

# Základy diagnostiky vysokoteplotního plazmatu na tokamaku GOLEM

D. Káčerek<sup>1</sup>, F. Krafčík<sup>2</sup>, D. Theiss<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Gymnázium, Plzeň, Mikulášské nám. 23, kacerekdan@gmail.com

<sup>2</sup>Gymnázium Terézie Vansovej, filipkrafc@gmail.com

<sup>3</sup>Gymnázium Cheb, datheis@gymcheb.cz

## Abstrakt

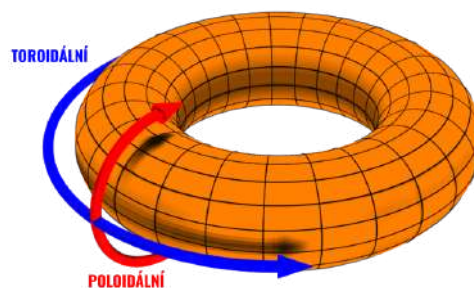
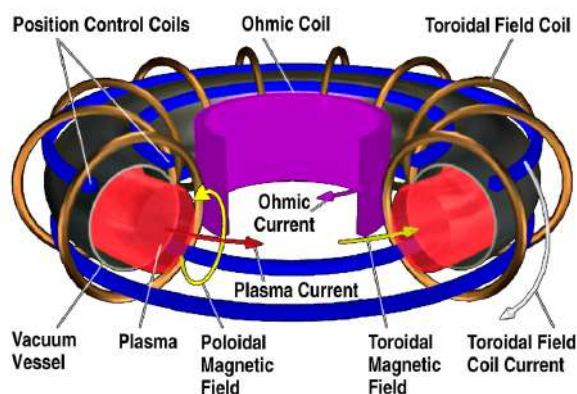
V tomto projektu se zabýváme základní diagnostikou tokamaku GOLEM. Pomocí různých zařízení měříme jeho parametry, jejichž vztahy jsou klíčové pro pokročilejší analýzu chování tokamaku. Z naměřených hodnot tak odvozujeme důležité vlastnosti průběhu udržení energie v něm, což je jeden z podstatných faktorů při produkci čisté a bezpečné fúzní energie.

## 1 Úvod

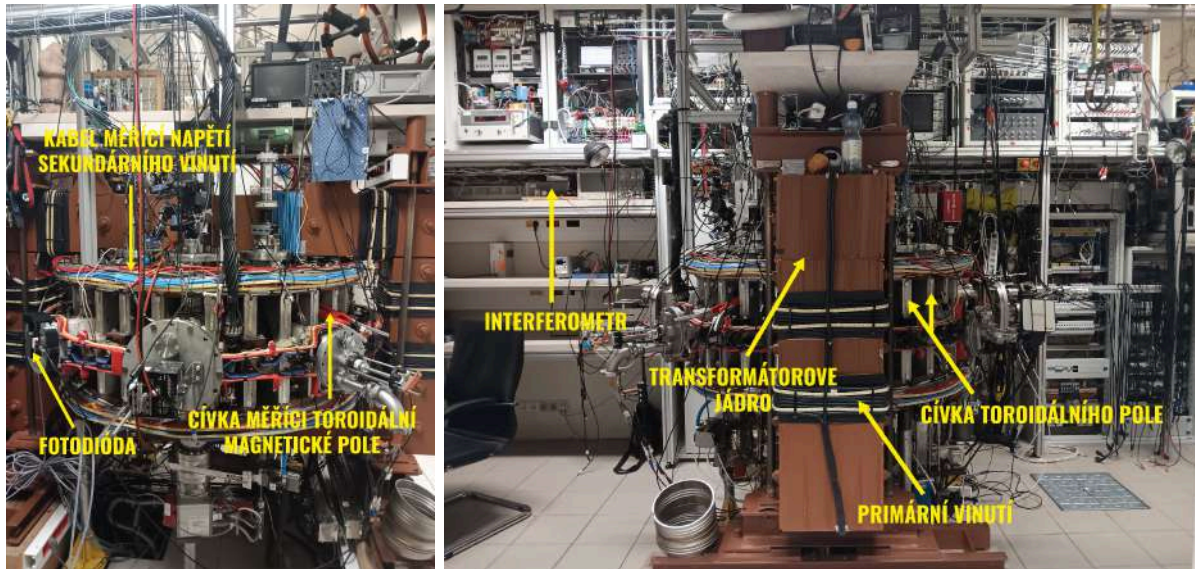
Elektrina je dnes páteří naší společnosti. Život bez ní je téměř nepředstavitelný. Její spotřeba denně exponenciálně roste, což má také významný dopad na naše životní prostředí. Neefektivní uhelné elektrárny vypouštějí obrovské množství emisních plynů a jaderné elektrárny zase produkují nadměrné množství radioaktivního materiálu. Nevyčerpatelné přírodní zdroje nejsou skutečně nevyčerpatelné, jak se jim obvykle říká kvůli jejich dosud neznámé hranici. Tímto problémem se vědci zabývají již mnoho let. První naděje na jeho řešení se objevily v druhé polovině 20. století, kdy několik světových mocností investovalo mnoho času a peněz do vývoje technologie jaderné fúze. Dnes je dosažení účinné jaderné fúze stále jedním z největších snů všech jaderných fyziků na celém světě.

## 2 Jak funguje tokamak?

Tokamak je přístroj, o kterém dnes předpokládáme, že by mohl v budoucnu sloužit jako fúzní reaktor v elektrárnách.

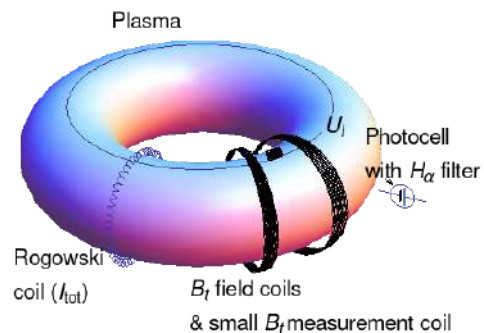


Jádrem tokamaku je torus (vakuová komora), ve kterém je vytvořeno vysoké vakuum (kolem 0,5 mPa). Torus je navlečený na jádro transformátoru, jehož sekundární cívkou je samotná vakuová komora (a případné plazma v ní). Tím se v komoře vytváří elektrické pole, které urychluje nabitě částice v komoře. Uvnitř komory vždy jsou nějaké nabitě částice plynu (hlavně vlivem kosmického záření). Ty jsou elektrickým polem urychleny a jejich srážkami s dalšími částicemi může dojít k řetězové ionizaci a vzniku plazmatu. Okolo vakuové komory jsou instalovány cívky (poloidální cívky), které generují uvnitř nádoby magnetické (toroidální) pole, kolem kterého plazma “obíhá”, což ho udržuje uvnitř komory.



### 3 Principy diagnostiky plazmatu uvnitř tokamaku

Plazma, které se uvnitř tokamaku během jeho provozu tvoří, je velmi horké, a proto je obtížné ho přímo měřit. Existují ale způsoby, jak lze jeho vlastnosti stanovit nepřímou. Hodnoty, které nás nejvíce zajímají, jsou patrně teplota vzniklého plazmatu a doba udržení energie uvnitř komory. Ty lze vypočítat, známe-li napětí na plazmatu, proud jím procházející a elektronovou hustotu uvnitř něj.



Napětí na plazmatu lze zjistit měřením napětí na jediném závitě umístěném na tokamaku v toroidálním směru osciloskopem. Obdobným způsobem lze zjistit intenzitu toroidálního magnetického pole pomocí měření napětí na malé cívce umístěné na komoře v poloidálním směru a proud procházející komoru i plazmatem pomocí tzv. Rogowské cívky. Z těchto dvou veličin se pak vypočte plazmatický proud. Poslední veličinu, střední elektronovou hustotu plazmatu, měří interferometr, zařízení postavené na principu interference (skládání) elektromagnetického vlnění.

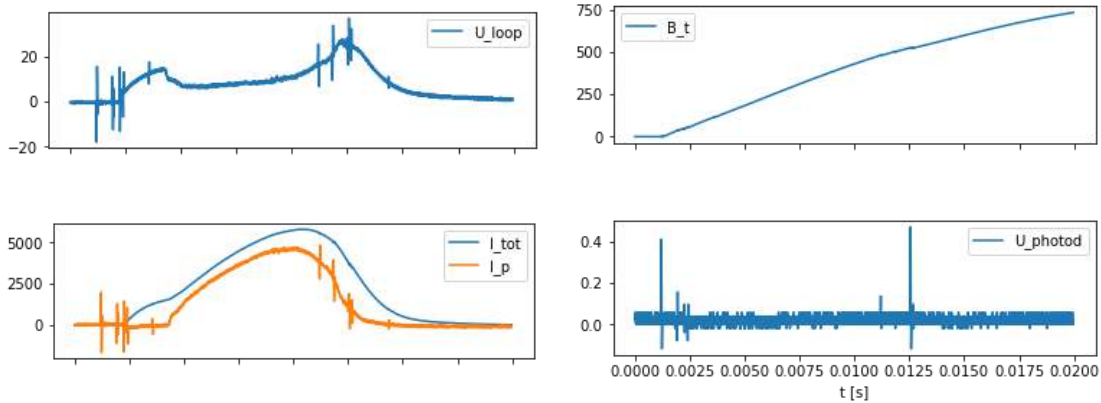
$$U_l = R_p I_p.$$

$$T_e = 0.9 \cdot R_p^{-2/3}$$

$$\tau_E = \frac{en_e T_e V_p}{3U_l I_p}.$$

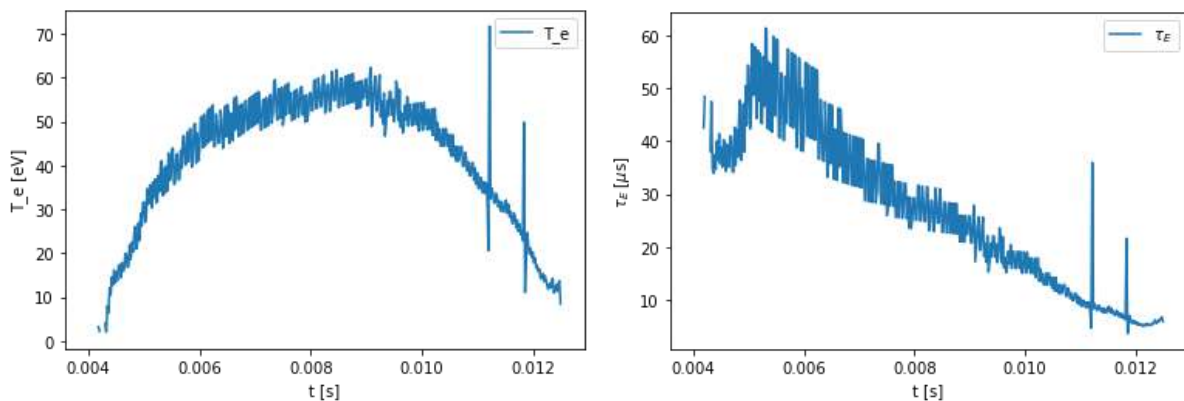
## 4 Měření

S využitím osciloskopu jsme měřili průběh napětí na plazmatu, změny intenzity toroidálního a poloidálního magnetického pole a napětí na fotodiodě umístěné u pozorovacího otvoru do komory tokamaku. Integrováním změn magnetického pole v toroidálním a poloidálním směru jsme dostali hodnoty intenzity toroidálního magnetického pole a proudu v komoře a plazmatu, respektive. Fotodiodu bohužel někdo shodil. Následují grafy získaných měření.



## 5 Výsledky

Na závěr miniprojektu jsme napsali program pro výpočet střední elektronové teploty plazmatu a doby udržení energie v komoře ze změřených veličin. Následují grafy těchto veličin pro jeden z výstřelů (#45338).



## 6 Závěr

V rámci našeho bádání jsme byli úspěšně zapojili diagnostické nástroje na tokamaku a získali hodnoty veličin vědeckého zájmu.

Fúzní energie je technologií stále ve vývoji, a přestože jsou v této oblasti další a další pokroky, bude následovat ještě několik let výzkumu a vývoje, než bude tento druh výroby elektrické energie výhodný a komerčně výnosný.

## Poděkování

Tímto bychom chtěli srdečně poděkovat Ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc., bez kterého by Týden vědy na Jaderce nebyl možný, byl během miniprojektu hlavním dirigentem správného fungování tokamaku a který miniprojekt uvedl, a Ing. Marku Tunklovi, který byl garantem miniprojektu, zodpovídal naše dotazy jak nejlépe mohl a pomáhal nám miniprojekt realizovat.

## Reference

[1] <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/Universities/CTU.cz/PRA2/index>

[2] Výklad Ing. Marka Tunkla a Ing. Vojtěcha Svobody, CSc.

Obrázky:

- [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Toroidal\\_coord.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Toroidal_coord.png)
- <https://www6.lehigh.edu/~eus204/publications/conferences/acc20a.pdf>
- <http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/0/Diagnostics/BasicDiagnostics/expsetup.svg>