

Oponentský posudek bakalářské práce

Autor práce: **Tadeáš Němec**
Název práce: **Generace vysokých harmonických frekvencí pomocí “dvoubarevného” pole**
(anglicky: High-harmonic generation in “two-color” field)
Vedoucí práce: **Ondřej Hort, Ph.D.**
Konzultant: **prof. Ing. Jiří Limpouch, CSc.**
Ing. Jan Vábek

Popis předkládané práce: Předkládaná práce se zabývá vznikem vyšších harmonických frekvencí při interakci intenzivního laserového pulsu, resp. dvou pulsů, s jednotlivými atomy. Za tímto účelem je vypracován kvantový model založený na *aproximaci silného pole*, k jehož zjednodušení je použita *aproximace sedlového bodu*. Celý text je přehledně rozdělen do pěti kapitol doplněných o krátký úvod a závěr a čtyři přílohy. Po krátkém úvodu do problematiky generování vysokých harmonických frekvencí je v práci popsán nejprve klasický tříkrokový model, který je schopen poskytnout základní vhled do procesu vzniku harmonických frekvencí a poskytnout odhad maximální energie generovaného záření. Dále je odvozen kvantový model, jehož výsledkem je časový vývoj dipólu a jehož použitím lze získat detailní spektrum vznikajícího harmonického záření. Tento model je nejprve uveden pro případ modelování základního stavu a dále zobecněn pro modelování složitějších orbitalů. Pro modelování základního stavu je dále na model úspěšně aplikována zjednodušující aproximace sedlového bodu. V případě složitějších orbitalů se však další aplikace této aproximace zdá velmi nepřesná a není zcela dořešené, jakým způsobem korektně regularizovat integrál se singularitou, který se ve vztahu pro dipól vyskytuje. V práci následují samotné výsledky výpočtů s použitím představeného modelu (pro základní stav) a jejich porovnání s klasickým modelem pro různé konfigurace polí dvou laserových pulsů (různé polarizace, intenzity, frekvence a fázové posuvy). Prezentované výsledky jsou dostatečně analyzovány, diskutovány a zasazeny do kontextu probíhajícího výzkumu. Práce má celkem 68 stran (54 bez úvodních formálních a prázdných stran) a obsahuje 45 odkazů na odbornou literaturu. Obsahově je práce dostatečně rozsáhlá, přehledně uspořádaná a bez větších chyb. Výsledky prezentované v práci jsou původní, kvalitně zpracované a poskytující prostor pro další vylepšení a pokračování ve výzkumu.

Splnění stanovených cílů: Hlavním úkolem práce bylo studium vzniku vysokých harmonických frekvencí za použití dvoubarevných polí (dvou laserových svazků) s různými vlastnostmi za pomoci numerických simulací. Tento cíl byl naplněn v kapitole 5 předkládané práce. I jednotlivé dílčí cíle stanovené v zadání práce byly naplněny snad s výjimkou toho, že v práci chybí návrh vhodné konfigurace pro experimentální realizaci (je zde pouze zmínka o možnosti „experimentálně proměřit polarizace jednotlivých harmonických frekvencí pomocí XUV elipsometru“). Tento dílčí cíl však považují za velmi ambiciózní a jeho nesplnění za nepodstatné vzhledem k tomu, že se jedná o práci bakalářskou, kde student musí nejprve proniknout do dané problematiky, osvojit si nástroje pro studium dané problematiky a vyzkoušet si jejich použitelnost na modelových případech. Není tedy příliš prostoru pro optimalizaci procesů a vlastní návrhy na vylepšení.

Připomínky k obsahu práce:

V této části shrnuji své připomínky k obsahu práce. Jedná se spíše o drobné gramatické chyby, nepřesnosti nebo nevhodné formulace. Doporučuji autorovi práce příště provést ještě jednu pozornější kontrolu, případně poprosit o kontrolu někoho jiného, aby tyto drobné prohřešky nekazily jinak velmi dobrý dojem z odvedené práce.

- 1.) V názvu “Akademie věd” je velké písmeno “A” (“Fyzikální ústav Akademie věd České republiky” viz. <https://www.fzu.cz>). Tato chyba se vyskytuje již v zadání práce u pracoviště vedoucího práce a dále i na straně 7.
- 2.) Pravděpodobně nejvýznamnější faktická chyba se vyskytuje hned na začátku práce na straně 11. Zde jsou uvedeny použité fyzikální konstanty a u konstanty rychlosti světla ve vakuu je uvedena o patnáct řádů špatná hodnota.
- 3.) V některých formulacích je patrná inspirace cizojazyčným textem, kde však jejich překlad, resp. formulace v českém jazyce, není vhodná a zní dosti uměle. Např.
 - a. Strana 13 „záření nachází značná uplatnění“. Asi by bylo vhodnější např. „se s úspěchem uplatňuje“
 - b. Strana 14 (18) slovo „region“. Vhodnější by bylo asi „oblast“.
 - c. Slovo „naleznout“. Toto slovo se vyskytuje v práci na více místech a je používáno konzistentně, ale podle mého názoru nevhodně. Např. strana 17 „lze je naleznout např. v [4]“ by bylo vhodné pozměnit na „podrobnější popis je uveden v [4]“.
- 4.) Ve vzorci 1.1 pro rozvoj do Fourierovy řady na straně 18 nemá být infinitesimální parametr „d“.
- 5.) Další drobnější připomínky
 - a. Strana 13 „energií mezi dvěma energetickými hladinami“ – „rozdílu energií mezi dvěma energetickými hladinami“
 - b. Strana 14 „s plazmatem vzniklého ionizací“ – „s plazmatem vzniklým ionizací“
 - c. Strana 14 „řády odpovídajících energiím“ – „řády odpovídající energiím“
 - d. Strana 34 „skrze ionizaci laseru“ – „skrze ionizaci laserovým polem“
 - e. Strana 51 (52) – použití desetinné tečky místo čárky u hodnoty fázového posunu. Desetinná čárka je jinak v práci používána konzistentně všude.
 - f. V odkazech na použité zdroje – [31], [34] chybí čísla stránek.
 - g. V obrázcích, kde jsou zobrazena spektra záření v závislosti na fázovém posunu jsou u barevné škály tzv. “arb. u.” – libovolné jednotky. V takovém případě je zbytečné používat tolik desetinných míst a bylo by srozumitelnější použít jednotky takové, aby jejich číselné hodnoty byly v řádu jednotek či desítek.

Doplňující otázky:

- 1.) V kapitole 3.3.1 je k vyřešení integrálu pro s orbital použita aproximace sedlového bodu a v obrázku 3.1 je ukázáno, že tato aproximace je pro jednobarevné pole dostatečně přesná. Mohl byste prosím komentovat nebo předvést na nějakém příkladu, zda je tato aproximace dostatečně přesná i v případě dvoubarevných polí?
- 2.) V případě dvoubarevných polí není zcela zřejmé, co je myšleno hodnotou U_p . Jedná se o vždy hodnotu danou silnějším laserovým polem? Podotýkám, že hodnota U_p závisí i na frekvenci pole.
- 3.) V obrázcích, kde jsou zobrazena spektra záření v závislosti na fázovém posunu jsou použity libovolné jednotky. Jsou tyto jednotky totožné a mezi jednotlivými

případy srovnatelné? Pokud ano, lze srovnáním jednotlivých případů vyvodit nějaké závěry, týkající se efektivity generace vyšších harmonických frekvencí?

Celkové hodnocení práce: Práci považuji za velmi kvalitní, dobře zpracovanou a přínosnou s dalším potenciálem do budoucna. Téma práce je velmi aktuální. Cíle práce byly splněny.

Závěr: Bakalářskou práci doporučuji k obhajobě a navrhuji klasifikovat známkou

výborně (A).

V Praze, 30.8. 2021

doc. Ing. Ondřej Klimo, Ph.D.