



Palaiseau, 28. května 2021

**Oponentský posudek diplomové práce****Název práce:** PIC simulace urychlování elektronů v brázdovém poli laseru ve vlnovodném režimu**Autorka:** Bc. Ekaterina Eremenko**Vedoucí práce:** Ing. Michal Nevrkla, Ph.D.

Diplomová práce Bc. Ekateriny Eremenko si klade za cíl za pomoci pokročilých numerických simulací metodou particle-in-cell (PIC) studovat urychlování elektronů na brázdové vlně tažené laserovým impulzem (LWFA), který se šíří plazmatem s parabolickým příčným hustotním profilem. Takový profil lze realizovat v kapilárách. Tímto se důmyslně potlačuje difrakce laserového impulzu, jenž pak je schopen vést plazmovou vlnu v centrální oblasti řídkého plazmatu po dobu několika desítek pikosekund. Jelikož fázová rychlost plazmové vlny je v těchto nízkých hustotách velmi blízká rychlosti světla ve vakuu, případně zachycené elektrony, jejichž rychlost je ještě o malinko vyšší, mohou setrvávat v její urychlující fázi i po celou tuto dobu a tedy stále od ní získávat energii. Tímto způsobem bylo roku 2019 dosaženo rekordního urychlení elektronů na energii až 8 GeV [35].

Práce samotná je rozdělena do pěti hlavních kapitol. Úvodní kapitola představuje poněkud neučesaný přehled různých jevů a vztahů více či méně relevantních pro studovanou problematiku. Je těžké ten výklad sledovat. Chybí uspořádanost, málo je odkazováno na předchozí zjištění a literaturu a také je tam množství ortografických i topografických chyb. Hlavně mi však chybělo určité zařazení teoretických pojmů do kontextu vlastního výzkumu. Myslím tím, že třeba při diskusi např. kritického výkonu laserového systému, délky vyčerpání či defázování by bylo vhodné uvést hodnoty těchto veličin pro typické hodnoty parametrů uvažovaných v simulační části práce. Taková počáteční analýza by byla určitě prospěla celkovému výsledku výzkumu.

Druhá kapitola povrchně představuje metodu particle-in-cell a kód EPOCH. Tato kapitola v zadání nebyla požadována. Vzhledem k tomu, že metoda není nijak rozvíjena, vynechání této kapitoly by ničemu neuškodilo.

Třetí kapitola se věnuje zpracování nějaké nepříliš jemně rozlišené simulace MHD, jejíž výsledek je uveden v Obr. 11, nejspíše s chybnou jednotkou hustoty. Záměrem je interpolovat hodnoty hustoty elektronů a neutrálních atomů vodíku na mřížku simulace PIC. Dějí se tam až neuvěřitelné věci, jako třeba fitování gaussovského profilu ze tří hodnot v peaku. Překvapivě však lze interpolaci těchto rozostřených

dat lze považovat za nejkvalitnější výsledek z celé práce. Skutečně se dá uvěřit tomu, že hustotní průběh elektronů v kanále může odpovídat Obr. 19 či 24. Je ovšem třeba podotknout, že je značně ošemetné prezentovat hodnoty chyby fitovaných hodnot vzešlých z takových vstupních dat.

Orientaci ve výsledcích by ulehčilo, pokud by pozice ve  $r$  z Obr. 14 byly naznačeny v Obr. 13 a v Obr. 14 by mohly být označeny hodnoty intervalu  $z_i$ . Kvalita grafické prezentace výsledků obecně pokulhává za standardem obvyklým pro závěrečné práce z oboru.

Čtvrtá kapitola uvádí strategii simulací metodou PIC. Vyjma zásadního nedostatku, o kterém se rozepíší níže, obsahuje i nepravdivé tvrzení, že EPOCH neumožňuje nastavení časového kroku. To je s podivem, neboť v příloženém vstupním souboru je uvedena hodnota  $dt\_multiplier$ , což je Courantovo–Friedrichsovo–Lewyho číslo uměle snižující délku časového kroku, jež je odvozena z prostorové diskretizace a zaručuje konvergenci explicitních schémat. Obecně se doporučuje nastavit jej na 0,95, diplomantka zvolila 0,99, což je poměrně hodně.

Pátá kapitola se věnuje prezentaci výsledků simulací metodou PIC. Je nešťastné, že se diplomantka ve svém výzkumném úkolu i ve své diplomové práci věnovala simulacím urychlování elektronových svazků na plazmové vlně, přičemž se dá říci, že částečně uspěla jedinkrát, a to v DP při konfiguraci č. 2, kde se pár makročástic udrželo v urychlujícím poli a dosáhlo nízké energie 30 MeV. Rozhodně se ale nejedná o takovou injekci, jaká byla zřejmě zamýšlena. Kolik elektronů bylo urychleno, to se v práci nedozvíme. Pohledem např. na Obr. 34 odhaduji nanejvýše jednotky fC, což je žalostné při energii v laserovém impulzu, již řádově odhaduji na několik J.

Bibliografie čítá 44 záznamů, z čehož 35 záznamů odkazuje na články v impaktovaných žurnálech. Pouze tři z těchto odkazů míří na práce nanejvýše 10 let staré, což je u tak rapidně se rozvíjejícího se oboru zarážející. Formát záznamů není jednotný.

Předkládaná práce není kvalitně sepsána. Asi nejzásadnějším nedostatkem práce je skutečnost, že simulace byly provedeny s nevhodně nízkým rozlišením. Jejich relevance je proto pochybná. Například třináct let stará práce [O1] hodnotí mimo jiné i 2D simulace LWFA v parabolickém kanálu a shrnuje, že je vhodné užívat rozlišení alespoň 24 buněk na vlnovou délku laserového impulzu  $\lambda_L$ . Předkládaná diplomová práce se k rozlišení simulace vyjadřuje, bere ovšem v potaz pouze mně neznámou a nijak necitovanou podmínku na 10 buněk na plazmovou vlnovou délku  $\lambda_p$ . Standardně užívaná podmínka z [O1] vede na požadavek  $\Delta x < 33$  nm, podmínka uvedená v práci požaduje pouze  $\Delta x < 3,3$   $\mu$ m. Studentka ve své práci zvolila  $\Delta x = 100$  nm. Prakticky to znamená, že jedna perioda laserového impulzu je popsána pouze 8 body mřížky a na takové mřížce má být počítáno šíření elektromagnetické vlny prostředím na vzdálenosti několika centimetrů. Samovolná injekce elektronů do plazmové vlny (tzv. self-injection) je přitom spojena s její dynamikou, která je svázána s vývojem ponderomotorické síly, jež závisí na vývoji profilu laserového impulzu. Je tedy i takto intuitivně zřejmé, že přinejmenším podélné rozlišení mřížky musí být mnohem jemnější, než bylo zvoleno, aby výsledky simulací mohly být brány vážně.

Těžko však z tohoto vážného prohřešku vinit jen studentku. Z práce ani ze zadání jsem se nedozvěděl, jaké měla diplomantka výpočetní možnosti. Bylo by proto příkré kritizovat diplomantku příliš v tomto ohledu. Z vlastní zkušenosti vím, že kinetické simulace laserového plazmatu lze pokládat za řemeslo, kterému je třeba se učit od zkušenějších. Během rozpravy při obhajobě by se jak diplomantka, tak vedoucí měli k tomuto ohledu vyjádřit. Musím totiž předpokládat, že volba rozlišení sledovala určitý záměr a má nějaké logické ospravedlnění. Existuje-li takové, rozhodně mělo být vysvětleno v práci.

Co jsem vyrozuměl z práce a ze zadání, studentka dostala výsledky nějaké blíže nespecifikované magnetohydrodynamické simulace průběhu hustoty v kapiláře, které pak nainterpolovala jako vstup pro simulaci metodou PIC. Průměr kapiláry byl 200  $\mu\text{m}$  a celý tento průřez byl simulován. Podélný rozměr simulačního okna pohybujícího se spolu s laserovým impulzem byl stanoven na 100  $\mu\text{m}$ . I při nedostatečném rozlišení, jež bylo zvoleno, je simulační oblast tvořena 2 000 000 buňkami. V každé této buňce jsou pak inicializovány tři elektrony a tři atomy vodíku, máme tedy odhadem 12 000 000 částic. Další pak v průběhu přibývají ionizací, jež je také simulována. Vezmeme-li v potaz extrémně dlouhou dobu simulace 100 ps, což je přibližně 1 000 000 časových kroků, je zřejmé, že zadání bylo příliš ambiciózní.

Závěr práce proto pozitivně překvapil. Obsahuje kritickou reflexi vlastního neúspěchu. Lze podepsat tvrzení, že *časová náročnost simulace kapiláry omezuje parametrizaci soustavy, kvůli čemuž (diplomantka) v rámci této práce nedospěla k optimálnímu nastavení počátečních podmínek systému*. Toto by však zkušeného výzkumníka v oboru nemělo překvapit a mělo s tím být počítáno již při zadání práce. Diskuse výskytu nějakých *kritických nestabilit* je s ohledem na nedostatečné rozlišení simulace pouze spekulativní. Lze také souhlasit se závěrečnou větou, že *elektrony lze urychlit na 100 MeV na vzdálenosti menší než 1 mm*. Záměr navrhovat pro tento účel parabolický kanál v několikacentimetrové kapiláře, jak je požadováno v zadání v bodu č. 4, je proto nešťastný, nemluvě o požadavku na kvazimonochromaticnost urychleného elektronového svazku při takové konfiguraci.

Celkově lze zhodnotit, že zadání práce se splnit zcela nepovedlo. Příčinu lze hledat jak v nedostatecích zadání, tak v nedostatecích zpracování. Připadalo by mi však příliš přísné vzhledem k okolnostem předkládanou diplomovou práci zcela odmítnout. Proto navrhuji připustit tuto práci k obhajobě a ohodnocuji ji známkou

### **E (dostatečně).**

Zároveň předpokládám kritickou diskusi o příčinách neúspěchu jako součást obhajoby.

Ing. Vojtěch Horný, Ph.D.  
Chercheur postdoctoral au CNRS

[O1] Cormier-Michel, E., Shadwick, B. A., Geddes, C. G. R., Esarey, E., Schroeder, C. B., & Leemans, W. P. (2008). Unphysical kinetic effects in particle-in-cell modeling of laser wakefield accelerators. *Physical Review E*, 78(1), 016404.

### **Otázky pro obhajobu**

1. Ze vstupního souboru v příloze je zřejmé, že laserový impulz vstupoval do simulační oblasti fokusován na jeho levý okraj. Zkuste odhadnout, jestli by simulace dopadly lépe, byl-li by impulz zaostřen vhodněji, řekněme na  $z = 1.8$  cm nebo hlouběji do plazmového kanálu.
2. Na základě čeho jste volila parametry laserového svazku? Mohla byste uvést vhodné parametry laserového svazku a profilu plazmatu, které byly vhodné pro definovaný cíl v zadání? Vysvětlete svou volbu.
3. Uveďte výpočetní prostředky, jaké jste měla k dispozici. Na základě informací z posudku či z literatury zkuste navrhnout vhodnou konfiguraci dobře rozlišené simulace. Odhadněte, jaká by byla výpočetní náročnost takové simulace. Jak by se taková náročnost dala snížit? Diskutujte, co vše by bylo možno zanedbat.