

Gymnázium Thomase Manna

ROČNÍKOVÁ PRÁCE

Termojaderná fúze a experiment s vysokoteplotním plazmatem

Petr Skala

Vedoucí práce: Mgr. Michaela Dvořáková

Ročník: Septima

Školní rok: 2020/2021

Obsah

1	Úvod	2
2	Fyzika plazmatu.....	3
3	Princip fungování tokamaků.....	3
3.1	Teoretický úvod	3
3.2	Praktické provedení	4
3.2.1	Konstrukce tokamaku	4
3.2.2	Jaderné reakce a palivo.....	5
3.2.3	Výroba energie a významné reaktory	5
4	Tokamak GOLEM.....	6
4.1	Konstrukce	6
4.2	Diagnostika	7
4.3	Výboj na Golemu.....	7
5	Experiment.....	8
6	Závěr.....	12
7	Seznam použitých informačních zdrojů	13

1 Úvod

Již léta se lidé snaží spoutat energii reakcí jaderné fúze – s trochou nadsázky by se dalo říct vytvářením malého Slunce na Zemi. Jedním z nejslibnějších způsobů, jak tohoto dosáhnout, je zařízení, které nazýváme tokamak. Pomocí silných elektromagnetických cívek v komoře vytvoříme dostatečně silné magnetické pole, ze kterého nabitě částice v plazmatu nemohou uniknout. Tyto částice jsou zahřáté na teploty v řádu desítek milionů kelvinů, přičemž je překonána Coulombova bariéra a spojením jader je produkována energie. V Čechách momentálně existují dva takovéto stroje, sloužící zatím jen k vědeckým a studijním účelům, a to COMPASS v Ústavu fyziky plazmatu na Ládví (nyní probíhá jeho modernizace)(1) a GOLEM na FJFI na Břehové. Právě ten slouží primárně ke studiu, a i mně jakožto doufejme budoucímu studentovi na FJFI bylo dovoleno prokouknout do jeho tajemství. V této práci bych tedy rád nejdříve pojednal o obecném fungování tokamaků, potažmo Golema, a také bych se zaměřil na jeho diagnostiku a popis toho, co vlastně měří. K práci jsem také připojil popis experimentu, na kterém jsem se podílel.

2 Fyzika plazmatu

Pro vytvoření lepší představy o tom, jak tokamaky fungují, je potřeba představit alespoň pár základních konceptů fyziky plazmatu. Obecná definice plazmatu zní takto:

Plasma je kvazineutrální plyn nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování.

Pojem kvazineutralita chápeme jako rovnost koncentrací kladně a záporně nabitých částic, přičemž ale plazma není homogenní, tudíž existují oblasti, které jsou nabitě.

Výskyt nabitých částic také koresponduje s výskytem elektrického pole, které ovlivňuje další částice. Při shlukování stejně nabitých částic může toto elektrické pole působit i na velké vzdálenosti. Tyto síly způsobují velice složité interakce, které popisujeme jako kolektivní chování.

Plazma je tedy plyn, kde je obal atomu oddělen od jeho jádra. Někdy je popisováno jako čtvrté skupenství hmoty. Nejčastěji se plazma produkuje zahřátím plynu, nicméně jde produkovat i jinak, a tudíž nemusí být vždy horké. (2)

3 Princip fungování tokamaků

3.1 Teoretický úvod

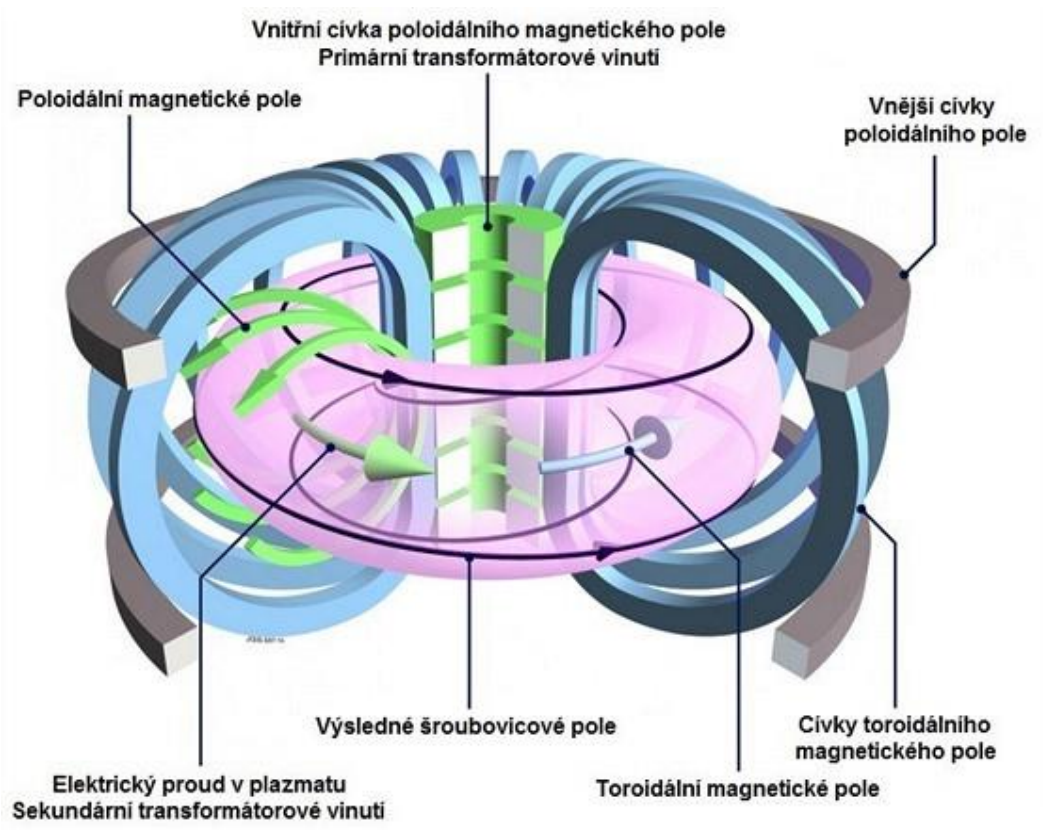
Již v druhém desetiletí 20. století bylo podle teorie Arthura Eddingtona jasné, že energie, kterou Slunce vyzařuje, pochází z jaderné fúze, přesněji proton-protonového cyklu, a k tomu z malé části i z cyklu CNO. Předmětem pozdějších debat tedy bylo, zda se tato energie dá ustálit a udržet na Zemi.

Původní myšlenka fúzních reaktorů je dá se říct až utopická. Z materiálů, které jsou na zemi snadno dostupné a téměř nevyčerpatelné (voda a lithium) by se dalo vyrobit nezměrné množství energie, a to bez nevýhod klasických elektráren. Fúzní reaktory by při normálním běhu neprodukovaly žádné emise, nebezpečí spojené s výbuchem reaktoru a zamoření prostoru radioaktivními látkami tak jako u štěpných reaktorů neexistuje. Tyto výhody jsou však bohužel vyváženy extrémní složitostí technického provedení reaktoru. Hlavně proto trvá vývoj fúzních technologií tak dlouho. (2,7)

3.2 Praktické provedení

3.2.1 Konstrukce tokamaku

Je nutné vytvořit vakuovou nádobu, do které je vehnán plyn, který se následně zahřeje, ionizuje, a začne provádět jaderné reakce. První komory byly válcové, ale od tohoto designu se rychle upustilo, protože částice snadno unikají podstavami. Ty se odstranili jednoduše – konce válce se spojily a vzniknul tvar nazývaný torus. Přišlo se též na to, že plazma zahřáté na extrémně vysoké teploty se rádo roztahuje a uniká ven. Při teplotách, kdy je fúze možné dosáhnout, dochází při kontaktu plazmatu se stěnou komory k jejímu odpařování, což je vcelku nežádoucí efekt. Je tedy potřeba plazma jaksi udržet, a to tak, aby se nedotýkalo stěn, dá se říct levitovalo. K tomu je nejslibnější metodou magnetické pole (další metodou je tzv. inerciální udržení, ale tomu se nyní věnovat nebudu). Nabité části plazmatu krouží kolem siločar mag. pole, a tím pádem neunikají ven.



Obrázek 1 - náčrt typického tokamaku (10)

Pro zajištění stability plazmatu má mag. pole dvě složky – toroidální a poloidální. Každý tokamak má cívky na vytvoření toroidálního pole, pole poloidální je tvořeno proudem v plazmatu samotném, ve větších tokamacích jsou ale i poloidální cívky. Složením siločar těchto dvou polí dostaneme typickou šroubovici, toto charakterizuje tzv. helicity mag. pole. (2,7)

3.2.2 Jaderné reakce a palivo

Nejefektivnější fúzní reakci, když se vezme v potaz potřebná teplota a tlak, je následující reakce izotopů vodíku, deuteria a tritia:



Jak můžeme vidět, reakce produkuje nemalé množství energie, celkem 17,6 MeV. Extrakce energie heliového jádra je téměř nemožná, tudíž se v nádobě použije na další ohřívání plazmatu, tj. k nahrazení energie ztracené zářením. Právě z energie neutronu se bude produkovat teplo potřebné k výrobě el. Energie. Kvůli slabé interakci mezi stěnou vakuové nádoby a neutronem jsme je schopni zachytávat až později, kde jejichž energie může na teplo být přeměněna. S neutronovým zářením je problém, že materiály, které ho absorbují, lehce transmutují. Nicméně se pracuje na látkách, které jsou k transmutaci méně náchylné. Přibližně každá tisícová molekula vody obsahuje atom deuteria, tudíž jeho získávání není problémem. Tritium se však volně v přírodě kvůli svému krátkému poločasu rozpadu nevyskytuje. Musí se tedy vyrobit uměle. Bude buď brát z kanadských těžkovodních reaktorů anebo se bude vyrábět přímo v reaktoru neutronovým bombardováním lithia. (8, 9)

3.2.3 Výroba energie a významné reaktory

Elektrická energie se z fúzních reaktorů vyrábí ohřevem vody neutronovou radiací a následným vháněním vysokotlaké páry do parogenerátoru, podobně jako u jiných elektráren. Důležitým milníkem jaderné fúze je tzv. faktor Q. Pro komerční použití je potřeba, aby reaktor vyráběl více energie, než je do něj vloženo (energie spotřebovaná na ohřev plazmatu, generování mag. pole, chlazení cívek atd.). Faktor Q je tedy poměr energie, která je vyrobena, s energií, která je spotřebována (příkon). Nicméně bychom si výkon ve vyrobené el. energii neměli plést z fúzním výkonem, který může být o dost větší z důvodu ztrát. Pro využitelnost musí tedy být $Q > 1$, a pro ekonomičnost minimálně $Q > 5$. (11)

Energetického zisku ještě žádný reaktor nedosáhl, nicméně jsou již ve výstavbě reaktory, které to mají v plánu. Nejvýznamnější je reaktor ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), na kterém se podílí všechny technologické velmoci světa (včetně EU). Za zmínku též stojí americký reaktor SPARC, který používá zajímavou technologii vysokoteplotních supravodičů. (12, 13)

4 Tokamak GOLEM

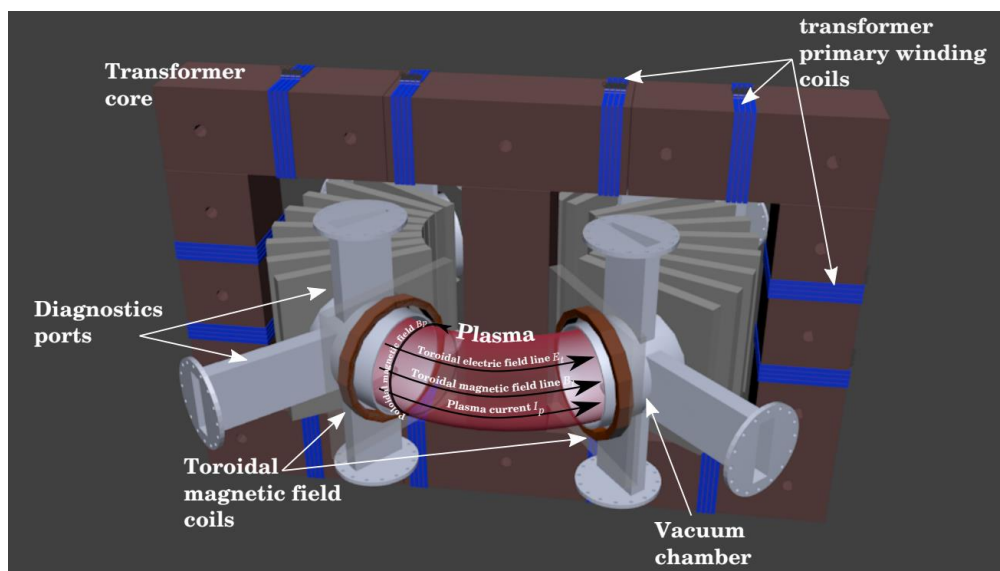
Původně označován jako tokamak TM-1 fungoval do roku 1976 v Kurčatově ústavu atomové energie v Moskvě. Posléze byl předán československé akademii věd, kde byl uveden do provozu jako CASTOR. Když Ústav fyziky plazmatu získal větší tokamak COMPASS, předal CASTOR do rukou Fakultě Jaderné a fyzikálně inženýrské. Tokamak byl posléze pojmenován jako GOLEM, jak kvůli blízkosti židovského hřbitova, ale také kvůli symbolice energie čekající na své sklizení. (14)

4.1 Konstrukce

GOLEM by se dal považovat za malý tokamak. Poněvadž teploty pracovní látky jsou v něm příliš nízké, aby docházelo k fúzním reakcím, používá se především k výukovým účelům, popř. ke studiu plazmatu, a ne fúze jako takové.

Hlavní poloměr komory	$R_0 = 0.4 \text{ m}$
Vedlejší poloměr komory	$r_0 = 0.1 \text{ m}$
Poloměr plazmatu	$a \approx 0.06 \text{ m}$
Délka výboje	$\tau < 25 \text{ ms}$
Toroidální magnetické pole	$B_t < 0.5 \text{ T}$
Proud plazmatem	$I_p < 8 \text{ kA}$
Elektronová hustota	$n_e \approx 0.2 - 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
Teplota iontů	$T_i < 50 \text{ eV}$
Teplota elektronů	$T_e < 100 \text{ eV}$
Pracovní plyny	H, He

Obrázek 2: základní parametry tokamaku GOLEM (3)



Obrázek 3 - schéma tokamaku GOLEM (15)

4.2 Diagnostika

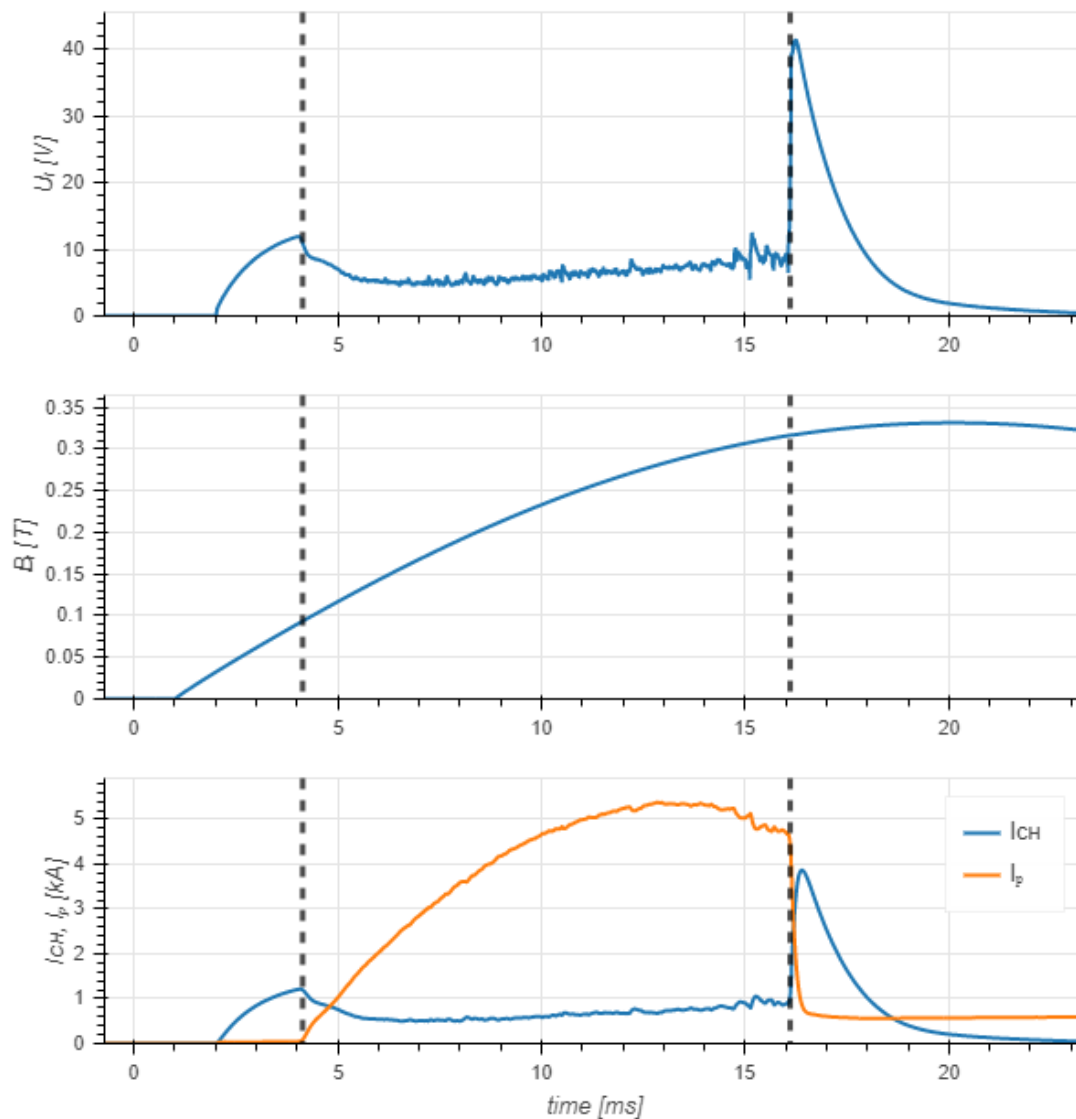
Tokamak je permanentně osazen několika diagnostickými přístroji, které měří základní parametry výboje. Mezi ně patří rogowského cívka pro měření celkového proudu, cívka pro měření magnetického pole, a voltmetr pro měření napětí na závit.

Pro zkoumání plazmatu je k dispozici několik sond, které se v různých místech vkládají pomocí tzv. diagnostických portů do tokamaku. O těchto sondách budu dále mluvit v kapitole o experimentu. (5)

4.3 Výboj na Golemu

Typický výboj (shot) na Golemu dosahuje maximálních výsledků uvedených na obrázku 2. Pomocí dříve zmíněných základních diagnostik se na každém shotu měří napětí, magnetické pole a proud. Na obrázku 4 jsou právě tyto charakteristiky vizualizovány. Trvání výboje (tj. čas, po který je udrženo plasma) je ohraničeno přerušovanými vertikálními čarami.

Na grafu, který znázorňuje proud, máme dvě křivky – oranžová označuje proud v plazmatu I_p a modrá proud v komoře I_{ch} . Důvodem drastického nárůstu hned po konci výboje je rozplynutí plazmatu – energie látky se nemůže jen tak ztratit, musí se někam přenést. S klesající energií plazmatu klesá i podíl ionizace, a na konci výboje už je z plazmatu téměř nevodivý plyn. Energie se tedy “přelévá“ do komory, odsud’ tedy pochází nárůst napětí na závit a proudu v komoře. (5)



Obrázek 4: základní parametry typického výboje (5)

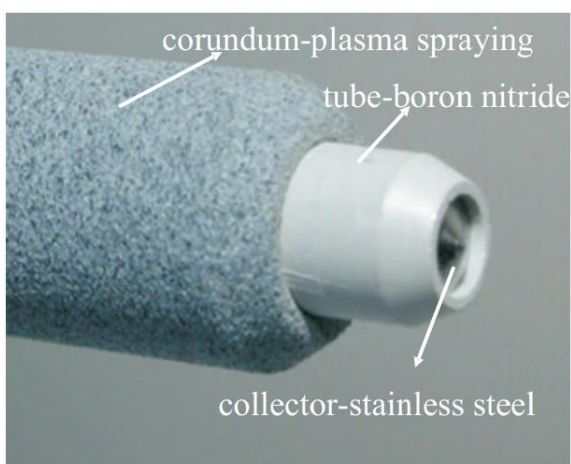
5 Experiment

Na Golemu probíhá měření z velké části pro studenty FJFI. GOLEM má ale i jedinečnou vlastnost být ovládán dálkově, experimentovat na něm tedy můžou i studenti z celého světa. Pan inženýr Vojtěch Svoboda, který vše kolem tokamaku organizuje, umožňuje měřit i středoškolským studentům jako já. Měl jsem tedy možnost vyzkoušet si, jak takové studium na Golemu vypadá. Rád bych zde tedy představil výsledky tohoto měření.

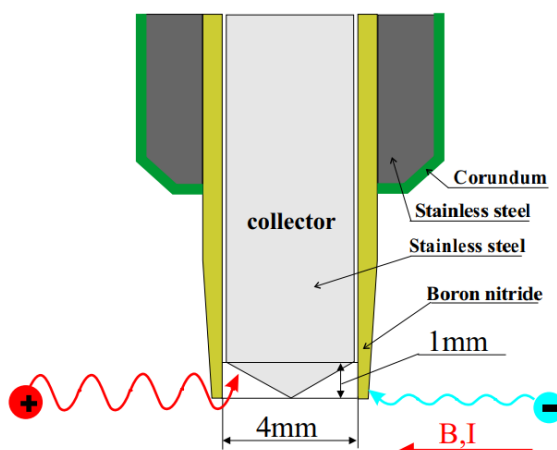
Pomocí dříve zmíněných sond se dají měřit i složitější parametry plazmatu. Právě dvě takovéto sondy se použily při našem měření – a to BPP (Ball-pen probe) a DRP (Double

rake probe, dvojitá hřebínková sonda). Tyto sondy různým způsobem měří potenciál v plazmatu Φ . V práci bych se zaměřil hlavně na data ze sondy BPP.

Nejdříve bych popsal, jak BPP funguje. Je primárně tvořena kolektorem nabitých částic, a trubicí z dielektrického materiálu. Díky menšímu gyračnímu poloměru elektronů dojde k jejich izolaci (odstínění). Na kolektor tak dopadnou jen ionty (v našem případě protony), sonda tedy měří potenciál na kolektoru. Při správné kalibraci jsme schopni změřit i plovoucí potenciál, tedy samotný lokální potenciál plazmatu Φ . Obrázek 5 ukazuje starší verzi BPP z tokamaku CASTOR, obrázek 6 schéma sondy. (3, 6)



Obrázek 5 (6)



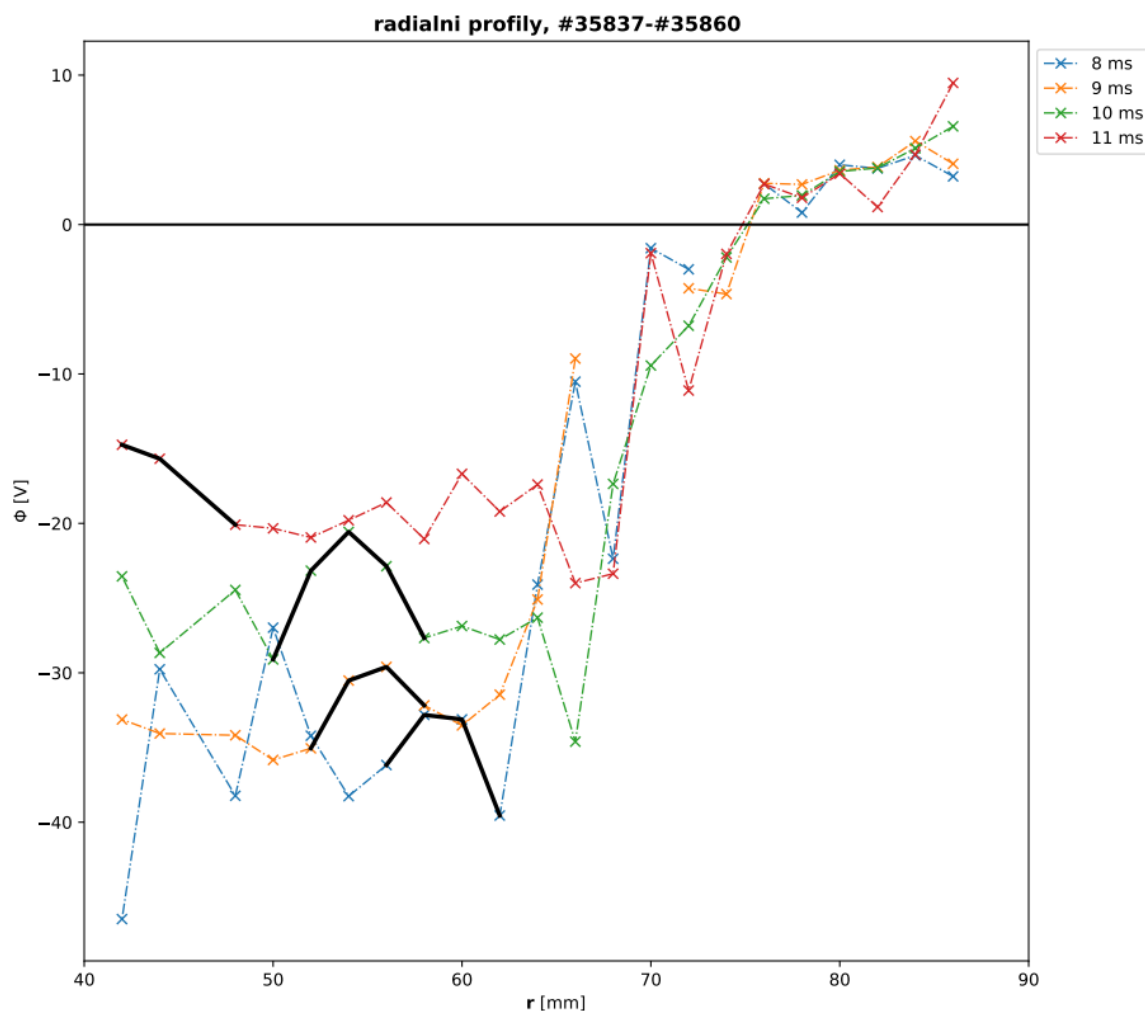
Obrázek 6 (6)

Náš experiment se skládá z více výbojů, konkrétně shotů 35837 až 35861. Po každém výboji pan Svoboda posunul sondy o 2 mm hlouběji radiálním směrem, při každém výboji se tedy měřily parametry na jiném místě v plazmatu. Tento postup se nazývá jako tzv. radiální sken. Při složení dat ze všech výbojů vzniká tzv. radiální profil dané charakteristiky, v našem případě rad. profil potenciálu plazmatu Φ .

Naším cílem při měření potenciálu plazmatu bylo primárně najít stříhovou vrstvu (v aj. VSL – Velocity shear layer). To je vrstva v plazmatu, kde se obrací rychlost v poloidálním směru. Tření látky v této vrstvě způsobuje vznik tzv. blobů (blobs v Aj.), dá se říct kuliček plazmatu. Bloby do plazmatu vnášejí turbulenci, tj. nestabilitu, která ztěžuje

udržení plazmatu a zrychluje ztrátu energie. VSL se dobře charakterizuje tzv. “kopečky“ v potenciálu.

Na obrázku 5 je primární výstup z měření, tyto kopečky jsem zvýraznil černě. Barevné křivky zobrazují potenciál v různých časech, osa x je hloubka vsunutí sondy, osa y potenciál plazmatu Φ .

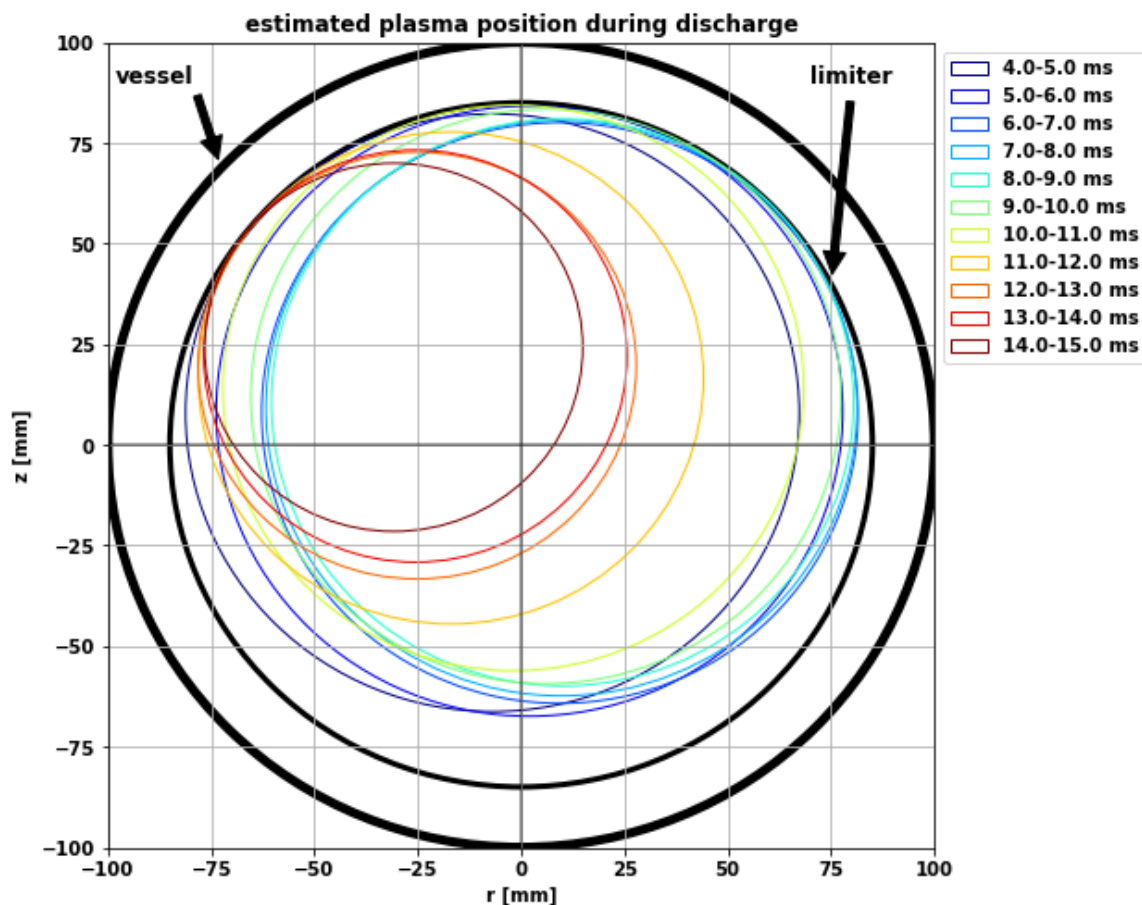


Obrázek 7 - profil potenciálu plazmatu Φ (4)

Na grafu je mimo jiné výborně vidět, jak se potenciál přibližuje k nule, čím dál je od středu. Kopečky jsou dle mého názoru dobře viditelné jen v čase 8-11 ms, dříve je plazma příliš nestabilní, a později je již mimo dosah sondy.

Pozici plazmatu v tokamaku ukazuje obrázek 8. Plazma se zmenšuje ze dvou důvodů – zesiluje se magnetické pole (viděno na obrázku 4), plazma je tedy svíráno větší silou.

Celková energie plazmatu se také zmenšuje – tím pádem se zmenšuje i jeho poloměr. I kvůli tomuto “utíkáni“ nebylo možné měřit potenciál plazmatu v pozdější fázi výboje. Únik je vidět na obou vizualizacích – na obrázku 7 se kopečky posouvají mimo dosah sondy, na obrázku 8 se plazma posunuje a zmenšuje. Za zmínku též fakt, že pozice plazmatu koreluje s lokací kopečku, tedy i VSL.



Obrázek 8 – pozice plazmatu během výboje (4)

Na Golemu jsou sondy statické, tím pádem je pro vytvoření profilů nutná již zmíněná série výbojů. Při takovýchto sériích je důležitá reprodukovatelnost - co největší podobnost mezi výboji. I to má ale své meze, protože čím hlouběji je sonda v komoře, tím více narušuje proudění plazmatu a zkracuje trvání výboje. Pokročilejší tokamaky již série nedělají, jejich sondy jsou pohyblivé. Profil plazmatu se tedy může udělat během jednoho výboje tím, že sonda “projede“ celým poloměrem. (3, 6)

6 Závěr

Původním záměrem práce bylo poreferovat o vlastnostech plazmatu a nynějších těžkostech při experimentování na tokamacích. Okolnosti se ale změnily, a mohl jsem tedy do své práce přidat i praktické zkušenosti z práce na tokamaku. Za tuto možnost jsem velice rád, protože si myslím, že prakticky se toho naučím více, a ještě k tomu mnohem zajímavějším způsobem než čistě teoretickou prací.

Je nutné uznat, že experiment na Golemu nebyl úplně perfektní. Myslím si ale, že ho můžeme považovat za úspěšný. V datech jsme našli to, co jsme chtěli, i když v menší míře, než bych doufal. Pro mě velice důležité zjištění bylo také to, že i na malém tokamaku jdou dělat velké věci.

Rád bych tímto poděkoval Petru Máchovi za jeho ochotné rady a pomoc při zpracování dat z výbojů, a panu Svobodovi za to, že mi pomáhal s uskutečněním výbojů, a dal mi k dispozici GOLEM jako takový. Také bych podotknul, že díky moderním komunikačním technologiím veškerá naše spolupráce probíhala dálkově, a GOLEM jsem tak nemusel přes koronavirovou situaci navštěvovat.

Nejvíce jsem ale vděčný za možnost nakouknout do zákulisí fungování fúzní vědy. I předtím jsem uvažoval o tom, že bych fyziku plazmatu šel studovat, ale teď to vím docela jistě.

7 Seznam použitých informačních zdrojů

- 1 *Tokamak COMPASS* [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z:
http://www.ipp.cas.cz/vedecka_struktura_ufp/tokamak/COMPASS/
- 2 CHEN, Francis. *Úvod do fyziky plazmatu*. Academia, 1984.
- 3 MÁCHA, Petr. *Edge plasma parameter measurements of the GOLEM tokamak using ball-pen and Langmuir probe*. Praha, 2018. Bakalářská práce.
- 4 *Tokamak GOLEM - Shot Database* [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z:
<http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/35861/>. Data z experimentální kampaně výbojů 38537 až 35861. zpracování proběhlo v programovacím jazyku Python.
- 5 *Tokamak GOLEM - Shot Database* [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z:
<http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/0/>. Stránka nejnovějšího výboje, ukázkový průběh.
- 6 ADÁMEK, J. a J. STÖCKEL. *A novel approach to direct measurement of the plasma potential*. 2004. Dostupné z: doi:10.1007/BF03166386
- 7 *An Overview and Basic Design Principles of Tokamak Nuclear Fusion Reactors* [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/kadribasic2/>
- 8 W. M. NEVINS. *A Review of Confinement Requirements for Advanced Fuels*. 1998. Dostupné z: doi:10.1023/a:1022513215080
- 9 *TRITIUM BREEDING* [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z:
<https://www.iter.org/mach/TritiumBreeding>
- 10 [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/technet/veda/fuzni-energie-elektrarna-iter-projekt-dostavba.A200512_100751_veda_mla
- 11 ENTLER, Slavomír. *Engineering Breakeven*. 2014. Dostupné z:
doi:10.1007/s10894-014-9830-2
- 12 *ITER tokamak* [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <https://www.iter.org/mach>
- 13 *SPARC tokamak* [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z:
<https://www.psfc.mit.edu/sparc>
- 14 *Tokamak GOLEM wiki* [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z:
<http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/>

15 *Electron energy confinement time τ_E of a high temperature plasma at the GOLEM tokamak* [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z:

<http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/Education/ExperimentMenu/1stLevelBasic/ElectronEnergyConfinementTime/Manual/docum.pdf>