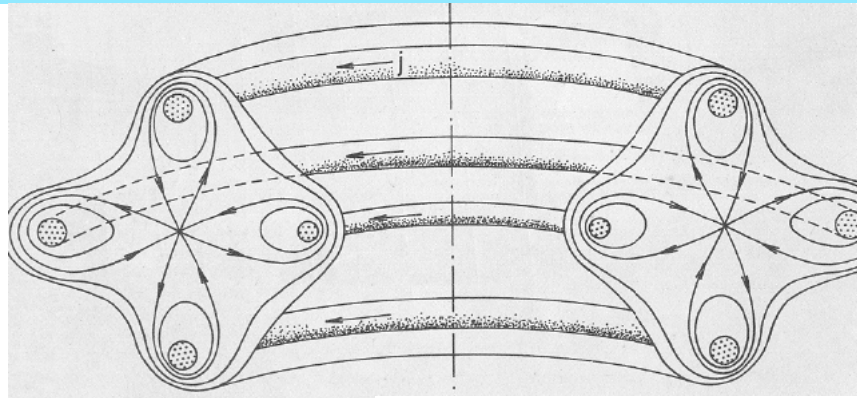
5 velkých tokamaků in 80 letech– JET (UK), nyní ITER ve výstavbě (2025?)



# Multipóly, magnetická zrcadla

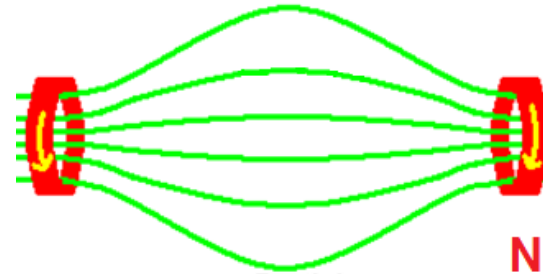


Multipóly – s rovnoběžnými vodiči v toroidálním tvaru tvoří konfiguraci s minimem-B která je MHD stabilní

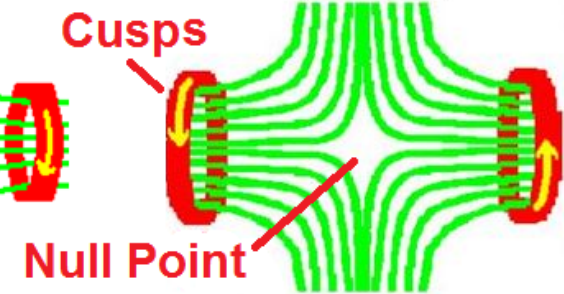


Obyčejné magnetické zrcadlo je také nestabilní, ale vstříčná magnetická zrcadla jsou stabilní.

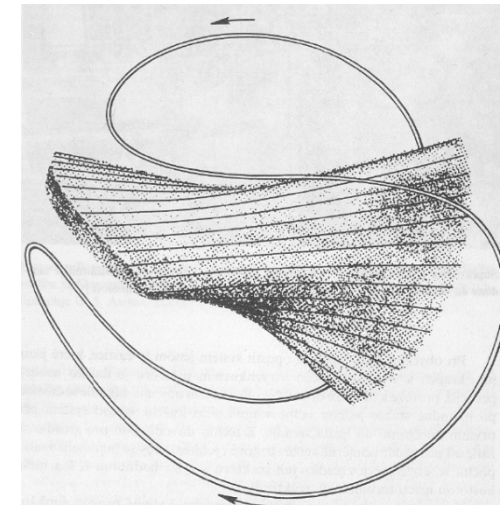
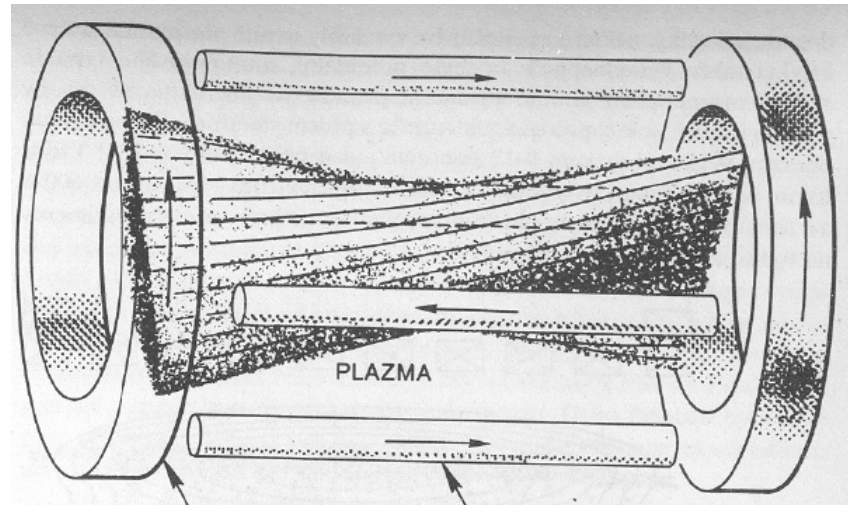
Magnetic Mirror:

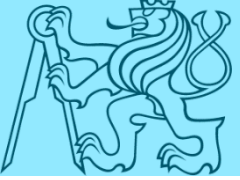


The Biconic Cusp:

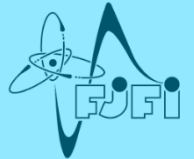


Stabilní konfigurace je dosaženo pomocí přidáním Ioffeho tyčí. Topologicky stejná konfigurace je dosaženo v baseballové cívce.

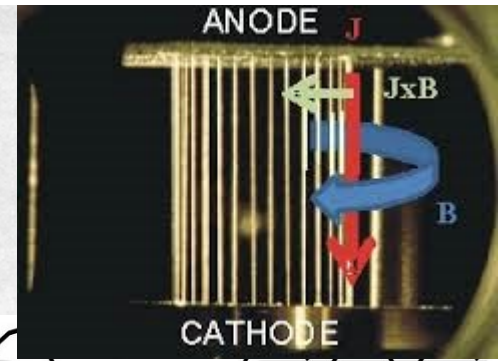
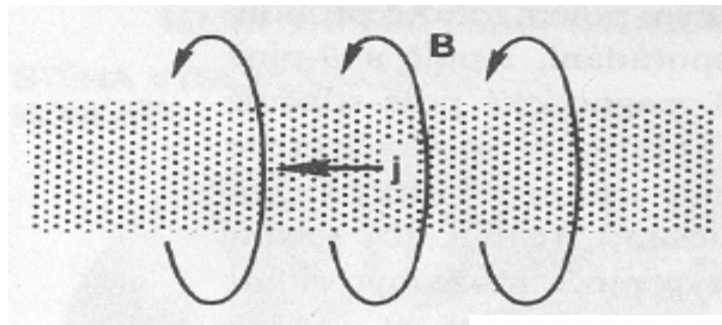




# Pinč – z-pinč a $\theta$ -pinč



Z-pinč – magnetické pole generované výbojem s velkým proudem může výbojové plazma stlačit – jev pinče - klasický z-pinč nestabilní rovnováha



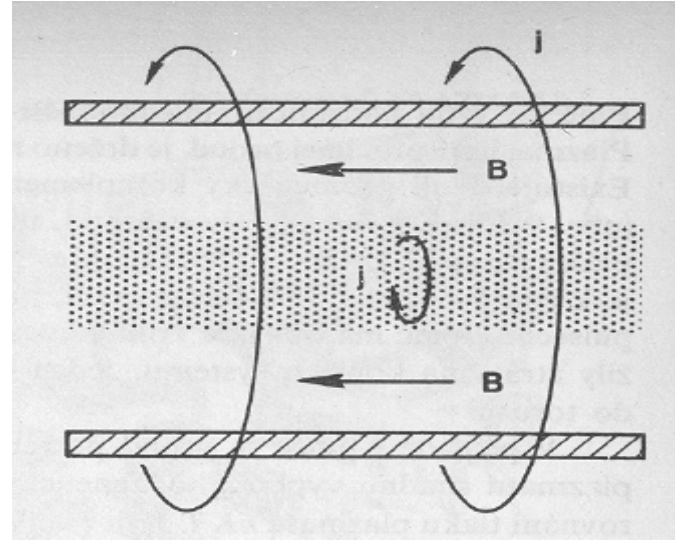
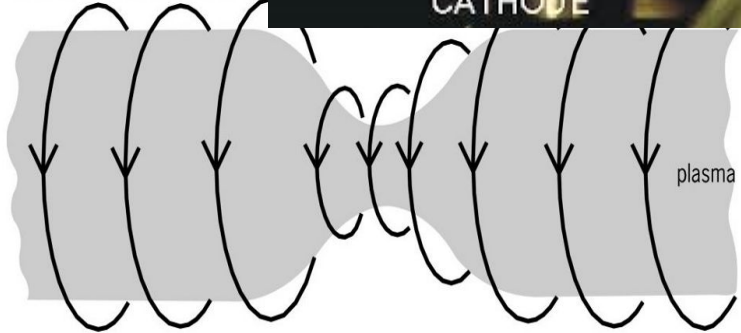
z-pinč; z-pinč s cylindrem z drátků

$$\frac{d}{dr} \left( p + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) = \frac{1}{\mu_0} (\vec{B} \nabla) \vec{B} = -\frac{B^2}{\mu_0 r} \quad \text{nestabilita zaškrčení}$$

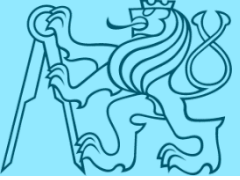
$$B = \frac{I}{2\pi r \epsilon_0 c^2} \Rightarrow I^2 = 2 \times 10^7 N k_B T, \text{ počet elektronů na jednotku délky } N = \pi R^2 n \quad \text{Bennettův vztah}$$

**Z-machine** v Sandia National Laboratory, USA

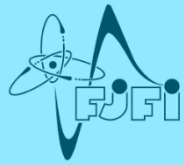
$\theta$ -pinč – proud ve směru  $\theta$  ve vnější obálce indukuje opačný  $\theta$  proud v plazmovém sloupci; překvapivě stabilní; může být vytvořen i v toroidální geometrii



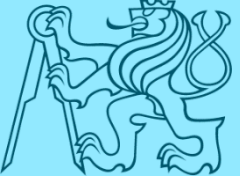
$\theta$ -pinč



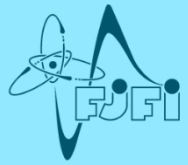
# Inerciální fúze – nutnost stlačení



- Inerciální udržení – stěží jde o udržení, v důsledku setrvačnosti trvá rozlet horkého paliva konečný čas  $\tau$
- Předpokládáme sférické horké palivo o poloměru  $R$ , pak  $\tau \approx R/3c_s$  (iontozvuková rychlost  $c_s \sim T^{1/2}$ ) a  $n_0 \cong \rho/2.5m_p \Rightarrow \Psi = \frac{\rho R}{\rho R + H_B}$ ,  $H_B \cong 6.3 \text{ g/cm}^2$ ,  $\Psi = 1/3 \Rightarrow \rho R = 3 \text{ g/cm}^2$
- Tlak paliva  $P$  [bar]  $\approx 8 \times 10^8 \rho T_i$  [keV]
- V podmínkách ICF (inerciální fúze):  $\rho R \approx 3 \text{ g/cm}^2$ ,  $T \approx 10 \text{ keV} \Rightarrow PR \sim 3 \times 10^{10} \text{ bar} \times \text{cm} \Rightarrow E \sim PV \sim 3 \times 10^9 R^2$  [J]
- Pokud lze do paliva dodat energii  $E \sim 300 \text{ kJ}$ , pak  $R \sim 100 \mu\text{m}$ ,  $P \sim 3 \text{ Tbar}$ ,  $\rho \sim 300 \text{ g/cm}^3$  (hustota DT ledu  $\rho_{\text{DT}} = 0.25 \text{ g/cm}^3$ ,  $m_{\text{DT}} \sim 1.25 \text{ mg}$ )
- *Jak dosáhnout tak ohromných tlaků a hustot?*  
**Pečlivě vyladěnou sférickou implozí !!**

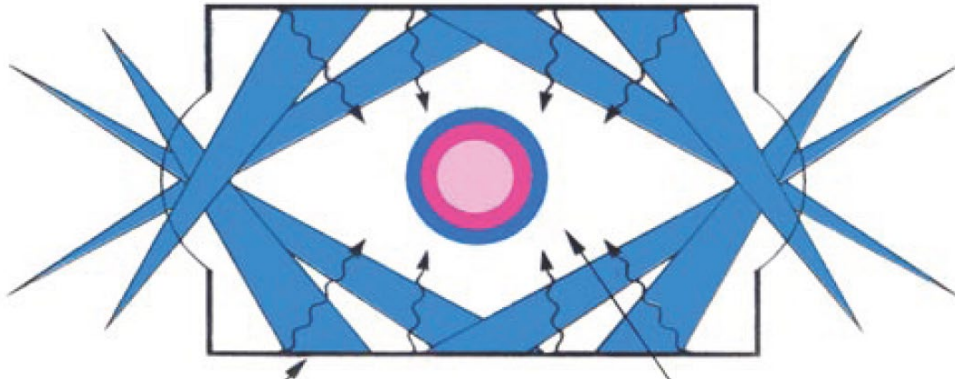


# Nepřímo a přímo hnaná fúze



## Nepřímo hnaná fúze

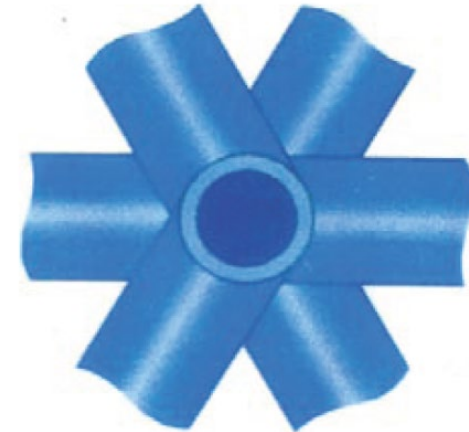
### Indirect Drive



Lasery, svazky těžkých iontů nebo Z-pinče generují v miniaturní dutině zvané hohlraum rentgenové záření, které ozařuje a abluje sférický terčik s palivem

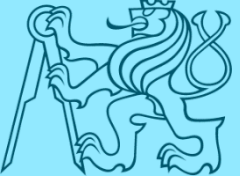
## Přímo hnaná fúze

### Direct Drive

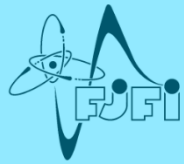


Lasery nebo svazky těžkých iontů přímo ozařují a ablují sférický terčik s palivem

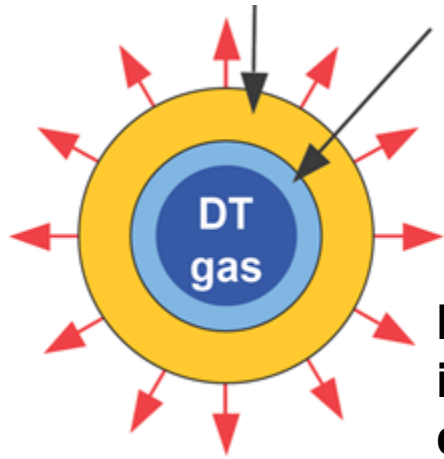




# Ablace a komprese



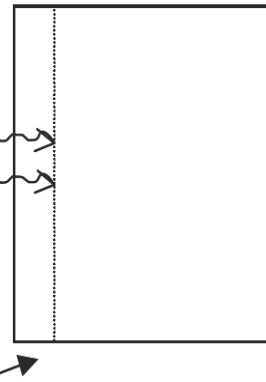
## Ablátor s nízkým Z pro účinnou absorpci



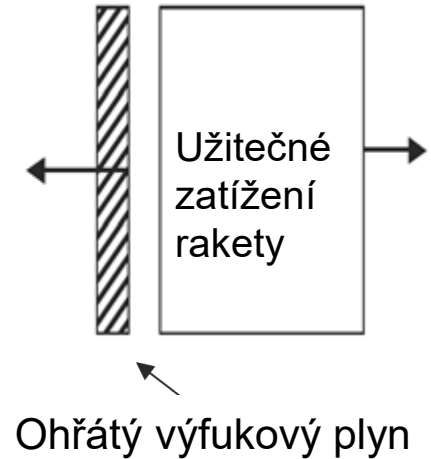
Kryogenní  
DT palivo  
pro účinnou  
kompresi

Raketě-podobná  
imploze téměř Fermi-  
degenerovaného paliva

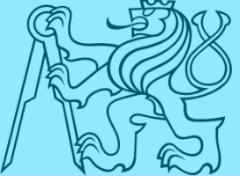
Lasery  
nebo rentge-  
nové záření



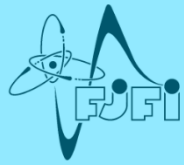
Absorpční oblast



- Zrychlení vyplývá ze zákona zachování hybnosti
- Ozáření je vyrovnáváno výtokem ohřátého materiálu
- Pro nepřímo hnanou  $I_{X\text{-ray}} \approx \sigma_{SB} T_r^4 \sim n T c_s \Rightarrow P_{abl} \sim \sigma_{SB} T_r^4 / c_s \sim T_r^{3.5}$
- Typicky  $T_r \approx 300 \text{ eV} \Rightarrow I_{X\text{-ray}} \approx 8 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2 \Rightarrow P_{abl} \approx 100 \text{ Mbar}$
- Přímá hnaná - podobné intenzity laseru, krátké  $\lambda$  potlačí horké elny
- Stagnace (max. komprese)  $P_{sg} V_{sg} \approx P_{abl} V_0$  a  $P_{sg} \sim 10^4 P_{abl}$   
 $\Rightarrow V_{sg} \sim 10^{-4} V_0 \Rightarrow R_0 / R_{sg} \sim 20$  *(jako stlačení fotbalového míče do hrášku)*

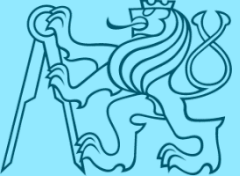


# Konverze energie a zisk

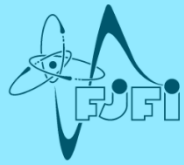


- Energie driveru  $E_D$  je předána s účinností  $\eta_c$  do terčíku
- Energie terčíku  $\eta_c E_D$  je konvertována s hydrodynamickou účinností  $\eta_H$  na kinetickou energii implodujícího paliva
- Typicky

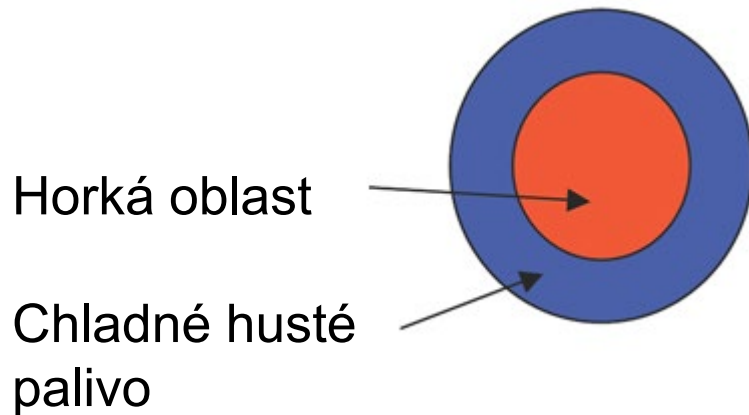
	Přímá fúze (DD)	Nepřímá fúze (ID)
$\eta_c$	0.8	0.2
$\eta_H$	0.1	0.2
- Čili celková účinnost  $\eta_T$  je  $\sim 0.08$  pro DD a  $\sim 0.04$  pro ID
- Teoretický energetický zisk fúze se zdá být velkým
$$G \approx \frac{17.6 \text{ MeV}}{4 \times \frac{3}{2} k_B T} \cdot \Psi \sim \frac{17.6 \text{ MeV}}{6 \times 5 \text{ keV}} \Psi = 580 \Psi \sim 190$$
- Ale celkový zisk v terči je  $G_T \sim \eta_T G \sim 16$  (DD) a  $\sim 8$  (ID). Když vezmeme do úvahy účinnost konverze tepla na elektřinu a elektřiny na energii driveru, je to příliš málo.
- Tak **objemově ohřátý DT** nelze využít pro výrobu energie.



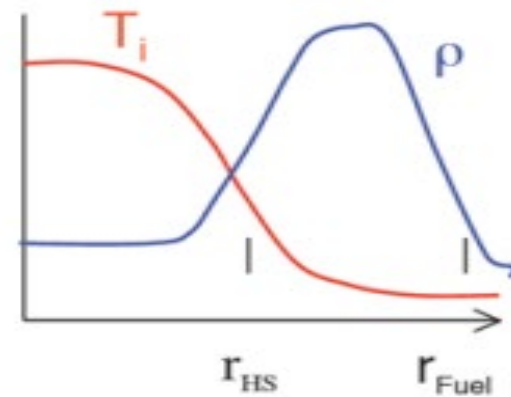
# Jiskrové zapálení



- Řešení – ohřát jen malou část paliva na vysokou  $T$  a fúzní  $\alpha$  částice ohřejí okolní chladné husté palivo a vlna fúzního hoření se šíří

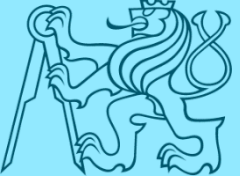


Tlaková rovnováha

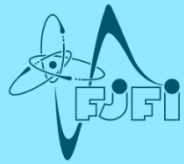


Isobarický profil stlačeného paliva

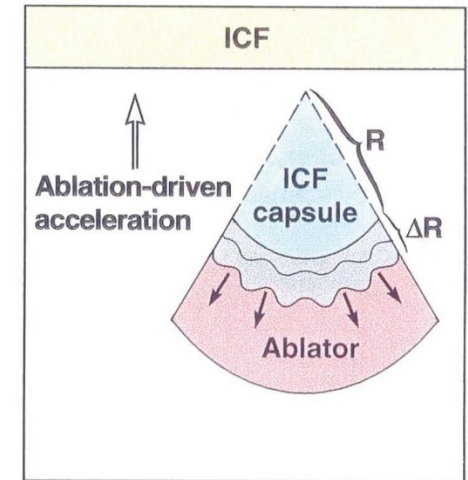
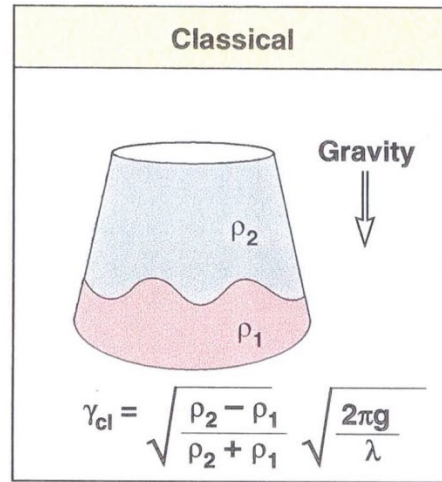
- Schéma funguje výborně v 1D sférických numerických simulacích, ale život není 1D
- **Nesmí dojít k mísení** chladného paliva s palivem horké oblasti
- Symetrie je důležitá, malé odchylky od symetrie se zvětší, když se slupka implozí zmenší na velmi malý poloměr
- Hydrodynamické nestability při implozi jsou hlavním problémem



# Rayleigh-Taylorova nestabilita (RTI)

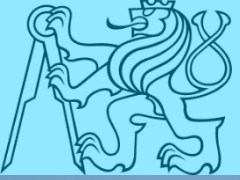


- RTI je hlavní problém
- RTI může vzniknout tam, kde  $\nabla \rho \cdot \nabla P < 0$
- Klasicky rozhraní mezi horní těžší tekutinou a lehčí tekutinou dole

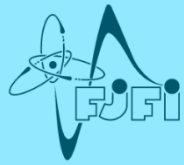


- Když se blížíme k ablační ploše z vnějšku - hustota  $\uparrow$  tlak  $\downarrow$
- Fáze zpomalení - nestabilní oblast při stagnaci – poruchy vedou ke smísení chladného paliva s palivem z horké oblasti, což může zastavit hoření
- 3D výpočty se používají k odhadu fungování terčů v přítomnosti poruch

140 ps before ignition time	Ignition time
<p>Plastic/DT interface <math>\updownarrow</math> Hohlraum axis</p>	<p>Stagnation shock</p>
60 g/cc density isosurface	400 g/cc density isosurface (different scale)

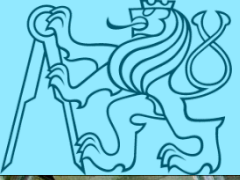


# National Ignition Facility

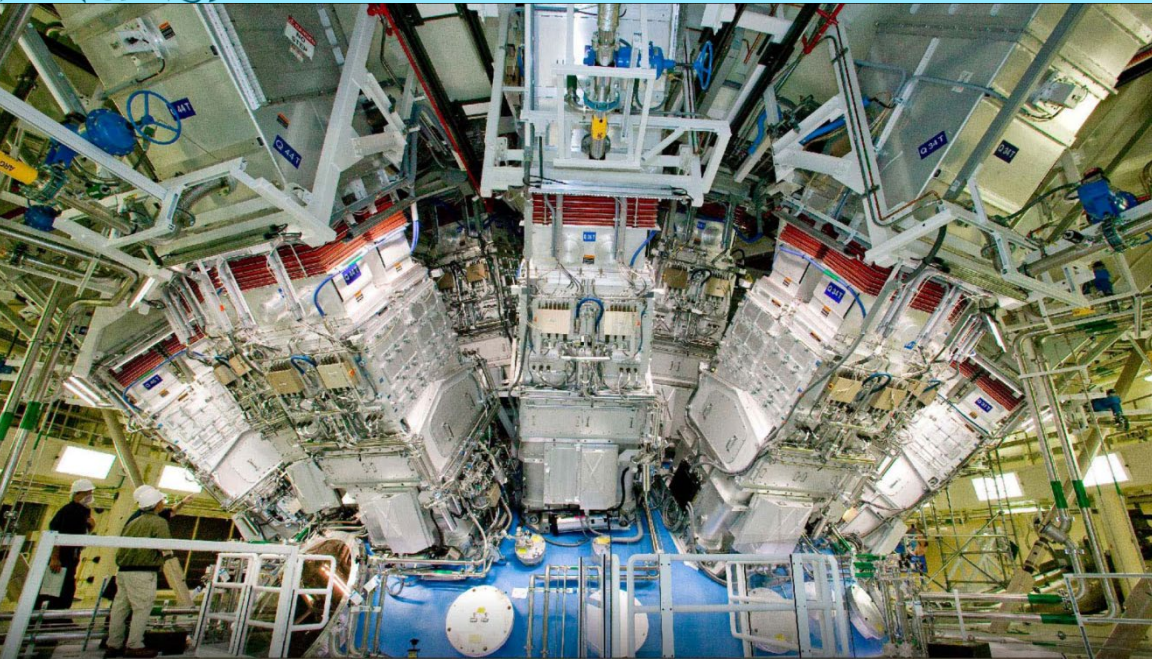
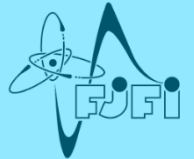


- 1 budova, 5 hektarů (2 fotbalová hřiště)
- Výška domu 10 pater
- 10 let výstavby
- 30 roků fungování
- > 4 G\$ - finance pro údržbu arsenálu strategických jader. zbraní
- Nepřímo hnaná fúze - primární (~ H bomba)
- 192 svazků Nd-laseru v 48 čtveřicích konvertováno do  $3\omega$  – 1.8 MJ v 20 ns tvar. pulsech
- 1 výstřel/8 hod.,  $\eta < 1\%$
- Plná energie 2009
- **Funguje perfektně**

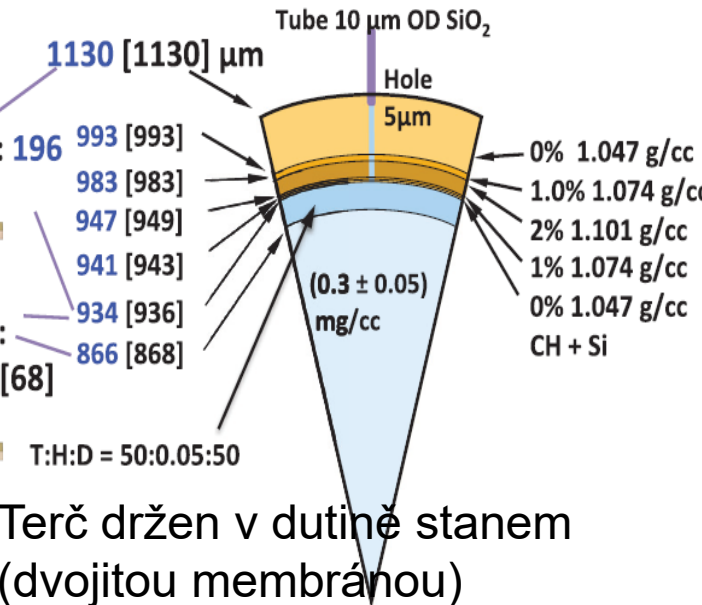
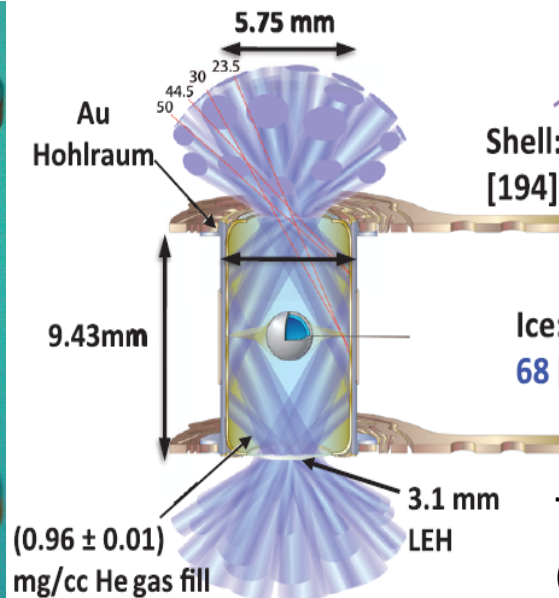
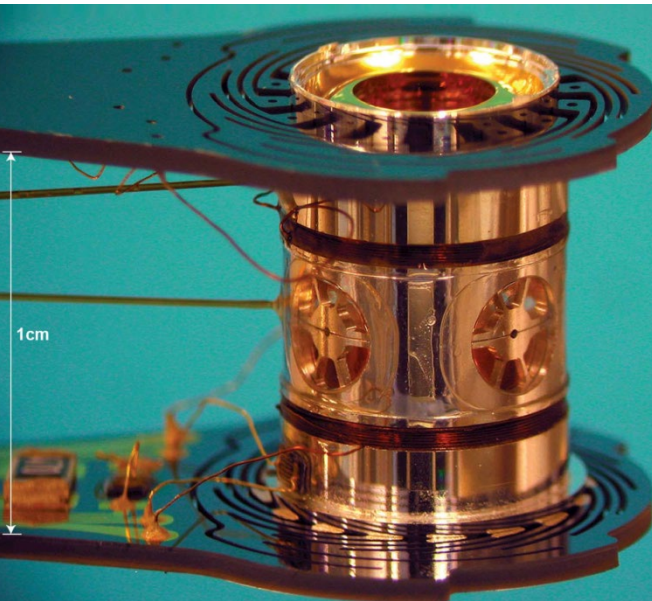
Podobná lab. LMJ u Bordeaux nyní v náběhu

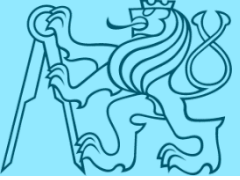


# NIF interakční komora a terče

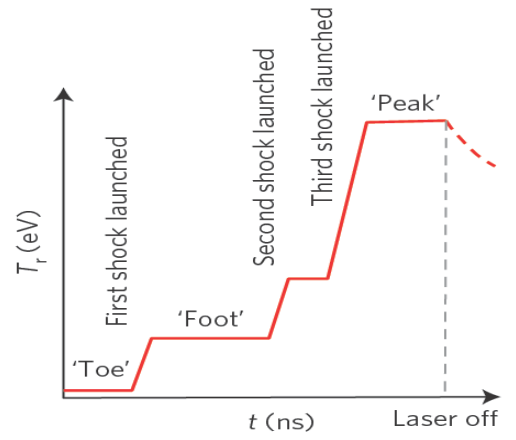
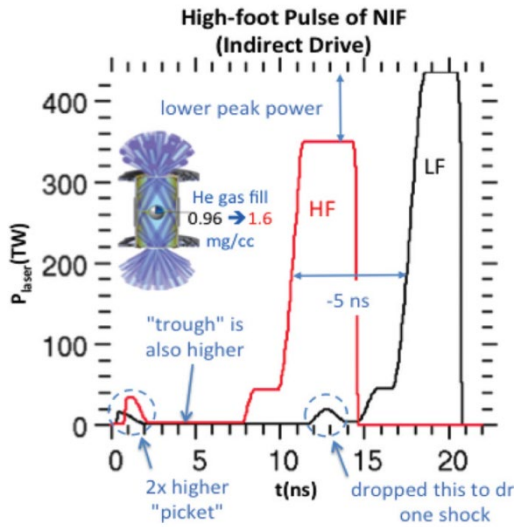
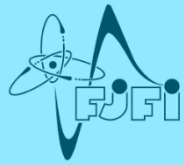


Terčová komora  $\varnothing$  10 m  
 pohled z rovníku  
 (diagnostika a terče)  
 Laserové svazky ze spodní  
 a horní strany  
 Kryogenní terč při 17.3 K  
 Hohraum, lasery - 4 kužely  
 Terč s vrstveným ablátorem  
 z  $(CH)_n$  dopovaného Si

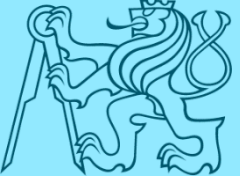




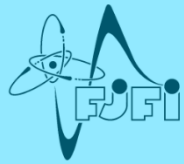
# Experimenty



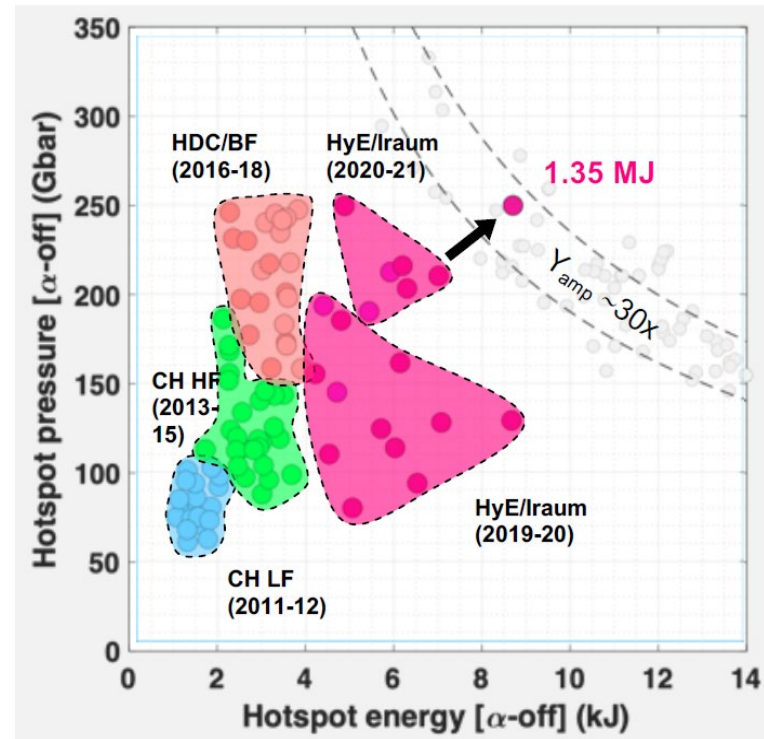
- Dutina (hohlraum) a terčik (capsule) musí být přesně sesouhlaseny s laserovým pulsem
- Původní schéma vyvinuté během 10 let založeno na 4 rázových vlnách s předpuls (picket) o malé energii  $\Rightarrow$  nízká radiční  $T_r \Rightarrow$  malá 1. rázová  $\Rightarrow$  k udržení paliva na nízké adiabatě ( $P/P_{\text{Fermi}} \sim 1.45$ )
- Laser  $\lambda$  je u vnějšího kužele laděno pro modifikaci transferu energie mezi svazky (CBET) k dosažení makroskopicky symetrického ozáření terče (časová závislost nejasná, modelování nedostatečné)
- Parametry návrhu – špičková  $T_r = 300$  eV,  $v_{\text{impl}} \cong 370$  km/s,  $P = 375$  Gbar, zisk  $\sim 10$  ( $5 \times 10^{18}$  neutronů)
- Nestability a mísení paliva v simulacích podceněno  $\Rightarrow$  maximální fúzní výtěžek  $\sim 10^{15}$  neutronů
- Nestabilní růst baroklinické vorticity ( $\nabla \rho \times \nabla P / \rho^2$ ) startovaná stanem
- Částečné řešení – **větší předpuls** + 3-rázové vlny - stabilita  $\uparrow$ , zisk  $\uparrow$ , předvídatelnost  $\uparrow$  (nevýhoda – adiabata  $\uparrow \Rightarrow$  nižší komprese)



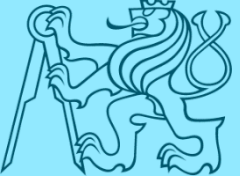
# History of improvements



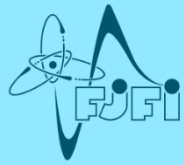
- **High foot** – foot  $T_r \sim 90$  eV ( $1.5 \times T_r$  for low foot) to increase ablation velocity and density scale length  $\Rightarrow$  ablative RT instability is suppressed, but higher adiabat ( $P/P_{Fermi} \cong 2.5$ ) reduces convergence ratio
- 1.9 MJ of  $3\omega$  radiation led to released fusion energy 26 kJ > **2x** fuel energy, doubling fusion yield due to  **$\alpha$ -particle self-heating** (2013-2014)
- **Diamond (HDC/BF) capsule** (+ lower gas fill of depleted uranium hohlraum) increased released fusion energy to 54 kJ in 2018
- **HybridE/Iraum** bigger capsule radius (910  $\rightarrow$  1100  $\mu\text{m}$ ) in slightly bigger hohlraum ( $\varnothing$  6.2  $\rightarrow$  6.4 mm) led to higher hot-spot energy
- **HybridE** with radius 1050  $\mu\text{m}$  2020-21 used **frequency detuning** between inner and outer laser cone, Feb 21 yield  $\sim$  170 kJ, **burning plasma regime** when up to bang time  **$\alpha$  energy > work by pressure**



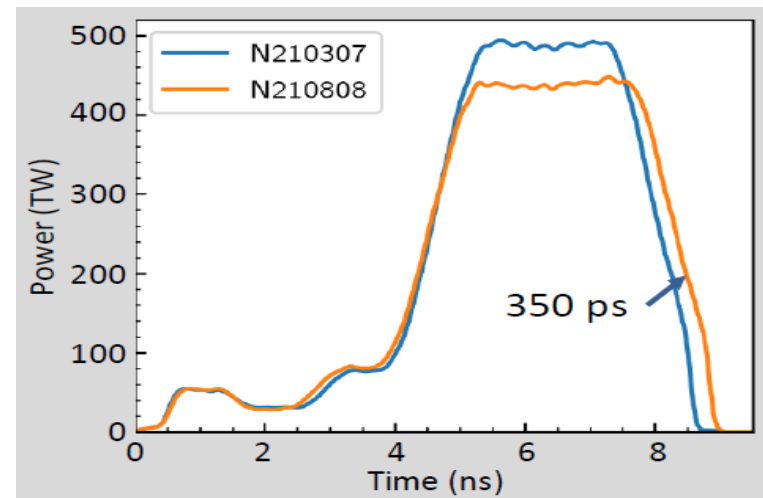
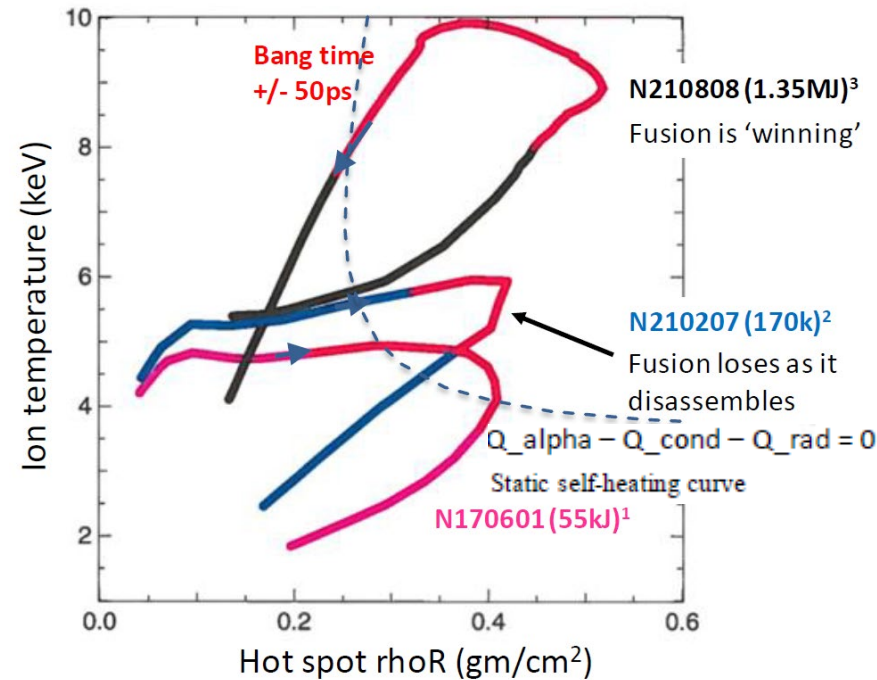


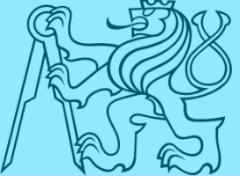


# Ignition shot parameters

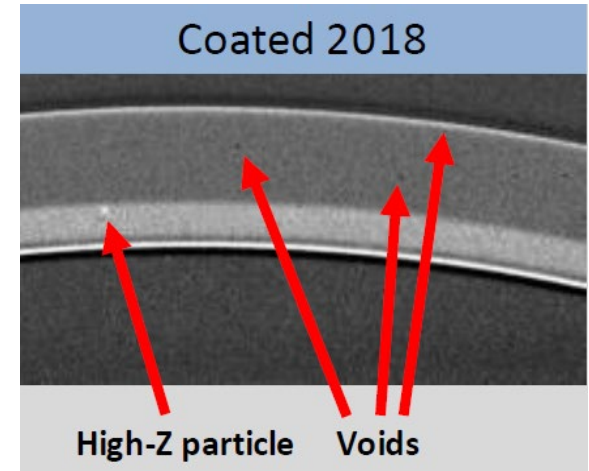
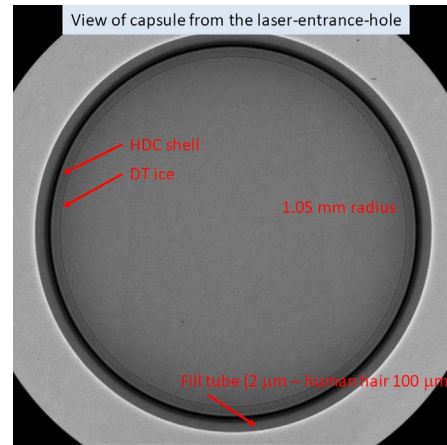
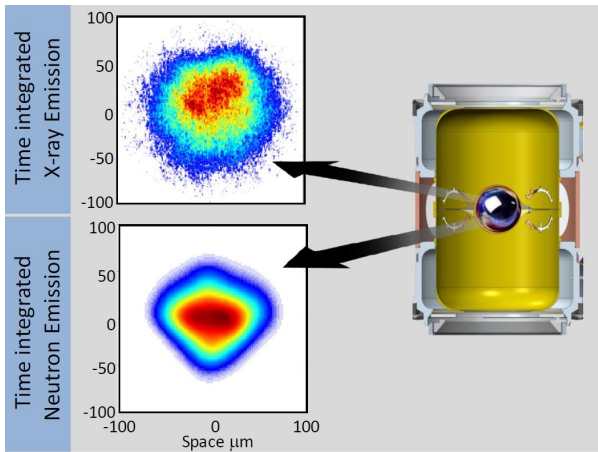
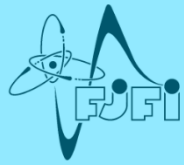


- Inertial fusion **ignition and burn** on Aug 8, 2021 – **fusion energy 1.3 MJ** still less than laser energy 1.9 MJ (breakeven not achieved)
- **HDC (high-density carbon)** shell capsule (3.48 g/cc) – shorter laser pulse
- **Gold-plated depleted Uranium** hohlraum
- **Lower density He-gas fill** (0.3 mg/cc)
- Wavelength separation (1-2 Å) between inner and outer laser cones
- **Bigger capsule** - 1050 μm inner radius, thickness 78 μm, inner 5 μm undoped, then 20 μm doped by W
- **Thicker DT layer** (65 μm)
- **Narrower DT fill tube** ∅ 2 μm
- The **best quality capsule** (pits and voids reduced 100× from 2018)
- **Smaller laser entrance holes** ∅ 3.1 mm (laser beams had to be repointed)
- **Reduce coasting time** (bang time – laser end) – lower max laser power - 440 TW

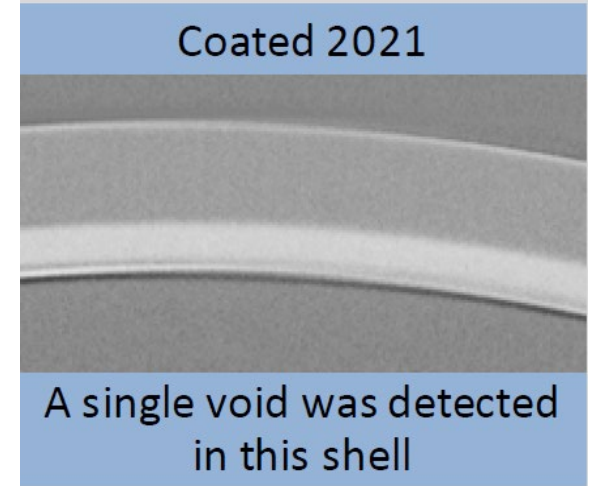
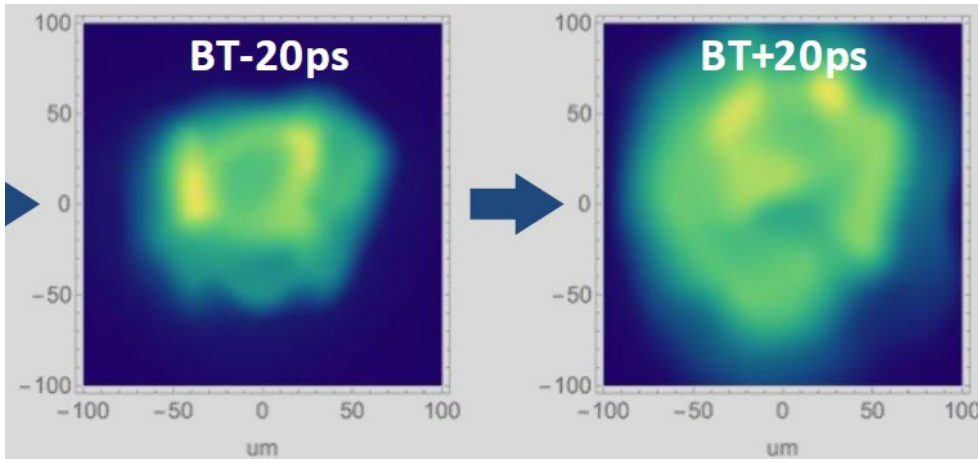




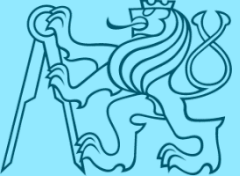
# Ignition shot



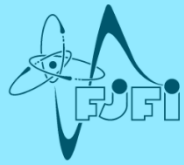
250 diagnostics fielded



Measured X-ray emission in ignition shot 20 ps before after bang time (maximum compression)



# Ignition and breakeven shots

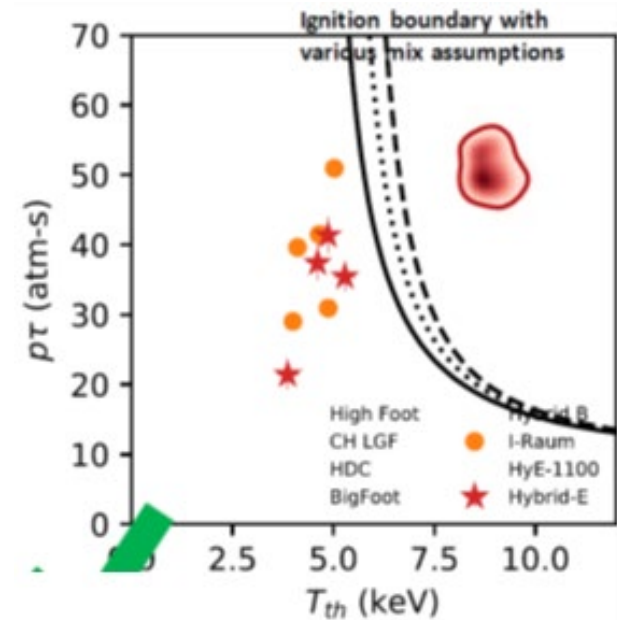


- Hot spot temperature evolution

$$c_{DT} \frac{dT}{dt} = f_{\alpha} Q_{\alpha} - f_B Q_B - Q_e - \frac{1}{m} P \frac{dV}{dt}$$

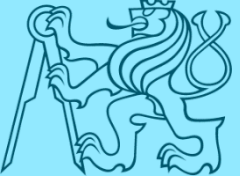
$\alpha$ -heating  $Q_{\alpha} \sim T^{3.6}$ , work  $p dV$  heats hot spot before bang time and cools it after

- Ignition -  $\alpha$ -heating > losses**, 70–80% of  $\alpha$  heats hot spot ( $\varnothing 100 \mu\text{m}$ ), 20-30 % heats surrounding DT
- Max  $\rho_c \approx 100 \text{ g/cc}$ ,  $p_c \approx 450 \text{ Gbar}$ , burn time  $\sim 90 \text{ ps}$
- $\alpha$  energy  $> 250 \text{ kJ}$ , radiation loss  $\approx 60 \text{ kJ}$ , work  $\approx 20 \text{ kJ}$
- Capsule absorbed energy  $\approx 230 \text{ kJ}$ , **capsule gain  $\approx 6$**
- Fusion energy 1.35 MJ**, power 15 PW, mix  $\sim 10\%$
- Burnt 2% of DT fuel (NIF energy input – 320 MJ/shot)
- 3 repeat experiments reach 25 – 50% fusion yield (but all  $>$  early 21, all  $>$  capsule absorbed energy)



## Breakeven (positive energy balance) – Dec 5, 2022

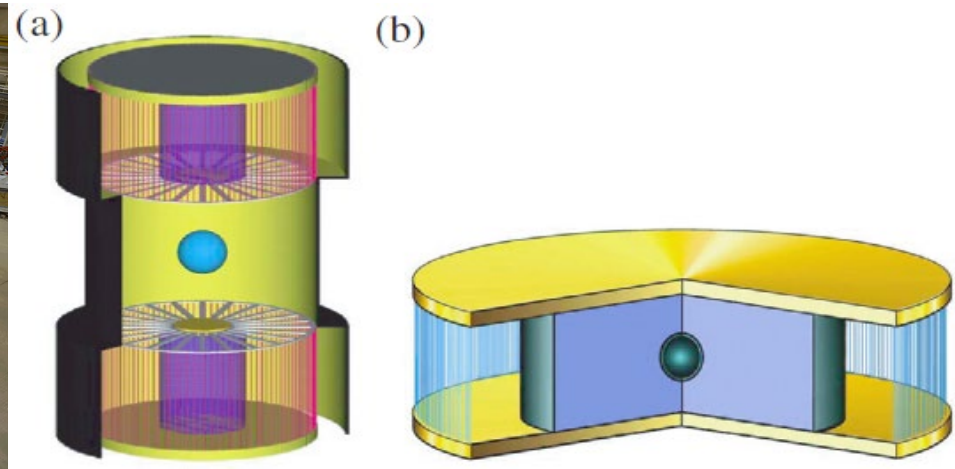
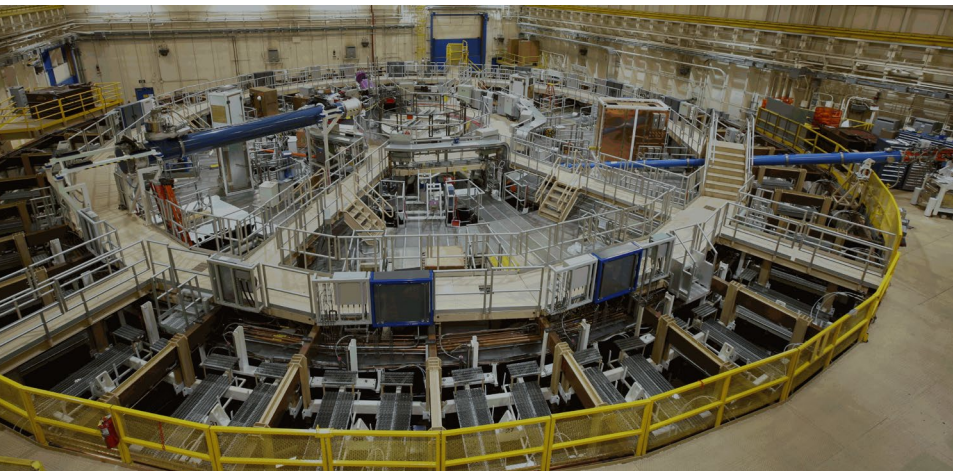
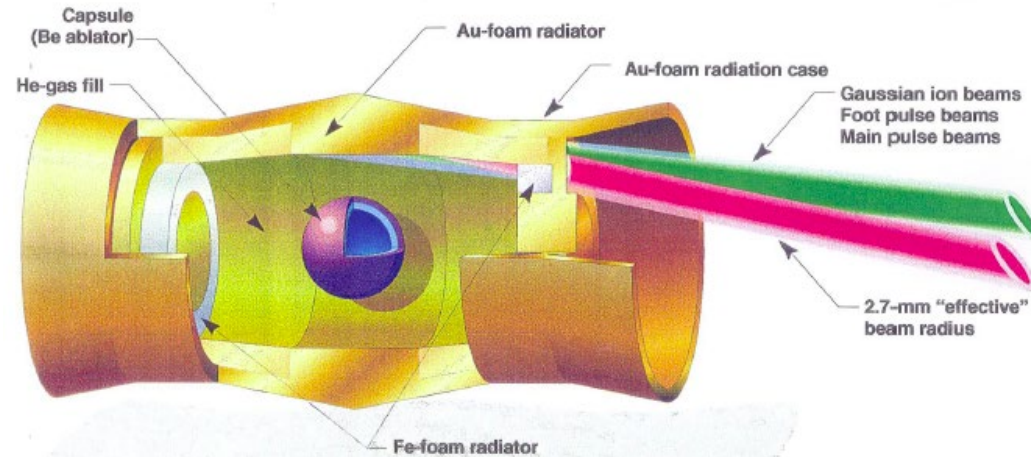
- Laser energy increased to **2.05 MJ**, released fusion energy **3.15 MJ** (gain  $\sim 1.5$ )
- 8% thicker capsule corresponding to laser energy increase, better protection against hydro instability growth
- Difference in laser wavelength increased from 0.25 to 0.275 nm

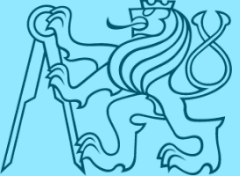


# Alternativní drivery pro inerciální fúzi

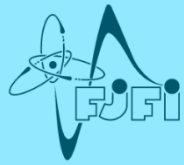


- **Jaderný výbuch** – v programu Halite/Centurion 80-tých letech rentgenové záření z podzemního jaderného výbuchu svítilo do dutiny (hohlraumu) a zapálilo inerciální fúzi v terči
- **Svazek těžkých iontů** - zdroj s účinností  $>50\%$  a 10 Hz dosažitelný, nepřímá i přímá fúze, nikdo dosud nechtěl financovat velké zařízení
- **Z-pinč (systém drátků)** – Z-machine Sandia 2 MJ energie v rtg., 15% účinnost elektrina do rtg.

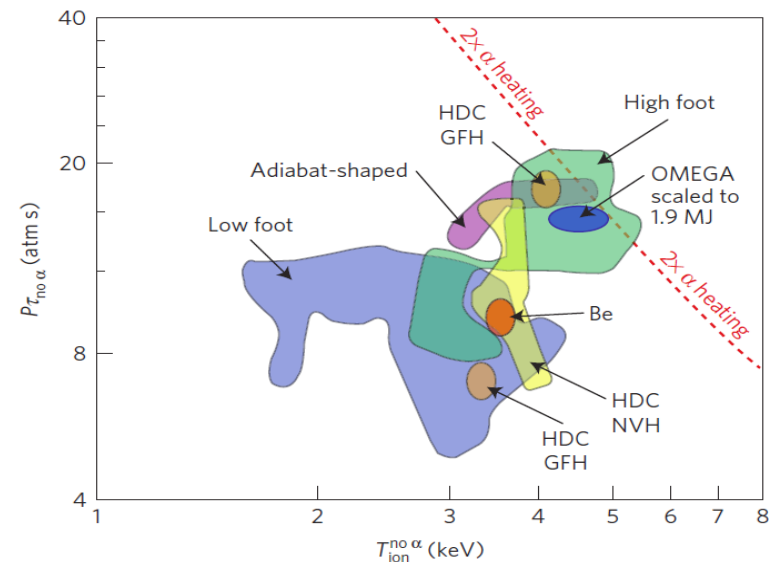
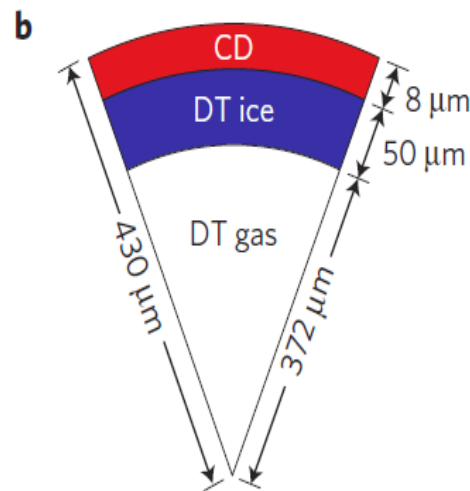
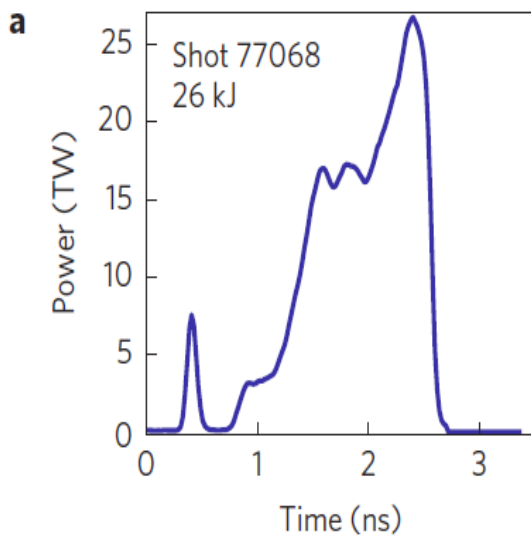


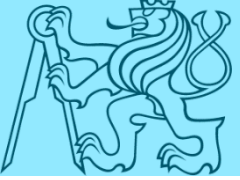


# Přímo hnaná fúze

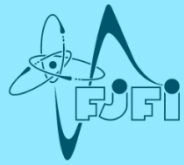


- Hlavní experimenty na laseru Omega v LLE Univ. Rochester, USA
- 60 laserových svazků symetricky ozařuje kryogenní terč
- Celková energie laseru 30 kJ, má systémy vyhlazování svazků
- Intenzita mírně  $< 10^{15}$  W/cm<sup>2</sup> kvůli nestabilitám při interakci laseru
- Výsledná imploze odpovídá hydrodynamicky  $\sim 2x$   $\alpha$  ohřevu při energii NIFu (vyšší  $\eta_C$ , ale nižší kvalita imploze)
- NIF – polární přímo hnaná fúze (symetrická nelze) – předběžné experimenty, zvětšené ztráty kvůli přenosu energie mezi svazky

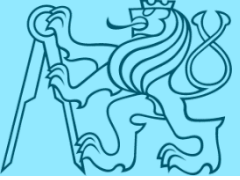




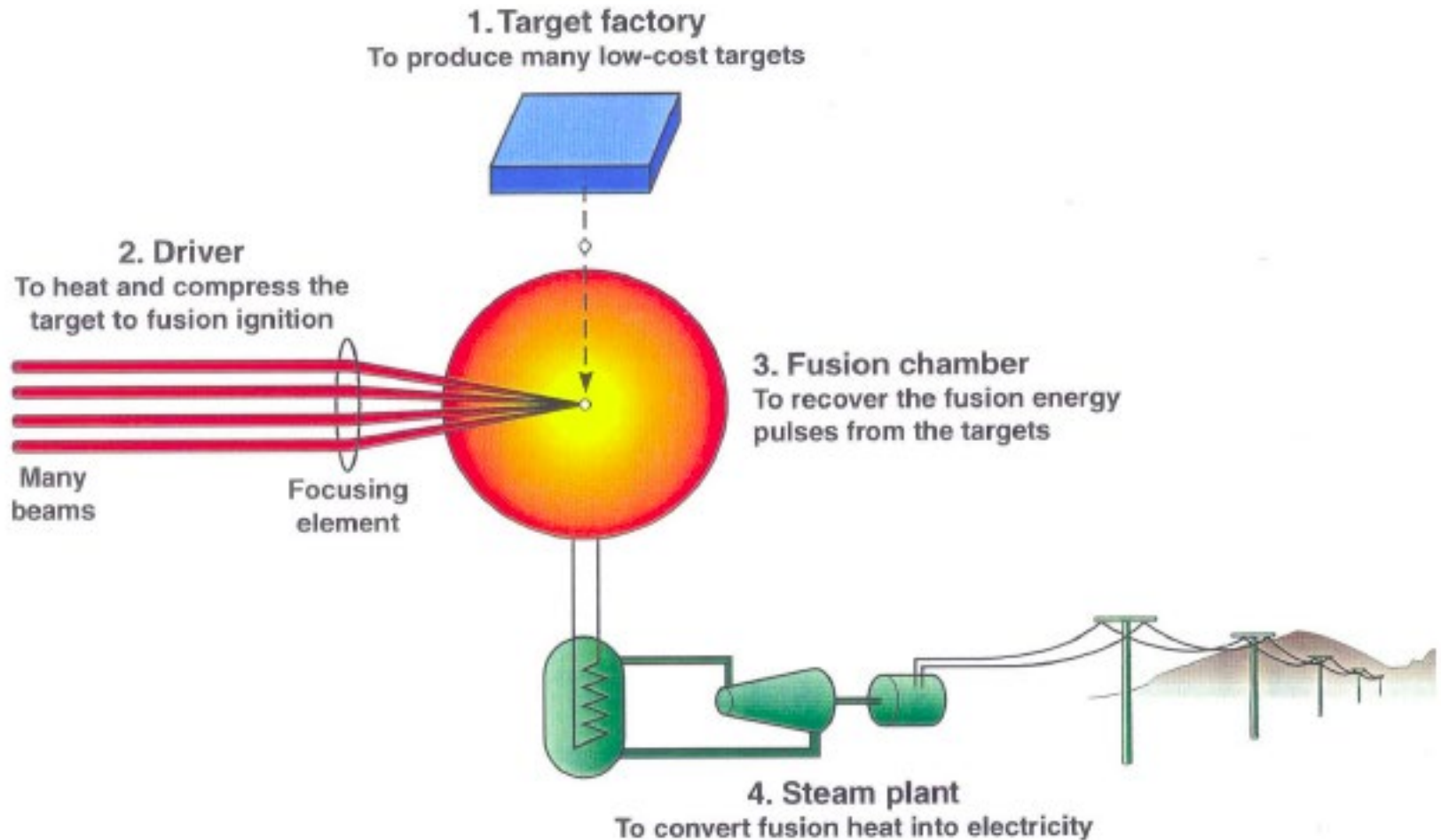
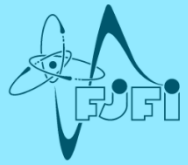
# Pokročilá fúzní schémata



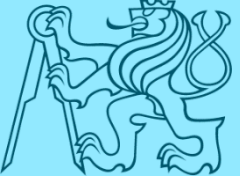
- Pokročilá schémata užívají externí prostředky ke zvýšení teploty paliva komprimovaného pomocí buď DD nebo ID
  - **Fast ignition (FI)** – svazky energetických částic (elektrony či ionty)
  - **Shock ignition (SI)** – sféricky konvergentní rázové vlny
  - **Magnetizovaná ICF** či magneto-inerciální fúze (**MIF**) – magnetická pole
- Základní idea FI and SI je použít dlouhý (ns) laserový puls ke kompresi a dosažení dostatečného  $\rho R$  při nízké teplotě a potom použít krátký (ps) puls k ohřevu a zapálení paliva
- Ač idea oddělení komprese a ohřevu byla navržena už dříve, zájem začal s vývojem vysokovýkonných laserů s ultrakrátkým pulsem (zesilování čirpovaného impulsu)



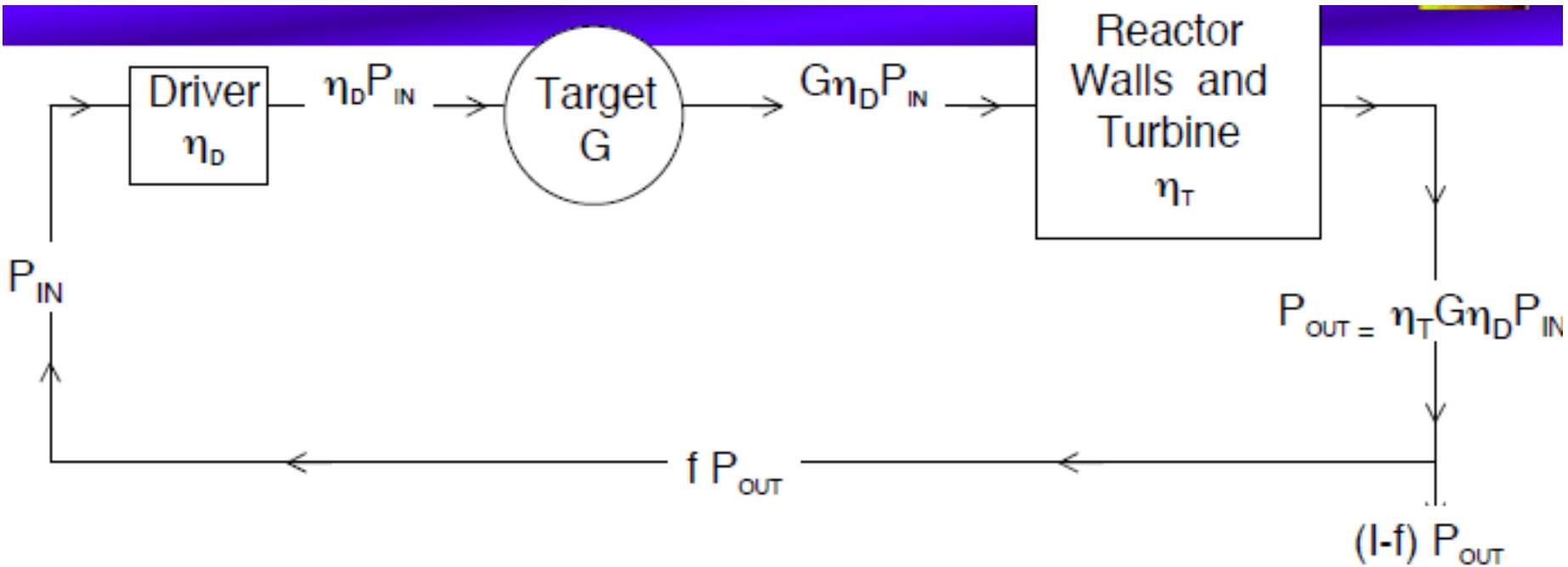
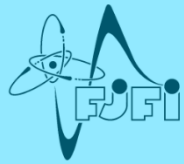
# ICF pro výrobu energie



A power-plant driver would fire about five targets per second to produce as much electricity as today's 1000-megawatt power plant



# Výkonová bilance



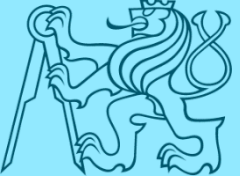
$$P_{IN} = f P_{out} = f \eta_T G \eta_D P_{IN} \Rightarrow f \eta_T G \eta_D = 1$$

Recyklovaný výkon by neměl být příliš velký, nechť  $f = 0.25$

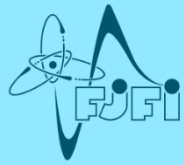
$$\text{S } \eta_T = 0.4 \Rightarrow \eta_D G \geq 10$$

**Reprezentativní čísla - pro  $(1-f) P_{out} = 1000$  MW blok a 10% driver ( $\eta_D$ ) -  $f = 0.23$ ,  $P_{IN} = 300$  MW, driver 6 MJ, 5 Hz (30 MW),  $G = 100$ , výstup z fúze 3 GW (600 MJ),  $\eta_T = 0.43$ ,  $P_{out} = 1.3$  GW**

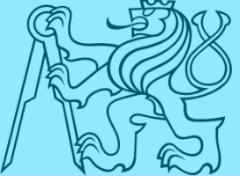




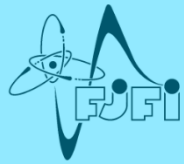
# Reaktorová terčová komora



- 600 MJ je energie uvolněná při výbuchu 1/7 tuny TNT
  - Mechanické působení na komoru je ale způsobeno hybností  $p$  a  $p = m v = (2 E/m)^{1/2}$  a pro  $m_{DT} = 5.4$  mg (vyhoření DT = 1/3) je hybnost ekvivalentní výbuchu  $m_{TNT} = 29$  g TNT
  - Ochrana první stěny proti radiaci klade větší nároky
- **Požadavky na reaktorovou komoru**
  - Regenerovat podmínky v komoře pro injekci terče, průchod svazků driveru a zapálení s dostatečnou opakovací frekvencí
  - Chránit struktury komory po několik až mnoho let nebo dovolit jednoduchou výměnu levných modulárních komponent
  - Extrahovat fúzní energii ve vysokoteplotním chladiči, regenerovat tritium
  - Redukovat produkci radioaktivního odpadu
- **Náklady na komoru** jsou 7 – 15 % ceny elektrárny



# Koncepty elektrárny



- Mnoho konceptů navrženo a analyzováno, zde jen 1 příklad
- **HYLIFE-II** – driver na těžkých iontech, užívá oscilující kapalnou proudy FLIBE (F, Li a Be roztavená sůl) k ochraně fúzní komory před neutrony a též k produkci tritia

