

Měření základních parametrů vysokoteplotního plazmatu na tokamaku GOLEM

J. Krbec¹

¹České 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*
- 4. Experiment: *Měření*
- 5. Experiment: *Zpracování naměřených dat*
- 6. Teorie: *Energetická rovnováha plazmatu*
- 7. Experiment: *Výpočet základních parametrů plazmatu + (vytvoření protokolu z měření)*
- 8. Exkurze: *Tokamak COMPASS*

Diagnostika plazmatu

Teplota elektronů

Teplota plazmatu se měří v elektronvoltech eV. Píšíme-li

$$T = 1 \text{ eV},$$

myslíme tím

$$kT = 1 \text{ eV},$$

kde k je Boltzmannova konstanta. Dosadíme-li za $k = 8,6 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ dostáváme převodní vztah

$$T = \frac{1 \text{ eV}}{8,617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}} = 11605 \text{ K}. \quad (1)$$

Teplo

Máme-li plazma o hmotnosti m , tepelné kapacitě c a změníme-li jeho teplotu o ΔT , pak teplo je definováno jako

$$Q = mc\Delta T \text{ [J]}.$$

Diagnostika

- Magnetická
- Spektroskopická
- Sondová
- Mikrovlnná
- Svazková a částicová

Tokamak Golem

- Flux loop pro měření napětí na závit U_{loop}
- Cívka pro měření toroidálního magnetického pole
- Rogowského pásek pro měření proudu komorou a plazmatem $I_{ch} + I_p$
- Mirnovovy cívky pro měření polohy plazmatu
- Saddle coil - cívka pro měření vertikálního magnetického pole

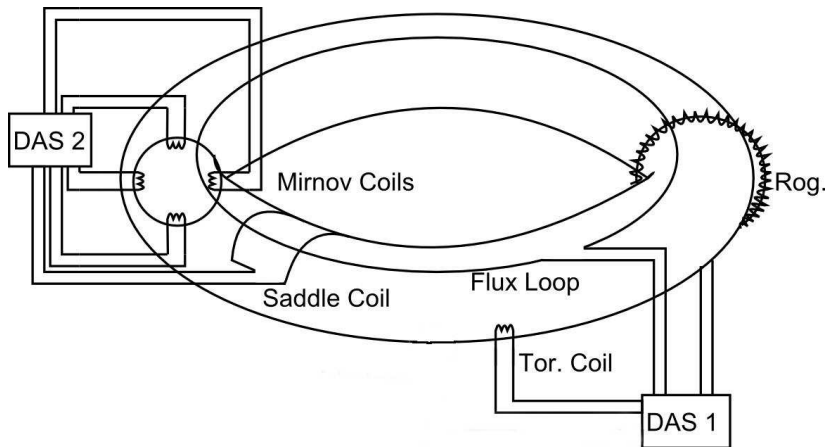
Pamatuj

Pro určení velikosti magnetického pole je třeba signál z cívek integrovat! Faradayův zákon elektromagnetické indukce zní

$$U = -N \frac{\Delta BS}{\Delta t}$$

kde N je počet závitů cívky, B velikost magnetické pole, S plocha cívky kolmá na mag. pole a t je čas.

Osazení magnetických diagnostik



Měření napětí na závit - flux loop

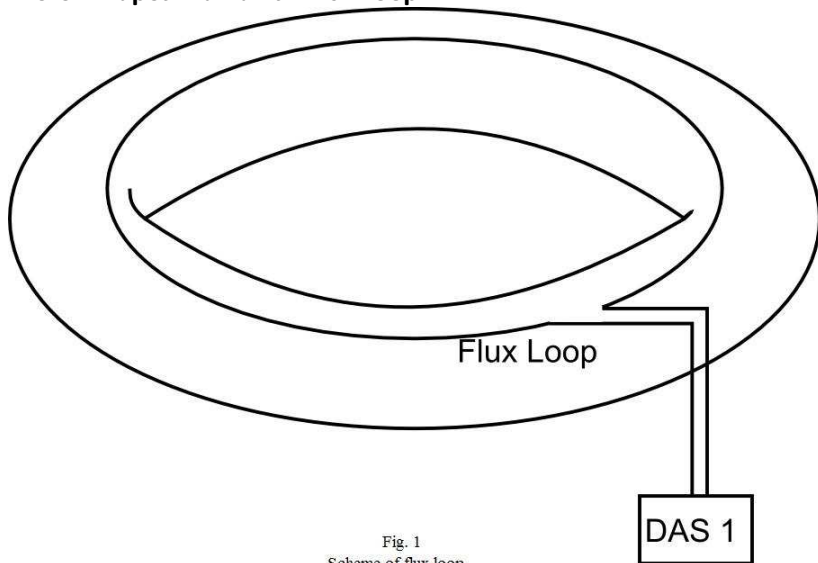


Fig. 1
Scheme of flux loop.

Rogowského pásek

- pojmenována po Walteru Rogowskim [DE]
- měření střídavých proudů (AC)
- možnost měření velikých proudů $> \text{kA}$
- používána v kleštvých ampérmetrech
- na české wikipedii chybný náčrt !!

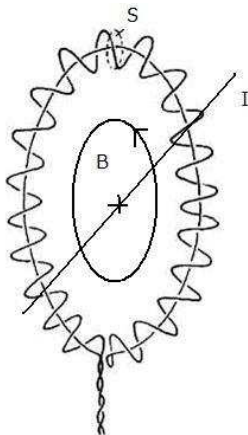


Fig. 1

Scheme of Rogowski coil.

Měření proudu plazmatem

Měření odporu komory

Průběh napětí na závit pro vakuový výstřel je dán rovnicí

$$U_I(t) = R_{ch} \cdot I_{tot}(t), \quad (2)$$

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

Měření proudu plazmatem

Celkový měřený proud je součtem proudu plazmatem a proudu komorou

$$I_{tot}(t) = I_{pl}(t) + I_{ch}(t) \quad (3)$$

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

$$I_{pl}(t) = I_{tot}(t) - U_I(t)/R_{ch} \quad (4)$$

Mirnovovy cívky

- Z rozdílu hodnot magnetického pole mezi dvojicí cívek lze určit polohu středu plazmatu v přiblížení proudového vodiče

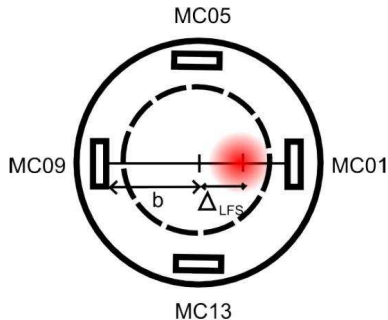


Fig. 1

Locations of Mirnov coils with misplaced plasma column represented by red, fading circle. Limiter is represented by dashed, circular line.

Plazma je opticky tenké prostředí

Zanedbatelná absorpce ve viditelné, ultrafialové a měkké rentgenové oblasti spektra

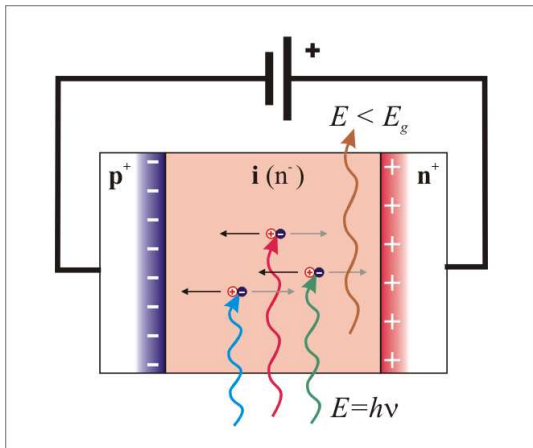
Tokamak Golem

- Fotodioda + H_{α} filtr
- CCD kamera
- Scintilační detektor pro detekci tvrdého rentgenového záření (HXR)

Tokamak COMPASS

- Detekce měkkého rentgenového záření (SXR)
- Diagnostika Thomsonova rozptylu pro měření hustoty a teploty elektronů

Fotodioda



- Kamera Casio EX-F1
- Počet snímků za vteřiny
336x96@1200 fp/s
- Využití závěrky typu rolling-shutter a symetrie plazmatu k dosažení 40000 řádků/s

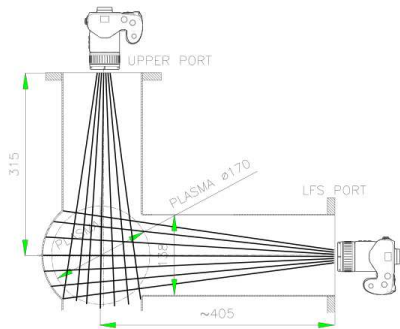


Figure 3: Poloidal cross-section of the tokamak GOLEM and the positions of the cameras during observation of plasma for tomographic reconstruction.

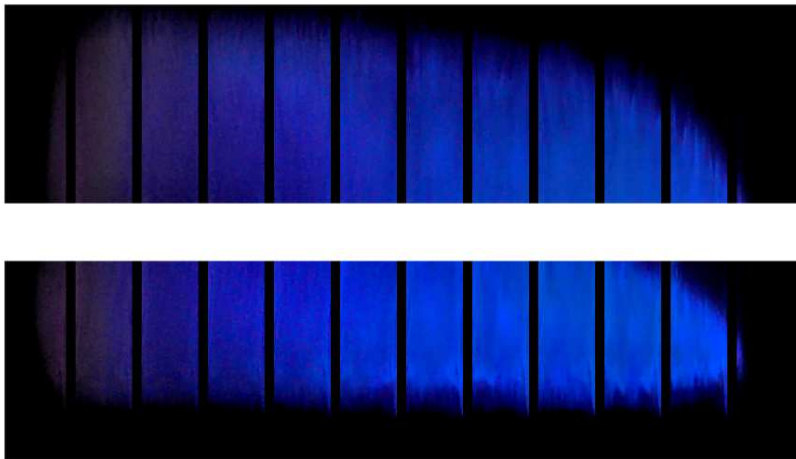


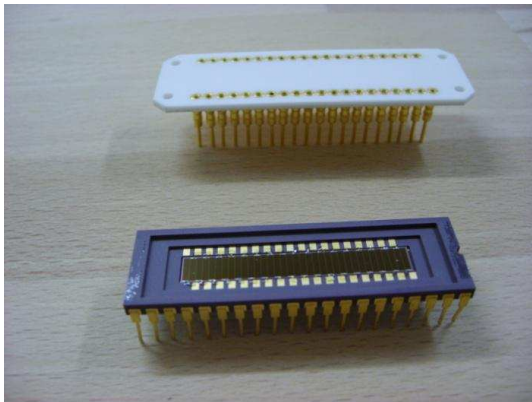
Figure 8: Raw data acquired from the cameras. The upper pictures are taken from the upper camera (Fig. 3) and the lower pictures from LFS the camera.

Scintilační detektor + zdroj vysokého napětí + analyzátor pulsů
Možnost detekce runaway elektronů



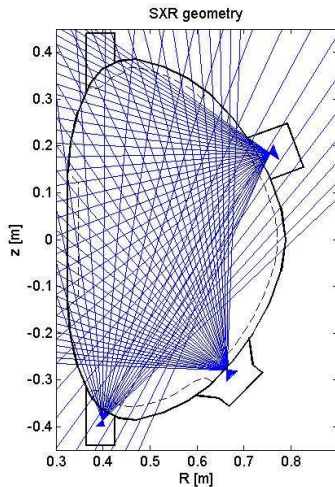
Detekce měkkého rentgenového záření (SXR)

Křemíkový detektor



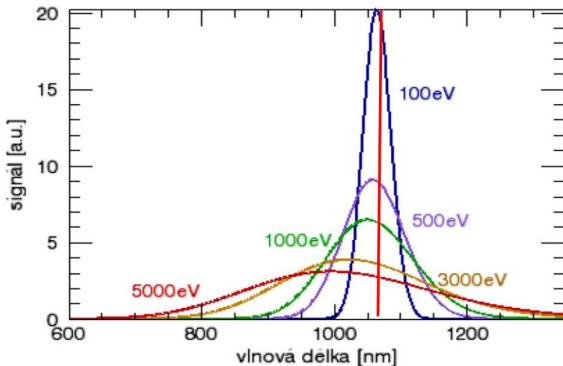
Detekce měkkého rentgenového záření (SXR)

Tomografie SXR

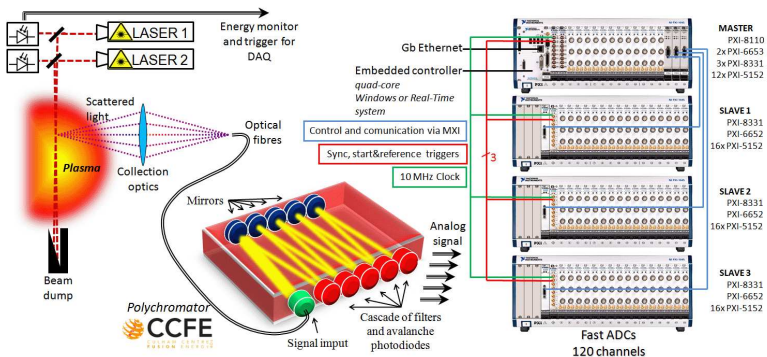


Měření teploty a hustoty elektronů

- Dochází k rozšíření spektra monochromatického záření vlivem Dopplerova jevu
- Měření teploty z rozšíření spektra rozptýleného záření
- Měření hustoty z intenzity rozptýleného záření

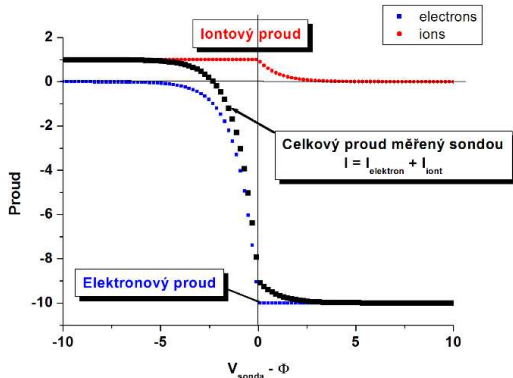


Diagnostika Thomsonova rozptylu - geometrie

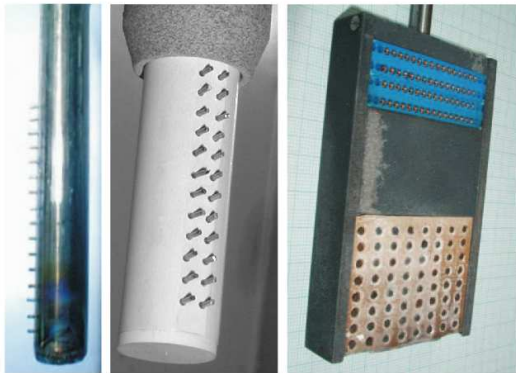


Měření volt-ampérové charakteristiky plazmatu

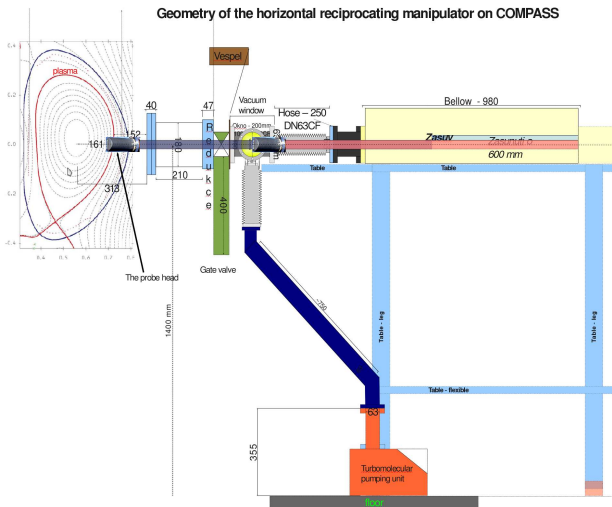
- Lagmuirova sonda - kus vodiče vnořeného do plazmatu
- Měření: elektrického potenciálu Φ a teploty elektronů T_e
- Sonda by svými rozměry neměla ovlivňovat srážkovost plazmatu
- Elektronový proud je funkcí teploty $I_e = I_{e0} \exp(-e \frac{\Phi - U}{kT_e})$



Nízké tepelné toky - hřebínková sonda (napevno umístěna v plazmatu)



Vysoké tepelné toky - recipročná sonda



Mikrovlnná diagnostika

Mikrovlnná radiometrie

- $\omega \approx B_t, I(\omega) \approx \omega^2 T_e$

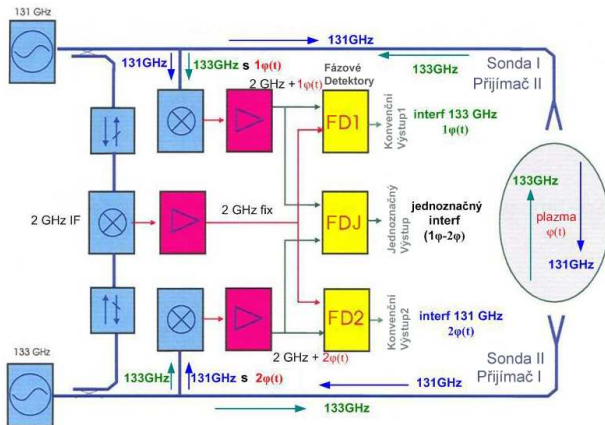
Mikrovlnná interferometrie

- Změna fáze elmag. vlny v důsledky změny indexu lomu
- Index lomu plazmatu je funkcí elektronové hustoty
- Porovnáním referenčního signálu a signálu prošlého plazmatem je možné určit elektronovou hustotu
- Vlna se musí šířit plazmatem. Frekvence signálu > 100 GHz

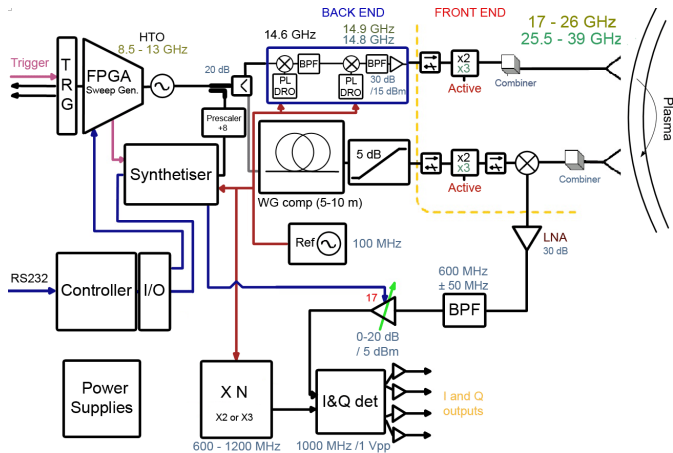
Mikrovlnná reflektometrie

- Plazmová frekvence ω_p je harmonická oscilace elektronů při poruše nábojové rovnováhy plazmatu
- Odraz vln s frekvencí nižší než plazmová frekvence $\omega < \omega_p$.
- Pomocí rychlého rozmítání frekvence je dosaženo proskenování hustoty plazmatu. Frekvence signálu ≈ 10 GHz

Mikrovlnná interferometrie

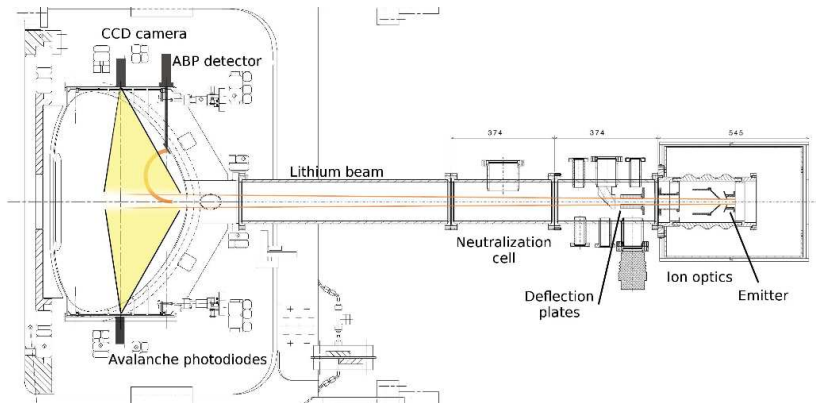


Mikrovlnná reflektometrie

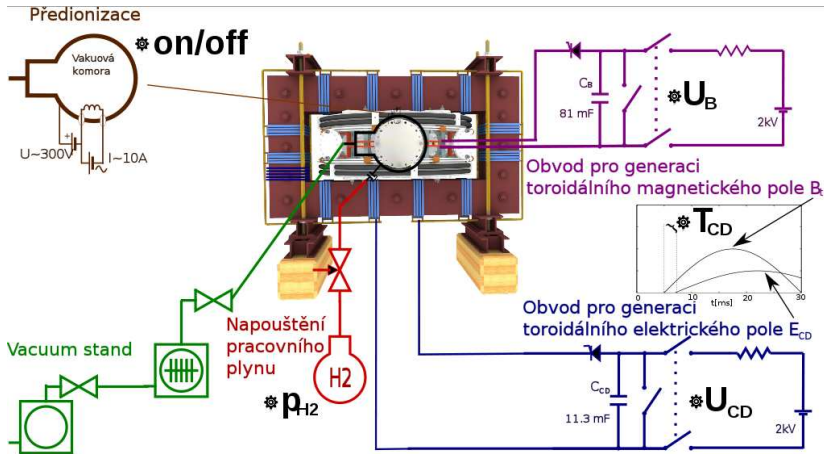


Lithiový svazek

- Intenzita záření excitovaných lithiových atomů je funkcí hustoty plazmatu



Postup měření



Scénář provedení výboje:

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

- 1) V laboratoři tokamaku se seznamte fyzicky s tokamakem GOLEM a zmapujte na něm jeho základní prvky.
Prověřte funkci jednotlivých komponent infrastruktury tokamaku:
 - 1 vypněte a zapněte čerpání tokamaku,
 - 2 napuštěte 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_α filtrem), napojte vše na 4-kanálový osciloskop Tektronix a zaznamenávejte časové vývoje signálů jednotlivých diagnostik.

3) Proved'te 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.

Dobrovolná domácí příprava pro zpracování dat

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