

# 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"

## Seznam přednášek

- 1. Teorie: *Termojaderná fúze*
- 2. Teorie: *Tokamak + pomocné systémy*
- 3. Teorie: *Diagnostika plazmatu*
- 8. Exkurze: *Tokamak COMPASS*
- 5. Teorie: *Tokamak GOLEM*
- 6. Experiment: *Měření základních parametrů plazmatu na tokamaku GOLEM*
- 7. Experiment: *Zpracování naměřených dat*

# Zpracování naměřených dat

- 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.
- Proveďte kalibraci Rogowského pásku
- Určete odpor komory tokamaku
- Vytvořte tabulku 5 výstřelů s nejvyšší  $T_e$  a u každého uveďte vámi vypočtené parametry: délku výboje, maximální proud plazmatem, maximální elektronovou teplotu.

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

Průběh napětí na závit pro vakuový výstřel je dán rovnicí

$$U_I(t) = R_{ch} \cdot I_{tot}(t), \quad (1)$$

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

$$I_{tot}(t) = I_{pl}(t) + I_{ch}(t) \quad (2)$$

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

$$I_{pl}(t) = I_{tot}(t) - U_I(t)/R_{ch} \quad (3)$$

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

$$T_e(0, t) = \left( 0,7 \frac{I_p(t)}{U_I(t)} \right)^{2/3}, \quad [\text{eV}; \text{A}, \text{V}] \quad (4)$$

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

---

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



# 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)'
```

Porovnání maxima proudu komorou z vaší diagnostiky s maximem proudu komorou ze standardní diagnostiky.

Proud komorou je dostupný z adresy

`http://golem.fjfi.cvut.cz/utils/data/shot/chamber_current`

kde místo `shot` zadáte číslo výboje. K určení maxima z naměřených dat je možné použít funkce `stats`

## Pod Windows

Vykreslení dat

```
dt=2e-6; x=0; plot 'data.txt' u 1:(x=x+$4*dt) w l title 'Proud  
plazmatem'
```

Statistická analýza

```
dt=2e-6; x=0; stats 'data.txt' u 1:(x=x+$4*dt)
```

## Pod Windows

```
dt=2e-6; x=0; plot 'data.txt' u 1:($4+0.0059)*dt w l title 'Proud  
plazmatem'
```

Při zanedbání indukčnosti komory nebo v době maxima proudu plazmatem určíme odpor komory z ohmova zákona

$$R_{ch} = \frac{U_l(t)}{I_{tot}(t)}, \quad (5)$$

## Pod Windows

```
dt=2e-6; x=0; plot 'data.txt' u 1:($2/(x=x+$4*dt)) w l title 'Odpor komory'
```

Proud plazmatem je dán rovnicí:

$$I_{pl}(t) = I_{tot}(t) - U_I(t)/R_{ch} \quad (6)$$

## Pod Windows

```
dt=2e-6; x=0; plot 'data.txt' u 1:((x=x+$4*dt*C)-$2/R_ch) w l title  
'Proud plazmatem'
```

kde  $C=11070000$  je kalibrační konstanta pro Rogowského pásek.

Centrální elektronová teplota je dána vztahem

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

## Pod Windows

```
dt=2e-6; 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'
```



# Energetická rovnováha plazmatu - Ohmický příkon, Energie plazmatu

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

$$\bar{n} = 2 \frac{p_0}{k_B T_{ch}}, \quad [\text{počet částic/m}^3, \text{Pa, K}] \quad (8)$$

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

Jediným zdrojem ohřevu plazmatu na tokamaku GOLEM je ohmický ohřev:

$$P_{OH}(t) = R_p(t) \cdot I_p^2(t) = U_I(t) \cdot I_p(t). \quad (9)$$

Celkovou tepelnou energii plazmatu spočteme z ekvipartičního teorému:

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

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

$$W_{th}(t) = \frac{1}{3} \bar{n} k_B T_e(0, t) V \quad [\text{J; m}^{-3}, \text{K, m}^3], \quad (10)$$

# Energetická rovnováha plazmatu - Doba udržení

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

$$P_{\text{loss}}(t) = P_{OH}(t) - \frac{\Delta W_{th}}{\Delta t} \quad (11)$$

a následně i dobu udržení energie definovanou jako

$$\tau_E(t) \equiv \frac{W_{th}(t)}{P_{\text{loss}}(t)}. \quad (12)$$

V momentě kdy se energie plazmatu nemění je člen  $\frac{\Delta W_{th}}{\Delta t}$  v rovnici (11) 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  $P_{\text{loss}} = W_{th}/\tau_E$ .