

Termojaderná fúze

Ondřej Grover

Týden vědy na Jaderce

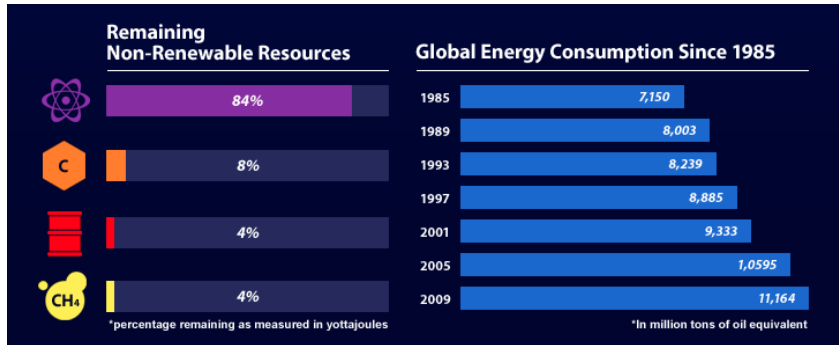
Osnova

- 1 Motivace
- 2 Princip termojaderné fúze
 - Slučování jader
 - Plazma
- 3 Udržení plazmatu
 - Inerciální udržení
 - Magnetické udržení
- 4 Stav bádání
 - Přehled důležitých zařízení
 - Komplikace
 - Technologie

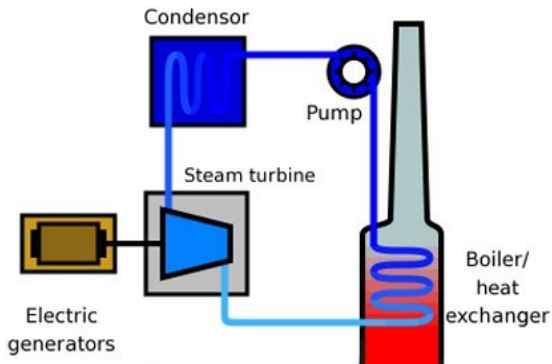
Osnova

- 1 Motivace
- 2 Princip termojaderné fúze
 - Slučování jader
 - Plazma
- 3 Udržení plazmatu
 - Inerciální udržení
 - Magnetické udržení
- 4 Stav bádání
 - Přehled důležitých zařízení
 - Komplikace
 - Technologie

Energetické zásoby Země

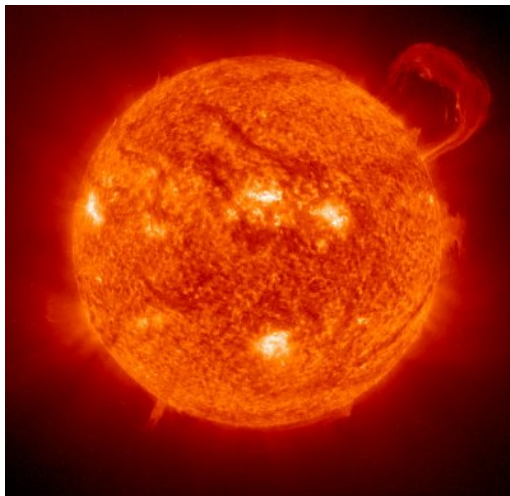


Princip tepelné elektrárny



- co dáme pod kotel?

Energie hvězd



Výhody termojaderné fúze

- 1 l mořské vody (33 mg D) + 5 g lithiové rudy (50 mg T) = 2.3 barelů ropy
- ztráta udržení → zastavení řetězové reakce
- radioaktivní pouze schránka
- odpad: He

Osnova

- 1 Motivace
- 2 Princip termojaderné fúze
 - Slučování jader
 - Plazma
- 3 Udržení plazmatu
 - Inerciální udržení
 - Magnetické udržení
- 4 Stav bádání
 - Přehled důležitých zařízení
 - Komplikace
 - Technologie

Osnova

- 1 Motivace
- 2 Princip termojaderné fúze
 - Slučování jader
 - Plazma
- 3 Udržení plazmatu
 - Inerciální udržení
 - Magnetické udržení
- 4 Stav bádání
 - Přehled důležitých zařízení
 - Komplikace
 - Technologie

Základní pojmy

- *lat.* fusionem ... sloučit, zkombinovat, syntetizovat

Vazebná energie

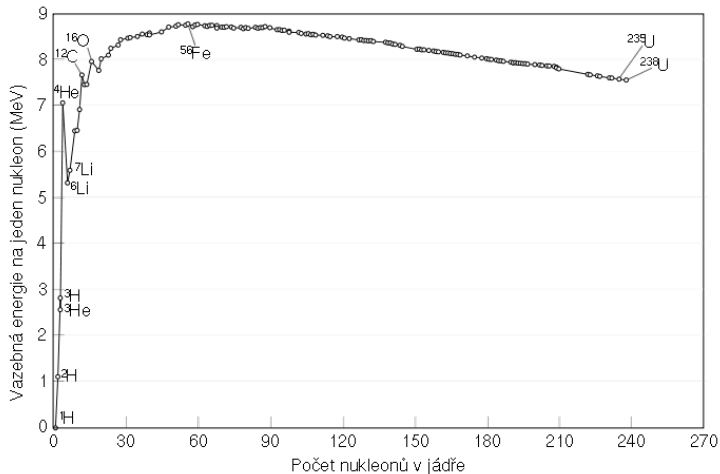
energie potřebná pro rozštěpení vazby

Hmotnostní schodek (defekt)

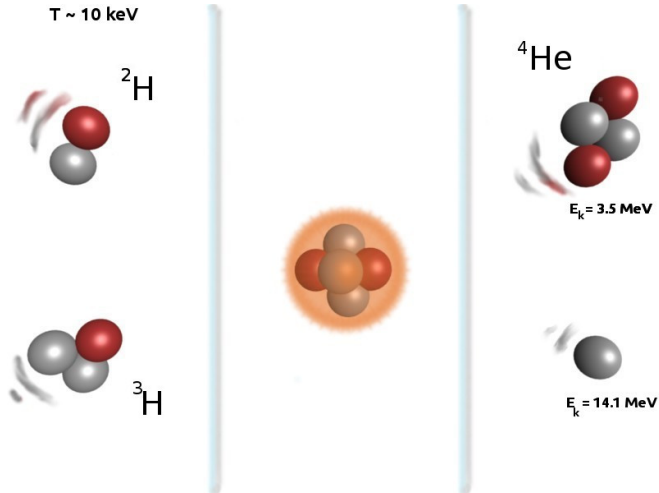
$$\Delta E = \Delta mc^2 \quad (1)$$

- $\sum m_p + \sum m_n \neq m_a$

Vazebná energie jader



Ideální reakce



Síly mezi jádry

- odpuzivé síly

Coulombův zákon

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (2)$$

- přitažlivé síly
 - silná interakce
 - dosah: 10^{-15}

Překonání Coulombické bariéry: urychlení jader

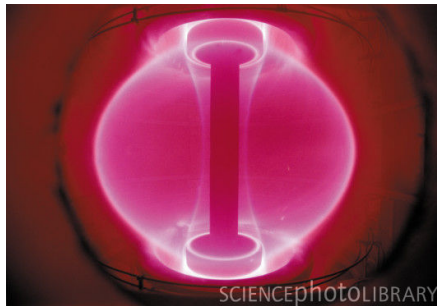
- Coulombova síla nezabrzdí velmi rychlou částici $\sim 20\,000\text{ km/s}$
- rychlost částic $\rightarrow$ teplota
- DT reakce : $\sim 10\text{ keV}$
 - $1\text{ eV} \sim 11600\text{ K}$
 - $100 - 200\text{ MK}$
 - kvantové tunelování

Osnova

- 1 Motivace
- 2 Princip termojaderné fúze
 - Slučování jader
 - Plazma
- 3 Udržení plazmatu
 - Inerciální udržení
 - Magnetické udržení
- 4 Stav bádání
 - Přehled důležitých zařízení
 - Komplikace
 - Technologie

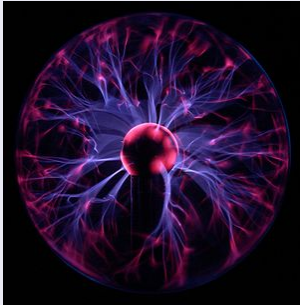
Plazma: 4. skupenství

- shluk ionizovaných částic a elektronů
- kvazineutrální
- kolektivní chování, chaotické



Gramatická vsuvka

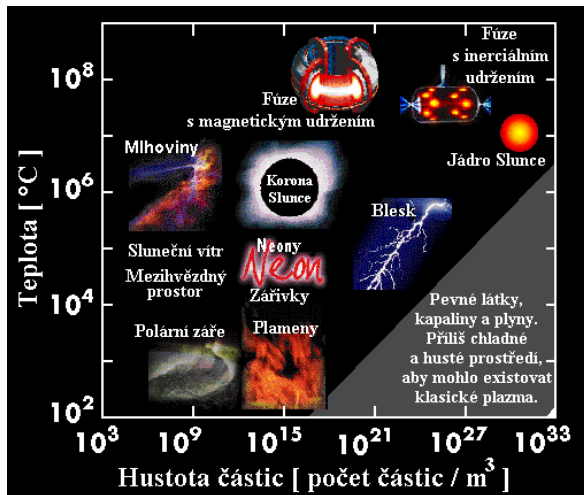
TO plazma



TA plazma



Výskyt plazmatu



Osnova

- 1 Motivace
- 2 Princip termojaderné fúze
 - Slučování jader
 - Plazma
- 3 Udržení plazmatu
 - Inerciální udržení
 - Magnetické udržení
- 4 Stav bádání
 - Přehled důležitých zařízení
 - Komplikace
 - Technologie

Lawsonovo kritérium

Zapálení fúzní reakce

výkon fúzních reakcí > ztrátový výkon

Lawsonovo kritérium pro zapálení DT reakce

$$n \cdot \tau > c_{crit}(T)$$

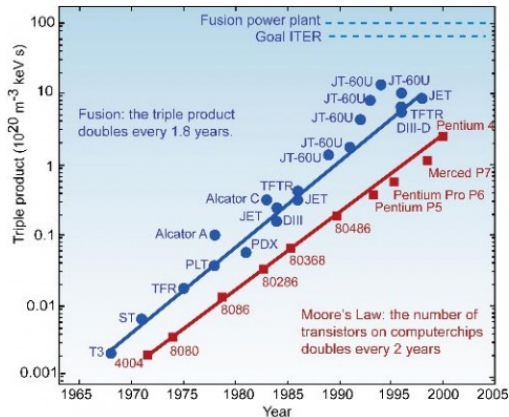
- n ... hustota (koncentrace) částic
- τ ... doba udržení (energie)
- T ... teplota plazmatu (optimální ~ 14 keV)

princip udržení	n [m ⁻³]	τ [s]
inerciální	10^{32}	10^{-11}
magnetické	10^{20}	5

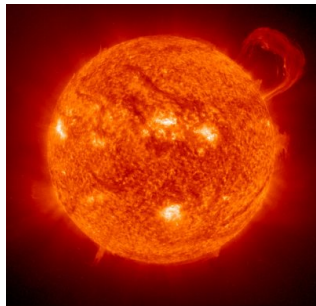
Trojný součin

Aproximace Lawsonova kritéria v okolí optimální T

$$nT\tau_E > 3 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}$$



Gravitační udržení

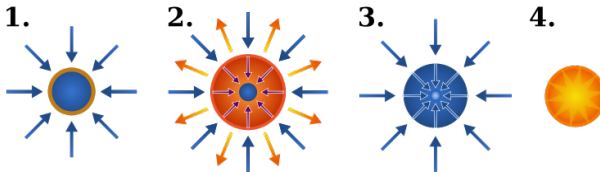


Osnova

- 1 Motivace
- 2 Princip termojaderné fúze
 - Slučování jader
 - Plazma
- 3 Udržení plazmatu
 - **Inerciální udržení**
 - Magnetické udržení
- 4 Stav bádání
 - Přehled důležitých zařízení
 - Komplikace
 - Technologie

Princip inerciálního "udržení"

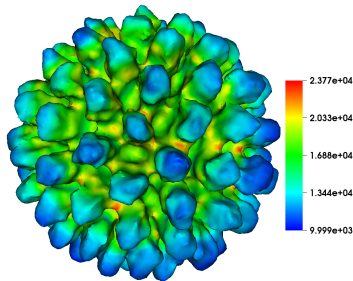
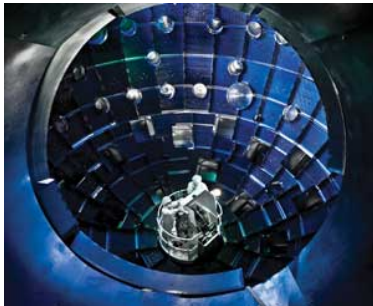
- 1 zahřátí povrchu el. mag. zářením
- 2 ablace povrchu → "sférická raketa"
- 3 stlačení na kritickou hustotu
- 4 zapálení



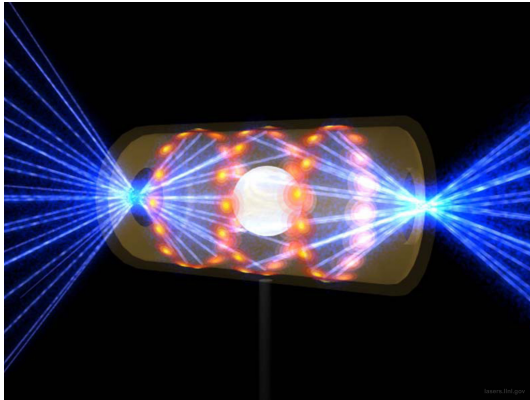
- hoří dokud se nerozletí → "drženo setrvačností (inertia)"

Problémy

- technologicky náročné (přesnost, palivový cyklus)
- nestability při nerovnoměrném ohřevu
- potřeba výkonného chlazení



Technologie hohlraum



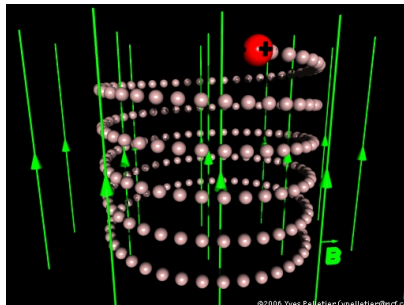
Osnova

- 1 Motivace
- 2 Princip termojaderné fúze
 - Slučování jader
 - Plazma
- 3 Udržení plazmatu
 - Inerciální udržení
 - Magnetické udržení
- 4 Stav bádání
 - Přehled důležitých zařízení
 - Komplikace
 - Technologie

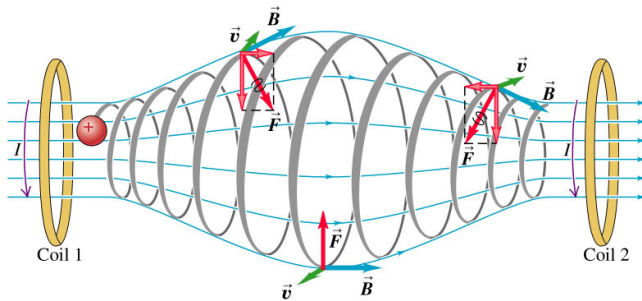
Lorentzova síla

Lorentzova síla

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (3)$$

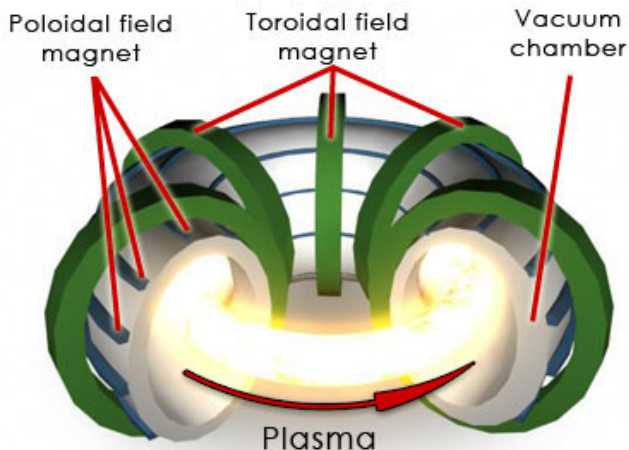


Magnetické zrcadlo



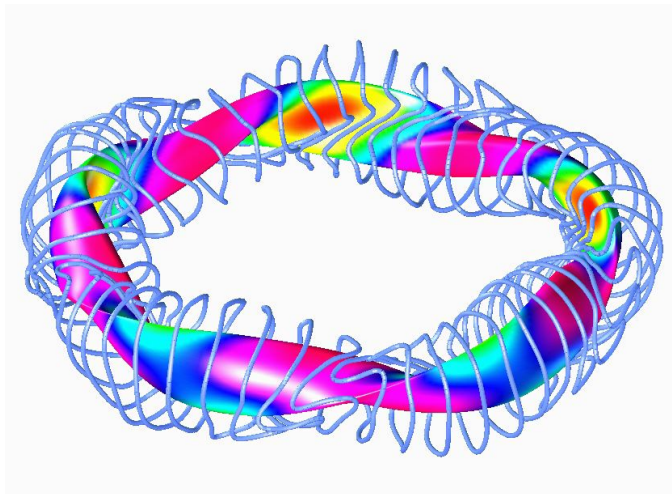
Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley.

Torus

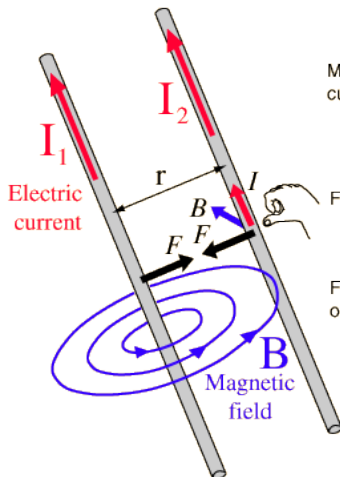


© 2005 HowStuffWorks

Stelarátor



Ampérův zákon magnetické síly



Magnetic field at wire 2 from current in wire 1:

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

Force on a length ΔL of wire 2:

$$F = I_2 \Delta L B$$

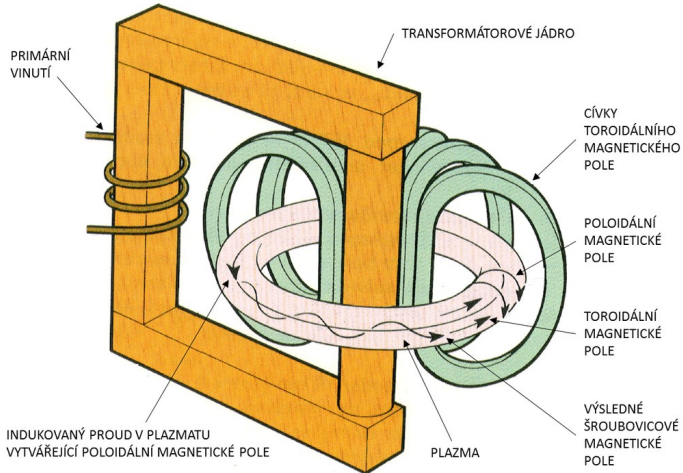
Force per unit length in terms of the currents:

$$\frac{F}{\Delta L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$$

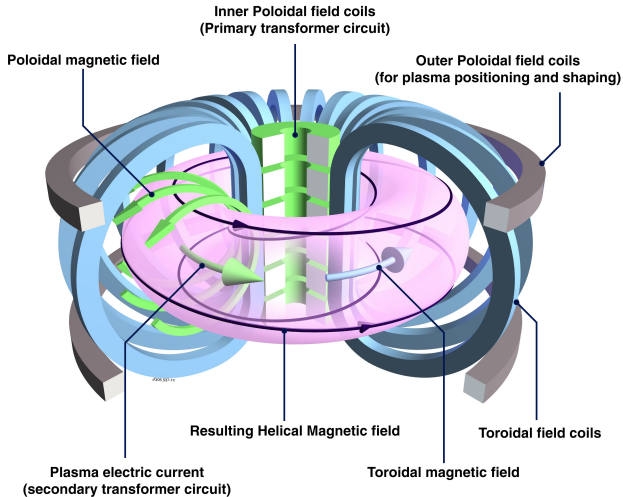
Z-Pinch



Tokamak



Moderní tokamak



Historie tokamaku

Název

- toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami
- toroidní komora s magnetickými cívkami



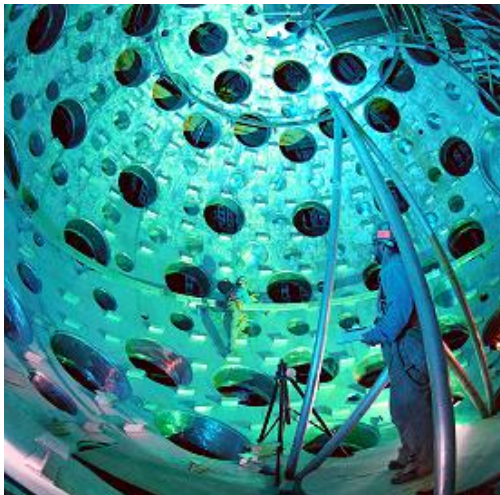
Osnova

- 1 Motivace
- 2 Princip termojaderné fúze
 - Slučování jader
 - Plazma
- 3 Udržení plazmatu
 - Inerciální udržení
 - Magnetické udržení
- 4 Stav bádání
 - Přehled důležitých zařízení
 - Komplikace
 - Technologie

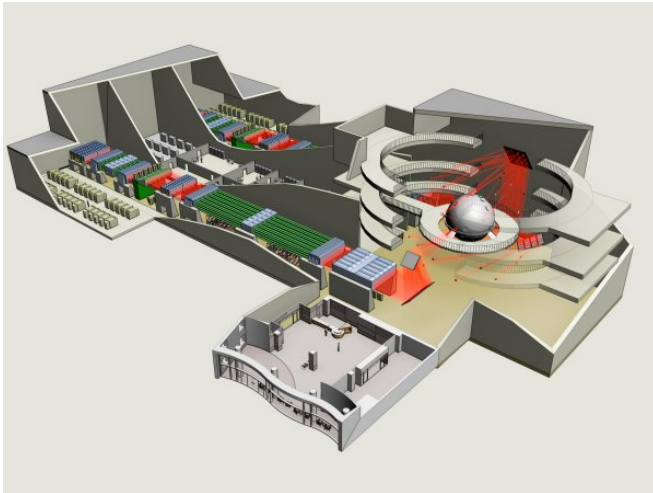
Osnova

- 1 Motivace
- 2 Princip termojaderné fúze
 - Slučování jader
 - Plazma
- 3 Udržení plazmatu
 - Inerciální udržení
 - Magnetické udržení
- 4 Stav bádání
 - Přehled důležitých zařízení
 - Komplikace
 - Technologie

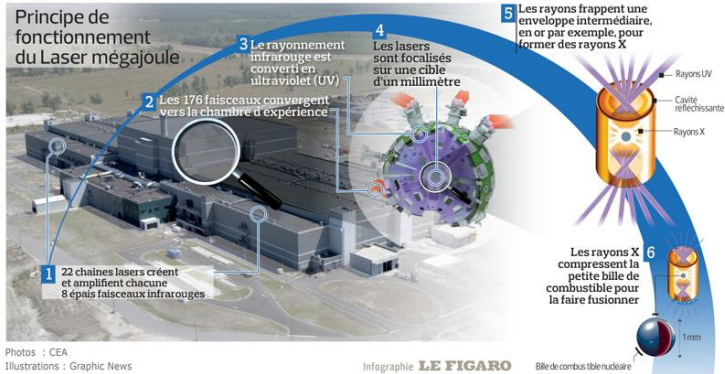
National Ignition Facility (NIF)



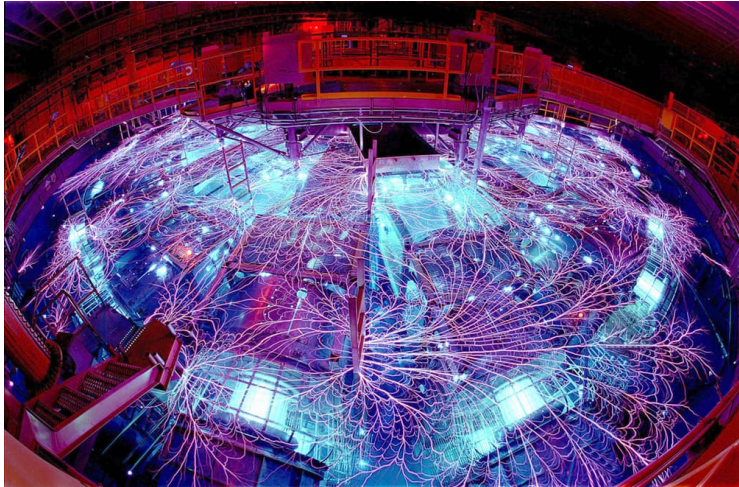
High Power laser Energy Research facility (HiPER)



Laser Mégajoule (Fr, Bordeaux)



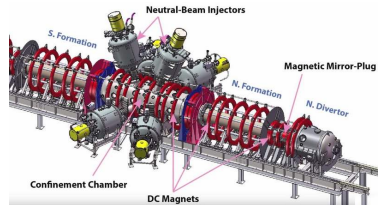
Z-machine



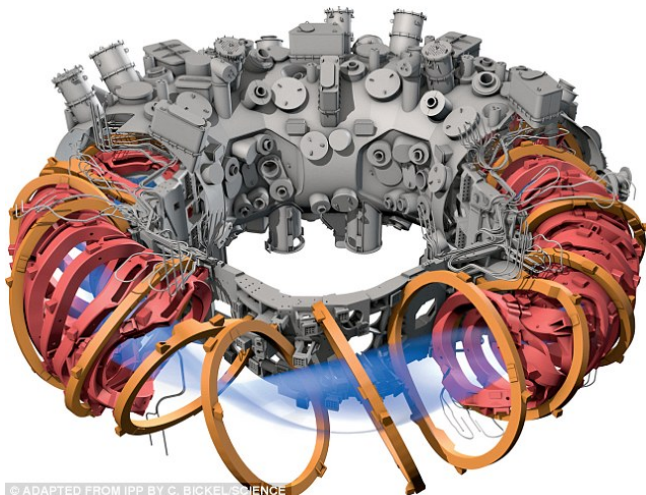
Privátní podniky/startups

- severní Amerika: veřejné finance na (nejen) fúzní experimenty škrtány (kromě armádních projektů)
- "módní" vlna startupů: velké PR, lákání investorů X vědecké výsledky (zatím?) nevalné

3- α

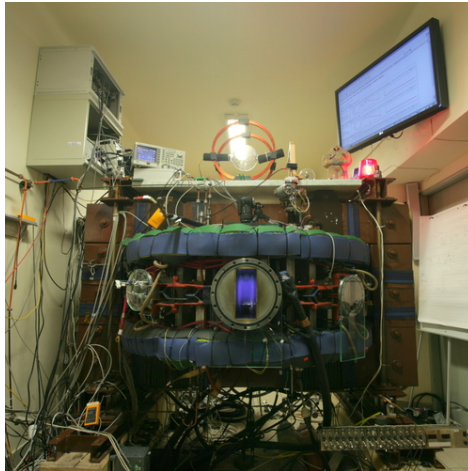


Wendelstein 7-X



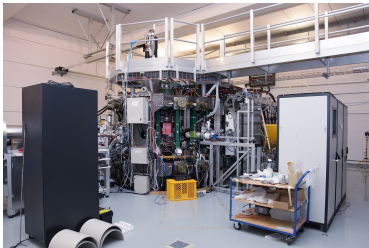
© ADAPTED FROM IPP BY C. BICKEL/SCIENCE

TM-1 / CASTOR / GOLEM - FJFI ČVUT

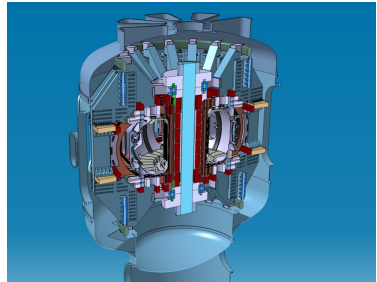


COMPASS (Upgrade) - Ústav fyziky plazmatu AV ČR

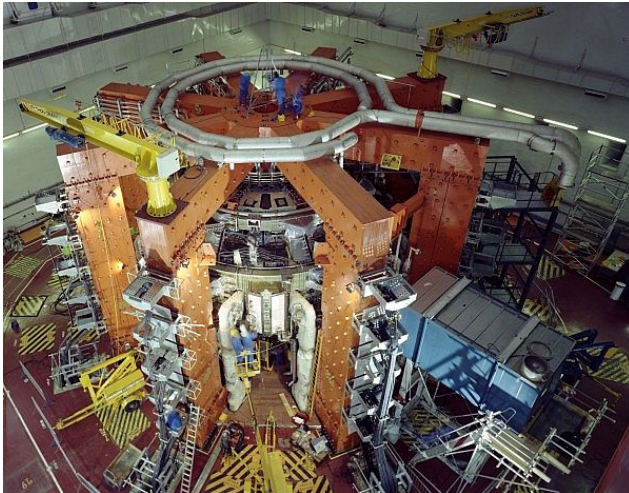
COMPASS (2.1 T) 2008-2021



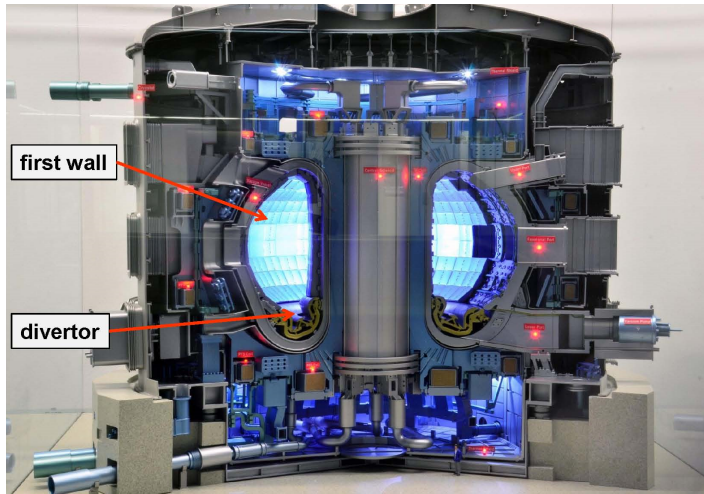
COMPASS Upgrade (5 T) 2021-



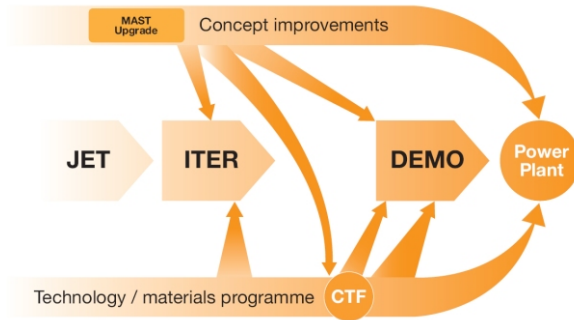
Joint European Tokamak (JET) - Culham, UK



International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)



DEMOstration power plant (DEMO)



Privátní podniky/startups: vysokoteplotní supravodiče

- snaha získat patent na v budoucnu důležitou technologii?

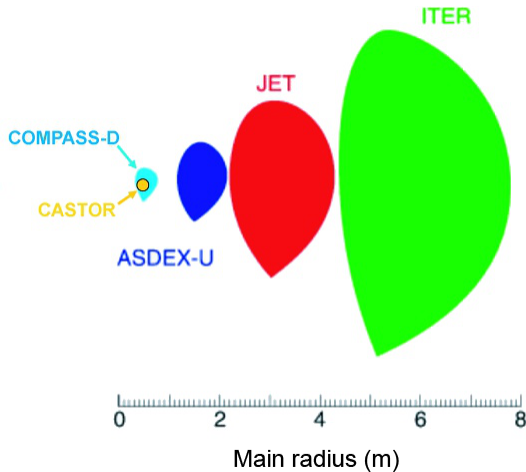
Tokamak Energy



SPARC (MIT-CFS-Eni)



Srovnání tokamaků

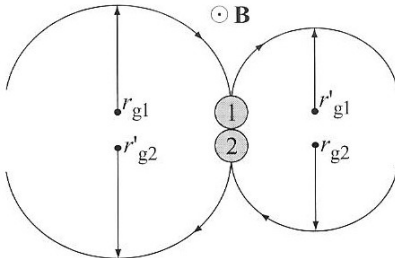


Osnova

- 1 Motivace
- 2 Princip termojaderné fúze
 - Slučování jader
 - Plazma
- 3 Udržení plazmatu
 - Inerciální udržení
 - Magnetické udržení
- 4 Stav bádání
 - Přehled důležitých zařízení
 - **Komplikace**
 - Technologie

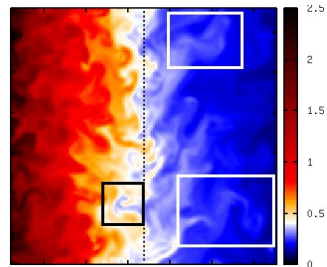
Původní představa difúze skrze magnetické pole vs. realita

- přeskoky částic mezi šroubovicemi při srážkách



- rychlost $\propto \frac{1}{B^2} \Rightarrow$ stačí silné mag. pole

- unikající turbulentní struktury (víry)

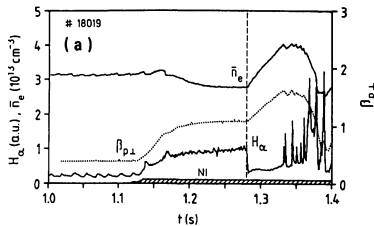


- o 5 řádů rychlejší než klasická difúze

Módy zlepšeného udržení (H-mód, QH-mód, I-mód, ...)

High confinement mode

- $\sim 2 \times \nearrow \tau_E, \beta_p$
- referenční scénář pro ITER: ELMy H-mód



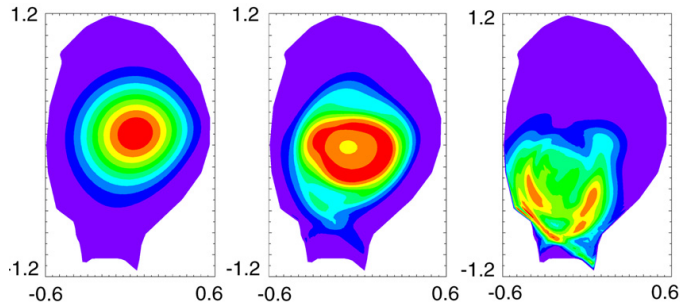
Obrázek: (Wagner, 1982)

L-H přechod

- empirická teorie: přechod při $P_{in} > P_{LH}$
- škálovací výrazy $P_{LH} = C n_e^\alpha B_\phi^\beta Z_{eff}^\gamma S^\delta f(R, a)$
- robustní teorie zatím chybí

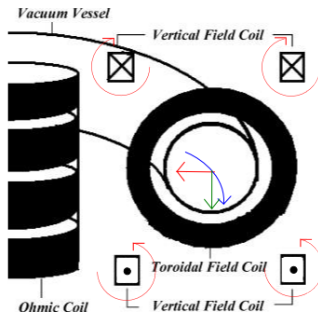
Nestability, disrupce

- chaotické plazma, nelineární jevy
- real-time zpětnovazební systémy



Vertikální poloha

- zpětnovazební systém



Ubíhající elektrony



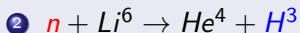
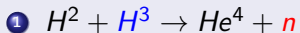
Osnova

- 1 Motivace
- 2 Princip termojaderné fúze
 - Slučování jader
 - Plazma
- 3 Udržení plazmatu
 - Inerciální udržení
 - Magnetické udržení
- 4 Stav bádání
 - Přehled důležitých zařízení
 - Komplikace
 - Technologie

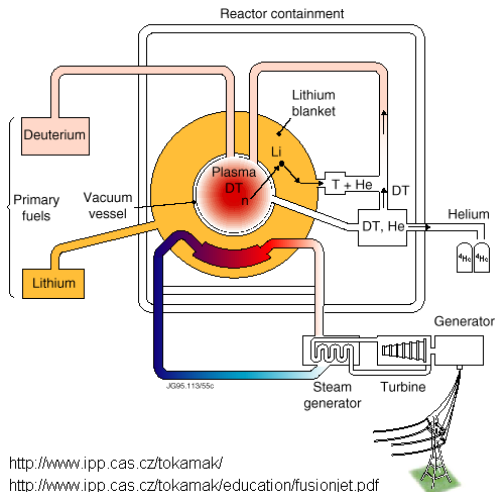
Produkce tritia

- radioaktivní tritium
poločas rozpadu 12.3 let

Lithiový obal



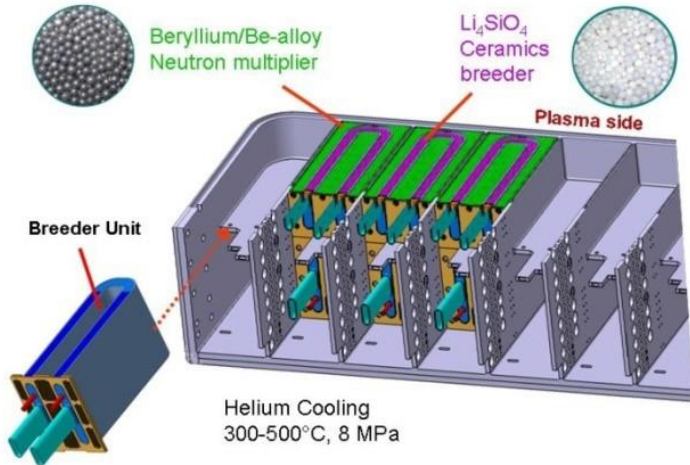
Fúzní jaderná elektrárna



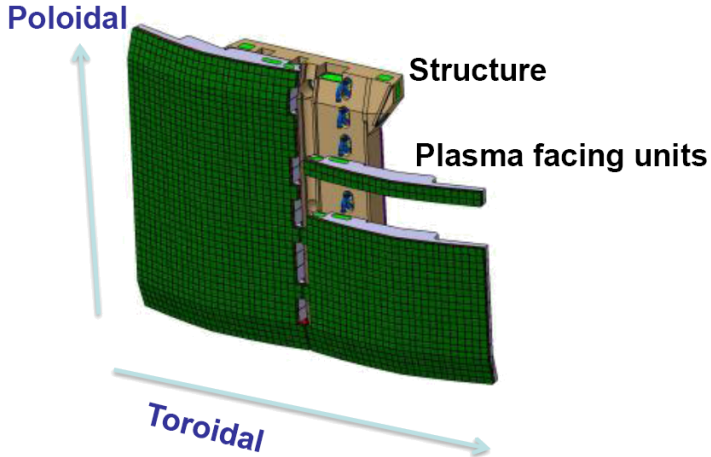
<http://www.ipp.cas.cz/tokamak/>

<http://www.ipp.cas.cz/tokamak/education/fusionjet.pdf>

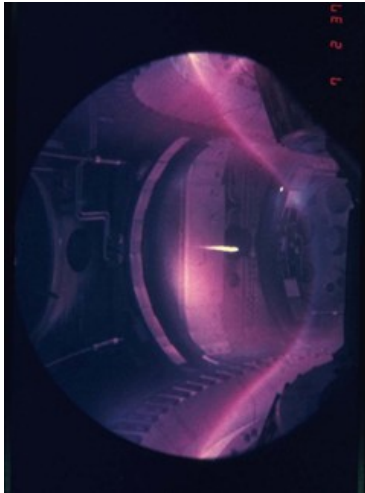
Moduly pro produkci tritia testované v reaktoru ITER



Chlazení stěn reaktoru ITER



Doplňování paliva



Supravodiče

- vydrží bombardování neutrony?

Tore supra

- tekuté helium
- stabilní udržení

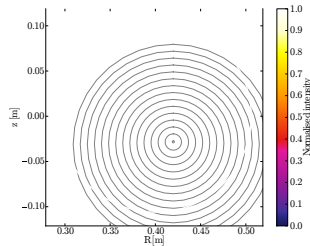
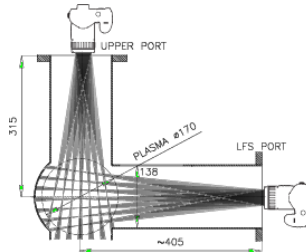
Vysokoteplotní supravodiče

- tekutý dusík

Diagnostiky

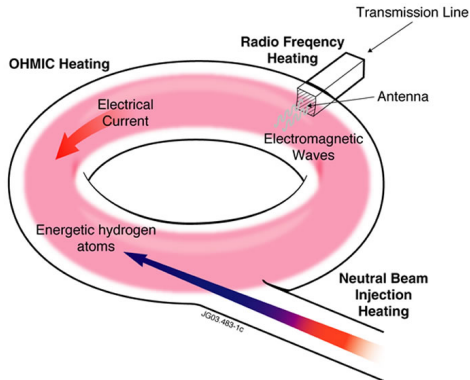
- neinvazivní
 - elektromagnetické vlnění
 - magnetické cívky
 - sondy na okraji
 - částicové/svazkové diagnostiky
- tomografické metody

Tomografie vysokorychlostních kamer

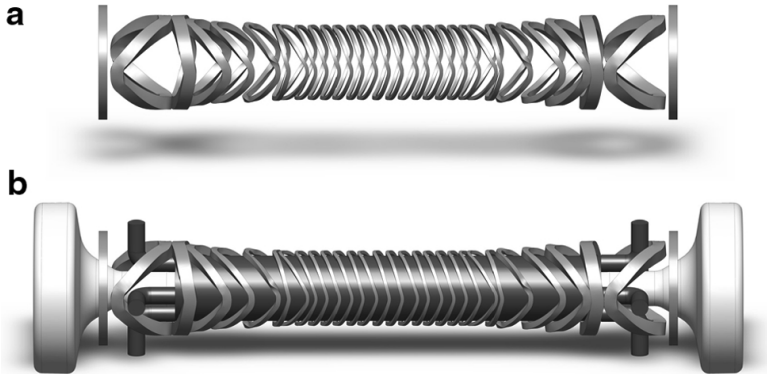


Přídavný ohřev

- vstřikování urychlených neutrálních částic
- vybuzení rezonance el. mag. zářením



Hybridní reaktor



štěpení palivo → energie, odpad

fúze neutrony → transmutace odpadu na palivo

Osnova

5 Shrnutí

Termojaderná fúze

- slučování jader $\rightarrow$ uvolnění vazebné energie
- vysoké teploty pro překonání odpud. sil $\rightarrow$ plazma
- udržení plazmatu $\rightarrow$ řetězová reakce

Termojaderná fúze jako alternativní zdroj energie

- (v *budoucnu*) bezpečný a (z *hlediska paliva*) levný zdroj energie
- zbývají (*především*) technologické výzvy
- možné využití jako zdroje neutronů

Kam dál?

- ① obor Fyzika a Technika Termojaderné Fúze, FJFI
 - <http://fttf.fjfi.cvut.cz/>
 - tokamak GOLEM
- ② Ústav Fyziky Plazmatu, AV ČR
 - <http://www.ipp.cas.cz/>
 - tokamak COMPASS (Upgrade!)
- ③ do světa ...
[FuseNet http://www.fusenet.eu/](http://www.fusenet.eu/)