

基于缪子离散能量的材料鉴别实验研究*

李雨芃 汤秀章[†] 陈欣南 高春宇 陈雁南 范澄军 吕建友

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

(2022年8月18日收到; 2022年10月14日收到修改稿)

宇宙射线缪子具有穿透力强、对重核材料敏感的特点, 近年来被广泛应用于核材料检查等领域. 缪子与不同原子序数材料发生的多重库仑散射效果不同, 利用这点可以对被测物体进行成像以及材料鉴别, 而在该过程中引入缪子的能量信息可以提高材料鉴别的准确度. 本文基于原子能院研制的缪子成像装置开展了5种样品的材料鉴别实验, 使用离散能量拟合近似连续能量的缪子散射角分布, 进而测量出各材料的辐射长度并以此作为特征量进行材料鉴别. 实验结果表明, 在约1400个有效缪子事例下, Al-Fe和Fe-Pb可以在95%的置信水平下有效区分, 该方法相比于不引入缪子能量信息对Pb-W鉴别的准确率提高了18.5%.

关键词: 宇宙射线缪子, 缪子成像, 离散能量, 材料鉴别**PACS:** 95.85.Ry, 42.30.Wb, 68.55.Nq**DOI:** 10.7498/aps.72.20221645

1 引言

缪子是一种由宇宙射线与大气层相互作用产生的高能带电粒子, 质量是电子的207倍, 平均能量为3—4 GeV^[1]. 缪子的穿透能力强, 可以有效地穿过屏蔽层对物体内部结构进行成像探测, 并且无放射性危害. 目前缪子成像技术已被应用于核材料检查^[2,3]、金字塔探测^[4,5]、陵墓探测^[6]、火山监测^[7,8], 以及对反应堆^[9,10]和核废料^[11]的监测等多个领域.

2003年美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)首次提出利用缪子散射成像方法进行核材料检查^[12], 该技术利用缪子穿过物体时发生多重库仑散射的角度偏转与材料原子序数、缪子能量的规律对被测物进行成像^[13]和识别^[14]. 在实际应用中, 天然缪子的能量是连续的且实时测量非常困难, 因此大多数研究使用缪子的平均能量代替未知缪子能量, 这种近似导致了成像图像质量和材料鉴别准确度的降低. Vanini等^[15]开展了不同能量精度下的高炉成像模拟研究, Bae和Chatzidakis^[16]开展了多种

特殊核材料的材料鉴别模拟研究, Morris等^[17]提出了缪子能量的多群模型等. 这些模拟结果均表明缪子能量信息对于成像和材料鉴别有着重要影响. 此外, 部分学者也开展了缪子能量测量的实验研究. 例如, 加拿大团队^[18]研制出了带能量测量结构的CRIPT探测器, 通过测量已知材料阻挡缪子产生的散射角还原缪子动量; 清华大学罗志飞^[19]利用多气隙阻性板室(multi-gap resistive plate chamber, MRPC)时间分辨率高的特性, 使用飞行时间法计算出缪子的分段能量信息.

本文基于原子能院研制的缪子成像装置开展了5种不同原子序数样品的材料鉴别实验研究, 采用离散能量缪子散射角分布拟合近似连续能量的缪子散射角分布, 以辐射长度作为特征量进行材料鉴别, 并分析实验测量误差对材料鉴别准确度的影响.

2 基于缪子离散能量信息的材料鉴别方法

当缪子穿过靶材料时, 会受到原子核库仑力的作用发生多重库仑散射, 其散射角在同一平面内的

* 国家财政部稳定支持研究(批准号: WDJC-2019-05)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: tangxz@ciae.ac.cn

投影近似服从均值为 0、标准差为 σ_θ 的高斯分布^[20]. 根据 Molière 理论^[21,22], 散射角分布宽度与缪子能量、材料辐射长度有如下关系:

$$\sigma_\theta = \frac{13.6}{\beta c p} \sqrt{\frac{L}{L_{\text{rad}}}}, \quad (1)$$

其中, 辐射长度 L_{rad} 是材料的特征量, 通常原子序数越大的材料, 辐射长度越小. βc 是缪子的速度, 约等于光速, p 是缪子的动量, L 为材料的厚度. (1) 式表明缪子散射角与缪子能量有关. 天然缪子的能谱是连续的, 实验测量到的缪子散射角是不同能量的缪子产生的散射角集合. 单能的缪子散射角服从高斯分布, 对天然缪子散射角分布的贡献为其能量对应的高斯概率密度函数,

$$f_i(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma_i^2}}. \quad (2)$$

由此推广到整个缪子能量区间, 天然缪子散射角满足的分布应为全能量区间上的缪子产生的散射角贡献加权求和, 权重为各微分能量点上出现的缪子概率. 该分布理论上为高斯分布与缪子能谱的卷积. 由于缪子能谱较为复杂, 本研究采用缪子的 9 个特征能量点代替缪子能谱. 在天然缪子能量区间上以对数线性选取 0.25, 0.50, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00, 16.00, 32.00, 64.00 GeV 这 9 个能量点, 它们的跨度 0.25—64.00 GeV 区间上包含了 94.3% 的天然缪子, 覆盖了缪子的主要相互作用能量区间, 具有理论意义. 用 9 个特征能量点上的缪子散射角分布加权求和近似连续能量缪子的散射角分布, 对实验测量到的天然缪子散射角统计点进行拟合, 可得

$$f(\theta) \approx \sum_{i=1}^9 \frac{A_i}{\sigma_i} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma_i^2}}. \quad (3)$$

拟合函数 (3) 式为 9 个能量点对应的高斯概率密度函数加权求和形式, 常数项已归纳到待定系数中. 通过测量标准材料的缪子散射角标定权重系数 $A_1—A_9$, 在已知材料种类时各能量点对应的 σ_i 为已知量, 可以由 (1) 式计算. 标定得到的权重 $A_1—A_9$ 代表各自对应能量点上的缪子数量占比. 将 $A_1—A_9$ 代入 (3) 式得到一个近似天然缪子散射角分布的表达式. 此后测量未知材料的缪子散射角并与标定后的 (3) 式耦合进而推算出未知材料的辐射长度. 该方法从统计角度引入了缪子的离散能量信息.

综上所述, 基于离散能量信息进行材料鉴别分为两个步骤: 1) 利用已知厚度的铅作为标准材料标定各能量点的权重系数; 2) 测量待鉴别样品的散射角, 通过标定后的缪子散射角分布计算出各材料的辐射长度, 并以此对材料进行鉴别.

3 实验配置与蒙特卡罗模拟

基于缪子离散能量的材料鉴别实验在中国原子能科学研究院研制的宇宙射线缪子成像装置上进行. 该装置的主体部分由六层探测器阵列构成, 每层由各两排垂直相交的气体漂移管紧密排列组成. 上、下部分各三层分别用于测量入射和出射缪子的径迹坐标, 中间约 1 m 间距的探测区域摆放实验样品. 本文采用 Geant4 对实验过程进行模拟, Geant4 是欧洲核子中心开发的蒙特卡罗软件^[23], 用于模拟微观粒子与宏观物质相互作用的全过程.

3.1 离散能量点权重的实验标定

权重标定实验选用已知厚度的铅标准材料测量散射角并计算各离散能量所占权重. 由于铅的厚度过大会阻挡低能缪子, 厚度过小又使高能缪子产生的散射角过小, 因此本实验选用 5, 10, 15 cm 三种厚度的铅块, 取标定结果的平均值作为最终权重. 将三种厚度的铅块同时放入宇宙射线缪子成像装置中进行测量, 实验设置和成像结果如图 1 所示.

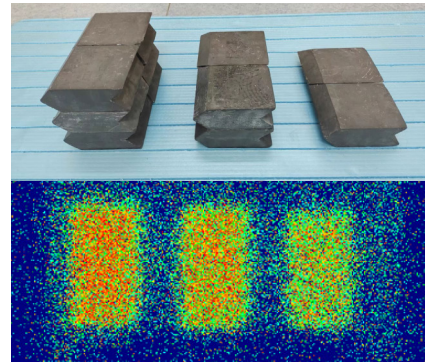


图 1 三种不同厚度铅块及散射成像结果

Fig. 1. Lead cube with different thickness and the image of scattering tomography.

根据材料在探测区域内放置位置的先验知识筛选出穿过完整厚度铅块的缪子. 选取其中穿透每种厚度的缪子各 90000 个, 计算上述缪子在 XZ 和 YZ 两正交平面上形成的平面散射角. 两平面内

的散射角独立、同分布,可以混合为一个样本集.在 $-200\sim 200$ mrad 的范围内,以 1 mrad 为间隔划分区间,统计测量散射角的归一化频数后做出散点图并用 (3) 式进行拟合.在 Geant4 中构建与上述实验相同的铅块模型,探测器阵列面积和位置均与实际装置一致.缪子从最顶层探测器表面 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的正方形区域内均匀抽样发射.入射方向和缪子能量均由 CRY 库抽样产生 [24].模拟计算缪子穿透铅块产生的散射角分布,图 2 为本实验的 Geant4 模型示意图.

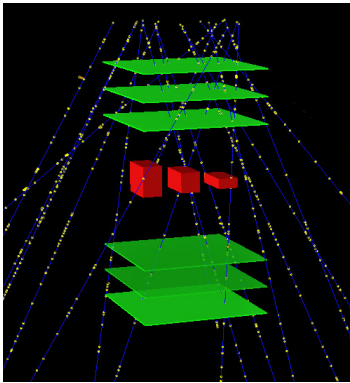


图 2 权重标定实验的 Geant4 模型

Fig. 2. Geant4 model for weight calibration experiment.

三种不同厚度铅块的散射角分布如图 3(a) 所示,其中 10 cm 组的实验结果与模拟结果对比如

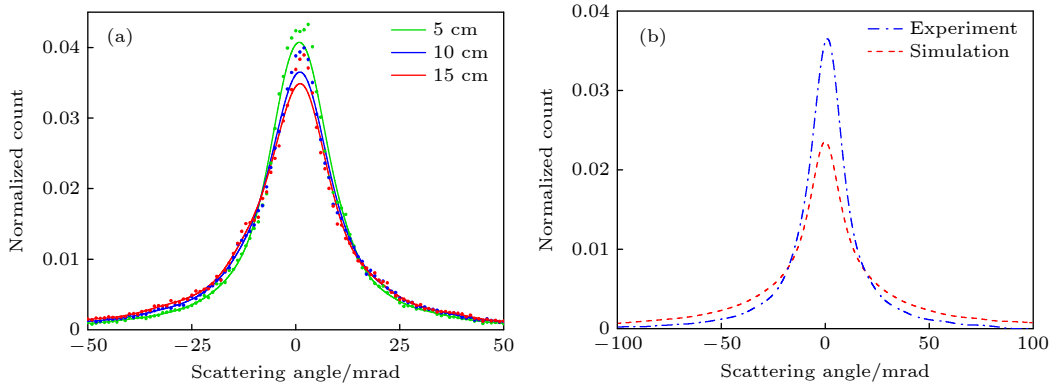


图 3 (a) 缪子穿过不同厚度铅块的散射角分布 (点) 与拟合曲线 (线); (b) 10 cm 铅块的实验结果与模拟结果对比

Fig. 3. (a) Measured scattering angle distributions of lead cubes under different thicknesses (dot) and fitting curve (line); (b) the comparison between experiments and simulations of 10 cm Pb.

图 3(b) 所示,实验结果已扣除本底影响.每个厚度的实验组可以拟合出一组权重 $A_1\sim A_9$,将三组权重取平均值,得到的实验结果及模拟结果见表 1,权重系数 $A_1\sim A_9$ 代表以对应的特征能量点为中心的能量分段中包含的缪子数量占比.由表 1 可知, $A_3\sim A_5$ 的数值在实验和模拟结果中均较高,表明在天然缪子中 1—4 GeV 的缪子数量较多,对总体散射角分布贡献较大.由于实验测量存在一定误差,部分权重系数的实验与模拟结果存在差异.

3.2 引入离散能量的材料鉴别实验与分析

材料鉴别实验选用 C, Al, Fe, Pb, W 5 种样品作为待测材料,利用标定后的缪子散射角分布和各材料散射角测量值计算材料辐射长度.5 种材料的厚度均为 10 cm,其中 Al, Fe, Pb, W 为底面积 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的立方体, C 为底面直径 10 cm 的圆柱体.实验设置和成像结果如图 4 所示.将 5 种材料样品放入缪子成像装置中,经一段时间测量后,穿透每种材料完整厚度的粒子数各 40000 个.在 $-200\sim 200$ mrad 内,以 1 mrad 为间隔划分区间,统计各材料散射角的归一化频数并绘制散点图,如图 5 所示.

根据 (3) 式可知,离散能量点近似的天然缪子散射角分布在 $\theta = 0$ 时取得最大值,将该值与测量

表 1 离散能量权重模拟结果与实验结果

Table 1. Discrete energy's weights of experiment and simulation.

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
实验结果	-0.029	0.089	0.081	0.140	0.084	0.033	-0.005	0.000	0.001
模拟结果	0.022	0.038	0.095	0.100	0.084	0.043	0.021	0.005	0.003

到的天然缪子散射角频率峰值 N_0 (即图 5 中的峰值) 对应,

$$f(0) = \sum_{i=1}^9 \frac{A_i p_i}{13.6} \sqrt{\frac{L_{\text{rad}}}{L}} \approx N_0. \quad (4)$$

从而计算出材料的辐射长度,

$$L_{\text{rad}} = \frac{184.96 \cdot N_0^2 L}{\left(\sum A_i p_i\right)^2}. \quad (5)$$

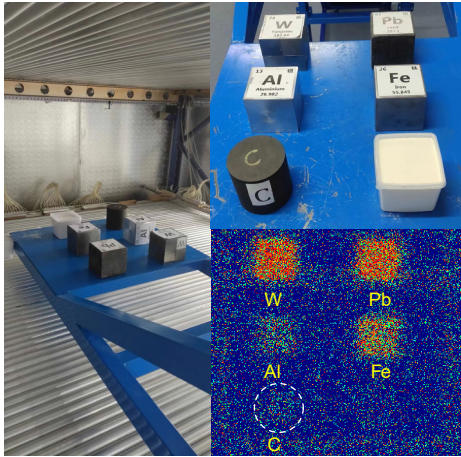


图 4 测量五种材料的散射角及散射成像结果

Fig. 4. Measurement of scattering angles for the different materials and the image of scattering tomography.

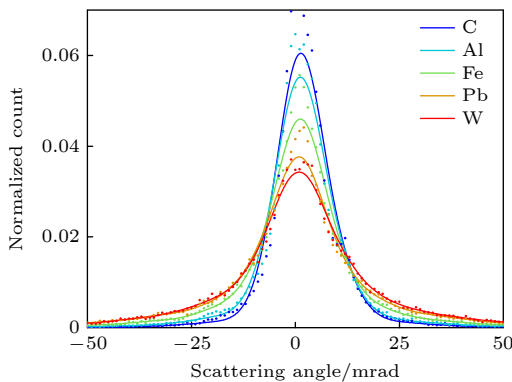


图 5 缪子穿过不同材料的散射角分布 (点) 与拟合曲线 (线)

Fig. 5. Measured scattering angle distribution of different materials (dot) and fitting curve (line).

将穿过各材料的缪子事例等分为 8 组做平行实验, 按上述方法分别计算 5 种材料在平行实验组的辐射长度值, 对平行实验的结果取均值以减小随机误差. 在 Geant4 中构建 C, Al, Fe, Pb, W 5 种材料模型, 按照与实验相同步骤进行模拟计算. 表 2 为 5 种材料辐射长度的实验结果、模拟结果以及与劳伦斯伯克利实验室提供的辐射长度标准值^[25]比

较得到的相对误差. 由表 2 可知, 重建 5 种材料辐射长度的模拟结果与辐射长度标准值也存在一些偏差. 由于模拟中不存在缪子径迹的测量误差, 模拟结果的误差为重建材料辐射长度算法带来的方法误差. 该方法误差的来源为两部分, 一是用离散能量缪子散射角分布近似连续能量的缪子散射角分布产生的误差, 二是对散射角测量值拟合的误差. 方法误差通常在 15% 以内浮动. 在实验结果中, Pb 和 W 两种高原子序数材料的重建辐射长度误差较小, 分别为 4.7% 和 9.7%; 而低原子序数材料受到实验测量误差的影响, 重建辐射长度的误差较大, 第 4 节将进一步分析测量误差对计算不同材料辐射长度值的影响.

表 2 不同材料辐射长度的估计值与相对误差

Table 2. Estimated radiation lengths of different materials with relative error.

	实验结果/cm (相对误差/%)	模拟结果/cm (相对误差/%)	标准值/cm
C	1.985 (89.7)	17.050 (11.7)	19.320
Al	1.572 (82.3)	8.550 (3.9)	8.897
Fe	1.049 (40.3)	1.875 (6.7)	1.757
Pb	0.5878 (4.7)	0.5629 (0.3)	0.5612
W	0.3845 (9.7)	0.3583 (2.2)	0.3504

本文引入受试者工作特征曲线 (ROC) 评价两种材料之间鉴别的准确度, 该曲线可反映各数据集整体的区分能力. 其中 AUC 值为 ROC 曲线下方面积, AUC 值越接近 1, 代表各材料之间的鉴别准确度越高. 本实验以材料辐射长度作为特征量, 用二分类法对 5 种材料中密度相邻的材料进行两两鉴别. 将 5 种材料分为 C-Al, Al-Fe, Fe-Pb, Pb-W 四个实验组, 计算每种材料的辐射长度样本值 30 个. 待鉴别的两种材料的辐射长度样本混合后由小到大进行排序, 从最小值到最大值之间等间隔选取阈值对混合样本逐个判断鉴别材料种类. 对于单个阈值, 材料分类准确率为准确分类的样本个数与混合样本总数之比. 随着阈值的改变, 分类准确率也不断变化. 材料鉴别准确率定义为在所有阈值下分类准确率的极大值, 对应的阈值为最优阈值.

绘制各实验组材料鉴别的 ROC 曲线并计算曲线下面积 AUC 值. 四个实验组的 ROC 曲线及材料鉴别准确率见图 6 和表 3. 结果表明, 在各样本值对应 1400 个缪子事例下, 四个实验组材料鉴别的 AUC 值均在 0.9 以上. 其中 Al-Fe 和 Fe-Pb 在

95% 的置信水平下可以区分; C-Al, Pb-W 在 85% 的置信水平下可以区分。

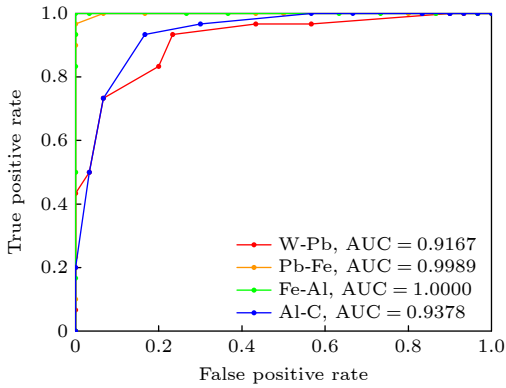


图 6 材料鉴别实验 ROC 曲线

Fig. 6. ROC curve of material distinguishment experiment.

表 3 各材料鉴别准确率

Table 3. Distinguishment accuracy of the different materials.

鉴别材料	C-Al	Al-Fe	Fe-Pb	Pb-W
准确率/%	88.3	100	98.3	85.0

材料鉴别的准确度也与两种材料间辐射长度的差值大小 (材料密度差异) 有关. 本研究以 Pb 材料为参照, 模拟了 Ag, Cd, Sn, Cu 四种辐射长度递增的材料与 Pb 进行区分, 各材料的鉴别准确率与辐射长度的关系如表 4 所列. 使用缪子离散能量的材料鉴别方法可在 95% 置信水平下区分辐射长度差值大于 0.7 cm 的两种材料。

表 4 材料鉴别准确率与辐射长度的关系

Table 4. Materials distinguishment accuracy versus the radiation length.

材料种类	辐射长度标准值/cm	与Pb材料鉴别准确率/%
Pb	0.5612	—
Ag	0.8543	81.7
Cd	1.040	91.7
Sn	1.206	95.0
Cu	1.568	100.0
Fe	1.757	100.0

对比分析引入缪子离散能量信息与不引入缪子能量信息对材料鉴别准确度的提升效果. 在不引入缪子能量信息时, 需要假定入射缪子能量为常数, 材料鉴别方法只能利用缪子散射角大小作为判断标准. 计算本实验中缪子穿过 Pb 和 W 散射角的平方平均值作为特征量, 在不引入缪子能量信息

下对 Pb-W 进行材料鉴别, 并与上文中引入缪子离散能量信息的 Pb-W 鉴别进行对比, 结果如图 7 所示. 引入离散缪子能量信息后, Pb-W 鉴别的 AUC 值与准确率分别相比前者提升了 16.7% 和 18.5%, 由此表明引入离散缪子能量信息可以提高重核材料鉴别的准确度。

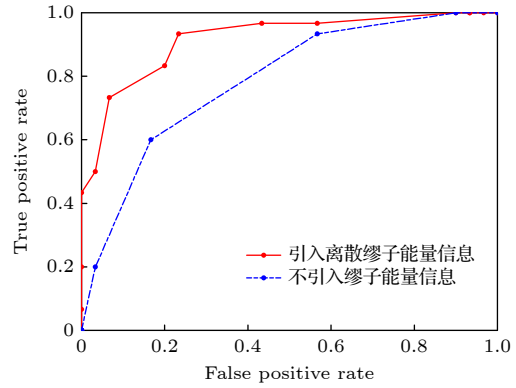


图 7 两种方法鉴别铅-钨的 ROC 曲线对比

Fig. 7. ROC curves of the lead-tungsten distinguishment performed by different method.

4 径迹测量误差对鉴别准确度的影响

在实验测量过程中, 由于探测器存在一定的位置分辨率, 电子学读出以及径迹拟合等过程也存在一定误差, 多种因素影响到测量的缪子坐标与缪子真实位置产生了偏差. 为分析探测器径迹测量误差对材料鉴别准确度的影响, 本节模拟计算径迹测量误差分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm 时 5 种材料的辐射长度值. 各材料辐射长度相对误差与径迹测量误差之间的关系如图 8 所示。

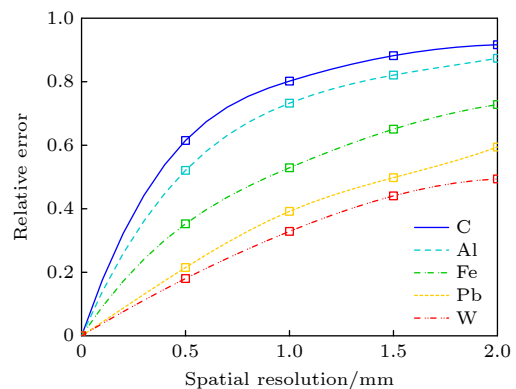


图 8 径迹测量误差与各材料辐射长度误差的关系

Fig. 8. Relationship between measurement error and the radiation length error of different materials.

图 8 表明各材料的辐射长度误差随径迹测量

误差的增加而增加. 在相同水平的测量误差下, 代入缪子离散能量计算低原子序数材料辐射长度的误差大于高原子序数材料辐射长度的误差. 探测器的径迹测量误差影响材料辐射长度的计算精度, 进而影响材料鉴别的准确度. 随着测量误差的增大, C-Al 实验组和 Pb-W 实验组的 ROC 曲线变化如图 9 所示. 图 9 表明, 随着径迹测量误差的增加, 两实验组的鉴别准确率均不断降低. 与精准测量相比, 当缪子径迹测量存在 1 mm 的误差时, C-Al 鉴别的 AUC 值降低了 11.1%; Pb-W 鉴别的 AUC 值降低了 9.8%. 当径迹测量存在 2 mm 的误差时, C-Al 鉴别的 AUC 值降低了 21.6%; Pb-W 鉴别的 AUC 值降低了 16.6%. 由此表明径迹测量误差对高原子序数材料间鉴别的影响较小.

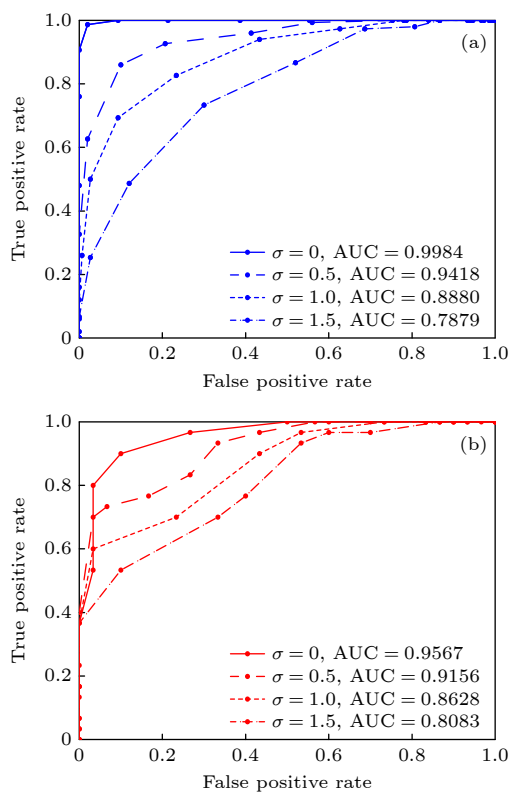


图 9 不同径迹测量误差下鉴别 ROC 曲线 (a) C-Al; (b) Pb-W
Fig. 9. ROC curve of distinguishment under the different measurement error: (a) C-Al; (b) Pb-W.

5 总结

本文介绍了基于缪子离散能量进行材料鉴别的实验方法. 基于缪子散射现象, 通过已知厚度的铅块标定出离散能量的权重系数, 测量样品的散射角计算得到各材料的辐射长度值, 并以此为特征量

进行不同材料的鉴别. Pb 和 W 两种材料辐射长度的实验值与标准值相比, 分别相差 4.7% 和 9.7%. 在约 1400 个有效缪子事例下, 分组对比实验表明, Al-Fe 和 Fe-Pb 在 95% 的置信水平下可以区分. 进一步模拟表明, 引入缪子离散能量可在 95% 置信水平下区分辐射长度差值大于 0.7 cm 的两种材料, 并且相比于不引入缪子能量信息时, 对 Pb-W 鉴别的准确率提高了 18.5%. 此外, 高原子序数材料的鉴别准确度受测量误差的影响较小.

参考文献

- [1] Bonechi L, D'Alessandro R, Giammanco A 2020 *Rev. Phys.* **5** 100038
- [2] Blanpied G, Kumar S, Dorroh D, et al. 2015 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **784** 352
- [3] Sossong M, Blanpied G, Kumar S, et al. 2015 *Nuclear Threats and Security Challenge* (Dordrecht: Springer) pp229–243
- [4] Morishima K, Kuno M, Nishio A, et al. 2017 *Nature* **552** 386
- [5] Alvarez L W, Anderson J A, Bedwei F E, et al. 1970 *Science* **167** 832
- [6] Su N, Liu Y Y, Wang L, Cheng J P 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 064201 (in Chinese) [苏宁, 刘圆圆, 王力, 程建平 2022 物理学报 **71** 064201]
- [7] Oláh L, Tanaka H K M, Hamar G, et al. 2019 *Philos. Trans. R. Soc. A* **377** 20180135
- [8] Tioukov V, Alexandrov A, Bozza C, et al. 2019 *Sci. Rep.* **9** 1
- [9] Miyadera H, Borozdin K N, Greene S J, et al. 2013 *AIP Adv.* **3** 052133
- [10] Perry J, Azzouz M, Bacon J, et al. 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 184909
- [11] Poulson D, Durham J M, Guardincerri E, et al. 2017 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **842** 48
- [12] Borozdin K N, Hogan G E, Morris C, et al. 2003 *Nature* **422** 277
- [13] Priedhorsky W C, Borozdin K N, Hogan G E, et al. 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 4294
- [14] Schultz L J, Borozdin K N, Gomez J J, et al. 2004 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **519** 687
- [15] Vanini S, Calvini P, Checchia P, et al. 2019 *Philos. Trans. R. Soc. A* **377** 20180051
- [16] Bae J, Chatzidakis S 2021 arXiv: 2109.02470 [physics.ins-det]
- [17] Morris C L, Bacon J, Borozdin K, et al. 2013 *AIP Adv.* **3** 082128
- [18] Anghel V, Armitage J, Baig F, et al. 2015 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **798** 12
- [19] Luo Z F 2016 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [罗志飞 2016 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [20] Particle Data Group, Workman R L, Burkert V D, et al. 2022 *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2022** 083C01
- [21] Bethe H A 1953 *Phys. Rev.* **89** 1256
- [22] Lynch G R, Dahl O I 1991 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **58** 6
- [23] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. 2003 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **506** 250
- [24] Hagnann C, Lange D, Verbeke J, et al. 2012 *Lawrence Livermore National Laboratory Document UCRL-TM-229453*
- [25] Particle Data Group <http://pdg.lbl.gov/2011/AtomicNuclearProperties> [2022-8-15]

Experimental study on material discrimination based on muon discrete energy*

Li Yu-Peng Tang Xiu-Zhang[†] Chen Xin-Nan Gao Chun-Yu
Chen Yan-Nan Fan Cheng-Jun Lü Jian-You

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

(Received 18 August 2022; revised manuscript received 14 October 2022)

Abstract

Cosmic-ray muon is a kind of charged particle with strong penetrating capability and sensitivity to high atomic number materials. In recent years, muonography emerged as a novel technique by using cosmic-ray muon to image unknown volume, and is widely applied to nuclear security, geosciences, archaeology and civil engineering. The effect of multiple Coulomb scattering between muons and materials with different atomic number is different, and the scattering angle is related to material Z and muon energy. If we can measure muon scattering angle and muon energy, we can identify the category of material interacted with muon. However, it is difficult to measure the energy of each muon in real time, most of the researches use the mean muon energy ~ 4 GeV to alternate each muon energy which causes image to blurred and material discrimination accuracy to decrease. This article introduces a method of using the discrete muon energy to fit the scattering angle distribution derived from continuous muon energy and estimate the weight of each discrete muon energy. Then measure the scattering angle of the material to be identified, histogram the scattering angle and couple it with the calibrated scattering angle distribution by discrete muon energy. The last step is to calculate the radiation length from the above equation. The radiation length is a characteristic quantity of the material, and used to identify materials in this method. We carry out the experiment on material's discrimination based on the apparatus of cosmic-ray muon tomography made by China Institute of Atomic Energy. The system contains 6 layers, consisting of several drift tube detectors planted in two orthogonal coordinate for tracking muon trajectory. Five materials are selected to be distinguished in the experiment, they being C, Al, Fe, Pb, and W. The scattering angles formed by muons passing through these materials are measured respectively, and their radiation lengths are measured and identified in pairs. In order to evaluate material discrimination accuracy, we plot the ROC curve between each pair of materials. The result reveals that Al-Fe and Fe-Pb can be effectively identified at a 95% confidence level, under 1400 valid muon events. Considering that the difference in material density also influences discrimination accuracy, we simulate several other materials identified by Pb. It is concluded that this method can identify the materials with radiation length greater than 0.7 cm. Compared with the discrimination method of unknowing muon energy, this method improves the accuracy of Pb-W discrimination by 18.5%.

Keywords: cosmic ray muon, muon tomography, discrete energy, material discrimination

PACS: 95.85.Ry, 42.30.Wb, 68.55.Nq

DOI: 10.7498/aps.72.20221645

* Project supported by the Fund for Stable Support Research in Ministry of Finance, China (Grant No. WDJC-2019-05).

[†] Corresponding author. E-mail: tangxz@ciae.ac.cn



基于缪子离散能量的材料鉴别实验研究

李雨芃 汤秀章 陈欣南 高春宇 陈雁南 范澄军 吕建友

Experimental study on material discrimination based on muon discrete energy

Li Yu-Peng Tang Xiu-Zhang Chen Xin-Nan Gao Chun-Yu Chen Yan-Nan Fan Cheng-Jun Lü Jian-You

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 029501 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221645

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221645>

当期内容 View table of contents: <https://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秦始皇陵地宫宇宙射线缪子吸收成像模拟研究

Muon radiography simulation for underground palace of Qinshihuang Mausoleum

物理学报. 2022, 71(6): 064201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211582>

基于散射和次级诱发中子的缪子多模态成像

Multimodal imaging of muon based on scattering and secondary induced neutrons

物理学报. 2021, 70(19): 191401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210804>

缪子多模态成像图像质量分析

Image quality evaluation of multimodal imaging of muon

物理学报. 2022, 71(2): 021401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211083>

膝区宇宙线广延大气簇射次级成分的特征

Properties of secondary components in extensive air shower of cosmic rays in knee energy region

物理学报. 2022, 71(24): 249601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221556>

Duffing振子型结构声系统中声能量非互易传递的建模和实验研究

Modeling and experimental study of non-reciprocal acoustic energy transfer in vibro-acoustic Duffing oscillator

物理学报. 2022, 71(10): 104301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212181>

基于超二次曲面的颗粒材料缓冲性能离散元分析

Discrete element analysis of buffering capacity of non-spherical granular materials based on super-quadric method

物理学报. 2018, 67(9): 094501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172549>