

宇宙线 μ 用于反应堆燃料元件成像的 尝试性模拟研究

谭新建^{1,2}, 冯朝阳², 谢一冈², 姚泽恩^{1,*}, 庞洪超³, 王红艳³

(1. 兰州大学 核科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049;
3. 中国原子能科学研究院 辐射安全部, 北京 102413)

摘要:建立了用于 Monte-Carlo 模拟的 μ 抽样模型。使用此模型,采用 Geant4 程序和 Root 软件,对核燃料元件的 μ 成像进行模拟研究。模拟成像结果显示,基于将多次库伦散射等效为单次散射的径迹重建方法,可实现核燃料元件的 μ 成像。

关键词:宇宙线 μ ; 燃料元件; 成像

中图分类号: TL816.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2010)03-0344-04

Simulation Study on Cosmic Ray μ Tomography for Reactor Fuel Elements

TAN Xin-jian^{1,2}, FENG Zhao-yang², XIE Yi-gang², YAO Ze-en^{1,*},
PANG Hong-chao³, WANG Hong-yan³

(1. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Division of Radiation Safety, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: A model of sampling on the cosmic ray μ was developed. The preliminary simulation study on μ tomography for reactor fuel elements was finished using Geant4 program and Root software. The simulated results show that it is feasible to detect the reactor fuel elements using the point of closest approach algorithm based on the simplification of multiple Coulomb scattering.

Key words: cosmic ray μ ; fuel element; imaging

穿透致密物质能力有限和人为增加辐射剂量使 X 射线、 γ 射线和中子成像技术在检测核材料时遇到困难和挑战^[1]。原始宇宙线穿越大气层时产生了大量次级宇宙线,主要以 μ 为

主。宇宙线 μ 是一种穿透性极强的高能带电粒子,可轻易穿透很厚的防护层,通过测量它在物质中的散射,可定性地检测重核材料。因呈现出诸多优势, μ 成像近年来受到了关注和

研究^[2-4]。

早在 1955 年, George^[5] 在地下通道中利用 μ 注量的衰减测量了岩层的厚度。随后, Alvarez 等^[6] 提出将该方法应用于大的建筑物考古成像及地质结构的测量。2007 年, 美国 DSI 公司、DSC 公司和 LANL^[7] 就新型 μ 成像探测技术的研制开展了合作。目前, 我国的 μ 成像技术尚处于尝试性研究阶段^[8]。

本工作构建用于蒙特卡罗模拟的宇宙线 μ 抽样模型, 并应用该模型, 采用径迹重建法 (POCA) 尝试模拟研究核燃料元件的 μ 成像。

1 研究方法

1.1 海平面 μ 模型

到达海平面的 μ 微分流强随天顶角 θ 近似按 $\cos^2 \theta$ 分布, 约 $1 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 事例率。其双微分流强分布一般用 Gaisser 公式^[9] 描述:

$$\frac{dI}{dE d\cos \theta} = 0.14E^{-2.7} \left(\frac{1}{1 + \frac{1.1E\cos \theta}{115}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1E\cos \theta}{850}} \right) \quad (1)$$

其中: I 为 μ 流强; E 为 μ 能量, GeV; θ 为 μ 入射天顶角 (极角)。

式(1)中忽略了 μ 的衰变和地球曲率的影响。为获得更好的海平面 μ 流强分布的描述, 需对照宇宙线 μ 的实验测量数据将式(1)进行修正, 即通常用 θ^* 代替 θ , θ^* 与 θ 的关系为:

$$\cos \theta^* = \sqrt{\frac{\cos^2 \theta + P_1 \cos^{P_3} \theta + P_4 \cos^{P_5} \theta}{1 + P_1 + P_2 + P_4}} \quad (2)$$

这里假设大气厚度为 114.8 g/cm^2 , 使用 CORSIKA 宇宙线模拟程序, 模拟确定的各常数数值分别为: $P_1 = 0.10257$, $P_2 = -0.06828$, $P_3 = 0.95863$, $P_4 = 0.040725$, $P_5 = 0.817285$ 。

根据式(1)和式(2), 建立了 μ 抽样模型。进行了约 1 200 万个全天区的抽样检验, 得到的极角抽样结果如图 1 所示, 能谱抽样结果示于图 2, 图 3 是 Kremer 等^[3] 测量得到的海平面宇宙线的 μ 能谱。由图 2、3 结果的比较可看出, 本研究所建立的模型得到的抽样结果与能谱实验数据吻合较好。

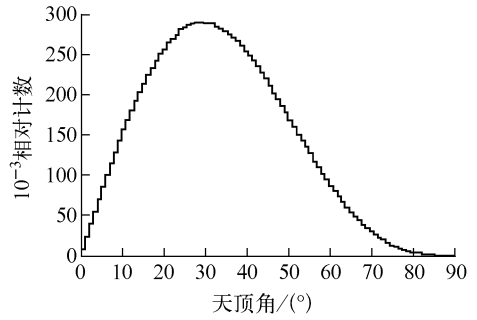


图 1 μ 极角抽样模型

Fig. 1 Model of μ zenith angle distribution

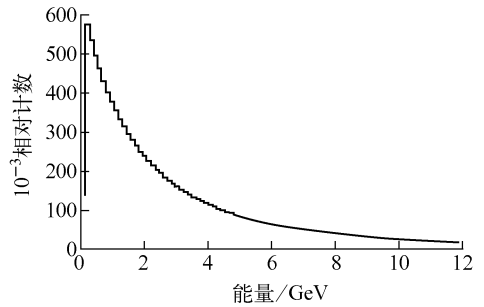


图 2 μ 能谱抽样模型

Fig. 2 Model of μ energy spectrum

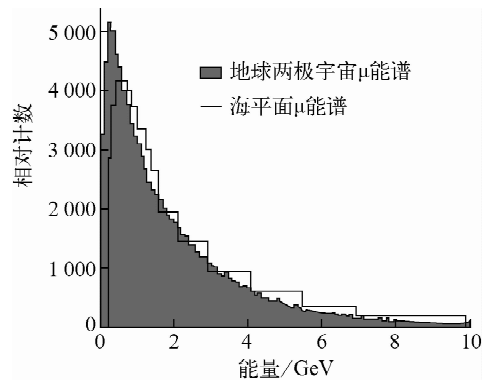


图 3 海平面 μ 能谱实验数据^[3]

Fig. 3 Experimental μ energy spectra at sea level^[3]

1.2 μ 散射角分析

带电粒子穿透物质时因发生多次库仑散射而引起散射角歧离, 从统计学角度讲, 小角度散射角的投影角服从近高斯分布, 其标准差 θ_0 (mrad) 可描述为:

$$\theta_0 = \frac{13.6Z}{\beta c p} \sqrt{\frac{L}{L_0}} [1 + 0.038(L/L_0)] \quad (3)$$

其中: βc 为入射粒子速度, β 为相对速度, c 为光速; Z 为电荷数; p 为动量; L 为穿越物质的厚

度; L_0 为对应物质的辐射长度, 其大小与物质原子序数紧密相关, 随着物质原子序数的增加, 辐射长度 L_0 急剧下降。

散射角的空间角一维分布函数^[10]可描述为:

$$f(\theta) = 2\pi\theta \times \frac{1}{2\pi\theta_0^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\theta_0^2}\right) = \frac{\theta}{\theta_0^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\theta_0^2}\right) \quad (4)$$

散射角的空间角一维分布函数存在一最可几值, 且该值对应投影角分布的标准差 θ_0 。由于辐射长度 L_0 与物质原子序数密切相关, 因此, 高原子序数物质和低原子序数物质的 μ 散

射角最可几值之间会有明显差异。

本工作利用 Geant4 平台编写了 μ 穿越物质后散射角和投影角的模拟程序, 并对 3 GeV 单能 μ 穿越 10 cm 厚的铝(低原子序数物质)和铀(高原子序数物质)后 μ 的散射角分布及投影角分布进行了模拟研究, 结果示于图 4。

模拟结果显示, 投影角是服从高斯分布的, 且 10 cm 厚的铝和铀对 3 GeV 的 μ 产生的散射角最可几值分别为 0.3° 和 1.8° 左右, 即 μ 穿过两种高低不同原子序数物质后散射角之间有明显的差异。利用这一特性, 在充分考虑散射角及能量等判选条件下, 可实现在轻物质中分辨高原子序数物质。

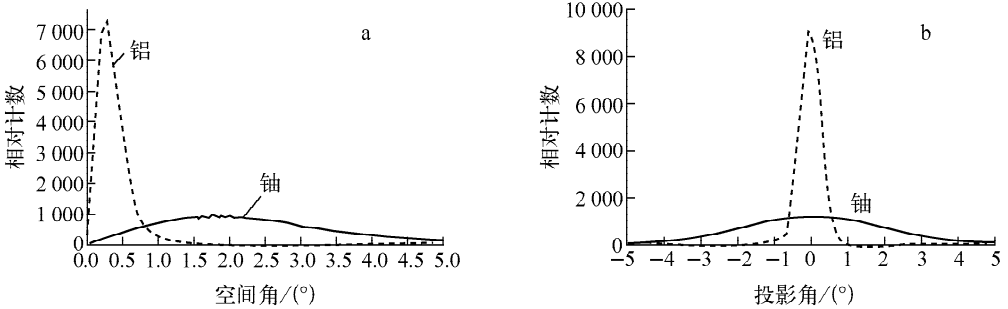


图 4 3 GeV 的 μ 垂直穿透 10 cm 厚的铝和铀的散射角分布(a)和投影角分布(b)

Fig. 4 Space angular distributions (a) and projected angular distributions (b) of 3 GeV μ penetrating through 10 cm Al and U

2 核燃料元件 μ 成像的尝试性模拟

μ 的模拟抽样采用 1.1 节海平面 μ 模型。核燃料元件 μ 成像模拟结构如图 5 所示。探测器部分由 4 组简化漂移管室(MDTC)构成, 经优化后的单支漂移管(MDT)参数为: 长度 2 m、直径 5 cm、管壁 0.6 mm 的铝管, 内充 2×10^5 Pa 的 93%Ar 和 7%CO₂ 混合气体, 对应探测器位置分辨的半高宽给定为 $FMHW \approx 2.355 \times 0.3$ mm。第 1 组 MDT 的 4 层探测器阵列与燃料元件的间距分别为 97.00、92.50、87.50 和 83.00 cm; 第 2 组 MDT 的 4 层探测器与燃料元件的间距分别为 47.00、42.50、37.50 和 33.00 cm; 第 3、4 两组 MDT 以燃料元件放置平面为中平面, 相对上方 MDT 对称放置。9 根燃料元件长度为 1 m、直径为 1 cm、外附 0.01 cm 的铅包壳, 燃料元件的放置间距为 10 cm。

在进行成像模拟时, 第 1、2 组探测器记录入射方位和方向, 第 3、4 组探测器记录出射方位, 进而由 Root 软件拟合得到入射、出射 μ 径迹, 并由此确定 POCA 拐点所在位置。经计算得到, 在相同介质中, 散射角与能量近似呈反比例关系。本研究约定以 μ 能量与散射角的乘积作为成像判选条件, 记为 $melody = \text{能量(MeV)} \times \text{散射角}(\circ)$ 。

采用 600 万个入射 μ 事例, 判选条件选为 $melody \geq 1000$, 对大于该值的 POCA 点做统计并记为像点。图 5 所示燃料元件成像结构的模拟成像结果示于图 6。可看出, 图 6 中成像结果已较为清晰地呈现了 9 根管壁燃料元件的轮廓, 说明采用 POCA 算法可实现对重物质的 μ 成像。然而, 采用该算法得到的图像清晰度仍不高。

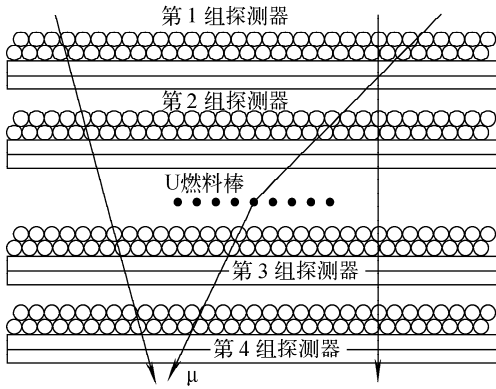
图5 燃料元件 μ 成像结构模型剖面图

Fig. 5 Schematic illustration of geometry in simulation

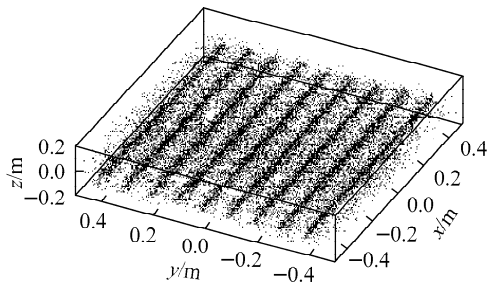


图6 成像结果

Fig. 6 μ -tomography result

3 结论

采用 POCA 算法可实现对重物质的 μ 成像,然而,得到的图像清晰度仍不高。主要原因是探测器接收度有限,模拟得到的有效事例率低。进一步提高图像清晰度的主要途径有两条,一是增大探测器有效面积,增加接收度;二是增加 μ 模拟照射时间,即增加总入射 μ 事例数。另外,本研究共跟踪了 600 万个 μ 事例,相当于约 150 min 天然 μ 照射时间。在本工作条件下,尚无法实现快速成像。欲实现快速成像,须研究新的成像算法,并优化探测系统。

参考文献:

- [1] BOROZDIN K, HOGAN G, MORRIS C, et al. Radiographic imaging with cosmic-ray muons[J]. Nature, 2003, 422: 277.
- [2] GILBOY W B, JENNESON PM, SIMONS S J R, et al. Muon radiography of large industrial structures[J]. Nucl Instrum Methods B, 2007, 263(1): 317-319.
- [3] BENETTONI M, BONOMI G, CALVINI P, et al. Muon radiography with the CMS muon barrel chambers[C]//IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. [S. l.]: [s. n.], 2007: 1 021-1 025.
- [4] WANG Guobao, QI Jinyi. Statistical image reconstruction for muon tomography using Gaussian scale mixture model[C]//IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'08). [S. l.]: [s. n.], 2008: 2 948-2 951.
- [5] GEORGE E P. Cosmic rays measure overburden of tunnel[J]. Commonwealth Engineer, 1955, 1: 455-457.
- [6] ALVAREZ L, ANDERSON J, BEDWEI F, et al. Search for hidden chambers in the pyramids [J]. Science, 1969, 167: 832-839.
- [7] JAENISCH H, HANDLEYA J, HICKLENA M, et al. Muon imaging and data modeling[J]. Proc SPIE, 2007, 65380G: 1-8.
- [8] 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 for cosmic ray muon radiography[J]. CT Theory and Applications, 2007, 16(3): 1-5(in Chinese).
- [9] GASSER T K, STANEV T. Review of particle physics[J]. Phys Lett B, 2004, 592: 230.
- [10] LYNCH G R, DAHL O I. Approximations to multiple Coulomb scattering[J]. Nucl Instrum Methods B, 1991, 58: 6-10.