

# Vysokoteplotní plazma na tokamaku GOLEM

J. Krbec<sup>1</sup>

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

Den s jádrem 2014

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

## Termonukleární fúze

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  $m_{He} = 4,002602u$

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

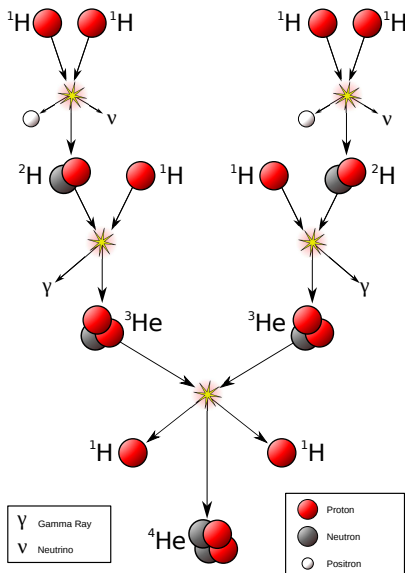
zhruba 0.5 % přeměněno na energii

# 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  $p + B^{11} \rightarrow 3 He^4$

Pro sloučení dvou prvků je třeba dodat počáteční energii.

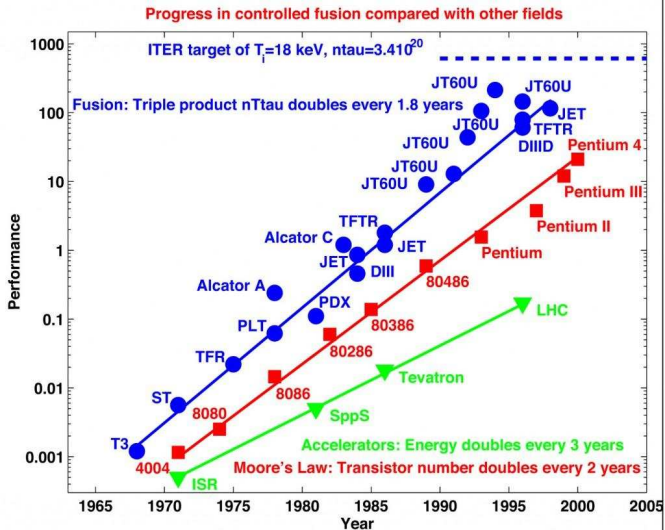
Čím vyšší teplota tím vyšší pravděpodobnost sloučení.





- Kvazineutrální plyn vzniklý ionizací atomů neutrálního plynu.
- Dvě hlavní složky: ionty a elektrony
- Dalekodosahová interakce vlivem elektromagnetických polí.
- Částice vykazují kolektivní chování.
- Reaguje na elektromagnetické pole.
- Parametry plazmatu: teplota, hustota
- Parametry zařízení udržující plazma: doba udržení

# Trojný součin

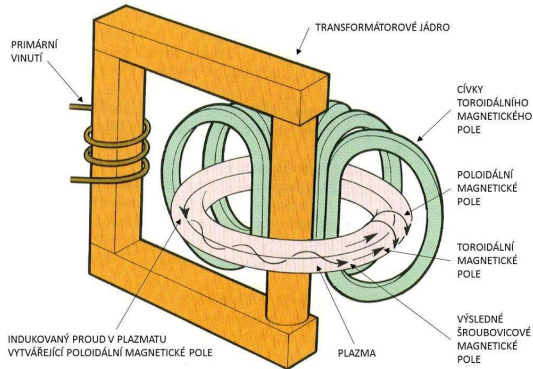


Magnetický indukční tok:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\alpha)$$

Faradayův zákon  
elektromagnetické  
indukce:

$$U_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

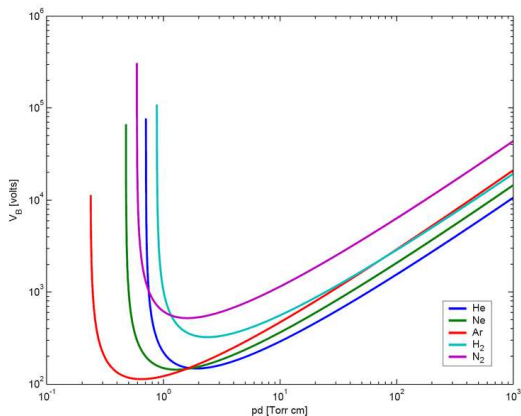


# Průraz plazmatu

Vznik primárního  
elektronu: kosmické záření  
předionizace

Následuje lavinovitá  
ionizace

Závislost průrazného  
napětí na tlaku popsána  
Paschenovým zákonem



# Základní parametry plazmatu - teplota, hustota

Pro tokamak GOLEM lze odvodit vztah pro centrální elektronovou teplotu v elektronvoltech: <sup>1</sup>

$$T_e(0, t) = \left( 0,7 \frac{I_p(t)}{U_I(t)} \right)^{2/3}, \quad [\text{eV}; \text{A}, \text{V}] \quad (3)$$

kde  $I_p(t)$  je proud tekoucí plazmatem v ampérech a  $U_I$  je napětí na závit v transformátoru ve voltech.

Druhým základním parametrem plazmatu je elektronová hustota, která je určena ze stavové rovnice jako

$$\bar{n} = 2 \frac{p_0}{k_B T_{ch}}, \quad [\text{počet částic}/\text{m}^3, \text{Pa}, \text{K}] \quad (4)$$

kde  $\bar{n}$  je průměrná hustota,  $p_0$  je tlak neutrálního plynu v komoře a  $T_{ch}$  je teplota komory.

---

<sup>1</sup>Mezi teplotou v elektronvoltech a v Kelvinech platí vztah  $1 \text{ eV} \approx 11600 \text{ K}$ .

# Energetická rovnováha plazmatu - Ohmický příkon, Energie plazmatu

Jediným zdrojem ohřevu plazmatu na tokamaku GOLEM je ohmický ohřev:

$$P_{OH}(t) = R_p(t) \cdot I_p^2(t) = U_I(t) \cdot I_p(t). \quad (5)$$

Celkovou tepelnou energii plazmatu spočteme z ekvipartičního teorému:

$$W_{th} = \frac{3}{2} k_B (n_e T_e + n_i T_i) V \approx 3k_B n_e T_e V$$

Je-li  $n_e = n_i$ ,  $T_e = T_i$  a uvažujeme-li parabolický profil elektronové teploty a konstantní hustotu dostaneme

$$W_{th}(t) = \frac{1}{3} \bar{n} k_B T_e(0, t) V \quad [\text{J}; \text{m}^{-3}, \text{K}, \text{m}^3], \quad (6)$$

kde  $V$  je objem plazmatu,  $\bar{n}$  průměrná elektronová hustota,  $k_B$  Boltzmannova konstanta a  $T_e(0, t)$  centrální elektronová teplota.

Na základě znalosti energie plazmatu  $W_{th}$  a ohmického příkonu  $P_{OH}$  lze ze zákona zachování energie spočítat energetické ztráty plazmatu

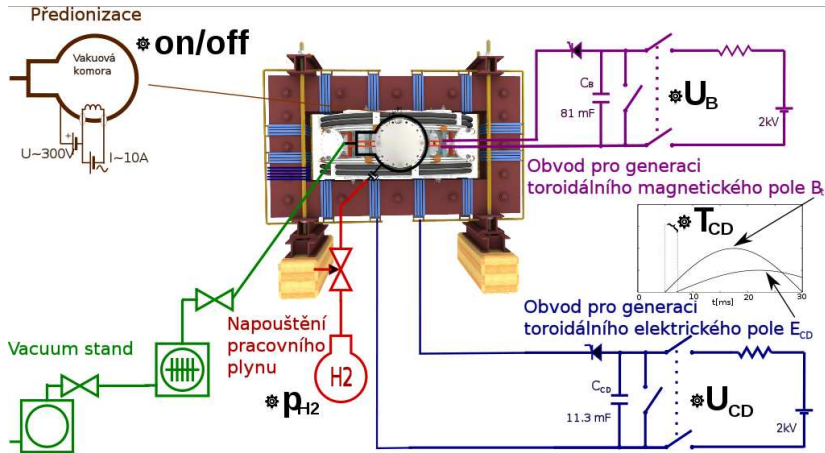
$$P_{\text{loss}}(t) = P_{OH}(t) - \frac{\Delta W_{th}}{\Delta t} \quad (7)$$

a následně i dobu udržení energie definovanou jako

$$\tau_E(t) \equiv \frac{W_{th}(t)}{P_{\text{loss}}(t)}. \quad (8)$$

V momentě kdy se energie plazmatu nemění je člen  $\frac{\Delta W_{th}}{\Delta t}$  v rovnici (7) roven 0, tudíž ohmický příkon  $P_{OH}$  je roven ztrátám  $P_{\text{loss}}$ . Doba udržení plazmatu je důležitým parametrem popisujícím globální energetickou rovnováhu plazmatu a představuje charakteristickou dobu vychladnutí plazmatu  $P_{\text{loss}} = W_{th}/\tau_E$ .

# Postup měření





Scénář provedení výboje:

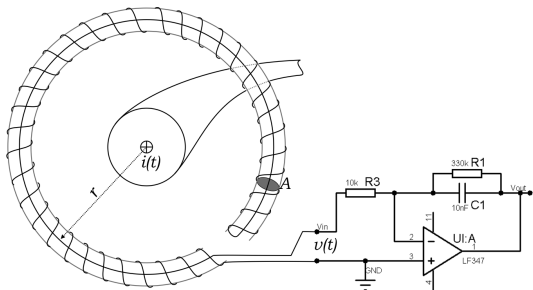
- 1 Vyčerpání komory na tlak  $\approx 1$  mPa
- 2 Napuštění pracovního plynu (doporučené hodnoty  $p_H \in (8, 15) Pa$ )
- 3 Zapnutí předionizace
- 4 Iniciovat toroidální magnetické pole  $B_t$  ( $U_B < 1300 V$ )
- 5 Iniciovat toroidální elektrické pole  $E_T$  ( $U_{CD} < 600 V$ ,  $T_{CD} \in (0, 10) ms$ )

Vztah mezi napětím  $U_z$  a měřeným magnetickým polem  $\mathbf{B}_m$  jedním kruhovým závitem cívky je dán Faradayovým zákonem

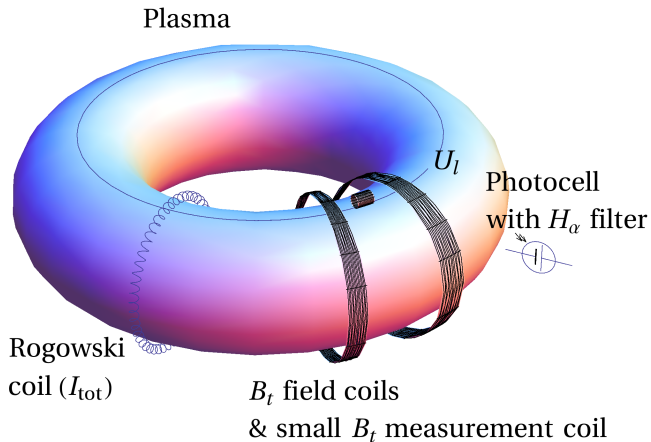
$$U_z = -S_{\text{eff}} \frac{\Delta B_m(t)}{\Delta t}, \quad (9)$$

kde  $S_{\text{eff}}$  je efektivní plocha cívky kolmá na směr magnetického pole.

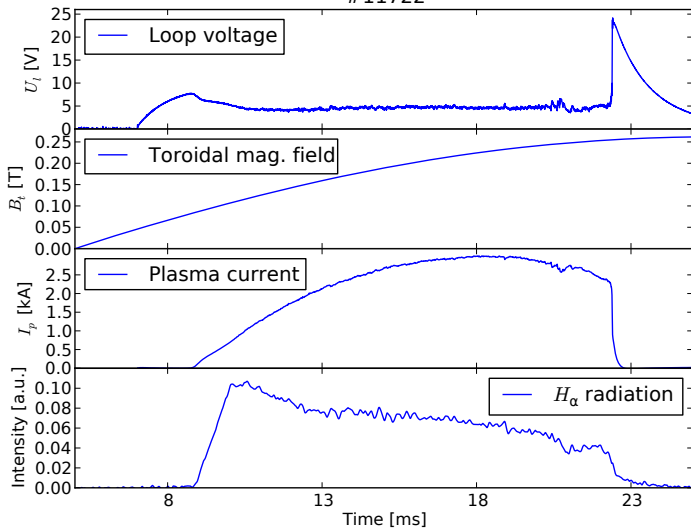
Rogowského pásek:



# Experimentální uspořádání



#11722



Průběh napětí na závit pro vakuový výstřel je dán rovnicí

$$U_I(t) = R_{ch} \cdot I_{tot}(t), \quad (10)$$

kde  $R_{ch}$  je odpor komory a  $I_{tot}$  je celkový proud změřený Rogowského páskem.

Celkový měřený proud je součtem proudu plazmatem a proudu komorou

$$I_{tot}(t) = I_{pl}(t) + I_{ch}(t) \quad (11)$$

ze znalosti odporu komory lze určit proud komorou. Proud plazmatem je dán vztahem

$$I_{pl}(t) = I_{tot}(t) - U_I(t)/R_{ch} \quad (12)$$

- Po osazení tokamaku diagnostickými systémy jsou jednotlivé signály přivedeny k osciloskopu.
- Osciloskop zdigitalizuje signál a uloží do databáze.
- Pro zpracování a zobrazení dat bude použit program Gnuplot.

Paralelně k vašemu sběru bude probíhat sběr standartním systémem tokamaku. Parametry výstřelu jsou dostupné na adrese: <http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/shotnumber/> kde místo shotnumber zadejte číslo výstřelu.

# Jak spouštět sekvence příkazů

Veškeré informace dostupné na:

<http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/SW/gnuplot/training/index>

Předpoklady:

Linux: mít nainstalovány gnuplot a wget

Windows: mít nainstalovány gnuplot pro Windows a wget pro Windows



## Pod GNU/Linux

```
echo "plot '< wget -q -O -  
http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/SW/gnuplot/training/sinusx.page' u  
1:2 w l title 'sin(x)'"|gnuplot -persist
```

## Pod Windows

```
system "C:\Program Files\GnuWin32 \bin \wget.exe" -q -O data.txt  
http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/SW/gnuplot/training/sinusx.page';  
plot 'data.txt' u 1:2 w l title 'sin(x)'
```

## Pod GNU/Linux

```
echo " dt=0.1;x=0 ;plot '< wget -q -O -  
http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/SW/gnuplot/training/sinusx.page' u  
1:2 w l title 'sin(x)', '< wget -q -O -  
http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/SW/gnuplot/training/sinusx.page' u  
1:(x=x+\$2*dt) w l title 'Integral sin(x)'" |gnuplot -persist
```

## Pod Windows

```
system "C:\Program Files\GnuWin32\bin\wget.exe"-q -O data.txt  
http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/SW/gnuplot/training/sinusx.page';  
dt=0.1; x=0; plot 'data.txt' u 1:2 w l title 'sin(x)', 'data.txt'  
u 1:(x=x+\$2*dt) w l title 'Integral sin(x)'
```

Proud plazmatem je dán rovnicí:

$$I_{pl}(t) = I_{tot}(t) - U_I(t)/R_{ch} \quad (13)$$

## Pod Windows

```
dt=0.000002; x=0; plot 'data.txt' u 1:((x=x+$4*dt*C)-$2/Rch) w l  
title 'Proud plazmatem'
```

kde  $C = 1.1 \cdot 10^7$  je kalibrační konstanta.

Centrální elektronová teplota je dána vztahem

$$T_e(0, t) = \left( 0,7 \frac{I_p(t)}{U_I(t)} \right)^{2/3} \quad (14)$$

## Pod Windows

```
dt=0.000002; x=0; plot 'data.txt' u  
1:((0.7*((x=x+$4*dt*C)-$2/R_ch)/$2))**(2.0/3.0) w l title  
'Centrální elektronová teplota'
```

- 1) V laboratoři tokamaku se seznámte fyzicky s tokamakem GOLEM a zmapujte na něm jeho základní prvky. Provéřte funkci jednotlivých komponent infrastruktury tokamaku:
  - 1) vypněte a zapněte čerpání tokamaku,
  - 2) napusťte do tokamaku pracovní plyn,
  - 3) vyzkoušejte předionizační trysku.
- 2) Osad'te tokamak základními diagnostickými prostředky (drát na měření napětí na závit, cívečka měření toroidálního magnetického pole, Rogowského pásek pro měření  $I_p$  a fotodiodu s  $H_\alpha$  filtrem), napojte vše na 4-kanálový osciloskop Tektronix a zaznamenávejte časové vývoje signálů jednotlivých diagnostik.

- 3) Proveďte následující seznamovací experimenty
  - 3.1) Vygenerujte na tokamaku samostatné toroidální elektrické pole  $E_t$  a zaznamenejte časový průběh napětí na závit  $U_I(t)$ . Z jeho průběhu a signálu z Rogowského pásku  $I_{tot}(t)$  odhadněte z Ohmova zákona v prvním přiblížení odpor komory  $R_{ch}$  se zanedbáním její indukčnosti.
  - 3.2) Vygenerujte na tokamaku samostatné toroidální magnetické pole  $B_t$  a zaznamenejte časový průběh napětí na měřící cívce  $U_B(t)$ .
  - 3.3) Vytvořte komplexní zadání pro výboj. Z napětí na závit  $U_I(t)$  a průběhu proudu na Rogowského pásku  $I_{tot}(t)$  vypočítejte časový vývoj proudu plazmatem  $I_p(t)$  se zanedbáním jeho indukčnosti. Následně znázorněte časový vývoj elektronové teploty  $T_e(t)$ .

- 4) Proveďte 10 výbojů, ve kterých se budete snažit pokrýt maximálně prostor parametrů (zadávejte co nejpestřejší spektrum parametrů výbojů), přičemž se pokuste dosáhnout co nejvyšší elektronové teploty.
- 5) Vytvořte tabulku 5 výstřelů s nejvyšší  $T_e$  a u každého uveďte vámi vypočtené parametry: délku výboje, maximální proud plazmatem, maximální elektronovou teplotu, maximální ohmický příkon, maximální energii plazmatu a dobu udržení v době maxima energie plazmatu.

Všechny závislosti získané z improvizované diagnostiky srovnávejte s původním diagnostickým osazením tokamaku GOLEM.