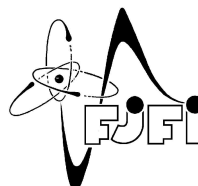


České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky
Obor: Fyzikální inženýrství
Zaměření: Fyzika a technika termojaderné fúze



Svazková diagnostika na tokamaku COMPASS

VÝZKUMNÝ ÚKOL

Vypracoval: Bc. Jaroslav Krbec
Vedoucí práce: Ing. Pavel Háček
Rok: 2011

Před svázáním místo téhle stránky

vložíte zadání práce

 s podpisem děkana (bude to jediný oboustranný list ve Vaší práci) !!!!

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svůj výzkumný úkol vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....
Bc. Jaroslav Krbec

Poděkování

Děkuji Ing. Pavlu Háčkovi za vedení mého výzkumného úkolu a podnětné návrhy, které ho obohatily.

Bc. Jaroslav Krbec

Název práce:

Svazková diagnostika na tokamaku COMPASS

Autor: Bc. Jaroslav Krbec

Obor: Fyzikální inženýrství

Druh práce: Výzkumný úkol

Vedoucí práce: Ing. Pavel Háček

Ústav fyziky plazmatu, AV ČR, v.v.i.

Abstrakt: Práce se zabývá svazkovou diagnostikou na tokamaku COMPASS, popisuje experimentální uspořádání lithiového svazku pro BES a ABP diagnostiku a popisuje rekonstrukci profilu hustoty na diagnostice BES pomocí genetického algoritmu. Součástí práce je testovací program pro výpočet intenzity záření 2p-2s přechodu atomu lithia zahrnující pouze interakci s protony. Tento program slouží k ověření možnosti rekonstruovat hustotu plazmatu pomocí genetického algoritmu. Program je implementovaný v prostředí MATLAB.

Klíčová slova: tokamak COMPASS, BES, ABP, CXRS, genetický algoritmus

Title:

Beam diagnostics on the COMPASS tokamak

Author: Bc. Jaroslav Krbec

Abstract: This work deals with beam diagnostics on tokamak COMPASS. It describes experimental setup of lithium beam for BES and ABP diagnostics and it describes the reconstruction of density profile on BES diagnostics using genetic algorithms. A part of this work is a testing programme for computing the radiation intensity of the 2p-2s transition of a lithium atom including only the proton interaction. This program serves for verification of the possibility to reconstruct the plasma density using genetic algorithms. This programme is implemented in MATLAB environment.

Key words: tokamak COMPASS, BES, ABP, CXRS, genetic algorithm

Seznam zkratek

ABP	Atomic Beam Probe
APD	Avalanche Photodiode
BES	Beam Emission Spectroscopy
CXRS	Charge Exchange Recombination Spectroscopy
EBW	Electron Bernstein wave
ECE	Electron Cyclotron Emission
ELM	Edge Localised Mode
HFS	High Field Side
HIBP	Heavy Ion Beam Probe
ICRH	Ion Cyclotron Resonance Heating
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
LHCD	Lower Hybrid Current Drive
LHW	Low Hybrid Wave
MHD	MagnetoHydroDynamics
NBI	Neutral Beam Injection
RMKI	Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet (Research Institute for Particle and Nuclear Physics)
SOL	Scrape-off-layer
SXR	Soft X-Ray
ÚFP	Ústav Fyziky Plazmatu
XR	X-Ray
XUV	Extreme Ultraviolet

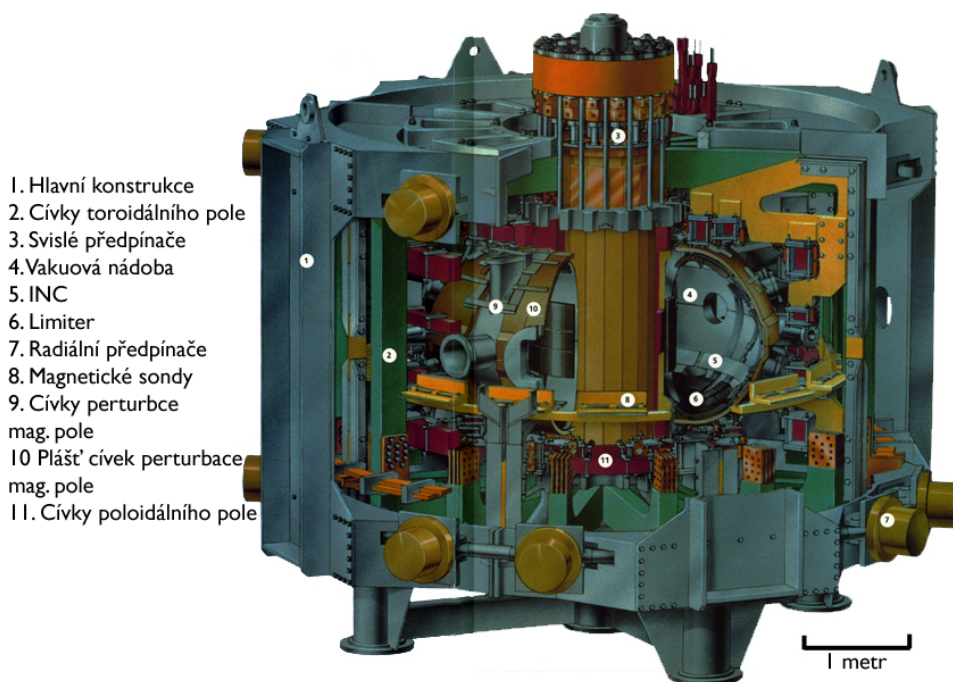
Obsah

Seznam zkratk	6
Úvod	8
1 Tokamak COMPASS	11
2 Neutrální svazek	15
2.1 Produkce částic svazku	15
2.2 Útlum svazku	16
2.3 CXRS	17
3 Lithiový svazek	19
3.1 Princip a design Li svazku na COMPASSu	19
3.2 Experimentální uspořádání	21
3.2.1 CCD kamera	22
3.2.2 ABP detektor	22
3.2.3 Lavinové fotodiody	22
3.3 Interakce částic	22
3.4 BES (Beam Emission Spectroscopy)	23
3.5 ABP (Atomic Beam Probe)	24
4 BES - Rekonstrukce profilu hustoty	26
4.1 Genetický algoritmus	27
4.2 Rekonstrukce profilu hustoty	28
Závěr	30
Seznam použitých zdrojů	31

Úvod

Fúzní energetika může v budoucnosti představovat pro společnost zdroj energie, která je v současné době získávána především z ubývajících zásob nerostných surovin a v menší míře i z obnovitelných zdrojů energie, přičemž s dalším vývojem rozvojových zemí a s rostoucím počtem obyvatelstva se očekává zvýšení spotřeby energie. Způsobem provedení fúzní reakce se lidstvo inspirovalo procesy ve hvězdách, kde se slučují jádra atomů za vysokých teplot a hustot. K udržení horkého plazmatu se však namísto gravitačních sil, jak je tomu u hvězd, používá především udržení pomocí magnetického pole. Jedním ze zařízení, které během posledních několika desetiletí prokázalo významný pokrok v dosažení požadovaných parametrů pro termojadernou fúzi, je tokamak.

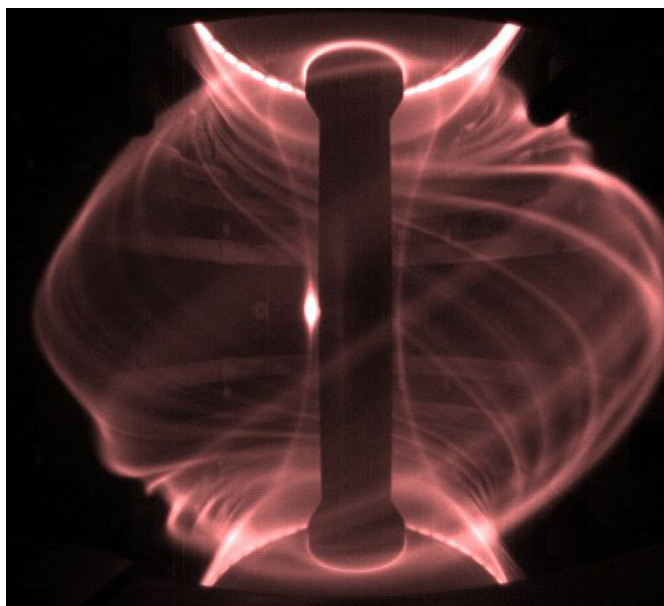
Tokamak (zkratka ruského TOroidalnaja KAtushka i MAgnitnij toK - toroidální cívka a magnetický tok) je zařízení vyvinuté v 50. letech minulého století sovětskými fyziky A.D. Sacharovem, I.J. Tammem a L.A. Arcimovičem sloužící k udržení plazmatu pomocí magnetického pole. Jedná se o vakuovou komoru ve tvaru toroidu představující sekundární vinutí transformátoru, doplněnou o cívky silného toroidálního pole navinuté na torus. Součástí tokamaku je řada podpůrných systémů a diagnostických nástrojů. Pro dodatečný ohřev plazmatu se kromě mnoha dalších způsobů využívá vstřikování svazku vysokoenergetických částic (NBI, Neutral beam injection). Za pomoci svazku se však dají provádět i diagnostická měření.



Obrázek 1: Tokamak COMPASS.

Jednou z diagnostik je spektroskopie záření pocházejícího z deexcitace elektronu v atomovém obalu iontu, který přijal tento elektron právě od atomu svazku (CXRS, Charge exchange radiation spectroscopy). Výhodou této tzv. aktivní diagnostické metody je schopnost měřit hustotu, teplotu a rychlost plně ionizovaných atomů, s možností jak prostorového tak i časového rozlišení. Cílem je především měřit parametry nečistot v plazmatu s nízkým protonovým číslem např. helium, beryllium a uhlík, které jsou v centru plazmatu zcela ionizované.

Při mohutném ohřívání plazmatu pomocí neutrálních svazků z důvodu dosažení vyšších teplot si v roce 1982 vědec Fritz Wagner na tokamaku ASDEX všiml skokové změny doby udržení částic, která dosud nebyla pozorována. Výhodou tohoto režimu byla vyšší doba udržení částic plazmatu a stejně tak i energie, proto byl tento režim nazván H-mód (High - režim s vyšším udržením). Oproti L-módu se však objevila nová nestabilita plazmatu tzv. ELMy (Edge Localised Modes), kdy jsou z plazmatu uvolňovány výtrysky částic dopadající na stěnu komory. Tím plazma ztrácí částice i energii a často mají výtrysky tvar tenkých filamentů viz. obr. 2. Tento jev brání v dosažení vyšších hustot plazmatu. Analogií k tomu může představa hromady písku, kdy při dosažení maximální strmosti svahu se písek začne sesouvat dolů. Dopad částic na komoru také snižuje životnost komory a nainstalovaných diagnostik. Vznik filamentů je spojen s okrajem plazmatu, proto je pro pochopení mechanismu tvoření ELMů potřeba studovat právě tuto oblast a to s vysokým časovým rozlišením. Za účelem měření parametrů plazmatu v okrajové oblasti byl vyvinut diagnostický nástroj využívající vstřiku lithiových atomů a detekce jejich záření.



Obrázek 2: Filamenty částic zachycené kamerou na tokamaku MAST.

Lithiový svazek může být použit k dvěma typům diagnostik:

- BES (Beam Emission Spectroscopy) pro měření elektronové hustoty na okraji plazmatu. Vstříknuté atomy lithia se při interakci s plazmatem ionizují a excitují. Vzniklé čarové záření přechodu 2p-2s o vlnové délce 670,8 nm je detekováno CCD kamerou a lavinovými fotodiodami. Z následné rekonstrukce intenzity záření je určen profil hustoty elektronů.
- ABP (Atomic Beam Probe) je zcela nový přístup pro měření proudu v okrajových

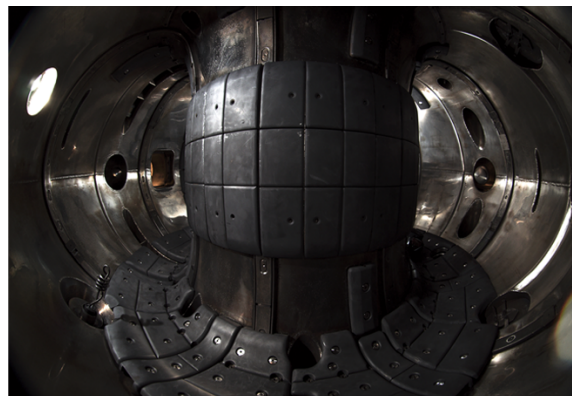
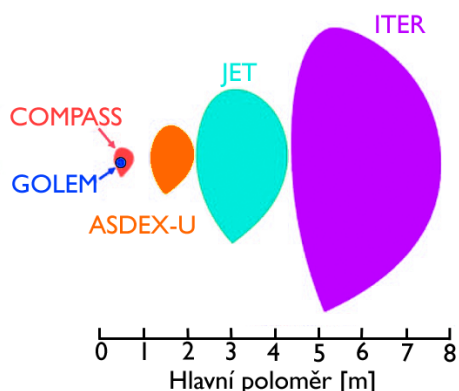
oblastech plazmatu. Ionizované atomy lithia jsou zachyceny mg. polem tokamaku a po zakřivené trajektorii dopadají do ABP detektoru. Odečtením polohy dopadu iontu na detektor je možné dopočítat celkové magnetické pole po dráze iontu a z něho určit proud. Z intenzity dopadu iontů je možné určit hustotu plazmatu.

Lithiový svazek je v současné době nainstalován na tokamaku COMPASS a je ve fázi testování. Cílem této práce je shrnout informace o svazkové diagnostice na tokamaku, obohatit je o výsledky z prvních měření a popsat způsob rekonstrukce profilu hustoty na diagnostice BES. Na začátku této práce budou podány základní informace o tokamaku COMPASS a použitých diagnostikách. V druhé kapitole bude krátce popsán princip neutrálního svazku a diagnostiky CXRS následován třetí kapitolou popisující lithiový svazek a diagnostiku BES i ABP. V poslední kapitole je rozebrán jeden z možných způsobů rekonstrukce profilu hustoty a zobrazeny výsledky z testovacího programu pro ověření možnosti rekonstrukce.

Kapitola 1

Tokamak COMPASS

Tokamak COMPASS (z anglického COMPact ASSEMBly) je zařízení vyvinuté v 80. letech v Culham Science Center v Anglii za účelem studia vysokoteplotního plazmatu. Prvního "breakdownu" (neboli průrazu plazmatu) se tokamak dočkal v roce 1989, tehdy ještě s komorou s kruhovým průřezem. V roce 1992 měl již tokamak vakuovou komoru ve tvaru písmene D a byl schopen dosáhnout vysokého udržení plazmatu tzv. H-módu, čímž se stal nejmenším tokamakem, který je schopen tohoto provozu. Se svými rozměry (viz. tabulka 1.1) se řadí mezi menší tokamaky a jeho podoba se stavějícím se tokamakem ITER z něj dělá vhodný nástroj pro odhad chování plazmatu na ITERu, viz. obrázek 1.1.



Obrázek 1.1: Vlevo: Srovnání velikostí a tvarů průřezů plazmatu. Vpravo: Fotografie komory tokamaku COMPASS.

V roce 2004 byl tokamak nabídnut Ústavu fyziky plazmatu, AV ČR, v.v.i. a v roce 2005 se rozhodlo o jeho přijetí. V roce 2008 se podařilo vytvořit první plazma a následovalo přidávání dalších systémů pro dodatečný ohřev a diagnostiku plazmatu.

K dodatečnému ohřevu bude sloužit anténa na vlečení proudu dolněhybridní vlnou (Lower Hybrid Current Drive) o výkonu 0,4 MW a dva neutrální svazky (Neutral Beam Injection) každý o výkonu 0,3 MW, které mohou být používány ve dvou konfiguracích: tangenciální vstřik kdy oba svazky roztáčí plazma stejným směrem, nebo tangenciální vstřik kdy každý svazek roztáčí plazma opačným směrem a předaná hybnost od obou svazků se vyruší, což více odpovídá situaci na ITERu, kde se očekává nerotující plazma. Základní parametry tokamaku jsou v tabulce 1.1.

Základní parametry tokamaku COMPASS	
Velký poloměr R	0,557 m
Malý poloměr, horizontální a	0,232 m
Malý poloměr, vertikální	0,385 m
Aspekt R/a	2,53
Materiál komory	Inconel 625
Materiál divertoru	Grafit
Maximální toroidální pole na ose B_T	2,1 T
Maximální proud plazmatem I_p	350 kA
Délka výboje	300ms, max 1s
Current Drive P_{LH} 1,3 GHz	0,4 MW
Neutrální svazek P_{NBI} 40 keV	2x0,3 MW
Tlak	1×10^{-8} Pa

Tabulka 1.1: Základní parametry tokamaku COMPASS.

Pro měření vlastností plazmatu budou na tokamaku sloužit následující diagnostiky:

Magnetické diagnostiky:

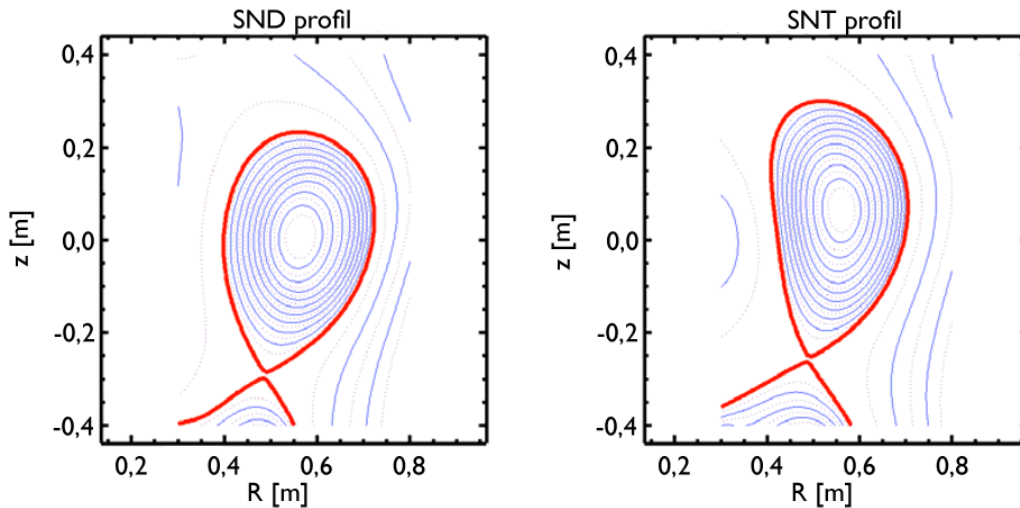
Patří mezi základní diagnostiky na každém tokamaku. Tokamak COMPASS je vybaven počtem přibližně 400 diagnostických cívek pro měření proudu plazmatem, tvaru a pozice plazmatu, vodivosti plazmatu, MHD nestabilit a energie plazmatu. Na základě znalostí tvaru a polohy plazmatu je možné pomocí cívek vertikálního pole a zpětnovazebního řízení mít plazma na požadované pozici a dosáhnout delšího výboje.

Mikrovlnné diagnostiky:

Elektromagnetické záření v mikrovlnné oblasti je používáno k určení vlastností elektronů v plazmatu. Tokamak bude vybaven jak aktivními diagnostikami (interferometr, reflektometr), tak pasivními (detekce mikrovlnného záření plazmatu). Pro určení hustoty elektronů je používán jednak 2-mm interferometr, který měří průměrnou hustotu elektronů po měřené dráze a dále mikrovlnná reflektometrie pro určení radiálního profilu hustoty na okraji plazmatu, přičemž tato diagnostika se bude doplňovat s diagnostikou lithiového svazku (viz 3. kapitola této práce). Pro měření radiálního profilu elektronové teploty slouží ECE (elektronová cyklotronová emise)/ EBW (elektronové Bernsteinovy vlny) radiometr. ECE/EBW diagnostika potřebuje absolutní kalibraci, např. měřením teploty z Thomsonova rozptylu.

Spektroskopické diagnostiky:

Spektroskopické diagnostiky můžeme rozdělit na tzv. aktivní diagnostiky kdy detekované záření vzniklo jako následek interakce částic nebo záření do plazmatu dodaných experimentátorem s částicemi plazmatu a na diagnostiky pasivní, kdy záření z plazmatu pouze detekujeme. Do první skupiny diagnostik patří Thomsonův rozptyl laserového záření na elektronech plazmatu pro měření elektronové hustoty a teploty. Do druhé skupiny patří rychlá kamera (32x1 px 140 kHz) pracující ve viditelném spektru sledující interakce plazmatu se stěnami komory, dále multikanálový optický systém pro měření záření plazmatu ve viditelném spektru s možností určení časového vývoje záření vodíku a nečistot, v oblasti extrémě ultrafialové a měkké rentgenové oblasti pracují bolometry (XUV) a SXR detektory měřící celkové radiační ztráty a profil intenzity záření plazmatu, a pro určení rotace plazmatu je detekováno záření okolo vlnové délky 465 nm, pro určení Dopplerova posuvu



Obrázek 1.2: Možné tvary průřezů plazmatu na tokamaku COMPASS.

spektrální čáry uhlíku CIII (tj. C^{2+})

Svazková a částicová diagnostika:

Pro studium okrajového plazmatu se používá lithiový svazek, a to ve dvou diagnostikách: Spektroskopie záření ze svazku (Beam Emission Spectroscopy) využívá detekce čárového záření částic vstříknutého lithiového svazku k určení profilu hustoty elektronů a 2D fluktuací hustoty elektronů na okraji plazmatu. A diagnostika pomocí sondy atomového svazku (Atomic Beam Probe), kde měření posunu ionizovaných atomů lithiového svazku v toroidálním směru slouží k určení perturbací poloidálního magnetického pole a proudového profilu na okraji plazmatu. Na tokamaku je dále použit analyzátor neutrálních částic pro určení energetického rozdělení rychlých atomů unikajících z plazmatu.

Sondová diagnostika:

Na tokamaku bude několik typů sond. Již funkční sada diverzorových Langmuirových sond (39) sloužící k měření hustoty elektronů, teploty elektronů a plovoucího potenciálu v oblasti divertoru, bude rozšířena o dalších 14 sond na HFS. Dvě reciproké sondy (jedna ve vertikálním druhá v horizontálním směru) budou měřit v SOL (diamantovou hlavici se plánuje vstřelovat až do oblasti pedestalu) radiální profil elektrického potenciálu plazmatu, elektronovou hustotu a teplotu, rychlost pohybu plazmatu podél magnetických siločar, tok částic na stěnu a iontovou teplotu. Plánuje se i výroba a použití U-sondy, Sendvičové sondy a dalších.

Komora ve tvaru písmene D ve spolupráci s cívkami vertikálního pole je schopna formovat plazma do diverzorových konfigurací DND (doble null D) i SND (single null D) průřezem. Nejčastěji se budou používat dva typy profilů SND a SNT (s vyšší triangularitou) viz obrázek 1.2. V limiterových konfiguracích lze mít kruhový průřez i průřez ve tvaru písmene D. U plazmatu s posledním ze zmiňovaných průřezů dochází k přechodu z L do H-módu, kdy se v plazmatu vytvoří transportní bariéra, na okraji plazmatu vznikne oblast s vysokým gradientem hustoty (oblast pedestalu) a tím se zvýší i hustota ve středu plazmatu.

Vlastnosti L-H přechodu (prahová energie potřebná pro L-H přechod, hystereze L-H a H-L přechodu, šířka pedestalu a úloha škálovacích metod v L-H přechodu) stejně jako

okrajové nestability (ELM - Edge Localized Modes), turbulence v plazmatu a transport částic jsou jedním z hlavních cílů výzkumu na tokamaku COMPASS.

Předmětem výzkumu na tokamaku COMPASS je dále interakce plazmatu s elektromagnetickým vlněním tj. studium interakce dolně-hybridní vlny (LHW) s plazmatem a jevů v blízkosti LHW antény, ohřevu plazmatu pomocí iontově-cyklotronní vlny (ICRH) a studium generace a detekce elektronových Bernsteinových vln (EBW). Výzkum je také spojen s vývojem pokročilých diagnostických metod, jako jsou pokročilé elektrické sondy pro měření parametrů okrajového plazmatu (iontová teplota, potenciál plazmatu a fluktuací), nové diagnostické metody pro měření magnetických polí na zařízeních typu tokamak/stelarátor (Hallové senzory) a vývoj diagnostiky pro měření elektronové teploty a hustoty plazmatu s vysokým prostorovým rozlišením pomocí metody Thomsonova rozptylu.

Následující kapitoly se pokusí shrnout vlastnosti diagnostik CXRS (Charge Exchange Recombination Spectroscopy) pomocí neutrálního svazku, ačkoliv použití této diagnostiky se na tokamaku v blízké době neuvažuje, a diagnostik BES a ABP s použitím lithiového svazku.

Kapitola 2

Neutrální svazek

Cílem zařízení pro vstřik neutrálního svazku (NBI - Neutral Beam Injection) na tokamacích je především dodatečný ohřev plazmatu. Pro předání energii svazku do centra plazmatu není možné použít nabité částice, které by byly vychýleny magnetickým polem a narazily by na stěnu vstřikovacího portu nebo dostaly do oblasti okrajového plazmatu a po svém Larmorovském poloměru by vycestovaly ven na stěnu. Neutrální částice, které pronikají hlouběji do plazmatu a ionizují se v oblasti silnějšího magnetického pole mají větší šanci na zachycení v plazmatu.

Z diagnostického hlediska je to zatím nejlepší diagnostická metoda pro měření hustoty, teploty a rychlosti nečistot v plazmatu.

Neutrální atomy svazku se při průchodu plazmatem srážejí s elektrony a ionty plazmatu a ionizují se, ionizované atomy jsou zachyceny magnetickým polem a předávají svoji kinetickou energii částicím plazmatu. Neutrální svazek vzniká urychlením vodíkových nebo deuteriových iontů rozdílem elektrických potenciálů, urychlené ionty procházejí neutralizační částí, tj. řídkým vodíkovým plynem kde nábojovou výměnou zachycují elektrony, rychlé neutrální atomy míří do tokamaku.

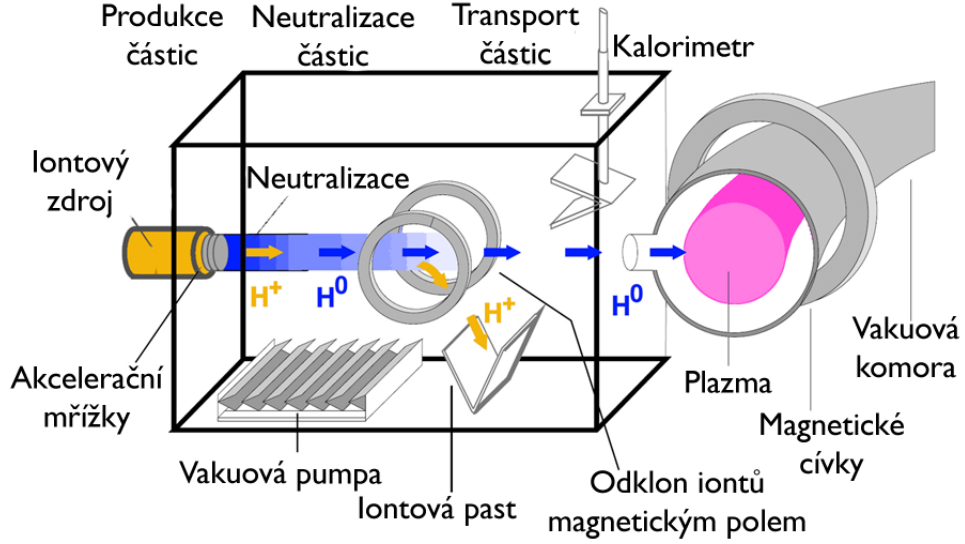
Základní parametry neutrálního svazku jsou průřez d , energie produkovaných částic E [eV] a celkový výkon P [W]. Hustota svazku je dána vztahem

$$n_b = \frac{I}{veS} \quad (2.1)$$

kde $I = P/E$ [A] je tzv. ekvivalentní proud svazku, e elementární náboj, v rychlost částic svazku a $S = \pi(d/2)^2$ plocha průřezu svazku. Schéma zařízení pro vstřik neutrálního svazku je na obrázku 2.1.

2.1 Produkce částic svazku

Při vytváření svazku se nejprve ve výbojce vytvoří jednou ionizované atomy a molekuly H_1^+ , H_2^+ a H_3^+ případně v malém množství i molekuly vody H_2O^+ . Částice jsou následně urychleny soustavou urychlovacích mřížek, kdy získají všechny částice stejnou kinetickou energii, avšak díky rozdílu jejich hmotností v poměru 1:2:3:18 mají rychlosti v poměru $1 : 1/\sqrt{2} : 1/\sqrt{3} : 1/\sqrt{18}$. Molekuly se při průchodu neutralizačním plynem jednak neutralizují ale i disociují, výsledkem je proud iontů H_1^+ se složkami o energii E_0 , $E_0/2$, $E_0/3$ a $E_0/18$. Ionty, které nebyly zneutralizovány, jsou magnetickým polem odkloněny z dráhy svazku a zachyceny iontovou pastí, viz obrázek 2.1.



Obrázek 2.1: Schéma neutrálního svazku. Převzato z [9].

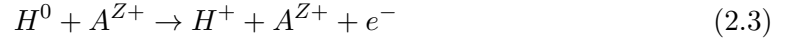
2.2 Útlum svazku

Vlivem interakce svazku s plazmatem se částice svazku ionizují, tj. hustota atomů svazku po dráze v plazmatu klesá. Svazek s plazmatem interaguje těmito mechanismy:

Ionizace elektronem



Ionizace iontem



Výměna elektronu s iontem



Označíme-li λ koeficient útlumu svazku zahrnující všechny tři procesy, potom útlum svazku můžeme vyjádřit vztahem:

$$\frac{dn_b}{dx} = -\lambda n_b \quad (2.5)$$

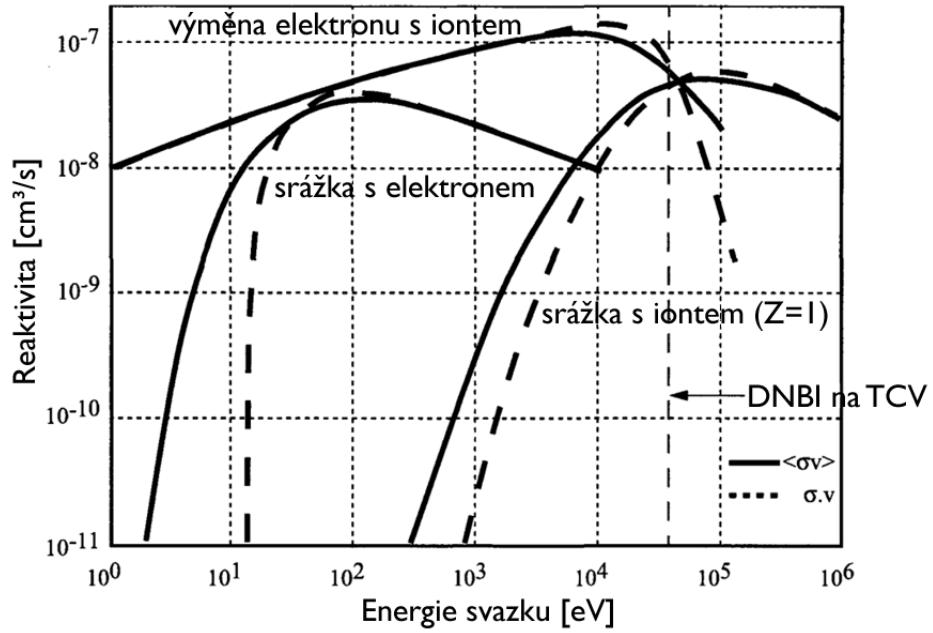
jehož integrací po dráze v plazmatu vymezenou body A a B získáme vztah

$$n_b(B) = n_b(A) \exp\left(-\int_A^B \lambda dx\right) \quad (2.6)$$

Uvážíme-li, že zmíněné typy interakcí mohou probíhat i na nečistotách v plazmatu, bude celkový srážkový průřez λ dán vztahem

$$\lambda v_b = \sum_j n_j \langle \sigma_j v_j \rangle_b \quad (2.7)$$

kde sumu vysčítáme přes všechny částice v plazmatu, v_j je rychlost částic a n_j jejich koncentrace. Hodnota součinu srážkového průřezu $\sigma(|v - v_b|)$ a rychlosti částic prostředí v udává počet reakcí v jednotce objemu za jednotku času a nazýváme ho reaktivitou.



Obrázek 2.2: Závislost reaktivity na energii neutrálního svazku. Převzato z [4].

Závislost reaktivity na energii neutrálního svazku pro interakci svazku s protony a elektrony je na obrázku 2.2. V reálné situaci jsou rychlosti částic prostředí popsány jistou rozdělovací funkcí $f(v)$ a je vhodné použít vystředovanou hodnotu reaktivity přes rychlosti částic v plazmatu

$$\langle \sigma_j v_j \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(|v_j - v_b|) f(v_j) dv_j. \quad (2.8)$$

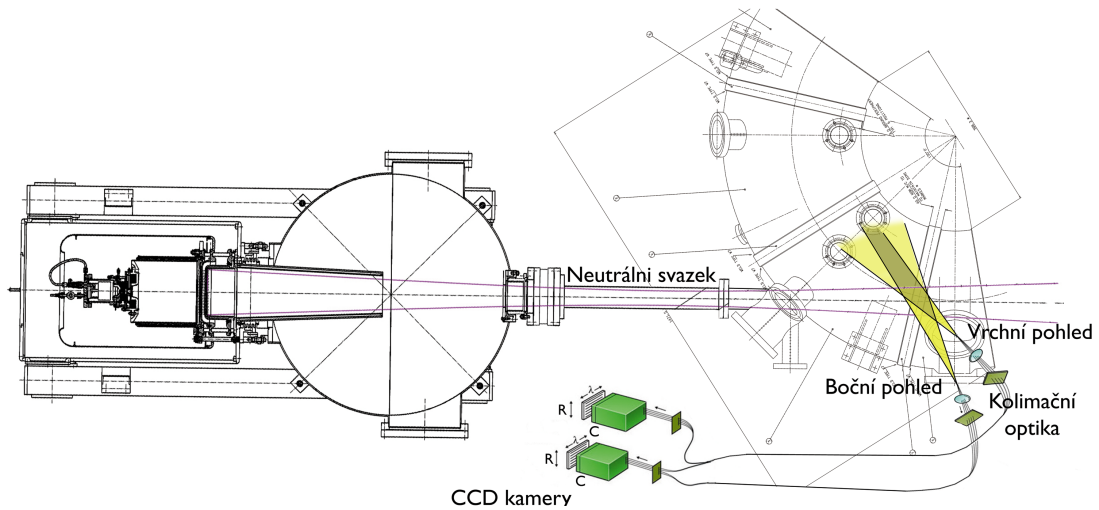
Rychlosti částic v plazmatu popisujeme Maxwellovským rozdělením a rychlost částic svazku uvažujeme konstantní. Vztah 2.7 si pro náš experiment můžeme dále zjednodušit, pokud rychlost elektronů v plazmatu je mnohem vyšší než rychlost svazku a rychlost iontů v plazmatu je mnohem nižší než rychlost svazku, tedy $v_e \gg v_b \gg v_i$. Při energii svazku $E = 40 \text{ keV}$ a teplotě plazmatu 1 keV toto jistě platí, neboť $v_b = \sqrt{2E/m_p} = 2,77 \cdot 10^6 \text{ m/s}$, $v_p = 4,38 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ a $v_e = 1,86 \cdot 10^7 \text{ m/s}$. Částice v plazmatu těžší než proton budou mít při stejné teplotě rychlost nižší. Dosazením do 2.7 dostáváme vztah

$$\lambda = n_e \frac{\langle \sigma_e v_e \rangle}{v_b} + \sum_j n_j \sigma_j \quad (2.9)$$

kde σ_j představuje celkový srážkový průřez s ionty zahrnující jak srážkový průřez pro ionizaci tak pro nábojovou výměnu s iontem. Koeficienty σ_j při naší aproximaci závisí pouze na rychlosti částic neutrálního svazku tj. na jeho energii, zatímco reaktivita $\langle \sigma_e v_e \rangle$ závisí na rychlosti elektronů tj. na elektronové teplotě. Ze vztahu 2.9 vyplývá, že s rostoucí energií svazku klesá vliv ionizace elektrony, viz obrázek 2.2.

2.3 CXRS

Jedná se o aktivní spektroskopickou metodu využívající neutrální svazek. Za pomoci nábojové výměny, kdy jiný atom nebo iont předá elektron ze svého elektronového obalu do elektronového obalu ionizovanému atomu uhlíku, je možné detekovat čárové záření



Obrázek 2.3: Možné experimentální uspořádání diagnostiky CXRS.

atomu uhlíku při deexcitaci přijatého elektronu. To je cílem spektroskopie pomocí nábojové výměny (CXRS - Charge Exchange Recombination Spectroscopy). Neutrální atom vodíku nebo deuteria interaguje s ionizovaným atomem uhlíku, dojde k přenosu elektronu na jednu z energetických hladin atomu uhlíku a jeho následné deexcitaci na hladinu nižší a vyzáření příslušného kvanta záření. Detekci vyzářeného spektra lze měřit hustotu (z intenzity záření), teplotu (z šířky spektrální čáry) a rychlost pohybu (z dopplerova posuvu) plně ionizovaných atomů uhlíku ze středu plazmatu. Průběh nábojové výměny můžeme popsat rovnicí:

$$H^0 + A^{Z+} \rightarrow H^+ + A^{*(Z-1)+} \quad (2.10)$$

kde neutrální vodíkový resp. deuterionový atom H^0 si vymění elektron s plně ionizovaným atomem A^{Z+} , a vzniká proton resp. jádro deuteria a $Z - 1$ krát ionizovaný excitovaný atom $A^{*(Z-1)+}$ (tzv. vodíku podobný iont). Deexcitací přijatého elektronu vzniká čárové záření. Neutrální částice svazku nejsou ovlivněny magnetickým polem tokamaku, proto je možné svazek neutrálních částic zaměřit do centrálních oblastí plazmatu. Použitím dostatečně úzkého profilu svazku oproti velikosti plazmatu lze měřit prostorové rozložení iontů uhlíku v plazmatu. Kromě prostorového rozlišení lze pomocí CXRS získat i časový vývoj parametrů nečistot za podmínky získání dostatečné intenzity signálu.

Intenzitou záření rozumíme počet fotonů vyzářených za jednotku času v jednotce objemu. Intenzita záření iontu A^{Z+} v bodě r se dá vyjádřit jako

$$I(r) = n_b(r)n_A(r) \langle \sigma v \rangle (r) \quad (2.11)$$

kde $n_b(r)$ je hustota neutrálních atomů, $n_A(r)$ hustota zcela ionizovaných atomů A^{Z+} v plazmatu a $\langle \sigma v \rangle (r)$ je reaktivita příslušné interakce.

Reaktivitou $\langle \sigma v \rangle$ rozumíme střední hodnotu součinu srážkového průřezu a relativní rychlosti iontů A^{Z+} a neutrálních atomů. Srážkový průřez σ v sobě zahrnuje dva procesy, za prvé přenesení elektronu z neutrálního atomu svazku na iont A^{Z+} a za druhé deexcitaci přijatého elektronu z energetické hladiny $n=i$ na energetickou hladinu $n=j$ (odpovídající pozorované spektrální čáře), kde n značí hlavní kvantové číslo.

Při deexcitaci elektronu se vyzáří foton o vlnové délce úměrné rozdílu energetických hladin $i-j$. Záření dopadající do optiky na diagnostických portech tokamaku je pomocí optických vláken přiváděno do spektrometru a požadované vlnové délky se detekují CCD kamerou viz obrázek 2.3.

Kapitola 3

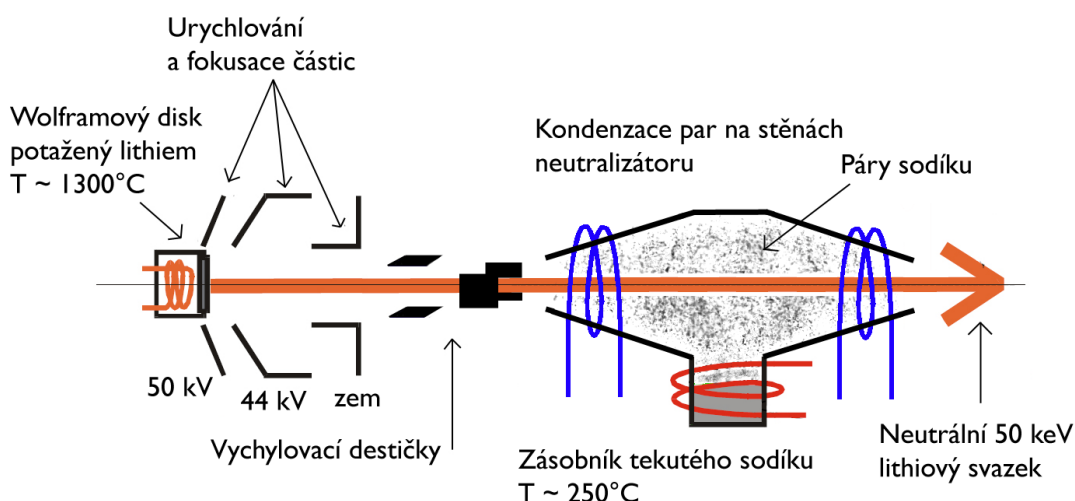
Lithiový svazek

Lithiový svazek je čistě diagnostický nástroj (na rozdíl od neutrálního svazku viz kapitola 2) o výkonu řádově 100W, který je využíván k měření okrajových vlastností plazmatu. Na tokamaku COMPASS bude lithiový svazek používán k měření následujících parametrů:

- Radiálního profilu elektronové hustoty na okraji plazmatu s prostorovým rozlišením 2cm, časovým rozlišením CCD $\sim 10\text{ms}$, APD $\sim \mu\text{s}$.
- 2D měření fluktuací elektronové hustoty na okraji plazmatu a s tím související studium anomálního transportu a studium poloidálních toků a turbulentních struktur na okraji plazmatu.
- Měření fluktuací magnetického pole a perturbací proudu na okraji plazmatu a s tím související studium pedestalu a nestability ELM.

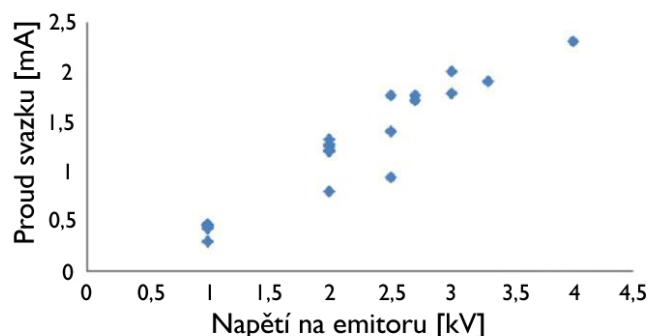
Pro měření budou použity dvě diagnostické metody: BES (Beam Emission Spectroscopy) k měření radiálního profilu hustoty elektronů a metoda ABP (Atomic Beam Probe) k měření poloidálního magnetického pole tokamaku.

3.1 Princip a design Li svazku na COMPASSu



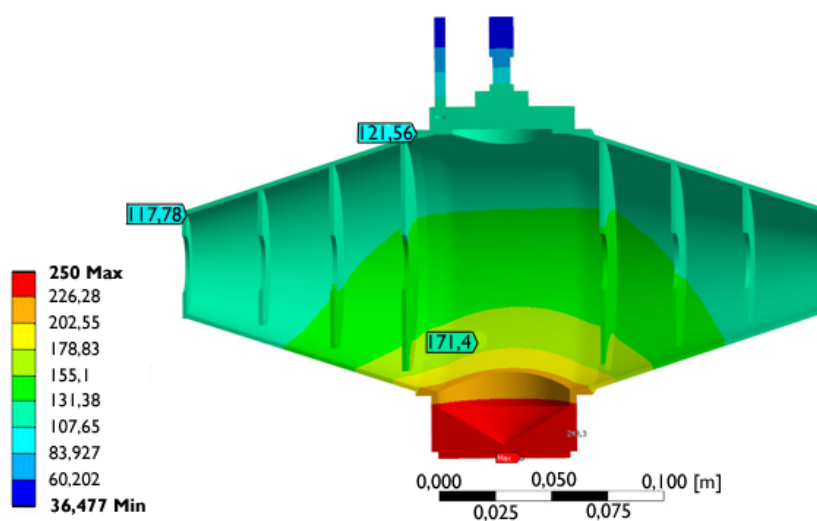
Obrázek 3.1: Schéma zařízení pro vstřik lithiového svazku. Převzato z [6]

Zdrojem lithiových atomů je žhavená katoda (emitor). Jedná se o kruhovou destičku o průměru 19 mm z β - eukryptidu ($\text{Li}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2$) vložené do molybdenové dutiny. Ohmickým ohřevem (ale lze použít i elektronový svazek) je katoda rozžhavena na teplotu okolo 1400 °C a přiloženým napětím jsou emitovány ionty lithia. Maximální proud svazku je limitován vlastnostmi katody viz obrázek 3.2. Životnost tohoto typu emitoru



Obrázek 3.2: Závislost proudu emitovaných iontů v závislosti na přiloženém napětí. Převzato z [11]

je okolo hodiny stálého provozu tzn. při výbojích, kdy je svazek zapnutý řádově vteřiny, bude nutné emitor měnit přibližně jednou za půl roku. Životnost emitoru je ovlivněna i emitujícím proudem. Emitované ionty lithia jsou urychleny soustavou nabitých prstenců na požadovanou energii. Mezi neutralizátorem a urychlovací částí jsou dvě dvojice vychylovacích elektrod. Horní a dolní elektroda slouží k rozmítání svazku ve vertikálním směru v rozsahu $\pm 5\text{cm}$ a umožňují kvazi 2D měření a také vychýlení do Faradayovy komůrky sloužící k měření záření pozadí. Boční elektrody se používají pro nastavení vhodné trajektorie svazku. Ionť lithia v neutralizační části získá nábojovou výměnou od atomů sodíku elektron a pokračuje do komory tokamaku. V neutralizační části je zásobník kapalného sodíku ohříván na teplotu ~ 250 °C. Při této teplotě je dostatečná rychlost vypařování sodíku a tlak par v interakční oblasti je dostatečný. Aby se zabránilo úniku par sodíku,



Obrázek 3.3: Rovnovážní profil teploty v neutralizátoru.

3.2 Experimentální uspořádání

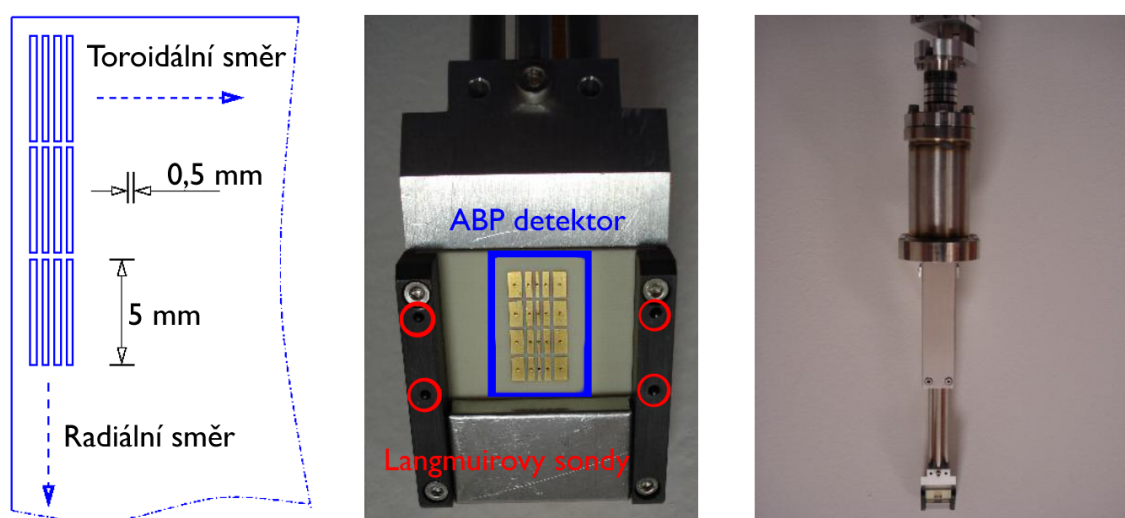
21

3.2.1 CCD kamera

V jednom z horních portů bude umístěna CCD kamera s rozlišením 640x480 px a časovým rozlišením 100 Hz. Kamera je schopná i dvojnásobného časového rozlišení při zmenšení prostorového rozlišení, avšak předpokládá se že pro detekci dostatečné intenzity záření je doba expozice 10 ms optimální. Před kamerou je instalována fokusovací optika a filtr pro vlnovou délku 670,8 nm (odpovídá přechodu lithia 2p-2s).

3.2.2 ABP detektor

Je umístěn v horním portu tokamaku ve stejném poloidálním řezu jako CCD kamera. Jedná se o pole 20ti (4x5) měděných destiček sloužících k detekci iontů lithia. Hlavice je osazena i čtyřmi Langmuirovými sondami. Celou hlavici se dá vertikálně pohybovat pro nastavení optimální pozice pro detekci iontů lithia. Testovací ABP detektor je zobrazen na obrázku 3.6. Tento detektor v současné době slouží k měření úrovně šumu bez použití svazku.



Obrázek 3.6: Vlevo: Přepokladané uspořádání sond na ABP detektoru. Uprostřed a vpravo: Testovací ABP detektor používaný na tokamaku. Převzato z [11].

3.2.3 Lavinové fotodiody

Lavinové fotodiody (APD) budou zasunuty do spodního portu tokamaku ve stejném poloidálním řezu jako CCD kamera i ABP detektor. Tento detektor se v současné době vyvíjí v RMKI, Maďarsku. Jedná se o 20 až 22 křemíkových detektorů s efektivní plochou 25 mm² a časovým rozlišením několika μ s. Kvantová účinnost detektoru bude 85%. Součástí bude i nízkošumový zesilovač navržený v RMKI. Celý detektor bude udržován v pouzdru se stabilní teplotou.

3.3 Interakce částic

Částice svazku jsou v plazmatu excitovány a ionizovány. Intenzita záření (vzniklého deexcitací fotonu) po dobu interakce svazku s plazmatem je ovlivněna populací na jednotlivých energetických hladinách atomu lithia. Změna počtu elektronů na i -té hladině

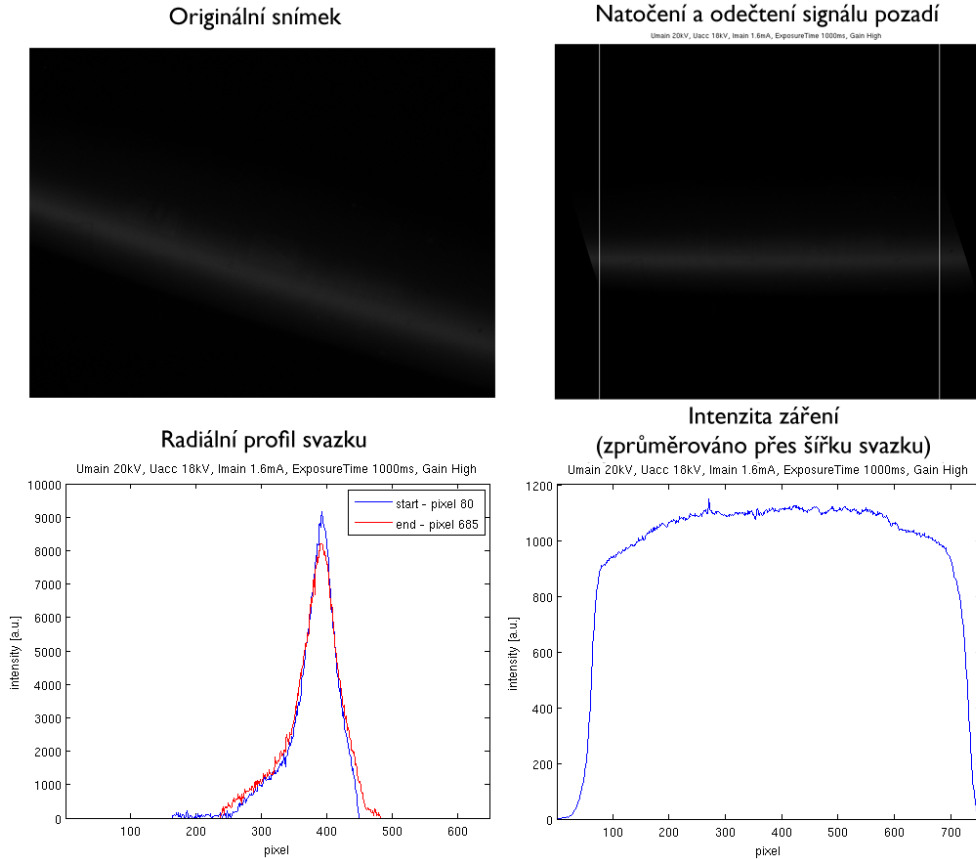
v závislosti na interakci s elektrony a ionty v plazmatu je popsána rovnicí 3.1.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} n_i = & \sum_{j,j \neq i} \langle \sigma_{e,ji} v \rangle n_e n_j - \sum_{j,j \neq i} \langle \sigma_{e,ij} v \rangle n_e n_i + \sum_{j,j \neq i} \langle \sigma_{p,ji} v \rangle n_{ion} n_j - \sum_{j,j \neq i} \langle \sigma_{p,ij} v \rangle n_{ion} n_i \\ & + \sum_{j,j > i} A_{ji} n_j - \sum_{j,j < i} A_{ij} n_i - \langle \sigma_{e \rightarrow ion, i} v \rangle n_e n_i - \langle \sigma_{p \rightarrow ion, i} v \rangle n_{ion} n_i - \langle \sigma_{cx, i} v \rangle n_{ion} n_i \end{aligned} \quad (3.1)$$

kde n_e, n_{ion} je hustota elektronů a hustota iontů, n_i, n_j je počet elektronů na i -té a j -té energetické hladině, $\langle \sigma_{e,ij} v \rangle, \langle \sigma_{p,ij} v \rangle$ jsou reaktivity excitace elektronu z i -té na j -tou hladinu srážkou s elektronem a iontem, A_{ij} je pravděpodobnost spontánní emise z hladiny i na hladinu j a $\langle \sigma_{e \rightarrow ion, i} v \rangle, \langle \sigma_{p \rightarrow ion, i} v \rangle, \langle \sigma_{cx, i} v \rangle$ jsou reaktivity ionizace elektronem, iontem a nábojové výměny. Účinné průřezy příslušných procesů jsou fitovány z tabelovaných funkcí např. [13], [15], [16], [5]. V tokamakovém plazmatu se často zanedbává srážková deexcitace oproti spontánní emisi.

3.4 BES (Beam Emission Spectroscopy)

Jedná se o aktivní spektroskopickou metodu, při které se detekuje čárové záření atomů lithia vstříknutých do plazmatu. Rekonstrukcí měřené intenzity záření lze získat 2D fluktuace hustoty elektronů (svazek je rozmítán do několika pozic v poloidálním řezu, nejedná se o celý poloidální řez plazmatu) a radiální profil hustoty elektronů.



Obrázek 3.7: Snímek CCD kamerou: vstřík iontového lithiového svazku do vodíkovém plynu. Urychlovací napětí 18 kV, proud emitoru 1,6 mA, expoziční čas 1000 ms.

Rozmítání svazku je prováděno elektrostatickými vychylovacími destičkami v rozsahu ± 5 cm (v oblasti plazmatu) s rychlostí až 400Hz. Svazek se bude zvrchu snímat CCD kamerou a ze spodu lavinovými fotodiodami. Pro odečtení pozadí budou sloužit snímky pořízené při vychylení svazku do faradayovy komůrky.

V současné době nejsou na tokamaku nainstalovány lavinové fotodiody ale pouze CCD kamera. První experimenty na tokamaku se svazkem proběhly s pouze s iontovým lithiovým svazkem (bez neutralizace) do vodíkového plynu (bez magnetických polí, tlak v komoře $2,7 \cdot 10^{-4}$ mbar). Na obrázcích 3.7 jsou zobrazeny první snímky z CCD kamery.

Tyto testovací snímky slouží k sledování parametrů svazku. Do komory vlétají ionty lithia, které získají pomocí nábojové výměny (Charge Exchange) elektron od atomu vodíku a začnou emitovat čarové záření. Při vstupu iontů do komory by měla intenzita záření narůstat. Na původním snímku je vidět i protější port na dolní straně komory. Po odečtení pozadí a natočení snímku je možné vykreslit radiální profil intenzity svazku. Změna šířky radiálního profilu vstupního a koncového profilu svazku je nepatrná (kamera snímá skoro celou šíři komory, nebyla však ještě nakalibrována velikost pixelů). Strmější spád pravé jedné strany je způsoben oříznutím jednou z clonek, svazek nemířil přesně do jejího středu.

3.5 ABP (Atomic Beam Probe)

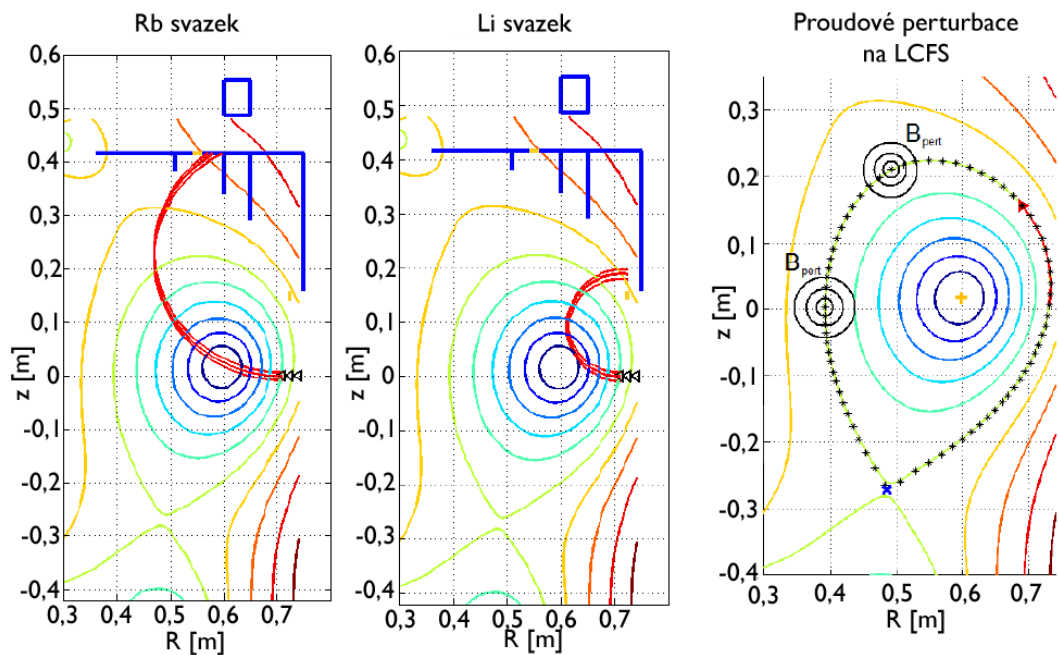
ABP představuje alternativu k HIBP (Heavy Ion Beam Probe). Neutrální atomy svazku se při interakci s plazmatem ionizují a dochází k zakřivení jejich trajektorie vlivem magnetického pole tokamaku. V horním portu tokamaku ve stejném poloidálním řezu jako je vstřikován svazek je umístěn ABP detektor zachycující ionty vychýlené ze svazku, viz obrázek 3.8. Intenzita dopadajících iontů je úměrná hustotě plazmatu v místě ionizace a posun iontů v toroidálním směru je způsoben poloidální složkou magnetického pole integrovanou po dráze iontu.

Důvodem použití alkalických kovů je mnohem vyšší 2. ionizační energie nežli 1 a tím i menší pravděpodobnost 2. ionizace, která by způsobila změnu trajektorie iontu tak, že by dopadal mimo ABP detektor. Na obrázku 3.8 je srovnání modelovaných trajektorií Rb a Li. Těžší ionty by se dostali dále do plazmatu avšak častěji dochází vícenásobné ionizaci, viz tabulka 3.1.

	1. ionizační potenciál	2. ionizační potenciál	Poměr proudů 2x ioniz./ 1x ioniz.
Li	5,42 eV	76,02 eV	5%
Na	5,16 eV	47,52 eV	18%
K	4,36 eV	31,79 eV	41%
Rb	4,20 eV	27,43 eV	100%
Cs	3,91 eV	23,27 eV	100%

Tabulka 3.1: Hodnoty 1. a 2. ionizačního potenciálu a poměru proudů částic 2x a 1x ionizovaných atomů lithia. Převzato z [3]

Pro měření pomocí ABP detektoru bude u svazku, který má pro BES průměr okolo 2cm, vycloněna středová část o průměru několika mm. Před samotným ABP detektorem bude clona omezující vnik iontů a elektronů plazmatu, čímž se sníží šum pozadí. Pozadí naměřené při svazku vychýleném do faradayovy komůrky bude z celkového signálu před jeho rekonstrukcí odečteno. Uspořádání svazku a ABP detektoru je koncipováno tak, aby na detektor přímo dopadalo co nejméně UV a XR, které mohou vyrazit elektrony z detektoru a tím představovat iontový proud.



Obrázek 3.8: Simulace trajektorie jednou ionizovaných atomů Rb a Li a zobrazení proudových perturbací na LCFS. Převzato z [3]

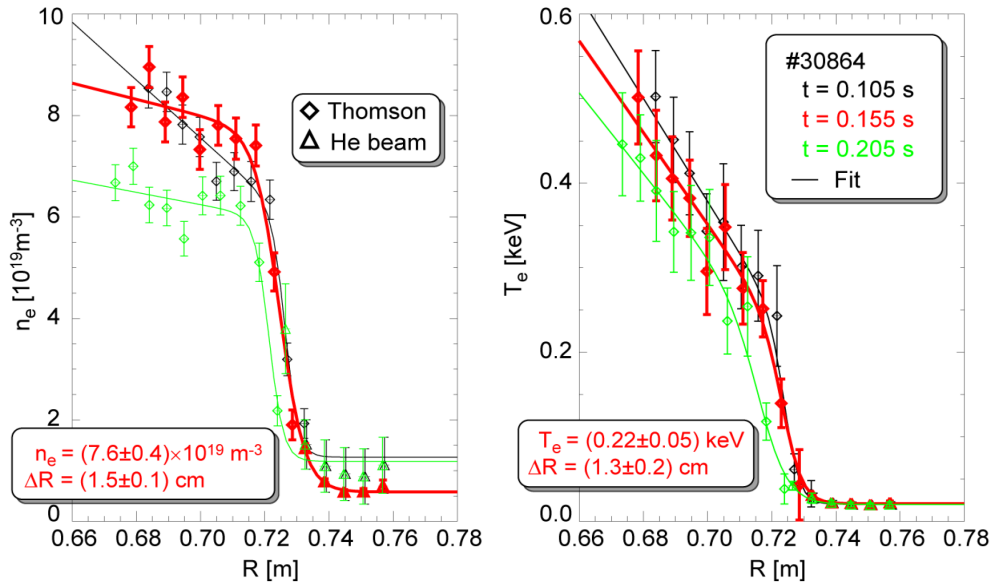
Plánovaná hlavice ABP detektoru bude mít detekční segmenty široké 0,5 mm v toroidálním směru, viz obrázek 3.6, a očekává se prostorové rozlišení okolo 0,1 mm. To odpovídá proudu 1kA což na tokamaku COMPASS představuje 1% celkového proudu v plazmatu. Proudové perturbace o proudu větším než 1kA způsobí posun lithiových iontů v toroidálním směru, které by mělo jít metodou ABP detekovat. Tato možnost je velice zajímavá pro studium ELMů.

Kapitola 4

BES - Rekonstrukce profilu hustoty

Výstupem z měření BES je naměřený profil intenzity záření pomocí lavinových fotodiód v několika bodech (max 20), více bodů dostaneme z CCD kamery v závislosti na hloubce vniku svazku do plazmatu. Intenzita záření je závislá na hustotě i teplotě plazmatu viz 3.1.

Pro rekonstrukci hustoty se použije nejprve dopředné metody pro výpočet intenzity záření a potom zpětně změni vstupní parametry v závislosti na rozdílu mezi modelem a experimentem tak, aby následující výpočet byl blíže experimentu.



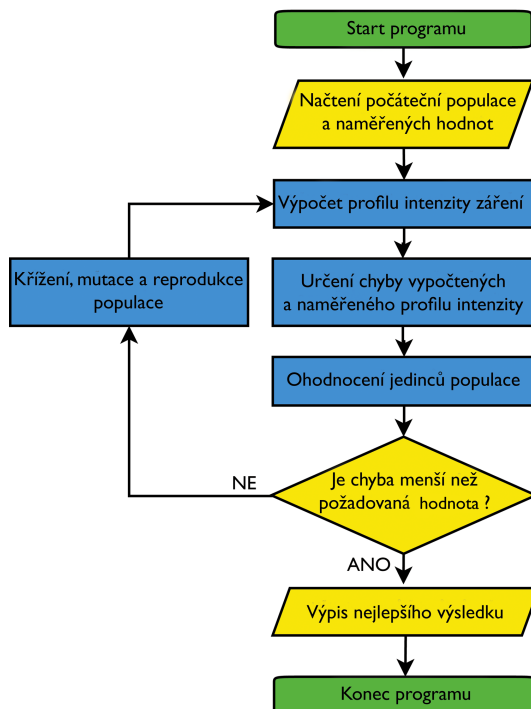
Obrázek 4.1: Profil hustoty a teploty z výstřelu #30864, v době kdy byl tokamak COM-PASS v Culhamu.

Pro simulaci použijeme profil hustoty a teploty popsaný několika parametry. Budeme-li očekávat některý z profilů hustoty v H-módu viz obrázek 4.1, budou popsány rovnicí

$$n_e(x) = A * \tanh(2 * (XSYM - x)/WIDTH) + B + (XKNEE - x) * SLOPE, \quad (4.1)$$

kde $A = (pedestal - offset)/2$, $B = (pedestal + offset)/2$, $WIDTH = (XSYM - XKNEE)*2$, $SLOPE = (max_density - pedestal)/(XKNEE - major_rad)$ a pro výstřel

#30864 jsou parametry $XS\bar{Y}M = 0,7225$, $XKNEE = 0,7100$, $pedestal = 8[10^{19}m^{-3}]$, $offset = 0,0; [10^{19}m^{-3}]$. Výsledná hustota má rozměr $10^{19}m^{-3}$. S takto zvoleným profilem hustoty a teploty plazmatu je potřeba vyřešit rovnici 3.1 nebo soustavu těchto rovnic pro jednotlivé hladiny v atomu lithia a tím získat profil intenzity záření přechodu 2s - 2p v atomu lithia pro konkrétní profil hustoty a teploty. Cílem tohoto postupu je určit vstupní profil hustoty a teploty plazmatu tak aby rozdíl mezi vypočítaným a naměřeným profilem intenzity záření byl co nejmenší (např. metoda nejmenší čtverců). Je zřejmé, že je potřeba na základě rozdílu profilů určit nové vstupní profily hustoty a teploty plazmatu. To je možné například pomocí genetického algoritmu kde za jednotlivé geny jedince považujeme sadu parametrů popisujících jeden profil hustoty a teploty plazmatu. Použití genetického algoritmu je na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Vývojový diagram aplikace genetického algoritmu pro určení profilu hustoty plazmatu z porovnání vypočtených a naměřeného profilu intenzity záření.

Program pro výpočet intenzity záření byl napsán v prostředí Matlab. Celý kód využívá genetický algoritmus z nadstavby Optimization Toolbox.

4.1 Genetický algoritmus

Pro určení další generace vstupních parametrů využívá genetický algoritmus (dále jen GA) principů evoluční biologie. Jednu sadu vstupních parametrů popisující hustotu plazmatu nazýváme jedincem. V našem případě jsou to 4 parametry $pedestal$, $offset$, $XS\bar{Y}M$ a $XKNEE$. Pro každého jedince z populace vypočítáme intenzitu záření plazmatu a porovnáme s experimentálně získanou intenzitou záření. Výsledkem bude ohodnocení jedinců podle velikosti chyby způsobené rozdílem vypočteného a naměřeného profilu intenzity záření. Bude-li chyba větší než požadovaná hodnota, provede se vytvoření nové generace jedinců tj. parametrů popisující hustotou plazmatu.

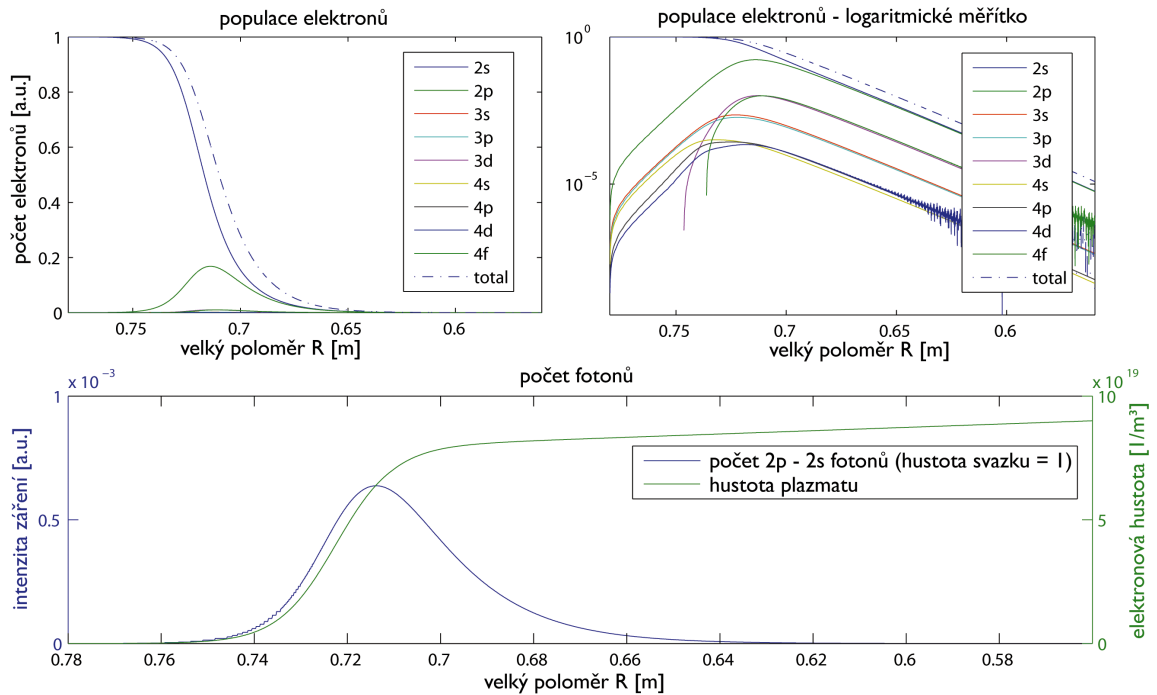
Přitom se vezmou vždy dva jedinci a provede se jedna z následujících operací:

- Křížení: Jedinci si vymění několik genů (parametrů).
- Mutace: Dojde k náhodné změně jednoho nebo více genů (parametrů) jedince.
- Jedinec se ponechá beze změny: Používá se pro nejlépe ohodnocené jedince.

Po vytvoření nové generace se opět provede celý cyklus viz 4.2 dokud chyba nalezeného řešení (správný profil hustoty plazmatu) nebude menší než požadovaná. Implementace genetického algoritmu v nadstavbě Matlabu Optimization Toolbox umožňuje velkou variabilitu v nastavení parametrů křížení, mutace a dalších vlastností výpočtu.

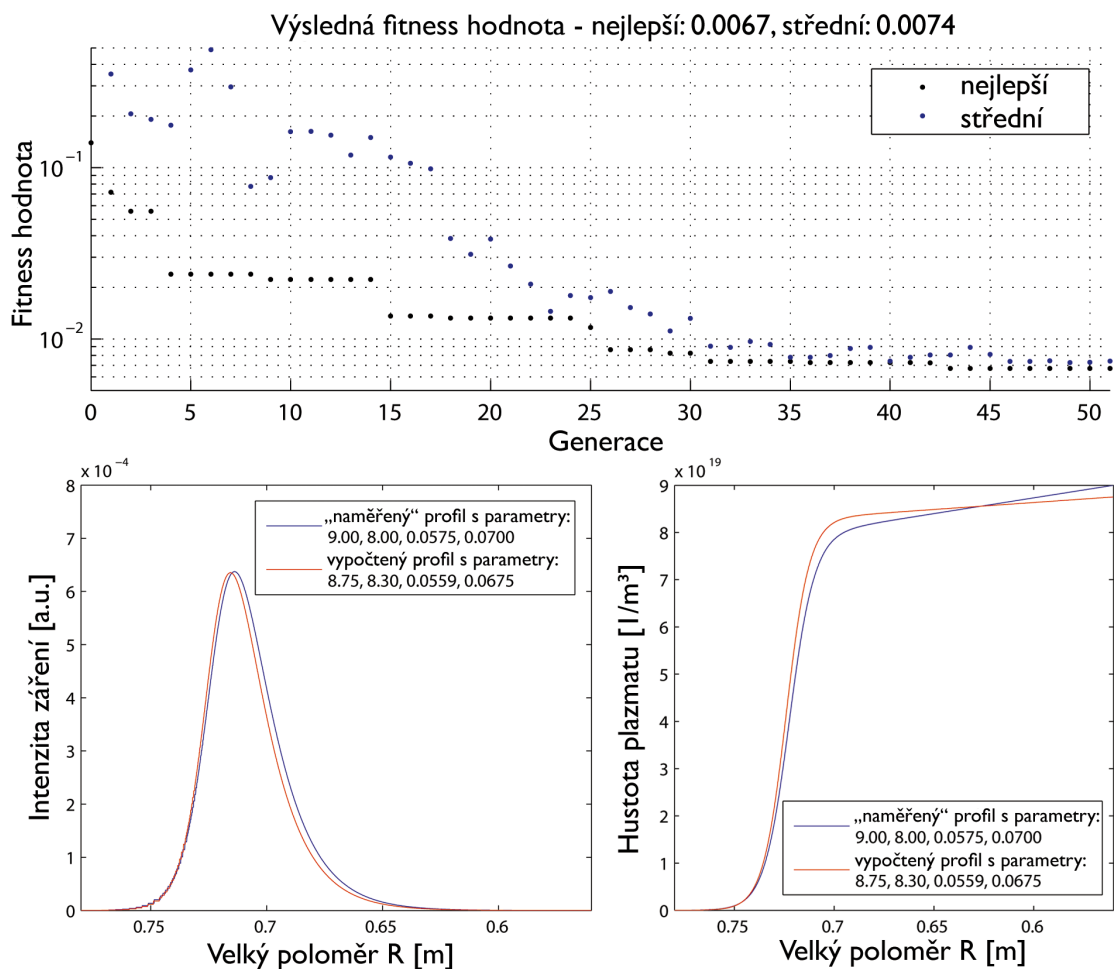
4.2 Rekonstrukce profilu hustoty

Navržený testovací program počítá obazeni hladin řešením soustavy rovnic 3.1 metodou Dormand-Prince 5, pouze se započtením interakce s protony. Jedná se o 1D model počítající populace elektronů v závislosti na velkém poloměru tokamaku. Počet deexcitovaných elektronů mezi hladinami 2p a 2s určuje počet fotonů o vlnové délce 670,8 nm. Typický profil intenzity záření pro energii svazku 25keV je na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Typický profil intenzity záření a obsazení hladin lithia pro energii svazku 25keV.

Tento 4.3 profil intenzity záření nyní použijeme jako naměřený jelikož experimentální data nejsou k dispozici a ani není započítána interakce s elektrony v 3.1. Nejprve byla vytvořena populace 10 jedinců. Cílem genetického algoritmu bylo minimalizovat relativní chybu vypočteného a naměřeného profilu intenzity záření určenou v 14ti hodnotách velkého poloměru tokamaku (0.77 - 0.64 m). Výsledky výpočtu jsou na obrázku 4.4. Výpočet se zastavil ve chvíli kdy průměrná změna fitness hodnoty byla menší než 10^{-6} . Fitness hodnota je funkcí rozdílu naměřeného a vypočteného profilu intenzity záření. Maximální



Obrázek 4.4: Vývoj fitness hodnoty (chyba mezi "naměřeným" a vypočteným profilem intenzity záření) a výsledné profile hustoty a intenzity záření. Výpočet pro populaci 10ti jedinců.

relativní chyba u intenzity je 17% a u hustoty 7%. Výsledné maximální relativní chyby rozdílu profilů silně závisí na parametrizaci profilu hustoty. Doba výpočtu intenzity záření je 0.3 vteřiny na procesoru o výkonu 11GFLOPS. Výsledná doba výpočtu se odvíjí od počtu generací a počtu jedinců.

Závěr

Cílem výzkumného úkolu bylo seznámení se s principy svazkové diagnostiky na tokamacích a podílení se na instalaci lithiového svazku na tokamaku COMPASS. Na základě těchto činností byla vytvořena práce popisující svazkovou diagnostiku na tokamaku COMPASS a jeden z možných způsobů rekonstrukce profilu hustoty na diagnostice BES.

V úvodu práce je shrnuta základní teorie týkající se svazkové diagnostiky na tokamaku COMPASS. Obecné informace o diagnostice na tokamaku jsou v 2. kapitole doplněny detailnějšími informacemi o CXRS diagnostice pomocí neutrálního svazku a ve 3. kapitole je popis lithiového svazku spolu s diagnostikami BES a ABP. Část práce o diagnostice BES je doplněna o první naměřené snímky z CCD kamery (jedná se o nezneutralizovaný svazek vstřikovaný do vodíkového plynu). Ve 4. kapitole je aplikován způsob rekonstrukce profilu hustoty pomocí genetického algoritmu. S ohledem na popis rekonstrukce profilu hustoty na diagnostice BES byl navržen testovací 1D model pro výpočet intenzity záření 2p-2s přechodu atomu lithia. Tento kód byl začleněn do genetického algoritmu z nadstavby MATLABu Optimization Toolbox. Celý program je implementován v prostředí MATLAB.

Pomocí programu byla ověřena možnost hledání profilu hustoty plazmatu pomocí genetického algoritmu. Genetický algoritmus složí k optimalizaci hledání vstupních parametrů programu na základě rozdílu výsledků mezi vypočteným a naměřeným profilem. Pro ověření funkčnosti byl naměřený profil vypočten tímtož programem se sadou parametrů, které se následně porovnaly s parametry nalezenými pomocí genetického algoritmu. Složitost algoritmu je ovlivněna pouze velikostí populace, která se nemění po dobu výpočtu. Nevýhodou je velké množství parametrů ovlivňujících vytvoření další generace a tím i rychlost konvergence. Doba výpočtu je dána počtem jedinců x počet generací.

Tento kód by měl praktické využití (z časového hlediska) pouze pro snímky z CCD kamery, která má časové rozlišení 10 ms. Pro rekonstrukci profilu hustoty z lavinových fotodiod s časovým rozlišením $\sim \mu\text{s}$ je program nepoužitelný z důvodu časové náročnosti výpočtu.

Pro použití programu k rekonstrukci dat z lavinových fotodiod bude zapotřebí kromě nalezení optimálních parametrů mutace, křížení atd. změnit parametrizace profilu hustoty a s ohledem na velikost změny mezi jednotlivými snímky z CCD kamery nebo lavinových fotodiod použít populaci z určité fáze výpočtu jednoho snímku jako počáteční populaci pro výpočet snímku následujícího, což by mohlo zvýšit rychlost výpočtu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] G. Anda, G. Petravich, S. Zoletnik, and S. Bató. Li-beam ion source developments. *Annual Report*, 2004.
- [2] G. Anda, G. Petravich, S. Zoletnik, and S. Bató. Li-beam developments for high-energy plasma diagnostics. *Fusion engineering and design*, 74(1-4):715–719, 2005.
- [3] M. Berta, A. Bencze, G. Anda, M. Aradi, D. Dunai, G. Veres, and S. Zoletnik. Concept of an atomic beam probe diagnostic on compass tokamak. In *36th EPS Conference on Plasma Physics, ECA*, volume 33, pages 5–139, 2009.
- [4] P. Bosshard. *Confinement ionique dans le tokamak TCV mesuré par spectroscopie d'échange de charge*. PhD thesis, EPFL, Lausanne, 2003. Vedoucí dizertační práce Basil Duval.
- [5] R. Brandenburg, J. Schweinzer, S. Fiedler, F. Aumayr, and HP Winter. Modelling of fast neutral li beams for fusion edge plasma diagnostics. *Plasma physics and controlled fusion*, 41:471, 1999.
- [6] M. Brix, A. Korotkov, M. Lehnen, P. Morgan, K. McCormick, J. Schweinzer, D. Summers, and J. Vince. Determination of edge density profiles in jet using a 50kv lithium beam. In *Proc. 28th Conf. on Control. Fusion Plasma Phys.(Madeira) Europhys. Conf. Abstracts*, 2001.
- [7] F.F. Chen. *Úvod do fyziky plazmatu.* : Academia, Praha, 1983.
- [8] H.R. Griem. Principles of plasma spectroscopy. *Proceedings of the Physical Society*, 1, 2005.
- [9] H.-W. Bartels H.-S. Bosch R. Brakel M. Drevlak U. Fantz H.-J. Hartfuss D. Hartmann D.H.H. Hoffmann R. Kleiber A. Könies K. Krieger E. Poli B.D. Scott W. Suttrop H. Zohm H.-W. Müller, M. Hirsch. *IPP Summer University for Plasma Physics*. Max-Planck-Institute für Plasmaphysik, 2007.
- [10] I.H. Hutchinson. *Principles of plasma diagnostics*. Cambridge Univ Pr, 2002.
- [11] J. Stockel-G. Anda G. Veres S. Zoletnik M. Berta P. Hacek, V. Weinzettl. Atomic beam probe diagnostic for compass tokamak. In *20th Annual Student Conference, Week of Doctoral Students*, 2011.
- [12] B. Schweer. Application of atomic beams in combination with spectroscopic observation for plasma diagnostic. *Fusion Science And Technology*, 53(2T):425–432, 2008.
- [13] J. Schweinzer, R. Brandenburg, I. Bray, R. Hoekstra, F. Aumayr, RK Janev, and HP Winter. Database for inelastic collisions of lithium atoms with electrons, protons, and multiply charged ions. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 72(2):239–273, 1999.

- [14] J. Wesson and DJ Campbell. *Tokamaks*, volume 118. Oxford University Press, USA, 2004.
- [15] WL Wiese and JR Fuhr. Accurate atomic transition probabilities for hydrogen, helium, and lithium. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 38:565, 2009.
- [16] D. Wutte, RK Janev, F. Aumayr, M. Schneider, J. Schweinzer, JJ Smith, and HP Winter. Cross sections for collision processes of li atoms interacting with electrons, protons, multiply charged ions, and hydrogen molecules. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 65(1):155–180, 1997.
- [17] S. Zoletnik, G. Petravich, A. Bencze, M. Berta, S. Fiedler, K. McCormick, and J. Schweinzer. Two-dimensional density and density fluctuation diagnostic for the edge plasma in fusion devices. *Review of scientific instruments*, 76:073504, 2005.