

Oponentský posudek diplomové práce:

Autor: Bc. Marek Tunkl

Název: Development of a new runaway electron diagnostics method based on strip semiconductor detectors

Téma a jeho aktuálnost

Uskutečnění termojaderné fúze je klíčovým tématem fyziky již po několik desetiletí. Současné velké tokamaky (JET, JT-60 a další), stavba tokamaku ITER a úvahy o DEMO posouvají snahy o fúzi jakožto budoucího zdroje energie pro lidstvo do realistické roviny. Ubíhající elektrony (Runaway Electrons, RE) jsou potenciálním nebezpečím pro většinu fúzních zařízení. Jejich detekce různými metodami je předmětem studií mnoha špičkových laboratoří. Práce Bc. Marka Tunkla je vysoce aktuální a zabývá se výzkumem v přední linii současné fyziky.

Grafická úprava, sazba a jazyk práce

Práce je napsána v anglickém jazyce, a to na velmi dobré úrovni. Škoda, že práce nebyla zkontrolována elementárním korektorem překlepů, který by jejich množství minimalizoval („almost“, „of this thesis, And“, „detktrrorů“, „křemýkových“, „ubíhajícíh“ atd.). Obrázky jsou, až na pár výjimek (6.1 má malé popisky, 6.2 využívá gradientní kompresi u čárové grafiky), většinou dobře čitelné a vztahy jsou majoritně vysázeny dle platných norem. Seznam zkratk je užitečný, seznam použitých symbolů chybí. Symbol E je používán jak pro elektrické pole (např. ve vztahu 3.12), tak pro energii (např. ve vztahu 4.1), což považuji za nevhodné. Symbolem e je značen jak elementární náboj, tak Eulerovo číslo, které by správně mělo být sázeno základním řezem písma (viz např. vztah 5.1). V celé práci je správně vysázena rychlost (v), až na vztahy (5.2) a (5.3), kde je pro rychlost použito řecké písmeno ν (ν) jinde využívané pro frekvenci. Tyto nekonzistence by při využití seznamu symbolů pravděpodobně nevznikly. Práce je dobře strukturovaná. Celkově lze říci, že se v práci dá velmi dobře orientovat a je přehledná.

Obsah a struktura práce

Práce je rozčleněna do osmi kapitol. V první části se práce zkratce zabývá problematikou termojaderné fúze, následuje kapitola o tokamacích. Ve třetí části se autor již konkrétně zabývá fyzikou ubíhajících elektronů. Další tři kapitoly jsou věnovány detekci záření (interakci záření s pevnou látkou, polovodičovými a scintilačními detektory). Sedmá kapitola se věnuje Monte Carlo simulacím v rámci programového balíku Geant4, který byl využit při simulaci projevů ubíhajících elektronů v tokamaku Golem. Osmá a poslední kapitola je věnována vlastnímu návrhu detektorů a dosaženým výsledkům. Struktura práce je zcela vyhovující a odpovídá zadání diplomové práce.

Fyzikální nejasnosti

Zejména v obecné části práce jsou tu a tam zavádějící formulace a někdy i chyby ve vztazích, které ale nemají vliv ani na simulační ani na experimentální část, která je skutečným těžištěm práce. U tokamaku ITER je uvedeno, že první plazma je očekáváno v roce 1931. To není pravda, stále se uvažuje o roce 2025 nebo 2026. Po deseti letech bezpečného provozu, tedy cca v roce 2036 bude možné začít testovat skutečné fúzní reakce (tedy DT náplň). Na straně 4

je uvedeno, že jeden elektronvolt odpovídá teplotě 11 700 kelvinů, ve skutečnosti jde o přibližně 11 605 kelvinů, konkrétně tuto chybu jsem vytýkal už v posudku bakalářské práce, ale jak je patrné, bez jakéhokoli vlivu na autora. Vztah (1.10) pro rychlost driftu zakřivení je chybný, u magnetického pole a poloměru křivosti ve jmenovateli mají být namísto prvních mocnin druhé. Vztah (1.12) pro rychlost polarizačního driftu je nepřipustně zjednodušený, polarizační drift nemíří ve směru $d\mathbf{E}/dt$, jak je uvedeno, ale směrová závislost je ve skutečnosti dána dvojným vektorovým součinem. Ve vztahu (2.5) je na pravé straně uveden jen škálovací faktor, chybí proudová hustota j_0 . Ve vztahu (3.4) má být nalevo velké lambda, nikoli malé. Na obrázku 3.1 je chybně zakresleno Dreicerovo pole. Nejde o hodnotu pole v maximum křivky, ale o hodnotu pole, při němž se tepelné elektrony dostanou do ubíhajícího režimu, na obrázku by proto Dreicerovu poli spíše odpovídala červená křivka, případně další vodorovná čára vykreslená přímo pro tepelné elektrony. Na straně 15 není v pořádku formulace „*all electrons run away*“, platí to jen pro elektrony s vyšší rychlostí než tepelnou. V textu je disrupce popisována jako nestabilita, což je pravdivé jen částečně. Zcela chybí fyzikální popis toho, co při disrupci vytvoří populaci RE (snížení proudu \rightarrow snížení magnetického pole \rightarrow prudký nárůst elektrického pole dle rovnice $\text{rot } \mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t \rightarrow$ vznik populace RE). Chybějící popis mechanismu vzniku RE při disrupci jsem vytýkal už v bakalářské práci, autor se bohužel nepoučil, přestože jde o nejdůležitější a nejnebezpečnější mechanismus vzniku RE v tokamacích.

Metody zpracování a výsledky práce

Autor předložené diplomové práce využil prostředí programového balíku Geant4 k vytvoření jednoduchého modelu komory tokamaku s limiterem a stripovým detektorem. Simulováno bylo brzděné záření vznikající při interakci ubíhajících detektorů s poloidálním limiterem v tokamaku Golem. Ke sledování tohoto brzděného záření byl vyvinut polovodičový detektor se dvěma navzájem kolmými stripovými detektory. Měření byla doplněna scintilačním detektorem s krystalem LYSO spojeným s křemíkovým fotonásobičem, který umožnil sledování tvrdého rentgenového záření. V práci je uvedena řada získaných výsledků. Měření prokázala, že nový typ diagnostiky je životaschopný a může dobře doplnit stávající diagnostiku v tokamacích, scintilační detektor navíc umožnil odhadnout maximální energii populace ubíhajících elektronů. Autor popisuje problémy s interpretací měření, se kterými se potýkal, zabývá se i poměrem užitečného signálu a šumu.

Dotazy k práci

- 1) mohl byste detailněji popsat, jak probíhá srovnání naměřeného signálu s ostatními diagnostikami nainstalovanými na tokamaku COMPASS?
- 2) mohl byste při obhajobě podrobněji popsat numerickou část práce, zejména jaké konkrétní numerické metody použitý balík Geant4 využívá?
- 3) porovnejte prosím vámi použité diagnostické metody s jinými současnými metodami pro detekci RE, zejména výhody a možnou budoucnost vámi použitých detektorů. S jakými největšími potížemi jste se potýkal?
- 4) Co znamená slovo „spectructrum“ vyskytující se v názvu jedné z kapitol?

Závěr

Autor prokázal vynikající schopnost samostatné orientace v dané problematice. Splnil veškeré části zadání diplomové práce a dosáhl zajímavých původních výsledků. Zejména prokázal životaschopnost testovaného polovodičového a scintilačního detektoru, které jsou vhodným doplňkem stávajících detektorů. Předložená práce má vynikající odbornou úroveň a splňuje veškeré zákonem stanovené podmínky pro diplomové práce, a proto ji doporučuji k obhajobě a hodnotím známkou **A (výborně)**.

Praha, 20. května 2022

Prof. RNDr. Petr Kulhánek, CSc.,
katedra fyziky FEL ČVUT v Praze,
Technická 2
166 27 Praha 6