

Stolní urychlovače elektronů

J. Demjančuková¹, M. Zikuda², Z. Vostřel³

¹Gymnázium Na Vítězné pláni, Praha; ²Gymnázium Jana Palacha 804, Turnov;

³Gymnázium a SOŠ dr. V. Šmejkal, Ústí nad Labem

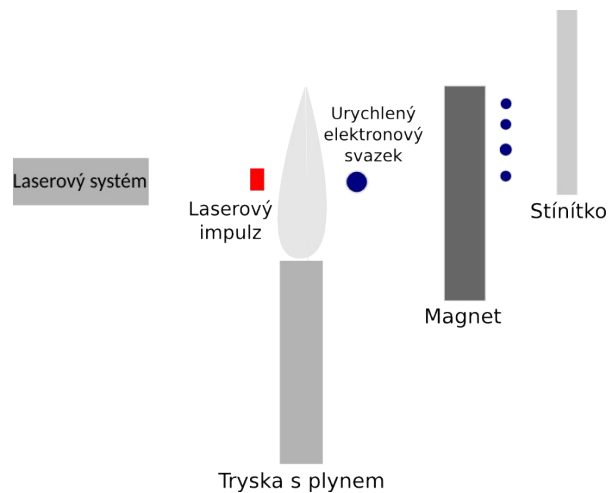
vostrel.zd@gmail.com

Abstrakt:

Urychlování částic pomocí laserových systémů je metoda, kterou se stále zabývá aktuální výzkum. Jejím praktickému využití stojí v cestě ještě řada problémů, zejména nestabilita parametrů produkovaných elektronových svazků. V této práci bylo provedeno několik simulací demonstrujících vliv změn jednotlivých fyzikálních parametrů na výsledek. Při simulaci se povedlo zvýšit energii elektronům na hodnotu 200 MeV při použití dvou protichůdných laserů.

1 Úvod

Pokud mluvíme o urychlovačích, většině lidí se vybaví obrovská zařízení jako např. LHC v CERNu. Urychlovače ale mají i jiné než vědecké využití v základním výzkumu, například ve zdravotnictví jako zdroje rentgenového záření. Všechny tyto urychlovače mají jedno společné – jsou extrémně drahé. A nejenom co se týče jejich výstavby, tak i provozu. Právě vysoká cena omezuje praktické využití těchto technologií například v medicínské praxi. Urychlovat částice ale lze potenciálně i s využitím mnohem menších přístrojů při dosažení srovnatelných výsledků. Jedním z takovýchto přístrojů může být laserový systém o výkonu menším než 100 TW. Výhodou tohoto zařízení je kompaktnost – k instalaci stačí větší stůl. Laserový systém generuje laserový impulz, který prochází plynným terčem. Za sebou vytváří brázdovou plazmovou vlnu, podobně jako loď za sebou zanechává vlnu na vodní hladině. Elektrická pole v brázdové plazmové vlně mohou dosahovat až stovek GV/m². Pokud jsou na vhodné části plazmové vlny umístěny elektrony, mohou být touto vlnou urychleni na energie několika stovek MeV na vzdálenosti několika milimetrů. Naše práce byla zaměřena na počítačovou simulaci počátku urychlovacího procesu.



Obr. 1 Náskres aparatury

2 Princip fungování

Vygenerovaný laserový impuls při průchodu plynem způsobí ionizaci plynu a vznik plazmatu. Při dostatečné výkonnosti laseru, tzn. pokud jeho intenzita dosahuje přibližně $6 \cdot 10^{18} \text{ W/cm}^2$, dochází vlivem takzvané ponderomické síly k vypuzení elektronů. Tím vzniká v plazmatu brázdová vlna. Pro srovnání intenzity potřebného laseru – intenzita záření na povrchu Slunce dosahuje hodnot $6.4 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$. Dosažení tak vysokých hodnot intenzity laseru je možné díky velmi krátkému trvání impulsu, které se pohybuje v řádu několika femtosekund ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$).

Na brázdové vlně dochází k zachycení elektronů, které jsou následně urychleny. Šance elektronů na zachycení závisí na řadě faktorů, přičemž my jsme se zabývali zejména průměrem dopadajícího laseru a jeho energií, hustotou plazmatu.

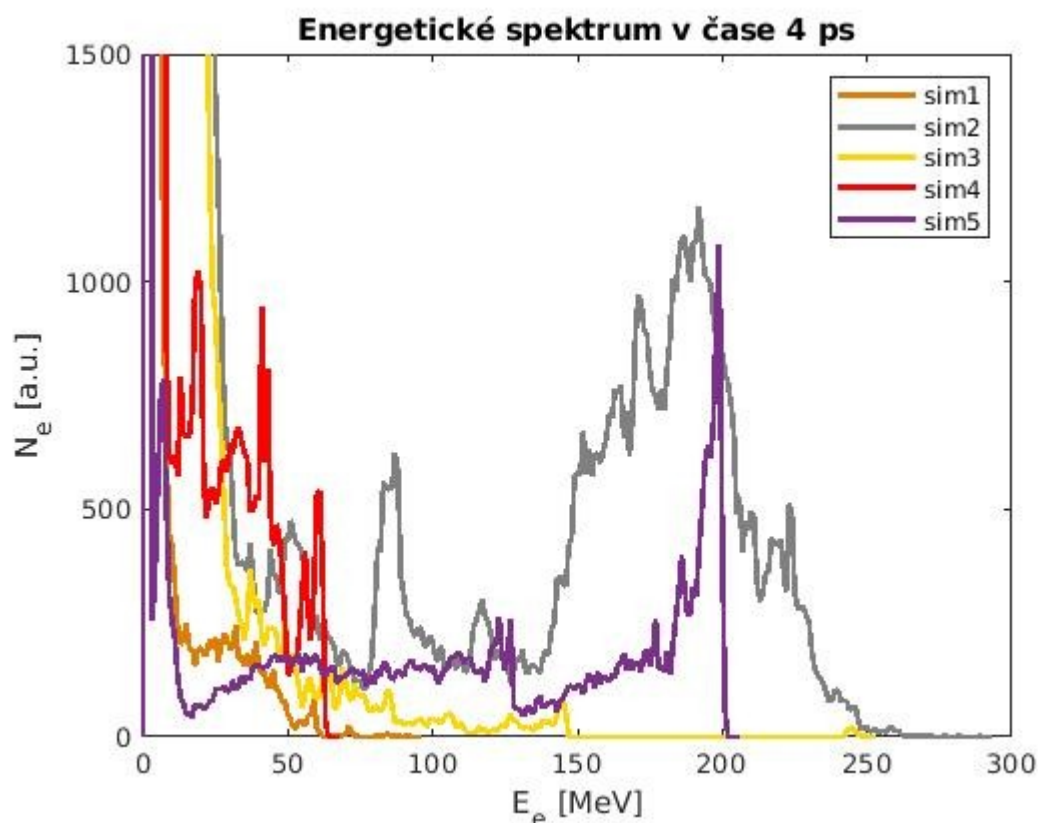
3 Simulace

Všechny simulace byly provedeny na výkonném klasteru na Ústavu fyziky plazmatu AV. Typická simulace probíhala na šestnácti jádrech a trvala více jak čtyři hodiny. Na začátku je vytvořena síťka s rozlišením 3200×360 , přičemž v každém jejím poli jsou umístěny čtyři částice. Celkem se tedy simulovalo 4.608.000 částic po dobu 4 ps. Pro každou z nich se řešily pohybové rovnice. Na síti jsou v každém časovém kroku řešeny Maxwellovy rovnice. Bylo provedeno pět simulací s různými konfiguracemi.

4 Výsledky

Simulace	Energie laseru [J]	Průměr dopadajícího laseru [m ²]	Hustota plazmatu [m ⁻³]
1	0.6	14e-6	1e25
2	2.4	14e-6	1.5e25
3	1.2	14e-6	1e25
4	2.4	14e-6	0.3e25
5	1.2+0.024	14e-6	3e24

U simulací 1-3 došlo k vytvoření brázdové vlny. Na té ale v měřeném čase nedošlo k zachycení elektronů, přestože vývoj nasvědčoval k tomu, že by k tomu dojít mohlo. Při simulaci číslo 4 došlo k dlouhé injekci elektronů, což je vhodné např. pro vytváření rentgenového záření, nebo pro medicínskou terapii.



Obr. 2: Energetické spektrum při jednotlivých konfiguracích.

U páté simulace byly použity dva protiběžné lasery. Obvykle jsou elektrony zachyceny právě tzv. samovolnou injekcí. K ní však dochází jen, když je plazmová vlna za laserovým impulzem dost

pomalá. V tom případě jsou však urychlované elektrony brzo rychlejší než plazmová vlna a proto na ni postupují kupředu. Zanedlouho se ale dostanou do zpomalující části plazmové vlny, což limituje maximální energii, na kterou mohou být urychleny.

Injekční impuls umožňuje zachycení silného elektronové svazku taky při nižších hustotách plazmatu, kdy je rychlost laserového impulsu blízká rychlosti světla. V okamžiku střetu obou impulsů je pohyb elektronů v místě střetu nelineární podoby a některé z nich setrvávají na plazmové vlně.

Použití injekčního impulsu skýtá výhody, jako kontrola nad dobou injekce a tudíž i stabilnější a větší energie. Zároveň se ale jedná o komplikovanější proces a je to složitější na provedení.

3 Shrnutí

Stolní urychlování elektronů je relativně novým a neprobádaným oborem, zároveň ale i velmi nadějnou oblastí, která slibuje ulehčení práce a možnosti nových objevů v dalších vědních disciplínách. Náš výzkum byl hlavně teoretický, ale povedlo se nám prozkoumat možnosti a hranice urychlování elektronů laserovými impulsy a možná zlepšení do budoucna, třeba kombinace několika impulsů.

Poděkování

Na závěr bychom chtěli poděkovat vedoucímu naší práce, Ing. Vojtěchu Hornýmu, za pomoc při práci, ochotu a trpělivost.

Reference:

ESAREY, E.; SCHROEDER, C. B.; LEEMANS, W. P. Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81.3: 1229.

HORNÝ, Vojtěch, et al. Short electron bunches generated by perpendicularly crossing laser pulses. *Physics of Plasmas*, 2017, 24.10: 103125.