

Svazková diagnostika na tokamaku COMPASS

Jaroslav Krbec

Zimní škola FTTF
Chata Plazmat 12.1.2011

Osnova

- 1 Neutrální svazek
 - Neutrální svazek a CXRS
 - Schéma svazku
 - Interakce částic svazku s plazmatem
 - Nábojová výměna
 - Experimentální uspořádání
- 2 Numerický model neutrálního svazku
 - Numerický model
 - Profil svazku ve vakuu
 - Útlum svazku
 - Hustota záření C5+
 - Rozlišovací schopnost
- 3 Lithiový svazek
 - Lithiový svazek a BES
 - Schéma svazku
 - Interakce částic svazku s plazmatem
 - Experimentální uspořádání

- 1 Neutrální svazek
 - Neutrální svazek a CXRS
 - Schéma svazku
 - Interakce částic svazku s plazmatem
 - Nábojová výměna
 - Experimentální uspořádání
- 2 Numerický model neutrálního svazku
 - Numerický model
 - Profil svazku ve vakuu
 - Útlum svazku
 - Hustota záření C5+
 - Rozlišovací schopnost
- 3 Lithiový svazek
 - Lithiový svazek a BES
 - Schéma svazku
 - Interakce částic svazku s plazmatem
 - Experimentální uspořádání

Osnova

- 1 Neutrální svazek
 - Neutrální svazek a CXRS
 - Schéma svazku
 - Interakce částic svazku s plazmatem
 - Nábojová výměna
 - Experimentální uspořádání
- 2 Numerický model neutrálního svazku
 - Numerický model
 - Profil svazku ve vakuu
 - Útlum svazku
 - Hustota záření C5+
 - Rozlišovací schopnost
- 3 Lithiový svazek
 - Lithiový svazek a BES
 - Schéma svazku
 - Interakce částic svazku s plazmatem
 - Experimentální uspořádání

Neutrální svazek a CXRS

Obecně

- Primární účel je dodatečný ohřev plazmatu (2x0,3MW).
- Diagnostika pomocí nábojové výměny (CXRS - Charge Exchange Recombination Spectroscopy).

Vlastnosti CXRS

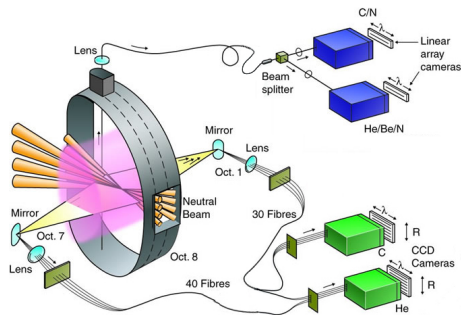
- Aktivní spektroskopická metoda, neutrální svazek - zdroj signálu pro spektroskopii.
- Měření hustoty, teploty a rychlosti plně ionizovaných atomů.
- Prostorové i časové rozlišení.

Nevýhoda

- Pasivní signál - odstranění pomocí modulační svazku, rozdíl v Dopplerovském rozšíření čar.

Použití

- JET (Velká Británie), TCV (Švýcarsko)

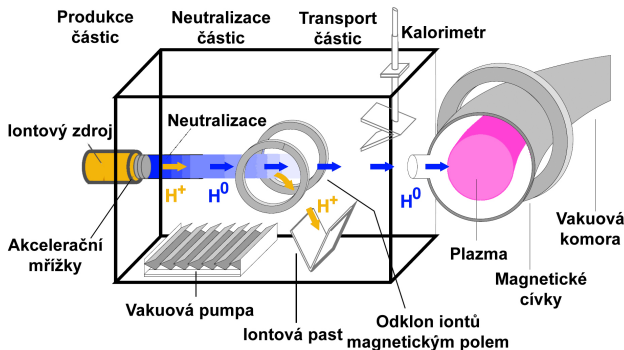


Obrázek: Schéma diagnostiky na tokamaku JET.

Schéma svazku

Princip

- Urychlení nabitých částic, neutralizace, vstřik do komory tokamaku.
- Vznik tří energetických složek E_0 , $E_0/2$, $E_0/3$.



Obrázek: Schéma zařízení pro vstřik neutrálního svazku.

Interakce částic svazku s plazmatem

Procesy způsobující útlum svazku

Ionizace elektronem	$H^0 + e^- \rightarrow H^+ + 2e^-$
Ionizace iontem	$H^0 + A^{Z+} \rightarrow H^+ + A^{Z+} + e^-$
Výměna elektronu s iontem	$H^0 + A^{Z+} \rightarrow H^+ + A^{(Z-1)+}$

- Útlum svazku je dán vztahem

$$\frac{dn_b}{dx} = -\lambda n_b \quad (1)$$

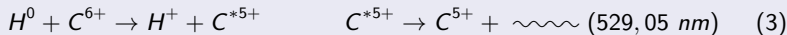
kde n_b je hustota svazku a λ je celkový účinný průřez pro všechny tři procesy

$$\lambda = n_e \frac{\langle \sigma_e v_e \rangle}{v_b} + \sum_j n_j \sigma_j \quad (2)$$

kde n_e je hustota elektronů, $\langle \sigma_e v_e \rangle$ reaktivita ionizace svazku s elektrony, v_b je rychlost částic svazku, n_j je hustota iontů a σ_j příslušný účinný průřez ionizace iontem.

Nábojová výměna

Průběh nábojové výměny + vyzáření fotonu



- Přechodu mezi energetickými hladinami $n=8 \rightarrow n=7$ odpovídá vlnová délka záření $\lambda = 529,05 \text{ nm}$.
- Intenzita záření C^{5+} je dána

$$I = n_b n_c \langle \sigma v \rangle \quad (4)$$

kde n_b je hustota svazku, n_c hustota uhlíku a $\langle \sigma v \rangle$ je reaktivita pro příslušné energie.

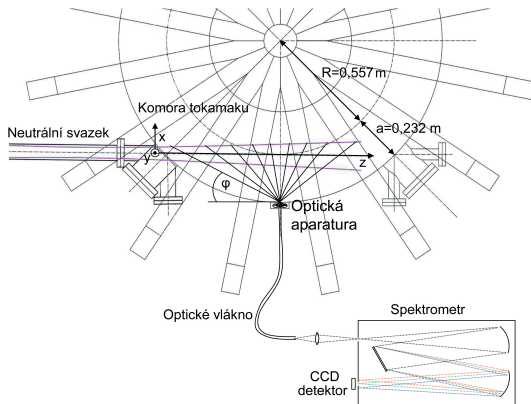
Experimentální uspořádání

Parametry svazku

- Výkon $P=0,3\text{MW}$
- Energie $E=40\text{keV}$
- Průměr svazku $d=5\text{cm}$
- Poměr složek
 $\text{H}_1:\text{H}_2:\text{H}_3 - 73:20:7$
- Účinnost neutralizace
 $\text{H}_1, \text{H}_2, \text{H}_3 - 50\%, 78\%, 85\%$

Parametry optiky

- Étendue
 $A\Omega = 6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ sr}$



Obrázek: Vrchní pohled na uspořádání diagnostiky u tokamaku COMPASS.

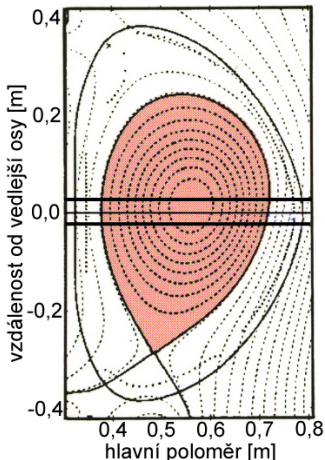
Numerický model

Vlastnosti

- Jedinou nečistotou v plazmatu je uhlík.
- Neuvažujeme pasivní signál.
- Zakřivené magnetické plochy nahrazujeme přímkami.
- Účinné průřezy a reaktivity převzaty z uvedené literatury.

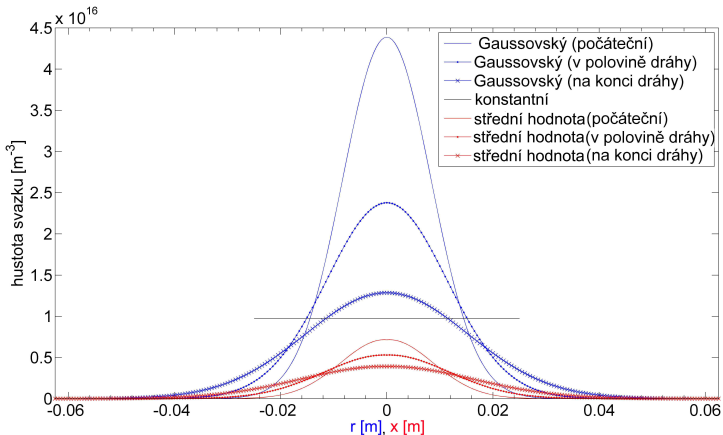
Struktura programu

- Výpočet profilu hustoty svazku ve vakuu.
- Určení hustoty svazku se započtením útlumu.
- Výpočet hustoty záření C5+.
- Převod do polárních souřadnic.



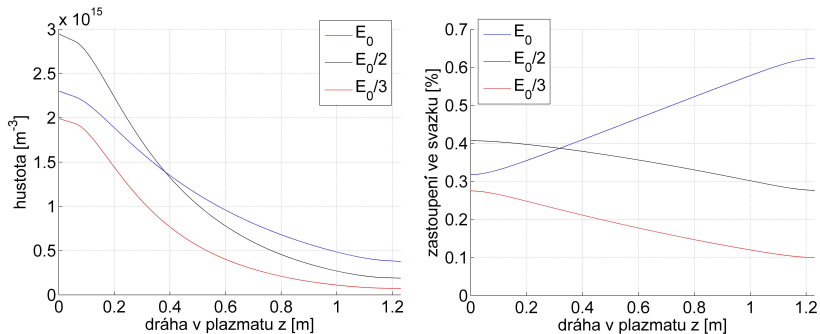
Obrázek: Konfigurace plazmatu na tokamaku COMPASS (poloidální řez). Černě je vyobrazena poloha svazku.

Profil svazku ve vakuu



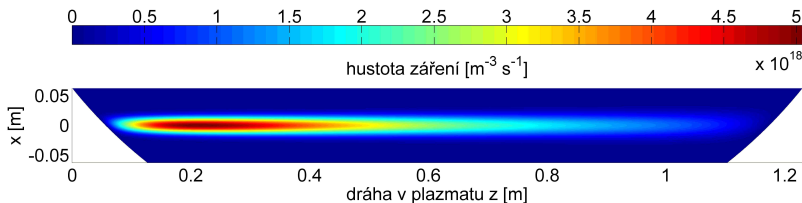
Obrázek: Hustotní profily svazku. Modře je nakreslen hustotní profil v závislosti na radiální složce. Červeně je nakreslena střední hodnota profilu v závislosti na souřadnici x .

Útlum svazku



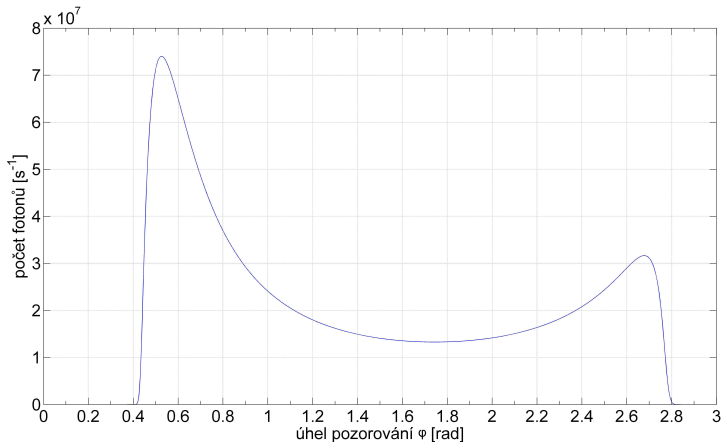
Obrázek: Hustota složek svazku při průchodu plazmatem.

Hustota záření C5+ (kartézské souřadnice)



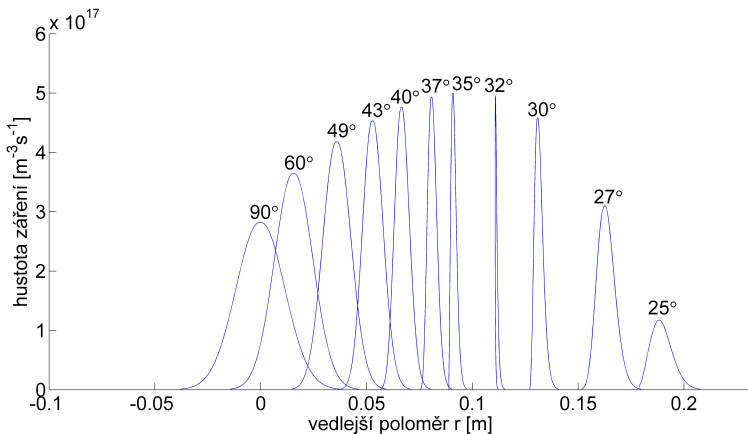
Obrázek: Hustota počtu fotonů vyzářených za jednotku času přechodu $8 \rightarrow 7$ iontu uhlíku C5+.

Hustota záření C5+ (polární souřadnice)



Obrázek: Počet fotonů vyzářených za jednotku času v závislosti na pozorovacím úhlu (přechod $8 \rightarrow 7$ iontu uhlíku C5+).

Rozlišovací schopnost



Obrázek: Průmět hustoty záření pozorované pod příslušným úhlem φ do vedlejšího poloměru tokamaku.

Lithiový svazek a BES

Obecně

- Diagnostika pomocí BES (Beam Emission Spectroscopy) a ABP (Atomic Beam Probe).
- Nízký výkon svazku řádově 100 W - měření okrajových vlastností plazmatu.

Vlastnosti BES

- Aktivní spektroskopická metoda.
- 2D měření fluktuací hustoty a radiálního profilu hustoty elektronů.
- Prostorové i časové rozlišení.
- Není problém s pasivním signálem - signál svazku dopplerovsky posunutý. V tokamaku není lithium.

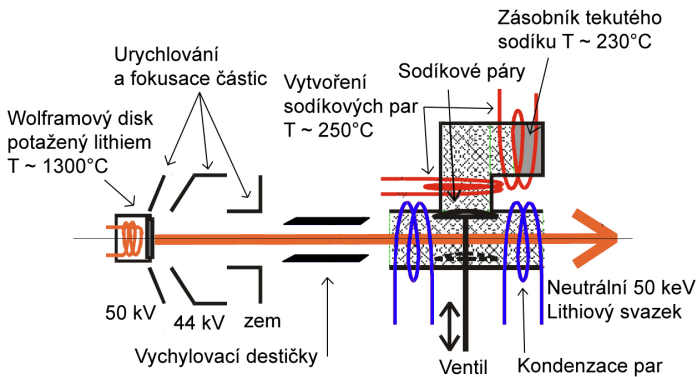
Vlastnosti ABP

- Z toroidálního posuvu iontů Lithia je možné spočítat poloidální magnetické pole.

Schéma svazku

Princip

- Urychlení nabitých částic, neutralizace, vstřik do komory tokamaku.
- Rozmítání svazku.



Obrázek: Schéma zařízení pro vstřik lithiového svazku.

Interakce částic svazku s plazmatem

- Potřebujeme znát populace jednotlivých hladin.
- Reaktivity příslušných procesů získáme fitováním dat z databází.
- Detekce spektrální čáry z reakce $Li^*(2p) \rightarrow Li(2s) + \sim\sim\sim$
- Přejechodu mezi energetickými hladinami $2s \rightarrow 2p$ odpovídá vlnová délka záření $\lambda = 670,8$ nm.

$$\frac{\partial}{\partial t} n_i = + \sum_{j, j \neq i} \langle \sigma_{e,ji} v \rangle n_e n_j - \sum_{j, j \neq i} \langle \sigma_{e,ij} v \rangle n_e n_i$$

gain by electron impact excitation gain by electron loss excitation

$$+ \sum_{j, j \neq i} \langle \sigma_{p,ji} v \rangle n_{ion} n_j - \sum_{j, j \neq i} \langle \sigma_{p,ij} v \rangle n_{ion} n_i$$

gain by ion impact excitation gain by ion loss excitation

$$+ \sum_{j, j < i} A_{ji} n_j - \sum_{j, j < i} A_{ij} n_i$$

gain by spontaneous s emission loss by spontaneous s emission

$$- \langle \sigma_{e \rightarrow ion, i} v \rangle n_e n_i$$

loss by electron impact ionisation

$$- \langle \sigma_{p \rightarrow ion, i} v \rangle n_{ion} n_i$$

loss by ion impact ionisation

$$- \langle \sigma_{cx, i} v \rangle n_{ion} n_i$$

loss by charge exchange

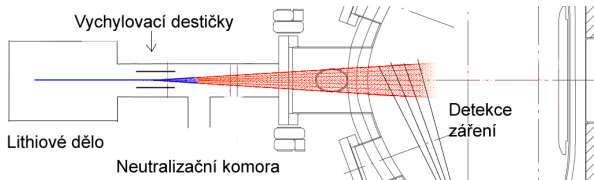
Experimentální uspořádání

Parametry svazku

- Atomy Lithia
- Proud svazku: $I=5-10$ mA
- Energie svazku: BES $E=40$ keV (max. $E=120$ keV)
- Průměr svazku $d=2-3$ cm
- Elektrostat. vychylování svazku ± 5 cm, frekvence < 400 kHz
- Elektrostat. vychylování svazku do Faradayovy komůrky < 200 kHz (měření záření pozadí)

Detekce záření

- Detekce spektrální čáry Lithia 670,8 nm.
- Rychlá (lavinové fotodiody, řádově μ s) a pomalá (CCD, 10ms) detekce.
- Numerická rekonstrukce profilu hustoty z měřeného světelného profilu.



Děkuji za pozornost.