

# Ubíhající elektrony na tokamacích Compass a Golem

Workshop FTTF, Mariánská 2014

Ondřej Ficker

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

# Obsah prezentace

- 1 Úvod
- 2 Vznik ubíhajících elektronů v tokamaku
- 3 Měření na tokamacích Golem a Compass
- 4 Potlačení ubíhajících elektronů v tokamaku

# Motivace

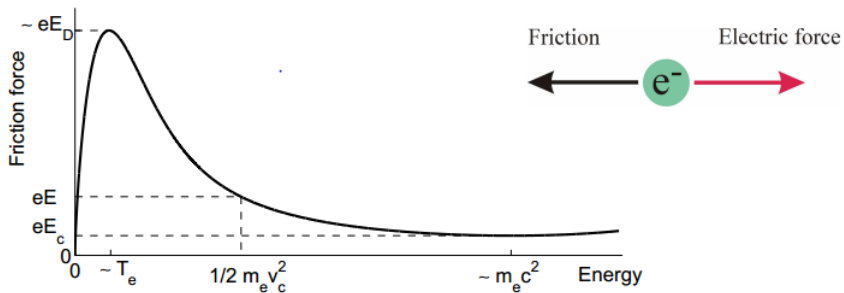
## Co jsou ubíhající elektrony (RE)?

- ▶ Velké elektrické pole a malé třecí síly  $\Rightarrow$  urychlování nabitých částic
- ▶ Spouštěcí mechanismus blesku? (Runaway breakdown)
- ▶ RE v tokamaku = nerovnováha v rychlostním rozdělení částic

## Proč představují problém?

- ▶ Velký proud RE (ITER až 12 MA) = obrovská energie
- ▶ U největších tokamaků mohou způsobit vážná poškození FW i dalších komponent

# Průběh třecí síly



# Vznik ubíhajících elektronů

Srážková frekvence coulombických srážek na velké vzdálenosti  
 $\propto v^{-3}$  pro rychlejší částice

El. pole v tokamaku není při standardním průběhu dost silné  
pro generaci RE

Při některých situacích ovšem vzniká silnější pole:

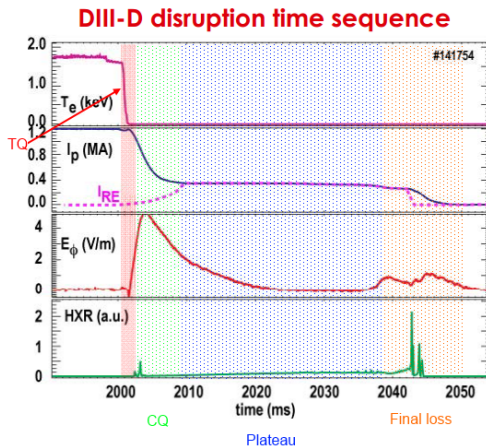
- ▶ Počátek výboje (malé tokamaky)
- ▶ Radiofrekvenční ohřev
- ▶ **Disrupce** (ITER)

# 1. fáze - Runaway seed

## Spouštěcí mechanismus

- ▶ Vznikají zárodky - první rychlé elektrony
- ▶ Nějaké rychlé elektrony jsou přítomny vždy -  $\beta$  rozpad T nebo Comptonův rozpyt gama fotonů
- ▶ Další mechanismy souvisí s velikostí  $v_c$ 
  - Dreicerův mechanismus - elektrony se dostanou do oblasti kritických rychlosti FP difuzí
  - Hot-tail mechanismus - příliš rychlé elektrony se netermalizují včas
- ▶ Thermal Quench - rychlý pokles teploty, ale rychlé elektrony se ochladit nestihnou - dominule Hot-tail

# Průběh disrupce



## 2. fáze - Avalanche

- ▶ Část elektronů opustí tokamak ihned - jejich množství závisí na udržení (**B**), velikosti tokamaku, nižší pro limiter
- ▶ Current Quench - ohmický proud plazmatem zaniká a je částečně nahrazen proudem RE
- ▶ Současně dochází k nárůstu napětí
- ▶ Proud RE se rozvíjí díky lavinovému jevu - rychlé elektrony dokáží několik dalších srážkově urychlit nad kritickou mez



## 3. fáze - Plateau / 4. fáze - Final loss

### Plateau

- ▶ Rovnováha
- ▶ Proud nesou dominantně RE
- ▶ Udržení elektronů opět závisí na magnetickém poli

### FL

- ▶ Konec rovnováhy, ztráta všech RE
- ▶ Největší zátěž pro stěnu - krátkodobá velká produkce HXR
- ▶ Úplný konec výboje

# Možnosti detekce

## Detekce vzniku a pohybu

- ▶ Synchrotronové záření / Bremsstrahlung při pohybu RE
- ▶ IR kamera, synchrotronové záření  $10\mu\text{m}$  (HT-7)
- ▶ SXR tomografie (JET)
- ▶ Náhlé změny v průběhu proudu a napětí na závit

## Detekce zániku

- ▶ Interakce se stěnou - HXR (scintilační detektory, polovodičové, pinhole camera)
- ▶ Fotoneutrony - HXR způsobí vytržení neutronu (prahové reakce, závisí na materiálu stěny)

# Možnosti měření na Golem a Compass

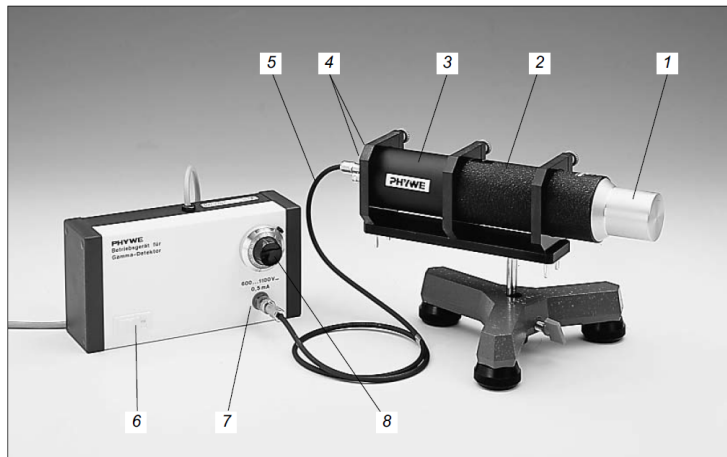
## Golem

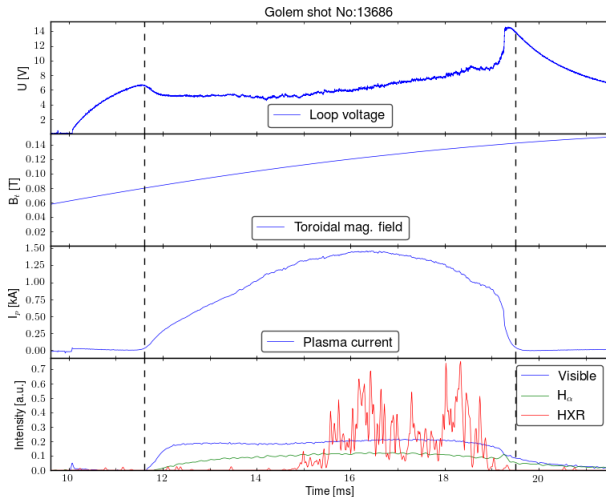
- ▶ Scintilační detektor NaI(Tl) - kalibrace  $^{137}\text{Cs}$
- ▶ Už dříve proměřeny některé závislosti - magnetické pole, tlak, teplota (rezistivita)

## Compass

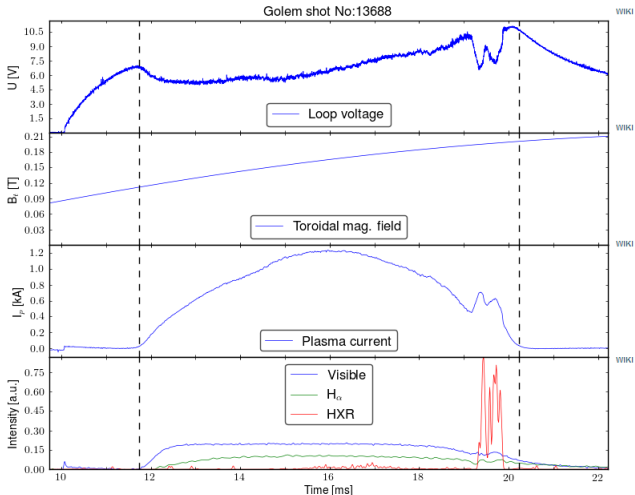
- ▶ Dříve 1 nebo 2 HXR sondy
- ▶ Nově 6-8 scintilačních/polovodičových HXR detektorů
- ▶ Rychlá IR kamera

# Scintilační detektor - měření HXR

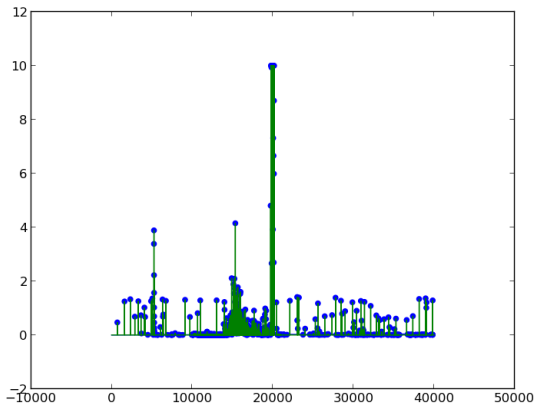


Výboj s nižším  $B_t$ 

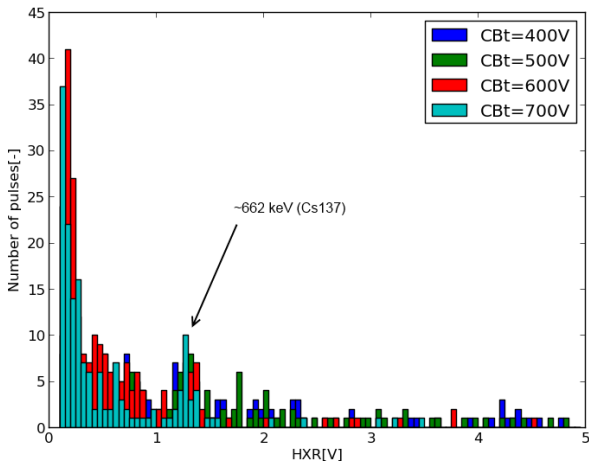
# Výboj s vyšším $B_t$



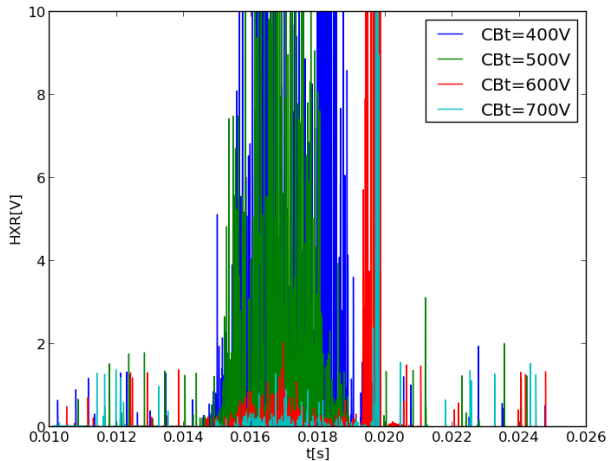
# Detekce píků



# Rozdělení energií HXR fotonů





Závislost na magnetickém poli při  $C_{CD} = 400 \text{ V}$ 

# Potenciál pro další měření

- ▶ Silná závislost průběhu produkce HXR na magnetickém poli
  - Slabší pole - elektrony mizí v průběhu výboje (důsledek většího Larmorova poloměru a driftu?)
  - Silnější pole - dominantní je ztráta při disrupci
- ▶ Jak se projeví změna orientace  $B_t$  a/nebo  $I$ ?
- ▶ Vliv tlaku na průběh produkce HXR
- ▶ Compass

# Možnosti potlačení negativních účinků






## Potlačení laviny

- ▶ Zvýšení hustoty nad kritickou mez
  - Plynová tryska (D,He,Ar,...)
  - Peleta (Killer)
- ▶ Likvidace počátečního RE proudu
  - Perturbace iniciované vnějšími cívkami
  - Opakované vstřiky plynu

## Udržení proudu RE

- ▶ Kontrolované zpomalení a vyloučení kontaktu s FW (jen velký proud)

# Zdroje

-  Lenka Kocmanová; Runaway electrons in tokamak and their detection
-  Hollman, E.M.; Progress on studies Runaway Electrons Formed During Tokamak Disruptions
-  Sergei Putvinski; Runaway electrons and their mitigation in ITER
-  Lukáš Matěna, Karol Ješko; PRPL report - Měření závislosti emise HXR na tlaku v tokamaku
-  Smith, H.; Hot tail runaway electron generation in tokamak disruptions