

Bolometrie na tokamaku Golem

Bořek Leitel

June 23, 2014

Abstract

Úvod

Energetická spotřeba lidstva neustále roste s tím, jak se společnost vyvíjí. Hlavními zdroji energie jsou dnes fosilní paliva, které se díky jejich dostupnosti vyplatí těžit. Ubývání fosilních paliv vyvíjí potřebu hledat alternativní a stabilní energetické zdroje. **#Možná nějaká zmínka i o atraktivnosti obnovitelných zdrojů#** Stabilní proto, že mají-li vykrýt hlavní spotřebu elektrické energie, není možné pro tyto účely použít na počasí a denní době závislé obnovitelné zdroje typu větrných či solárních elektráren.

Téměř století víme, že zdrojem energie Slunce je termojaderná fúze lehkých atomových jader. Pro uskutečnění takových reakcí na Zemi je zapotřebí vysoká teplota a hustota hmoty, která se **+možná: za těchto podmínek nutně+** nachází v plazmatickém stavu. Plazma je nutno **+vytvořit,+** zahřát **+a udržet po extrémně dlouhou dobu+** a **+přitom+** zároveň držet od stěn zařízení, aby nedošlo k jeho ochlazení **#anebo k roztavení komory#**. Dnes existují dvě **#hlavní#** možnosti, jak plazma držet a to magneticky a inerciálně, přitom magnetické udržení plazmatu je s ~~toroidálním zařízením~~ jménem tokamak zatím nejbližší ekonomickému využití. Jako palivo by se přitom využívalo **+izotopy+** vodíku **+D+**, kterého je dostatek vázaného ve vodě **+a T, který na Zemi není a musel by se "nějak" vyrábět+**. Termojaderná fúze by tak mohla být takřka neomezeným zdrojem energie.

Fyzika tokamaků se neobejde bez informací o plazmatu. Vzniklo tedy celé odvětví, zabývající se jeho diagnostikou. k tomu je mimo jiné zapotřebí znát jeho polohu, radiační profil a profil magnetických siločar. Metody, jak plazma zkoumat, se dělí na pasivní a aktivní, podle toho, zda mají na měření vliv, či nikoliv. Plazma zároveň emituje záření, které se z větší části podílí na tepelných ztrátách. Rozborem vyzařovaného spektra je pak možné zjistit složení plazmatu, tj. zastoupení jednotlivých prvků, a tedy i složení nežádoucích příměsí, podílejících se na nestabilitách a rychlém odvodu tepla.

Aby bylo možné měřit energii záření a dopadajících částic, byly s rozvojem astronomie vyvinuty detektory nazvané bolometry. Původní detektor z konce 19. stol. byl zdokonalen a s vývojem polovodičů dnes existuje řada bolometrů fungujících na různých fyzikálních principech. Detektory se pak odlišují zejména dle energie detekovaného záření a částic, podle pracovních teplot a rychlostí odezvy. Bolometry mají velký přínos ~~mají~~ jak pro astronomii, tak pro fyziku plazmatu na Zemi.

Konkrétním případem využití je např. měření vyzářeného výkonu plazmatu v tokamacích,

což napomáhá určit celkovou energetickou bilanci plazmatu [7], tedy rozdíl dodaného výkonu na jeho ohřev a ztrát tepla/*možná lépe energie* zářením a částicemi, které opustili/*y* magnetické pole. Dnešní typy bolometrů a datových sběrů umožňují sledování plazmatu s velkými snímkovacími frekvencemi řádu MHz [7]. Dnes jsou vyráběny i velmi malé detektory, jejichž řazením do série vznikají detektorová pole, která lze umístit do diagnostických portů tokamaku. Jelikož není možné rozmístění detektorů kolem celého zařízení, uvažujeme idealizaci, při níž předpokládáme, že se sledované vlastnosti plazmatu po celé ose komory tokamaku, příliš nemění a detektorová pole se proto umísťují tak, aby sledovali/*a* plazma v poloidálním řezu, tedy kolmo na osu komory. Přitom je žádoucí, aby na každý detektor v sérii dopadalo záření jen z jisté výšece komory. K tomu se využívá princip kamery obskury. Díváme-li se poté na plazma ve stejném poloidálním řezu z několika míst, je možné provést tomografickou rekonstrukci profilu vyzařování plazmatu.

Pro sledování rychlých změn ve vyzařování plazmatu, musí detektor být málo citlivý na částice, mít rychlou časovou odezvu a stabilní poměr výkonu ku energii dopadajícího záření v oblasti pozorovaného spektra. Tyto požadavky splňují rychlé fotodiody AXUV **#přidejte odkaz na nějaký datasheet #**. Zvláštní chování plazmatu jako jsou transportní jevy, vznik nestabilit a vyzařování nečistot se projeví na jeho radiačním profilu. Tyto jevy zároveň probíhají velmi rychle. Právě proto je důležité mít informace o plazmatu v co nejkratších intervalech během výboje. Často se využívá několik typů diagnostik, které se porovnávají.

Tokamak Golem je jedním z malých výukových tokamaků, jejichž smysl je jak experimentální, tak **edukativní/*vzdělávací***. Na tokamaku Golem bude v první fázi instalováno jedno pole diod AXUV20EL, které již bylo využito na tokamaku CASTOR, původní verzi tokamaku GOLEM. Hlavní citlivost detektoru je v oblasti UV a měkkých rentgenů, což odpovídá vyzařovanému spektru při standardním výboji na tokamaku GOLEM. Pole je nejprve nutné zkalibrovat z hlediska umístění detektoru vůči přírubě diagnostického portu. V druhé fázi proběhne zařazení bolometrických měření do systému již používaných diagnostik. K rekonstrukci profilu výkonu vyzařovaného plazmatem poslouží Abelova inverzní transformace. Rychlost odezvy detektoru v řádu MHz umožní sledovat časový vývoj profilu během výboje, jehož běžná délka je na tokamaku GOLEM cca 15 ms. Pro kontrolu určené polohy plazmatu poslouží data z Mirnovových cívek a rychlé kamery. Budou-li měření úspěšná, přijede na řadu třetí fáze, tj. využití dvou nových polí AXUV diod a jejich aplikace pro tomografickou rekonstrukci profilu vyzařovaného výkonu plazmatu.

Obsah

Úvod	1
1 Termojaderná fúze	5
1.1 Plazma	6
1.1.1 Vlastnosti plazmatu	6
1.1.2 Vyzařování plazmatu	7
1.2 Tokamaky	8
1.2.1 Popis tokamaku	9
1.2.2 Diagnostika plazmatu	10
1.2.3 Tokamak Golem	11
1.2.4 Diagnostika plazmatu na tokamaku Golem	13
2 Bolometrie	15
2.1 AXUV diody	16
2.1.1 Účinnost a citlivost AXUV	16
2.1.2 Parametry použitých fotodiód	18
2.2 Camera obscura	18
2.2.1 parametry detektorového krytu	19
2.2.2 geometrie	19
2.3 Zesilovač	21
2.3.1 Test zesilovače vlastní konstrukce	21
2.3.2 Datový sběr PAPOUCH	21
2.4 Experimentální uspořádání	21
2.5 Výsledky měření	21
3 Algoritmy na zpracování signálu	22
3.0.1 Abelova symetrická inverze	22
3.0.2 Abelova asymetrická inverze	22
3.0.3 Cormackova metoda	22
4 Bolometrie na tokamaku GOLEM	23
4.1 Geometrie	23
4.2 Aplikace na naměřená data	23
Závěr	24

Seznam použitých zdrojů	25
Přílohy	26

Chapter 1

Termojaderná fúze

Termojadernými fúzními reakcemi označujeme soubor jaderných reakcí, probíhajících za vysokých teplot, při nichž dochází ke sloučení atomových jader a uvolnění vazebné energie. Za takových podmínek hmoty nachází v plazmatickém stavu. Nutnou podmínkou pro sloučení jader je jejich dostatečně velká tepelná rychlost k překonání Coulombovy bariéry, která neumožňuje jádrům přiblížit se na malé vzdálenosti. Elektrická **možná odpudivá** síla je v porovnání se silnou interakcí nepatrná, ale dosah jaderných sil je velmi malý. Označíme-li r vzdálenost od středu jádra, pak pro r větší než jisté R jsou jaderné síly oproti jiným zanedbatelné. Dobrý odhad pro takové R poskytuje kapkový model jádra, jenž jádro uvažuje jako nestlačitelnou kapalinu, potom

$$R \approx r_0 A^{1/3}, \quad (1.1)$$

kde $r_0 = (1,52 \pm 0,08) \cdot 10^{-15}$, A je nukleonové číslo **tady něco chybí, ne?** více např. v klasické učebnici [6].

Nejmenší prahové energie, potřebné k překonání Coulombovy bariéry mají reakce izotopů vodíku a helia **nerozumím**. Velké zastoupení vodíku na Zemi předurčuje termojadernou fúzi k jejímu energetickému využití. Pro první termojadernou elektrárnu se uvažuje reakce D-T (2) **Jednotný styl odkazů - určité to dělejte přes bibtex**, která má z vodíkových reakcí nejmenší požadavky na uskutečnění.



Komentář: Součet dává 17.6 MeV!!

Pro uskutečnění termojaderné fúze na Zemi je zapotřebí vysokých teplot a hustot plazmatu. Za takových podmínek se ~~vylučuje~~ je vyloučen* přímý kontakt s jinou hmotou. K ~~tomu~~ takovému způsobu udržení* se využívá tzv. inerciální ~~a~~/*či* magnetický způsob udržení. V prvním případě je hmoty držena setrvačností (inerciálně) a ohřev ~~plazmatu~~/*to není šťastné*, které se umísťuje do pozlaceného válcového terče zvaného Hohlraum v podobě zmražené vodíkové kuličky, zajišťují výkonné, dnes často neodymové, lasery. Energie laserů je fokusována přímo na palivo nebo do vnitřních stěn válečku, kde vzniklé záření rovnoměrně odpařuje povrch kuličky. Jak při přímé tak nepřímé inerciální fúzi dochází k velmi rychlému

stlačení paliva díky rychle se odpařujícímu povrchu, k implozi a následnému zapálení termojaderné reakce [1]. **+Velkým+** Problémem inerciální fúze je fokusace laserového svazku. Bylo sice dosaženo stavu, kdy energie reakce byla větší než energie spotřebovaná na ohřev průřezu terče, ale díky velkému rozptylu svazku byla celková bilance nepříznivá.

Jinou možností jak plazma držet je pomocí silného magnetického pole. Nabitě částice sledují magnetické siločáry a to **+jim+** zabraňuje uniknout. **!Magnetiké!** pole přitom může být tzv. otevřené s volnými konci v případě pinčů, nebo uzavřené jako např. u tokamaků či stellarátorů. Od padesátých let minulého století tak byla vyvinuta řada zařízení, jak s otevřeným tak uzavřeným magnetickým polem. Zatím nejbliže **+konečnému řešení+** fúzní elektrárně je typ tokamak.

1.1 Plazma

1.1.1 Vlastnosti plazmatu

Plazmatem označujeme kvazineutrální plyn elektronů, iontů a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování [4]. Díky volným elektronům vede plazma elektrický proud. **#tuto větu rozvinout nebo vyhodit, nehodí se sem.#**

Kvazineutralitou rozumíme přibližnou rovnost koncentrací záporně nabitých elektronů a pozitivně nabitých iontů v dostatečně velkém objemu plazmatu, tedy s větším rozměrem než tzv. Debyova délka (viz [4]). Pro případ s kladnými ionty s různými náboji jader Q_i **+s hustotami** n_i **+** můžeme podmínku kvazineutrality zapsat ve tvaru

$$\sum_{i=0}^n Q_i n_i - e n_e = 0, \quad (1.3)$$

kde je e je náboj elektronu **+**, n_e **je ... a sčítáme přes ...+**.

Na rozdíl od neutrálního plynu, kde reakce na vnější síly je z okraje objemu dále distribuována srážkami, v plazmatu vznikají posunem nabitých částic elektrická pole, která působí na zbytek objemu na dálku. Tento způsob chování plazmatu nazýváme kolektivním.

Na Zemi se s plazmatem setkáme v několika případech, jako jsou kanály blesků, výbojkové trubice nebo **+ve speciálních+** laboratoře. Ve ∇V směru se plazma vyskytuje ve velké míře např. v podobě hvězd a mlhovin. Díky svým vlastnostem a volnému výskytu je proto označováno jako čtvrté skupenství hmoty.

Plazma dále charakterizujeme jeho hustotou **#uvést veličinu#**, teplotou elektronů T_e resp. iontů T_i a poměrem koncentrací nabitých a neutrálních částic n_i/n_n tzv. stupněm ionizace. Důvodem, proč se plazma na Zemi samostatně nevyskytuje jsou právě podmínky pro velký stupeň ionizace, který definuje Sahaova rovnice

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2,4 \times 10^{21} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-U_i/KT}, \quad (1.4)$$

kde U_i je ionizační napětí, K Boltzmannova konstanta, T teplota v kelvinech [4]. Zvyšujeme-li teplotu, stupeň ionizace zůstává nízký, dokud se U_i nestane pouze nevelkým násobkem

KT . Potom n_i/n_n příkře stoupá a plyn se fázovým přechodem dostává* plazmat-
ickém stavu cit. [4]. V okolí chladné hmoty ionty navíc neustále rekombinují, což má za
následek ředění ionizovaného plynu a tepelné srážky zapříčiňují jeho chladnutí. Pro existenci
plazmatu tedy není důležitý jen/*je důležitý nejen* poměr v exponenciále, ale i koncentrace
nabitých částic n_i , obsažený ve zlomku na pravé straně rovnice.

Pojem teploty plazmatu je odvozen od jednorozměrného pohybu s Maxwellovým rozdělením
rychlostí. Pro tento model dostaneme střední tepelnou energii $E_{st} = 1/2KT$. Přitom podle
konvence zavádíme převodní koeficient daný rovností $KT = 1eV$, takže

$$1eV = 11600K. \quad (1.5)$$

Komentář: jednotky pišme stojatě

Plazma se vyskytuje ve velkém rozsahu energií přibližně od 0,1 do 10^6 eV a emituje
široké spektrum záření, jehož detekcí je možné například zjistit složení hvězd, mlhovin a
jiných vesmírných objektů, či informace o plazmatu v pozemských podmínkách.

1.1.2 Vyzařování plazmatu

+**Elektromagnetické**+ Záření je hlavní příčinou energetických ztrát plazmatu. Zároveň
poskytuje nástroj pro jeho diagnostiku. Rozsah vlnových délek se pohybuje v rozmezí od
milimetrových vln po záření gamma **#pozor, "rozsah vlnových délek .." #**. Plazma
ztrácí energii jak klasickým brzdným zářením, kdy je spektrum spojité, tak rekombinačními
procesy s čárovým spektrem. Zároveň dochází k vyzařování cyklotronního díky pohybu
elektronů a iontů v magnetickém poli.

Brzdné záření vzniká primárně změnou rychlosti elektronů při pružných srážkách s ionty.
Přitom je vyzářen foton o energii úměrné změně rychlosti. Uvažujeme-li nerelativistické
srážky, pak se pro stejné částice vyzařovaná pole přesně zruší a brzdné záření tak vzniká
pouze pro reakce elektronů s ionty. Výkon brzdného $+P_B+$ záření můžeme popsat vzta-
hem,

$$P_B = \frac{e^6}{24\pi\epsilon_0^3 c^3 m_e h} n^2 Z^2 \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} g_{ff} \left(\frac{Z^2}{T_e} \right) [W/m^3], \quad (1.6)$$

**#Máte tady jiné značení pro Boltzman. konst., než co máte definici výše ..
(k x K) #**

kde g_{ff} je tzv. Gauntův faktor představující korekci na kvantové efekty [8] **#asi by se
slušelo vysvětlit i Z, možná i n #**. Vztah pro nekvantové odvození lze nalézt zde/*v*
[2]. Jelikož plazma obsahuje i příměsi, musíme Z nahradit efektivním nábojem

Komentář: Co se týče odkazování, prohlédněte si

<http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/HowTo/BasicScientificRules/indexCZ>

$$Z_{eff} \equiv \sum_{j \neq e} \frac{n_j Z_j^2}{n_e}. \quad (1.7)$$

#nahore máte podobně uvedeno Q , nedá se to sjednotit?#

+Tokamakové+ Plazma je sice primárně složeno z vodíku+,+ popřípadě helia+,+ jakožto pracovních plynů, ale obsahuje také řadu příměsí pocházejících z limiteru, stěn nádoby a dalších součástí. Za velkých teplot je pracovní plyn plně ionizován, a proto ke ztrátám zářením vzniklého rekombinací dochází převážně u nečistot. Ty mohou mít malá Z jako v případě uhlíku, berylia či kyslíku, nebo velká Z , z nichž se v tokamacích vyskytují prvky jako železo či nikl **#předpokládá se wolfram?#**. Ačkoliv za velkých teplot ubývá ztrát z rekombinace prvků s malým Z , pro velká Z není zatím možné tento faktor eliminovat a koncept elektrárny s tím musí počítat [3]. Ztráty zářením nečistot $+P_R+$ je možno vyjádřit aproximativním vztahem

$$P_R = (1 + 0,3T_e) \times 10^{-43} n_e n_z t^{3,7-0,33 \ln T} [W/m^3], \quad (1.8)$$

kde elektronová teplota T_e je v keV **#co je t , T , n_z ??#**. Celé odvození společně s jinými odhady+,+ viz [2].

Cyklotronní záření je způsobeno pohybem nabitých částic po spirálách v magnetickém poli. Dle teorie je poloměr oběhu silokřivky dán intenzitou magnetického pole. Intenzita se však napříč plazmatem liší a zároveň se mění i s časem. Frekvence záření je úměrná frekvenci oběhu a je z velké části pohlcováno plazmatem. Tyto frekvence je tedy možné využít i při jeho ohřevu. Stanovit celkový vyzářený výkon cyklotronního záření je značně obtížné. Musí se přitom počítat s odrazem záření od stěn tokamaku a jeho pohlcování plazmatem. Celkový výkon cyklotronního záření lze přibližně vyjádřit jako

$$P_C = 6,2 \times 10^{-17} B^2 n_e T_e (1 + T_e/204 + \dots) [W/m^3], \quad (1.9)$$

kde elektronová teplota T_e je v keV.

Diagnostika vyzařování plazmatu má pro fyziku tokamaků velký význam. Společně se znalostí energií částic opouštějících plazma, lze odhadovat celkovou energetickou bilanci plazmatu či složení nečistot.

1.2 Tokamaky

Tokamak je jedním ze zařízení s magnetickým udržením plazmatu. Koncept v 50. letech 20. stol., tehdy s držením pomocí elektrického pole, navrhl Rus O. A. Lavrentěv. Myšlenka byla dále rozvinuta do návrhu s magnetickým udržením I. J. Tammem a A. Sacharovem a za vedení L. Arcimoviče bylo zařízení zkonstruováno. Název tokamak je zkratkou ruského

(TOroidálnaja KAmera s MAgnytnymi Katuskami) tedy "toroidální komora s magnetickými cívkami". Původní návrh zařízení sestával z toroidální vakuové komory s kruhovým průřezem, kterou si lze představit jako uzavřenou, ocelovou pneumatiku. Pro lepší podmínky udržení plazmatu se dnes používají průřezy připomínající písmeno D. Výzkum probíhá v

několika rovinách. První úroveň malých tokamaků má edukační charakter a probíhají zde i experimenty s nižšími nároky na plazma. Střední a velké tokamaky poté mají za úkol testovat nové technologie pro zkušební reaktor ITER. Ten poskytne důležitá data např. v oblasti získání tepla a spalín z fúzní reakce či stability plazmatu ve velkém objemu, odkud bude čerpat projekt první demonstrační elektrárny nazvaný DEMO.

1.2.1 Popis tokamaku

V případě kruhové idealizace průřezu komory jsou konstrukčními parametry viz obrázek 1 hlavní poloměr R_0 , udávající vzdálenost rotační osy prstence Z od osy komory a vedlejší poloměr a je poloměr komory. Při parametrizaci toroidálního tvaru rozlišujeme dva hlavní úhly, čímž se definují i dva základní směry, tedy poloidální a toroidální. První úhel, který označíme ϕ popisuje otáčení kolem osy Z (toroidální směr), zatímco úhel θ popisuje pohyb kolem osy komory tokamaku (poloidální směr). Obecnou vzdálenost od středu osy Z udává parametr R . Libovolný bod v komoře tokamaku je tedy popsán třemi parametry, tj. úhly θ a ϕ a vzdáleností R .

Magnetické držení částic plazmatu zajišťují poloidální cívky toroidálního magnetického pole. Aby se předešlo uniku částic při *gradB* driftu a driftu zakřivení viz [4], je zapotřebí druhé magnetické pole, to je v případě tokamaku vytvářeno proudem v plazmatu uvnitř komory. Pole vzniklé složením poloidálního pole tvořeného proudovou smyčkou plazmatu a pole toroidálního, nazýváme střižné a z hlediska stability je nutný požadavek, aby toroidální pole bylo silnější než poloidální viz [4]. Tokamak se od ostatních zařízení jako stellarátor liší právě řízeným proudem v plazmatu. Střižné pole je pro stabilitu nutné, ale u ostatních zařízení se řeší jiným způsobem.

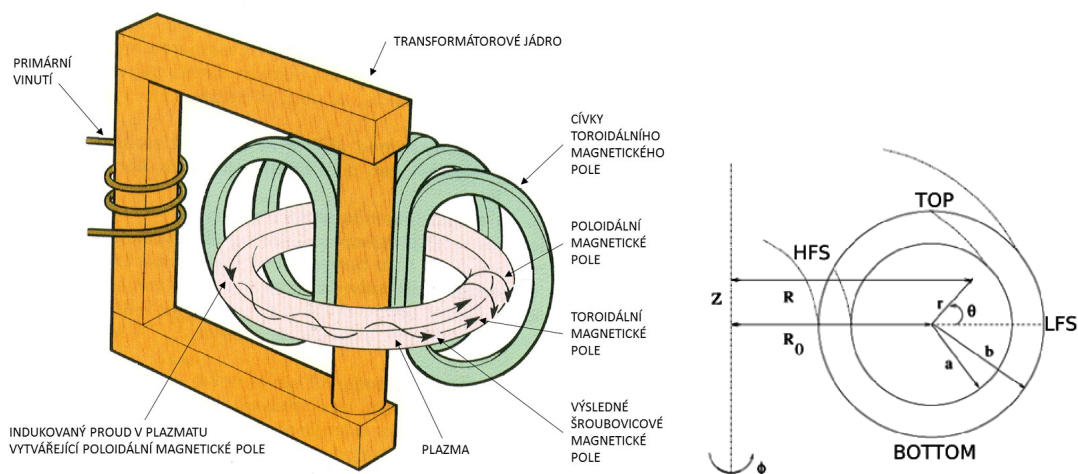
U tokamaku je proud plazmatem iniciován na principu transformátoru, kdy primárním vinutím je cívka s feritovým jádrem, dnes jsou používány i cívky vzduchové, a sekundární okruh tvoří samotný prstenec ionizovaného plynu. Toroidální pole klesá vzhledem ke konstrukci poloidálních cívek viz obrázek 1 jako $1/R$, tudíž je na vnitřní straně prstence, tj. blíže k ose Z , silnější magnetické pole. Tuto vnitřní část označujeme HFS (High Field Site/*d*e), zatímco vnější stranu tokamaku značíme LFS (Low Field Site). Pro horní resp. spodní část komory zavedeme označení TOP resp. BOTTOM. Další dodatečná magnetická pole (nejsou znázorněny v obrázku) se generují toroidálními cívkami vně nádoby. Volí se několik nezávislých svazků vodičů, jak v horní, tak ve spodní části komory. Ty umožňují polohování plazmatu vůči komoře a zpětnovazební řízení.

Pro diagnostiku plazmatu uvnitř komory je nutné mít k dispozici pozorovací okna neboli porty. Ty mohou mít různou velikost v závislosti na konstrukčním řešení tokamaku a umísťují se na TOP, BOTTOM a HFS. Přístupové porty umožňují nejen detekovat záření, ale i zavedení sond, různých typů ohřevu a detektorů, které se neobejdou bez přímého ~~pohledu na~~ ~~plazma~~/*kontakty s plazmatem*.

Proud v plazmatu je důležitý i z důvodu ohmického ohřevu. **+Účinnost ohřevu+** Proud plazmatem buzený změnou magnetické indukce ve středním sloupcu transformátoru ale

postupně s **vzrůstající** teplotou klesá a **a tento typ** ohřev se pak stává neefektivní. Problémem je navíc rychlá změna magnetického pole v plazmatu indukovaného proudem, což vede k nestabilitám [3]. Přesto je ohmický ohřev využíván u převážné většiny malých **takamů!**, kdy není pro účely výzkumu zapotřebí dosahovat velmi vysokých energií, což by bylo i neekonomické. **#dalším problémem je saturace transformátorového jádra#** Dalším typem ohřevu plazmatu je využití mikrovln a rádiových vln **+o specifických frekvencích+**, které interagují s polem částic plazmatu a tak je zahřívá. Frekvence se volí dle vyšších modů rezonančních frekvencí iontů a elektronů [3]. Elektrony mají vyšší rezonanční frekvenci než ionty, což vyžaduje mikrovlnný zdroj v řádu GHz. Ionty mají rezonanční frekvence nižší a ohřev probíhá pomocí rádiových vln v řádu MHz. Velké energie je možné plazmatu předat také svazky neutrálních částic, kdy se postupně urychlí svazek vodíkových, popřípadě heliových atomů, které před vstupem do komory tokamaku prochází neutralizátorem, aby svazek nebyl ihned odkloněn magnetickým polem v tokamaku **#a navíc jej nenabíhel#**. Takový ohřev, se společně s vysokoenergetickými lasery **#vysokoenergetickými lasery - cože?#** využívá u převážné většiny středních a velkých tokamaků, kdy je zapotřebí dosahovat vysokých energií částic [5].

Koncept tokamaku se díky dobrým výsledkům stal kandidátem na první fúzní elektrárnu. Základní výzkum ve velkém měřítku zprostředkuje mezinárodní projekt ITER, jenž má být dostaven na počátku třicátých let. Po vyřešení otázek, týkajících se mj. doplňování a generace paliva společně s problémem výroby elektrické energie, bude možné přistoupit k výstavbě první demonstrační fúzní elektrárny DEMO.



Obrázek 1.1: **Vlevo: Základní** schéma tokamaku **vpravo geometrie**

1.2.2 Diagnostika plazmatu

Komentář: Tady bych viděl ještě stéle něco obecnějšího (strukturované z nějaké klasiky (Hutchinson,)) a pak bych přidal samotnou kapitolku věnovanou detekci záření

K porozumění chování a vlastností plazmatu byla vyvinuta řada metod, jak jej zkoumat. V prvním stádiu vývoje tokamaků, bylo zapotřebí určit zejména polohu plazmatu, jeho hustotu a dobu udržení energie. Byl také zjištěn velký vliv nečistot na kvalitu plazmatu a na ztrátách záření. Z toho plyne potřeba detekce záření, odkud je možné zjistit nejen složení plazmatu, ale i ztráty výkonu záření. Dalšími měřenými vlastnostmi jsou např. hustota plazmatu, teplota elektronů a iontů, proud plazmatem či rozložení magnetického pole. Měření vlastností plazmatu je obecně komplikované kvůli jeho vysoké teplotě a proto je jakýkoliv přímý kontakt s měřicími přístroji vyloučen.

Existují dvě skupiny, na něž můžeme diagnostické metody rozdělit. První z nich jsou pasivní, neovlivňující plazma. Nejjednodušší z nich jsou na principu elektromagnetické indukce, tak měříme proud plazmatem pomocí Rogowského cívek. Toroidální magnetické pole měříme s Mirnovovými cívkami, které, jsou-li umístěny ve stejném poloidálním řezu, mohou navíc poskytovat informace o poloze plazmatu z rozdílu velikosti naměřených polí. K stanovení V/I charakteristiky plazmatu **# co je V/I charakteristika plazmatu??#**, z níž lze odvodit elektronovou hustotu a teplotu, se používají Langmuirovy sondy. Energetické ztráty plazmatu jsou především způsobeny zářením. Primární podíl má brzdné záření elektronů a rekombinační jevy spojené s vyzařováním nečistot viz (1.1.2). Moderní tokamaky operují s vysokoenergetickými částicemi, a energiemi fotonů v řádu keV. Kvůli vysokým energiím záření a částic se proto klade důraz i na bezpečnost zařízení.

Pro detekci energie záření se používají jak polovodičové detektory, tak detektory celkové dopadající energie záření i částic, které souhrně označujeme bolometry viz kapitola 2. Z profilu výkonu vyzařovaného plazmatem je možné odhadovat absolutní teplotu resp. rychlostní rozdělení částic a dobu udržení energie. [5] K určení spektra záření slouží spektrometry. Lze tak určit složení plazmatu a podíl nečistot. Energie iontů se měří pomocí hmotnostních a energetických spektrometrů. Lze tak stanovit teplotu iontů T_i a rychlostní distribuční funkci napříč plazmatem. V případě neutrálních částic se jedná o tzv. analyzátor neutrálních částic (NPA). Pro novou elektrárnu je také důležitý vliv poměru palivové směsi D-T a energie alfa částic, jakožto produktu fúzní reakce.

Aktivní diagnostiky využívají laserů a svazků částic, které interagují s plazmatem a sleduje se jejich rozptyl nebo pohlcení. Měří se tak např. posuv fáze laserového svazku procházejícího plazmatem, odkud lze zjistit jeho hustotu. Diagnostika plazmatu je samostatný obor, kterému je věnována značná důležitost a bez níž by se fyzika tokamakového plazmatu neobešla.

Komentář: Z výše uvedené kapitoly nemám dobrý pocit, je to taková slátanina ..

1.2.3 Tokamak Golem

Tokamak GOLEM je řazen do třídy malých zařízení, tj. s malým pracovním objemem. Dosahované energie elektronů $T_e \approx 100\text{eV}$ **#jednotky umístějte mimo dolary eV x eV#** neumožňují vznik fúzních reakcí. GOLEM dnes plní funkci malého výzkumného a

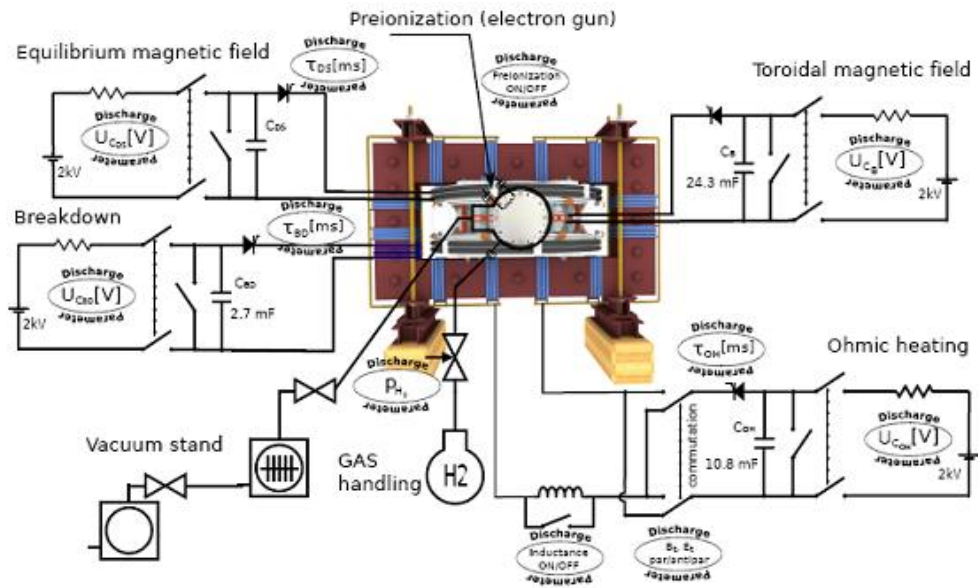
především ~~edukačního~~/*vzdělávacího* zařízení. Přitom se jedná o jeden z prvních tokamaků na světě. Původní verze moskevského tokamaku TM-1, sloužila v letech 1977-2007 na Ústavu fyziky plazmatu pod jménem CASTOR. Po rozebrání a následné rekonstrukci byl opět r.[XXX]/*2009* uveden do provozu na FJFI, ČVUT pod názvem GOLEM. Základní parametry tokamaku a dosahované vlastnosti plazmatu jsou uvedeny v tabulce 1.

Komentář: Bořku, používejte zavedené symboly z <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/root/PhysicalQuantities> téměř každou řádku budete muset opravit

Hlavní poloměr	$R = 0.4 \text{ m}$
Poloměr komory	$a_{max} = 10 \text{ cm}$
Poloměr limiteru	$a_{min} = 8,5 \text{ cm}$
Toroidální magnetické pole B_T	$B_T < 0.8 \text{ T}$
Proud plazmatem I_p	$I_p < 8 \text{ kA}$
Dosahované délky výbojů	$< 30 \text{ ms}/* < 20 \text{ ms}*$
Centrální elektronová teplota	$\approx 100 \text{ keV}/* < 100 \text{ eV}*$
Hustota plazmatu	
Tlak v nádobě	$P = 5\text{--}200 \text{ mPa}/*0.5\text{--}30 \text{ mPa}*$
Pracovní plyn	$H_2/*H_2*, \text{ He}$
Odpor nerezové vložky	$5\text{m}\Omega$

Schéma tokamaku GOLEM je na obrázku 2. Energii pro jádru transformátoru **#to je blbost, opište to lépe#** dodávají dva kondenzátorové okruhy viz obrázek 1.2. První okruh (Breakdown) se vybíjí rychle. Rychlá změna indukce jádra vytvoří silné elektrické pole, které zionizuje pracovní plyn **#to není úplně přesné vyjádření#**, čímž se vytvoří vodivé plazma, dochází k **+průrazu neutrálního plynu do plazmatu+** tzv. breakdownu. Druhý okruh slouží k ohmickému ohřevu a obsažené kondenzátory se vybíjí pomaleji **#tohle by mohl někdo napadnout ..#**. Při tom dochází k postupnému nasycení jádra transformátoru, což je hlavním omezením této metody ohřevu. Z tohoto důvodu byly zavedeny různé „typy předionizace“. Základní možností je použití elektronových trysek sestávajících z odolných žárovek umístěných přes port do komory tokamaku. Emitované elektrony jsou poté urychlovány přiloženým napětím na komoru a předávají svoji energii částicím pracovního plynu. Jiný způsobem předionizace na tokamaku GOLEM je ionizace mikrovlnami, který vznikl r. 2013. Mikrovlny zároveň umožňují i doplňující ohřev **#bacha, vůbec ne, mají absolutně špatnou frekvenci#**, čímž je možné značně prodloužit dobu výboje. Koncem roku 2013 byla zároveň odzkoušena i předionizace pomocí zabudované UV lampy.

Komentář: úplně jste vypustil toroidální magnetické pole, doporučuji vzít jednodušší obrázek, třeba http://golem.fjfi.cvut.cz/roperation/tasks/XXYYMASTER/Level_I/figs/expsetup_L1.png a popisovat vše systematicky od vakua, přes pracovní plyn, generaci magnetického pole, generaci elektrického pole až po předionizaci, breakdown a stabilizaci klidně vypusťte, stejně to ve vašich výbojích nepoužíváme.



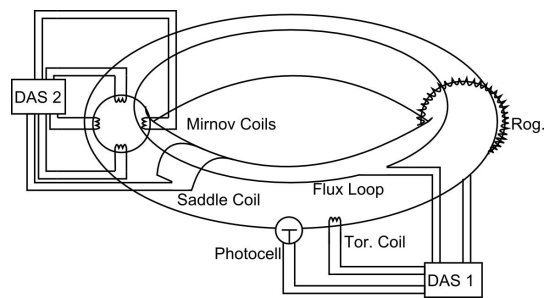
Obrázek 1.2: Schéma tokamaku GOLEM, převzato z [XXX]

Komentář: Tady by se mi líbila pasáž, věnující se scénáři provedení vyboje, inspirovat se můžete na

<http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/KFpract/14/Basics/uloha13A.pdf>

1.2.4 Diagnostika plazmatu na tokamaku Golem

Informace o plazmatu zprostředkovává na tokamaku GOLEM řada diagnostik viz obrázek 1.3 **#není úplně nejvhodnější ..#**. **#Bořku, naučte se pracovat s referencemi, nebo se zblázníte#** O sběr dat se starají sběrné systémy DAS1 a DAS2 od firmy National Instruments. K dispozici je celkem [XXX] portů. Z magnetických diagnostik je zavedena cívka pro měření napětí na závit plazmatu U_{loop} jdoucí podél komory tokamaku. Pro určení polohy plazmatu slouží čtyři Mirnovovy cívky umístěné v poloidálním řezu na osu komory v polohách TOP, BOTTOM, LFS a HFS. Proud plazmatem je odvozen z napětí z Rogovského cívek, obepínajících komoru v poloidálním řezu. Fotorezistory s H_α filtrem a rozlišením 100kHz **#rozlišení fotorezistorů??#** integrují vyzařovaný výkon ve viditelném spektru a je možno pozorovat čáru H_α tj. (656,3 nm). Dále se měří velikost toroidálního pole B_T **#pozor na symbol!#**. Informaci o poloze plazmatu vůči komoře poskytují kromě Mirnovových cívek také rychlé kamery Casio EX-F1, umístěné na LFS a TOP **+tak+**, aby snímali/*y* záření v poloidálním řezu ze dvou různých míst. Získaná data umožňují zjistit díky tomografickým metodám celkový profil **+tady něco chybí+**. Tato diagnostika má nejbližší k instalovanému poli AXUV diod a umožňuje tak srovnání naměřených dat.



Obrázek 1.3: Schéma diagnostik na tokamaku GOLEM, převzato z [XXX]

Chapter 2

Bolometrie

Bolometr, řecky ($\beta\omicron\lambda\omicron\mu\epsilon\tau\rho\nu$) je zařízení sloužící k měření energie dopadajícího záření a částic. Původ slova je odvozen z řeckého ($\beta\omicron\lambda\omicron\eta$) pro vržený objekt a slova ($\mu\epsilon\tau\rho\nu$) pro měřící přístroj.

Komentář: Ten začátek je moc hezký

Pod pojmem bolometr se lze setkat s několika typy zařízení fungujících na odlišných principech. První z nich, jež vynalezl americký astronom Pierpont Langley r. 1878, dnes nazýváme odporovým bolometrem. Ten je založen na předání energie od dopadajícího elektromagnetického záření a částic součástce, absorbéru, o malé tepelné kapacitě, který je spojen s tepelným rezervoárem. Absorbér, kterým může být např. tenká kovová fólie, předá teplo rezervoáru. Ten je zapojen do elektrického obvodu, přičemž je známa jeho tepelná kapacita a závislost odporu na teplotě. Je tak možné spočítat celkové teplo přijaté rezervoárem. Čas, za který se absorbér zrelaxuje, nazýváme obecně dobou odezvy. Novější typ bolometrů využívá jako absorbéru pyroelektrický krystal, v němž je generován proud na základě spontánní polarizace. Malý proud ($\sim pA$) se přes výkonné zesilovače konvertuje na napěťový signál. Při dobré kalibraci je tak možné získat absolutní teplotu zdroje. Na tomto principu jsou založeny např. pyrometry. Další typ bolometrů využívá polovodičů a fotoelektrického jevu. Je-li absorbérem polovodič s vhodnou konstrukcí, lze detekovat jistou oblast elektromagnetického záření, kdy je generován proud s lineární závislostí na energii záření. Jak polovodičové tak odporové bolometry se řadí do polí a umísťují se do zadní části kamery obskury. Taková detektorová pole snímají plazma z několika míst v poloidálním řezu a mohou zahrnovat i stovky detektorů, z nichž každý integruje signál z jistého prostorového úhlu (chordy). Vhodnou parametrizací lze s pomocí integrálních transformací získat profil vyzařovaného výkonu pozorované oblasti plazmatu.

Na větších zařízeních se kvůli velkým tokům energie z částic a záření předsazují před detektory různé typy stínění, čímž může být například slídová destička. V případě polovodičových detektorů je často stínění součástí jejich konstrukčního řešení [IRD] **#co je IRD?#**. Zároveň je tak možné stanovit dolní energetickou propust. Detektory je také potřeba v některých případech chladit, aby si zachovaly nejlepší vlastnosti. Měříme-li celkový vyzářený výkon

plazmatu, je vhodné použití odporových detektorů, jelikož jsou citlivé i na dopadající částice. Jejich nevýhodou je však pomalejší odezva.

Někdy je výhodné oddělit detekovaný výkon částic od výkonu záření plazmatu. Tehdy najdou uplatnění polovodičové detektory, tedy fotodiody a termistory. Dnešní typy fotodiody jako AXUV, SXUV či UVG viz [IRD] **#vysvětlete ty zkratky aspoň základně#** mají dobré časové rozlišení, což umožňuje sledování rychlých změn ve vyzařovaném výkonu v průběhu výboje a studovat tak mimo jiné i projevy nečistot.

2.1 AXUV diody

Komentář: Tuhle úvodní pasáž bych asi dal někam dále, ne do teoretického úvodu k problematice - tohle už je GOLEM specifika. Prosím, zde se inspirujte u IAEA Fusion physics Pole AXUV20EL bylo instalováno na tokamak GOLEM, čemuž předcházela kalibrace na prostorové rozložení detektorového pole vůči přírubě komory **#kalibraci musíte věnovat samostatnou pasáž se schématem experimentu, fotkou, výsledky ..#**. Pole dvaceti diod, z nichž 19 jich je funkčních, slouží k základnímu uvedení bolometrické diagnostiky do provozu na tokamaku GOLEM.

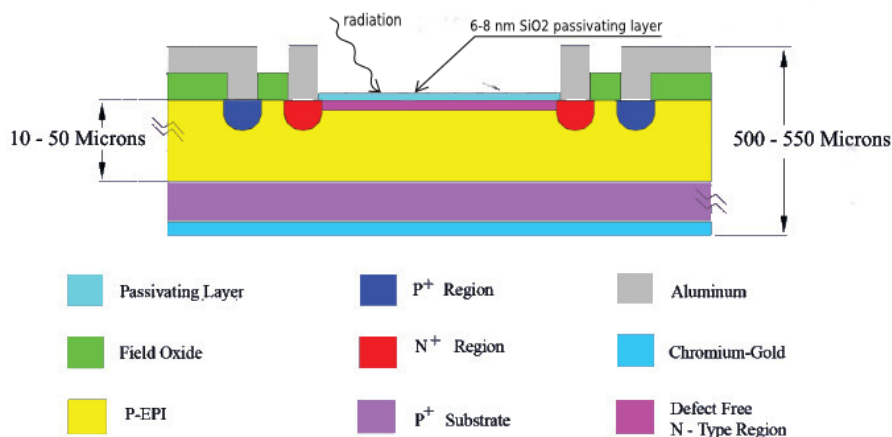
+Na tokamaku GOLEM se používá xxy typ bolometru.+ Detektor byl vyroben firmou International **!Radiational!** Detectors Inc. [IRD]. Nyní AXUV detektory vyrábí firma Opto Diode Corporation [17].

Používané pole fotodiody bylo původně instalováno na tokamaku CASTOR pod označením AXUV2, kde s detektorem AXUV1 o šestnácti kanálech **!!** sloužilo k tomografické rekonstrukci profilu vyzařovaného výkonu plazmatu. Vzhledem k tomu, že je pole AXUV na tokamaku GOLEM testovacím modulem, zavedeme označení AXUV0. AXUV0 je umístěno na teflonové podložce v detektorovém krytu se štěrbinou (pinhole) **#pomohlo by nějaké schémátko#**/*tohle zase patří k samotnému experimentu na GOLEMovi - někde dozadu. *

AXUV20EL jsou rychlé fotodiody s dobou 0,2 μ s určené k detekci záření s energiemi v oblasti 7 eV až 6keV **#stejně - s mezerou#**, tj. od UV po měkké RTG záření. V této oblasti mají detektory kvantovou účinnost téměř 100% [IRD]. Pozorovací okno je v případě AXUV chráněno proti energetickým částicím a tvrdému záření 4-8nm silnou ochrannou vrstvou oxidu křemičitého viz obrázek 2.1. **#na tom obrázku je toho zázorněno mnohem více - měl byste to popsát.#**

2.1.1 Účinnost a citlivost AXUV

Dopadající záření vyvolává vnitřní fotoefekt, vzniká pár elektron-díra a při zapojení do obvodu se generuje proud úměrný dopadajícímu záření. Pravděpodobnost, že dopadající foton vytvoří elektron-děrový pár, který se bude podílet na detekovaném proudu se nazývá kvantová účinnost a označme ji η . Pakliže pravděpodobnost, že vytvořený pár bude tvořit detekovaný proud označíme ξ , pak pravděpodobnost ztráty bude $1 - \xi$. Kvantovou účinnost



Obrázek 2.1: Skladba polovodičových detektorů typu AXUV, UVG a SXUV +převzato z+ [IRD]

pak lze vyjádřit jako

$$\eta = (1 - R)\xi(1 - e^{-\alpha(\nu)d}), \quad (2.1)$$

kde R je index odrazivosti vrstvy, α koeficient absorpce záření vlnové délky ν a d je tloušťka vrstvy. [IRD] Pro vlnové délky větší jak 700nm vnitřní kvantová účinnost klesá viz příloha [XXX].

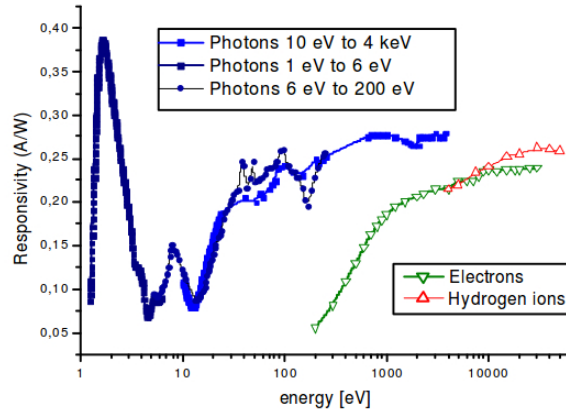
AXUV nemají dopovanou mrtvou vrstvu a navíc u nich v n-vrstvě ani na přechodu křemíkové vrstvy téměř nedochází k rekombinaci elektron-děrových párů zpět na fotony. Pro dopadající UV a EUV #co je EUV? Vysvětlete, není to notoricky známé# záření mají zároveň malou absorpční délku $< \mu m$. Díky těmto vlastnostem je ve vnějším obvodu detekován téměř 100% generovaného proudu. Celkovou kvantovou účinnost detektoru je v oblasti XUV možno odhadnout jako $\epsilon_{ph}/3,65$, kde ϵ_{ph} je energie dopadajících fotonů v eV.

Dále definujeme citlivost fotodiod C vyjadřujeme jako podíl generovaného proudu a výkonu absorbovaného záření a s kvantovou účinností η souvisí vztahem

$$C = \frac{\eta q}{W}[A/W]. \quad (2.2)$$

#je v čitateli opravdu proud? Co je q ? Ve jmenovateli opravdu W ? To bývá práce, výkon je spíše P ..#

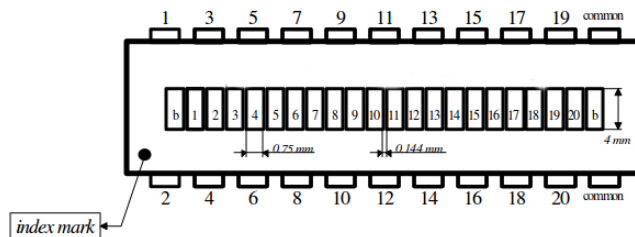
Graf citlivosti použitého pole AXUV20EL je uveden na obrázku 2.2, který byl dodán firmou IRD [19]. Kvůli absorpci křemíkového ochranného okna je kvantová účinnost mírně snížena pro fotony o energiích 8-100 eV. K poklesu citlivosti dochází i pro energie fotonů mezi 100 až 200 eV. Pro energie vyšší jak 200 eV se již citlivost AXUV blíží teoretické hodnotě 0,275 A/W [IRD]. Zároveň je vidět citlivost detektoru pro elektrony a ionty.



Obrázek 2.2: Citlivost AXUV20EL [19]

2.1.2 Parametry použitých fotodiód

-[vedle vložit foto detektodu, Shunt resistance čeština]



Obrázek 2.3: Konstrukční schema detektoru AXUV20EL [MATERIAL ZESILOVAC]

Technické parametry detektorů AXUV2 jsou zobrazeny na obrázku [XXX] a příslušné hodnoty jsou uvedeny v tabulce [XXX]. Pole AXUV2 sestává z dvaceti diód AXUV (Absolute XUV), z nichž 19 je funkčních. Jednotlivé diody mají 0,75 mm na výšku a 4 mm na šířku; mezi okraji diód je 0,144 mm široká mezera. Účinná délka pole je celkem 16,842 mm. Snímkovací frekvence 5MHz umožňuje pořizovat záběr plazmatu každých 200ns, ale záleží i na sběrných počítačích. Díky dlouhodobému využití diód na tokamaku CASTOR byla provedena analýza histogramu dat celkového vyzařovaného profilu [19]. Ukazuje se, že vystavení diód rychlým částicím a nečistotám může mít vliv na jejich celkovou účinnost viz [19].

2.2 Camera obscura

Abychom mohli určit profil vyzařovaného výkonu v poloidálním řezu, je nutné použít detektorová pole. Pokud by na každý detektor pole dopadalo záření z libovolné oblasti poloidálního řezu, mohli bychom určit pouze celkový výkon plazmatu. Není tak možné určit vyzařování konkrétní oblasti. Proto se využívá kamera obscura viz obrázek [XXX]. Její princip spočívá v tom, že se detektory umístí do zadní části uzavřeného krytu, se štěrbinou v přední části.

Parametry bolometrů	
citlivá plocha	$3 \times 19 \text{ mm}^2$ #nerozumím#
šířka diody	0,75 mm
výška diody	4 mm
délka mezery mezi diodami	0,144 mm
vzdálenost středů diod	0,894 mm
šířka užitého pole AXUV (19 kanálů#používejte data ideálního bolometru#)	16,842 mm
Shunt resistance #vysvětlit#	300 MΩ
citlivost diod	0,26 A/W (pro $h\nu + \sim + 1\text{-}5\text{keV}$)
doba náběhu (10-90%)	0,2μs #jednotky stojatě#

Table 2.1: Základní charakteristika fotodiód

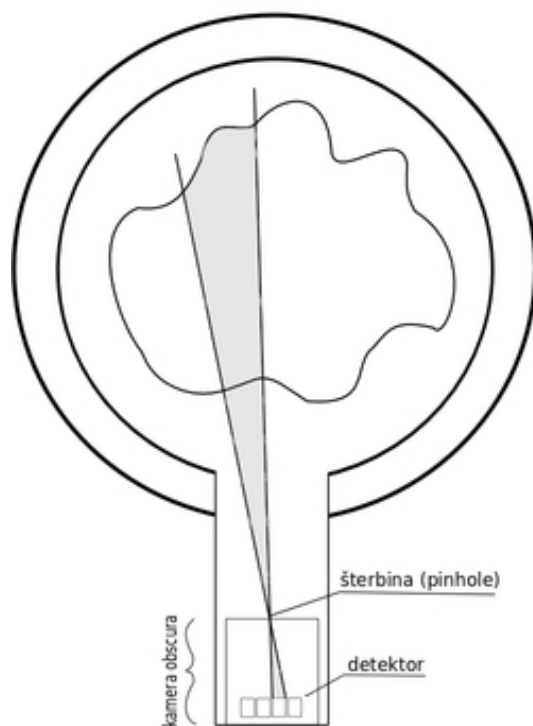
Světlo ze snímaného objektu pak prochází štěrbinou, která brání záření, aby dopadalo na všechny detektory z libovolného úhlu. Každý detektor tak snímá pouze jistý prostorový úhel, což umožňuje další numerické zpracování. Štěrba nesmí být ani příliš velká, aby byl efekt kamery obscure účinný, ani příliš tenká, jelikož v tom případě dochází k difrakci a rozostření. Zorný úhel celého detektoru je poté určen šířkou detektorového pole a jeho vzdáleností od štěrby. Pozorovací směr je určen osou detektorového pole. Na plazma se díváme z hlediska účelu v různých pozorovacích úhlech. Pokud nás zajímá střed plazmatu, míří tam i osa detektoru. V takovém případě můžeme často využít symetrií plazmatu. Pokud je použito jedno detektorového pole je možno využít cylindrickou symetrii plazmatu v poloidálním řezu a signál zpracovat pomocí symetrické a asymetrické Abelovy inverze. Cílem pozorování bývá i okraj plazmatu, kdy detektor směřuje na plazma tangenciálně viz [zdroj]. Tím je možné např. sledovat chování plazmatu poblíž limiteru, kde se nachází mnoho ionizovaných nečistot a probíhají největší tepelné ztráty. V případě použití více detektorů, tedy i více pozorovacích míst, vznikne pozorovací síť, ze které je možné tomograficky zrekonstruovat celkový radiační profil plazmatu. Rychlé AXUV diody zároveň umožňují snímat plazma s frekvencí 5MHz. Společně s integrálními metodami tak lze určit i časový vývoj radiačního profilu.

2.2.1 parametry detektorového krytu

zde budou parametry krytu pro AXUV2

2.2.2 geometrie

Detektor s příslušným krytem je konstruovaný pro přímý pohled do středu komory. Díky cylindrické symetrii je tak možné v prvním přiblížení použít inverzní Abelovu transformaci pro získání profilu vyzařovaného výkonu. Umístění detektoru



Obrázek 2.4: Skladba polovodičových detektorů typu AXUV, UVG a SXUV [IRD]
 #Nerozumím, proč se stále objevuje značka "[IRD]"# #A tohle vůbec není vhodný popis k tomu obrázku, v obrázku uveďte, že se díváme na poloidální řez plazmatem#

2.3 Zesilovač

Aby bylo možné měřit malý proudový signál cca $0,1\mu A$ a jednotky stojatě!, je nutné jej zesílit. K tomu slouží zesilovač, který byl přejet z původního experimentu na tokamaku CASTOR. Zesílení proud-napětí umožňuje deset operačních modulů tvořených duálními zesilovači AD822AN se zpětnou kapacitní vazbou. Zesilovací člen tvoří odpor $R_f = 510k\Omega$ a vyrovnávací kapacita má hodnotu $C_f = 3,3pF$. Konstrukční schema zesilovače je uvedeno v příloze (neodpovídá použité konfiguraci).

Parametry bolometrů #nejde spíše o zesilovač?#	
Vstupní klidový proud	0.5 nA max. pro $T_{max}=+85deg C$ #bacha#
Vstupní napětí	1,2mV max. pro $T_{max}=+85deg C$ #bacha#
Šířka pásma	1,8MHz
Rychlost přeběhu	3V/ μs
Šum vstupního napětí	0,894 mm #v milimetrech?#
Šum vstupního proudu	16,842 mm
Kapacitní zátěž[XXX]	300pF Ω #mezera#
Klidový proud	2 \times 3,8mA #mezera, proč 2x?#
doba náběhu (10-90%)	0,2 μs #jednotky stojatě#

Table 2.2: Parametry zesilovače

2.3.1 Test zesilovače vlastní konstrukce

2.3.2 Datový sběr PAPOUCH

Použity byly dva datové sběry firmy PAPOUCH. Jejich používané specifikace jsou uvedeny v tabulce [XXX]. Papouch

2.4 Experimentální uspořádání

2.5 Výsledky měření

Chapter 3

Algoritmyč na zpracování signálu

- 3.0.1 Abelova symetrická inverze
- 3.0.2 Abelova asymetrická inverze
- 3.0.3 Cormackova metoda

Chapter 4

Bolometrie na tokamaku GOLEM

4.1 Geometrie

4.2 Aplikace na naměřená data

Závěr

Seznam použitých zdrojů

Přílohy

v přílohách zahrnout nákres příruby, obrázek AXUV citlivosti pro oblasti vlnových délek graf podobný tangentě., na CD [IRD] dokument s popisem diod společně s manuálem k zesilovačům.

- [1] M. Řípa, J. Mlynář, V. Weinzettl, F. Žáček, Řízená termojaderná fúze pro každého, TA. Print, s.r.o., Praha, 2011
- [2] W. M. Stacey, Jr. Fusion plasma analysis, John Wiley Sons, New York, 1981
- [3] J. Wesson, Tokamaks, Clarendon Press - Oxford, 2004
- [4] F. F. Chen, Úvod do fyziky plazmatu, Academia, Praha, 1984
- [5] M. Kikuchi, K. Lackner, M. Q. Tran, Fusion Physics, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2012
- [6] I. Úlehla, M. Suk, Z. Trka, Atomy, jádra, částice, Academia, Praha, 1990
- [7] I. H. Hutchinson, Principles of Plasma Diagnostics, Cambridge University Press, 1987
- [8] M. Imrisek, Tomografie měkkého rentgenového záření na tokamaku JET, 2011, dostupné online z <http://fttf.fjfi.cvut.cz/StPrace/Diplomky/2012/ImrisekMartin.pdf>
- [9] G. McCracken and P. Stott, Fusion, The Energy of the Universe, Academic Press February 2005 ISBN 012481851X ; v českém překladu pod názvem Fúze - energie vesmíru, Mladá Fronta, edice Kolumbus, 2006, ISBN 80-204-1453-3
- [10] Vladimir Dribinski, Alexei Ossadtchi, Vladimir A. Mandelshtam and H. Reisler, Reconstruction of Abel-transformable images: The Gaussian basis-set expansion Abel transform method, 2002, American Institute of Physics dostupné online z <http://www-bcf.usc.edu/~reisler/assets/pdf/67.pdf>
- [11] Eric W. Hansen and Phaih-Lan Law, "Recursive methods for computing the Abel transform and its inverse," J. Opt. Soc. Am. A 2, 510-519 (1985)
- [12] P. Tomassini and A. Giulietti, A generalization of Abel inversion to non axisymmetric density distribution, 2001

- [13] M. Kalal and K. A. Nugent, Abel inversion using fast Fourier transforms, *Appl. Opt.* 27, 1956-1959,1988
- [14] R. N. Strickland and David W. Chandler, "Reconstruction of an axisymmetric image from its blurred and noisy projection," *Appl. Opt.* 30, 1811-1819 (1991)
- [15] L.C. Ingesson et al.:Tomography diagnostics: Bolometry and Soft X-ray De-tection, *Fusion Science and Technology* 53 (2008), 528
- [16] F. Natterer, Numerical Methods in Tomography, *Acta Numerica*, 1999, dostupné online z http://wwwmath1.uni-muenster.de:8000/num/Preprints/1998/natterer_1/paper.pdf
- [17] Opto Diode Corp. <http://optodiode.com>
- [18] C. W. Thiel An Introduction to Semiconductor Radiation Detectors, online dostupné z <http://www.physics.montana.edu/students/thiel/docs/detector.pdf>
- [19] E.Dufková, Bolometrická měření celkového vyzářeného výkonu vysokoteplotního plazmatu tokamaku CASTOR, bakalářská práce, 2008, online dostupné z http://golem.fjfi.cvut.cz:5001/Diagnostics/Radiation/Bolometry/Dufkov%C3%A1_bakalarka.pdf