

# Základy řízení a diagnostiky plazmatu na tokamaku GOLEM

Jakub Dlouhý,  
Daniel Boruch,  
Jakub Talanda,  
Ondřej Altman

ondraalt@seznam.cz

## **Abstrakt:**

Naším cílem bylo popsat vliv jednotlivých parametrů výboje na vlastnosti plazmatu na tokamaku GOLEM. Konkrétně jsme se pokoušeli nalézt anomálie, které se projevují jako náhlý nárůst proudu a pokles napětí. Odhalit příčinu anomálií se nám sice nepodařilo, nicméně nás při jejich studiu napadla myšlenka zkoumání závislosti teploty plazmatu na jednotlivých parametrech pro výboj. Snažili jsme se určit vliv parametrů a jejich kombinací na teplotu plazmatu.

## **1. Úvod**

V současnosti nedokážeme spočítat veškeré chování a vlastnosti plazmatu v tokamaku, proto je potřeba všechny úvahy experimentálně ověřovat bez možnosti předchozího teoretické předpovědi výsledků. I když nedokážeme funkci určující vlastnosti plazmatu popsat, snažíme se nalézt závislost určitých vlastností plazmatu na jednotlivých parametrech. Zpočátku jsme se pokoušeli najít příčinu anomálií pozorovaných na tokamaku. Přestože se nám ji nepodařilo odhalit, zaujaly nás různé hodnoty teploty plazmatu pozorované během pokusů, které nás přivedly k myšlence studia faktorů ovlivňujících teplotu.

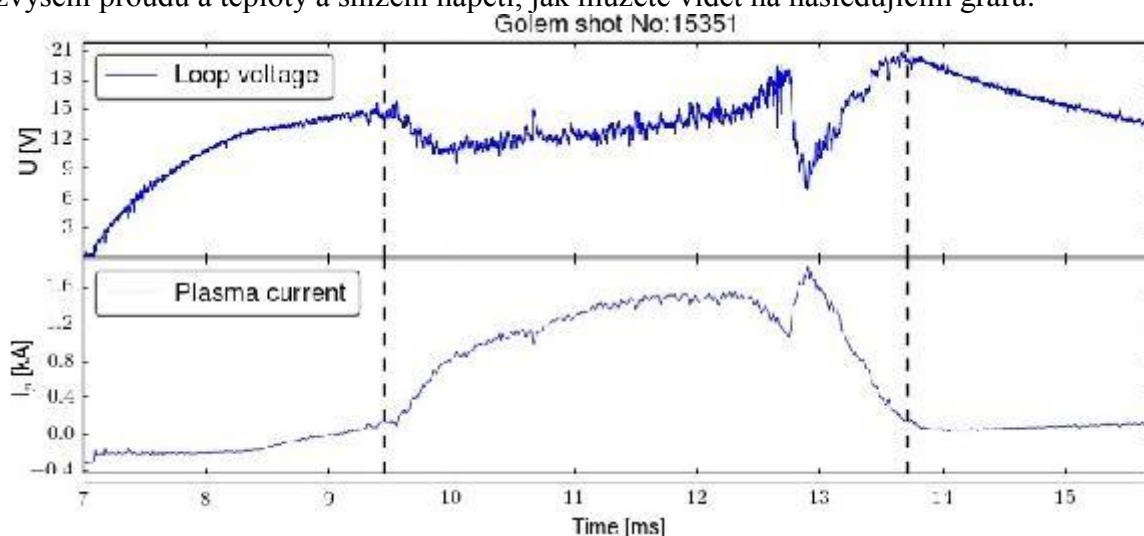
## **2. Experimentální uspořádání**

### **O tokamaku obecně**

Tokamak je zařízení sloužící k výzkumu vytváření a udržení plazmatu a zahájení termojaderné fúze. Pomocí elektromagnetického pole udržuje plazma uvnitř komory a pomocí elektrického ho urychluje, čímž se zvyšuje jeho teplota. I když zatím nedokážeme vytvořit dostatečně teplé plazma pro zažehnutí termojaderné fúze, můžeme provádět výzkum s plazmatem o nižších teplotách.

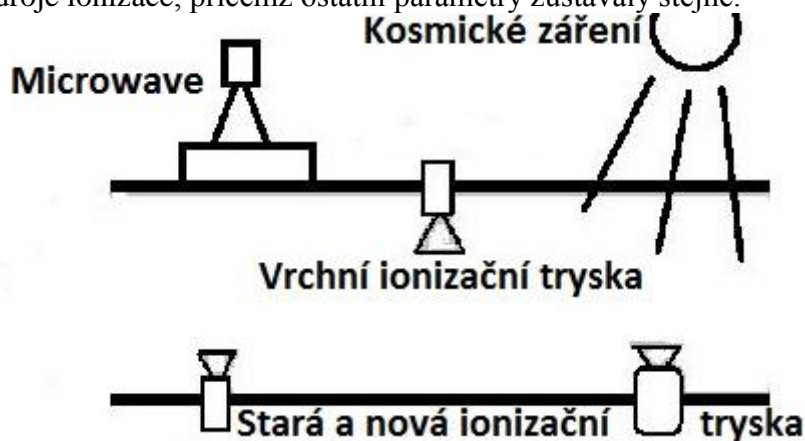
## Náš postup

Při předchozích pokusech bylo zaznamenáno několik anomálií v podobě zvýšení proudu a teploty a snížení napětí, jak můžete vidět na následujícím grafu.



Rozhodli jsme se vyhledat všechna měření s těmito anomáliemi z posledních několika týdnů a najít společné parametry pro určení příčin těchto anomálií. Následně jsme se pokusili napodobit některé z těchto výbojů, abychom ověřili, že je těchto anomálií v současnosti ještě možno dosáhnout. Také jsme měnili některé parametry, abychom určili jejich vliv. Naneštěstí se nám nepodařilo těchto anomálií znovu dosáhnout. Během měření jsme si všimli změn teploty a rozhodli se určit její závislost na jednotlivých parametrech. Prováděli jsme série měření, kde jsme měnili pouze jeden parametr a ostatní nechávali stejné.

Začali jsme se změnami napětí  $U_b$ , tedy napětí na kondenzátorech, které po vybytí do cívek vytvořilo magnetické pole, které udržovalo plazma. Dále jsme se rozhodli určit vliv jednotlivých zařízení umožňující počáteční ionizaci plynu na teplotu. Postupně jsme zkusili všechny dostupné zdroje ionizace, přičemž ostatní parametry zůstávaly stejné.



Z předchozích měření jsme vyvodili, že teplota je ovlivňována zpožděním mezi aktivací udržovacího a urychlovacího pole, takže jsme provedli sérii měření se změnami tohoto parametru, přičemž ostatní zůstávaly stejné. Na parametr tlaku vodíku jsme provedli dokonce dvě série měření, abychom měli údaje ověřené. Měřili jsme v rozmezí od 16 do 40 mPa. Samozřejmě záleželo i na kombinaci ostatních parametrů, ale z časových důvodů nebylo možné tolik měření provést a tak jsme provedli pouze měření v závislosti na jednotlivých parametrech.

### 3. Výsledky

Výsledky první části našeho měření, tedy hledání anomálií, nenaplnily naše očekávání. I přestože jsme nastavili stejné parametry jako při experimentu o tři dny dříve, nepodařilo se nám výraznější anomálie vytvořit. V minulosti se mnohokrát opakovaly úspěšné pokusy s hodnotami parametrů  $U_b=800V$ ;  $U_{cd}=700V$ ;  $T_{cd}=2000ms$ ;  $H_2=2\text{ mPa}$ ; horní tryska. Pokusili jsme se tyto hodnoty přesně zopakovat, ale došlo pouze k malým anomáliím. Poté jsme zvyšovali zpoždění, ale anomálií jsme nedosáhli.

Následně jsme měřili závislost teploty na dalších parametrech.

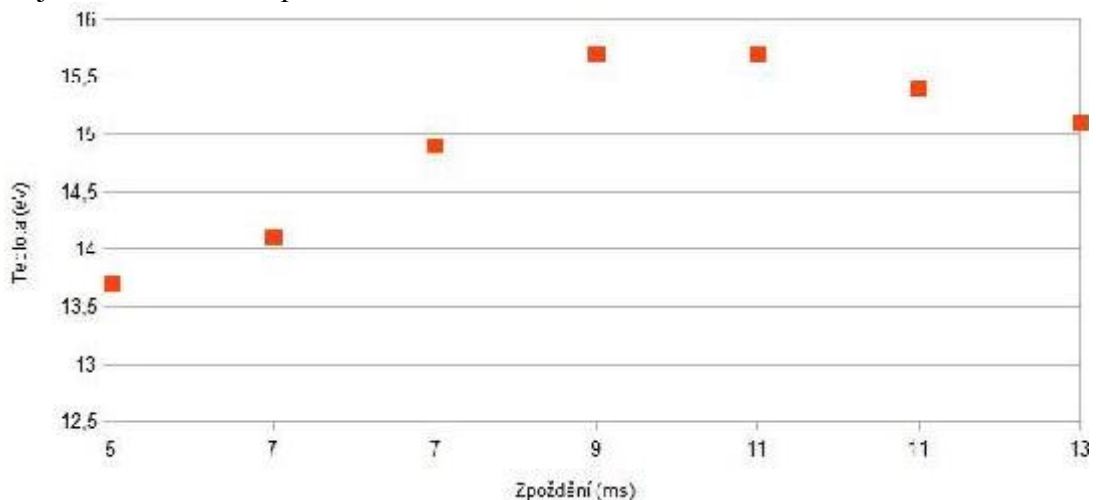
#### 1) Na prostředcích umožňujících počáteční ionizaci plynu

Kosmické záření	Plazma se nevytvořilo
Horní tryska	10,2eV
Spodní tryska	10,2eV
Stará spodní tryska	10,3eV
Microwave	10,3eV
Horní tryska +MW	10,6eV
Spodní tryska +MW	10,4eV
Stará spodní tryska +MW	10,5eV

Z těchto výsledků je patrné, že teplota je zdroji počáteční ionizace ovlivněna jen minimálně.

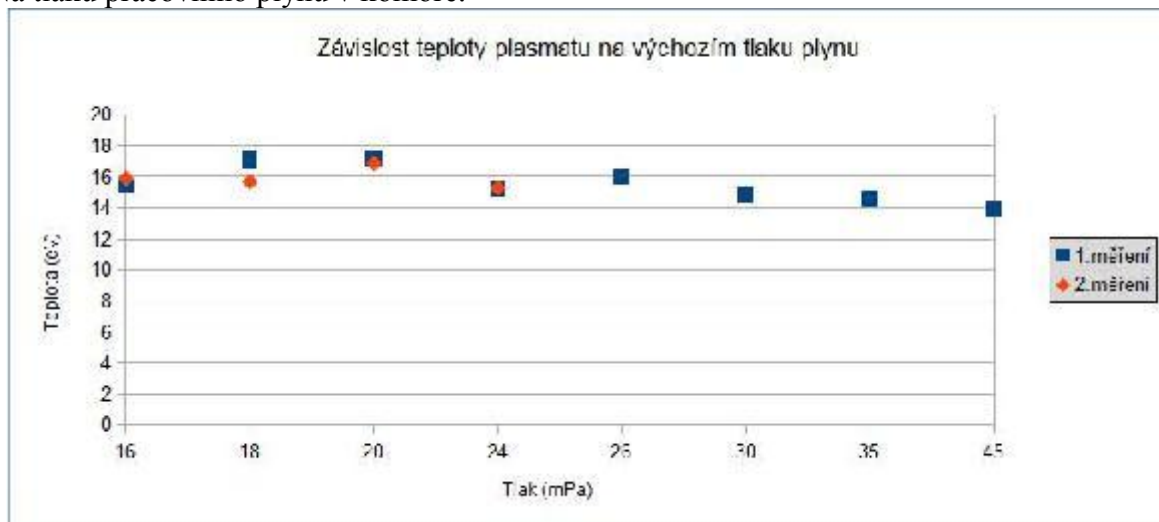
#### 2) Na zpoždění mezi aktivací urychlovacího a udržovacího pole.

Zkoušeli jsme závislost na zpoždění mezi 5000ms a 13000ms.



Je vidět, že minimálně do 10ms teplota roste, s vyšším zpožděním ale začne klesat.

#### 3) Na tlaku pracovního plynu v komoře.



Uvádíme data z obou sérií. Jak můžeme vidět, při nižším UBt má tlak vyšší vliv na teplotu nežli při vyšším.

Jak vidíme z obou grafů, nejvyšších teplot dosahujeme kolem 20mPa. Také vidíme, že tlak vodíku na teplotu účinek má, i když poměrně malý.

## 4. Diskuse

Domníváme se, že vytvořit anomálie se nám nepodařilo z toho důvodu, že v době mezi měřeními, u nichž se anomálie vyskytly a našimi měřeními byly do tokamaku vloženy Machovy sondy, které pravděpodobně omezily prostor, ve kterém se plazma v komoře může pohybovat. Z naměřených dat usuzujeme, že pokud je zpoždění aktivace urychlovacího elektrického pole příliš krátké, magnetické udržovací pole ještě není dostatečně silné na udržení plazmatu ve středu, a proto se plazma brzy ochladí (a tím pádem zanikne) dotekem o stěnu. Pokud je naopak příliš velké, může udržovací pole zeslábnout před začátkem urychlování. Z výsledků, které jsme měli možnost vidět, usuzujeme, že napětí samo o sobě teplotu při zachování hodnot ostatních parametrů neovlivní, teplota závisí na kombinaci napětí s ostatními parametry – čím vyšší je napětí, tím prudší je rychlost růstu teploty v závislosti na zpoždění. Z toho vyplývá, že vlastnosti plazmatu záleží na více parametrech a jejich vzájemném poměru. Je tedy obtížné určit nějaký obecný algoritmus pro výpočet těchto vlastností. Maxima dosahuje teplota při délce zpoždění 10 ms pravděpodobně kvůli tomu, že právě v tuto chvíli dosahuje magnetické pole nejvyšší intenzity.

## 5. Shrnutí

Přestože se nám nepodařilo získat odpověď na naši první otázku, dokázali jsme poměrně rozsáhle naměřit a popsat problematiku teploty plazmatu v tokamaku. Dokázali jsme odpovědět na otázku, které faktory a jak intenzivně teplotu plazmatu ovlivňují, a u jakých hodnot bývá teplota nejvyšší.

Pomocí dalších sérií měření založených na podobném principu, zabývajících se ostatními vlastnostmi plazmatu bychom mohli lépe určit závislost těchto vlastností na jednotlivých parametrech a získat tak díky tomuto měření ucelený obraz o chování plazmatu v tokamaku a získat tak drobnou nápovědu k hledání algoritmu, který by nám jej předpověděl.

## Poděkování

Chtěli bychom poděkovat zejména panu Svobodovi, za organizaci Týdne Vědy a zpřístupnění tokamaku Golem, našemu supervizorovi, Ondřeji Groverovi, za zasvěcení do problematiky tokamaku a následnou pomoc při provádění experimentů.

## Reference:

Databáze výbojů tokamaku GOLEM : [golem.fjfi.cvut.cz/shots](http://golem.fjfi.cvut.cz/shots)