

# Základy diagnostiky vysokoteplotního plazmatu na tokamaku GOLEM

Michal Starý

Gymnázium Vincence Makovského, Michalstary98@gmail.com

Václav Mikeska

Gymnázium Františka Palackého, Val. Meziříčí, vasek.mikeska@seznam.cz

Roman Lipový

Masarykovo gymnázium, roman.lipovy@gypri.cz

Jan Buryanec

Gymnázium Dobruška, BurdisXD1998@seznam.cz

## Abstrakt:

Cílem našeho miniprojektu bylo naučit se pracovat se základní diagnostikou plazmatu v tokamaku. Dále jsme se snažili o dosažení nejvyšší možné elektronové teploty plazmatu pomocí vhodného nastavení parametrů tokamaku. Teplotu jsme spočítali pomocí námi napsaného programu a to z hodnot napětí změřených osciloskopem.

## 1 Úvod

Snažili jsme se o přiblížení podmínkám, které v nitru hvězd umožňují fúzi jader atomů vodíku z důvodu výzkumu fúze jako perspektivního zdroje energie. Základním požadavkem zapálení plazmatu je mj. dosažení kritické teploty (řádově stovky milionů Kelvinů), přesněji Lawrensovo kritérium pro součin hustoty a teploty [1] V našem případě jsme používali pro ohřev transformátorovým efektem indukovaný proud v plazmatu. V rámci miniprojektu bylo naším cílem tuto teplotu plazmatu určit. Teplotu plazmatu nelze měřit přímo, a proto jsme museli využít elektromagnetických účinků proudu plazmatu. Jako teplotu plazmatu považujeme teplotu elektronů vyjádřenou v eV ( $1\text{eV} \approx 11600\text{K}$ ), a protože plazma není v celém svém objemu teplotně stejnorodé, jedná se přibližně o střední hodnotu.

## 2 Určování teploty plazmatu

### 2.1. Teorie

K určení elektronové teploty  $T_e$ , použijeme Spitzerovu formuli, která velmi dobře popisuje závislost odporu  $R_p$  plazmatu na její teplotě  $T_e$ :

$$T_e = (R_p / 0.7)^{2/3}, [eV, \Omega]$$

Proud plazmatu je tvořen jedním závitem, a proto je odpor  $R_p$  určen jako podíl napětí  $U_l$  na závitu a proudu  $I_p$  plazmatem. Proud  $I_p$  získáme důmyslnou metodou použitím Rogowského pásky, který usadíme kolem komory torusu. Rogowského pásky je tvořena cívkou obmotanou kolem drátu a při změně magnetického indukčního toku se na koncích této pásky indukuje napětí. Změřené napětí na Rogowského pásky se nejdříve zintegruje podle času a poté se vypočítá proud  $I_{tot}$  vynásobením vhodnou převodovou konstantou (pro tokamak GOLEM). Od  $I_{tot}$  odečteme proud v komoře  $I_{ch}$ , a tak získáme proud  $I_p$ . Napětí na komoře je stejné jako napětí  $U_l$  na plazmatu, odpor  $R_{ch}$  komory je známý ( $R_{ch} = 9,7 \text{ m}\Omega$ ) a v průběhu experimentu přibližně konstantní (nezahřívá se), a proto lze poměrně jednoduše a přesně určit proud  $I_{ch}$ . Shrnutím těchto poznatků dostaneme soustavu rovnic:

$$R_p = \frac{U_l}{I_p}$$

$$I_{tot} = I_{ch} + I_p$$

Z Ohmova zákona pro komoru platí

$$U_{ch} = U_l = R_{ch} \cdot I_{ch}$$

Výslednou teplotu v eV vypočteme jako

$$T_e = \left(0,7 \cdot \frac{I_p}{U_l}\right)^{2/3} = \left(0,7 \cdot \frac{I_{tot} - I_{ch}}{U_l}\right)^{2/3} = \left(0,7 \cdot \frac{I_{tot} - \frac{U_l}{R_{ch}}}{U_l}\right)^{2/3} = \left(0,7 \cdot \left(\frac{I_{tot}}{U_l} - \frac{1}{R_{ch}}\right)\right)^{2/3}, [eV, A, V]$$

Toto platí pro libovolný okamžik, a proto jsme měřené veličiny sledovali po čas výboje a z nich jsme vytvořili časovou závislost  $T_e$  na čase, přepsáno

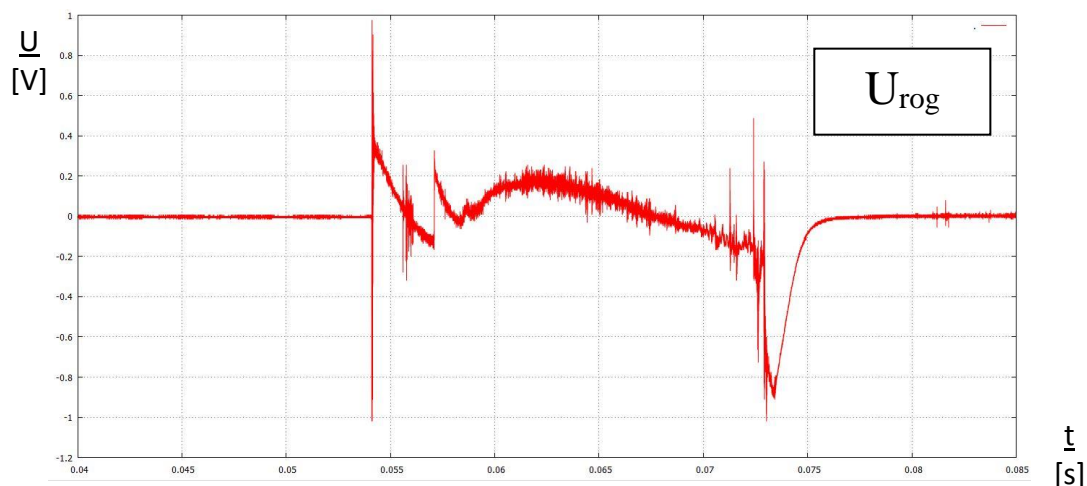
$$T_e(t) = \left(0,7 \cdot \left(\frac{I_{tot}(t)}{U_l(t)} - \frac{1}{R_{ch}}\right)\right)^{2/3}$$

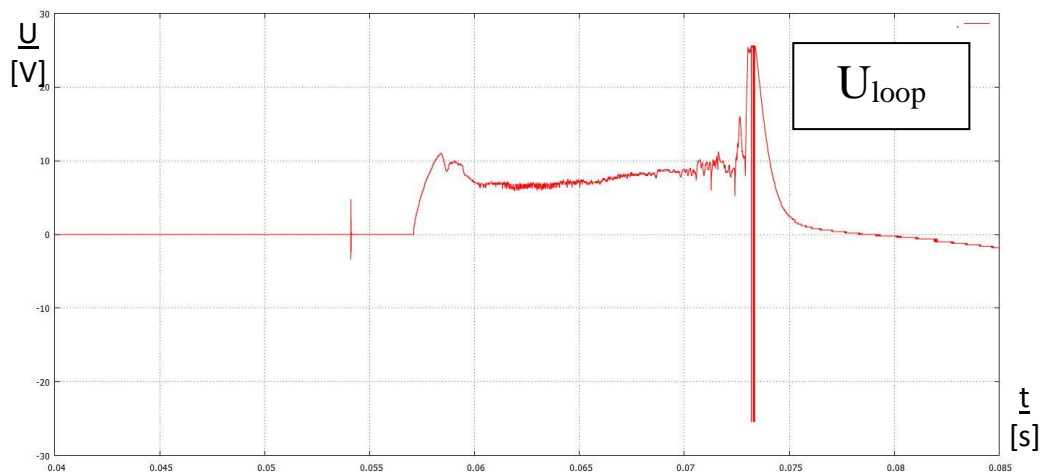
Podle tohoto předpisu jsme se dostali k hledané závislosti teploty plazmatu na čase.

## 2.2. Materiály a metody

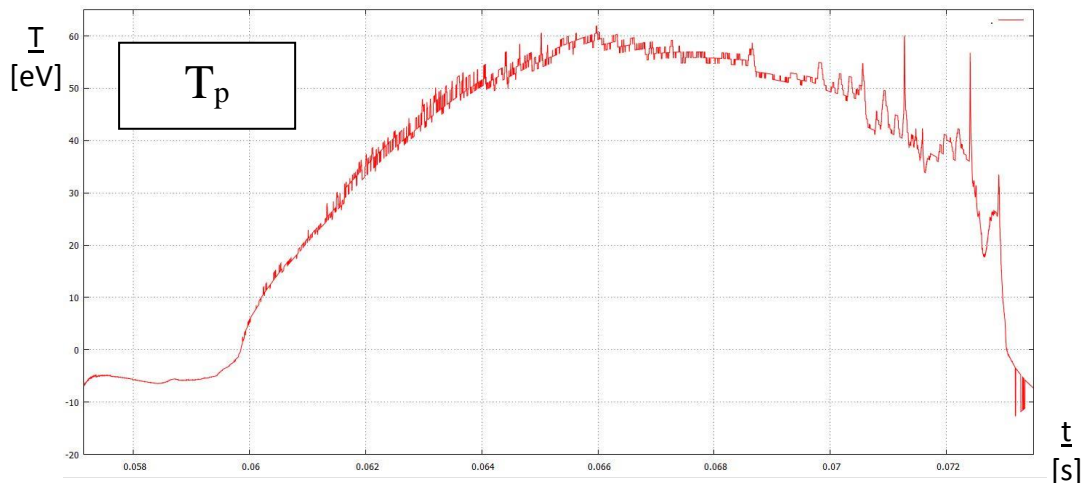
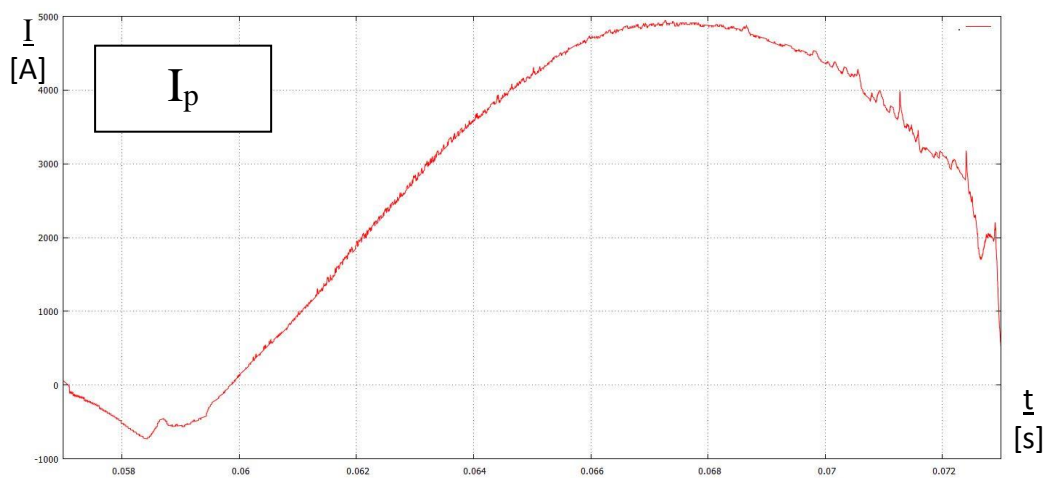
Tokamak jsme osadili Rogowského páskem pro měření proudu  $I_{Tot}$  v plazmatu a komoře kolem toru tak, aby procházel jeho středem, a elektrickým drátem na měření napětí na závit  $U_l$ , který jsme vedli po horní straně toru horizontálně. Oba měřicí dráty jsme zapojili do 4kanálového osciloskopu RIGOL. Naměřená data jsme přeposlali do počítače, ve kterém jsme je pomocí programu wGet stáhli automaticky. Dále jsme data zpracovali v programu GNU PLOT. Z naměřených hodnot napětí na závit ( $U_{loop}$ ) a z napětí na Rogowského pásce ( $U_{rog}$ ). Napětí na Rogowského pásce je úměrné derivaci celkového proudu procházejícího tokamakem ( $I_{tot}$ ). Z těchto hodnot jsme dále vykreslili grafy proudu plazmatem a teplotu centra plazmatického vlákna.

## 2.3. Naměřená data





## 2.4. Zpracovaná data



## 2.5. Výsledky

Podařilo se nám dosáhnout nejvyšší průměrné teploty plazmatu kolem 39.1 eV, což se dá jednoduchým převodem vyjádřit také jako cca  $4,5 \cdot 10^5$  °C. Ovšem v centru plazmatického vlákna se nám podařilo naměřit teploty kolem 60 eV. To na zapálení termojaderné fúze samozřejmě nestačí, nicméně šlo o měření na tokamaku, díky kterému se nám tuto teplotu podařilo určit.

## 2.6. Diskuze

Úspěšně jsme vykreslili závislost teploty centra plazmatického vlákna a také závislost proudu jím procházejícím. Podařilo se nám dosáhnout průměrné teploty plazmatu 39,1 eV za podmínek  $p_{ch} = 21,93$  mPa,  $U_{Bt} = 1050$  V,  $C_{CD} = 550$  V a prodlevy mezi sepnutím magnetického pole a začátkem indukce 3 ms. Vzhledem k nalezeným hodnotám z minulých pokusů považujeme náš výsledek za lepší než průměrný.

## 3 Shrnutí

Úspěšně se nám podařilo nastavit parametry tokamaku GOLEM tak, že jsme provedli několik plazmatických výbojů. Průběh jednoho z nich jsme detailněji prozkoumali a zpracovali. Určili jsme nejvyšší a průměrnou teplotu plazmatického vlákna v komoře tokamaku. Během experimentu jsme se naučili pracovat s diagnostickými zařízeními, jako např. umístění měřících cívek a drátů na tělo tokamaku a správně sbírat naměřená data z osciloskopu.

## Poděkování

Děkujeme Bc. Ondřeji Groverovi a panu Ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc. za jejich srozumitelný výklad z oblasti termojaderné fúze, za vysvětlení principu fungování tokamaku a za celkovou pomoc s naším miniprojektem. Dále FJFI ČVUT za poskytnutí přístupu k špičkovému vědeckému vybavení. Také celému organizačnímu týmu Týdne vědy na Jaderce za uspořádání této skvělé akce.

## Reference:

[1] Uloha13A.pdf. *GOLEM @ FJFI.CVUT* [online]. [cit. 2016-06-21]. Dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/KFpract/15/Basics/uloha13A.pdf>