

Měření energetických spekter pomocí polovodičového detektoru Timepix3 na tokamaku GOLEM

Alex Faivre¹, Jan Herzig², David Němec³

¹Gymnázium JAK Uherský Brod; alexchristianfaivre@gmail.com

²G J. Š. Baara Domažlice; herzig@astro.cz

³Masarykovo G Plzeň; nemecd24@gmail.com

Š. Malec, školitel; KF FJFI ČVUT

Abstrakt

Tokamaky jsou rychle se rozvíjející technologií, která by nám mohla v budoucnu pomoci vytvořit fúzní reaktor. K tomu ale vede dlouhá cesta, při které je potřeba překonat množství překážek. Jednou z nich jsou tzv. runaway elektrony, kterými se zabýváme v naší práci. K tomu využíváme dva pixelové detektory Timepix3 a tokamak GOLEM. Nejdříve v rámci testování měříme spektra testovacích vzorků a zaznamenáváme vliv kosmického záření. Nakonec měříme energetická spektra fotonů brzděného záření elektronů při nárazech do stěn tokamaku.

1 Úvod

Elektromagnetické záření nezahrnuje zdaleka jen viditelné světlo, na které jsou citlivé naše oči. Ve skutečnosti je viditelné světlo, na které jsme zvyklí, jen úzkou částí světelného spektra. To zahrnuje i záření o větších vlnových délkách a menších energiích, tedy infračervené a rádiové. Naopak kratší vlnové délky a větší energie má světlo z ultrafialové, rentgenové a gama oblasti. Rentgenové záření má původ v atomovém obalu, gama záření pak v atomovém jádře. V rámci našeho miniprojektu jsme se věnovali výzkumu posledních dvou zmíněných oblastí elektromagnetického spektra.

Využili jsme k tomu dva polovodičové detektory Timepix3. S nimi jsme zkoumali zmíněné záření různými způsoby. Nejdříve jsme změřili energetická spektra radioaktivních prvků. Poté jsme se zaměřili na detekci brzděného záření tzv. runaway elektronů v tokamaku GOLEM. Na závěr jsme se v datech ze zmíněných detektorů pokusili nalézt i stopy interakce kosmického záření.

Tokamak je zařízení určené pro udržení vysokoteplotního plazmatu. Právě toto plazma je základním předpokladem pro zažehnutí jaderné fúze a tím vytvoření "malé hvězdy" v pozemských podmínkách. Doposud jsou lidé schopni tento proces ovládnout pouze nekontrolovatelně, v podobě vodíkové bomby. Pokud bychom však zvládli tuto jadernou reakci provádět kontrolovatelně po dlouhou dobu, získalo by tím lidstvo de facto neomezený zdroj čisté energie.

Pro zvládnutí toho jsou tokamaky zcela stěžejní. V současnosti se však potýkají s řadou problémů, které jim doposud brání v úspěšném provádění ziskové fúzní reakce. Na některé z nich jsme se zaměřili i my, konkrétně na již zmíněné runaway elektrony v tokamaku.

2 Detektory Timepix a tokamak GOLEM

1. Detektory Timepix

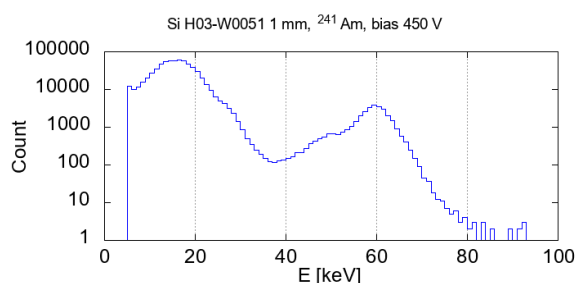
V experimentech jsme používali křemíkový a kadmium-teluridový senzor Timepix3. Jedná se o polovodičové pixelové detektory. Mezi jejich přednosti, díky kterým jsou vhodné i pro naše měření, můžeme zařadit rozlišení 256×256 pixelů, což nám umožnilo lokalizaci a rekonstrukci dráhy pozorovaných částic. Dále jsme využili vyčítací přesnost 1,56 ns a kapacitu 40 milionů interakcí za sekundu na centimetr čtvereční.

2. Tokamak GOLEM

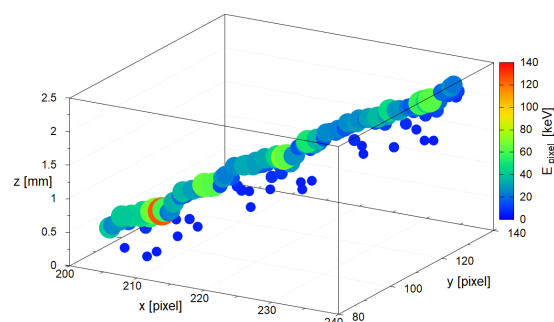
Jedná se o jedno z prvních zařízení svého druhu a zároveň jeden z nejmenších v současnosti provozovaných tokamaků na světě. V současnosti ho využívá Katedra fyziky FJFI ČVUT. V podstatě se jedná o transformátor, jehož sekundární vedení tvoří zahříváné plazma. To je udržováno v toroidální komoře působením magnetického pole, které je vytvářeno cívkami. Částice plazmatu jsou urychlovány působením elektrické síly a pohybují se ve směru působení Lorentzovy síly. Díky tomu jsou částice zahřívány na extrémně vysoké teploty.

3 Měření s detektory Timepix3

Nejdříve jsme zkoumali spektra záření radioaktivního prvku. Křemíkovým detektorem jsme pořídili 10 měření vyzařování Americia ^{241}Am . Z toho jsme vytvořili spektrum, které jsme poté porovnali s tím, jak by měla vypadat podle [1], abychom mohli ověřit správnost funkčnosti detektorů. Dosáhli jsme velmi dobré shody.

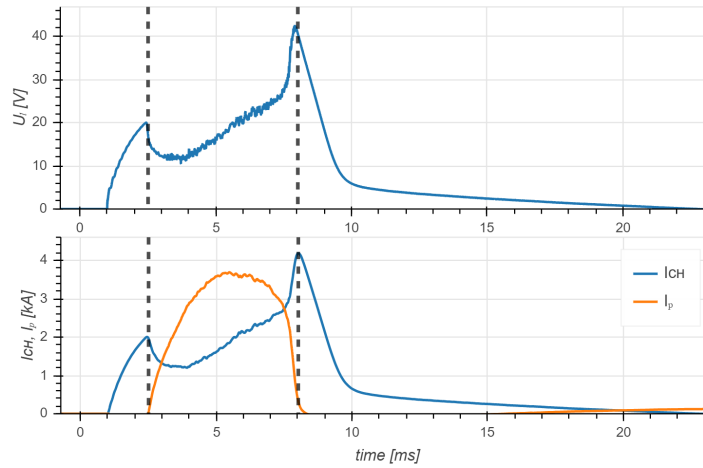


Obrázek 1: Spektrum záření z izotopu Americia Am-241. V prostřední části je jasně vidět pík vyzařování na energii 59,5 keV, což je ve shodě s databází.

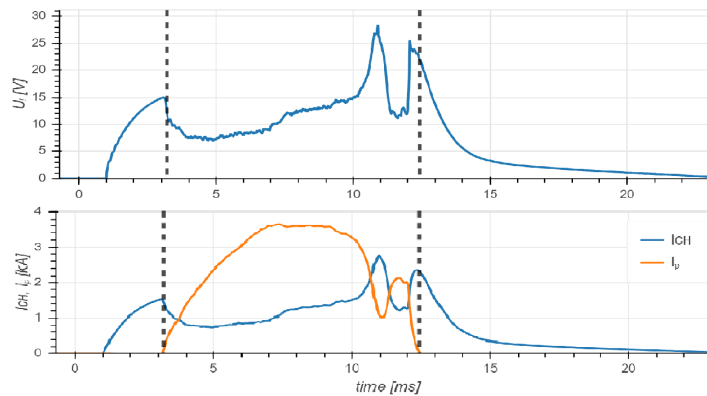


Obrázek 2: Záznam pohybu mionu detektorem. Charakteristická je pro něj přímá trajektorie. Čím červenější barva, tím vyšší energii předala částice jednotlivým pixelům.

Následně jsme podobně měřili kosmické záření. V určitých případech může posloužit k ionizaci plynu v tokamaku a jeho znalost je tak pro provoz těchto zařízení také důležitá. Detektor jsme nechali měřit v souhrnu 25 minut v izolaci od všech rušivých vlivů. Získali jsme tak několik stop interakce kosmického záření. Následně jsme s využitím programů pro zpracování dat zrekonstruovali dráhu jejich průchodu detektorem. Mezi nejzajímavější se řadil vysoce energetický mion, který je zobrazen na Obr. 2.



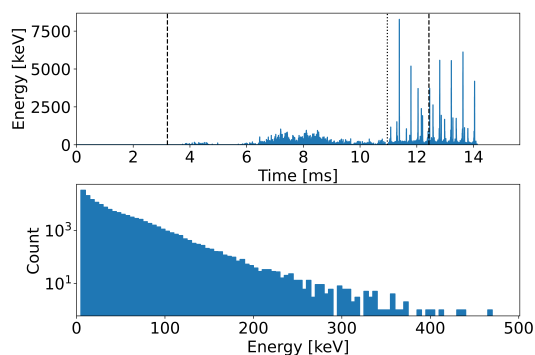
Obrázek 3: Standardní výboj. V horní části je zobrazen časový průběh napětí na závit. V dolní části pak průběh proudu v komoře I_{Ch} a proudu plazmatem I_p . Plazma je přítomno v komoře v časovém okamžiku mezi svislými čárkovanými přímkami. Obrázek převzat z [3], výboj č. 45324.



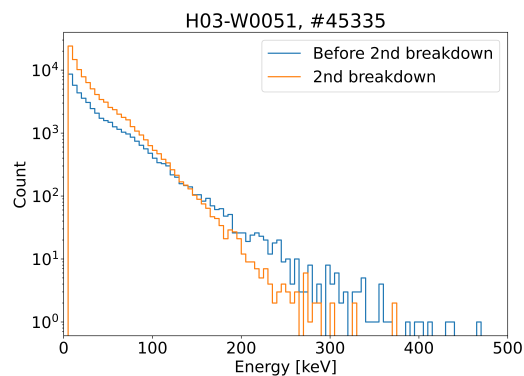
Obrázek 4: Nestandardní výboj. V horní části je zobrazen časový průběh napětí na závit. V dolní části pak průběh proudu v komoře I_{Ch} a proudu plazmatem I_p . Plazma je přítomno v komoře v časovém okamžiku mezi svislými čárkovanými přímkami. Obrázek převzat z [4], výboj č. 45335.

4 Měření s detektory Timepix3 na tokamaku GOLEM

Hlavní částí našeho výzkumu byla detekce brzděného záření generovaného runaway elektrony. Jedná se o elektrony urychlené v tokamaku na relativistické rychlosti, které už nejsou udrženy magnetickým polem a narazí do stěny toroidální komory. To může představovat vážný problém pro bezpečný provoz tokamaku. Postupně jsme prováděli výboje v tokamaku a měnili jejich parametry tak, abychom dosáhli delší doby trvání výboje a větší energie a počtu runaway elektronů. Standardní výboj s minimálním počtem runaway elektronů je zobrazen na Obr. 3. Při určitých delších výbojích jsme však zaznamenali odlišný průběh proudu procházejícího plazmatem a s tím spojený vyšší počet runaway elektronů. Důkazem je Obr. 4, kde plazma již téměř vymizelo a poté se opětovně zažehlo. Vytvořili jsme proto dvě spektra; před částečným uhasnutím plazmatu a po jeho opětovném zažehnutí, to je zobrazeno na Obr. 5 a Obr. 6. Jejich průběh je velmi podobný.



Obrázek 5: Průběh energie a spektrum nestandardního výboje. Tečkovaná čára značí čas, kde byl výboj rozdělen. Mezi čárkovanými čarami je přítomno plazma v komoře tokamaku. Výboj č. 45335.



Obrázek 6: Jednotlivá spektra rozděleného nestandardního výboje. Výboj č. 45335.

5 Shrnutí

Zaměřili jsme se na problematiku detekce rentgenového a gama záření pomocí polovodičových detektorů Timepix3. Ověřili jsme jejich funkčnost a vyzkoušeli s nimi detekci kosmického záření. Poté jsme provedli několik výbojů na tokamaku GOLEM a změřili rentgenové záření vytvářené runaway elektrony. Nalezli jsme nestandardní výboj plazmatu na tokamaku GOLEM, při kterém vzniklo velké množství rentgenového záření.

Poděkování

Chtěli bychom poděkovat našemu školiteli Ing. Štěpánu Malcovi za jeho obětavou pomoc v celém průběhu naší práce na projektu. Dále bychom rádi poděkovali Ing. Vojtěchu Svobodovi CSc. za organizaci Týdne vědy na Jaderce, v rámci kterého naše práce vznikla, za možnost využití tokamaku GOLEM, kterou nám dal, a rovněž za uvedení do problematiky tokamaků.

Odkazy

- [1] AKOVALI, Y.A. Nuclear Data Sheets Update for $A = 241$. *Nuclear Data Sheets* [online]. 1994, **72**(1), 191-219 [cit. 2024-06-18]. ISSN 00903752. Dostupné z: doi:10.1006/ndsh.1994.1024
- [2] *Tokamak GOLEM wiki* [online]. [cit. 2024-06-18]. Dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/FrontPage>
- [3] Shot #45324. *Tokamak GOLEM - Shot Database* [online]. 2009 [cit. 2024-06-18]. Dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/45324/>
- [4] Shot #45335. *Tokamak GOLEM - Shot Database* [online]. 2009 [cit. 2024-06-18]. Dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/45335/>