

宇宙射线 μ 子探测高 Z 材料的仿真研究

庞洪超, 刘森林, 王红艳, 徐勇军, 杨宏伟, 王列民

(中国原子能科学研究院 辐射安全研究部, 北京 102413)

摘要: 利用 Geant4 建立宇宙射线 μ 子探测高 Z 材料的仿真系统, 采用最大似然算法, 研究用于 μ 子探测的位置灵敏探测器漂移管的位置分辨率及系统成像时间对成像结果的影响。当漂移管的位置分辨率优于 200 μm 、成像时间在 1~2 min 内可对相对独立的高 Z 物质快速识别, 本研究也为漂移管的设计加工提供了理论依据。

关键词: 宇宙射线 μ 子; 高 Z 材料; Geant4; 漂移管; 位置分辨率

中图分类号: O411.3; TL811

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)07-0872-03

Simulation of Cosmic Ray Muons Detecting High- Z Materials

PANG Hong-chao, LIU Sen-lin, WANG Hong-yan, XU Yong-jun,

YANG Hong-wei, WANG Lie-min

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-20, Beijing 102413, China)

Abstract: The simulation system of cosmic ray muons detecting high- Z materials was established using Geant4 program. The relationship between the imaging results and the resolutions of position sensitive drift tube, and the imaging time of the system was studied using maximum likelihood algorithm. The results show that isolated high- Z materials can be rapidly identified when the resolution of the drift tube is less than 200 μm in 1-2 min. The study provides a theory gist for design and manufacture of drift tube.

Key words: cosmic ray muons; high- Z materials; Geant4; drift tube; position resolution

2003 年美国洛斯阿拉莫斯实验室首先报道可利用宇宙射线 μ 子对重核物质辐射成像^[1], 引起国内外科学家的广泛关注^[2-5]。天然宇宙射线 μ 子能量高, 穿透能力强, 不会对环境和人员造成额外辐射, 在探测重核物质方面具有很大优势。本课题组也对 μ 子探测重核物质进行了前期研究并取得一定成果^[6-7]。本文在前期研究的基础上, 采用 Geant4 建立宇宙

射线 μ 子探测高 Z 材料的仿真系统, 研究漂移管探测器位置分辨率及系统成像时间对成像效果的影响, 同时为漂移管的设计加工提供理论依据。

1 仿真模型的建立

图 1 为宇宙射线 μ 子成像检测系统仿真模型结构图, 上下各两组探测器, 中间区域为有效

探测区域。当 μ 子穿过上两组探测器时,能准确确定 μ 子的入射位置坐标,当 μ 子穿过待测物并从下面两组探测器射出时,通过同样方法可确定 μ 子的出射位置坐标。通过探测器记录的数据可计算出 μ 子的位置和角度偏移信息,从而进一步确定探测区域是否含有高 Z 物质。

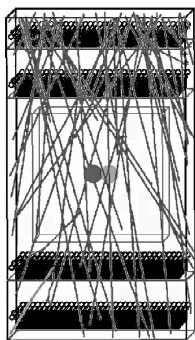


图1 Geant4 构建 μ 子探测系统仿真模型
Fig.1 Model of muons detector system using Geant4 simulation

探测器选择位置灵敏探测器漂移管(DT),DT 由外直径 30 mm、壁厚 0.6 mm、长 1 000 mm 的铝管(阴极),端头和直径为 50 μm 的镀金钨丝(阳极)组成,管内充气压为 300 kPa 的氩和二氧化碳(体积比为 93 : 7)的混合气体。

为增加模拟真实性,编写了宇宙射线 μ 子产生器,使 μ 子的角分布和能谱分布与真实海平面 μ 子一致^[7-8]。

探测空间为 1 m \times 1 m \times 1 m 的立方体,内装两个物体,其中 1 个为直径 10 cm 的铁球,另

1 个为直径 8 cm 的铀球,其中铀球的外面屏蔽一厚为 1 cm 的铁壳。上两层探测器间距离与下两层探测器间距离均为 20 cm。采用最大似然法^[4-5]进行模拟计算。

2 漂移管位置分辨率对成像结果的影响

μ 子产生器产生 1 min 的入射粒子,最大似然算法迭代 100 次,探测器位置分辨率分别取 0、200、300、400、500、1 000 μm 。成像显示以像素的散射密度 λ 进行划分,像素大小为 10 cm \times 10 cm \times 10 cm。当 $5 > \lambda \geq 1$ 时,表示为低 Z 物质,用浅灰色显示; $15 > \lambda \geq 5$,表示中 Z 物质,用深灰色显示; $\lambda \geq 15$,表示为高 Z 物质,用黑色显示(图 2)。由图 2 可看出,随探测器位置分辨率的增大,系统的成像效果逐渐变差。位置分辨率小于 200 μm 时,在铀球的位置出现黑色,铁球的位置出现深灰色,并出现几个浅灰色干扰点,成像效果理想。当探测器的位置分辨率取 400 μm 时,成像区域出现较大的深灰色干扰点,成像效果变差,当探测器的位置分辨率为 1 mm 时,虽然铀球的位置还能出现黑色但深灰色干扰点较多,已无法区分物体。可看出,探测器的位置分辨率优于 200 μm 时可得到理想的成像结果。

3 成像时间对成像结果的影响

选取探测器的位置分辨率为 200 μm ,算法迭代次数取 100, μ 子的入射时间分别为 30 s、1 min、2 min,得到的成像结果示于图 3。

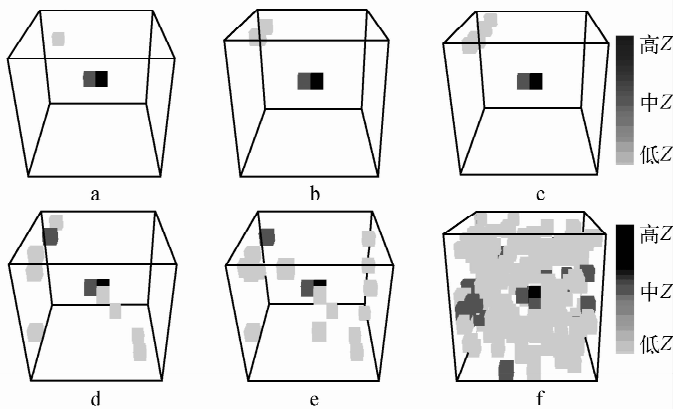


图 2 成像效果与探测器位置分辨率的关系

Fig.2 Relationship between imaging and detector resolution

探测器的位置分辨率: a—0 μm ; b—200 μm ; c—300 μm ; d—400 μm ; e—500 μm ; f—1 000 μm

由图 3 可看出,在探测器的位置分辨率及算法迭代次数一定时,成像效果随入射 μ 子数增加逐渐变好。当系统探测时间为 30 s 时,铀球位置出现黑色,而铁球位置未出现,其它像素出现干扰点,成像效果差;当探测时间为 1 min 时,

铀球和铁球均出现,且出现几个小散射密度点;当时间为 2 min 时,效果非常理想,出现了铀、铁散射点,且干扰散射点的散射密度均小于 1。可见,系统成像时间在 1~2 min 内能得到理想的成像结果。

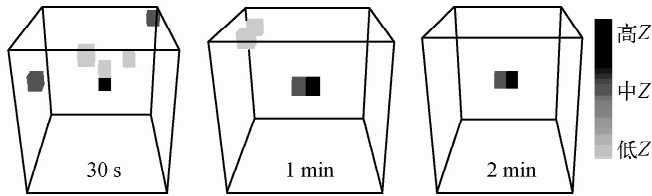


图 3 成像效果与系统探测时间的关系

Fig. 3 Relationship between imaging results and detecting time

4 结论

1) 利用宇宙射线 μ 子实现高 Z 材料的快速探测是可行的。在漂移管的位置分辨率为 200 μm 左右、成像时间 1~2 min 内可得到理想的成像结果。

2) 探测 μ 子的漂移管需具有 200 μm 以内的位置分辨率,高于此值,辨别物体就存在困难,即本文的研究也为探测器的设计加工提供了理论依据。

3) 本文的研究是基于蒙特卡罗方法的模拟研究,且探测区域情况较为理想,要将此方法进行实际应用,需做大量的实验工作。

参考文献:

[1] BOROZDIN K, HOGAN G, MORRIS C, et al. Radiographic imaging with cosmic-ray muons[J]. Nature, 2003, 422(6929): 277.

[2] SCHULTZ L J, BLANPIED G S, BOROZDIN K N, et al. Statistical reconstructions for cosmic ray muon tomography[J]. IEEE Trans Imag Proce, 2007, 16(8): 1 985-1 993.

[3] WANG Guobao, QI Jinyi. Statistical image reconstruction for muon tomography using Gaussian scale mixture model[C]//IEEE International Conference on Image Processing. [S. l.]: [s. n.], 2008: 2 948-2 951.

[4] SCHULTZ L J. Cosmic ray muon radiography

[D]. Portland: Portland State University, 2003.

[5] 刘圆圆,赵自然,陈志强,等.用于宇宙射线 μ 子成像的 MLS-EM 重建算法加速研究[J]. CT 理论与应用研究,2007,16(3):1-5.
LIU Yuanyuan, ZHAO Ziran, CHEN Zhiqiang, et al. Research on accelerating MLS-EM reconstruction algorithm in cosmic ray muon radiography[J]. CT Theory and Applications, 2007, 16(3): 1-5(in Chinese).

[6] 罗炜,王红艳,陈凌,等.用于核材料检测的两种宇宙射线 μ 子位置灵敏探测器[J].核电子学与探测技术,2009,29(2):353-356.
LUO Wei, WANG Hongyan, CHEN Ling, et al. Two types of position-sensitive detectors about universe radial of muon apply detecting nucleus material[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009, 29(2): 353-356 (in Chinese).

[7] 谭新建,冯朝阳,谢一冈,等.宇宙线 μ 用于反应堆燃料元件成像的尝试性模拟研究[J].原子能科学技术,2010,44(3):344-347.
TAN Xinjian, FENG Zhaoyang, XIE Yigang, et al. Simulation study on cosmic ray μ tomography for reactor fuel elements [J]. At Energy Sci Technol, 2010, 44(3): 344-347(in Chinese).

[8] GASSER T K, STANEV T. Review of particle physics[J]. Phys Lett B, 2004, 592: 230.