

Ubíhající elektrony a jejich detekce segmentovanými křemíkovými detektory

Zimní škola FTTF

Bc. Sergei Kulkov

Školitel: Ing. Michal Marčíšovský, Ph.D.

Konzultant: Ing. Peter Švihra

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Katedra fyziky

23.1.2020

- Motivace
- Generace RE
- Interakce záření s materiálem relevantní k detekci RE
- Měření s X-chip-03 detektorem během RE kampaně na tokamaku COMPASS
- Závěr

- Ubíhající elektrony (RE) jsou vysokoenergetické částice, které mohou vznikat během výbojů v tokamacích
- RE jsou nebezpečné: mohou poškodit vnitřní stěnu tokamaku a tím zkrátit životnost komory
- Je třeba RE detekovat a vyvíjet strategie mitigace jejich kontaktu se stěnou tokamaku
- Polovodičové detektory (PD) ve fyzice plazmatu - nová technologie s řadou výhod
- PD jsou rychlejší, mají menší potřebnou energii pro výrobu nosičů náboje (generace signálu), malé rozměry umožňují přímou detekci - instalace ve stěně tokamaku

- Motivace
- Generace RE
- Interakce záření s materiálem relevantní k detekci RE
- Měření s X-chip-03 detektorem během RE kampaně na tokamaku COMPASS
- Závěr

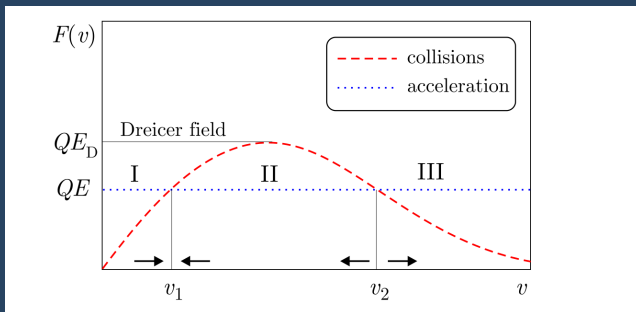
- Nabité částice plazmatu jsou urychlovány elektrickým polem a zpomalovány srážkami
- R-ce pro rychlost částic v přítomnosti elektrického pole¹:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{QE}{m} - \nu(v)v,$$

kde ν je srážková frekvence

- V závislosti na tom, který člen vpravo převládá, částice je buď urychlována nebo zpomalována

¹Kulhánek, P. *Úvod do teorie plazmatu*, 2011



Závislost síly působící na elektron na rychlosti. V regionu I jsou částice zrychlovány elektrickým polem, v regionu II jsou zpomalovány srážkami (ohmický režim), v regionu III částice jsou v ubíhajícím režimu. Pro $E > E_D$ a/nebo pro rychlost elektronu $v > v_2$ jsou elektrony v RE režimu ².

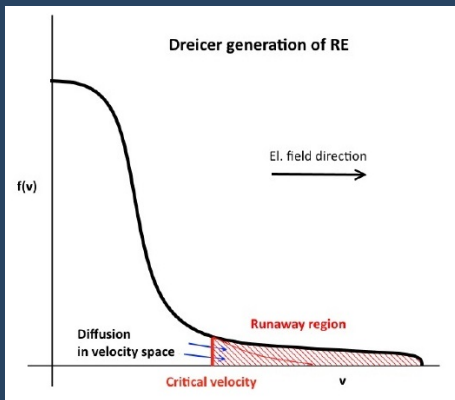
²Delong, V. A. et al. Physics of Plasmas **23**, 094504 (2016)

Generace RE lze rozdělit do dvou skupin mechanismů:

- Primární: Dreicerův mechanismus, Hot-tail mechanismus
- Sekundární: lavinový mechanismus

RE: generace. Dreicerův mechanismus

Dreicerův mechanismus popisuje urychlení elektronů elektrickým polem do RE režimu.



Dreicerův mechanismus generace RE^3 .

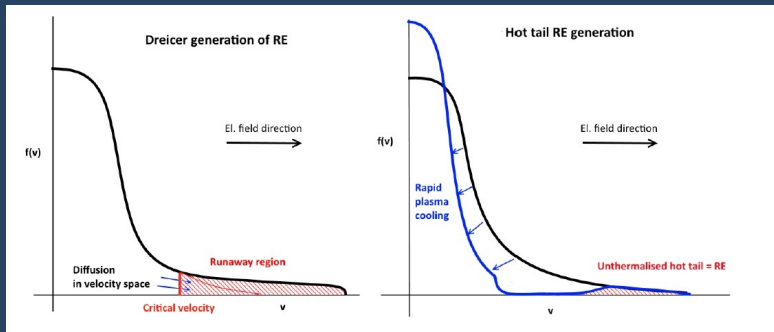
³Ficker, O. Diplomová práce, 2015

Hot-tail mechanismus generace RE v tokamacích převládá během disrupcí:

- Během disrupcí se do plazmatu přidávají nečistoty
- Elektrony v plazmatu se ochladí srážkami s nečistotami
- Pro rychlejší elektrony tento proces trvá mnohem déle: $\nu(v) \sim \frac{1}{v^3}$ ⁴
- Nejrychlejší elektrony z původně Maxwellovského plazmatu se objeví v RE režimu

⁴Kulhánek, P. *Úvod do teorie plazmatu*, 2011

RE: generace. Dreicerův a Hot-tail mechanismus



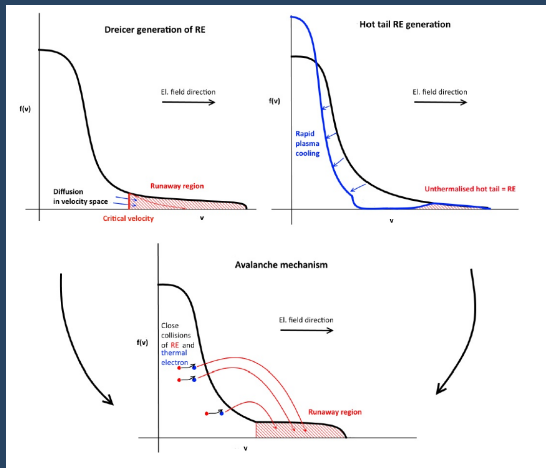
Primární mechanismy generace RE: Dreicerův mechanismus a Hot-tail mechanismus⁵.

⁵Ficker, O. Diplomová práce, 2015

Sekundární mechanismus generace RE předpokládá, že RE už jsou přítomné v plazmatu:

- Elektrony z RE režimu se mohou srážet s ostatními elektrony
- Během srážek RE předávají část své energie
- Pokud elektrony získají dostatečnou energii, objeví se v RE režimu
- Ubíhající elektrony zůstávají po srážce v RE režimu \Rightarrow počet RE se zvětší
- Nové RE se srážejí dále, proces se opakuje

RE: generace v tokamaku



Mechanismy generace RE v tokamaku⁶.

⁶Ficker, O. Diplomová práce, 2015

- Motivace
- Generace RE
- Interakce záření s materiálem relevantní k detekci RE
- Měření s X-chip-03 detektorem během RE kampaně na tokamaku COMPASS
- Závěr

- Bremsstrahlung
- Dominantní procesy interakce fotonů s materiálem
- Fotoneutrony

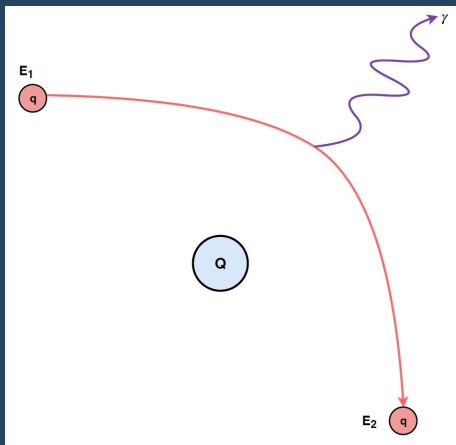
Interakce záření s materiálem: bremsstrahlung

Bremsstrahlung je elektromagnetické záření, které vzniká během zpomalování částic v elektrickém poli jiných částic. RE vyzařují fotony během interakci

- s nabitými částicemi plazmatu
- s materiálem první stěny

Pokud jsou v plazmatu přítomné nečistoty - bremsstrahlung se zesiluje. Bremsstrahlung je primární mechanismus, kterým RE ztrácejí svou energii.

Interakce záření s materiálem: bremsstrahlung



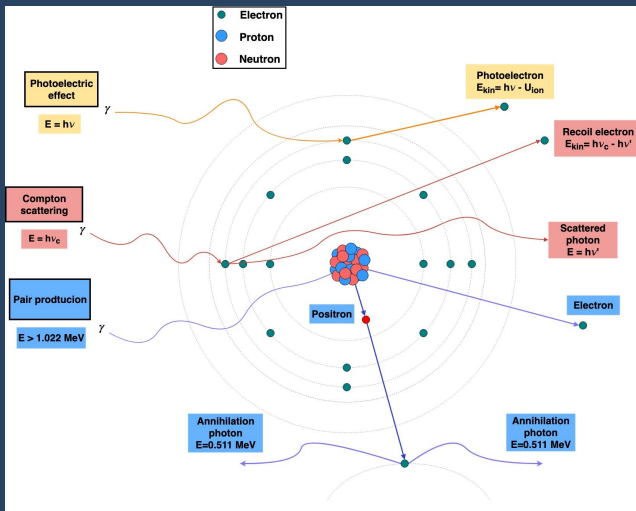
Bremsstrahlung: částice během interakce s jinou částicí vyzařuje foton o energii $\approx E_1 - E_2$.

Produkované fotony se obvykle rozdělují v závislosti na jejich E na:

- SXR (soft X-rays) s E od několika eV do 10 – 20 keV
- HXR (hard X-rays) s E od 10 – 20 keV až po MeV

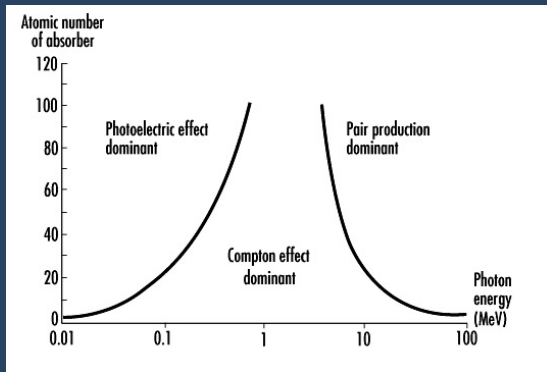
Pro detekci SXR se používají především polovodičové detektory, pro detekci HXR, které jsou generované během kontaktu RE se stěnou tokamaku, jsou používány scintilátory.

Interakce záření s materiálem



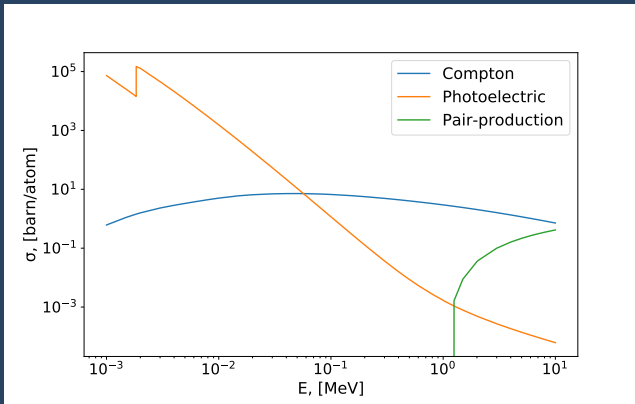
Interakce fotonů s materiálem: fotoelektrický efekt (žlutě), Comptonův rozptyl (červeně), produkce párů (modře).

Interakce záření s materiálem



Dominantní procesy interakce fotonů s materiálem v závislosti na Z materiálu⁷.

⁷Cherry, R. N. Jr. *Radiation: Ionizing*.



Dominantní procesy interakce fotonů s materiálem pro křemík⁸.

⁸National Institute of Standards and Technology, *Photon cross sections database*.
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

V plazmatu s D a T palivem neutrony se generují primárně během následujících reakcí:



Interakce záření s materiálem: fotoneutrony

Pokud dochází ke kontaktu RE se stěnou tokamaku, může dojít k reakcím, během kterých se budou produkovat tzv. *fotoneutrony*:

- Během interakce RE s materiálem dojde k vyzařování fotonu (bremsstrahlung)
- Tento foton může vstoupit do reakce s prvkem materiálu první stěny:



Fotoneutrony lze detekovat i pomocí polovodičových detektorů, u kterých se používá buď plastická nebo PE konverzní vrstva: (n,p) reakce. Detekce fotoneutronů slouží k oznámení, že došlo ke kontaktu RE se stěnou.

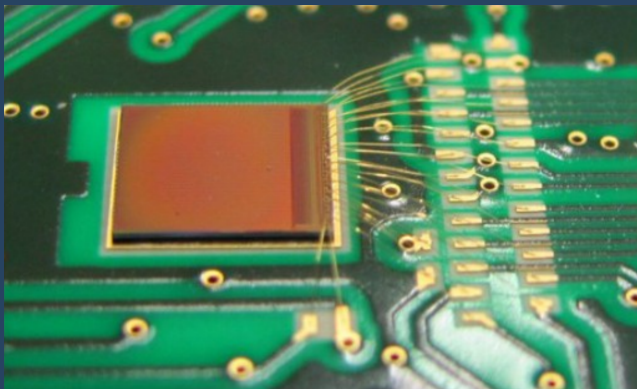
- Motivace
- Generace RE
- Interakce záření s materiálem relevantní k detekci RE
- Měření s X-chip-03 detektorem během RE kampaně na tokamaku COMPASS
- Závěr

X-chip-03 je polovodičový detektor na bázi Si, který byl vyvinut na FJFI, CAPADS (Center of Applied Physics and Advanced Detection Systems)⁹

- Stripový detektor, matice 64×64 pixelům rozměry pixelu jsou $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$
- Detekce primárně SXR (jednotky keV)
- Rozměry chipu jsou $3,96 \text{ mm} \times 4,76 \text{ mm}$
- Expozice (měření) 1 ms , mrtvá doba 5 ms , frekvence $\approx 165 \text{ Hz}$

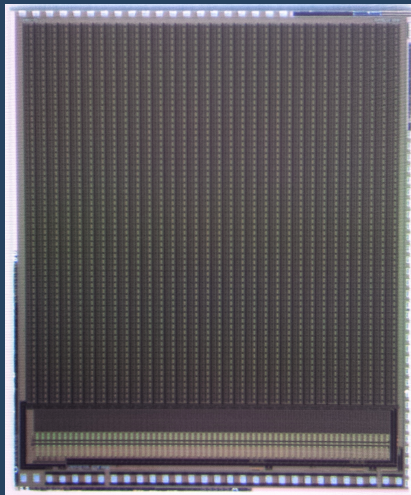
⁹Havránek, M., et. al. *IEEE NSS/MIC*, 2018

Polovodičové detektory: X-chip-03



X-chip-03.

Polovodičové detektory: X-chip-03



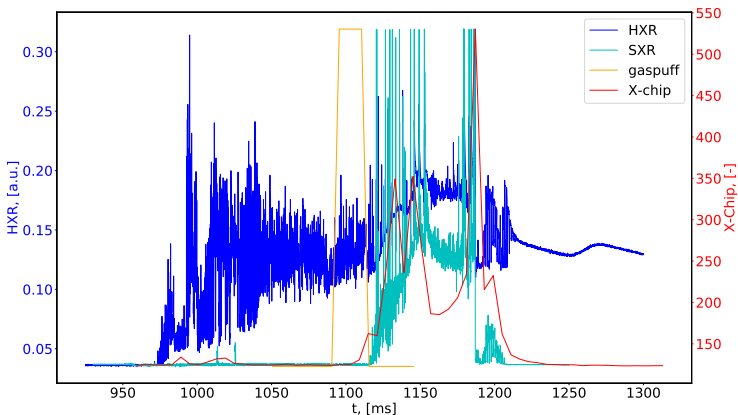
X-chip-03: matice pixelů.

RE kampaň na tokamaku COMPASS



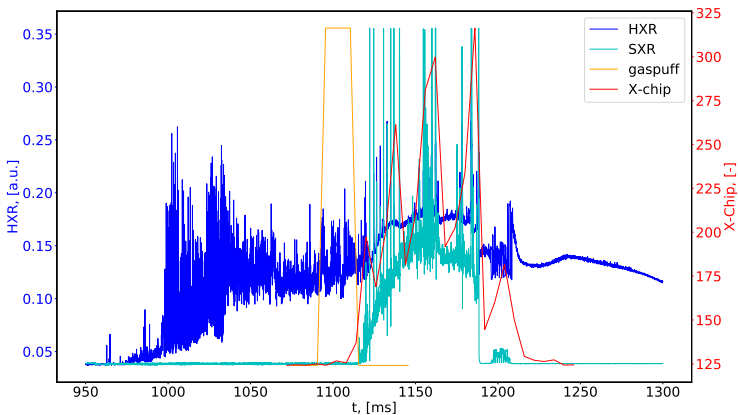
X-chip-03 během RE kampaně na tokamaku COMPASS.

RE kampaň na tokamaku COMPASS: výsledky



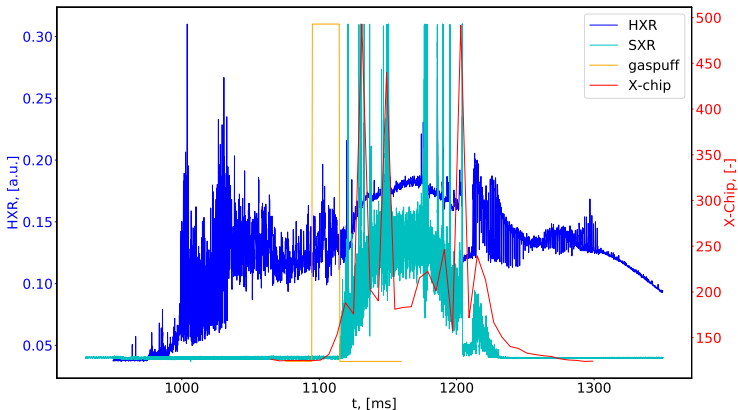
Shot 18969: signál z X-chip-03, SXR, HXR z diagnostik tokamaku a napouštění plynu.

RE kampaň na tokamaku COMPASS: výsledky



Shot 18970: signál z X-chip-03, SXR, HXR z diagnostik tokamaku a napouštění plynu.

RE kampaň na tokamaku COMPASS: výsledky



Shot 18971: signál z X-chip-03, SXR, HXR z diagnostik tokamaku a napouštění plynu.

- Polovodičové detektory pro diagnostiku plazmatu je zajímavé a perspektivní téma
- První výsledky z měření na tokamacích jsou nadějně
- Ovšem, protože polovodičové detektory v tokamacích jsou relativně nová technologie, je potřeba to testovat dál

Děkuji za pozornost.