



·惯性约束聚变物理与技术·综述·

激光-等离子体相互作用正电子发射研究进展*

蔡达峰¹, 王 剑¹, 谷渝秋², 郑志坚²

(1. 内江师范学院 物理与电子信息工程学院, 四川 内江 641112; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍了激光-等离子体相互作用产生正电子的相关实验和数值模拟研究进展。简要回顾了激光-等离子体相互作用正电子的发现过程及激光-等离子体作用产生正电子的三种物理机制; 详细地叙述了激光与物质相互作用产生正电子的两类典型实验方式(即直接方式和间接方式)及相关的实验和数值模拟结果; 对激光-等离子体相互作用产生正电子的研究进行了评述。从现有研究进展来看, 目前理论研究和实验研究所获结论差异较大, 还需要从激光设备、实验方案设计以及理论和模拟研究方面做大量细致的工作。

关键词: 激光-等离子体; 正电子产生; 量子电动力学效应

中图分类号: O434.12

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220189

Research evolution of the positron jet generated by intense laser interaction with the plasmas

Cai Dafeng¹, Wang Jian¹, Gu Yuqiu², Zheng Zhijian²

(1. College of Physics and Electronic Information Engineering, Neijiang Normal College, Neijiang 641112, China;

2. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The history and development about the study of positrons generated by intense laser interaction with the plasmas are introduced. The mechanisms of the positron generation are presented. Specially, the typical experiment scheme (direct and indirect) of the positron generation, including important results about the experiment and computer simulation are described systemically. Eventually, the study of positron is reviewed and summarized. At present, the conclusions obtained from theoretical research and experimental research are quite different, and a lot of detailed work needs to be done in terms of laser equipment, experimental scheme design, and theoretical and simulation research.

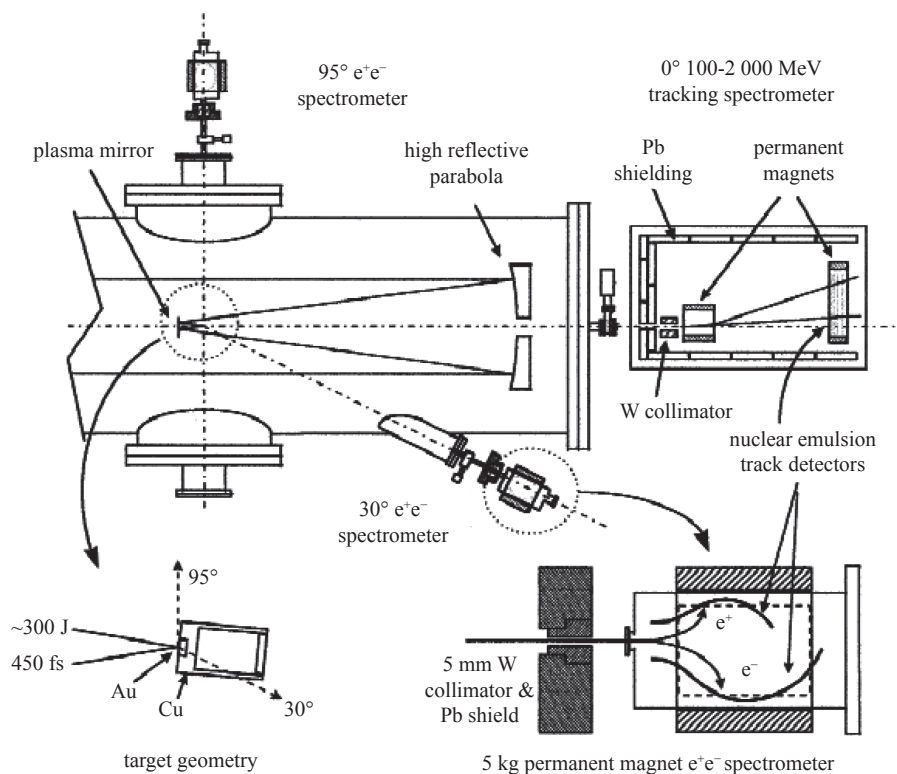
Key words: laser-plasmas, positron generation, quantum electrodynamics effect

正电子的存在首先是由 Dirac 根据量子力学作出的理论预言, 不久后 Anderson 等人通过云雾室实验在宇宙射线中发现了正电子, 这是反粒子存在的第一次直接证明^[1]。由于正电子在许多研究领域具有独特的地位, 例如 γ 射线暴研究、黑洞研究、实验室天体物理研究、反物质研究等; 同时正电子又具极广泛的应用前景, 例如正电子光谱学、等离子体物理学、材料检测等等, 因此科学家们对正电子的相关研究产生了极大的兴趣。传统上获取正电子的手段主要是由放射性同位素(如 ²²Na 或者 ¹⁸F)产生正电子或者在大型加速器中产生正电子。然而, 这些正电子的能量较低(MeV 以下), 数量有限, 尤其对于研究宇宙中许多高能物理现象远远不能满足。随着激光技术的迅速发展, 科学家提出了应用强激光与物质相互作用产生正电子的新方案, 这种方案可能提供大通量和高密度的正电子。本文简要回顾了激光-等离子体相互作用正电子的发现过程及激光-等离子体作用产生正电子的三种物理机制, 详细地叙述了激光与物质相互作用产生正电子的两类典型实验方式及相关的实验和数值模拟结果。在此基础上, 对激光-等离子体相互作用产生正电子的研究进行了评述。

1 早期实验证明

早期激光产生正电子的实验是 1999 年由 Cowan 等^[2]在利弗莫尔国家实验室(LLNL)首次利用拍瓦(Petawatt)激光与物质相互作用完成的。实验设置如图 1 所示, 一束能量为 280 J、脉宽为 450 fs、激光对比度 $1:10^{-1} \sim 1:10^{-4}$ 、

* 收稿日期: 2022-06-06; 修订日期: 2023-01-03
联系方式: 蔡达峰, dafeng_cai@aliyun.com。

Fig. 1 Experimental arrangement^[2]图1 实验设置^[2]

聚焦功率密度达到 3×10^{18} W/cm² 的强激光聚焦在金属靶上。靶由厚度 0.5 mm、直径 2 mm 的 Au 和厚度为 5 mm Cu 衬底构成。在与入射激光成 0° 的方向放置一台高能电子谱仪探测高能电子 (100~2000 MeV), 在与入射激光成 30° 方向和 95° 方向分别设置一台低能电子谱仪用于探测电子 (0.2~140 MeV) 和正电子 (0~40 MeV)。谱仪中采用核乳胶径迹探测器记录电子信号。

实验测量了高能电子能谱、光-中子反应和转化效率, 研究高能光子、类喷射 (Jet-like) 现象并观测到正电子的信号。在光子-中子反应和转化实验中, 通过 γ 射线能谱测量显示: ¹⁹⁶Au 和 ⁶²Cu、⁶⁴Cu 均发射了 β^+ 衰变, 且正电子湮灭 γ 射线曲线给出的 ⁶²Cu、⁶⁴Cu 衰变常数与它们的半衰期一致, 分别为 9.7 min 和 12.7 h。这意味着激光与固体靶相互作用产生了正电子。在正电子探测实验中, 由于实验条件下预测的正电子与电子产额的相对强度为 10^{-4} 量级, 能量在 5~10 MeV, 因此采用核乳胶径迹探测器探测能量低、产额少的正电子是非常困难的。实验采用三个标准确认正电子, 即径迹颗粒密度、入射角以及径迹横向位置。按照这个标准推算出正电子的能量在 3~9 MeV, 正电子与电子产额的相对强度为 10^{-4} , 这与预期的结果一致性很好。

2 物理机制以及实验和模拟研究

根据量子电动力学理论 (QED), 正电子产生主要有三种物理机制, 即 Bethe-Heitler (BH) 过程、Trident 过程以及 Breit-Wheeler (BW) 过程^[3]。BH 过程中, 首先是强激光与物质相互作用产生超热电子, 超热电子在靶内输运产生高能轫致辐射 (Bremsstrahlung) 光子, 其后高能轫致辐射光子与核相互作用产生电子-正电子对; 而 Trident 过程是强激光与物质相互作用产生的超热电子直接与核相互作用产生电子-正电子对^[4]。当强激光与固体靶相互作用时正负电子对的产生也可通过多光子 BW 过程, 但该过程通常要求激光功率密度大于 3×10^{23} W/cm²。目前实验室的激光设备还不能获得如此高的功率密度, 因此对于激光物质相互作用的 BW 过程产生正电子的研究多限于理论和数值模拟。本文重点介绍强激光与物质相互作用正电子产生 BH 过程和 Trident 过程典型的实验和模拟研究。

由于所采用的核乳胶径迹探测器本身的局限, 因此, Cowan 等的实验只是初步确认了正电子存在^[2]。之后, 各研究小组在不同的激光设备上, 采用不同的激光参数、不同的入射方式, 不同材料和不同形状的靶开展了一系列的实验和模拟研究^[4-13]。强激光与物质相互作用产生正电子主要有两种方式: (1) 激光与固体靶作用直接产生正电子^[2,5-6]; (2) 激光与气体靶作用通过尾场加速机制产生定向的高能电子, 高能电子再与转化靶作用间接产生正电子^[4,8,11-12]。

首先介绍激光与固体靶作用直接产生正电子的典型实验。Chen Hui 等^[5]采用超强皮秒激光与金靶相互作用,

以直接产生方式获得了相对论正电子, 实验设置如图 2 所示。

让一束 S 极化激光入射在靶上产生正电子。激光参数为: 激光能量 120~250 J, 脉宽 0.7~10 ps, 波长 1054 nm, 对比度小于 $1:10^{-5}$, 峰值功率密度达 $(3 \times 10^{19} \sim 2 \times 10^{20}) \text{ W/cm}^2$ 。两个经绝对标定的谱仪(能量范围 0.1~100 MeV, 分辨率 10~100)分别放置在靶前(与靶法线成 77°)和靶后(与靶法线成 28°)探测电子和正电子。靶分别采用 Au, Ta, Ti, Cu 和 Al。

实验结果如图 3 所示, 其中红色曲线为前置正电子谱仪测试结果, 蓝色曲线为后置正电子谱仪测试结果。实验发现, 只有厚度超过 250 μm 的高 Z 靶(Au, Ta)才有正电子产生; 而采用低 Z 靶(Cu, Al)时没有探测到正电子。靶前后的正电子能谱显示, 正电子产额分别为 $2 \times 10^9/\text{sr}$ 和 $1.6 \times 10^{10}/\text{sr}$; 峰值位于约为 6 MeV 处; 有效温度均为 $(2.8 \pm 0.3) \text{ MeV}$ (大约为电子有效温度的一半); 估算的正电子密度约为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。角分布测量显示, 正电子发射呈强烈的各向异性。理论分析和数值模拟证明, 正电子主要是由 BH 过程产生。

其后, Chen Hui 等改进了实验获得了相对论准单能的正电子发射^[6]。实验设置如图 4 所示, 采用脉宽 1~10 ps, 波长 1054 nm, 能量从 100~850 J 的激光聚焦成直径为 8~50 μm 的焦斑, 其峰值功率密度达 $1 \times 10^{19} \sim 5 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$, 以与靶法线成 18° 辐照在靶前表面, 而另一束长脉冲(3 ns)激光提前 2 ns 辐照在靶背面(目的是建立靶背鞘电场以加速正电子)。所用的靶为 1 mm 厚, 直径为 1~20 mm 的金靶。采用 3 个经绝对标定的 EPPS(电子、正电子、质子谱仪)设置在不同的角度同时探测它们的能谱和角分布, 如图 5 及图 6 所示。图 6 中, EPPS 是电子正电子谱仪; RCF 是辐射变色膜片; EGS 是软件; fit 是拟合曲线。

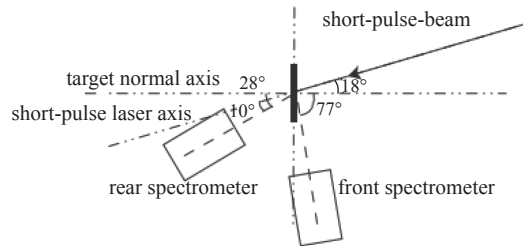


Fig. 2 Experimental setup (direct). The locations of two spectrometers relative to the lasers and target are marked^[5]

图 2 实验设置示意图(直接方式)^[5]

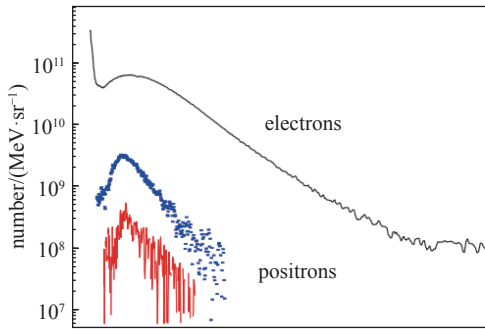


Fig. 3 Energy spectra of electrons and positrons^[5]

图 3 电子和正电子能谱^[5]

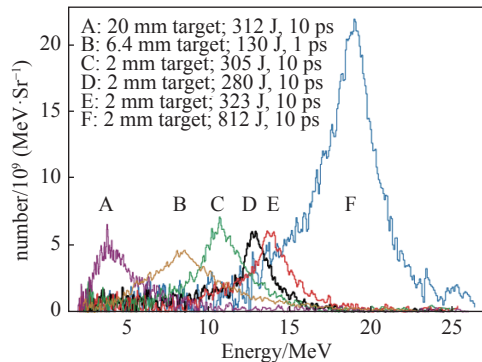


Fig. 5 Positron energy distributions beled from A to F. Experimental setup^[6]

图 5 正电子能量分布^[6]

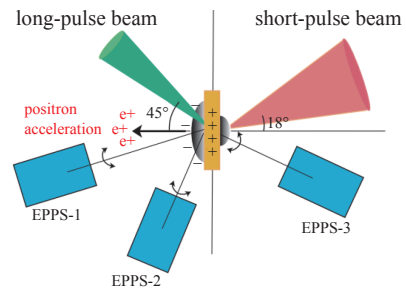


Fig. 4 Experimental setup (direct)^[6]

图 4 实验设置(直接方式)^[6]

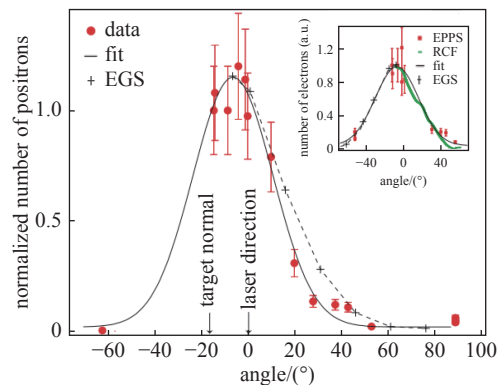


Fig. 6 Positron angles distributions^[6]

图 6 正电子角分布^[6]

实验结果显示: 激光-正电子能量转换效率约为 2×10^{-4} ; 正电子发射具有大约 20° 发散角; 正电子能谱是准单能的, 能量在 4~20 MeV 之间; 且有效温度约为 1 MeV。同时研究显示, 靶面鞘电场决定了正电子能谱, 通过改变激光条件和靶形状可以控制正电子角分布和能量分布。为了提高正电子的能量和产额, Chen Hui 等^[10] 在 3 种不同激光装置上(Titan, Orion 和 Omega EP)获得正电子。实验结果显示, 获得的正电子产额是文献 [6] 的 30 倍, 并且给出

了正电子产额与入射激光能量的定标关系 ($\sim E_L^2$)。

Gahn 等人进行了高能电子再与转化靶作用间接产生正电子的典型实验。他们采用飞秒激光与气体靶相互作用产生超热电子,加速的超热电子再与高 Z 固体靶作用,间接产生正电子,实验设置如图 7 所示^[4]。激光参数为:激光能量 220 mJ,脉宽 130 fs,波长 790 nm,重复频率 10 Hz。首先,激光聚焦在氦气喷射靶上产生相对论自聚焦形成等离子体通道并直接加速电子到达几个 MeV;然后加速的高能电子与高 Z 转换靶(2 mm 铅)作用,通过 BH 过程和 Trident 过程产生正电子,产生的正电子经磁场($B \approx 150$ mT)偏转后由闪烁体记录。

根据实验,他们给出了高能电子的能谱以及推断的正电子能谱,如图 8 所示^[4]。能谱显示,高能电子能谱呈类麦克斯韦分布,与文献 [6] 中的准单能分布不同。其有效温度 T_{eff} 约 2.7 MeV;而推算平均能量为 2 MeV 的正电子产额约为每激光脉冲 10^7 ,对应的平均强度为 2×10^8 Bq。

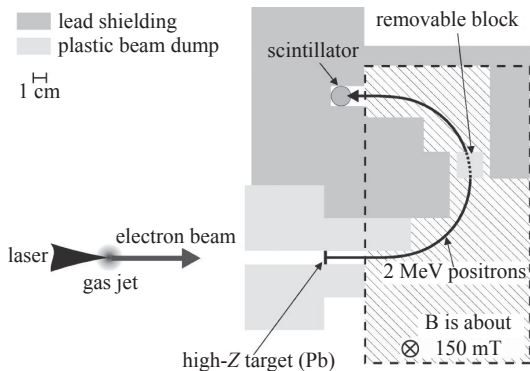


Fig. 7 Experimental setup (indirect)^[4]

图 7 实验设置(间接方式)^[4]

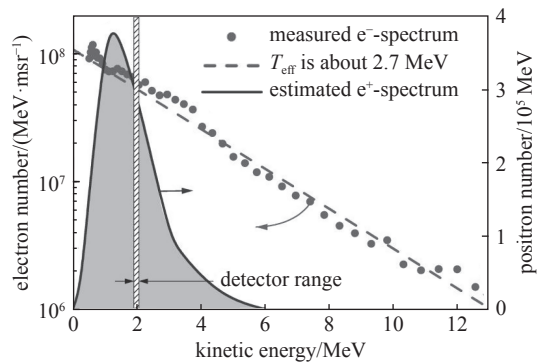


Fig. 8 Electron and positron energy distributions^[4]

图 8 电子和正电子能谱^[4]

Sarri 等^[8]对上面的实验进行了部分改进,实验设置如图 9 所示。一束能量为 0.8 J,脉宽 30 fs,波长 $0.8 \mu\text{m}$ 的激光,由一个 f 数为 $f/20$ 的离轴抛物面镜聚焦在 3 mm 宽的超声 He 气喷射上,激光焦斑半径约 $23 \mu\text{m}$,激光峰值功率密度达 $6 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 。如果完全电离化,对应产生的超热电子的密度可达 $9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。这些被加速的超热电子首先穿过 1 cm 的塑料(减少噪声信号)然后与数毫米厚的高 Z 固体靶(Cu, Sn, Ta, Pb)相互作用产生正电子。电子和正电子经磁场偏转后分别由 LANEX 屏和 IP 板记录。图 9(b)为成像板记录的来自 4.2 mm Ta 靶典型的正电子信号。

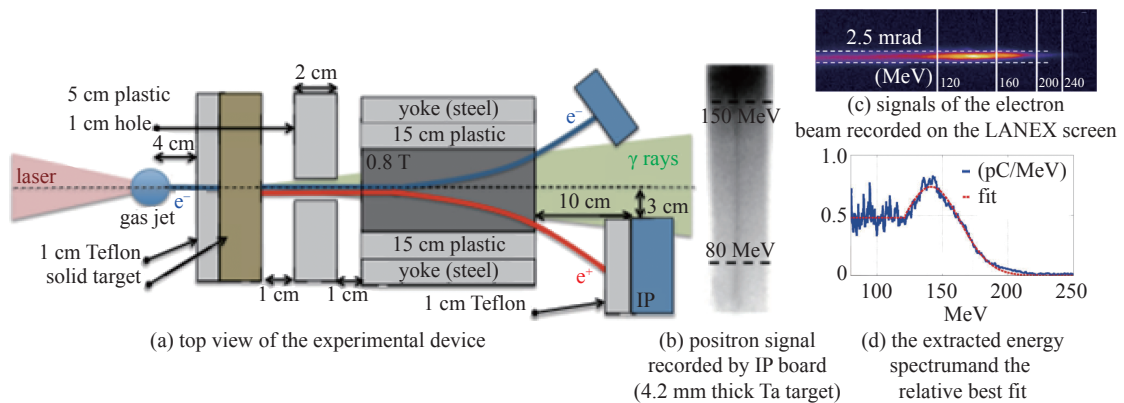


Fig. 9 Scheme figure of the experiment^[8]

图 9 实验原理图^[8]

在这样实验条件下,研究小组认为正电子主要是由 Trident 过程 BH 过程产生的。他们通过实验和模拟给出了正电子的能谱,如图 10。对于 Cu(靶厚度 5.3 mm),Sn(靶厚度 6.4 mm),Ta(靶厚度 2.8mm)和 Pb(靶厚度 4.1 mm)靶实验结果与模拟的能谱很好地一致。实验和模拟给出的正电子(能量 90-120 MeV)产额为 10^5 ,估算的正电子密度约为 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,而电子密度大约为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。

Williams 等^[11]利用激光-尾流场电子源研究正电子,其实验方式与激光与气体靶作用产生高能电子,高能电子再与转化靶作用间接产生正电子的方式相似,只是气体靶被一个氦气包(Cell)所代替。模拟显示产生了约 10^7 数量级的正电子,但实验中并没有观测到正电子,其原因可能在于正电子信号低于噪声。

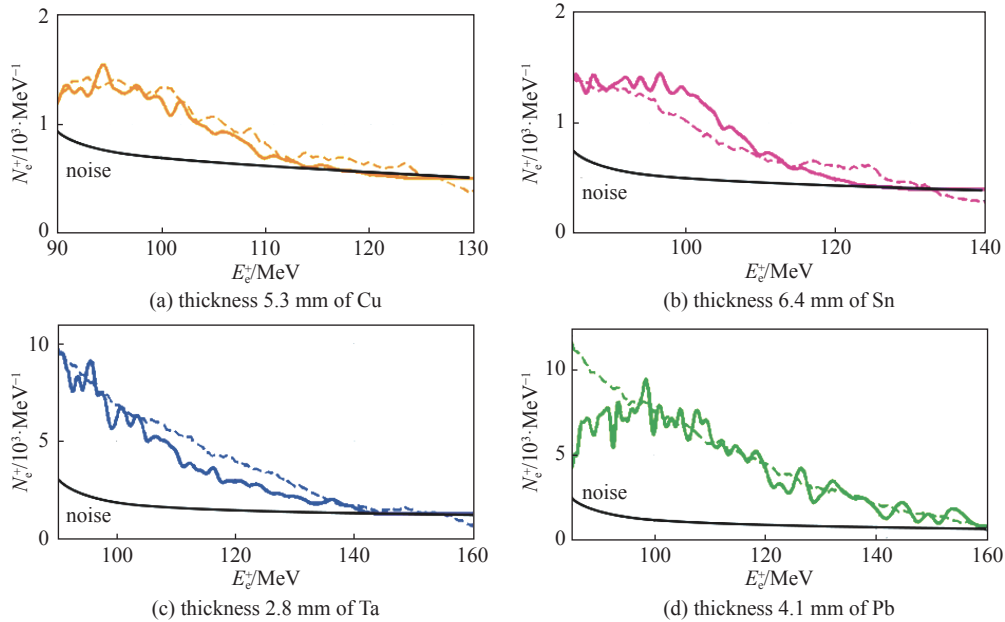


Fig. 10 Experimental (solid lines) and simulated (dashed lines) positron spectra^[8]

图 10 实验和模拟的正电子能谱^[8]

2016年, Xu Tongjun 等^[12] 仍然采用激光与气体靶作用产生高能电子, 高能电子再与转化靶作用间接产生正电子的方式获得了很好的实验结果。他们获得了超短脉冲(约 45 fs)MeV 量级的正电子束, 这些正电子密度达到 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 峰值强度达到 $7.8 \times 10^{21} \text{ s}^{-1}$ 。

Yan Yonghong 等^[7] 采用 2D PIC 和 Monte Carlo 模拟研究了超强飞秒激光通过直接方式和间接方式产生正电子的特性。物理模型如图 11 所示, 直接产生方式是: 激光直接辐照高 Z 固体靶, 在靶前由 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$, 共振吸收或真空加热机制产生大量超热电子, 这些超热电子输运进入靶, 经 BH 过程和 Trident 过程产生正电子。间接产生方式是: 激光首先经过一个次密等离子体(一个气体喷射)通过尾场加速机制产生定向的高能电子, 然后被加速电子打击一个转换靶, 最后在转换靶中产生正电子。

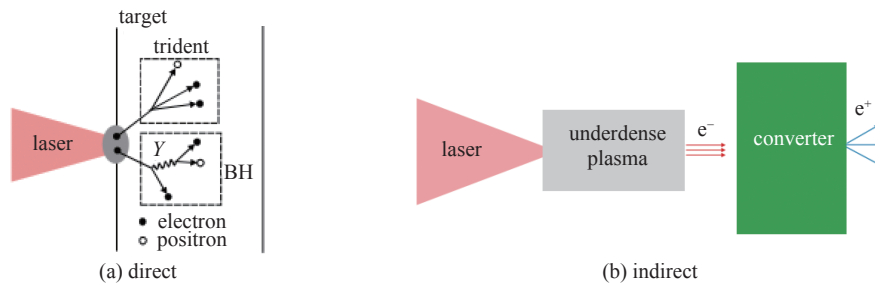


Fig. 11 Illustration of two laser-positron generation schemes^[7]

图 11 激光产生正电子的两种方案示意图^[7]

在直接产生方式中采用 MC 程序, 模拟的激光参数为: 能量 7.5 J, 脉宽 30 fs, 焦斑 $9 \mu\text{m}$, 峰值功率密度 $2 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$; 在间接产生方式中采用 PIC 程序, 激光焦斑 $15 \mu\text{m}$, 规格化矢势 $a_0 = 5.5$, 次密等离子体密度 $n_e = 6.9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 等离子体长度 $L = 0.96 \text{ mm}$ 。两种情况均采用 Au 靶。

Yan Yonghong 等的模拟显示^[7]: (1)间接方式的正电子产额(10^{10})高于直接方式的产额(10^9); (2)间接方式的正电子能谱的有效温度(28.8 MeV)大于直接方式的有效温度(4.4 MeV); (3)间接方式的正电子束的脉宽(5 ps)小于直接方式的脉宽(40 ps); (4)间接方式的正电子束的发散角(8°)小于直接方式的发散角(60°); (5)直接方式产生的正电子可以具有较好的准单能性。不过, 尽管模拟显示间接方式产生的正电子的特性优于直接方式, 也还没有实验的直接证实。

2017年, Liu Jianxun 等^[3] 提出采用两个相继的激光脉冲辐照铝靶产生正电子的新方案, 该方案产生正电子的物理机制是多光子 BW 过程。采用 2 维和 3 维 PIC 模拟显示, 该方案可以降低所要求的激光峰值强度, 同时提高正电子产额一个量级达 3.7894×10^7 , 在最佳条件下正电子最大密度可达 $3.134 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 。与此相似, Yu Jinqing 等^[13] 提

出采用激光脉冲驱动光子-光子碰撞产生正负电子对。这种方案产生正电子的物理机制是双光子 BW 过程, 理论计算显示, 每发激光脉冲可产生 3.2×10^8 个正负电子对, 它们具有较小的发散角 (7°), 且信噪比大于 10^3 。但是要通过 BW 过程产生正电子仍然需要激光峰值功率密度达到 10^{23} W/cm^2 。

无论是直接方式还是间接方式, 产生正电子的主要物理机制均是 BH 过程和 Trident 过程, 而 BW 过程通常要求激光功率密度很高, 目前激光设备还不能达到, 因此国内 BW 过程产生正电子的研究多限于理论和数值模拟, 实验研究目前还未见有公开的报道。例如, 闫永红等^[14]采用 Monte Carlo 程序 Geant4 对激光固体靶相互作用正电子产生进行了研究; 冯磊等^[15]为提高正电子的产额, 提出了基于激光尾波场电子轰击多层靶的方案, 并获得较好的模拟结果; Xu Zhangli 等^[16]基于间接方式产生正电子方案提出了加速正电子到 GeV 的新方案, 该方案包括 3 个阶段: 首先利用激光与气体相互作用, 通过尾波场加速获得高能电子, 其次高能电子与铜靶相互作用通过 BH 机制获得正电子, 最后阶段对正电子进行加速。模拟结果显示: 加速的正电子具有准单能特征, 中心能量约 500 MeV。

3 结 论

从现有研究进展来看, 实验和模拟所获正电子的物理特性仍具有较大的差异。同时, 由于各研究小组采用的激光设备不同, 所用的激光参数、入射方式、靶材料和形状也不同, 获得的正电子产额及密度也差异极大, 有些实验甚至没有观测到正电子信号。目前的研究还需要从激光设备、实验方案设计以及理论和模拟研究方面做大量细致的工作。

参考文献:

- [1] 苑红霞. 正电子的预言与发现[J]. *大学物理*, 2002, 21(2): 34-36. (Yuan Hongxia. The prediction and discovery positron[J]. *Coll Phys*, 2002, 21(2): 34-36)
- [2] Cowan T E, Perry M D, Key M H, et al. High energy electrons, nuclear phenomena and heating in petawatt laser-solid experiments[J]. *Laser Part Beams*, 1999, 17(4): 773-783.
- [3] Liu Jianxun, Gan Longfei, Ma Yanyun, et al. Positron generation via two sequent laser pulses irradiating a solid aluminum target[J]. *Phys Plasmas*, 2017, 24: 083113.
- [4] Gahn C, Tsakiris G D, Pretzler G, et al. Generating positrons with femtosecond-laser pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 2000, 77(17): 2662-2664.
- [5] Chen Hui, Wilks S C, Bonlie J D, et al. Relativistic positron creation using ultraintense short pulse lasers[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 105001.
- [6] Chen Hui, Wilks S C, Meyerhofer D D, et al. Relativistic quasimonoenergetic positron jets from intense laser-solid interactions[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 015003.
- [7] Yan Yonghong, Zhang Bo, Wu Yuchi, et al. Comparison of direct and indirect positron-generation by an ultra-intense femtosecond laser[J]. *Phys Plasmas*, 2013, 20: 103114.
- [8] Sarri G, Schumaker W, Di Piazza A, et al. Table-top laser-based source of femtosecond, collimated, ultrarelativistic positron beams[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 255002.
- [9] Yan Yonghong, Dong Kegong, Wu Yuchi, et al. Numerical simulation study of positron production by intense laser-accelerated electrons[J]. *Phys Plasmas*, 2013, 20: 103106.
- [10] Chen Hui, Fiuzu F, Link A, et al. Scaling the yield of laser-driven electron-positron jets to laboratory astrophysical applications[J]. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 215001.
- [11] Williams G J, Pollock B B, Albert F, et al. Positron generation using laser-wakefield electron sources[J]. *Phys Plasmas*, 2015, 22: 093115.
- [12] Xu Tongjun, Shen Baifei, Xu Jiancai, et al. Ultrashort mega-electronvolt positron beam generation based on laser-accelerated electrons[J]. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 033109.
- [13] Yu Jinqing, Lu Haiyang, Takahashi T, et al. Creation of electron-positron pairs in photon-photon collisions driven by 10-PW laser pulses[J]. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 014802.
- [14] 闫永宏, 吴玉迟, 董克攻, 等. 激光固体靶相互作用产生正电子的模拟研究[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 112006. (Yan Yonghong, Wu Yuchi, Dong Kegong, et al. Simulation study of positron production from laser-solid interactions[J]. *High Power Laser Part Beams*, 2015, 27: 112006)
- [15] 冯磊, 马燕云, 赵子甲, 等. 激光尾波场电子轰击多层靶的正电子产额模拟计算[J]. *现代应用物理*, 2019, 10: 040201. (Feng Lei, Ma Yanyun, Zhao Zijia, et al. Simulation of positron yield increased by the interaction of laser wakefield electrons with multi-layer targets[J]. *Mod Appl Phys*, 2019, 10: 040201)
- [16] Xu Zhangli, Yi Longqing, Shen Baifei, et al. Driving positron beam acceleration with coherent transition radiation[J]. *Commun Phys*, 2020, 3: 191.