

正负电子谱仪屏蔽方案的模拟优化设计

江小丹 徐妙华 李英骏

(中国矿业大学(北京)理学院, 北京 100083)

摘要 超短超强激光通过尾波场加速产生的高能负电子束与金属靶相互作用可以获得高能正电子束。实验和计算均表明当高能负电子与较厚的靶相互作用时,产生的正负电子和X射线强度强、发散角大。针对这种情况,为了准确测量能谱,谱仪前方必须使用准直孔,让混合束通过准直孔后再进入大间隙的磁场区域内进行偏转和探测。应用FLUKA程序模拟表明,通过在谱仪外部添加准直孔,谱仪内部添加塑料(以下简称CH)屏蔽片的方式,可以实现谱仪能量分辨率的提高和对噪声的有效抑制,从而实现在混合场中对正电子束能谱进行更准确的诊断。

关键词 正负电子谱仪; FLUKA; 超短超强激光; 正负电子

SIMULATION AND OPTIMIZATION DESIGN OF SHIELDING SCHEME FOR ELECTRON POSITRON AND ELECTRON POSITRON SPECTROMETER

JIANG Xiaodan XU Miaohua LI Yingjun

(China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083)

Abstract High energy electrons beams generated in the laser wake field acceleration process can be used to produce energetic positrons by interacting with the high Z targets. Both experiments and calculations show that when the high-energy negative electron interacts with the thicker target, the positive electron and negative electron and the X-ray produced have strong intensity and large divergence Angle. In this case, in order to accurately measure the energy spectrum, a collimation hole must be used in the front of the spectrometer to let the mixed beam pass through the collimating hole and then enter the magnetic field area with large gap for deflection and detection. Through the FLUKA code, the simulations shown that the energy resolution of the spectrometer can be improved and the noise can be effectively suppressed by adding collimation hole outside the spectrometer and a plastic (hereinafter referred to as CH) shield inside the spectrometer, so as to achieve more accurate diagnosis of positron-beam energy spectrum in the mixed field.

Key words positron electron spectrometer; FLUKA; ultra-short ultra-intense laser; positron-electron

收稿日期: 2021-12-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(批准号:2021YQLX09);大学生创新创业训练计划项目(批准号:202107002)。

作者简介: 江小丹,女,硕士,实验师,从事激光等离子体物理研究,201818@cumt.edu.cn;李英骏,男,博士,教授,从事激光等离子体物理研究,lyj@aphy.iphy.ac.cn。

通讯作者: 徐妙华,女,博士,副教授,从事激光等离子体物理研究,mhxxu@aphy.iphy.ac.cn。

引文格式: 江小丹,徐妙华,李英骏. 正负电子谱仪屏蔽方案的模拟优化设计[J]. 物理与工程,2023,33(1):134-142.

Cite this article: JIANG X D, XU M H, LI Y J. Simulation and optimization design of shielding scheme for electron positron and electron positron spectrometer[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(1): 134-142. (in Chinese)

超短超强激光通过间接过程可以产生高能正电子束。为了开展超短超强激光正-负电子对产生的实验研究,需要对正-负电子束的能谱进行高分辨的测量。本文基于尾波场加速得到的高能负电子束与厚靶相互作用获得正电子束的过程,设计并优化了正负电子谱仪,应用 FLUKA 程序对谱仪的能量分辨和噪声进行了细致的模拟。为了给实验提供更准确的参考,本文在模拟中采用的人射电子源基本参数是基于中科院物理所激光装置上所获得的高能电子束。此外,由于大尺寸磁谱仪在实验应用上受到空间上的诸多限制,本文将针对横向尺寸为 $8\text{cm} \times 8\text{cm}$ 的小尺寸谱仪开展优化模拟。通过细致的 FLUKA 模拟,可以为实验中谱仪的屏蔽优化设计方案提供一定参考。

1.1 FLUKA 程序简介

FLUKA 是用于计算粒子输运和粒子与物质相互作用的通用工具,涵盖的问题从质子和电子加速器屏蔽到靶标设计、量热、激活、剂量测定、探测器设计、加速器驱动系统、宇宙射线、中微子物理学、放射治疗等。它可以高精度地模拟大约 60 种不同粒子的相互作用和传播过程,包括光子、电子、离子、中子、中微子、任何能量的 μ 子及能量高达 20TeV 的强子。

本文的主要目的是对高能负电子束与厚靶相互作用产生的正负电子束以及 X 射线的性质进行计算,并基于上述结果对处于正负电子和 X 射线的混合辐射场中的正负电子谱仪的屏蔽方案进行优化模拟。其中关注的物理过程主要涉及到负电子与靶相互作用产生正电子的过程、光子、电子的联合输运问题、光子和原子核的光核反应、以及正负电子产生等过程。FLUKA 程序中对上述物理过程有着全面的涵盖,并且其光子、电子的能量跨度较广,因此可以较好的对上述问题进行计算,从而为实验中谱仪的设计方案提供指导。

1.2 厚靶情况下正负电子谱仪屏蔽方案的优化设计

1.2.1 负电子与厚靶相互作用后的正负电子和 X 射线辐射源

应用 FLUKA 程序,对高能电子束与固体厚靶相互作用产生的正电子束、透射的负电子束、以及伴随产生的 X 射线辐射源的特征进行了详细模拟计算。

在 FLUKA 输入文件中,采用的人射电子源基本参照中科院物理所激光装置上所获得的高能

电子束的基本参数。设置入射电子能量为 100MeV ,发散角为 6mrad ,垂直入射到厚度为 1cm 厚的钽靶上。利用 FLUKA 中的 USRBIN 选项卡对靶后 0.1cm 的位置处的负电子、正电子以及 X 射线的空间分布进行统计和输出,如图 1 (a)、(b)、(c) 所示。从数量上看,X 射线的产额要显著大于负电子束和正电子束的产额。

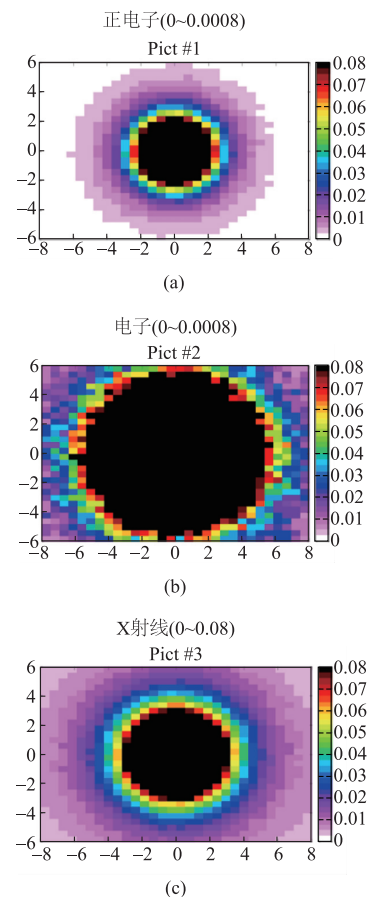


图 1 靶后 0.1cm 位置处的 (a) 正电子束空间分布; (b) 电子束空间分布; (c) X 射线空间分布

此外,利用 FLUKA 中的 USRBDX 选项对出射的负电子、正电子和 X 射线的角分布进行了统计和输出,如图 2 所示。

从上述的角分布图中可以看出,通过间接过程产生正电子的过程中,即使入射的高能负电子准直性很好(仅为 6mrad)、能量较大,在与较厚的靶相互作用中,产生韧致辐射 X 射线的发散角(半高全宽)是较大的,约为 10 度左右。而正负电子在厚靶中输运过程中由于多次库仑散射等过程发散角更大,约为 19 度和 22.5 度左右。图 3 我们给出了这一情况下不同发散角(单位:度)处的正负电子和 X 射线的能谱分布。

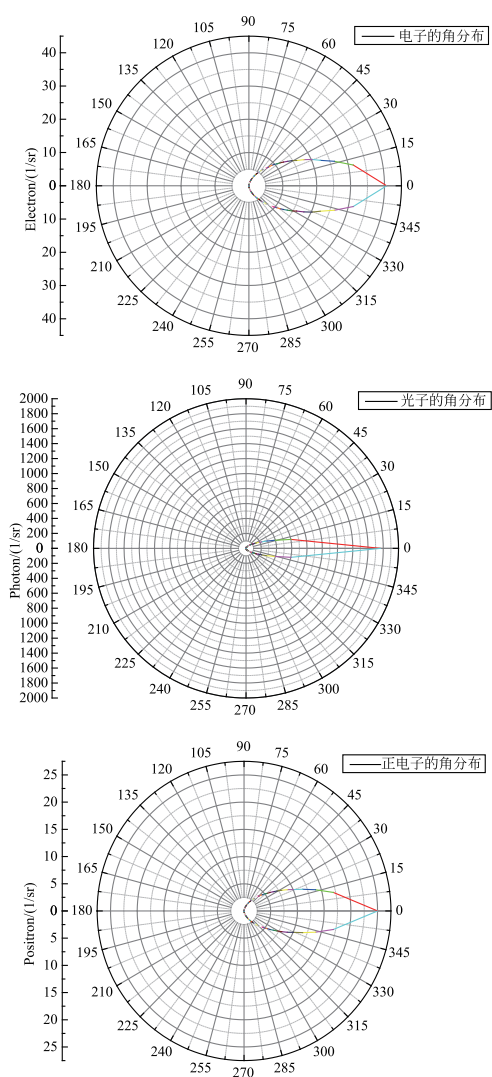


图2 入射单能电子束的能量为100MeV, 钨靶厚1cm对应电子束、正电子束和X射线角分布

从能谱分布图中可以看出,不同角度上正负电子和X射线辐射的能量和温度随着发散角的增大同样呈现减小的趋势。从负电子来看,透射负电子的强度与薄靶情况相差不大,能量有所降低,但是其发散角相对于薄靶情况显著增大。需要特别指出的是:靶后产生的韧致辐射X射线的强度相对于薄靶来说发生了显著增强,峰值强度(在入射电子方向上)增大了1倍,而在发散角为30度的方向上X射线强度变为薄靶的20倍左右。上述大发散角的负电子和X射线噪声均强于正电子信号的强度,这为谱仪外部屏蔽提出了很高的要求。

本文将主要从谱仪外部屏蔽和准直、内部屏蔽两方面对正负电子和X射线源的辐射特征进行辐射屏蔽方案的设计。

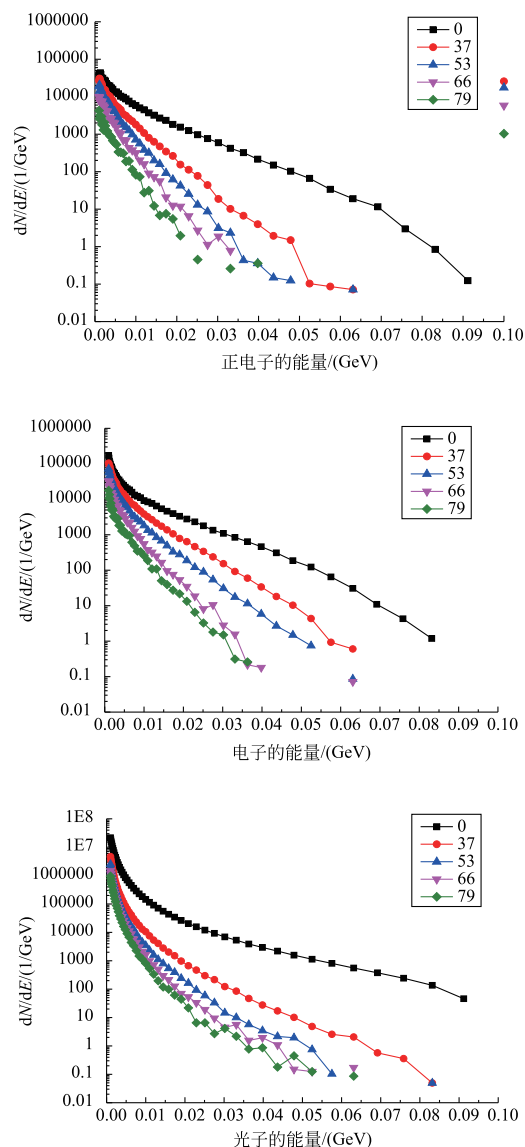


图3 不同角度下电子、正电子和X射线的能谱分布 (入射单能电子束的能量为100MeV,钨靶厚1cm)

1.2.2 谱仪外部的屏蔽和准直系统优化

从模拟结果可知,高能负电子与较厚的金属靶相互作用时,产生的正电子束发散角较大。因此,在谱仪设计中,必须对进入磁场区域的正电子束进行准直。

铅材料在各种屏蔽方案都是必不可少的组成部分,这主要是因为其对各种粒子和光子都具有较强的屏蔽能力。图4给出了不同能量电子在铅块中的平均射程曲线。而图5给出了不同能量光子在铅块中的平均射程曲线。

从图4和图5中可以看出,不同能量的电子、光子在铅块中的平均射程不同。对于能量在100MeV左右的电子来说,其平均射程约为2cm。

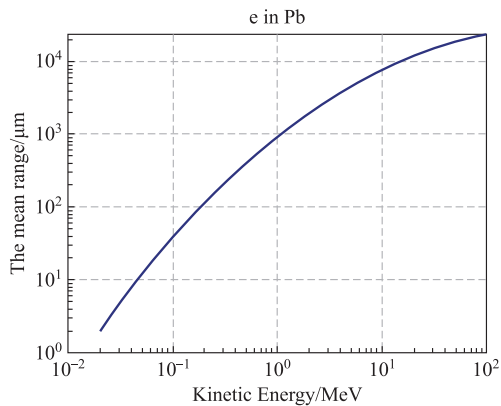


图4 不同能量的电子在铅块中的平均射程

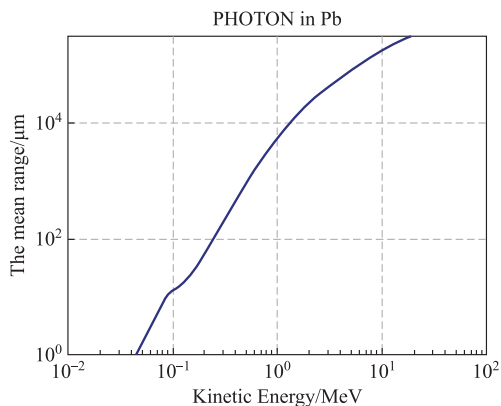


图5 不同能量的光子在铅块中的平均射程

根据 X 射线在铅材料中的衰减系数数据,可以对高能 X 射线的衰减进行估算。结果表明,即使对于能量仅为 20MeV 的 X 射线来说,要使其强度衰减为原来的 10%,需采用超过 3cm 的铅;若要实现强度衰减至 1%,则需采用超过 6cm 的铅。为了更有效的屏蔽更高能量的 X 射线,则需采用更厚的铅进行屏蔽。然而,实验中还需同时考虑到仪器重量体积以及占据的探测立体角等的限制,因此谱仪前的屏蔽材料的选择和厚度必须进行合理的设计和选择。

应用 FLUKA 进行了一系列模拟,计算不同厚度的铅块对上述混合辐射场的屏蔽效果。在输入文件中,将能量为 100MeV、发散角为 6mrad 的单能负电子入射到厚度 1cm 的钽靶上,用于产生与实验中相似的辐射环境。谱仪的横向尺寸仍为 8cm×8cm,磁极间隙为 2.6cm。谱仪前屏蔽铅层的厚度从 1cm 依次增大到 10cm,在铅块的中心留出了半径为 0.3cm 的准直孔,如图 6 所示。图 7 给出了不同位置处的负电子、X 射线和正电子信号的空间分布。

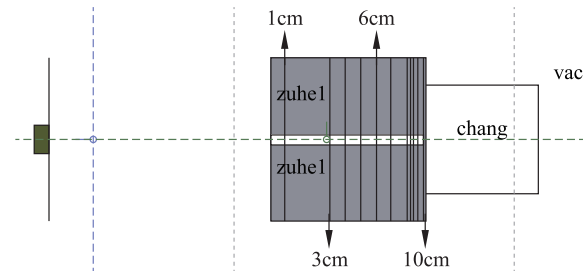


图6 FLUKA 程序中计算不同厚度的铅块对混合辐射场的屏蔽作用

从图 7(a)中可以看出,随着铅块厚度的增加,对入射孔周围的电子的屏蔽能力逐渐增强。当铅块 6cm 厚时入射孔周围的电子信号得到了很好的抑制,电子分布的区域和能量基本集中在准直孔区域。而从图 7(b)的 X 射线空间分布来看,尽管对于光子来说,铅块对 X 射线强度起到了一定的削弱作用,但是 X 射线分布仍然较为弥散。

为了更加准确的分析电子和 X 射线噪声在铅块中的运输过程,在 FLUKA 程序中设置了 5 个 USRBDX 选项卡,分别对不同界面处,能量范围为 0MeV-100MeV 的电子以及光子噪声的能谱分布进行了统计,得到不同界面处电子、光子噪声的能谱分布如图 8(a)、(b)所示。

通过对噪声能谱的详细分析,可以发现:当铅块厚度达到 6cm 时,低能端电子噪声削弱为原来的 1/100 左右,而高能端电子噪声衰减为原来的 1/100 左右。然而,对于图 8(b)中的 X 射线来说,低能端光子噪声强度仅衰减为原来的 1/7 左右;而高能端光子噪声信号衰减为原来的约 1/100。当铅块达到 10cm 时,低能端电子削弱为原来的 1/14,而高能端电子噪声衰减为原来的 1/10000 左右。然而,对于(b)中的 X 射线来说,低能端光子噪声强度仅衰减为原来的 1/2 左右;而高能端光子噪声信号衰减为原来的约 1/100。综上,可以初步断定在目前的辐射环境下,6cm 和 10cm 铅块对于电子的屏蔽效果较好,对 X 射线的屏蔽效果需要进一步改善,如何加强对 X 射线的屏蔽是谱仪外部设计的重点。

模拟接着将铅块厚度增加到 20cm,入射孔设计为圆台结构,前表面小孔的半径 $R_{\min} = 0.1\text{cm}$,后表面小孔的半径 $R_{\max} = 1\text{cm}$,如图 9 所示。谱仪间隙 2.6cm,得到进入准直孔(信号)和通过 20cm 厚准直孔(噪声)的电子、正电子和光子对比图,如图 10 所示。

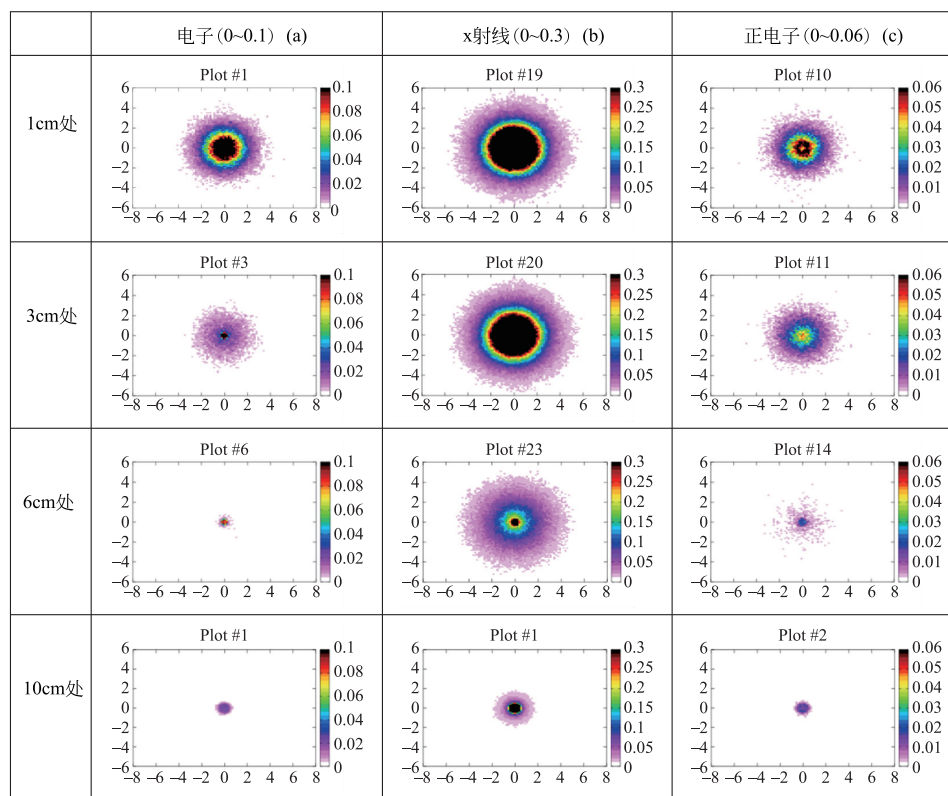


图7 (a) 不同厚度处电子信号分布图; (b) 不同厚度处 X 射线信号分布图; (c) 不同位置处正电子信号分布图

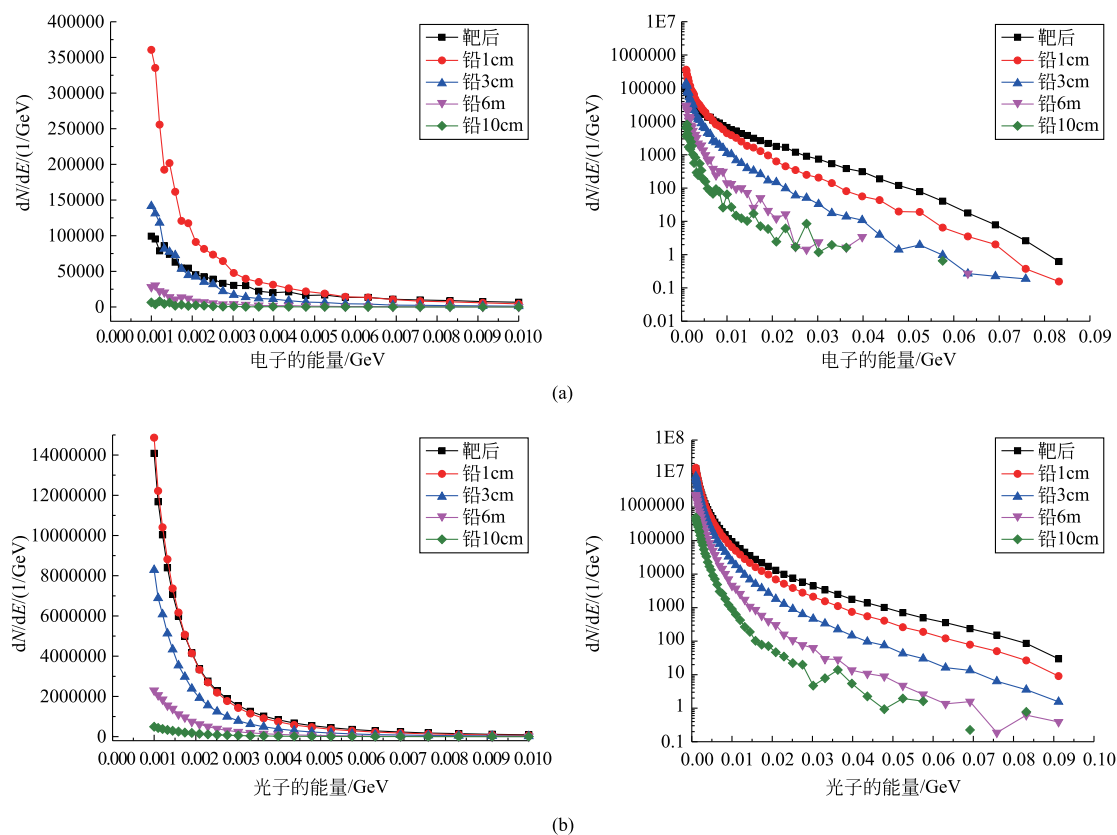


图8 (a) 不同界面处电子束噪声的能谱分布(左图中纵轴为线性坐标,右图中纵轴为对数坐标); (b) 不同界面处 X 射线噪声的能谱分布(左图中纵轴为线性坐标,右图中纵轴为对数坐标)

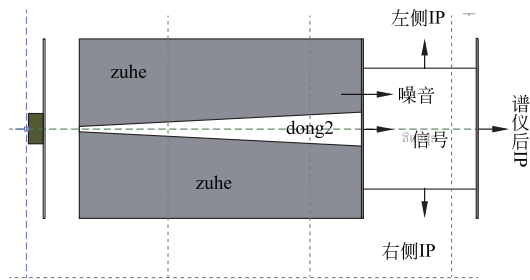


图9 入射孔设计为圆台结构 input 输入对应几何结构草图

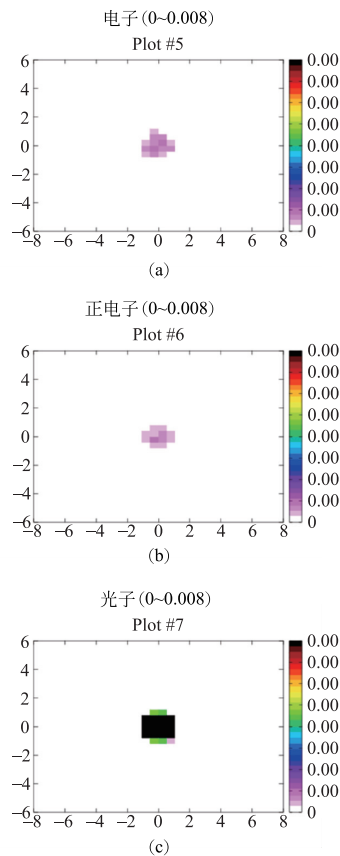


图10 20cm 准直孔后对应的电子、正电子和 X 射线分布图

(a) 20cm 准直孔后对应的电子分布图；(b) 20cm 准直孔后对应的正电子分布图；(c) 20cm 准直孔后对应的 X 射线分布图

从上述对比图可以发现,通过准直孔的电子信号约是噪声信号的 150 倍,正电子信号约是噪声信号的 100 倍,X 射线信号约是噪声信号的 600000 倍,通过 20cm 厚的准直铅块 X 射线信号得到明显的衰减,因此,这种铅屏蔽厚度高达 20cm、准直孔孔径逐渐增大的设计对于目前的正负电子谱仪的屏蔽准直系统来说,是一种较优的方案。

1.2.3 谱仪内部屏蔽的优化设计

从模拟计算结果中可以看到,尽管目前已经采用厚度高达 20cm 的铅块,然而仍然有部分正负

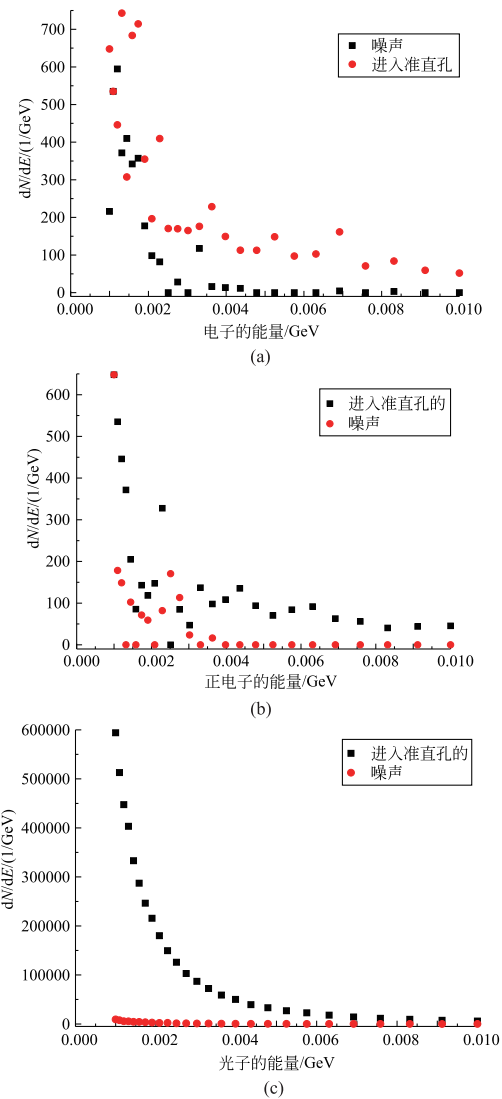


图11 经过屏蔽准直后,(a) 负电子、(b) 正电子和 (c) X 射线的信噪比对比图

电子噪声和 X 射线噪声穿透铅层进入磁场区域,而这部分噪声在经过磁场区域后将直接入射到 IP 成像板上。此外,通过准直孔直接入射的 X 射线和电子如果与上下表面的磁铁相互碰撞,也会进一步产生新的噪声。因此,为了尽可能降低噪声,在谱仪设计方案中必须同时考虑谱仪的内部屏蔽问题。在内部屏蔽材料的选择上,由于电子和光子在低 Z 的材料中输运时不易产生次级粒子和辐射,因此最终选定低 Z 的 CH(聚乙烯)做为谱仪内部的屏蔽材料。图 12 给出了不同能量电子在 CH(聚乙烯)中的平均射程曲线。

从上图中可以看出,MeV 能量量级的电子在 CH(聚乙烯)中的平均射程已经达到厘米量级。选择的厚度较薄对于高能电子和 X 射线来说起到

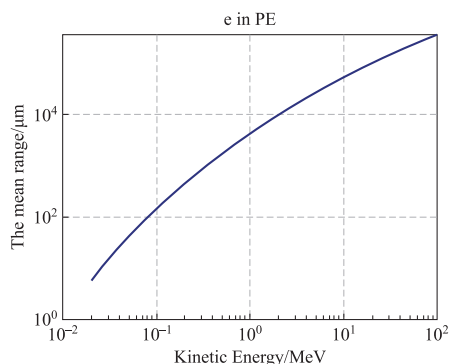


图 12 不同能量电子在 CH(聚乙烯)中的平均射程

的屏蔽效果是比较弱的。因此,谱仪优化方案设计中,在保证磁场强度不变的基础上将磁场区域的纵向尺寸增大,在上下表面的磁铁上均放置了厚度为 10cm 的 CH(聚乙烯)层。应用 FLUKA 程序研究了磁铁上下表面添加 CH 层后对谱仪屏蔽效果的影响。如图 13 所示给出了 FLUKA 程序中在谱仪内部添加了 CH 层后的磁谱仪示意图。

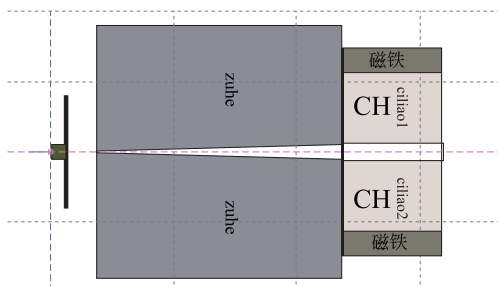
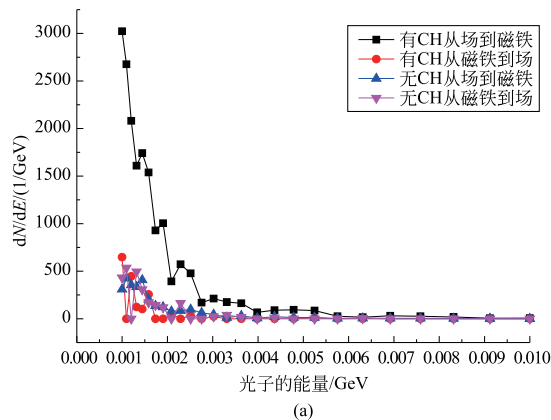


图 13 FLUKA 的输入文件中,在磁铁内侧添加 CH 屏蔽层,用于屏蔽进入谱仪内部的噪声信号

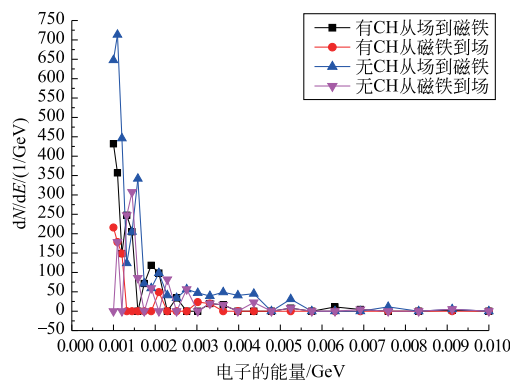
图 14(a)(b)分别给出了有 CH 和无 CH 时不同位置处的 X 射线噪声及相应的对比了各个位置处的负电子的情况。从图中可以明显看出,在添加了内部屏蔽层后,最终从外部进入磁场区域内的 X 射线噪声和电子噪声相对于没有 CH 层的情况下均有着显著的减弱。因此,在谱仪内部上下表面添加较厚的 CH 屏蔽层,对于厚靶时的强辐射背景的屏蔽来说是很有必要的。

1.3 谱仪总体优化方案整合

综合以上谱仪外部屏蔽和准直及谱仪内部的屏蔽措施方案,整合以上两部分谱仪屏蔽方案设计,对通过间接过程产生正电子实验中的混合辐射场经过 9000Gs 的优化谱仪后的偏转进行整体模拟。通过 USRBIN 选项卡,获得了经过磁场偏



(a)



(b)

图 14 (a) 有 CH 屏蔽层以及无 CH 屏蔽层时 X 射线噪声的对比; (b) 有 CH 屏蔽层以及无 CH 屏蔽层时各个位置处的负电子噪声的对比

转后在正前方 IP、谱仪右侧 IP(负电子偏转方向)以及谱仪左侧 IP(正电子偏转方向)这三块 IP 上的正负电子以及 X 射线的分布,如图 15 所示。图片中将三块 IP 上的信号进行了连接和整合,以获得完整的能谱。同时,为了更加形象直观的比较 IP 上正负电子、X 射线的相对强度,三幅图中的强度标尺均设置为相同。

从上图中可以看出,在目前整体的正负电子优化方案下,经过磁场偏转后在正电子端的 IP 上和负电子端的 IP 上得到的正负电子的强度均要强于这一位置处的 X 射线噪声的强度,因此可以实现很强的 X 射线噪声背景下对较弱的正电子能谱的准确测量。

为了进一步说明这一点,我们对入射到不同 IP 上的正电子、电子以及 X 射线能谱进行对比分析。下图给出了不同位置处的正电子能谱,为了清晰起见,左图纵轴为线性坐标,而右图为对数坐标。

黑色线为从准直孔内进入磁场区域内的正电子能谱。从图中可以看出,这些正电子中的高能

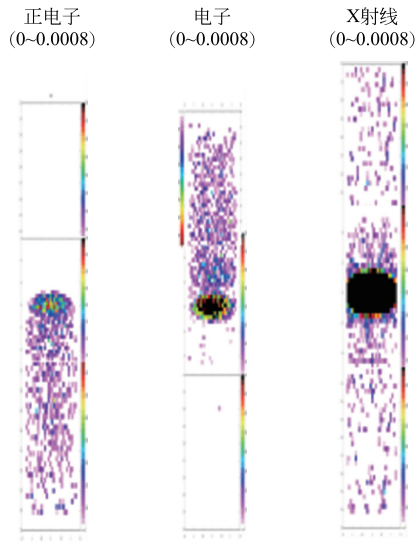


图 15 厚靶情况下,经过谱仪磁场偏转后,在 IP 上得到的正电子、电子和 X 射线信号分布图

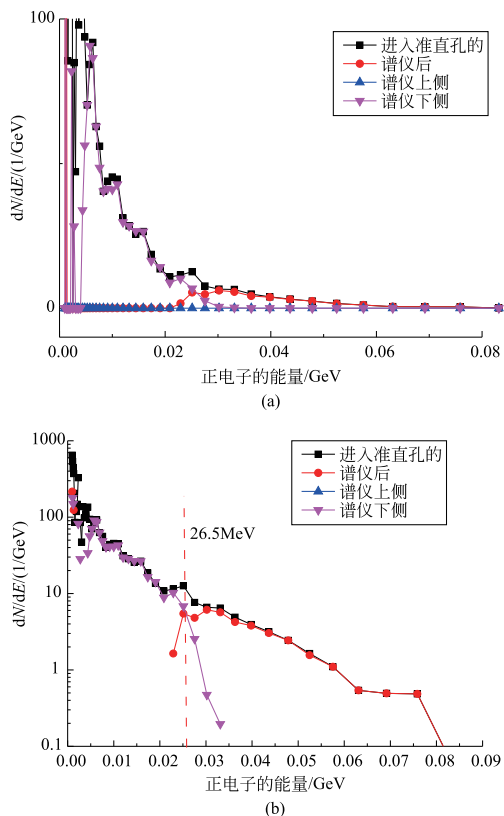


图 16 不同位置处的正电子能谱分布。从准直孔进入磁场区域的(黑线)、谱仪正后方 IP(●)、谱仪左侧边 IP(▲)和谱仪右侧边 IP(▼)上的正电子能谱

部分入射到正面的 IP 上(红线),低能部分入射到右侧面的 IP 上(紫线)。图中的蓝色线对应于负电子偏转上的 IP。在谱仪内部产生的极少量的正

电子噪声,部分会入射到了负电子 IP 一侧。对比强度可以看出,目前在谱仪内部产生的正电子噪声是非常弱的,不会对正电子信号的探测产生影响。

下图同样给出了不同位置处的负电子能谱,为了清晰起见,左图纵轴为线性坐标,而右图对数坐标。

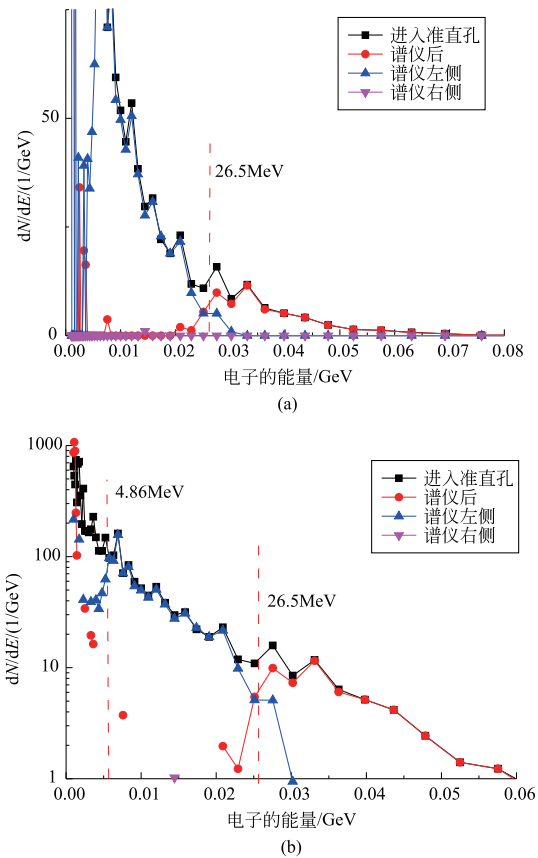


图 17 不同位置处的负电子能谱分布。从准直孔进入磁场区域的(黑线)、谱仪正后方 IP(●)、谱仪左侧边 IP(▲)和谱仪右侧边 IP(▼)上的负电子能谱

黑色线为从准直孔内进入到磁场区域内的负电子信号。从图中可以看出,这些负电子中的高能部分入射到正面的 IP 上(●),低能部分入射到左侧面的 IP 上(▲)。图中的▼对应于在谱仪内部产生的负电子噪声,然后有部分入射到了正电子 IP 一侧。从强度上可以看到,目前在谱仪内部产生的负电子噪声相对于负电子信号来说是非常弱的,在正电子信号一侧的负电子噪声信号几乎可以忽略。

下图给出了不同位置处的 X 射线能谱分布。为了清晰起见,左图纵轴为线性坐标,而右图对数坐标。从图中可以看出,在谱仪外部屏蔽和内

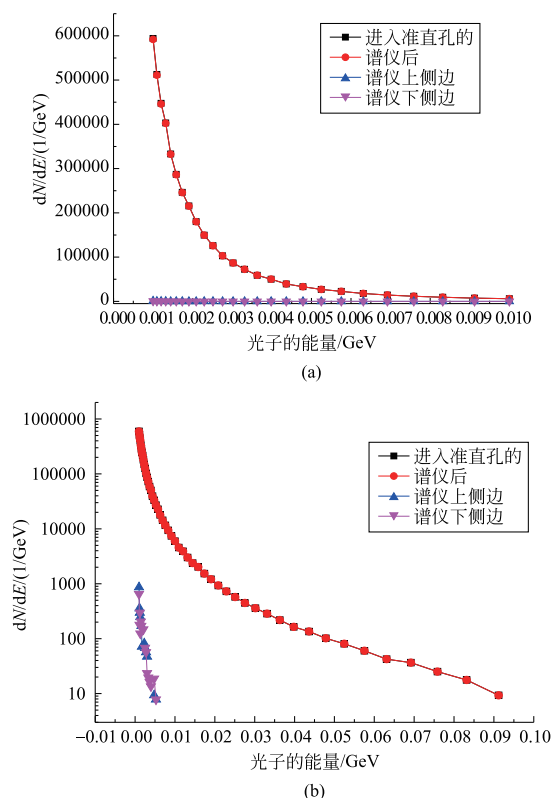


图 18 不同位置处的 X 射线能谱分布。从准直孔进入磁场区域的(黑线)、谱仪正后方 IP(●)、谱仪左侧边 IP(▲)和谱仪右侧边 IP(▼)上的 X 射线能谱

部屏蔽的基础上 X 射线噪声已经得到了显著的抑制,入射到左侧和右侧 IP 上的 X 射线噪声强度极低。这部分 X 射线噪声的背景将继续叠加在正电子信号和负电子信号上。在处理正电子和负电子的能谱数据时,需考虑将这部分均匀的 X 射线背景噪声去除掉。

此外,可以对上述厚靶情况下设计的正负电子谱仪的能量分辨率进行讨论。对于这一谱仪来说,除了谱仪的磁场强度和尺寸会影响能量分辨率外,谱仪前端采用的准直孔(这一准直孔相对于正电子源所张的角度为 2.2°)也将有助于提高谱仪的能量分辨率。通过分析不同能量的正负电子在两端 IP 上的分布,可以对谱仪的能量分辨进行估算。发现在能量为 26.5 MeV 位置处(即高能端 IP 与低能端 IP 交界处),DE 为 3.3 MeV,因此这一位置处对应的能量分辨能力为 8 在低能端。

2 结语

综上所述,通过谱仪外部屏蔽准直系统的优

化设计和谱仪内部屏蔽的设计,目前优化后的正负电子谱仪,可以实现在高能负电子与厚靶相互作用的实验中从大发散角、高强度的混合辐射背景中有效地对较弱的正电子束能谱信号进行更高能量分辨的测量。

参 考 文 献

- [1] 闫永宏. 基于短脉冲超强激光的正电子产生研究[J]. 兰州大学.
- [2] 闫永宏, 赵宗清, 吴玉迟, 等. 超短超强激光产生正电子的蒙特卡罗模拟[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1396-1400.
- [3] CHEN H, SHEPPARD J C, MEYERHOFFER D D, et al. Emittance of positron beams produced in intense laser plasma interaction[J]. Phys. Plasmas 20, 013111 (2013); doi: 10.1063/1.4789621.
- [4] TAYLOR D, LIANG E, CLARKE T, et al. Hot electron production using the texas petawatt laser irradiating thick gold targets[J]. High Energy Density Physics, 2013, 9(2): 363-368.
- [5] SARRI G, SCHUMAKER W, DI P A, et al. Table-top laser-based source of femtosecond, collimated, ultrarelativistic positron beams[J]. Physical Review Letters, 2013, 8779(25): 255002.
- [6] SARRI G. Laser-driven generation of high-quality ultra-relativistic positron beams[J]. Journal of Plasma Physics, 2015, 81(2): 124017-124022(6).
- [8] WILLIAMS G J, POLLOCK B B, ALBERT F, et al. Positron generation using laser-wakefield electron sources[J]. Physics of Plasmas, 2015, 22(9): 2662.
- [9] SARRI G, PODER K, COLE J M, et al. Generation of neutral and high-density electron-positron pair plasmas in the laboratory[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6747.
- [10] XU T, SHEN B, XU J, et al. Ultrashort megaelectron-volt positron beam generation based on laser-accelerated electrons[J]. Physics of Plasmas, 2016, 23(3): 457.
- [11] SARRI G, WARWICK J, SCHUMAKER W, et al. Spectral and spatial characterisation of laser-driven positron beams[J]. Plasma Physics & Controlled Fusion, 2016, 59(1).
- [12] 李毅飞. 基于激光与气体靶作用的电子加速和 betatron 辐射研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2017.
- [13] 江小丹, 徐妙华. 利用 FLUKA 程序优化谱仪屏蔽方案设计[J]. 物理与工程, 2022, 32(1): 162-168.