

# Základy diagnostiky vysokoteplotního plazmatu na tokamaku GOLEM I

**S. Buryšková\*, L. Nechyba\*\*, D. Komárek\*\*\***

\*Gymnázium Matyáše Lercha, Brno

\*\*Gymnázium Jana Ámose Komenského, Nové Strašecí

\*\*\*Masarykovo gymnázium, Příbor

[simona.buryskova@seznam.cz](mailto:simona.buryskova@seznam.cz)

## Abstrakt:

Práce se zabývá diagnostikou plazmatu na tokamaku GOLEM. Pomocí různých diagnostických zařízení bylo měřeno napětí na jeden závit, derivace proudu v komoře a plazmatu, magnetická indukce magnetického pole a charakteristická spektrální čára vyzařování vodíku  $H_{\alpha}$ . Z naměřených dat byla pomocí programovacího jazyka Python2 určena doba udržení plazmatu, elektronová teplota a hustota. Nejvyšší teplota, jíž bylo dosaženo, byla 100 eV, v plazmatu tedy nemohlo dojít k zapálení termojaderné fúze.

## 1 Úvod

Představte si, že byste mohli mít malou hvězdu přímo vedle sebe v pozemských podmínkách a využívat ji jako zdroj energie. Přesně toto může lidstvu umožnit zvládnutí termojaderné fúze, neboli slučování jader. K fúzi dochází při velmi vysokých teplotách, kdy se hmota nachází ve stavu plazmatu. Aby se termojaderná fúze dala využít jako zdroj energie, je potřeba plazma udržet dostatečně dlouhou dobu a to zatím neumíme. Cílem našeho miniprojektu bylo provést experiment na tokamaku GOLEM a dosáhnout co nejlepších parametrů plazmatu (vysoká teplota a dlouhá doba udržení). Článek seznamuje čtenáře postupně s tokamakem GOLEM, použitými metodami diagnostiky plazmatu, dosaženými výsledky experimentu a na závěr je uvedena i diskuse dosažených výsledků.

## 2 Diagnostika plazmatu na tokamaku GOLEM

### 2.1. Tokamak GOLEM

Tokamak GOLEM na JFJI ČVUT je zařízením pro udržení plazmatu za pomoci magnetického pole. Slouží primárně ke studijním účelům. Skládá se z vakuové komory ve tvaru toroidu, v níž se tvoří plazma, a cívek, které tvoří toroidální magnetické pole. Magnetické pole se vytváří také kolem plazmatu. V důsledku působení obou magnetických polí se částice v plazmatu pohybují po šroubovicovité trajektorii. Vakuová komora se plní vodíkem nebo heliem, což jsou neutrální plyny, které je třeba zionizovat, aby došlo k vytvoření plazmatu. Ohřev plazmatu je realizován ohmickým ohřevem pomocí elektrického

proudu indukovaného v plazmatu. Před výbojem je elektrická energie akumulována v kondenzátorech, které jsou poté vybíjeny do cívek. Jedna kondenzátorová baterie je vybita do toroidálních cívek, které vytváří toroidální magnetické pole. Druhá baterie je vybíjena do primárního vinutí transformátoru, které zajišťuje ohřev plazmatu.

## 2.2. Materiály a metody

Na tokamaku GOLEM jsme absolvovali jeden experimentální den. Před zahájením experimentu jsme komoru osadili diagnostikami: kruhovým vodičem pro měření napětí na jeden závit, Rogowského cívkou pro měření derivace proudu, cívkou pro měření derivace indukce magnetického pole a fotodiodou. Signál z diagnostik jsme přivedli do čtyřkanálového osciloskopu RIGOL. Před každým výbojem byla komora zčerpána na vakuum s hodnotou tlaku řádově  $10^{-4}$  Pa. Poté byl napuštěn pracovní plyn vodík. Následně jsme pomocí webového rozhraní nastavili parametry výboje (tlak pracovního plynu, napětí mezi deskami kondenzátorů, napětí na cívkách, časový rozdíl začátku vzestupu intenzity elektrického a magnetického pole). Získaná data jsme zpracovali pomocí programovacího jazyka Python2.

## 2.3. Výpočty

Na základě dat naměřených Rogowského cívkou při vakuovém výboji jsme spočítali odpor komory tokamaku, hodnota odporu  $R_{ch} = 1 \cdot 10^{-2} \Omega$ . Ze znalosti odporu a celkové hodnoty proudu  $I_{tot}$  jsme určili proud, který protékal plazmatem  $I_{pl}$  ze vztahu:

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

Poté jsme ze Spitzerovi formule dopočítali elektronovou teplotu  $T_e$  :

$$T_e(0, t) = (0,7 \frac{I_{pl}(t)}{U_I(t)})^{2/3}$$

Ze stavové rovnice pro počáteční tlak pracovního plynu jsme odhadli elektronovou hustotu  $n$  a celkovou tepelnou energii plazmatu  $W_{th}$  :

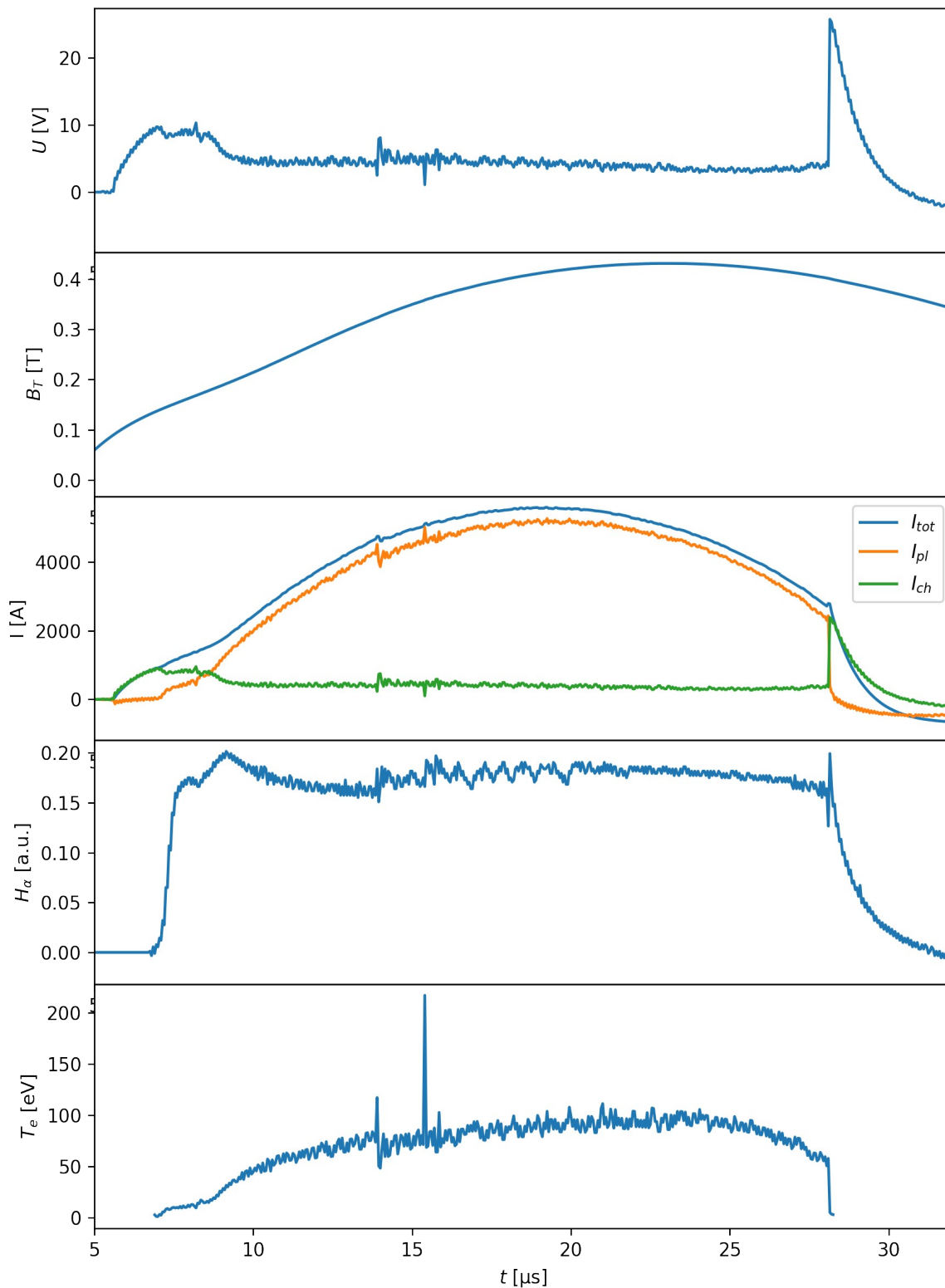
$$W_{th} = \frac{1}{3} n k_B T_e(0, t) V$$

A výslednou dobu udržení jsme spočítali jako:

$$\tau_E(t) = \frac{W_{th}}{P_{loss}},$$

kde  $P_{loss}$  je ztrátový výkon. Doba udržení vyjadřuje charakteristický čas, za který by při daném ztrátovém výkonu unikla energie plazmatu. Při výpočtu jsme předpokládali, že ztrátový výkon je roven ohmickému příkonu. Tento předpoklad platí, pokud se energie plazmatu nemění (využili jsme hodnoty energie a výkonu v okolí maxima).

## 2.4. Naměřená data



Obrázek 1: Shora: vývoj napětí na jeden závit  $U_1$ ; indukce toroidálního magnetického pole  $B_T$ ; celkový proud  $I_{tot}$ , proud plazmatem  $I_{pl}$  a komorou  $I_{ch}$ ; signál fotodiody s  $H_\alpha$  filtrem; elektronová teplota  $T_e$

## 2.2. Diskuse

Podařilo se nám dosáhnout dlouhé doby udržení plazmatu (100 mikrosekund) díky tomu, že kondenzátory pro ohřev plazmatu byly nabity na nižší napětí (450 V), což způsobilo nízký ztrátový výkon, a díky dostatečně vysokému tlaku pracovního plynu (28 mPa), za něhož je hustota částic, a tedy celková energie plazmatu, vyšší. Naše výpočty doby udržení se lišily od výpočtů provedených automatickým systémem zpracování dat tokamaku GOLEM (46,8 mikrosekund), který využívá průměru hodnot přes celý čas života plazmatu. Přesnější je výpočet s využitím hodnoty maxima tepelné energie plazmatu (naš výpočet). Elektronová teplota však nebyla dostatečně vysoká pro zapálení termojaderné fúze.

## 3 Shrnutí

Na tokamaku GOLEM jsme naměřili parametry plazmatu a komory zaznamenané na osciloskopu. Pomocí programovacího jazyka Python2 jsme zpracovali data a vypočítali dobu udržení plazmatu, teplotu plazmatu, energii plazmatu, průběhy indukce toroidálního magnetického pole, průběh napětí a proudu v závislosti na čase. Zjistili jsme, že automatický systém zpracování dat počítá nepřesné hodnoty doby udržení plazmatu.

## Poděkování

Naše poděkování patří Ondrovi Groverovi a Járovi Krbcovi za vedení našeho miniprojektu, také za jejich trpělivost a cenné rady při zpracování experimentu. Chceme poděkovat Vojtěchu Svobodovi za to, že nás seznámil s Golemem a za organizaci celého Týdne vědy na Jaderce. Děkujeme také katedře fyziky FJFI ČVUT za financování tokamaku GOLEM.

## Reference:

- [1] FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM FJFI *Vysokoteplotní plazma na tokamaku GOLEM* [cit. 20. 6. 2017] Dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/KFpract/15/Basics/uloha13A.pdf>
- [2] TOKAMAK GOLEM *Webová databáze výstřelů*, [cit. 20. 6. 2017] Dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/>“číslo výstřelu“