

Stolní urychlovače elektronů v laserovém plazmatu

J. Turza *

M. Iurchenko**

Gymnázium Velké Meziříčí, Sokolovská 27, Velké Meziříčí*

ZŠ Brána jazyků, Uhelný trh 4, Praha 11000 **

turzajan@email.cz*

m.iurchenko@seznam.cz**

Abstrakt:

Přemýšleli jste někdy jak urychlit elektron bez použití obrovských urychlovačů? Náš miniprojekt se zaměřuje na problematiku urychlování elektronů v laserovém plazmatu. Pro tuto analýzu jsme si vybrali metodu particle-in-cell a za pomoci počítače jsme provedli simulace wakefieldů a injekcí. Povedlo se nám předpovědět urychlení elektronů až na energii 290 MeV na vzdálenosti pouhých 1.8 mm.

1 Úvod

Urychlovače částic nemusí být pouze zařízení obrovských rozměrů, jejichž konstrukce a provoz stojí nemalé finanční prostředky. Alternativní technické řešení spočívající v interakci ultrakrátkého a extrémně intenzivního laserového impulzu s plynovým terčíkem dokáže vygenerovat elektronové svazky velmi vysokých energií už na urychlovací vzdálenosti několika milimetrů. I s laserovým systémem se tedy náš urychlovač vejde na (velký) stůl. Simulovali jsme urychlovací proces s numerickým výpočtem a podívali jsme se i do laboratoře v centru PALS, kde takové věci dokážou experimentálně uskutečnit.

2 Analýza dat

Motivace

Tato metoda urychlování elektronů by mohla v budoucnu nahradit konvenční urychlovače elektronů. Její výhoda spočívá v jednoduchosti, velikosti a nízké ceně oproti standardním radiofrekvenčním urychlovačům částic. V rámci tohoto miniprojektu chceme zjistit vzdálenost, po kterou mohou být elektrony efektivně urychlovány při daných parametrech laseru a prostředí. Hodláme odhadnout také energii, na kterou může být tento elektronový svazek urychlen.

Definování pojmů

LASER - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, tj. zesilování světla stimulovanou emisí záření. Je to optický zdroj elektromagnetického záření, světlo je z něho vyzářováno ve formě koherentního svazku.

Wakefield (brázdová vlna) – je to elektronová plazmová vlna, která se šíří za intenzivním laserovým impulsem prostupujícím skrz plynový terč. Má charakter periodicky se měnících oblastí s velkou intenzitou elektrického pole, kterým mohou být zachycené elektrony urychleny.

Plasma - je čtvrté skupenství hmoty, vzniká zahřátím a ionizací plynu, skládá se z iontů a elektronů, což vzniká odtržením elektronů z elektronového obalu atomů plynu, či roztržením molekul (ionizací).

Proč používáme laser

Díky laseru můžeme velmi malé množství energie (např.: 1 J) koncentrovat do velmi malého prostoru a krátkého časového okamžiku. Intenzita námi uvažovaného elektromagnetického záření je až ve výši řádově 10^{19} W. cm⁻².

Metoda

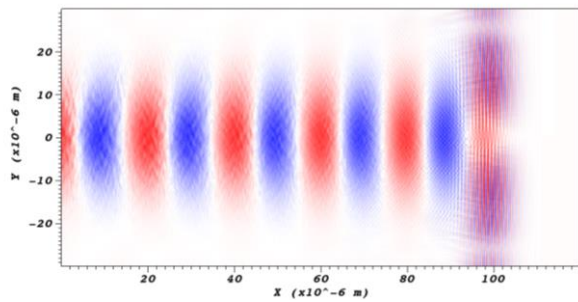
Prováděli jsme simulace urychlování elektronů za pomoci metody particle-in-cell (PIC) na 32-jádrovém počítači nobel15, který je umístěn na Katedře fyzikální elektroniky. Urychlování elektronů v plazmatu spočívá ve vystřelení laserového impulsu do plyného terče a následné injekci elektronů do bubliny vznikající za laserovým impulsem. Dosáhnout injekce není vůbec jednoduché, proto se hledají nové způsoby, jak nahradit nejistou samovolnou injekci. Injekce může proběhnout vystřelením druhého laserového impulsu do plynu v protiběžném směru.

Výsledky

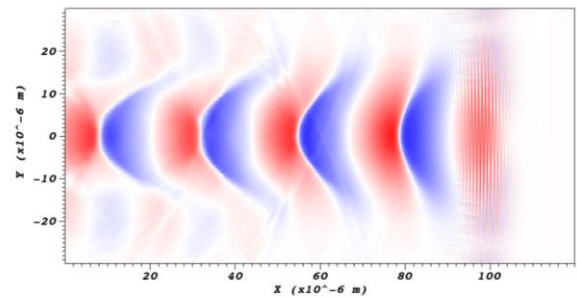
Nejprve jsme prováděli jednoduché simulace vytváření lineárního a nelineárního wakefieldu (viz obrázek č. 1, 2), jednoduché simulace samovolné injekce nebo injekce slabším protiběžným svazkem s padesátinovou intenzitou. Ta nás zaujala nejvíce, a proto jsme potom přistoupili k větší simulaci s těmito podmínkami. Zlepšili jsme ovšem výrazně numerické parametry simulace, tedy rozlišení mřížky a zvětšení simulační oblasti. Výpočet každé z jednoduchých simulací trval asi 15 minut, zatímco simulaci protiběžné injekce jsme museli nechat běžet přes noc, protože trvala asi 10 hodin.

	Lineární wakefield	Nelineární wakefield	Samovolná injekce	Protiběžná injekce
Velikost ohniska	14 μm	14 μm	14 μm	14 μm
Délka impulsu	30 fs	30 fs	30 fs	30 fs
Hustota elektronů	$3 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$	$3 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$	$3 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$	$5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$
Buňky	2400 x 120	2400 x 120	2400 x 120	3750 x 300
Energie	0.07 J	1.2 J	5 J	1.2 J + 0.17 J
Max. energie	bez injekce	bez injekce	190 MeV *	290 MeV
Konec simulace	1.8 ps	1.8 ps	1.8 ps	18 ps

* (energie bude ještě stoupat, protože jsme po dobu simulace nedosáhli středu bubliny)

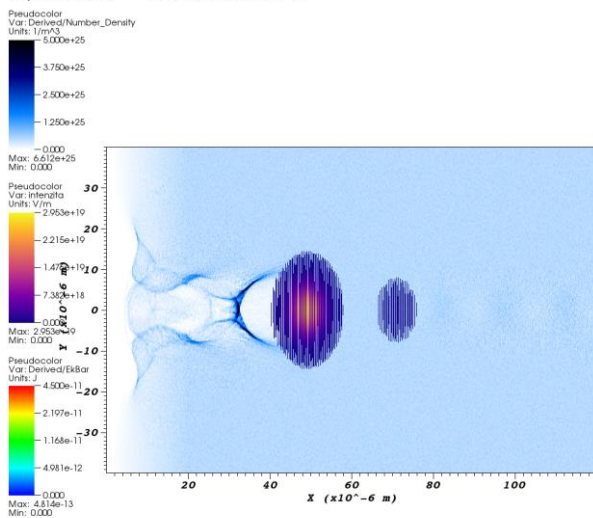


Obrazek 1: Lineární wakefield

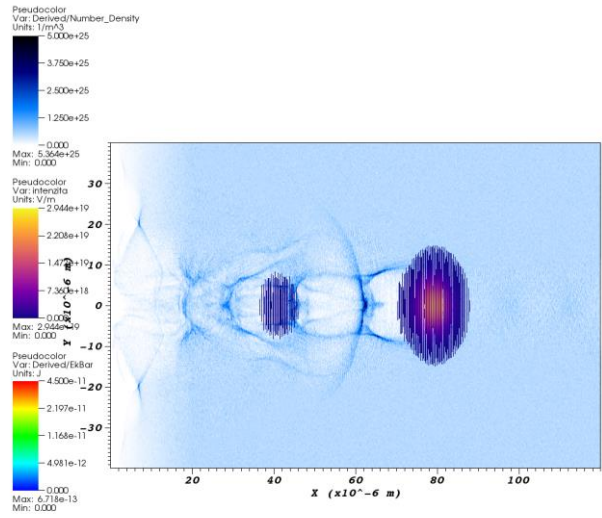


Obrazek 2: Nelineární wakefield

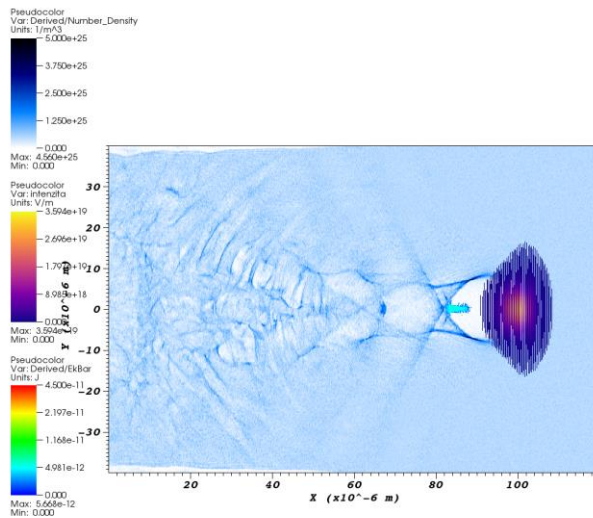
DB: 0004.scf
Cycle: 1987 Time: 2.00053e-13



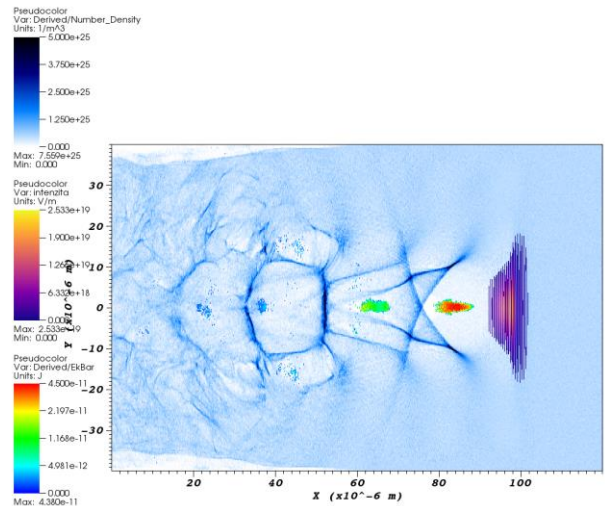
DB: 0006.scf
Cycle: 2980 Time: 3.0003e-13



DB: 0015.scf
Cycle: 7450 Time: 7.50075e-13



DB: 0102.scf
Cycle: 50655 Time: 5.1e-12



user: tv7
Tue Jun 20 11:40:14 2017

user: tv7
Tue Jun 20 10:33:00 2017

Obrazek 3-6: Vývoj sledovaných veličin v čase. Jsou to hustota elektronů, intenzita laserového svazku a energie urychlených elektronů.

Tyto čtyři obrázky jsou ze simulace protiběžné injekce. Na prvním obrázku vidíme dva laserové impulsy, za silnějším (vlevo) vzniká nelineární wakefield, zatímco za druhým, který je slabší, vzniká lineární wakefield. Impulsy se poté potkají a na druhém obrázku vidíme střetnutím vyvolanou injekci. K tomuto střetu došlo v čase 250 fs. Na třetím obrázku již můžeme vidět urychlující se elektronový svazek, kterému značně stoupá energie a to až na hodnotu 46 pJ (290 MeV), které dosáhne v čase 6.1 ps. Do doté doby urazí dráhu 1.8 mm. Je třeba poznamenat, že ve skutečnosti urychlovanému elektronu nenarůstá rychlost, ale energie. Toto vyplývá ze speciální teorie relativity. Na čtvrtém obrázku vidíme, že se elektronový svazek postupuje směrem kupředu vůči impulsu (to je způsobeno nepatrně větší rychlostí elektronového svazku oproti laserovému impulsu). Zároveň také vidíme, že impuls slábne a v bublinách za ním došlo k dalším injekcím (toto je většinou nechtěný jev, kterému lze předcházet výstřelem dalšího mírně opožděného laserového impulsu, který zbaví první impuls tohoto nechtěného elektronového svazku).

Shrnutí

Na počítačích jsme prováděli simulace lineárního a nelineárního wakefieldu, a později i simulace samovolné a protiběžné injekce. Zjistili jsme, že toto může být alternativní cesta jak urychlovat elektrony, která nevyžaduje velké materiální náklady ani spoustu místa jako standardní radiofrekvenční urychlovače. Elektrony jsme totiž urychlovali až na energii 290 MeV interakcí intenzivního laserového pulsu s plynným terčem o tloušťce 2 mm. V budoucnu doufáme, že se tato metoda stane dostupnější a rozšířenější a tím napomůže základnímu výzkumu.

Poděkování

Předně děkujeme Ing. Vojtěchu Hornému a doc. Ondřeji Klimovi, kteří nás touto problematikou provedli a zároveň bychom chtěli poděkovat organizátorům Týdne vědy na Jaderce.

Reference:

- [1] Klimo, O., Simulace laserového urychlování částic na superpočítačích: http://pi.fjfi.cvut.cz/mini/Simulace_laseroveho_urychlovani_castic_na_superpocitacich/Blank.html, navštíveno 20. 6. 2017
- [2] Esarey, E., C. B. Schroeder, and W. P. Leemans. "Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators." *Reviews of Modern Physics* 81.3 (2009): 1229.
- [3] Lehe, R., et al. "Optical transverse injection in laser-plasma acceleration." *Physical review letters* 111.8 (2013): 085005.