

Jak přeměnit světlo na hmotu

K. Vlčková¹, A. Trnka², D. Krátký³, M. Kalda⁴

¹Gymnázium Luďka Pika, Plzeň; tyna.wolf2k4@gmail.com

²GYOA Pelhřimov; trnka.antoska@gmail.com

³Gymnázium Tanvald; 2018-kratky-daniel@gymtan.cz

⁴Gymnázium Tišnov; martin.kalda07@gmail.com

O. Garant, školitel; M. Jirka, FJFI ČVUT

Abstrakt:

V této práci popisujeme simulaci generace virtuálních elektron-pozitronových párů pomocí různě polarizovaných laserových záblesků, tedy přeměnu energie ve hmotu. Cílem je porovnat efektivitu lineární a radiální polarizace laseru, aby se zjistilo kterou metodu je vhodnější použít při experimentálním ověřování jevu. Ve výsledcích je vidět řádově vyšší účinnost radiální polarizace.

1. Úvod

Když si lidé představí slavný Einsteinův vztah $E = mc^2$, skoro všem se vybaví přeměna hmoty na energii (štěpení uranu, fúze vodíku, anihilace). Ovšem ne tolik lidí si představí přeměnu opačným směrem tedy energie neboli světla na hmotu. Tímto fenoménem se zabývali Gregory Breit a John A. Wheeler už v roce 1934, kdy předpověděli proces interakce fotonů za vzniku pozitronu a elektronu, ale nebylo možné rovnice vyřešit z důvodu velmi složité matematiky [1]. V posledních letech se pomocí superpočítačů podařilo výpočetně náročné rovnice vyřešit a numerickými metodami simulovat průběh budoucích experimentů. Tento jev by se v budoucnosti dal využít jako zdroj antičástic do experimentů studujících např. laboratorní astrofyziku.

2. Numerické simulace

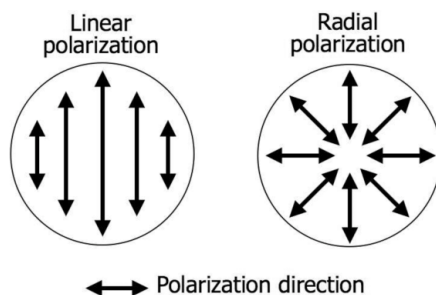
2.1 Modelovaný proces

První věc, kterou si musíme objasnit, je způsob přeměny energie na hmotu. Potřebujeme k tomu laser a elektron. Elektron, nacházející se v silném elektromagnetickém poli (dále jen EM pole), je urychlen a začne opisovat zakřivenou trajektorii, přičemž bude v intervalech vyzařovat fotony. Na tomto principu pracuje také synchrotron. Vyzářené fotony interagují s EM polem laseru a vznikají elektron-pozitronové páry Breit-Wheelerovým procesem. Vytvořený elektron a pozitron jsou dále urychleny EM polem laseru a znovu vyzařují další fotony, pomocí nichž se vytváří další

elektron-pozitronové páry - vzniká kaskádní generace elektron-pozitronových párů [2]. Tímto způsobem nám může vzniknout až 10^7 částic pouze z jednoho elektronu.

2.2 Typy polarizací

Tento princip jsme provedli dvěma způsoby, lišící se orientací (polarizací) elektrického pole. První způsob, zvaný lineární polarizace, má jednoduché elektrické pole, které míří směrem nahoru. Tato polarizace má jeden výrazný problém a to ten, že elektrony na které působí síla daná podle Lorentzovy rovnice se mohou dostat mimo pole působnosti laseru. Oproti tomu u radiální polarizace je zajištěno, že v době kdy je elektron potřeba bude na správném místě.

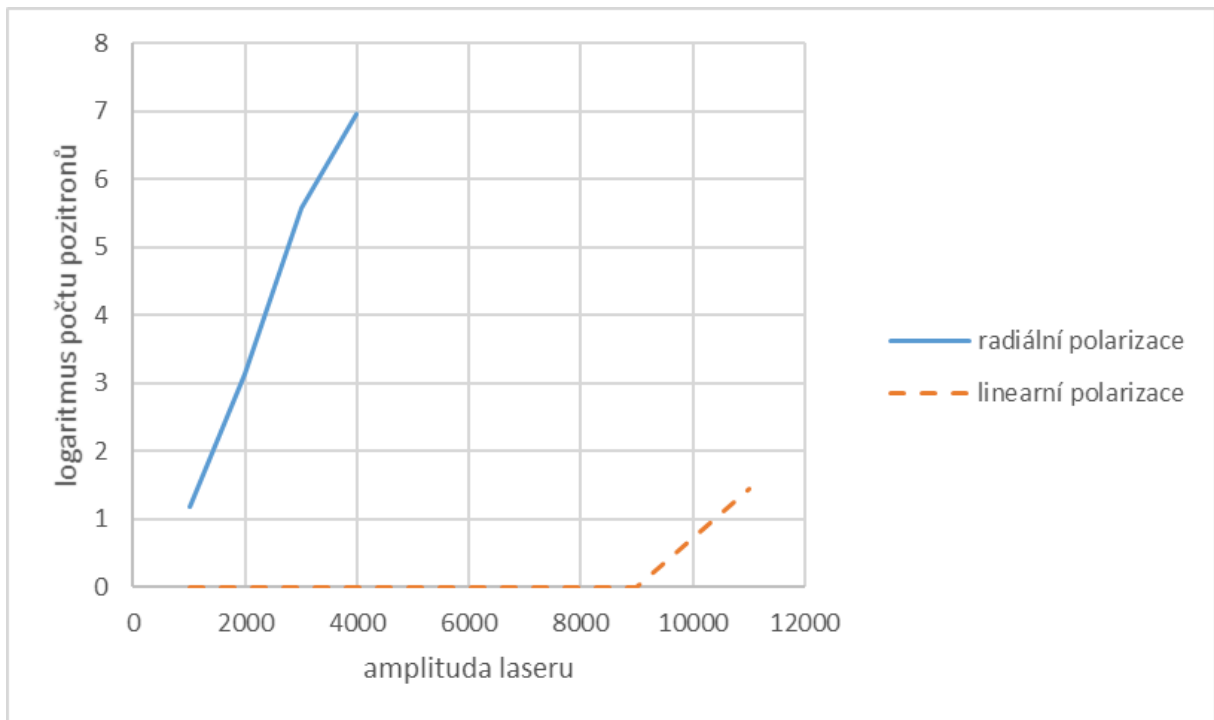


Lorentzova rovnice zní $\vec{F} = -q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} + G)$. Veličina G zahrnuje kvantové korekce v Lorentzově rovnici. Tato rovnice se nedá vypočítat ručně, a tak jsme poslali python program superpočítači v Ostravě (metacentrum.cz), který nám nasimuloval průběh tohoto experimentu. Zaslali jsme deset odlišných vstupních souborů, každý se lišil silou laseru (amplitudou), ale všechny simulované lasery byly silnější než současný nejsilnější laser na světě [3].

2.3 Výsledky

Amplituda laseru	Počet pozitronů v lineární polarizaci (LP)	Počet pozitronů v radiální polarizaci (RP)
1000	0	15
2000	0	1338
3000	0	337 337
4000	0	9 217 340
6000	0	ND
9000	0	ND
11000	28	ND

Tabulka popisuje počet vzniklých elektron-pozitronových párů v závislosti na metodě polarizace a amplitudě laseru. Pro hodnoty po amplitudě 4000 u radiální polarizace nemáme data, jelikož výsledky se zvedají exponenciálně a počítač, za nám přidělené dvě hodiny, nestihl dokončit simulaci. Vypočtené hodnoty jsou v logaritmickém měřítku zanesené v grafu.



2.4 Diskuse

Při vhodně zvolené (tj. radiální) polarizaci laserového záření je možné generovat řádově větší počet pozitronů oproti standardně používané lineární polarizaci. Kaskádní tvorby pozitronů je možné dosáhnout při intenzitě 10^{24} W/cm², přičemž světový rekord je 10^{23} W/cm² [3]. V případě lineární polarizace je potřebná intenzita 100x vyšší.

3. Shrnutí

Z provedených výpočtů vyplývá, že pro provedení experimentu přeměny světla na hmotu je zásadní polarizace použitého EM pole, to jest laseru.

Poděkování

Tímto bychom chtěli poděkovat Ing. Martinovi Jirkovi Ph.D. za odborné vedení. Také děkujeme organizátorům Týdne vědy na Jaderce za přípravu této skvělé akce.

Reference

- [1] G. Breit and J. A. Wheeler, Phys. Rev. 46, 1087 (1934)
- [2] T. G. Blackburn, Rev. Mod. Plasma Phys. 4, 5 (2020)
- [3] J. W. Yoon, Y. G. Kim, I. W. Choi, J. H. Sung, H. W. Lee, S. K. Lee, and C. H. Nam, Optica 8, 630 (2021)