

Generace, diagnostika a ztráty ubíhajících elektronů v tokamacích

Workshop FTTF, Mariánská 2015

Ondřej Ficker^{1,2} a RE tým tokamaku Compass

¹Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT

²Ústav fyziky plazmatu AV ČR

15. ledna 2015

Obsah prezentace

- 1 Úvod
- 2 Vznik ubíhajících elektronů v tokamaku a diagnostika
- 3 Nestability a RE
- 4 Výhled a závěr

Motivace

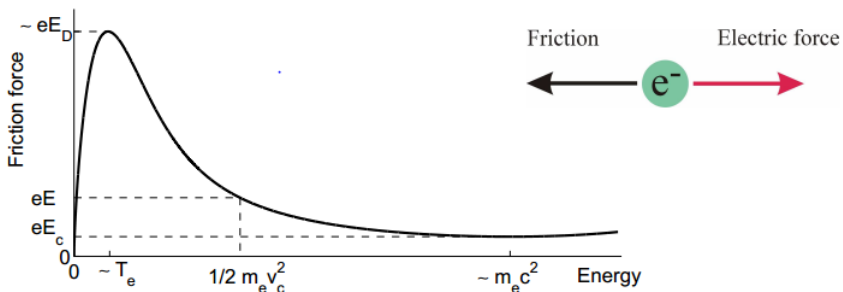
Co jsou ubíhající elektrony (RE)?

- Velké elektrické pole a malé třecí síly \Rightarrow urychlování nabitých částic
- RE v přírodě: blesky, sluneční erupce,...
- RE v tokamaku: nižší hustoty a hlavně při disrupci

Proč představují problém?

- Velký proud RE (ITER až 12 MA) = obrovská energie (magnetická i kinetická)
- Koncentrovaný svazek - silné poškození PFC

Vznik ubíhajících elektronů v tokamaku I



Vznik ubíhajících elektronů v tokamaku II

- Srážková frekvence Coulombických srážek $\propto v^{-3}$ pro rychlejší částice
- El. pole může tyto částice dále urychlovat
- Lavinovitý růst počtu rychlých elektronů - knock-on srážky

Při některých situacích může obecně vzniknout silnější pole:

- Počátek výboje (malé tokamaky) - BD voltage
- Radiofrekvenční ohřev
- Nestability (silná magnetická rekonekce,...)
- Disrupce

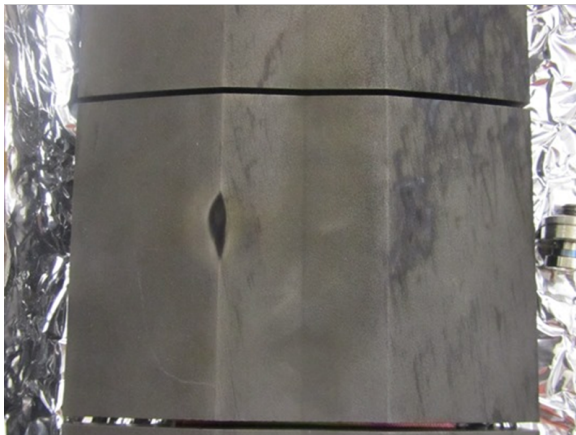
Slide-away režim

- Většinu proudu nesou RE
- Téměř nulové napětí na závit
- Compass při hustotách $< 1 \cdot 10^{19} \text{ m}^3$
- S nečistotami - Golem při "second breakdown"?
- Tokamak téměř betatronem
- Prostor pro zajímavé nestability - PPI

Možnosti detekce

- Indicie na magnetických a sondových diagnostikách
- Záření způsobené pohybem: ECE (\perp), IR kamery - synchrotronové záření tangenciálně
- Detekce brzdného záření po nárazu na stěnu - HXR scintilátory, timepix, medipix, atd.
- Druhotné projevy nárazu na stěny - fotoneutrony

První motivační obrázek - limiter po RE kampani



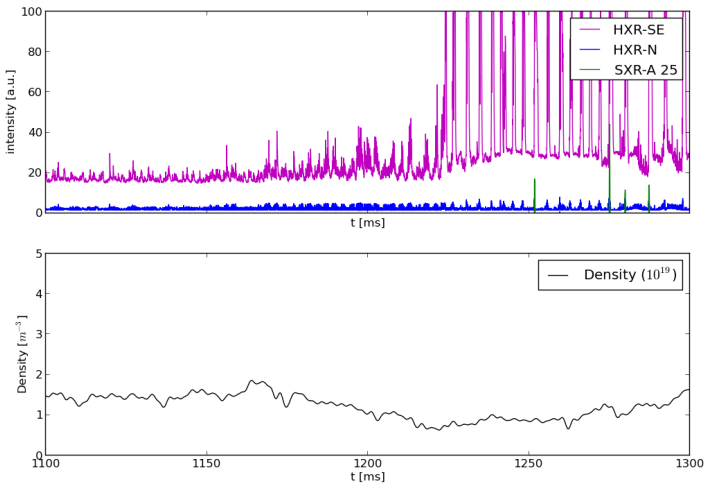
Cílený výzkum RE na Compass

- Zatím 2 kampaně + plán na další roky
- Experimenty s nízkou hustotou
- Disrupce vyvolané rychlým napouštěním Ar
- Testy nové diagnostiky - Čerenkov, medipix array, CdTe scintilátory
- Souvislost s pilovou nestabilitou
- Vertikální kicky
- a další

Parail-Pogutseho (vějířová) nestabilita

- Slide-away režim, velmi nízké hustoty
- Kinetická nestabilita (z MHD se odvodit nedá)
 - 1 Vznik RE (velké \mathbf{E} , malá n_e)
 - 2 Vybuzení magnetizované Langmuirovy vlny
 - 3 Elektronů předávají energii vlně rozptylem ($v_{\parallel} \rightarrow v_{\perp}$)
 - 4 energii vlny pohltí termální elektrony a ionty, relaxace rozdělení elektronů
 - 5 RE znovu začnou nabírat energii ...
- rezonanční podmínka $\omega_k + \omega_{ce} = k_{\parallel} v_{\parallel}$

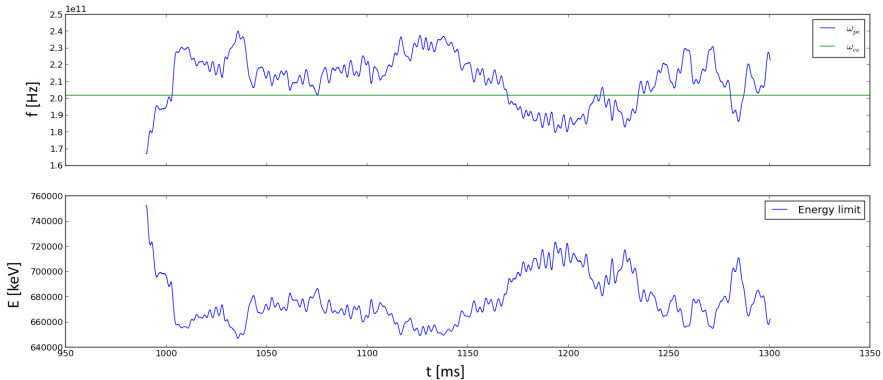
Parail-Pogutseho (vějířová) nestabilita II



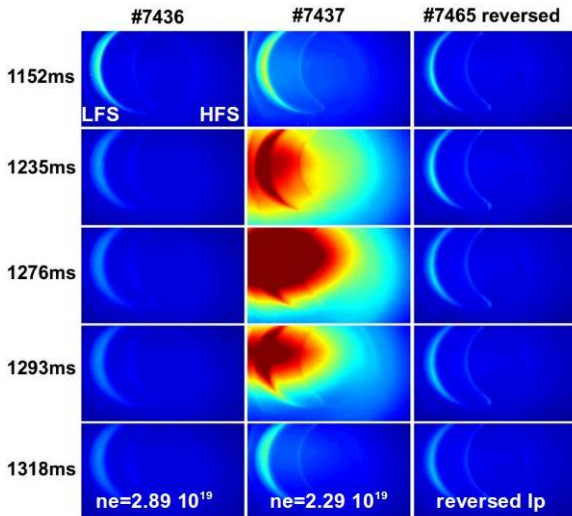
Parail-Pogutseho (vějířová) nestabilita III

- Projevy prakticky na veškeré diagnostice
- Separatrix z EFIT pulzuje
- Tři podmínky pro vznik:
 - 1 Podmínka šíření $\omega_{ce} > \omega_{pe}$
 - 2 Podmínka rezonance $v_b > 3v_{Te} \frac{E_{\parallel}}{E_D} \left(\frac{\omega_{ce}}{\omega_{pe}}\right)^{3/2}$
 - 3 "Podmínka útlumu" $\nu_{eff} > \nu_e$

Parail-Pogutseho (vějířová) nestabilita IV



Druhý motivační obrázek - synchrotronové záření RE



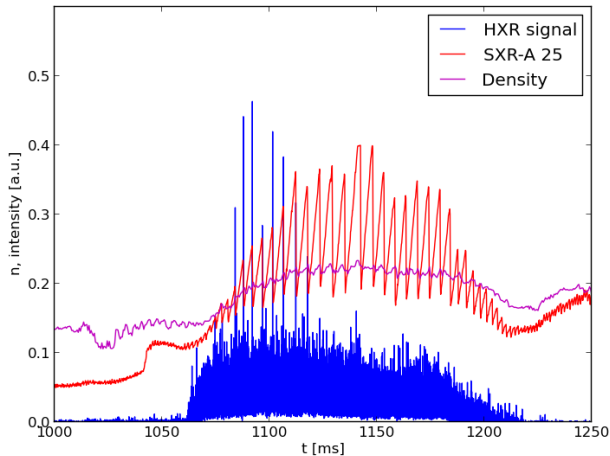
RE a pilová nestabilita I

Pilová nestabilita

- 'Internal kink'
- Periodický vznik a zánik $m=1$ nestability
- Zánik - magnetická rekonekce
- Horké plazma se přesune z centra na okraj
- Pilovitý signál - diagnostiky $\propto T_e$ - SXR
- Compass: perioda 2-6 ms podle ohřevu
- Někdy výtrysky RE po pádu

RE a pilová nestabilita II

HXR and SXR signal, shot #4420



RE a pilová nestabilita III

Jaká je příčina jetů?

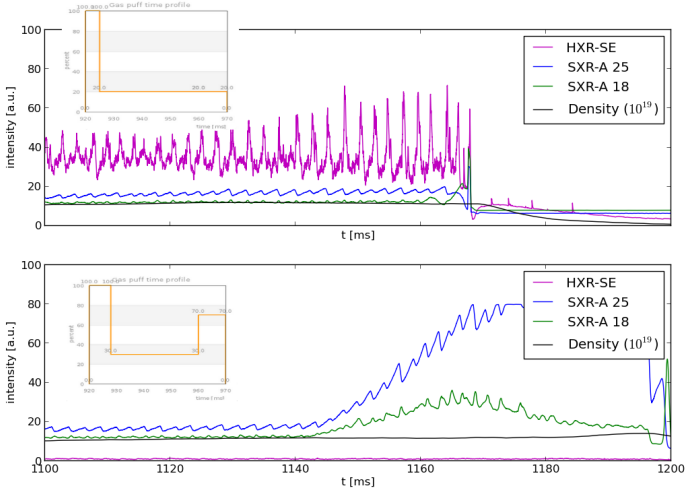
- Astrofyzika - urychlování na rekonekcích
- Pozorováno i na jiných tokamacích
- Energie RE 0,1-1 MeV
- Jaké důvody připadají v úvahu?
 - 1 Urychlování mezi pády
 - 2 Vysypávání RE vygenerovaných na začátku
 - 3 Urychlení na rekonekci při pádu

RE a pilová nestabilita IV

- Ad 1: velké hustoty: E_c při daných n_e vysoké
- Ad 1: Nepravděpodobné
- Ad 3: Oblast rekonekce příliš malá?
- Může rozhodnout: vysátí primárních elektronů
- Podržení na limiteru - problém se zpětnou vazbou
- 'Killer puff' - 10 ms rychlé napuštění Deuteria
- Běžné výboje bez RE

RE a pilová nestabilita V

ST runaways and ST without runaways #8636, #8634



RE a pilová nestabilita VI

- Kromě puffu totožné parametry
- Např: rozdíl proudů $< 2\%$
- Jednalo se o RE z breakdown!
- Reprodukováno po změně stochastických podmínek (oběd, glowdischarge, přeháňka)
- Pouze malý rozdíl v n_e a $E_{||}$ v kritických 10-15 ms \Rightarrow malý rozdíl v RE rate
- Nevylučuje nadteplné elektrony (desítky keV) z rekonekce
- Další testy - časový posun zesíleného puffu,...

Další práce a zajímavá témata

- Disrupce! - Ar MGI v ramp-up - Miloš Vlanič
- Několik rozumně vypadajících RE plateau s proudem 5-10 kA, nejdelší po dobu 10 ms
- Jednoduchý model této situace - difuzní rovnice pro OH proud a generace/ztráty RE
- Benchmarking lepších modelů - CODE, LUKE
- Pokus o řízení svazku magnetickým polem,...

Mezitím na tokamaku Golem

- Lze dobře odhadnout urychlovací časy
- Dva režimy - průběžná ztráta vs. rychlá na konci
- Nový HXR detektor
- Záporné napájení - nutnost přizpůsobit skripty + 'poloautomatizace' kalibrace
- Instalace pixelového detektoru přímo do komory - ideálně přímá detekce RE - Tomáš Benka

Shrnutí

- RE jsou urychlovány elektrickým polem a nedostatečně brzděny srážkami
- Představují velké nebezpečí pro FW a diagnostiku
- Na Compass proběhly první dvě cílené kampaně
- V souladu s teorií se objevila Parail-Pogutseho nestabilita
- Dokázali jsme rozhodnout o původu RE jetů v pilové nestabilitě
- S pomocí Ar puff vyvolána disrupce s RE plateau
- Budoucí instalace timepix na Golem