

Můžeme vytvořit antihmotu pomocí laseru?

A. Lénertová¹, J. Mynář², M. Stránský³

¹Gymnázium Botičská, Botičská 1, 128 01 Praha 2,
Alena.Lenertova@gybot.cz

²Gymnázium Boskovice, Palackého náměstí 1, 680 01 Boskovice,
zakopo185@gmail.com

³Akademické gymnázium a Jazyková škola s právem státní jazykové
zkoušky, školy hlavního města Prahy, Štěpánská 22, 110 00 Praha 1,
datejl@seznam.cz

Abstrakt

Pomocí simulace střetu vysokointenzivního laseru s urychleným svazkem elektronů můžeme studovat průběh vzniku elektron-pozitronových párů. Vznikající pozitrony jsou antičásticemi k elektronům a jsou proto jedněmi ze základních stavebních jednotek antihmoty. Pozitrony se uvolňují ve formě elektron-pozitronových párů. Výpočty byly provedeny na superpočítači Karolina v centru IT4Innovations pomocí kódu Smilei, který využívá metodu particle-in-cell. Simulacemi zjišťujeme jak souvisí náboj vytvořených pozitronů s původní energií elektronového svazku.

1 Úvod

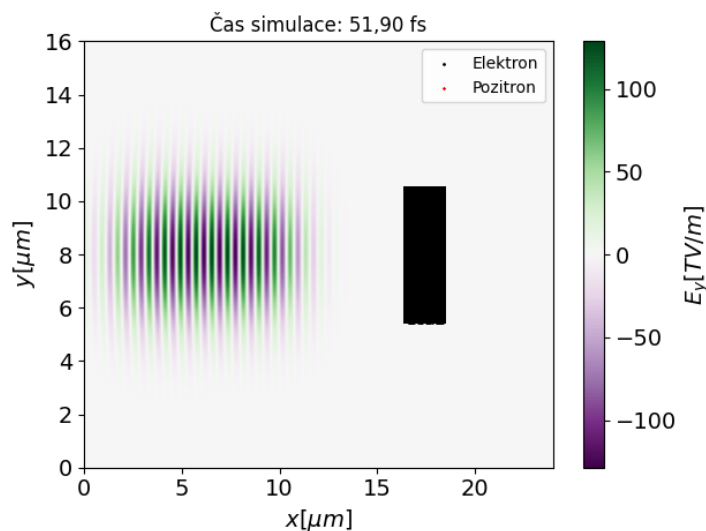
Existence antihmoty byla předpovězena už roku 1928 Paulem Diracem [1], který se zabýval kvantovou fyzikou. O čtyři roky později existenci pozitronů dokázal Carl Anderson, ale pouze ve velmi malém množství. V posledních letech se rozšiřuje výzkumy s vysokointenzivními lasery, pomocí kterých můžeme tvořit a zkoumat antičástice. Při těchto výzkumech pracujeme s extrémními podmínkami, které se mohou podobat podmínkám ve vesmíru. Díky tomu bychom si mohli ověřit spoustu teorií, jenž zatím nejsou prokázány. To zahrnuje například bližší výzkum magnetosféry pulsarů, testování asymetrie množství částic a antičástic ve vesmíru a podobně. Laser s zatím nejvyšší intenzitou byl sestaven Jižní Koreji a to s intenzitou výstřelu $10^{23} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ [2]. Pro samovolné vytvoření elektron-pozitronových párů ve vakuu je potřeba intenzity tzv. Schwingerova limitu s hodnotou $10^{29} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Dnes lze vytvořit elektron-pozitronové páry i s nižší intenzitou laseru pomocí nelineárního Breit-Wheelerova procesu [3]. V tomto procesu dochází ke srážce gama-fotonu s fotony z laseru za vzniku elektron-pozitronových párů. Zatím jediný experiment srážky laseru s urychleným svazkem elektronů s cílem vytvořit elektron-pozitronové páry úspěšně proběhl roku 1997 ve Stanfordu [4]. V rámci tohoto projektu budeme zkoumat tvorbu elektron-pozitronových párů pomocí simulace a metody particle-in-cell. A budeme sledovat změnu náboje a počtu vytvořených pozitronů na základě změny energie elektronových svazků.

2 Simulační metody

V námi vytvořené simulaci počítáme pomocí metody particle-in-cell (PIC), která počítá s částicemi v pomyslné mřížce. Dalším usnadněním jsou výpočty elektrického a magnetického pole v bodech mřížky a počty s makročásticemi. Dále pracujeme s kódem Smilei [5], který je volně dostupný. Pro zrychlení výpočtů jsme se dálkově připojili na superpočítač Karolina, kde jsme na 128 jádrech spustili 10 simulací s různými energiemi svazků elektronů. K simulaci jsme použili laser o intenzitě $5,281 \cdot 10^{21} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ s trváním impulsu 30 fs. Energií svazku jsme v rámci simulací měnili. Svazek elektronů ve tvaru válce měl délku $2 \mu\text{m}$ a poloměr $2,5 \mu\text{m}$. Získaná data jsme dále zpracovávali pomocí Pythonu.

3 Výsledky a diskuse

Na obrázku 1 vidíme že laser postupuje v kladném směru osy x a je lineárně polarizován ve směru osy y. Proti laseru postupuje svazek elektronů v záporném směru osy x. Obrázek 2 znázorňuje střet laseru a svazku elektronů. Dochází ke vzniku elektron-pozitronových párů, v místech kde má laser nejvyšší intenzitu. Na posledním obrázku 3 vidíme výsledek srážky a postupně se oddělující elektrony. Na základě dat ze simulací jsme vytvořili graf znázorňující závislost náboje pozitronů na počáteční energii elektronů. Při počáteční energii elektronů 1 nebo 2 GeV je počet i náboj vzniklých pozitronů zanedbatelný. Při vyšších hodnotách pozorujeme nárůst náboje vzniklých pozitronů.



Obrázek 1: Simulace před střetem.

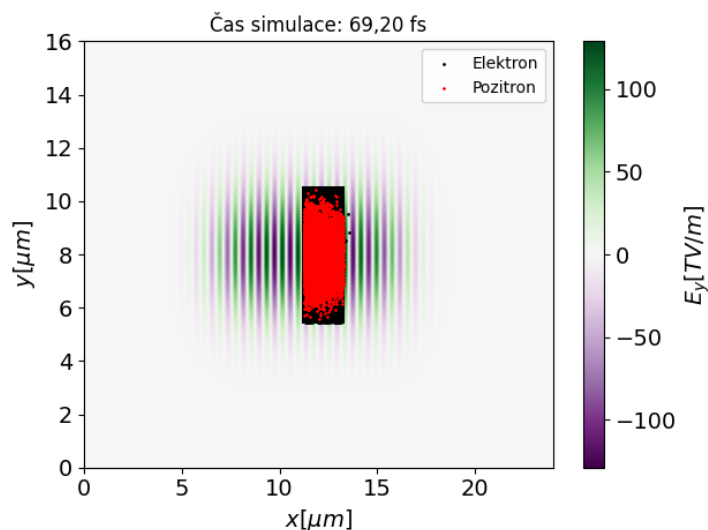
4 Závěr

Z výše uvedených výsledků předpokládáme, že s rostoucí počáteční energií elektronů vznikne více pozitronů s vyšším nábojem. Využití jednoho laserového systému pro urychlení elektronů a generaci elektron-pozitronových párů by značně zjednodušilo experiment. Prozatím nejvyšší urychlení elektronů laserem dosáhlo 8 GeV s použitím laseru BELLA

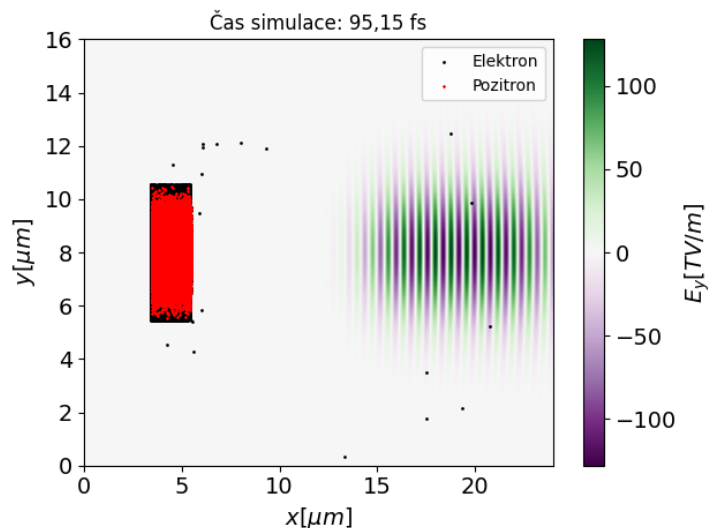
v Berkeley [6], co by podle našich simulací odpovídalo generaci 0,816 pC pozitronů. Při zvýšení této energie v blízké době by mohlo dojít ke produkci většího množství elektron-pozitronových párů při stejných parametrech laseru.

Poděkování

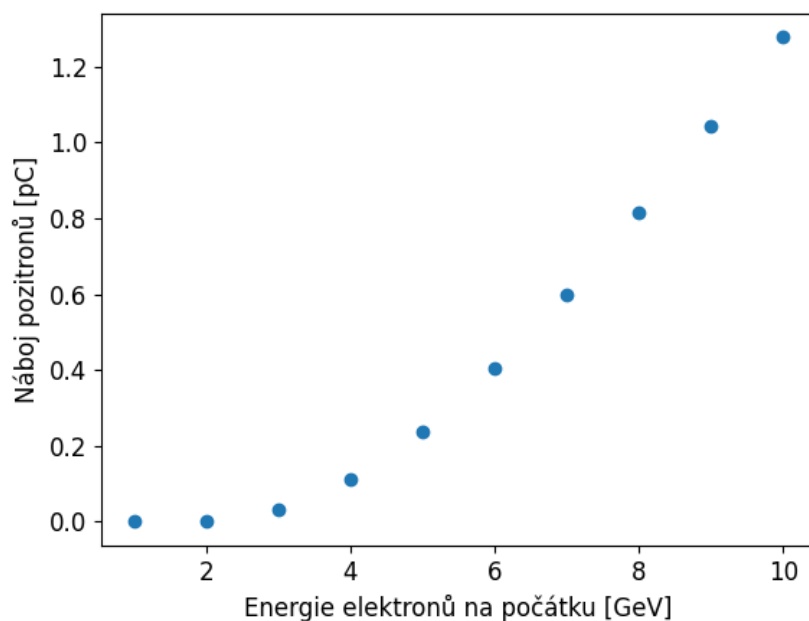
Děkujeme FJFI ČVUT v Praze a ÚFP AV ČR za možnost zpracovat tento miniprojekt v rámci Týdne vědy na Jaderce. Zvláště děkujeme Ing. Dominice Mašlárové za pomoc a vedení na tomto projektu. Tato práce byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky prostřednictvím e-INFRA CZ (ID:90254).



Obrázek 2: Simulace při střetu laseru a elektronového svazku.



Obrázek 3: Simulace po střetu a vytvoření elektron-pozitronových párů.



Obrázek 4: Závislost náboje pozitronů na počáteční energii elektronů

Reference

- [1] DIRAC, Paul Adrien Maurice. The quantum theory of the electron. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1928, 117.778: 610-624.
- [2] YOON, Jin Woo, et al. Realization of laser intensity over 10^{23} W/cm². Optica, 2021, 8.5: 630-635.
- [3] BREIT, Gregory; WHEELER, John A. Collision of two light quanta. Physical Review, 1934, 46.12: 1087.
- [4] BURKE, D. L., et al. Positron production in multiphoton light-by-light scattering. Physical Review Letters, 1997, 79.9: 1626.
- [5] DEROUILLAT, Julien, et al. Smilei: A collaborative, open-source, multi-purpose particle-in-cell code for plasma simulation. Computer Physics Communications, 2018, 222: 351-373.
- [6] TURNER, M., et al. Strong-field QED experiments using the BELLA PW laser dual beamlines. The European Physical Journal D, 2022, 76.11: 1-14.