

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor SOČ: 2. Fyzika

Název: Poloidální rotace plazmatu na tokamaku GOLEM

Matyáš Grof

Kraj: Praha

Praha 2014

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor SOČ: 2. Fyzika

Poloidální rotace plazmatu na tokamaku GOLEM

Poloidal rotation of plasma on tokamak GOLEM

Autor: Matyáš Grof

Škola:

Gymnázium Christiana Dopplera

Zborovská 45

Praha 5 - Smíchov

150 00

Kraj: Praha

Praha 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval(a) samostatně a použil (a) jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v seznamu vloženém v práci SOČ.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V dne podpis:

Děkuji Ing. Tomáši Markoviči za obětavou pomoc, asistenci a ochotu.

Dále děkuji Ing. Vojtěchu Svobodovi CSc. za poskytnuté zázemí a prostředky.

Anotace:

Plazma je nedílnou součástí našeho vesmíru. Jeho pochopení nám pomůže lépe pochopit, jak vznikl náš vesmír, a umožní nám rozvoj nových technologií, zejména zdroj energie – termojaderná fúze, což je proces ve hvězdách.

Tokamak GOLEM patří mezi nejstarší funkční tokamaky, ale neustále je na něm co zkoumat. Z pohledu magnetohydrodynamických studií lze zjistit mnoho důležitých informací o struktuře a pohybu plazmatu. Jednou z nich je rotace v poloidálním směru, kterou se zde zabývám.

Klíčová slova: Plazma, tokamak, golem, poloidální rotace, magnetohydrodynamika

Obsah

<i>Úvod</i>	6
<i>Plazma</i>	6
<i>Tokamak</i>	7
Fungování tokamaku.....	7
Komora.....	7
Magnetická pole.....	7
Ohřev.....	8
Ionizace.....	9
Pracovní plyn.....	9
Napájení.....	10
Udržení plazmatu.....	10
Diagnostika.....	11
Rogowského cívka.....	11
Sondové měření.....	11
Optická diagnostika.....	11
Mirnovova cívka.....	11
Tokamak GOLEM.....	12
Projekt ITER.....	14
Termojaderná fúze.....	14
Technické parametry.....	15
<i>Magnetohydrodynamické studie</i>	17
Safety Factor.....	17
Magnetické ostrovy.....	18
Výpočet rychlosti poloidální rotace plazmatu.....	21
<i>Výsledky</i>	23
Výstřel 13462.....	23
Výstřel 13449.....	26
Výstřel 13457.....	28
<i>Závěr</i>	30
<i>Použitá literatura</i>	30

Úvod

Plazma je dlouho neobjevený a nepochopený stav hmoty a přitom z plazmatu všichni pocházíme. Uvnitř hvězd se nachází plazma a termojadernou fúzí vznikají těžší prvky, z kterých dnes je složena celá naše sluneční soustava (krom slunce). Plazma lze studovat v přístrojích zvaných tokamaky. Jedním z těchto tokamaků je GOLEM.

Plazma je zde vytvářeno a drženo v silných magnetických polích a lze studovat z mnoha ohledů. Magnetohydrodynamické studie zkoumají magnetické pole plazmatu. Zejména pomocí Mirnovovo cívek.

Z hodnot z Mirnovovo cívek lze pozorovat zvláštní útvary, které jsou stabilní s plazmatem, jsou součástí plazmatu a lze je využít k změření rotace plazmatu.

Plazma

Jedná se o 4. Skupenství hmoty. Vedle pevného, plynného a kapalného ještě existuje plazma. Nachází se v blesku, hvězdách, v jisté formě v ohni a v plazmových televizích a 99% viditelné vesmírné hmoty je ve formě plazmatu. Vzniká pouze za extrémních podmínek, tedy nelze snadno pozorovat a dodnes nám je mnoho skryto.

Dle definice je plazma kvazineutrální soubor částic s volnými nosiči náboje a vykazuje kolektivní chování.

Při zvyšování teplot se elektrony v atomu snadněji excitují. Po dosažení jisté hranice jsou elektrony volné a přestávají být vázány atomem. To je bod, kdy se z látky (běžně z plynu) stává plazma. V plazmatu se ionty stále nacházejí, tudíž budou neustále vyrušovat náboj elektronů. Plazma navenek vykazuje chování nenabitě látky, jen na rozdíl od nenabitě látky extrémně reaguje na magnetická pole, což se nazývá kvazineutralita.

Elektrony a ionty se neustále přitahují elektromagnetickými silami, což je neustále udržuje v jednotném útvaru. Tomuto se říká kolektivní chování. Plazma je schopno reagovat na magnetická pole jako celek a generovat je.

Plazma, jak již bylo řečeno, je silně reaktivní na magnetická pole. Tohoto jevu se využívá při umělém vytváření plazmatu v laboratořích ve speciálních přístrojích nazývaných *tokamaky*.

Tokamak

Tokamak je zařízení pro studium plazmatu. Název je zkratka v překladu z ruštiny *toroidní komora v magnetických cívkách*. Experimentální výzkum na tokamacích započal v SSSR v Moskvě v roce 1956. Jeden z prvních tokamaků a tehdy nejúspěšnějších tokamaků byli T-3 a T-4. SSSR tehdy vzbudil celosvětový zájem o výzkum tokamaků a roku 1968 se SSSR povedla spustit první umělá fúzní reakce.

Do dnes se celý svět snaží pokořit fúzi. Jsme schopni ji spustit a udržet, ale stále nejsme schopni z ní načerpat dostatek energie, aby byla zisková a dala se použít pro budoucí elektrárny. Jsou ambice tohoto cíle dosáhnout a na jihu Francie se buduje zatím největší a nejsložitější tokamak světa, s názvem ITER.

Jednomu vybití energie a pokusu vytvořit plazma se říká *výboj*, nebo *výstřel*.

Fungování tokamaku

Komora

Tokamak se skládá z vakuové komory ve tvaru prstence (torus, anuloid), která je zaplněna pracovním plynem, kterým nejčastěji bývá vodík, zřídka helium, ale lze v použít jakýkoli plyn. Tlak je standardně na tokamaku GOLEM v hodnotách v rámci milipascalů (3-100, ale výboje se provádějí v rozmezí 10-30 mPa).

Průřez komory bývá různý. GOLEM má kruhovitý průřez, ale novější a větší tokamaky již používají průřezy ve tvaru písmene D, což je výhodnější pro pohyb plazmatu a jeho udržení. Na komoře se vyznačují dva směry – toroidální a poloidální, což je vidět na obr. G2, kde modrá šipka značí směr toroidální a červená směr poloidální.

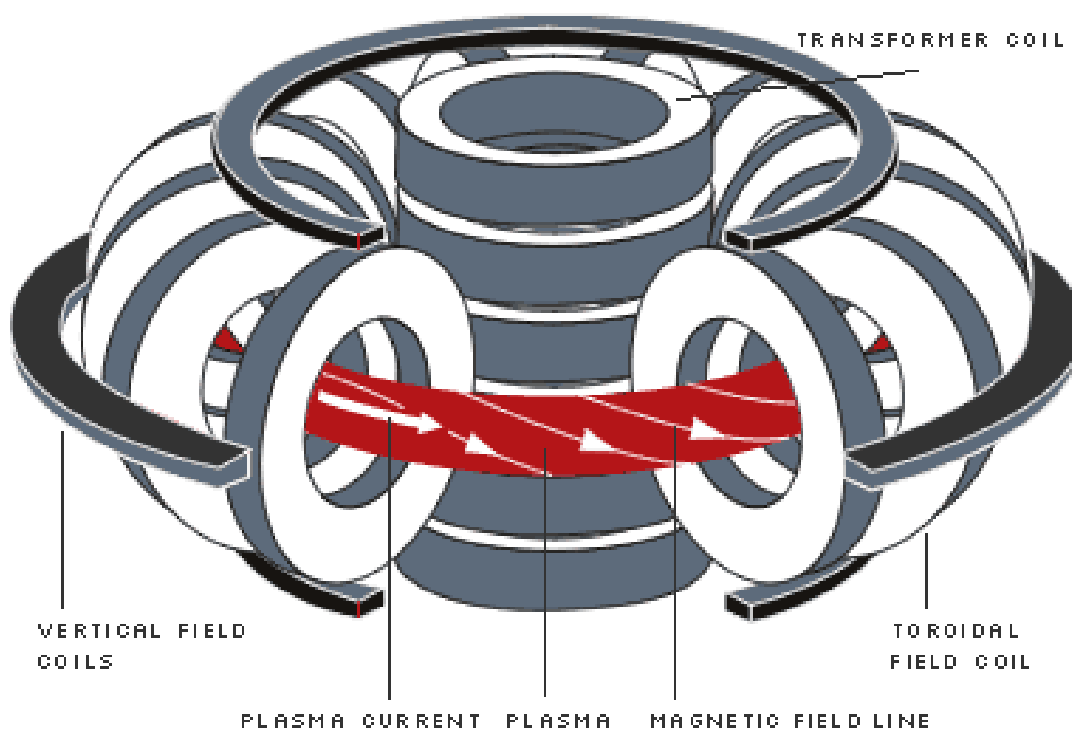
Magnetická pole

Pro vznik a udržení plazmatu je třeba mít výslednici magnetických polí helicitní. To znamená, že plazma musí rotovat jak toroidálně, tak poloidálně respektive toroidálně s poloidální šroubovicí.

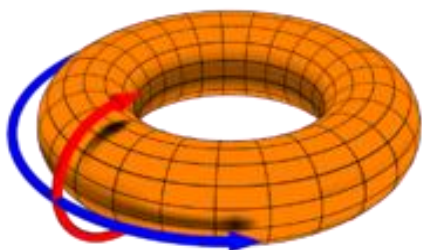
Toroidální magnetické pole se vytváří pomocí cívek toroidálního magnetického pole (obr. G1 – toroidal field coil), které jsou umístěny těsně okolo komory. Na tokamaku GOLEM jich je 28.

Poloidální magnetické pole se vytváří pomocí transformátoru (viz. Obr G1 – transformer coil). Komora s pracovním plynem/plazmatem je použita jako sekundární vlnutí transformátoru a v komoře se indukuje elektrický proud ve směru toroidálním (toroidální elektrické pole; proud bývá v jednotkách kiloampér). Tento elektrický proud kolem sebe vytváří magnetické pole ve směru poloidálním. Obě tato pole (poloidální a toroidální) nám udávají helicitu.

Na tokamaku GOLEM, který se řadí mezi malé tokamaky, se dosahuje indukce magnetických polí až 0,4 Tesla. Na tokamaku Compass-D, který je již střední velikosti a stejně jako GOLEM se nachází v České republice, se dosahuje 1.25 Tesla a na budoucím tokamaku ITER se očekává magnetická pole o indukci 13 Tesla.



obr.G1 (nahore), obr. G2 (dole)



Ohřev

Pro vznik plazmatu je nezbytné zvýšit teplotu pracovního plynu. Za pokojových teplot je nemožné plazma utvořit (alespoň v tokamaku). Je mnoho možností ohřívání pracovního plynu, ale

nejčastější ohřevy jsou mikrovlnný a proudový.

Proudový ohřev probíhá pomocí transformátorového jádra. Komora tvoří sekundární vinutí a pracovním plynem protýká elektrický proud, který vytváří poloidální magnetické pole. Odpor plynu není nulový, naopak je značný a vlivem tekoucího proudu se plyn zahřívá.

Ionizace

Pro vznik plazmatu je nezbytná ionizace pracovního plynu v komoře. Lze toho docílit mnoha způsoby, pro příklad elektronová ionizace, nebo ionizace pomocí elektromagnetického záření.

Elektronová ionizace se na GOLEMu provádí dvěma způsoby. Tokamak má hned dvě elektronová děla – jedno nahoře a jedno vespod komory. Plazma pomocí jevu zvanému drift částic stoupá vzhůru, tudíž elektronové dělo na vrchu by mělo být efektivnější a za tímto účelem bylo i tak vytvořeno. Ionizace prostřednictvím spodního elektronového děla je historicky častější a na tokamaku GOLEM bylo vytvořeno dříve.

Ionizace pomocí elektromagnetického záření se alespoň na tokamaku GOLEM provádí pomocí mikrovln. Byl použit běžný magnetron z mikrovlnné trouby, který je napájen pomocí kondenzátorů. Mikrovlny se přenášejí a směřují pomocí měděné trubice, resp. trychtýře do komory s pracovním plynem.

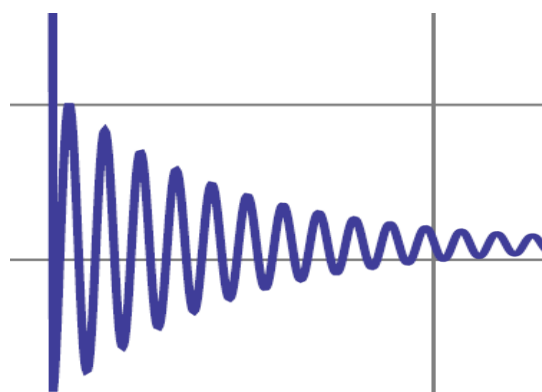
Zvláštěností je pokusit se utvořit plazma bez ionizace. Teoreticky za běžných podmínek by se nemělo nic vytvořit, ale již mnohokrát se povedlo bez ionizace plazma vytvořit. Tento jev se děje, protože na zem neustále dopadá kosmické záření, které dopadá i na komoru tokamaku. Kosmické záření mnohdy narušuje pracovní plyn, ionizuje ho, pokud se v ten samý moment provádí výboj, utvoří se plazma.

Pracovní plyn

Tlak pracovního plynu je volně nastavitelný. Na GOLEMu je v jednotkách milipascalů a to v rozmezí 0-100 mPa. Tlak ovlivňuje mnoho faktorů. Při vysokém tlaku plazma nevznikne, jelikož se v komoře nachází příliš částic a energie kondenzátorů pro vznik plazmatu nestačí. Při příliš nízkém tlaku plazma také nevznikne, jelikož v komoře částic není dost, kinetická ionizace (řetězová ionizace částic při elektronové ionizaci) není schopna zionizovat veškerý pracovní plyn a tedy plazma nedokáže vzniknout. Popřípadě by plazma vzniklo, ale na příliš krátkou dobu a velmi rychle by zaniklo.

Napájení

Tokamak je zařízení s extrémní spotřebou energie. Nelze napájet přímo z elektrické rozvodné sítě a je nutné dodávat velké množství energie v krátkých impulsích. Pro tento účel se používají kondenzátory, nebo kinetické setrvačníky. Celý tokamak GOLEM se napájí pomocí kondenzátorů, což s sebou přináší i jisté nevýhody. První je, že kondenzátor se nevybíjí lineárně, ale při spojení s cívkou se vytvoří oscilátor a kondenzátor se vybíjí a opět nabíjí po křivce sinusoidy se snižující se amplitudou v čase (viz obr. G3). Ovšem takto se vyvíjející proud v cívkách není vhodný pro plazma (zejména pro pohyb plazmatu a udržení teplot), proto se využívá pouze první půl perioda sinusoidy. Průběh proudu je kolísavý, což je problém, jelikož pro vytvoření plazmatu je třeba jistý proud a na udržení plazmatu je třeba již proud nižší. Předmětný problém se řeší zpožděním mezi vybíjením kondenzátorů toroidálního magnetického pole a proudem v plazmatu na úkor délky života plazmatu.



Obr. G3

Další možnost dodání energie jsou již řečené kinetické setrvačníky. Způsob vybíjení energie je odlišný a není ani zdaleka tak jednoduchý, jako vybíjení kondenzátorů. Pomocí složité elektroniky lze dosahovat téměř jakýchkoliv charakteristik magnetických polí. Za výhody poskytování energie se, ale „platí“ komplexností provedení.

Udržení plazmatu

Pro udržení plazmatu musíme udržovat energii plazmatu. Tedy je třeba se vyvarovat všem možným ztrátám energie a dotek plazmatu s komorou je nejrizikovější přenos tepla.

Pomocí čtyř cívek tažených toroidálně s komorou (viz obr. G1 – vertical field coil) lze generovat magnetické pole a s polohou plazmatu lze vůči komoře manipulovat. Počítač kontroluje polohu a v reálném čase vyhodnocuje a manipuluje s plazmatem, což je výpočetně náročné pro rychlost výpočtů. Proces se nazývá *zpětnovazební řízení plazmatu* a jeho provedení opět výrazně ovlivňuje délku života plazmatu.

Diagnostika

Plazma je extrémně energetická hmota. Dnes nejsme schopni studovat jiné plazma než povrchové, jakákoliv diagnostika hlubinného plazmatu je vyloučena, jelikož se za teplot plazmatu veškeré pevné materiály velmi rychle taví a senzory se ničí. Navíc takovýto zásah snižuje teplotu plazmatu a může způsobit jeho zánik.

Rogowského cívka

Běžná cívka, bez jádra a obtočená kolem komory. Vytváří kolem ní toroid, změna magnetického pole indukované cívkou generuje napětí na jejích koncích a lze dopočítat průběžný proud v plazmatu.

Sondové měření

Zvláštní druh měření plazmatu. I když bylo shora řečeno, že je to vyloučeno, je to možné. Měření je pouze chvilkové a v okrajových sférách plazmatu. Jedná se o přímou sondu do komory, která vniká do okrajového plazmatu a je schopna změřit teplotu, hustotu, či potenciál plazmatu.

Optická diagnostika

Diagnostika světelných efektů plazmatu. Spektrografie, bolometrie. Lze vyhodnocovat polohu plazmatu, nebo teplotu.

Mirnovova cívka

Jedná se o kruh s daným množstvím cívek (při vlastních pokusech použita s 16 cívkami) rovnoměrně umístěných po obvodu kruhu (viz obr. G4) a na držáku umístěných přímo do komory. Vnitřkem kruhu se při výstřelu pohybuje plazma, jeho magnetického pole se indukuje na cívkách a na koncích cívek se generuje napětí. Podobně jako u Rogowského cívky lze se dopočítat k magnetické indukci indukované na cívce. Tímto způsobem lze studovat strukturu plazmatu z pohledu magnetohydrodynamických studií plazmatu.

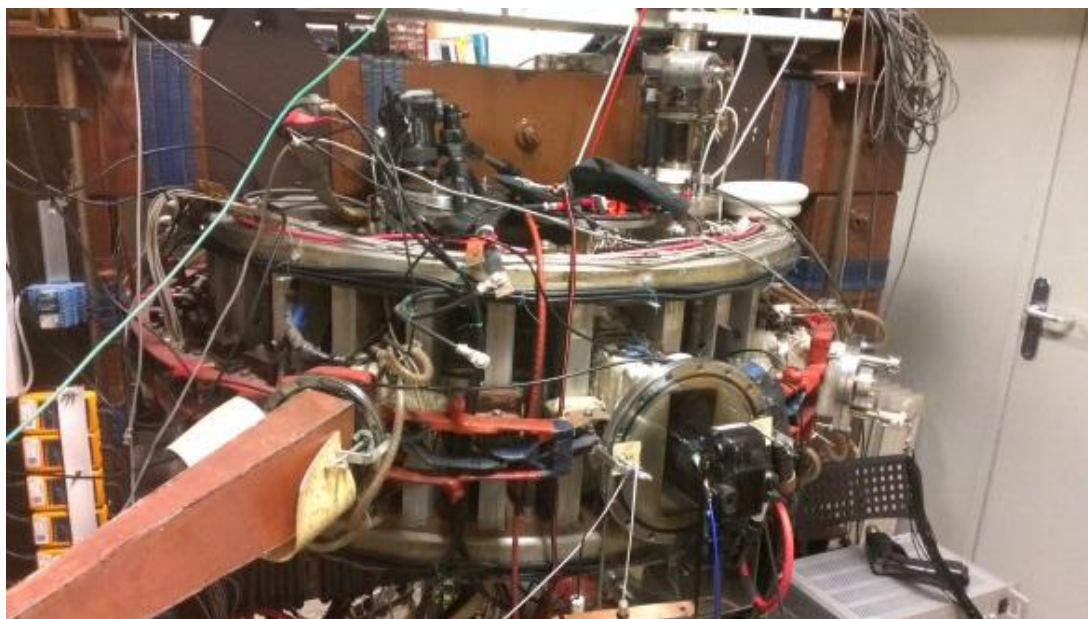


Obr. G4

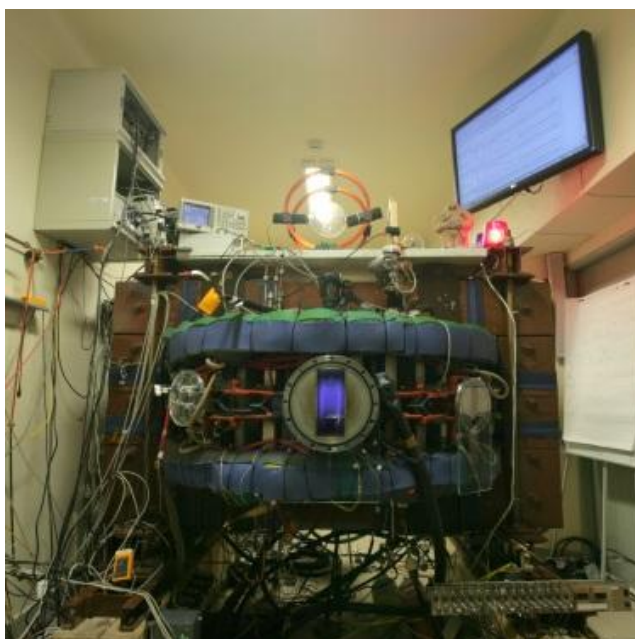
Tokamak GOLEM

GOLEM se nachází na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT. Byl zkonstruován v SSSR v roce 1959 pod jménem TM-1. Studoval se na něm mikrovlnný ohřev plazmatu. Později byl přejmenován na TM-1-MH a studovala se na něm makroskopická diagnostika plazmatu a stabilní režim provozu tokamaku. V roce 1976 byl přesunut na Ústav fyziky plazmatu Akademie věd. 1977 byl zprovozněn a přejmenován na tokamak CASTOR. V roce 2006 byl věnován ČVUT a přejmenován na tokamak GOLEM, kdy Ústav fyziky plazmatu získal tokamak COMPASS-D. Dnes patří mezi nejmenší a nejstarší funkční tokamaky světa. Patří Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

O tokamaku GOLEM se tvrdí, že je to první „open source“ tokamak. Veškerá data z výstřelů na GOLEMu se nachází na internetu a dokonce lze ho ovládat pomocí webového rozhraní (samozřejmě lze to i jinak př. konzole Linuxu). Tento přístup přináší mnoho výhod. Příkladem lze ho ovládat ze zahraničí. Byly prováděny experimenty na tokamaku GOLEM i ze země jako je Nový Zéland. Tato možnost spojuje zahraniční vědce s českými a umožňuje mnohým vytvořit experiment na tokamaku i přes nemožnost se k tokamaku fyzicky dostat.

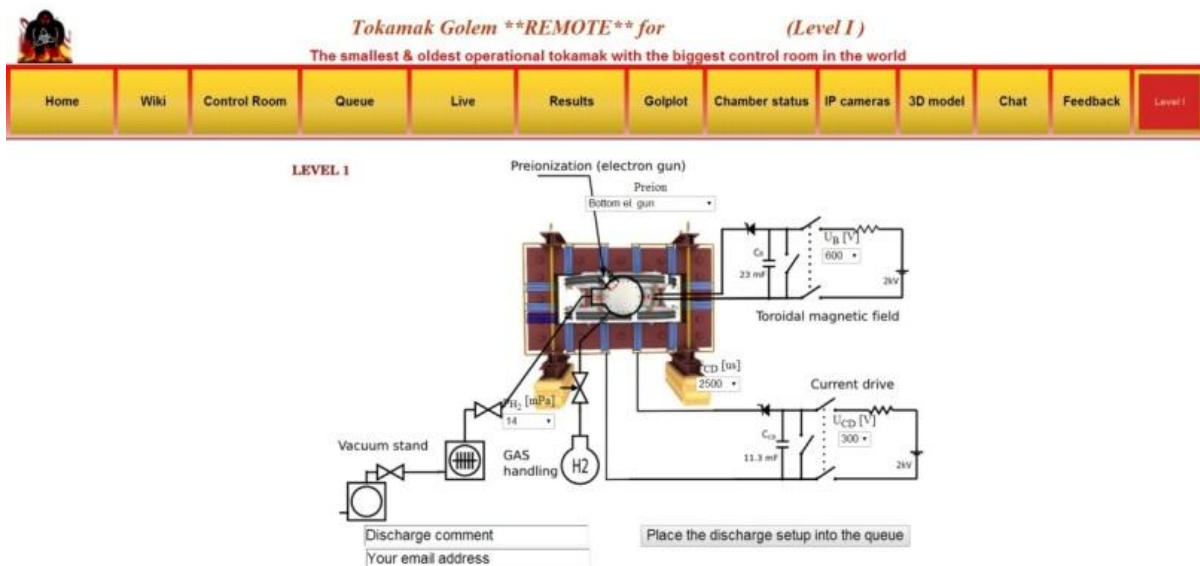


Aktuální foto golema (nahore); starší foto (dole)



Webové rozhraní pro řízení GOLEMa lze vidět na Obr. G5. Je zde model tokamaku a ukázané nastavitelné hodnoty. Lze nastavit: předionizaci na elektronovou (s elektronovým dělem dole, nahore, či oběma), mikrovlnou, různě smíšenou a bez ionizace; Napětí na kondenzátorech toroidálního magnetického pole (cívky okolo komory); Napětí na kondenzátorech proudu v plazmatu (tvořeného pomocí transformátoru); Zpoždění mezi vybíjením kondenzátorů toroidálního magnetického pole a proudu v plazmatu; Tlak pracovního plynu v komoře. K jednotlivým výstřelům lze umístit komentář a po provedení výstřelu je systém schopen vám zaslat odkaz webové adresy s daty na vámi zadaný e-mail.

Data z výstřelů, specifikace a wikipedie lze nalézt na tomto webu <http://golem.fjfi.cvut.cz/>.



Obr. G5

Projekt ITER

Výzkum a další poznání v oboru fúze a fyzika plazmatu lze provozovat pouze na větších a dokonalejších tokamacích, kde plazma dosahuje vyšších teplot a existuje po delší časové intervaly. ITER je tokamak stále ve výstavbě a bude to největší, nejsložitější, nejdokonalejší tokamak světa. Buduje se v jižní Francii v městečku Cadarache u Marseille.

Výstavba započala v roce 2007 jako projekt plně mezinárodní a plánovaný již od 80let minulého století. Dnes je to projekt, na kterém se podílí většina světa a veškerá fyzikální obec napjatě čeká na první výsledky. Očekávané dokončení pro první vytvoření plazmatu by mělo být v roce 2020 a úplné dokončení pro první spuštění fúzní reakce rokem 2027.

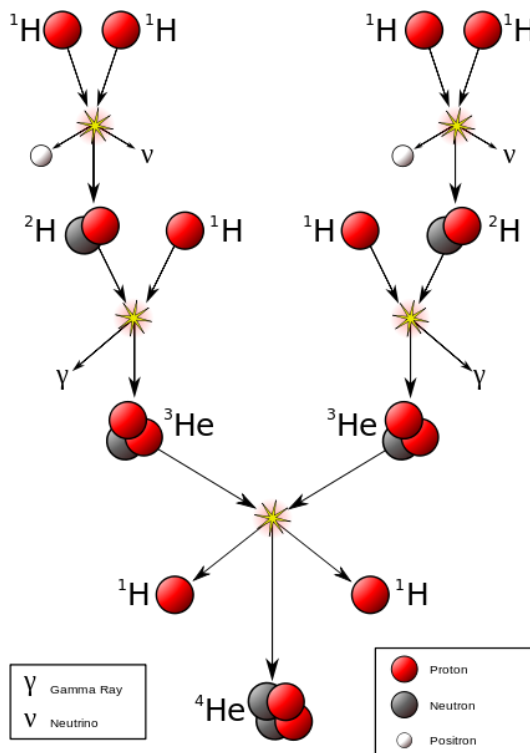
Neplánuje se při spuštění ziskové fúzní reakce zavedení do elektrické rozvodné sítě, tedy projekt ITER bude pouze pro výzkumné účely. Jako plně funkční fúzní elektrárna se plánuje následná výstavba tokamaku DEMO.

Termojaderná fúze

Jedná se o proces probíhající v hvězdách. 75% vesmírné hmoty je vodík (H) a 24% je helium (He). Při ohromných teplotách a tlacích se spustí termojaderná reakce,

kde z lehčích prvků se stávají prvky těžší. Takto vznikla veškerá hmota kolem nás (kromě H a He). Fúze je energeticky zisková pouze u prvků lehčích jak železo (tzn. s menším protonovým číslem prvku). U těžších prvků se energie musí dodávat. Syntéza těžších prvků probíhá až v konečných fázích hvězd, v supernově.

Ve hvězdách je nejčastější proces slučování vodíku v helium, který probíhá po většinu času života hvězdy, který napájí hvězdy a díky kterému hvězdy svítí. Nejprve se



sloučí 2 vodíky v deuterium, to poté v Helium 3 a to se na sléze slučuje v Helium 4. (viz. Obr. F1). Jedná se o nejzajímavější a zároveň nejčastější proces ve hvězdách.

Bohužel tento proces je pro nás stále příliš náročný na spuštění a udržení. Zatím nelze vytvořit na zemi vhodné podmínky, a tedy se v tokamacích dosahuje procesu slučování mezi deuteriem a tritiem za vzniku Helia 4, což je nejjednodušší na spuštění a udržení a zároveň je to proces s velmi dobrým ziskem energie.

Obr. F1

Technické parametry

Jak již bylo zmíněno, ITER bude největším tokamakem na světě, i jeho technické parametry budou dosahovat výrazně větších hodnot, než u dosud známých tokamaků.

Na tokamaku JET byla spuštěna termojaderná fúze o výkonu 18MW po dobu 1 sekundy. Budoucí výkon tokamaku ITER se odhaduje na 500MW při příkonu 50MW po dobu 500 sekund.

Komora bude mít tvar písmene D. Hmotnost se odhaduje na 400 tun, velikost vnějšího poloměru 19,4 m, vnitřního poloměru 6,5 m a objem 840 m³. Komoru v důsledku zahřívání plazmatu bude nutné chladit. Zde se o to bude starat masivní

chladičící systém s výkonem 1,3MW a schopností ochladit komoru na 80 K.

Toroidální magnetické pole bude tvořeno pomocí 18 supravodivých cívek a jeho indukce bude dosahovat 13,5 T.

Srovnávací tabulka parametrů různých tokamaků.

	GOLEM	COMPASS	JET	ITER	
hlavní poloměr komory	0,4	0,56	2,96	6,2	m
poloměr komory	0,06	0,2	1,25	2	m
délka výboje	0,04	0,3	60	>300	s
proud plazmatem	5	200	3200	15000	kA
tor. Mag. Pole	0,4	1,3	3,45	13,5	T

Magnetohydrodynamické studie

Magnetohydrodynamické studie (Dále jen MHD) zkoumají chování tekutin v magnetickém poli. V této práci se omezíme pouze na studium magnetického pole plazmatu pomocí již zmíněných Mirnovovo cívek.

MHD nám mohou pomoci lépe pochopit strukturu a pohyb plazmatu. Zkoumá magnetické pole plazmatu, které se přímo odvíjí od struktury a pohybu plazmatu v komoře. Zpětně lze vyhodnocovat polohu plazmatu vůči komoře, tedy lze MHD poznatků užít třeba i v stabilizaci plazmatu.

Safety Factor

V překladu bezpečnostní faktor, značí se q . Jedná se o poměr mezi rotací toroidální a poloidální, lze také vyjádřit pomocí vzorce Vz1, kde se jedná o konstanty, B_t (indukce toroidálního magnetického pole), I_p (proud v plazmatu) a hloubka v plazmatu (vzdálenost od středu; poloměr komory). Po zjednodušení pouze na okrajové plazma a jeden daný tokamak máme vzorec $q = k \frac{B_t}{I_p}$ s čímž lze velmi snadno počítat.

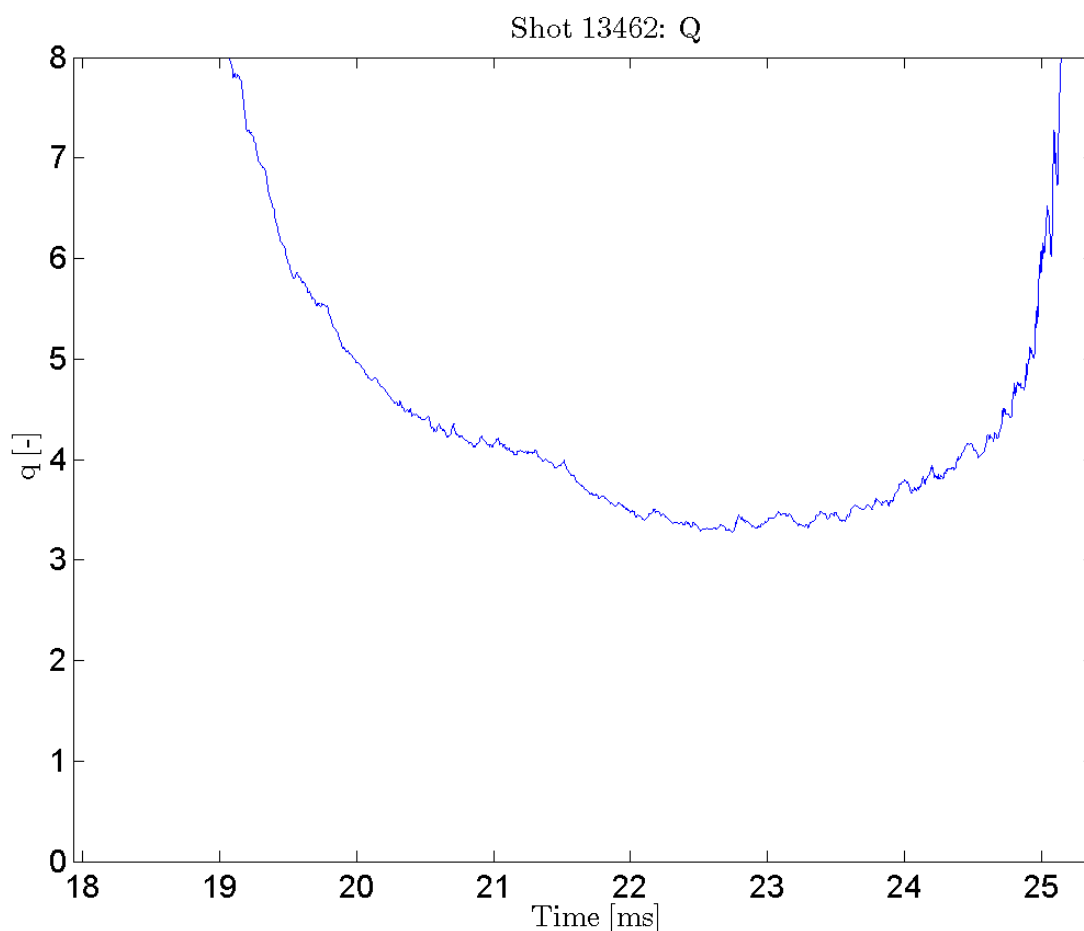
$$q = \frac{2\pi B_T}{R\mu_0 I_p} \frac{r^2}{1 - \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{\nu+1}} = k \frac{B_t}{I_p}$$

$= \frac{\text{toroidální směr (modrá)}}{\text{poloidální směr (červená)}}$

Vzorec Vz1

Safety factor, jak nám udává vzorec Vz1, klesá s hloubkou v plazmatu. Tedy safety factor na okraji plazmatu dosahuje nejvyšších hodnot a postupně hlouběji do plazmatu jeho hodnota klesá.

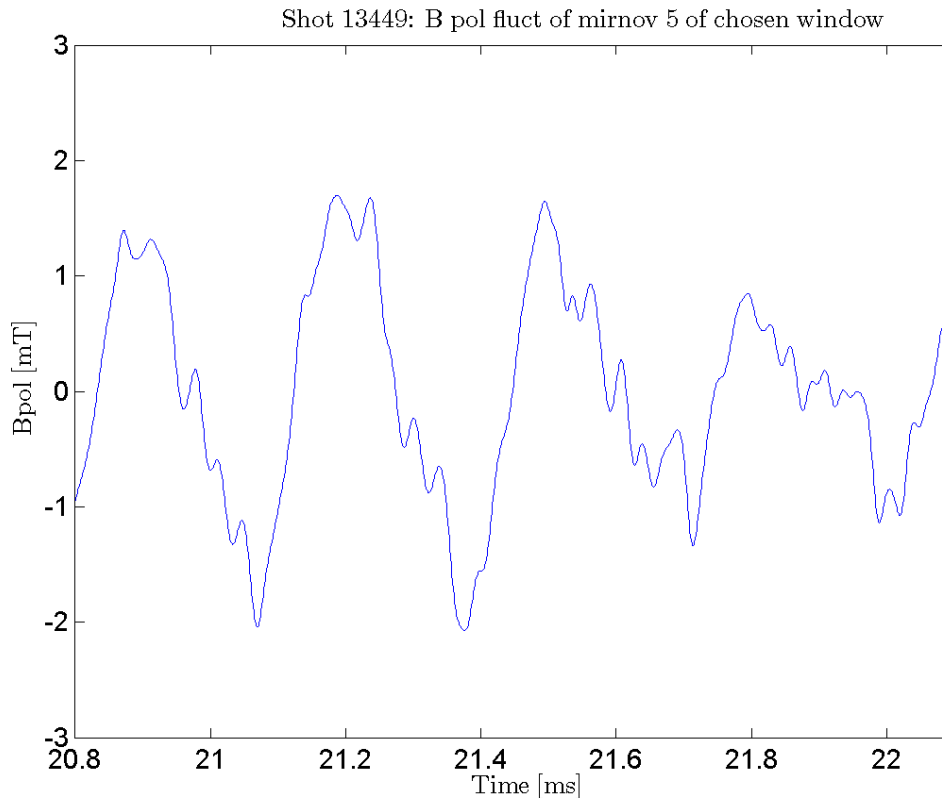
Vývoj okrajového safety factoru během jednoho výstřelu lze pozorovat na obr. G6, kde Osa X nám udává vývoj v čase, Osa Y safety factor a jedná se pouze o dobu trvání plazmatu. Lze pozorovat, že se během doby výstřelu drasticky mění. Během fáze s nejnižší hodnotou safety factoru je největší pravděpodobnost vzniku jevu zvaného magnetický ostrov.



Obr. G6

Magnetické ostrovy

V plazmatu lze nalézt zvláštní útvary tzv. *Magnetické ostrovy*. Jedná se o poruchu ve struktuře plazmatu, která se ve výsledku jeví v měřeném magnetickém poli Mirnovovo cívkami. Výstup z 5. Mirnovovo cívky je vidět na obr. G6, kde Osa X je vývoj v čase a Osa Y je indukce měřeného magnetického pole. Je zde vidět jistá periodičnost signálu, kterou v tomto případě způsobil magnetický ostrov.

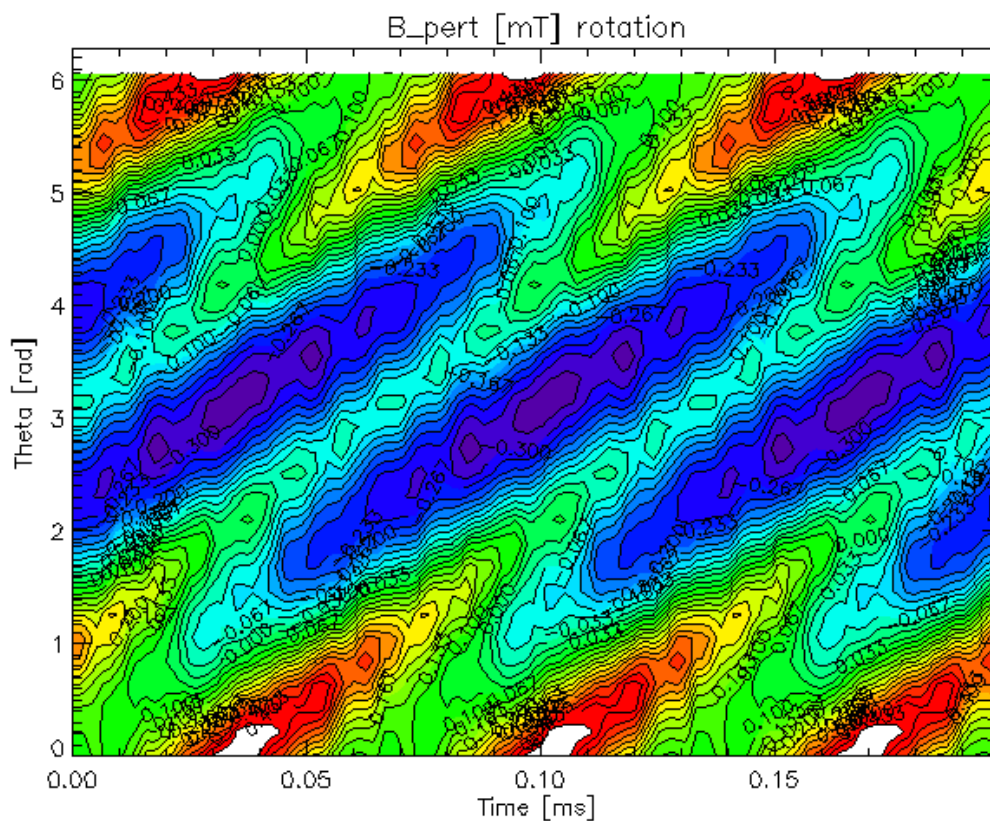


Obr. G6

Na obrázku G7 lze vidět ideální magnetický ostrov. Tento příklad bohužel nebyl naměřen, ale nasimulován Ing. Tomášem Markovičem. Osa X nám udává vývoj v čase, Osa Y jednotlivé cívky a barva (neboli Osa Z) nám udává magnetickou indukci měřeného pole na dané cívice (viz. Obr. G6 Osa Y). Lze pozorovat jistou pravidelnost a strukturu v měřených hodnotách, což je námi hledaný magnetický ostrov.

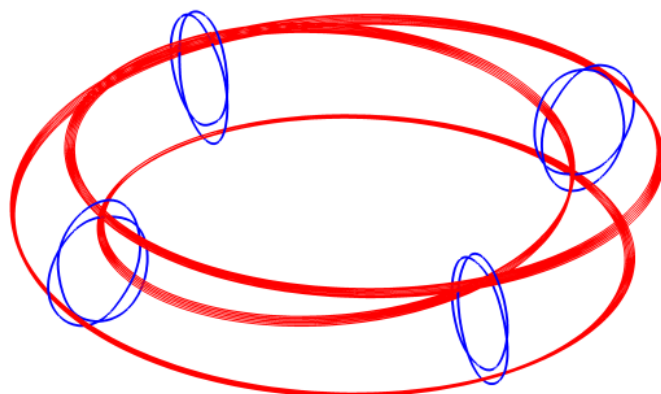
Pokud si na Obr. G7 děláme v libovolném bodě svislý řez, máme řez plazmatem a „srolování“ hodnot do kruhu by nám udávalo přesně obvod plazmatu v jednom časovém bodě. Lze pozorovat vrcholy hodnot. Magnetický ostrov je v místě červenějších hodnot a v modřejších hodnotách je magnetické pole na minimu, tudíž zde není magnetické pole intenzivní, jako v případě magnetického ostrova.

Na dalším obrázku (obr. G8) lze pozorovat dráhu pohybu magnetického ostrova, či jen pomyslného bodu, v celém plazmatu. Modrá křivka nám udává řez plazmatem a pohyb magnetického ostrova v tomto jednom bodě a zároveň takto vypadá struktura magnetického pole magnetického ostrova v řezu.



Obr. G7

Na obou obrázcích (G7, G8) lze pozorovat magnetické ostrovy s třemi vrcholy.



V značení $m=3$. Počet vrcholů magnetického ostrova udává helicity magnetického pole. Ostrov rotuje společně s plazmatem a dle poměru mezi rotací toroidální a poloidální se utvoří vrcholy magnetických ostrovů.

Obr. G8

Jelikož je magnetický ostrov jeden útvar stočený sám do sebe (viz. Obr. G8), tak pro udržení stability ostrova se musí rovnat hodnota safety factoru počtu vrcholů ostrova ($q=m$, kde q je safety factor a m je počet vrcholů). Pro safety factor >4 (jako na obr. G9) vznikne magnetický ostrov $m=4$ lehce pod povrchem plazmatu, kde je hodnota

safety factoru přesně rovna 4 a ostrov $m=3$ hlouběji, kde je safety factor přesně roven 3. Vývoj safety factoru dle poloměru v plazmatu známe, tedy lze určit poloha magnetického ostrova v plazmatu (resp. jeho vzdálenost od středu komory).

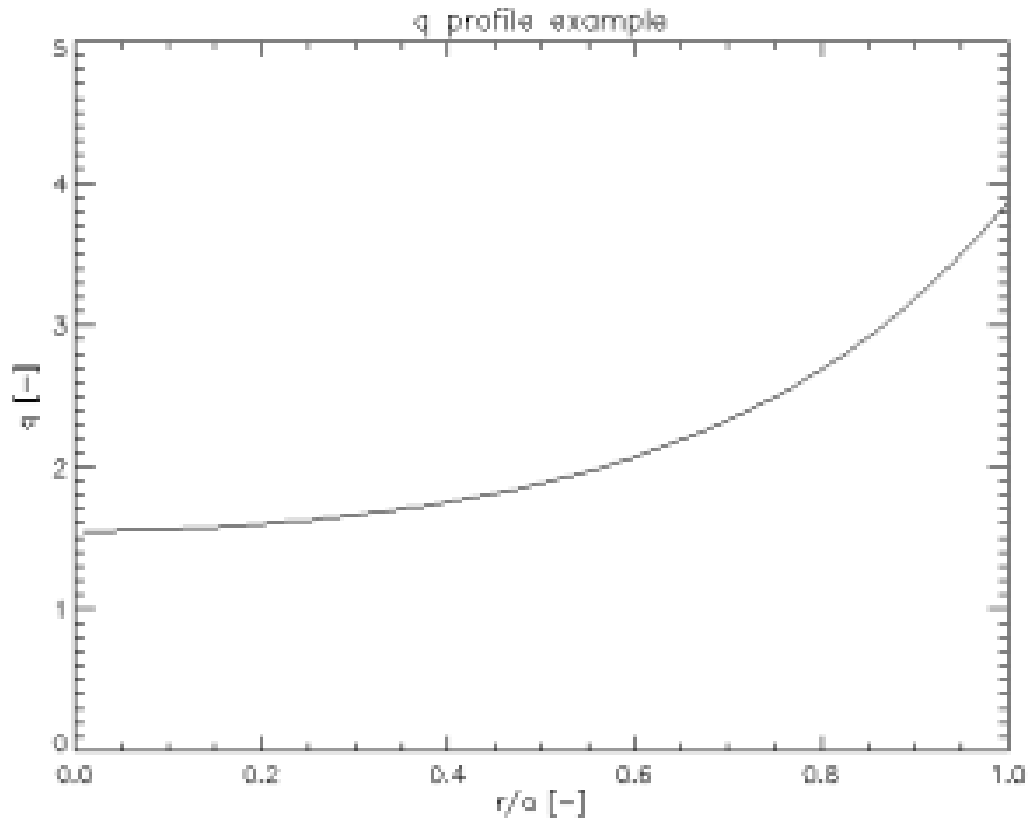
Plazma za běžných parametrů výboje vykazuje safety factor enormně vyšší než je možné pro vznik magnetických ostrovů. Jeho hodnoty se pohybují okolo hodnot $q=15$ a pouze v případě 16mirnovovo cívkami lze pozorovat magnetický ostrov pouze o $m<8$ a magnetické ostrovy o $m>5$ jsou alespoň na tokamaku GOLEM extrémně nestabilní a mnohdy zanikají velmi rychle. Nejčastější, nejstabilnější a nejlépe pozorovatelné jsou magnetické ostrovy s safety factorem a počtem vrcholů 3 nebo 4.

Pro vznik a detekci magnetických ostrovů se musí volit energie kondenzátorů šetrněji. Na tokamaku GOLEM je třeba extrémně nabít kondenzátory proudem v plazmatu a naopak kondenzátory vybíjející se do cívek toroidálního magnetického pole se nabíjejí jen částečně.

Výpočet rychlosti poloidální rotace plazmatu

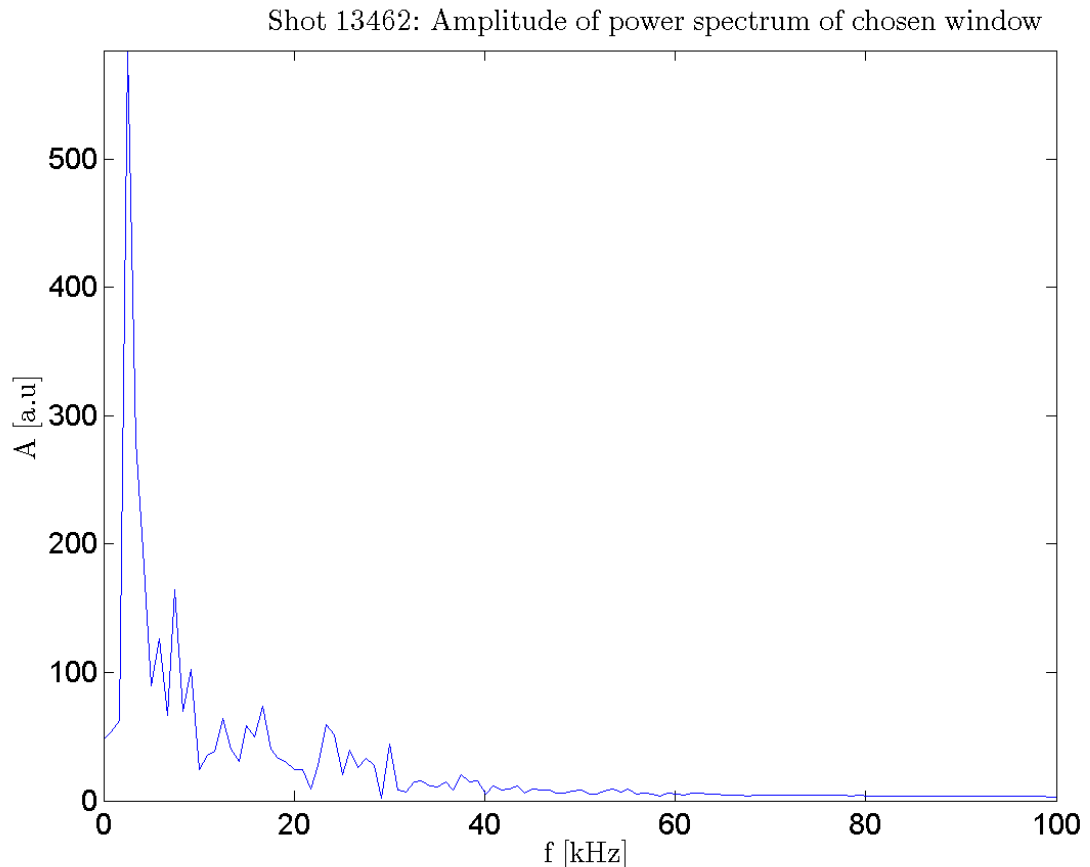
Rychlost lze vyjádřit vzorcem $v = \frac{s}{t}$. Tedy musíme zjistit polohu plazmatu pro určení jeho dráhy a čas, za který tuto dráhu urazí. Abychom tyto hodnoty získali je třeba v plazmatu najít pevný bod, který lze pozorovat a který se pohybuje společně s plazmatem. Pro tento účel lze využít magnetických ostrovů.

Dráha rotace magnetického ostrova je rovna obvodu kruhu, kde poloměr lze zjistit pomocí hodnoty safety factoru a počtu vrcholů magnetického ostrova (jak bylo zmíněno v předchozí kapitole). Vyjádření r ze vzorce Vz1 je příliš komplikované, naštěstí lze počítačem vytvořit velmi přesný graf vývoje safety factoru s hloubkou v plazmatu (viz. Obr. G9) a porovnáváním jsme schopni velmi přesně určit polohu v plazmatu.



Obr. G9

Čas oběhu lze snadno zjistit z rozdílu časů jednoho daného vrcholu ostrova, nebo rozdílu časů dvou vedlejších vrcholů, kde ještě je nezbytné vynásobit počtem vrcholů (vzorec $T = \Delta t * m$). Způsob je to možný a funkční, jenže pro počítač značně komplikovaný a je nutné pokaždé ho provádět vlastnoručně, což způsobuje nepřesnosti, tudíž byla zvolena možnost určení frekvence magnetického ostrova pomocí funkce Fast fourier transform (dále jen FFT). Tato funkce vyjádří dominanci frekvencí v zadaných hodnotách. Příklad výstupu FFT na Obr. G10, kde na Ose X jsou frekvence a na Ose Y jejich četnost. Hodnota frekvence, která dosahuje nejvyšších hodnot na Ose Y, je frekvence magnetického ostrova. Přesněji je to frekvence všech vrcholů magnetického ostrova, abychom získali frekvenci samotného magnetického ostrova je třeba ještě tuto frekvenci vydělit počtem vrcholů.



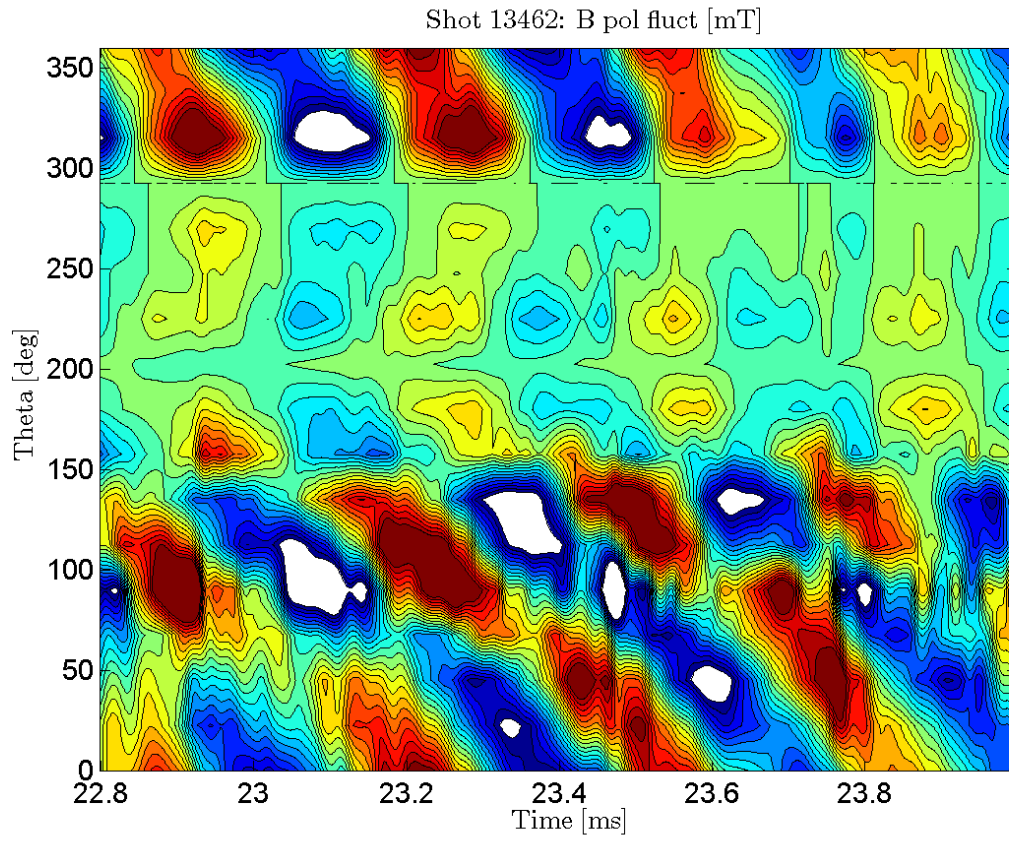
Obr. G10

Výsledky:

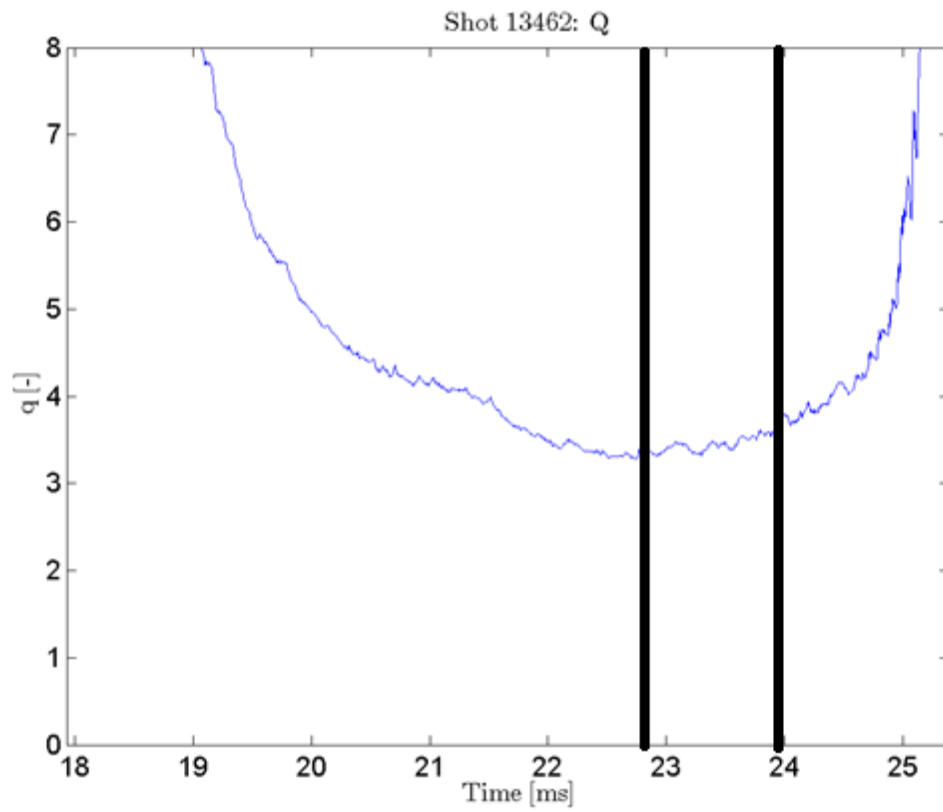
Výstřel 13462

Na grafu V1 lze vidět na tokamaku GOLEM typický a dobře viditelný magnetický ostrov s 3 vrcholy ($m=3$). Pro θ 150-300 jsou hodnoty výrazně slabší, jelikož se jedná o spodní cívky a plazma v tokamaku GOLEM stoupá vzhůru fyzikálním jevem zvaným drift částic.

Safety factor je pro toto období mírně větší jak 3 (viz Graf V2) a magnetický ostrov se nachází pouze mírně pod povrchem plazmatu. Z výpočtu vychází $r=7,82\text{cm}$. Vedlejší poloměr komory, tedy poloměr plazmatu je $a=8\text{cm}$ a $r/a=0,9775$, tudíž je ostrov znatelně u okraje plazmatu a proto je i snadno detekovatelný.

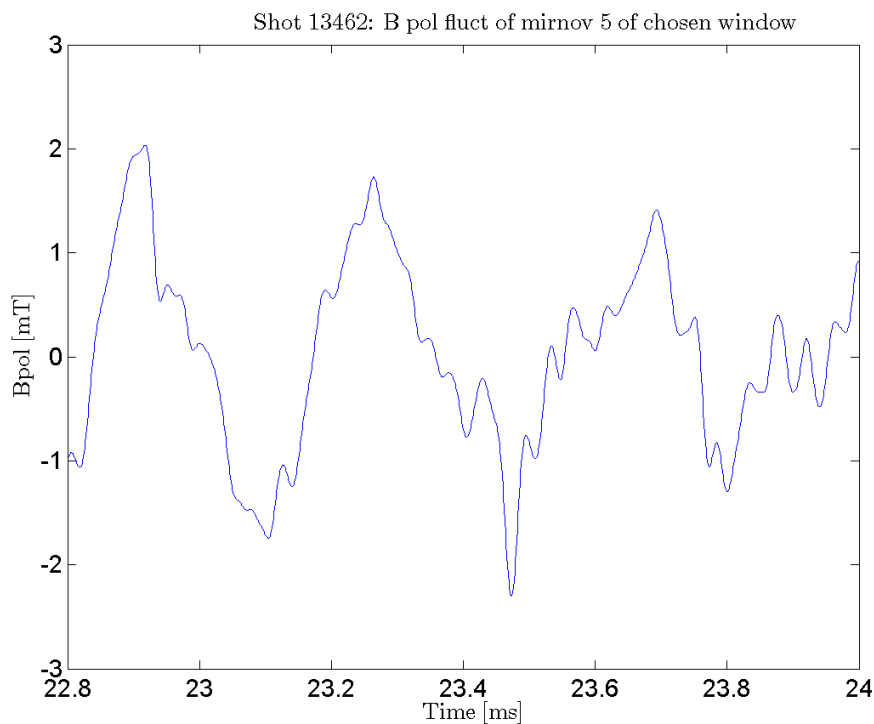


Graf V1

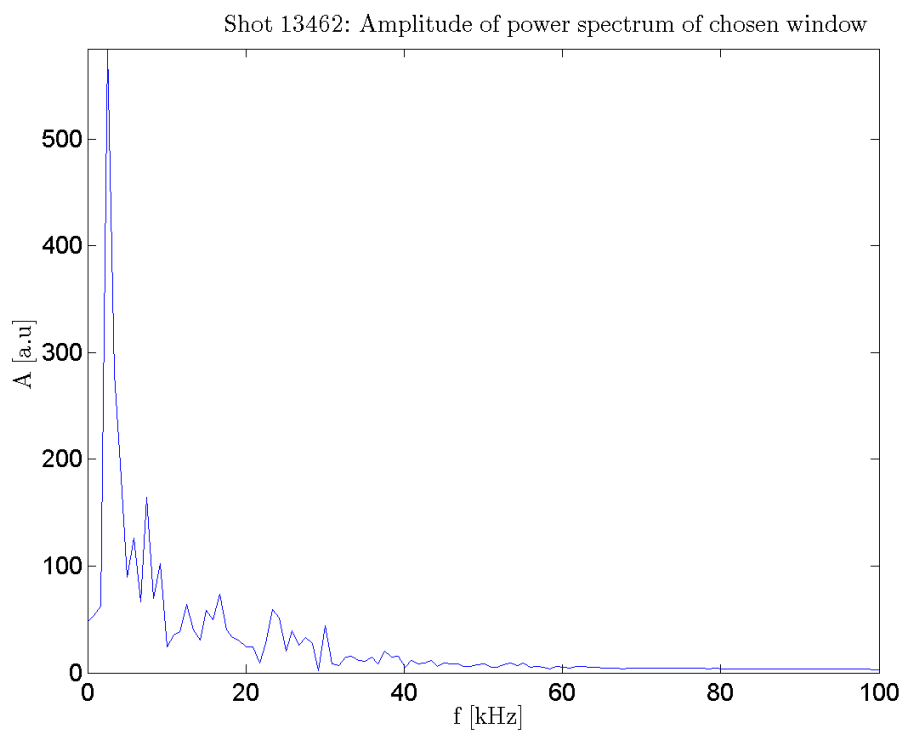


Graf V2

Pro ukázkou na Grafu V3 je samotný výstup z 5. Mirnovovo cívky, která je ze všech cívek nejvýše a má i nejintenzivnější hodnoty, dle kterého jsem pomocí FFT určoval frekvenci ostrova. Výstup z FFT lze vidět na Grafu V4. 5. Frekvence ostrova je $f=834\text{Hz}$. Nyní již máme veškeré potřebné hodnoty k určení rotace, která je $v=410\text{m/s}$.



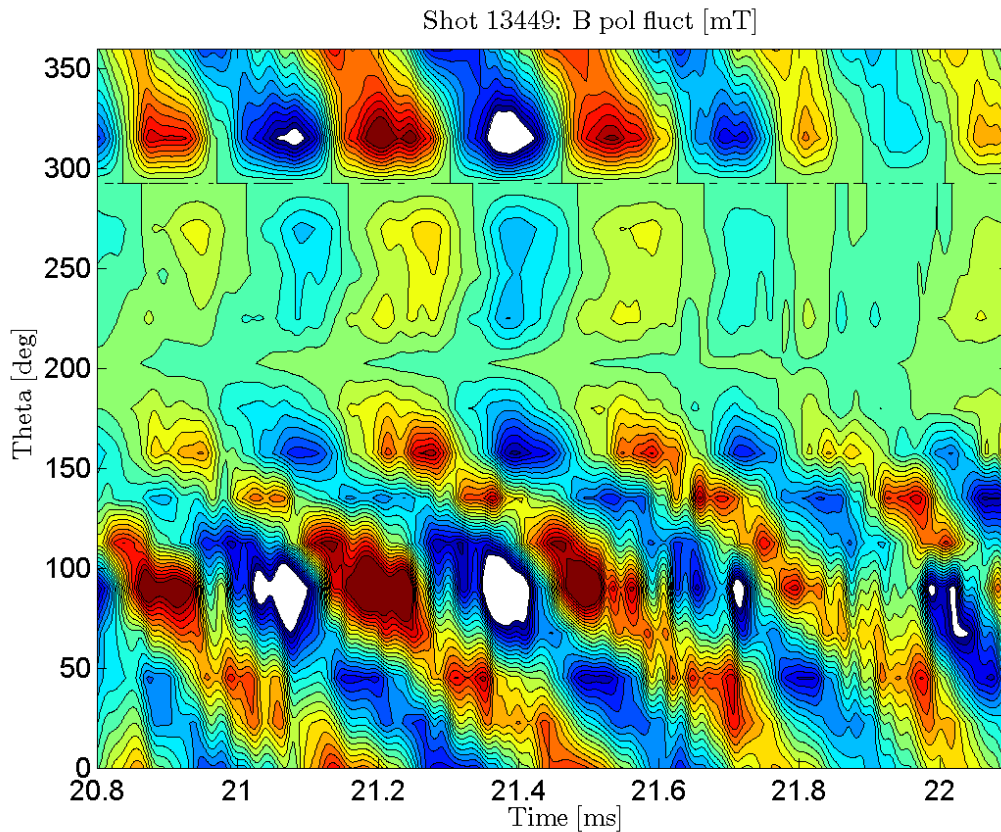
Graf V3



Graf V4

Výstřel 13449

Zde se jedná o ostrov s 4 vrcholy ($m=4$). Již z grafu V5 lze vidět oproti předchozímu grafu V1 výrazné zhuštění vrcholů ostrova, které nám způsobuje horší přehlednost grafu. Naneštěstí je tento ostrov nestabilním a již v průběhu své existence má tendence zanikat.

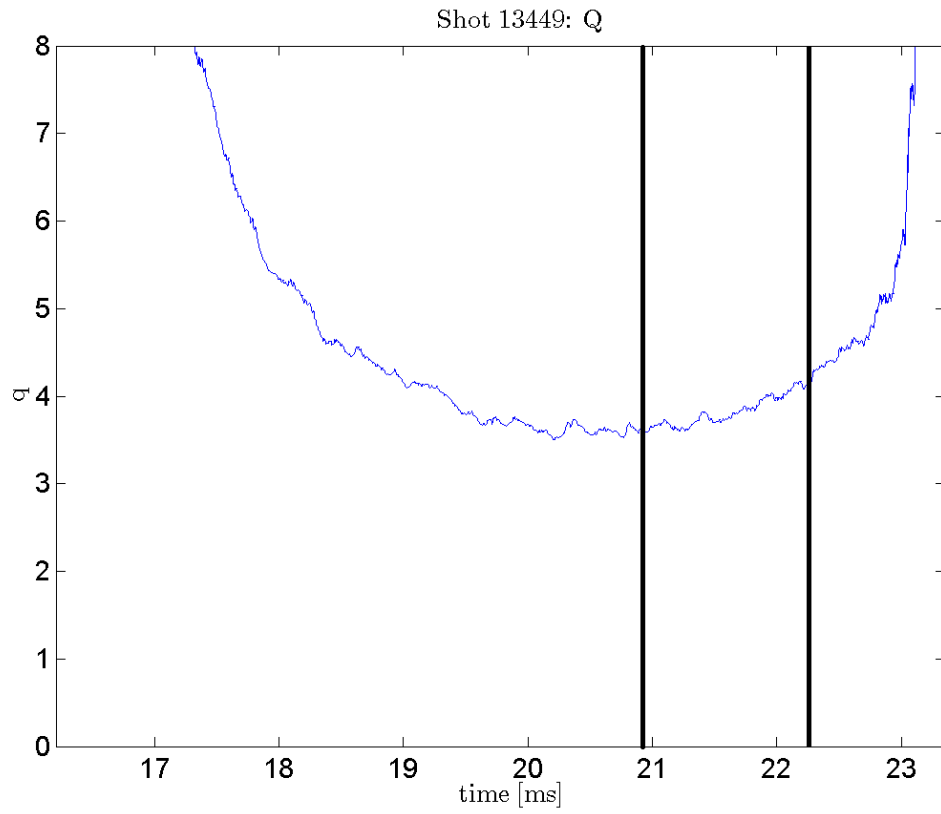


Graf V5

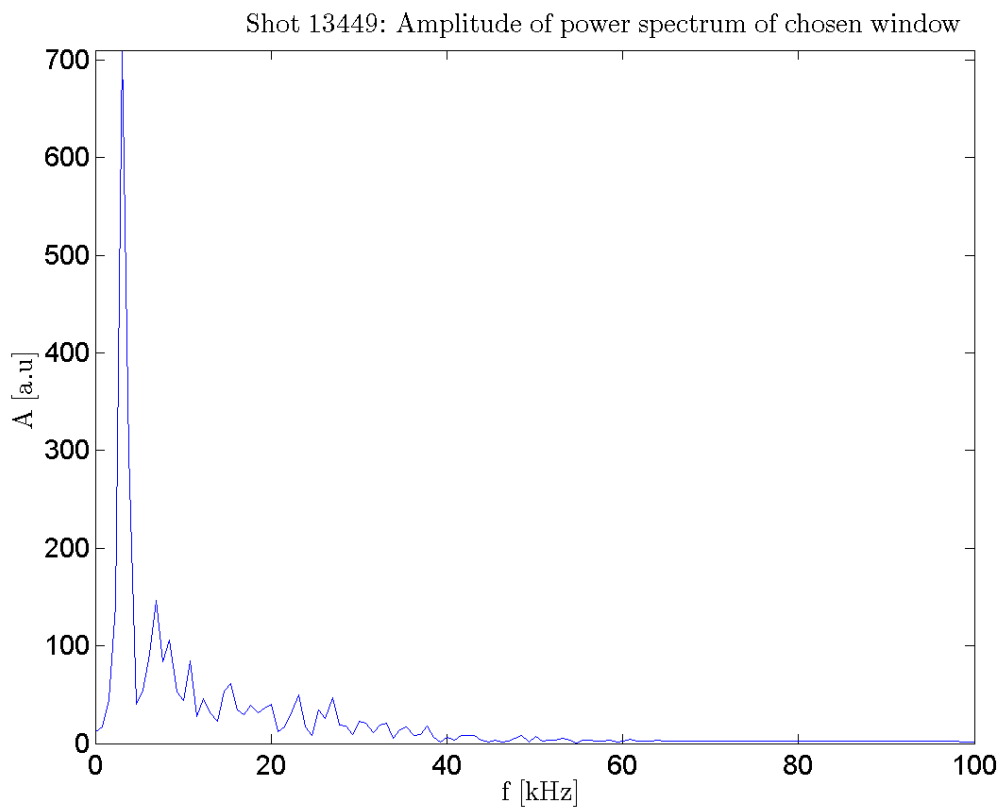
Magnetický ostrov vznikl v čase 20,8ms od započetí měření a zanikl 22,2ms po započetí měření. Může se zdát, že magnetický ostrov má velmi krátkou životnost v plazmatu (v tomto případě pouze 1,4ms), jenže život celého plazmatu trval 7,1ms. Tokamak GOLEM je stále malý tokamak a v něm plazma existuje pouze po velmi krátké časové intervaly (standardně 5-15ms).

Z grafu V6 lze vidět, že safety factor dosahoval hodnot 4 i při vrcholech magnetického ostrova $m=4$. Jedná se totiž o magnetický ostrov absolutně na povrchu plazmatu, kde $r=8\text{cm}$ a $r/a=1$.

Frekvence ostrova v tomto případě je rovna $f=770\text{Hz}$ (viz Graf V7) a rychlost byla $v=411\text{m/s}$.



Graf V6



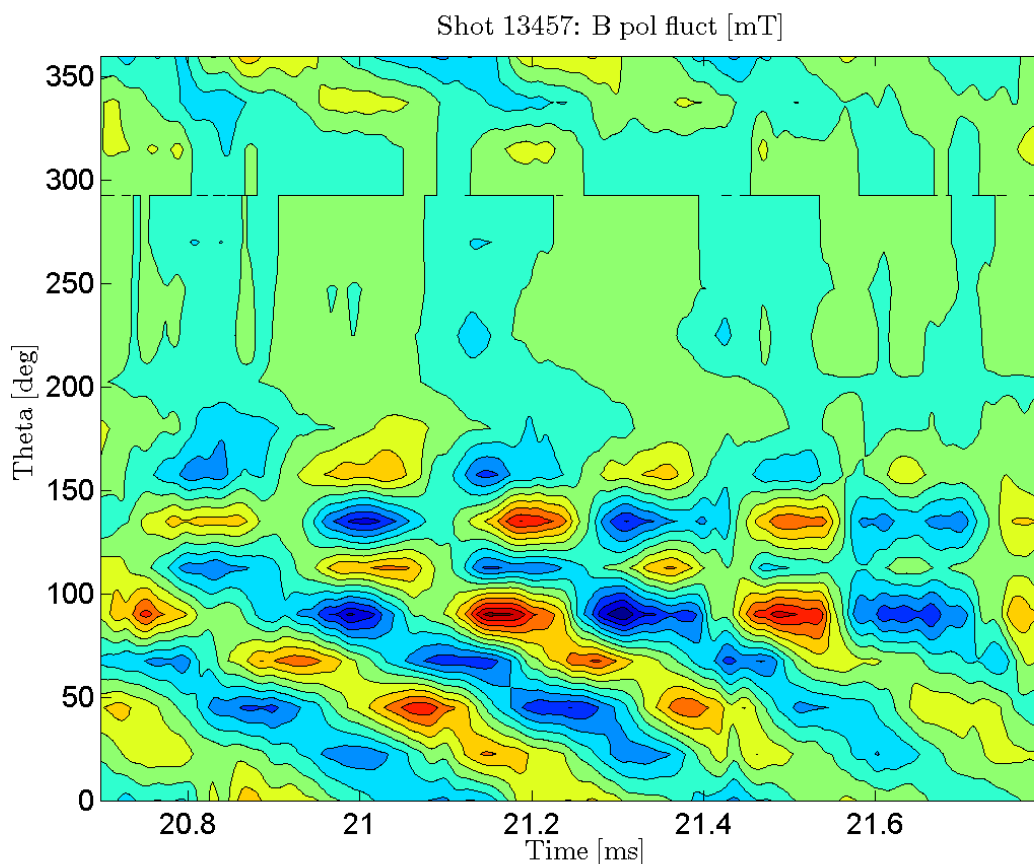
Graf V7

Výstřel 13457

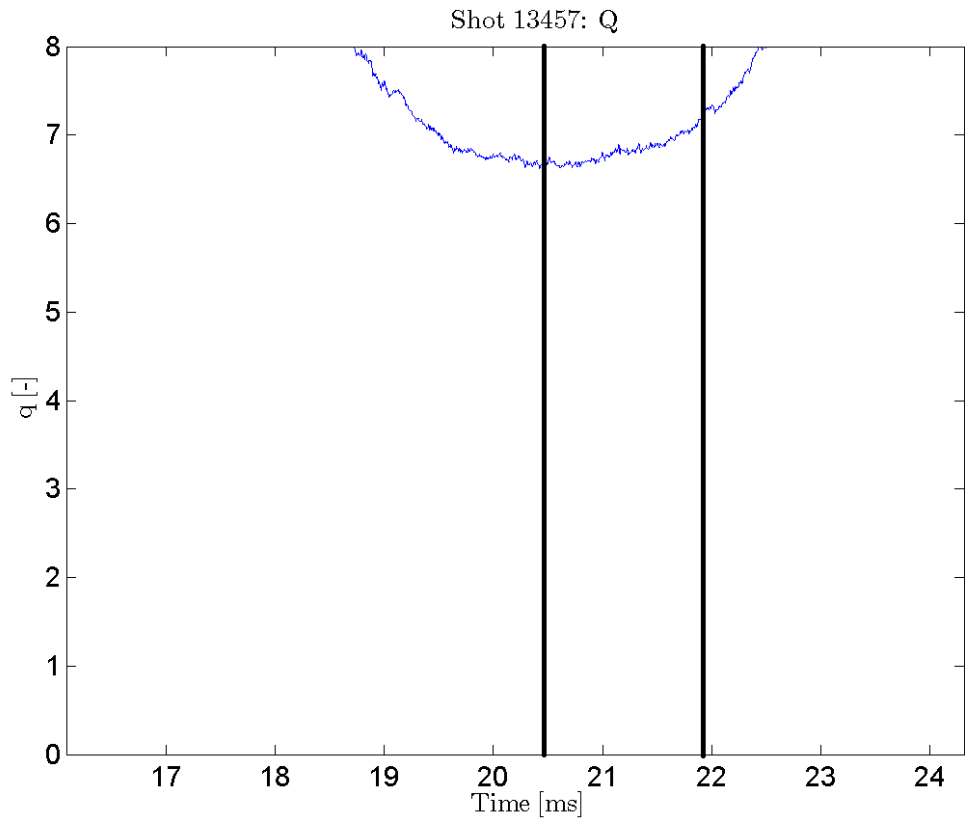
Ve výstřelu 13457 se nachází velice zajímavý magnetický ostrov. Vrcholů má 6 ($m=6$). Tento počet vrcholů je již špatně změřitelný i viditelný. Při pečlivém studování grafu V8 lze pozorovat, že ostrov zanikl dříve, než dokázal provést celou otočku ve směru poloidálních.

Safety factor se zde již téměř nevešel do rozsahu definovaného grafu V9 a jeho hodnota dosahovala $q=7$. Ostrov je oproti předchozím případům hlouběji v plazmatu, hodnota poloměru je $r=7,36\text{cm}$ a poměr je roven $r/a=0,92$.

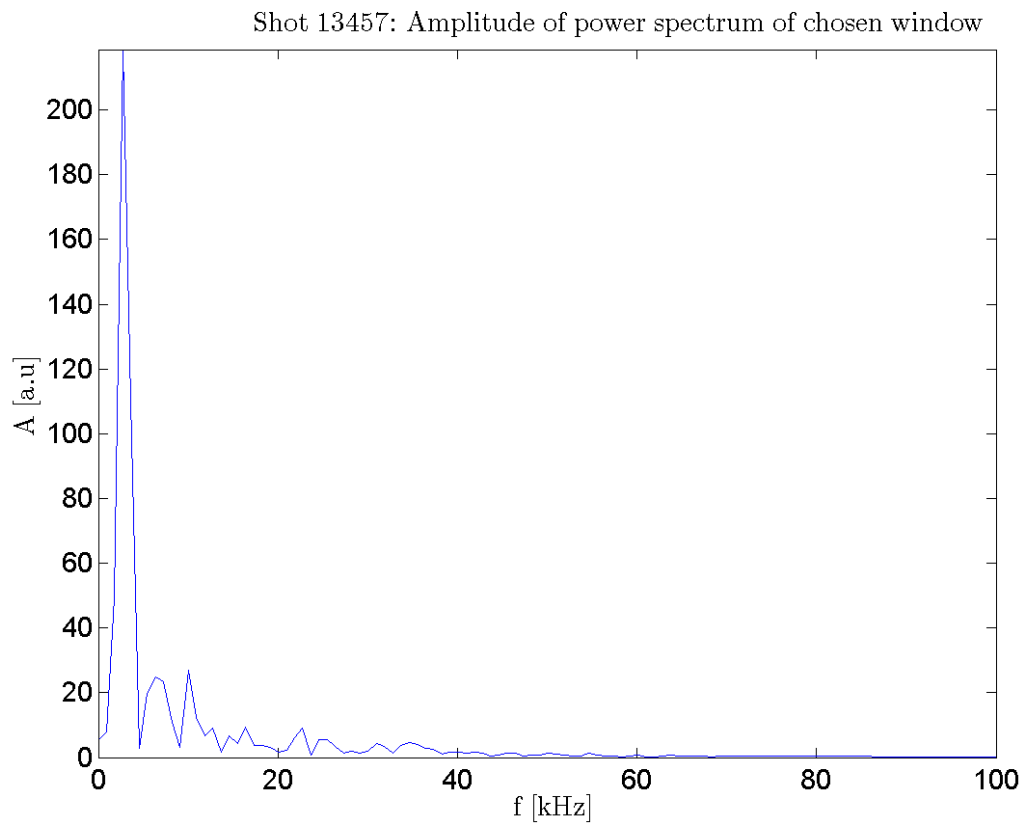
Frekvence ostrova byla $f=455\text{Hz}$ (viz graf V10), což je výrazně méně než v předchozích případech. Je to způsobeno již vysokým safety factorem a menším proudem v plazmatu, a tedy slabším poloidálním magnetickým polem. Při těchto parametrech výstřelu již klesá rychlost poloidální rotace, která je $v=223\text{m/s}$.



Graf V8



Graf V9



Graf V10

Závěr

V tokamaku lze vytvořit plazma a za různých podmínek se v plazmatu dějí různé jevy. V případě slabého toroidálního magnetického pole a zároveň silného proudu v plazmatu vznikají útvary zvané magnetické ostrovy. Jsou to útvary v plazmatu stabilní, společně se zbytkem plazmatu rotují a dají se velmi snadno pozorovat. Ideální kombinace pro studium pohybu plazmatu, který se dělí na pohyb poloidální a toroidální.

Poloidální rotace plazmatu lze určit z rychlosti pohybu jednotlivého vrcholu magnetického ostrova a jeho polohy v plazmatu, která nám určí dráhu pohybu. Výsledná rotace se poté pohybuje v rámci stovek m/s, což je enormní hodnota na částice, které během přibližně 10 milisekund se urychlili z klidu do této rychlosti pouze magnetickými poli.

Použitá literatura

- Načteno z Tokamak GOLEM wiki: <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/>
- Načteno z http://mariakapajeva.files.wordpress.com/2012/07/day1-tokamak_schema.gif
- ITER project*. (25. 06 2007). Načteno z Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique: <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/iter/iter02.htm>
- Tokamak GOLEM*. (2008). Načteno z GOLEM tokamak na FJFI CVUT: <http://golem.fjfi.cvut.cz/>
- Tokamak TM-1 MH*. (31. 01 2013). Načteno z Wikipedia: http://cs.wikipedia.org/wiki/Tokamak_TM-1_MH
- ITER*. (13. 02 2014). Načteno z Wikipedia: <http://en.wikipedia.org/wiki/ITER>
- Jaderná elektrárna Temelín*. (19. 02 2014). Načteno z Wikipedia: http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_Temel%C3%ADn
- Joint European Torus*. (08. 02 2014). Načteno z Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Joint_European_Torus
- Pinch (plasma physics)*. (22. 02 2014). Načteno z Wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Pinch_\(plasma_physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Pinch_(plasma_physics))
- Plazma*. (31. 01 2014). Načteno z Wikipedia: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Plazma>
- Termonukleární fúze*. (16. 02 2014). Načteno z Wikipedia: http://cs.wikipedia.org/wiki/Termonukle%C3%A1rn%C3%AD_f%C3%BAze
- Milan Řípa, R. P. (2008). *Instalace tokamaku COMPASS v Praze*. Načteno z INSTITUTE OF PLASMA PHYSICS: http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/clanky/Instalace_Compass.pdf
- PLAZMOVÝ VESMÍR*. Načteno z Aldebaran: <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/plazma/index.html>
- TOKAMAK COMPASS*. Načteno z INSTITUTE OF PLASMA PHYSICS: http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/index?m=comp&exp_menu=1
- Tokamak GOLEM remote*. Načteno z http://golem.fjfi.cvut.cz/roperation/tasks/STUDENTS/1113MatyasLucie/Level_1/index.php
- Tokamak schema*. Načteno z http://mariakapajeva.files.wordpress.com/2012/07/day1-tokamak_schema.gif