

Relativistické elektrony na Tokamaku Compass

¹Maximilián Molnár,

²Jakub Šafář,

³Ivan Hudák

¹Gymnázium Michala Miloslava Hodžu Lipt. Mikuláš,

²Gymnázium Frýdlant nad Ostravicí,

³ Evanjelické Gymnázium Juraja Tranovského Lipt. Mikuláš

¹maximilian.molnar1@gmail.com,

²jakub.safar1998@gmail.com,

³hudakivan6@gmail.com

Abstrakt:

Fúzní reaktory mohou být v budoucnosti téměř neomezeným zdrojem energie, která bude příznivá k životnému prostředí. Problémem jsou rozdíly v teplotách a zabezpečení bezpečnosti. Tokamaky pozorují chování plazmy a následný výzkum poskytuje informace pro největší připravovaný tokamak ITER. Relativistické elektrony mohou být problémem pro techniku zařízení.

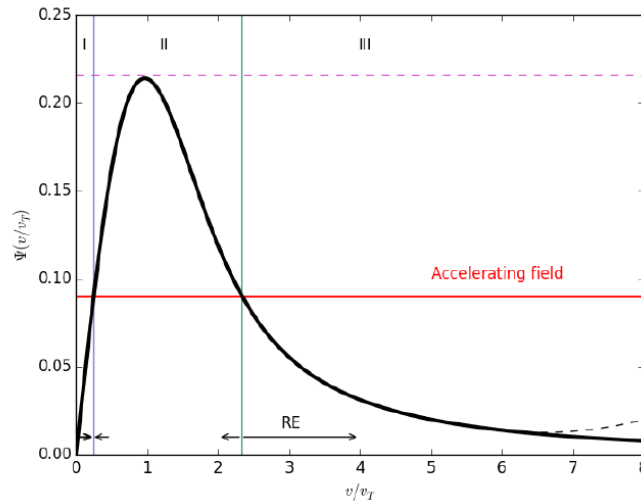
1 Úvod

Tokamak zkoumá termionukleární fúzi, což je reakce probíhající na slunci. Fúzní reakce jsou reakce v kterých z lehčích jader vznikají těžší. Na příklad na Slunci se slučují vodík a vytváří helium. Na zemi jsme schopni této reakce docílit několika způsoby. Jsme schopni vytvořit řízené a neřízené reakce. Za příklad neřízené reakce můžeme považovat vodíkovou bombu, ale zatím nejsme schopni vytvořit řízenou a zároveň energeticky výhodnou reakci. Máme hned několik způsobu jak ji vytvořit a zatím má největší předpoklad k úspěchu metoda, při které používáme magnetické pole, které využíváme právě v tokamaku. Jako zdroj magnetické síly využíváme cívek. Plazma, které si můžeme představit, jako kapalinu se snažíme udržet v magnetické nádobě. Výzkum v oblasti fúze směřuje hlavně k ITERU, což by měl být první tokamak, který je schopen vyrábět energii.

Tokamak Compass se v tomto směru také snaží přispět a to zkoumáním plazmatu, který dosáhne kritické energie, při kterém není schopna „magnetická nádoba“ zadržet elektrony, které letí relativistickou rychlostí a mohou poškodit reaktor.

2 Ubíhající elektrony

Odvodíme-li průběh třecí síly působící od ostatních elektronů a iontů na jeden vybraný testovací elektron, zjistíme, že pro elektrony několikrát rychlejší než je střední kvadratická rychlost elektronů (úměrná teplotě) v daném souboru klesá tato třecí síla se druhou mocninou jejich rychlosti. Co to znamená? Vzhledem k tomu, že třeba urychlující síla elektrická je na rychlosti částice nezávislá, znamená to, že pro dostatečně rychlé částice klesá třecí síla pod urychlovací a takové částice mohou být urychlovány až téměř k rychlosti světla, viz obr. 1.



Obr.1: Scénář pro měření kritického pole

Třecí síla je pak také samozřejmě závislá na hustotě částic v plazmatu a částečně také na teplotě. Znamená to tedy, že ve výbojích s velmi řídkým plazmatem se tokamak chová spíše jako urychlovač elektronů. Dobře, v kontrolované fázi výbojů se tomu můžeme vyhnout, tak že napustíme dostatečné množství pracovního plynu a bezpečnou hustotu hlídáme systémem zpětné vazby. Nicméně existují situace, kdy poměr urychlovací a třecí síly moc nedokážeme ovlivnit nebo kdy do hry vstoupí trochu jiné mechanismy, které se této jednoduché představě dvou sil vymykají. Jedním z největších nebezpečí pro velké fúzní reaktory, tedy ze současného hlediska především pro ITER. Je náraz 10 MA svazku 50 MeV elektronů do vnitřní stěny tokamaku ten by mohl znamenat velmi vážné poškození vedoucí k odstávce pravděpodobně v řádu měsíců či let. Z tohoto důvodu je nutné fyziku vzniku ubíhajících elektronů co nejlépe pochopit a vyvinout spolehlivé scénáře pro zabránění vzniku svazku ubíhajících elektronů nebo bezpečné metody likvidace tohoto svazku.

3 Problematika kritického pole

Jednoduchá představa- třecí versus urychlující síla vede v důsledku (vůbec ne jednoduchou cestou) k ustanovení kritického parametru $\frac{E}{E_c}$, kde E je urychlující elektrické pole (v tokamaku úměrné napětí na plazmatický závit) a E_c je takzvané kritické pole - minimální elektrické pole, které vede v plazmatu dané hustoty ke vzniku alespoň nějakých ubíhajících elektronů, teoreticky vypočtené jako:

$$E_c = \frac{e^3 n_e \ln \Lambda}{4\pi\epsilon_0^2 m_e c^2}$$

kde e je elementární náboj, n_e elektronová hustota plazmatu, ϵ_0 je permitivita vakua, m_e hmotnost elektronu, c rychlost světla a $\ln \Lambda$ slabá funkce parametrů plazmatu, kterou můžeme s dostatečnou přesností aproximovat číslem 14.

Jak je vidět, jedná se o shluk fyzikálních konstant a funkci jediné veličiny - elektronové hustoty. Celý výraz tedy můžeme poněkud zjednodušit: $E_c = 0.8n_e$, $[n_e] = 10^{19} \text{ m}^{-3}$ kam můžeme dosazovat hustotu elektronů přímo v rádech typických pro tokamakové plazma.

4 Výsledky

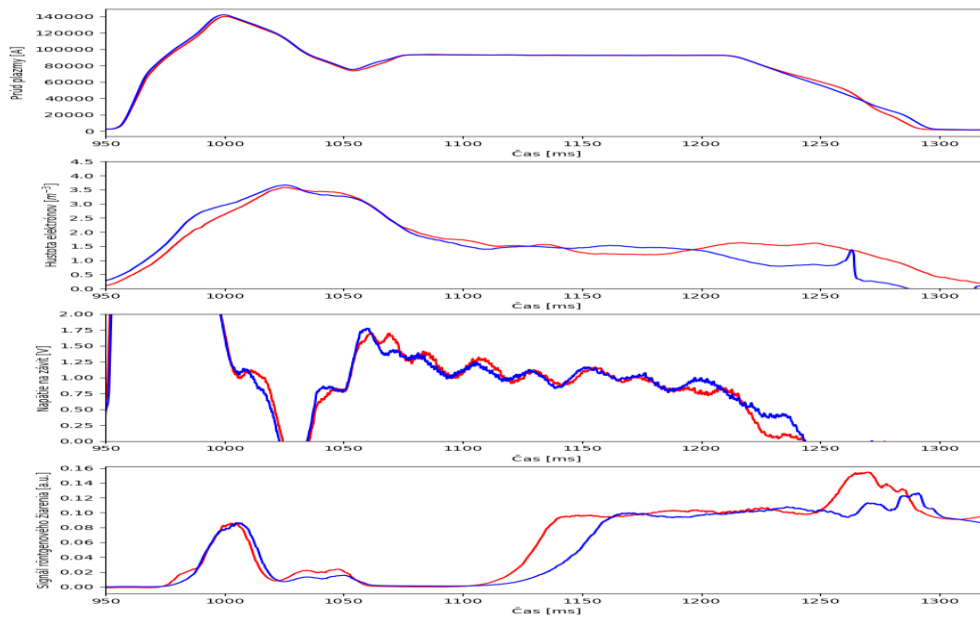
Naším výstupem je srovnání dvou výbojů (programovací jazyk Python-obr.1, obr.2), počátek růstu signálu exponenciální závislostí, vypočítat průměrné E v tomto okamžiku a určit směrodatní odchylku z dat, které smě měli k dispozici (10 výbojů).

Exponenciální růst začíná přibližně kolem 1000 ms.

Veličiny měřené při výboji: (Vzorek 2 výbojů)

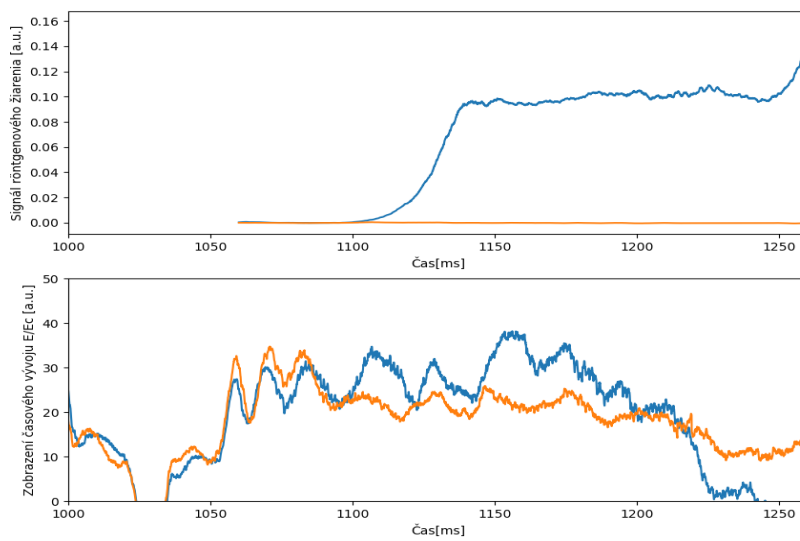
Skuteční hodnota kritické hodnoty pro tokamak Compass je (z tab.1)

Výstřely	Poměr teorie a experimentu	Odchylky	
Shot 1	30,635	-0,3958889	
Shot 2	29,959	-1,0718889	
Shot 3	30,908	-0,1228889	
Shot 4	27,49	-3,5408889	
Shot 5	39,454	8,42311111	
Shot 6	31,416	0,38511111	
Shot 7	32,501	1,47011111	
Shot 8	28,556	-2,4748889	
Shot 9	28,359	-2,6718889	
Průměr	31,03088889	1,25237944	směrodatná odchylka



Obr.2

Měřené veličiny (Proud plazmy, hustota elektronů, napětí na závit, signál rentgenového záření)



Obr.3

Signál rentgenového záření a zobrazení časového poměru E/E_c

5 Shrnutí

Jelikož se neshodovaly teoretické předpoklady s naměřenými výsledky. Tak experimentem byla vyvrácena chybná teorie. Což má za následek další zkoumání problému, který jistě pomůže částečně vyřešit energetickou otázku lidstva a zajistí bezpečný a plynulý provoz fuzních reaktorů.

Poděkování

Naše poděkování míří všem v kontrolní místnosti, hlavně však Ondřeji Fickerovi. Také však magisterským studentům Jaroslavu Čeřovskému a Michalu Farníkovi.

Reference:

- [1] Panek R. et al. 2016 Plas. Phys. Contr.Fusion 58 014015
- [2] Mlynar J. et al., 2015 Effects of Plasma Control on Runaway Electrons in COMPASS Tokamak 42nd EPS Conf. on Plasma Physics (Lisabon, Portugal) P4, 102
- [3] Ficker O. et al. 2017 Nuclear Fusion 57 7
- [4] Diaz E., Ho A., 2015 EMITRAIC report
- [5] Ficker O., Tyden vědy runaway elektrony na tokamaku COMPASS 2017