

# Měření základních parametrů vysokoteplotního plazmatu na tokamaku GOLEM

J. Krbec<sup>1</sup>

<sup>1</sup>České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

U3V "Fyzika přátelsky / Aplikované přírodní vědy"

# Termojaderná fúze

Co je zdrojem energie na slunci?

## Co je zdrojem energie na slunci?

- Albert Einstein - ekvivalence hmoty a energie

## Co je zdrojem energie na slunci?

- Albert Einstein - ekvivalence hmoty a energie
- Francis Aston - hmotnostní spektrometrie

## Co je zdrojem energie na slunci?

- Albert Einstein - ekvivalence hmoty a energie
- Francis Aston - hmotnostní spektrometrie
- Arthur Eddington - pozorování slunce

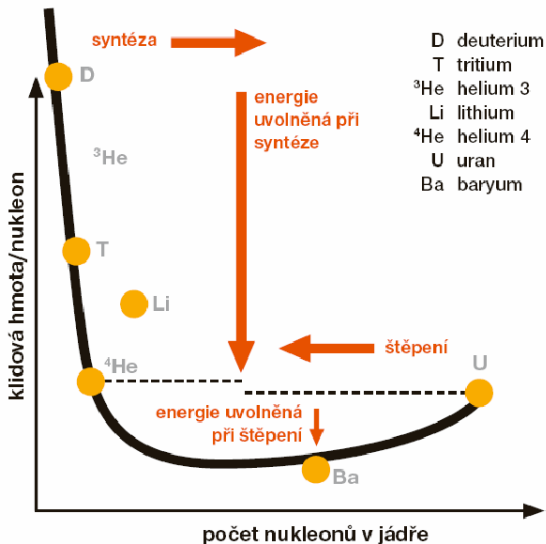
## Co je zdrojem energie na slunci?

- Albert Einstein - ekvivalence hmoty a energie
- Francis Aston - hmotnostní spektrometrie
- Arthur Eddington - pozorování slunce

## Termojaderná fúze

# Co je fúze?

## Slučování jader atomů





Ekvivalence hmoty a energie:

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

Zákon zachování energie:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m \quad (2)$$

**Příklad: přeměna deuteria na helium**

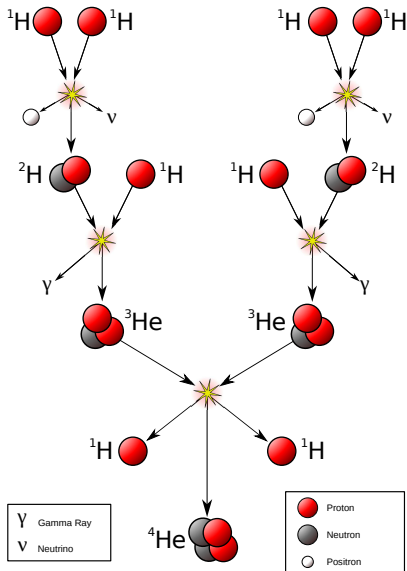
hmotnost deuteronu  $m_D = 2,01363u$ , helia  $m_{He} = 4,002602u$

$$\Delta m = 2 \cdot m_D - m_{He} = 4,02726u - 4,002602u = 0,0246u$$

zhruba 0.5 % přeměněno na energii

# Typy reakcí

- 1  $D + D \rightarrow T + p$   
 $\rightarrow He^3 + n$
- 2  $D + T \rightarrow He^4 + n$
- 3  $D + He^3 \rightarrow He^4 + p$
- 4  $T + T \rightarrow He^4 + 2n$
- 5  $p + Li^6 \rightarrow He^4 + He^3$
- 6  $p + B^{11} \rightarrow 3 He^4$



# Možnosti využití fúze?

## Zdroj energie

- Spotřeba energie vzrůstá
- Zásoby fosilních paliv se zmenšují

## Snížení zátěže na životní prostředí

- Těžba uhlí, ropy a zemního plynu
- Emise CO<sub>2</sub>, jaderný odpad, jaderné zbraně
- Velké plochy fotovoltaiky a větrníků

# Podmínky pro fúzi

- Jádra se musí přiblížit na vzdálenost  $10^{-14}$  metru
- Musí překonat odpudivé síly

## Coulombův zákon

$$F_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

- Vysoká teplota
  - zápalná teplota pro D-T fúzi je 150 000 000 Kelvinů

# Plazma

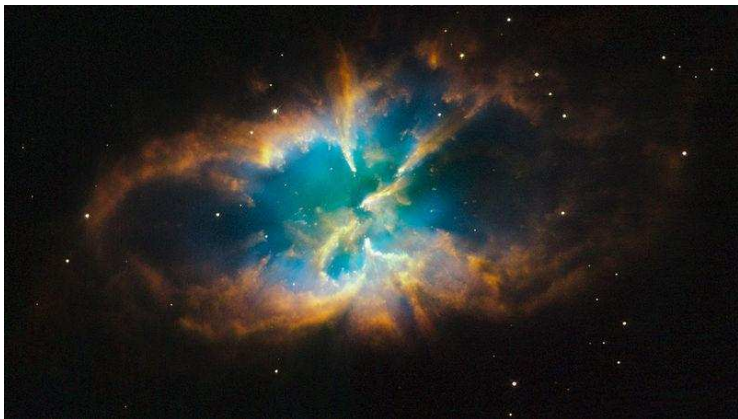
Jak vypadá velmi horká hmota

- Ionizovaný plyn
- Dvě složky: ionty a elektrony
- Čtvrté skupenství hmoty
- Velmi složité chování
  - Nabitě částice vytváří při pohybu magnetické pole, které ovlivňuje pohyb jiných nabitých částic
  - Velmi složité chování

# Plazma

## Výskyt ve Vesmíru

- 99% viditelné hmoty ve vesmíru.
- Na zemi vzácné



# Plazma

Oheň



# Plazma

Blesky





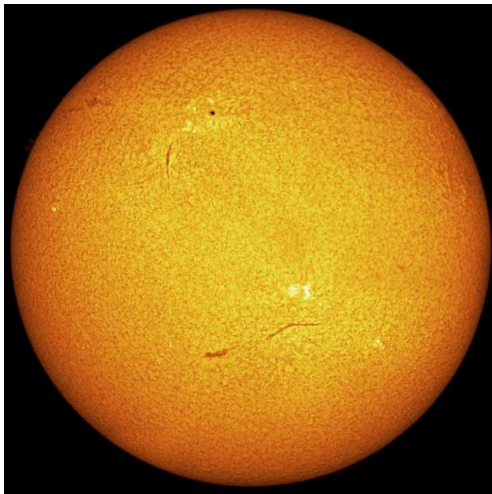
# Plazma

Aurora



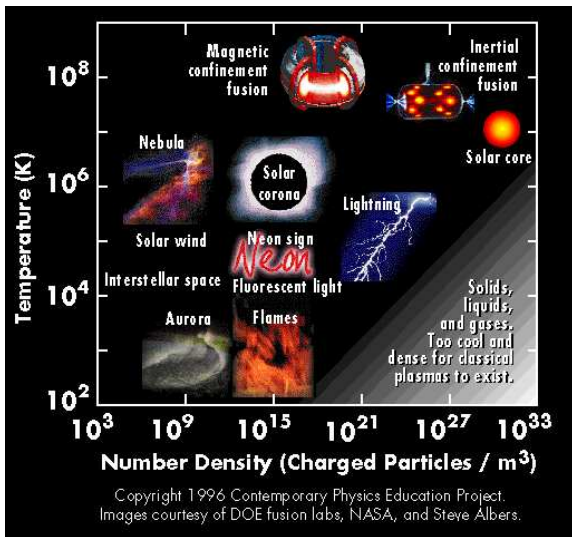
# Plazma

Slunce



# Plazma

## Parametry plazmatu: teplota, hustota



- Fúzní reakce musí vydat více energie než jaké jsou energetické ztráty plazmatu

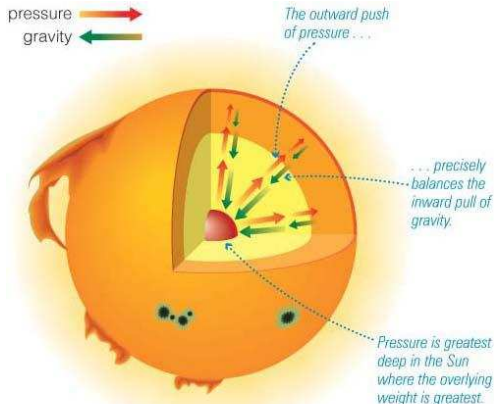
## Lawsonovo kritérium

$$n\tau_E > 1.5 \cdot 10^{20} m^{-3} s$$

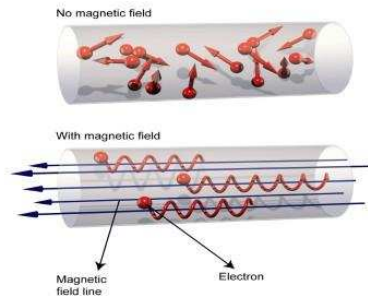
- Inerciální udržení: hustota  $10^{31} m^3$ , doba udržení  $10^{-10} s$
- Magnetické udržení: hustota  $10^{20} m^3$ , doba udržení  $1 s$

**Parametry zařízení: doba udržení**

## Gravitační udržení

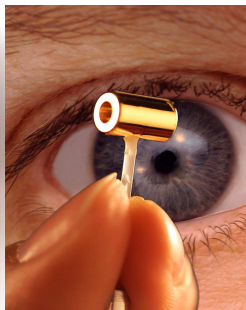
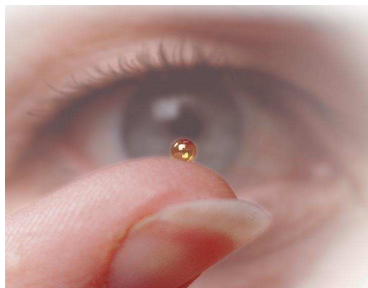


## Magnetické udržení



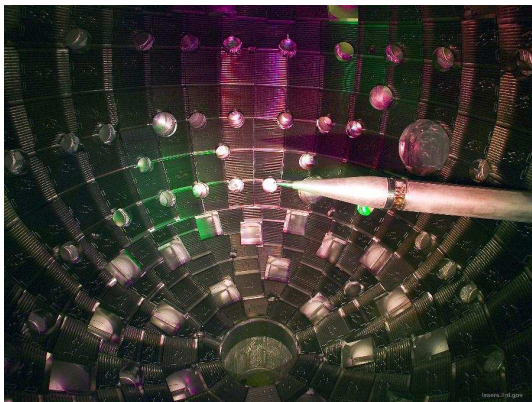
# Tři způsoby udržení plazmatu

## Inerciální udržení



# Tři způsoby udržení plazmatu

## Inerciální udržení



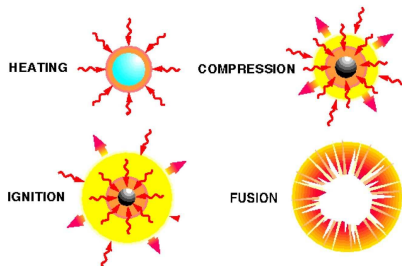


# Tři způsoby udržení plazmatu

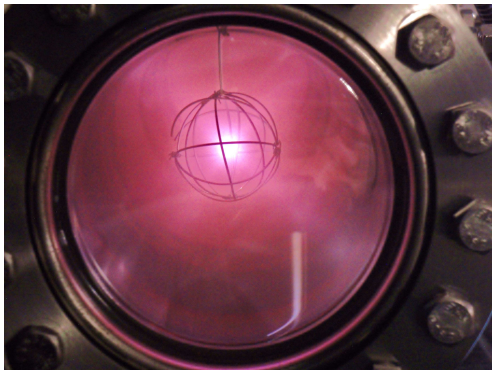
## Inerciální udržení



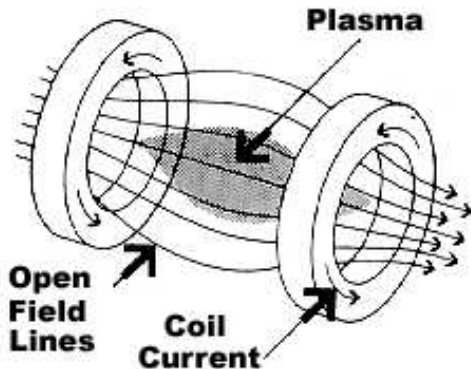
## Inerciální udržení



## Sférická



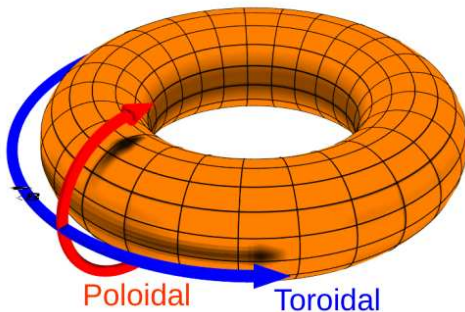
## Válcová



## Toroidální



## Toroidální



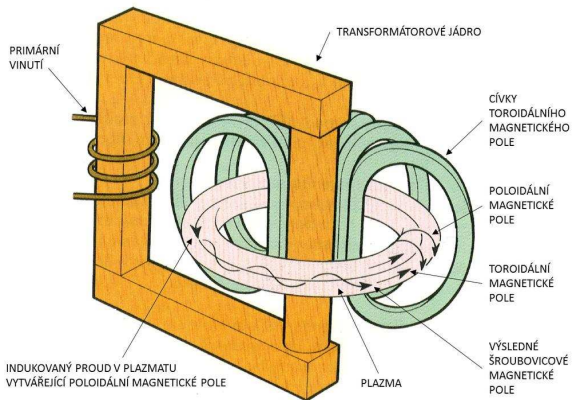
## Tokamaky

Kombinace cívek toroidálního pole a magnetického pole proudu tekoucího plazmatem.

## Stelarátory

Pouze speciálně tvarované cívky. Proud plazmatem je nežádoucí.

# Tokamak





## Geometrie stelarátoru



## Cívky generující magnetické pole



# Stelarátor

Tvar komory



# Palivo pro tokamak

## Deuterium

- Obsaženo ve vodě 1:6700
- 1 l vody (0.3 gramu deuteria) = 300 l benzínu

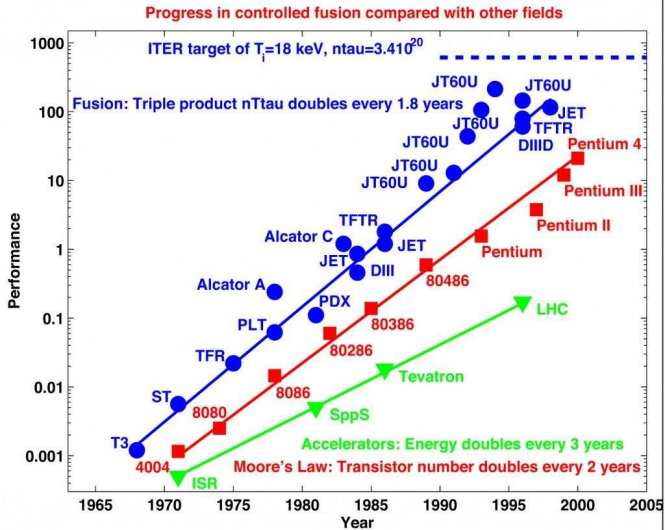
## Tritium

- Radioaktivní (poločas rozpadu 12,3 let)
- Výroba z lithia neutronovým záchytem přímo v reaktoru
- Plodivá obálka z lithium

## Trojný součin

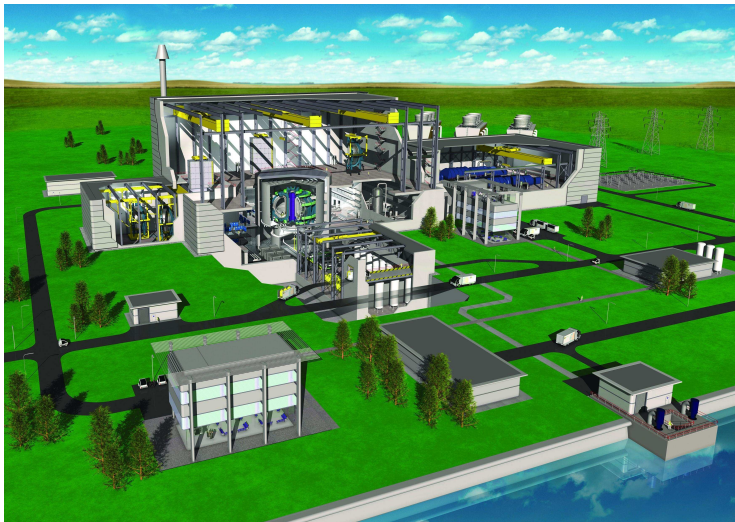
$$nT_{TE} > 3 \cdot 10^{21} m^{-3} s \text{ keV}$$

# Trojný součin



# Fúzní elektrárna

Proč už ji dávno nestavíme?



# Fúzní elektrárna

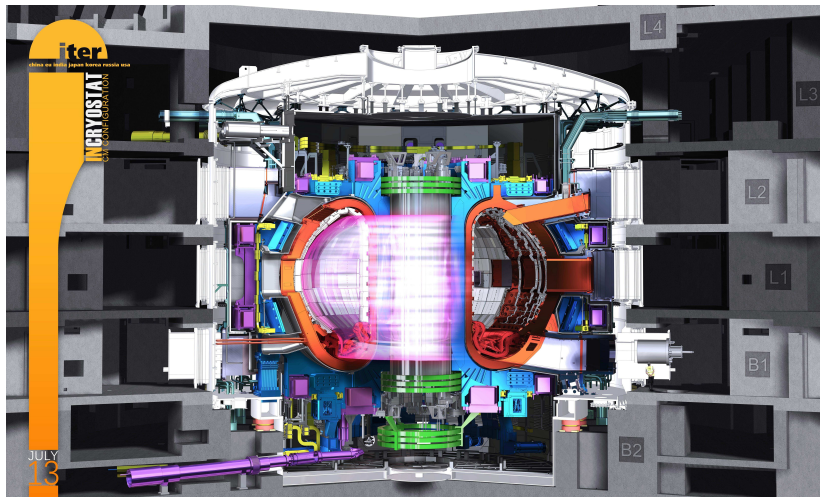
Proč už ji dávno nestavíme?

## Nedořešené otázky pro velké zařízení

- Diagnostika
- Supravodivé cívky
- Materiál první stěny
- Nestability plazmatu
- Řízení plazmatu

# Tokamak ITER

International Thermonuclear Experimental Reactor





# Další krok - DEMO

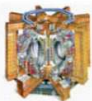
rok 2040



**Tore Supra**

$25 \text{ m}^3$

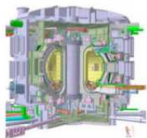
$\sim 0 \text{ MW}_{th}$



**JET**

$80 \text{ m}^3$

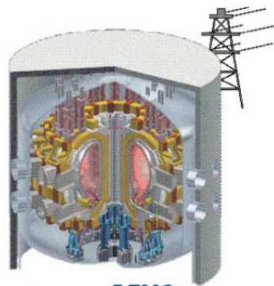
$\sim 16 \text{ MW}_{th}$



**ITER**

$800 \text{ m}^3$

$\sim 500 \text{ MW}_{th}$



**DEMO**

$\sim 1000 - 3500 \text{ m}^3$

$\sim 2000 - 4000 \text{ MW}_{th}$