



**Masarykovo gymnázium,  
Střední zdravotnická škola  
a Vyšší odborná škola zdravotnická Vsetín**

Miroslav Pecár  
4.B

**Tokamak GOLEM**  
aneb jak dosáhnout nejdelšího plazmového výboje

Seminární práce

Vedoucí práce: Mgr. Vladislav Válek  
2014

Prohlašuji, že jsem seminární práci vypracoval samostatně s využitím uvedených pramenů a literatury.

Ve Vsetíně dne 15. 11. 2014.

.....  
(podpis autora práce)

**Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval panu asistentovi Ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc. za odborné vedení a možnost přístupu k technice, která mi umožnila vypracovat tuto seminární práci. Také bych rád poděkoval panu Mgr. Vladislavu Válkovi za odborné vedení při vypracování této seminární práce.

## **Anotace**

### **Česká verze:**

Práce pojednává o plazmatu jako prostředku k dosažení termojaderné fúze. Teoretická část práce se zabývá popisem zařízení pro vytvoření plazmatu. Praktická část se zabývá měřením veličin plazmatu na zařízení GOLEM umístěném na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

### **Anglická verze:**

The work deals with the plasma as a means to achieve thermonuclear fusion. The theoretical part of the thesis describes the device to produce the plasma. The practical part deals with the measurement of plasma parameters on the device GOLEM located at the Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering Czech Technical University in Prague.

# Obsah

Úvod.....	5
I TEORETICKÁ ČÁST .....	6
1 Co je tokamak?.....	6
2 Úvod do termojaderné fúze .....	6
3 Princip tokamaku.....	7
4 Ohřev plazmatu .....	8
4.1 Proudový ohřev .....	8
4.2 Mikrovlnný ohřev .....	8
4.3 Ohřev neutrálními svazky .....	9
5 Současný stav fúzního výzkumu .....	9
6 Tokamaky v Česku.....	10
6.1 Compass .....	10
6.2 GOLEM.....	11
7 Parametry tokamaku GOLEM .....	11
8 Porovnání vybraných tokamaků.....	12
II. PRAKTICKÁ ČÁST .....	13
Úvod.....	13
1 Postup procesu vytvoření výboje:.....	13
2 Postup měření: .....	13
Závěr.....	18
Zdroje.....	19
Citace obrázků: .....	19
Tabulky a grafy: .....	20
Přílohy .....	25

## Úvod

Lidstvo potřebuje energii. Používáme ji všude a každodenně. Bez energie se neobejdou počítače, televize, mobily, dopravní prostředky, potřebujeme ji ke svícení, k ohřátí jakékoli látky a jídla. A myslím si, že jí budeme potřebovat čím dál víc. Centrem zájmu vědců je proto zvládnutí řízené termojaderné fúze jako zdroje čisté energie na zařízeních typu tokamak. Já jsem měl možnost pracovat s tokamakem Golem v Praze, kde jsem se naučil, jak se ovládá, jak se získávají data a jaké závěry mohu z naměřených dat udělat. Cílem mé práce bylo nalézt co nejlepší podmínky k vytvoření co možná nejdelšího výboje plazmatu, který mi tokamak umožní.

# I TEORETICKÁ ČÁST

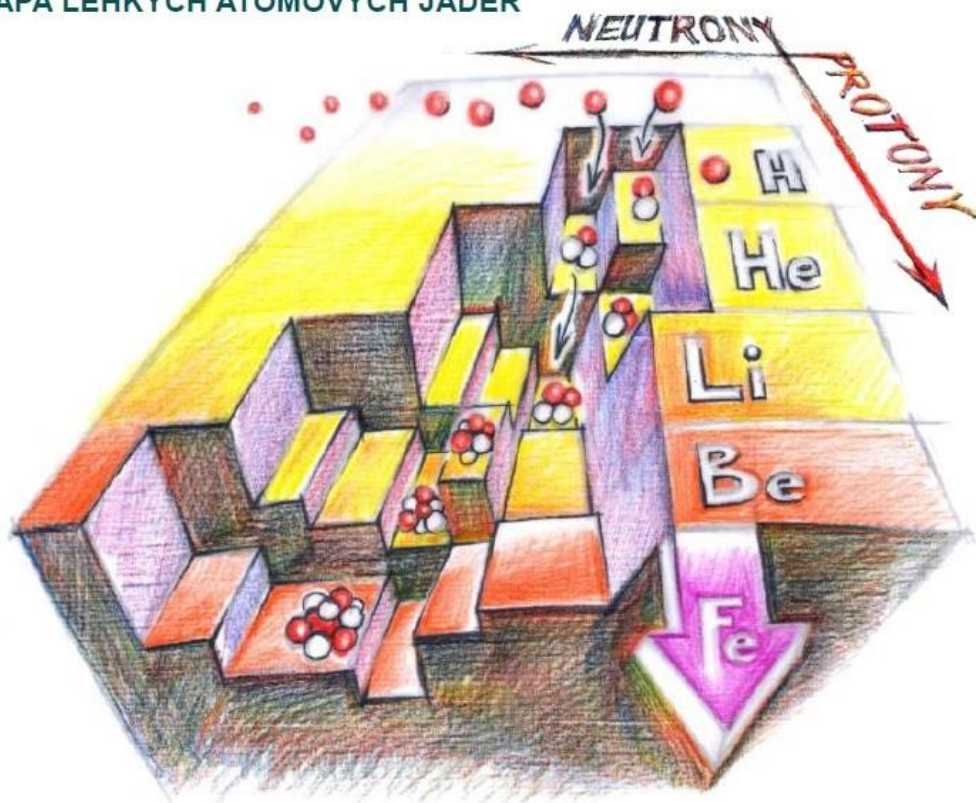
## 1 Co je tokamak?

Tokamak je zařízení vytvářející toroidální magnetické pole používané jako magnetická nádoba pro uchování vysokoteplotního plazmatu. Slovo pochází z ruštiny, kde Токамак je zkratkou popisu "тороидальная камера с магнитными катушками" (toroidní komora v magnetických cívkách). Myšlenka tokamaku se zrodila v 50. letech v hlavách Igora Jevgeněviče Tammema a Andreje Sacharova. Dnes se tokamaky považují za jednu z nejnadějnějších cest k realizaci kontrované jaderné fúze.

## 2 Úvod do termojaderné fúze

Termojaderná fúze je proces, při kterém se slučují lehká jádra, přičemž vznikají jádra těžší a uvolňuje se energie. K jejímu dosažení je nutné, aby se reagující jádra přiblížila vzájemně natolik, že převládne jaderná síla přitažlivá nad elektrickou silou odpudivou. Aby částice překonaly odpudivou Coulombickou bariéru (tedy aby se dostaly dostatečně blízko k sobě a převládly přitažlivé jaderné síly), musí se vzájemně srážet s velkou rychlostí. Nejefektivnějším způsobem jak toho dosáhnout, je ohřátí paliva na velmi vysokou teplotu. V pozemských podmínkách je z hlediska energetického využití nejvhodnější reakce deuteria a tritia (těžký a supertěžký izotop vodíku). Při této reakci vzniká helium a neutron. Výše zmíněná reakce je nejvhodnější zejména z důvodu nejnižší potřebné "zápalné" teploty ze všech fúzních reakcí. Jedná se o teplotu "pouze" 100 až 200 milionů K. První podmínkou zvládnutí řízené termojaderné fúze je dosažení této teploty. Jakýkoliv materiál je při takto vysoké teplotě ve stavu plazmatu. Z toho vyplývá druhá podmínka pro úspěšné zvládnutí řízené termojaderné fúze - zabránit dotyku horkého plazmatu na stěny komory.

## MAPA LEHKÝCH ATOMOVÝCH JADER

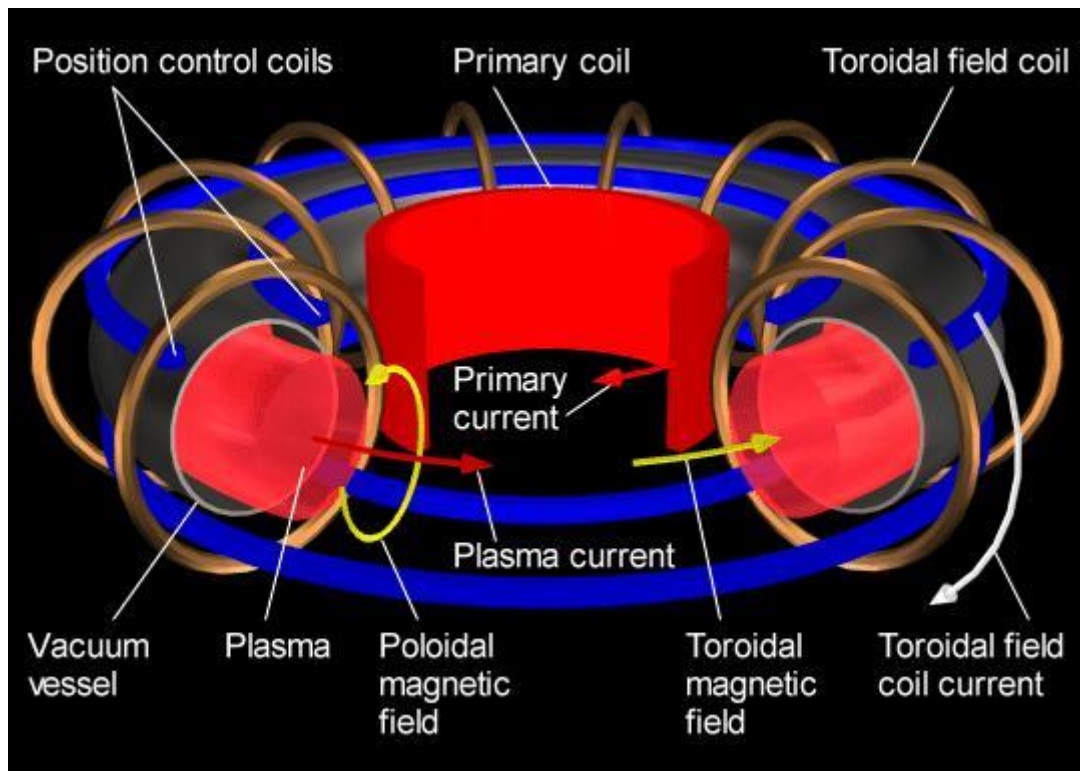


Obr. č. 1: Mapa lehkých atomových jader

### 3 Princip tokamaku

Tokamak je zařízení, které zabraňuje dotyku plazmatu a stěny komory pomocí magnetického pole. Jeho základní částí je vakuová reakční komora ve tvaru prstence, která je obklopena cívkami toroidálního magnetického pole (na obrázku č. 2 - modře). Tyto cívky vytvoří v komoře velmi silné magnetické pole (několik T), které udržuje plazma. Prstencová komora tokamaku je sekundárním závitem transformátoru, který v komoře generuje proud v toroidálním směru (na velkých zařízeních až několik MA). Tento proud vytváří kolem sebe poloidální magnetické pole. Pokud složíme magnetické pole toroidální a poloidální, dostáváme výslednou konfiguraci magnetického pole ve tvaru šroubovice (spodní schéma na obrázku schéma tokamaku). Siločáry takto vytvářeného magnetického pole se do sebe uzavírají v reakční komoře. Připomeňme, že se elektricky nabitá částice pohybuje podél magnetické siločáry. Právě proto by měly částice plazmatu zůstat v komoře izolované od stěny. Různé nestability a difúze částic napříč magnetickým polem výrazným způsobem zhoršují udržení plazmatu.





**Obr. č. 2:** Jak funguje tokamak

## 4 Ohřev plazmatu

Plazma v tokamaku je ohříváno třemi základními způsoby - proudovým ohřevem, mikrovlnami a svazky neutrálních částic.

### 4.1 Proudový ohřev

Vzhledem k tomu, že má plazma nenulový elektrický odpor, je ohříváno procházejícím elektrickým proudem. Protože elektrický odpor plazmatu s rostoucí teplotou klesá a vzhledem k existenci fyzikálního limitu omezujícího maximální možný proud plazmatem, lze tímto způsobem dosáhnout teplot maximálně v řádu desítek miliónů K. Z tohoto důvodu je třeba použít ještě další metody ohřevu plazmatu.

### 4.2 Mikrovlnný ohřev

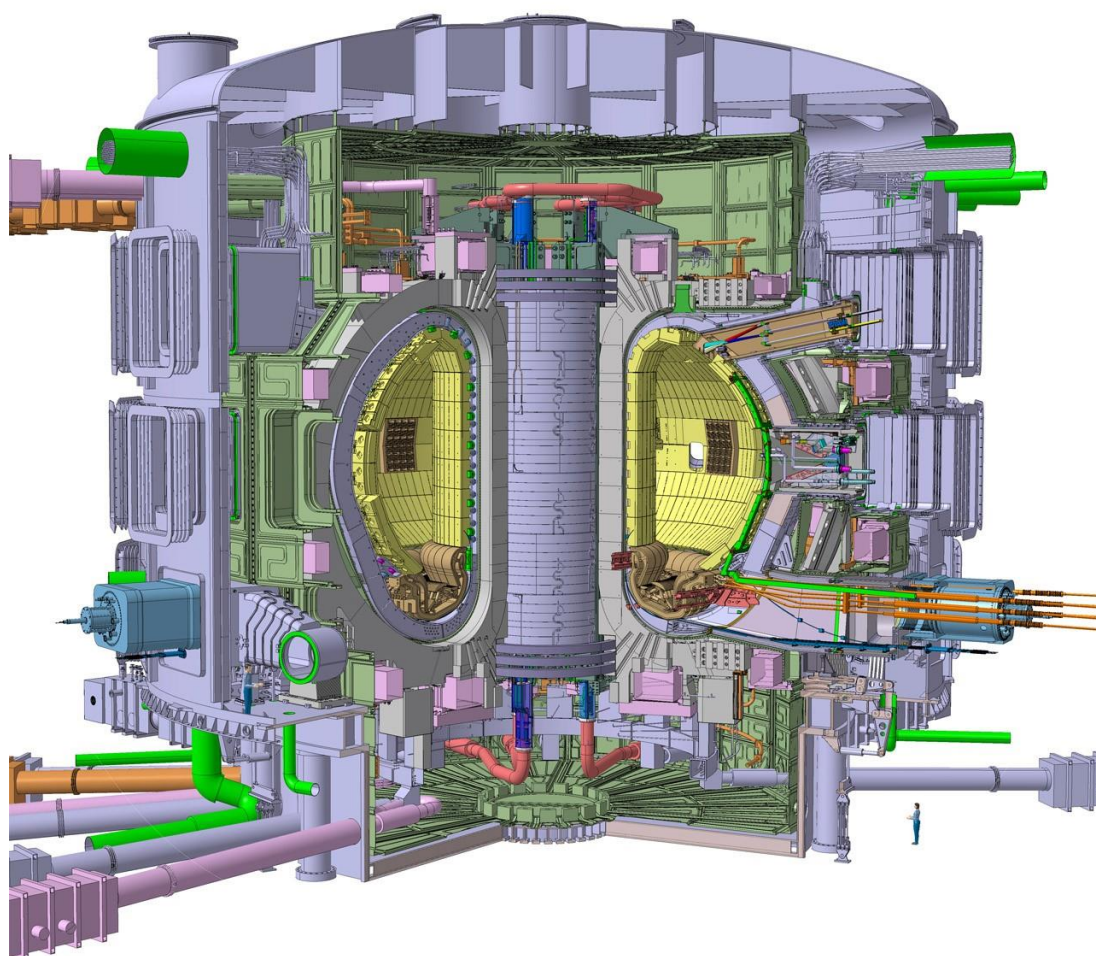
Tento druh ohřevu spočívá v tom, že jsou do plazmatu vysílány mikrovlny o vhodné vlnové délce. Ty s plazmatem interagují a předávají mu svou energii, čímž ho ohřívají.

### 4.3 Ohřev neutrálními svazky

Plazma je možné ohřívat také vstřikem urychlených neutrálních částic. Vzhledem k tomu, že neexistuje efektivní způsob urychlení neutrálních částic na požadovanou energii (až 1 MeV), musí být částice urychlovány jako nabitě a před vletem do tokamaku musí být zpětně neutralizovány. Neutrální částice neinteragují s magnetickým polem tokamaku, a proto se snadno dostanou až do středu komory tokamaku, kde jsou v důsledku srážek s částicemi plazmatu opět ionizovány, začnou se tedy pohybovat podél magnetické siločáry a svou energii předávají srážkami částicím plazmatu.

## 5 Současný stav fúzního výzkumu

V 90. letech začaly plně pracovat velká zařízení, tedy evropský (britský) tokamak JET a americký tokamak TFTR. Tyto tokamaky dokáží produkovat značné množství termojaderné energie. JET produkoval fúzní výkon 16 MW po dobu 1 s. To však bylo stále málo na to, aby vyráběly elektřinu. Navíc u obou tokamaků byla energie potřebná na vytvoření magnetického pole a ohřev plazmatu mnohem větší než vyprodukovaná fúzní energie. Nicméně i tak je zřejmé, že z fyzikálního hlediska je možné postavit fúzní elektrárnu právě na principu tokamaku. Otázkou zůstává, zda je lidstvo již na dostatečné technologické úrovni k tomu, aby tuto elektrárnu dokázalo spolehlivě provozovat. Je potřeba vyvinout nové materiály pro vnitřní stěnu vakuové komory, která se bude v průběhu výboje občas dostávat do kontaktu s horkým plazmatem a bude také silně ozářena fúzními neutrony. V reaktoru budou muset být cívky vytvářející supravodivé magnetické pole. Proto je nutné vyvinout supravodivé systémy. Demonstrátorem, který by měl skloubit všechny technologické a fyzikální požadavky na budoucí elektrárnu, bude právě budovaný tokamak ITER. Ten by měl být uveden do provozu v roce 2020. Pokud bude úspěšný, měla by být v roce 2040 až 2050 postavena první fúzní elektrárna.



**Obr. č. 3:** Model Evropského tokamaku ITER

## 6 Tokamaky v Česku

Fúzní výzkum probíhá v rámci široké mezinárodní spolupráce, na níž má svůj podíl i Česká republika jako člen organizace EUROATOM. V České republice leží těžiště výzkumu fúze na Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, který vlastní nejdůležitější experimentální zařízení pro výzkum fúze v ČR. Dále se na výzkumu podílí vysoké školy, zejména Matematicko-fyzikální fakulta UK a Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, kde bylo v roce 2006 otevřeno zaměření Fyzika a technika termojaderné fúze.

### 6.1 Compass

1989 - uveden do provozu v Culhamu v Británii jako zdroj dat k tokamaku ITER  
 2004 - nabídnut Ústavu fyziky plazmatu AV ČR  
 2008 - na konci tohoto roku zaznamenal první plazma  
 Compass má podobnou konfiguraci plazmatu, jako bude mít ITER.  
 Díky vlastnictví tohoto zařízení má ČR jedno z předních evropských pracovišť v oblasti řízené termojaderné fúze.

## 6.2 GOLEM

1959 - postaven v SSSR, pak darován Československu

1984 - došlo k jeho kompletní přestavbě a byl uveden do provozu na Ústavu fyziky plazmatu pod názvem Castor

2006 - činnost v UFP ukončena a CASTOR byl darován a nainstalován FJFI ČVUT

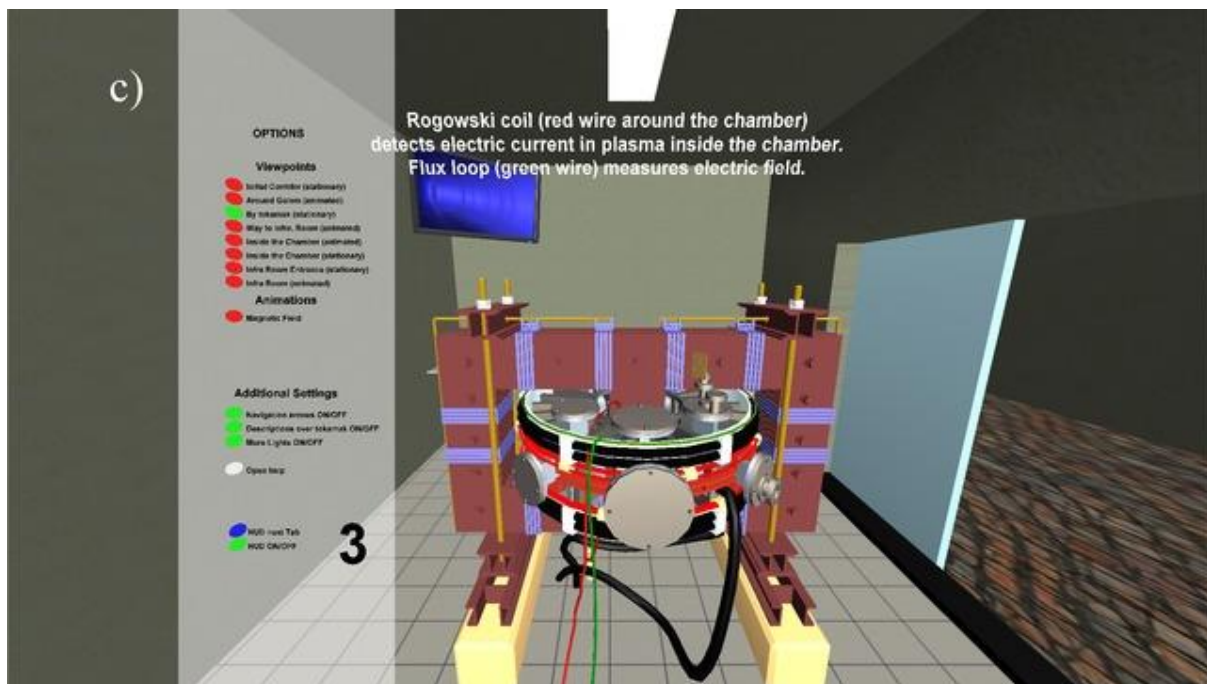
2009 - pod názvem GOLEM zaznamenal první plazma a jeho hlavním úkolem je zajištění výukové a vzdělávací činnosti.

Je umístěn na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze a jedná se o jeden z nejstarších a nejmenších z tokamaků

## 7 Parametry tokamaku GOLEM

Název tokamaku:	GOLEM
Typ:	Kruhový prstencový tokamak
Počet komor:	2
Prstencové magnetické pole:	< 0.8T
Proud v plazmatu:	< 8 kA
Maximální délka výboje:	13 ms
Centrální elektronová teplota:	80 eV
Rozmezí pracovního tlaku:	10 - 200 mPa
Pracovní plyn:	H <sub>2</sub>

Všechny parametry kromě maximální délky výboje jsem převzal, přičemž v této práci se pokusím replikovat 13 milisekund plazmatu v komoře tokamaku



Obr. č. 4: Tokamak GOLEM - 3D model

## 8 Porovnání vybraných tokamaků

Níže v tabulce je porovnání technických parametrů českých tokamaků COMPASS, CASTOR (GOLEM) a zahraničních tokamaků MAST, JET a ITER.

Parametr	CASTOR	COMPASS-D	MAST	JET	ITER
Hlavní poloměr Toroidu	0,4 m	0,56 m	0,85 m	2,96 m	6,2 m
Vedlejší poloměr komory	0,085 m	0,23 až 0,38 m	0,65 m	1,25 m	2 m
Objem plazmatu	0,08 m <sup>3</sup>	0,5 m <sup>3</sup>	7 m <sup>3</sup>	50 m <sup>3</sup>	873 m <sup>3</sup>
Proud	25 kA	400 kA	2 MA	5 MA	15 MA
Doba udržení plazmatu	50 ms	2 s	5 s	20 s	400 s
Magnetické pole	1,5 T	2,1 T	0,6 T	3,5 T	5,3 T

Tokamaky CASTOR a COMPASS jsou umístěny v České Republice.

Tokamaky MAST a JET jsou ve Velké Británii.

Tokamak ITER se staví ve Francii poblíž města Cadarache. Má začít fungovat pravděpodobně v roce 2020, plného výkonu by měl dosáhnout v roce 2027.

## II. PRAKTICKÁ ČÁST

### Úvod

Poprvé jsem se dověděl o tokamaku GOLEM během semináře na Hvězdárně ve Valašském Meziříčí, kde jsme tokamak GOLEM řídili přes internet dálkově. V této práci jsem taktéž dělal část měření fyzicky u tokamaku a část dálkově po internetu.

### 1 Postup procesu vytvoření výboje:

1. K experimentu je potřeba nejprve vypumpovat plyn a tlak, který tam byl z předchozího pokusu.
2. Zapneme méně výkonnou rotační vývěvu, která vypumpuje vzduch přibližně na 50 mPa.
3. V tomto kroku je potřeba naplnit komoru pracovním plynem tak, že zapneme druhou více výkonnou rotační vývěvu, která vypumpuje zbytek vzduchu asi na 10-20 mPa a následně otevřeme postupně ventily od pracovního plynu a vženeme molekuly vodíku do komory.
4. V tuto chvíli už máme připraven tokamak k nabití cívek a zažehnutí plazmatu.
5. Následně je potřeba na internetovém interface portálu zadat hodnoty, které chceme měřit (viz obr. č. 7 - Webový Interface).
6. Pokud jsme to udělali, už nám stačí jen jméno a heslo do centrálního spouštěče celého procesu tzv. střílení.
7. Následně nastavíme kapacitu kondenzátorů na toroidálním magnetickém poli  $U_b$ , dále na kolik mPa se vypustí komora, na jaké napětí se nabijí kondenzátory a pak jaký rozdíl bude mezi spuštěním magnetického pole a napětí na kondenzátorech.
8. Dáme výboj plazmatu do řady a spustí se sekvence.
9. V příloženém CD je video jak probíhá tzv. Výbojová sekvence.

### 2 Postup měření:

Vlastnosti plazmatu lze měřit pomocí několika veličin. Od těchto veličin pak závisí, jak dlouhý je výboj plazmatu. Vzhledem k tomu, že jsem nevěděl, která kombinace způsobí nejdelší výboj, postupoval jsem následovně: vybral jsem si jednu veličinu, kterou budu měřit a ostatní, které jsem neměřil, jsem dal do nějaké polohy a v celém měření jedné série jsem je nechal konstantní. Hodnotu, která způsobila nejdelší životnost plazmatu, jsem použil pro další měření, ve kterém jsem zase vybral nějakou jinou hodnotu, pro kterou jsem měřil zase celou sérii a hledal jsem nejdelší životnost plazmatu. Pak jsem znova vybral největší hodnotu a tak dokola, až jsem našel maximální délku plazmatického výboje. Zápis z měření je v části „Tabulky a grafy“.



Teplota plazmatu v komoře je 100tis. Kelvinů. Jenže abychom mohli vyrábět elektřinu, tak jsou potřeba teploty jako ve středu Slunce, tj. cca 15mil. Kelvinů. Díky tomu, že výboj proběhne za tisíce sekund, není potřeba komoru chladit.

Relativní odchylka při měření je odhadem asi 0,2 – 0,4ms, protože záleží, jak moc se nabijí kondenzátory.

## Sledovací systém

Proces práce tokamaku můžeme sledovat na 3 různých kamerách. Jedna snímá celý tokamak, druhá žárovku zbavenou skla, která zažehává nabitě plazma a třetí vysokorychlostní kamera, která zachycuje samotný výboj plazmatu.



**Obr. č. 5:** Venkovní kamera tokamaku a kamera namířená na žárovku (v pořadí) a kontrolní cmd terminál (dole)



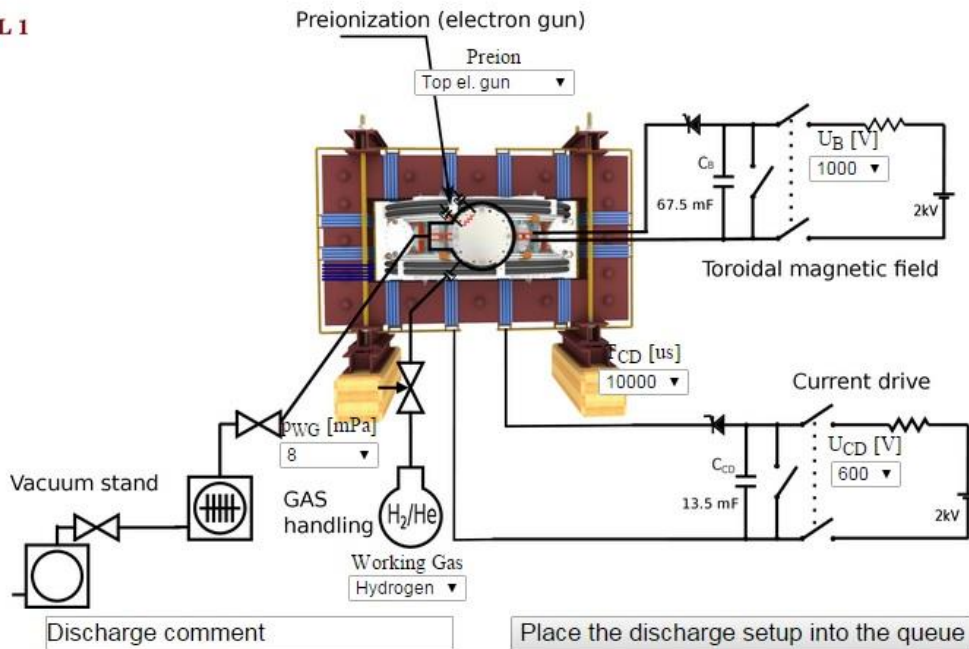
**Obr. č. 6:** Vysokorychlostní kamera připevněná k tokamaku (vzorek plazmatu ze střely č. 17183)

## Tokamak Golem **\*\*REMOTE\*\*** for Miroslav Pecar (Level I)

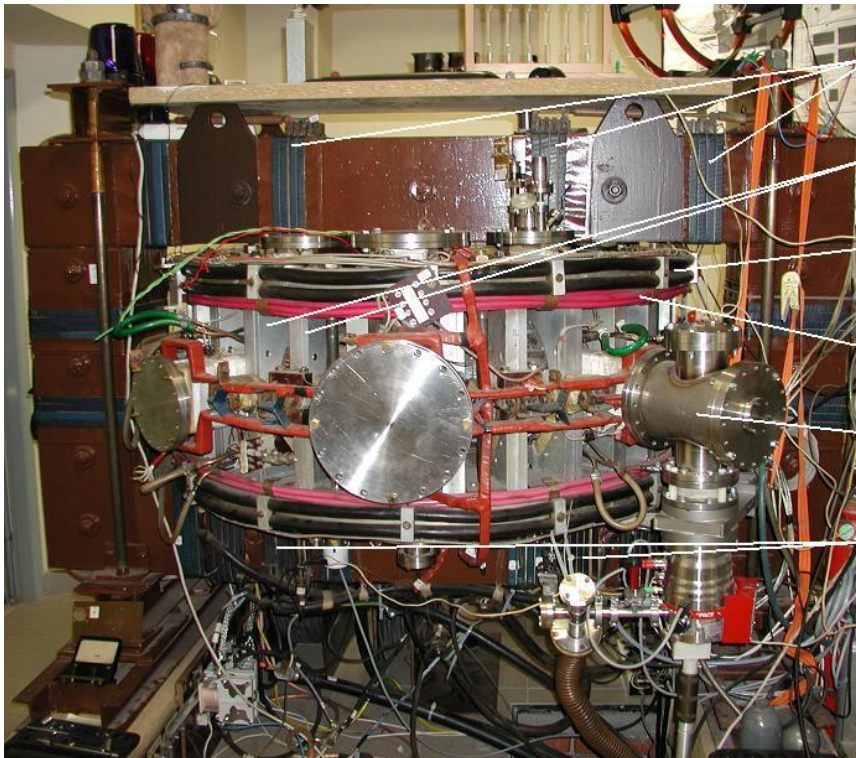
The smallest & oldest operational tokamak with the biggest control room in the world



**LEVEL 1**



**Obr. č. 7:** Webový interface



- Coils of Toroidal Electric Field Generation (Primary Circuit)
- Coils of Toroidal Magnetic Field
- Coil of Vertical Stabilization Field
- Coil of Horizontal Stabilization Field
- Vacuum System
- Coils of Plasma Breakdown Electric Field

**Obr. č. 8:** Pražský tokamak GOLEM s popisem zevnějšku



## Výsledná střela s nejdelším časem přežití plazmatu

### Tokamak GOLEM - Shot Database - 18119

**Date:** 2014-12-18 - 17:16:43  
**Session:** Training/2014/  
**Comment:** MiroslavPecar - pWG scan - 2mPa

#### Basic parameters: (compare)

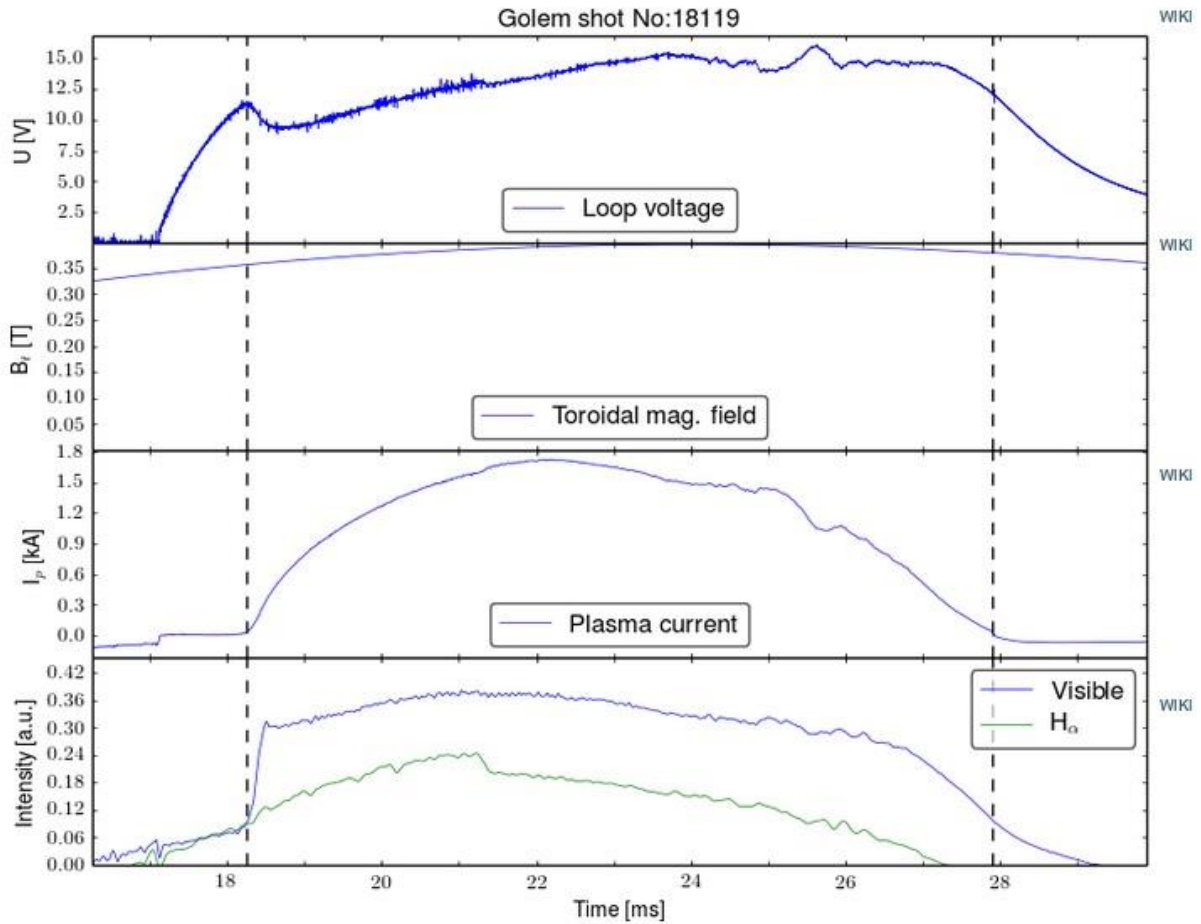
- Gas pressure  $p_{ch}$ : 13.86->15.43 mPa (request: 2 mPa) WIKI
- Working gas: H
- Preionization: Upper el. gun
- Chamber temperature: 40.00 C
- $C_{B_1}$  capacitors charged to: 1000 V, triggered 5.0 ms WIKI
- $C_{BD}$  capacitors charged to: 0 V, triggered 5.0 ms WIKI
- $C_{CD}$  capacitors charged to: 600 V, triggered 17.0 ms WIKI
- $C_{ST}$  capacitors charged to: 0 V, triggered 5.0 ms WIKI
- Max saturation of iron core transformer: 80% WIKI
- Probability of breakdown: 98% WIKI
- Time since session beginning: 1:43:38 h

#### Plasma parameters:

- Plasma life time 9.7 [ms] (from 18.2 to 27.9)
- Mean toroidal magnetic field  $B_t$ : 0.38 T WIKI
- Mean plasma current: 1.39 kA WIKI
- Mean Uloop: 14.02 V WIKI
- Break down voltage: 11.3 V WIKI
- Ohmic heating power: 19.55 kW
- Q edge: 12.4 WIKI
- Electron temperature: 12.3 eV WIKI
- Line electron density: N/A [ $10^{17} \cdot m^{-2}$ ] WIKI

Obrázek výsledné střely: vidíme různé parametry, které jsem zadával podle postupu, který je napsán v kapitole tabulky a grafy. Vidíme hlavně dva sloupce dat, které nám ukazují základní parametry dané střely a pak parametry vzniklého plazmatu.

Samotnou délku výboje vidíme na pravé straně tučným písmem. (Plasma life time: 9.6 [ms])



A také grafy střely, kde můžeme vidět různé křivky závislé na čase. V první části grafu je napětí na cívkách  $U$  [V], v druhé je znázorněno magnetické pole, ve třetí části napětí plazmatu a v poslední je graf viditelnosti části viditelného spektra světla a také spektrum emisní čáry  $H_\alpha$ .

## **Závěr**

Pokusem zjišťování nejdélšího výboje plazmatu na tokamaku Golem v Praze jsem ověřil výsledky předchozího měření Fakulty Jaderné a Fyzikálně Inženýrské, která také měřila maximální životnost plazmatu v komoře tokamaku Golem. Nenaměřil jsem stejné hodnoty, protože z důvodu omezeného časového rozpočtu na tokamaku Golem jsem nevyzkoušel všechny kombinace veličin, které by vedly k plazmatu s nejdélší životností.

## Zdroje

ITER. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/?p=tokamak>

Tokamak TM-1 MH. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Tokamak\\_TM-1\\_MH](http://cs.wikipedia.org/wiki/Tokamak_TM-1_MH)

Tokamak. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tokamak>

TOKAMAK GOLEM - CHARACTERISTICS. FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ. *GOLEM tokamak na fjfi cvut* [online]. 2008 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/?p=tokamak>

*Tokamak GOLEM - Shot Database - 18118* [online]. GOLEM Team, 2014 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/operation/shots/18118/>. Výzkumná práce. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT.

1014MiroslavPecar Level\_I. In: *Results* [online]. 2014 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: [http://golem.fjfi.cvut.cz/roperation/tasks/STUDENTS/1014MiroslavPecar/Level\\_I/results.php](http://golem.fjfi.cvut.cz/roperation/tasks/STUDENTS/1014MiroslavPecar/Level_I/results.php)

Petr Kulhánek: Tokamak COMPASS-D se stěhuje do Prahy [online]. Aldebaran Buletin [cit. 2015-01-04]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2006\\_20\\_tok.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2006_20_tok.php). Článek. České vysoké učení technické - Katedra fyziky.

## Citace obrázků:

**Obr. č. 1:** KULHÁNEK, Petr. Plazma V. In: *Pozorování slunce: Se sluncem společně I - Fyzika plazmatu* [online]. Valašské Meziříčí, 2013 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z: <http://pozorovanislunce.eu/ke-stazeni/workshop-se-sluncem-spolecne-i-fyzika-plazmatu.html>

**Obr. č. 2:** Nazeleno.cz. ASSOCIATED PLASMA LABORATORY. *Chytrá řešení pro každého* [online]. 2008 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z: [http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/print\\_1/lay\\_3/termojaderna-fuze-energeticka-spasa-nebo-armageddon.aspx](http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/print_1/lay_3/termojaderna-fuze-energeticka-spasa-nebo-armageddon.aspx)

**Obr. č. 3:** ITER. ITER ORGANIZATION. *The way to new energy* [online]. 2014 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z: [https://www.iter.org/gallery/com\\_image\\_download#156](https://www.iter.org/gallery/com_image_download#156)

**Obr. č. 4:** SVOBODA, Vojtech. Golem.fjfi.cvut.cz: 3D model. GOLEM TEAM. *České vysoké učení technické* [online]. 2008 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z: [http://golem.fjfi.cvut.cz/roperation/tasks/STUDENTS/1014MiroslavPecar/Level\\_I/index.php](http://golem.fjfi.cvut.cz/roperation/tasks/STUDENTS/1014MiroslavPecar/Level_I/index.php)

**Obr. č. 5:** Archiv Autora

**Obr. č. 6:** Golem.fjfi.cvut.cz. GOLEM TEAM. *České vysoké učení technické* [online]. 2014 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/17183/diagnostics/Radiation/0211FastCamera.ON/>

**Obr. č. 7,8:** SVOBODA, Vojtech. Golem.fjfi.cvut.cz. FNSPE CTU. *České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská* [online]. 2008 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/?p=tokamak>

## Tabulky a grafy:

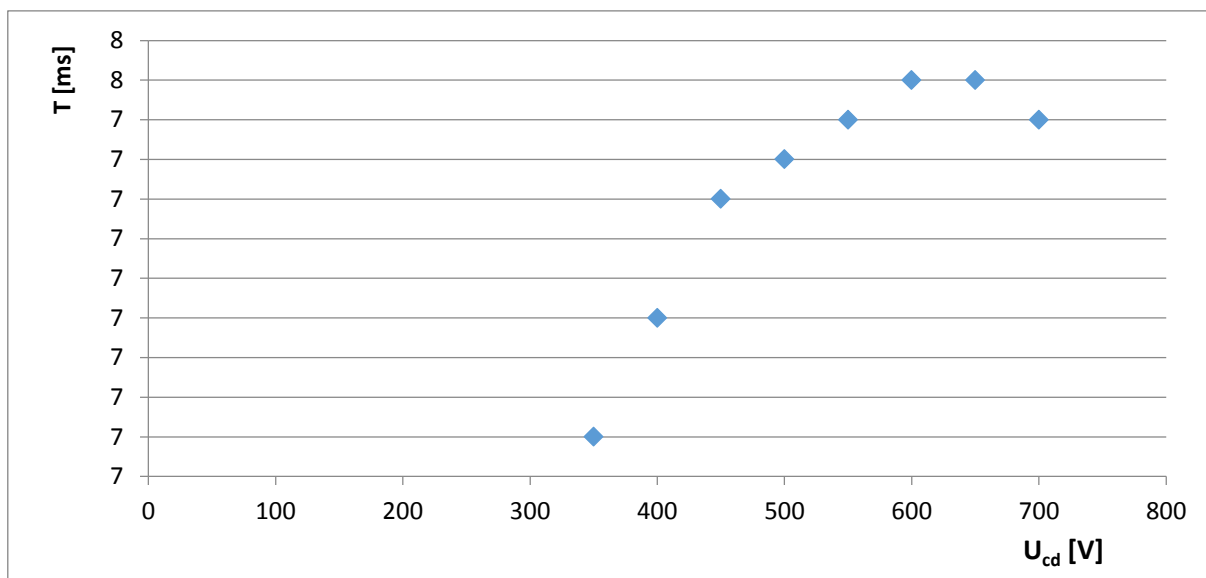
### 1. Tabulka z postupného měření (měním $U_{cd}$ [V])

U ostatních hodnot jsem si vybral nějakou náhodnou, abych měl nějaký základ hodnot pro první měření.

Hodnotu  $U_{cd}$  jsem přestal měřit, protože již dále na konzoli nebylo možno jít s hodnotami výše.

Shot No.	$p_{WG}$ [mPa]	$U_B$ [V]	$T_{cd}$ [us]	$U_{cd}$ [V]	T [ms]
17082	8	800	1000	50	0
17083	8	800	1000	100	0
17084	8	800	1000	150	0
17085	8	800	1000	200	0
17086	8	800	1000	250	0
17087	8	800	1000	300	0
17088	8	800	1000	350	6.6
17089	8	800	1000	400	6.9
17090	8	800	1000	450	7.2
17091	8	800	1000	500	7.3
17092	8	800	1000	550	7.4
17093	8	800	1000	600	7.5
17094	8	800	1000	650	7.5
17095	8	800	1000	700	7.4

### 1. Graf z postupného měření



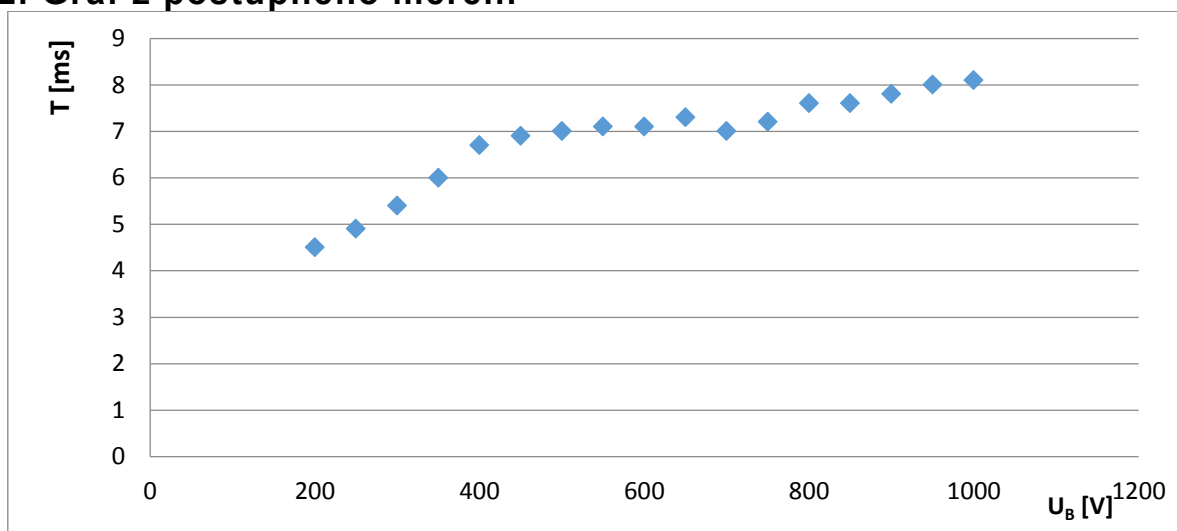
## 2. Tabulka z postupného měření (měním $U_B$ [V])

Jelikož z první tabulky už mám hodnotu  $U_{cd} = 600V$  pro čas 7.5ms jako maximální, tak mám zpřesnění tabulky a mohu měřit dále s hodnotami, co jsem si v první tabulce vymyslel.

Hodnoty  $U_B$  jsem měřil pouze do hodnoty 1000 Voltů, protože už nebyla možnost výběru vyšších hodnot.

Shot No.	$p_{WG}$ [mPa]	$T_{cd}$ [us]	$U_{cd}$ [V]	$U_B$ [V]	T [ms]
17095	8	1000	600	50	0
17096	8	1000	600	100	0
17097	8	1000	600	150	0
17098	8	1000	600	200	4.5
17099	8	1000	600	250	4.9
17100	8	1000	600	300	5.4
17101	8	1000	600	350	6
17102	8	1000	600	400	6.7
17103	8	1000	600	450	6.9
17104	8	1000	600	500	7
17105	8	1000	600	550	7.1
17106	8	1000	600	600	7.1
17107	8	1000	600	650	7.3
17108	8	1000	600	700	7
17109	8	1000	600	750	7.2
17110	8	1000	600	800	7.6
17111	8	1000	600	850	7.6
17112	8	1000	600	900	7.8
17113	8	1000	600	950	8
17115	8	1000	600	1000	8.1

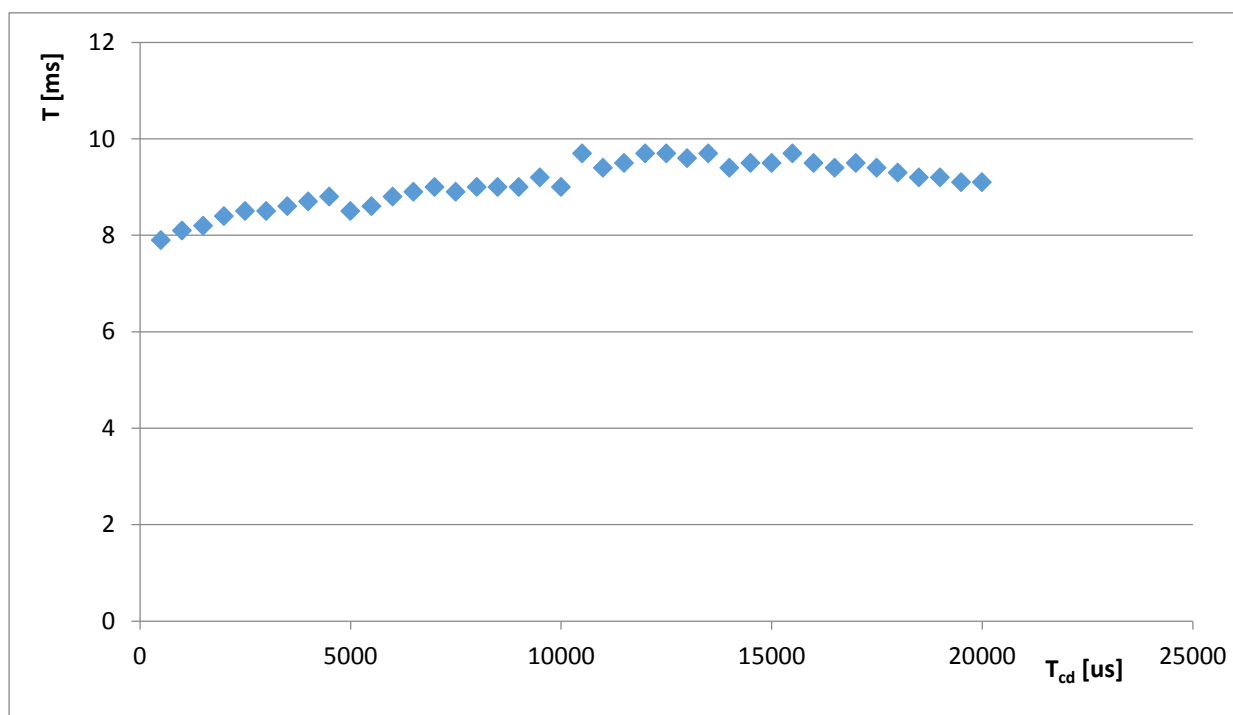
## 2. Graf z postupného měření



### 3. Tabulka z postupného měření (měním $T_{cd}$ [us])

	$p_{WG}$ [mPa]	$U_{cd}$ [V]	$U_B$ [V]	$T_{cd}$ [us]	$T$ [ms]
17115	8	600	1000	500	7.9
17116	8	600	1000	1000	8.1
17117	8	600	1000	1500	8.2
17118	8	600	1000	2000	8.4
17119	8	600	1000	2500	8.5
17120	8	600	1000	3000	8.5
17121	8	600	1000	3500	8.6
17122	8	600	1000	4000	8.7
17123	8	600	1000	4500	8.8
17124	8	600	1000	5000	8.5
17125	8	600	1000	5500	8.6
17126	8	600	1000	6000	8.8
17127	8	600	1000	6500	8.9
17128	8	600	1000	7000	9
17129	8	600	1000	7500	8.9
17130	8	600	1000	8000	9
17131	8	600	1000	8500	9
17132	8	600	1000	9000	9
17133	8	600	1000	9500	9.2
17134	8	600	1000	10000	9
Zde je mezera, protože tato měření byla prováděna na dálku z mého bydliště.					
18096	8	600	1000	10500	9.7
18097	8	600	1000	11000	9.4
18098	8	600	1000	11500	9.5
18099	8	600	1000	12000	9.7
18100	8	600	1000	12500	9.7
18101	8	600	1000	13000	9.6
18102	8	600	1000	13500	9.7
18103	8	600	1000	14000	9.4
18104	8	600	1000	14500	9.5
18105	8	600	1000	15000	9.5
18106	8	600	1000	15500	9.7
18107	8	600	1000	16000	9.5
18108	8	600	1000	16500	9.4
18109	8	600	1000	17000	9.5
18110	8	600	1000	17500	9.4
18111	8	600	1000	18000	9.3
18112	8	600	1000	18500	9.2
18113	8	600	1000	19000	9.2
18114	8	600	1000	19500	9.1
18115	8	600	1000	20000	9.1

### 3. Graf z postupného měření



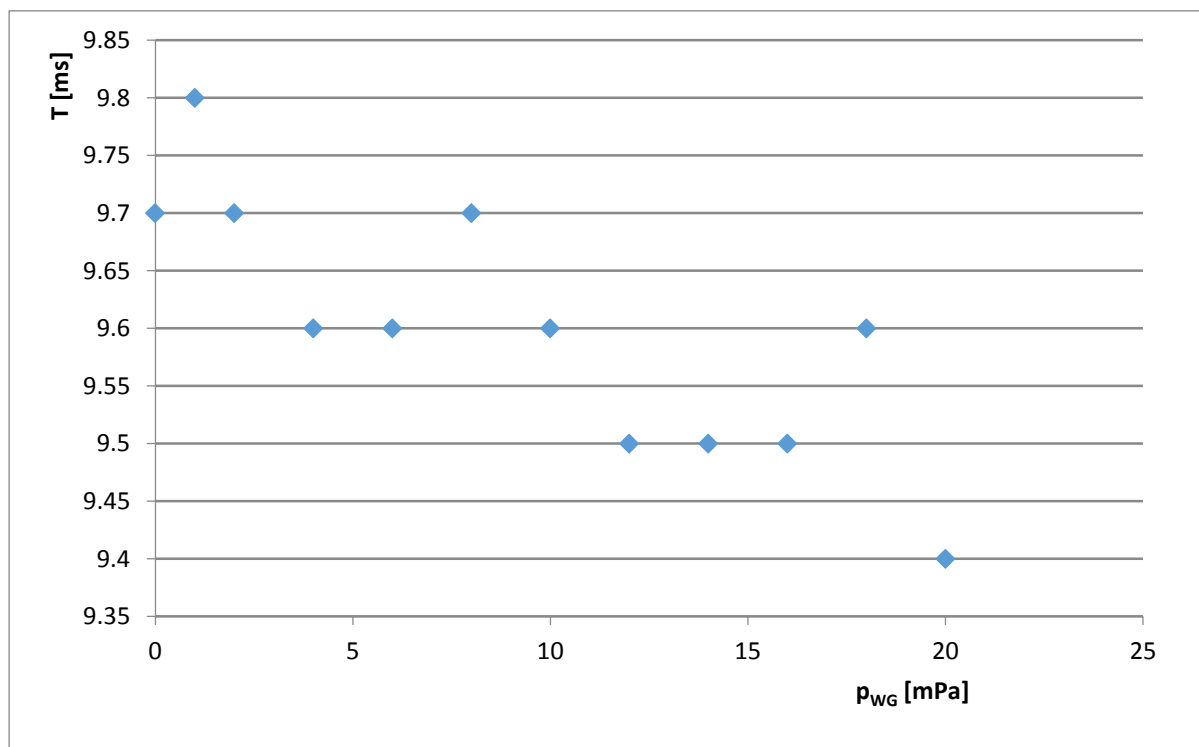
### 4. Tabulka z postupného měření (měním $p_{WG}$ [mPa])

Byla možnost měřit ještě více hodnot u tohoto měření, ale prvně už jsem neměl více času na měření, a po druhé už to nemělo smysl, protože hodnoty životnosti plazmatu klesají se stoupajícím atmosférickým tlakem.

	$U_{cd}$ [V]	$U_B$ [V]	$T_{cd}$ [us]	$p_{WG}$ [mPa]	$T$ [ms]
18117	600	1000	12000	0	9.7
18118	600	1000	12000	1	9.6
18119	600	1000	12000	2	9.7
18120	600	1000	12000	4	9.6
18121	600	1000	12000	6	9.6
18122	600	1000	12000	8	9.7
18123	600	1000	12000	10	9.6
18124	600	1000	12000	12	9.5
18125	600	1000	12000	14	9.5
18126	600	1000	12000	16	9.5
18127	600	1000	12000	18	9.6
18128	600	1000	12000	20	9.4



#### 4. Graf z postupného měření



## **Přílohy**

Příloha č.1: CD-ROM s reálnou ukázkou výkonu jednoho výboje

Příloha č.2: Prezentace o tokamaku GOLEM