

基于塑料闪烁体探测器的宇宙线缪子与 太阳调制效应观测*

王德鑫¹⁾²⁾ 张蕊¹⁾ 尉德康³⁾ 那蕙¹⁾ 姚张浩¹⁾ 吴凌赫¹⁾
张苏雅拉吐^{1)2)†} 梁泰然¹⁾ 黄美容¹⁾²⁾ 王志龙¹⁾²⁾ 白宇¹⁾²⁾
黄永顺¹⁾²⁾ 杨雪¹⁾²⁾ 张嘉文³⁾ 刘梦迪³⁾ 马菁³⁾
于静³⁾ 纪秀艳³⁾ 于伊丽琦³⁾ 邵学鹏^{3)‡}

1) (内蒙古民族大学物理与电子信息学院, 通辽 028043)

2) (内蒙古民族大学核物理研究所, 通辽 028043)

3) (通辽市气象局, 通辽 028000)

(2024 年 12 月 10 日收到; 2024 年 12 月 24 日收到修改稿)

利用塑料闪烁体探测器进行了宇宙线缪子计数谱及各向异性特性的观测实验. 实验采用双端符合测量和标准 γ 源进行能量刻度, 显著减小了探测器的噪声干扰, 提高了测量数据的可靠性. 通过引入温度与气压修正函数, 对计数结果进行了气象效应校正. 实验结果显示, 缪子在塑料闪烁体探测器中的能量损失呈现出随时间和太阳活动变化的周期性特征, 反映出太阳对宇宙线各向异性的调制效应. 此外, 实验数据与羊八井观测站中子-缪子望远镜的观测结果在缪子计数的日周期变化趋势上表现出较高的一致性. 本研究为深入探索宇宙线缪子的能量分布及太阳调制效应提供了可靠的实验依据, 同时为宇宙线探测技术的应用与发展提供了重要参考.

关键词: 宇宙线, 缪子, 各向异性, 塑料闪烁体, 太阳调制效应

PACS: 92.60.Pw, 95.55.Vj

DOI: 10.7498/aps.74.20241704

CSTR: 32037.14.aps.74.20241704

1 引言

宇宙线是一种高速运动的高能粒子流, 主要来源于银河系外的恒星、超新星遗迹以及活动星系核等天体^[1]. 当原初宇宙线进入地球大气层后, 与大气分子发生碰撞产生次级粒子, 包括缪子、中子和电子等^[2,3]. 这些次级粒子与地磁场和太阳风等环

境因素相互作用后, 表现出复杂的能量分布、强度变化以及各向异性特征^[4,5]. 宇宙线研究不仅有助于揭示粒子加速机制, 还对理解太阳活动及地球空间环境中的物理过程具有重要意义^[1,2].

在宇宙线次级粒子的研究中, 缪子因其是地表探测中的主要组成成分之一, 且具有相对稳定的特性, 成为研究宇宙线特性的重要对象^[6-11]. 例如, 刘珺等^[7,8]采用小波变换和折叠周期分析方法, 对羊

* 国家自然科学基金 (批准号: 12365018, U2032146, 12465024)、内蒙古自治区自然科学基金 (批准号: 2023MS01005, 2024ZD23, 2024FX30) 和内蒙古自治区科技英才项目 (批准号: NMGI2217, NJYT23109) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zsytl@imn.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: shaouxuepeng78@163.com

八井观测站的宇宙线数据进行了气象效应分析, 揭示了缪子流强的日变化及其与温度、气压变化的密切关系. 相关研究表明, 气象因素对地表缪子计数具有显著影响, 尤其是气压和温度的波动会引起缪子计数的周期性变化. 因此, 为了提高观测数据的可靠性, 需要对这些气象效应进行修正. 此外, 研究还表明, 太阳活动通过对宇宙线的调制影响次级粒子的分布和强度, 这一现象为揭示太阳调制效应提供了重要线索^[6].

近年来, 塑料闪烁体因具有低成本、高探测效率和优异的时间响应性能, 被广泛应用于宇宙线缪子的探测^[12-16]. 与其他类型的探测器相比, 塑料闪烁体具有响应时间快、信号稳定的优势, 适用于实时测量和大面积探测^[12]. 在缪子测量方面, 何韦杰和李波^[15]使用塑料闪烁体结合光电倍增管, 开发了一种用于缪子寿命测量的探测装置, 并实现了纳秒量级的时间分辨率. 王启奇等^[12]在塑料闪烁光纤的缪子探测实验中, 定量分析了光纤中的光子产额, 证明了闪烁体的光子计数方法可用于缪子的低能量光子测量.

然而, 关于塑料闪烁体在宇宙线各向异性和气象效应研究中的系统应用仍较少见. 因此本文利用塑料闪烁体探测器, 开展了对宇宙线缪子能量分布及日周期性变化的观测实验. 通过双端符合测量和能量刻度, 有效降低了噪声干扰, 并结合气象效应校正, 提高了测量数据的准确性. 本文的研究旨在揭示缪子计数的日周期性变化特征, 探索太阳调制效应在宇宙线缪子中的表现, 为理解宇宙线各向异性及其调制机制提供实验依据.

2 实验与数据处理

2.1 实验装置

本实验采用北京高能科迪公司生产的 HND-S2 双端输出型长条塑料闪烁体探测器, 其尺寸为 $1000 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 由聚苯乙烯、对联三苯和移波剂制成, 发射光谱主峰位在于 423 nm , 具有快速时间响应探测. 其脉冲上升时间为 0.7 ns , 衰减时间为 2.6 ns , 脉冲半高宽为 1.8 ns , 塑料闪烁体内平均氢碳原子比为 $1:1$ ^[17]. 在塑料闪烁体表面包裹一层厚度为 $50 \text{ }\mu\text{m}$ 的铝箔作为反射层, 以增加光在塑料闪烁体内表面的反射率, 提高光收集效率. 同时在最外面包裹一层黑色胶布, 避免自然

光对实验测量的影响. 该闪烁体两端分别耦合滨松 CR105-02 端窗型光电倍增管 (PMT), 由海阳博创公司生产的五路负高压模块为两端光电倍增管供电. 数据获取使用的是由意大利 CAEN 公司生产的桌面式数字化数据获取 DT5720B, 该设备具有四个通道, 最大信号幅度为 $2 V_{\text{pp}}$ (V_{pp} 为示波器波形信号幅值), 采样率高达 250 MS/s . 配合 COMPASS 数据处理软件, 可对信号的阈值、长/短门、信号长度等参数进行设置, 同时对数据进行在线和离线分析. 实验装置的示意图如图 1 所示.

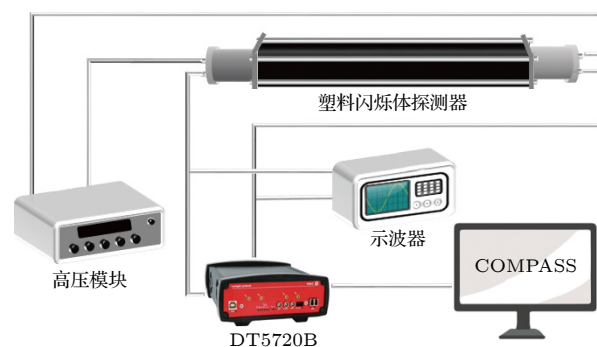


图 1 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

在实验过程中, 信号阈值和 PMT 电压的调节对数据的有效采集至关重要. 通过示波器观察信号波形, 综合考虑光电倍增管的性能与数据获取系统的参数, 最终将 PMT 的电压设定为 -785 V , 信号阈值设置为 100 mV , 两端 PMT 在示波器上的过阈信号如图 2 所示.

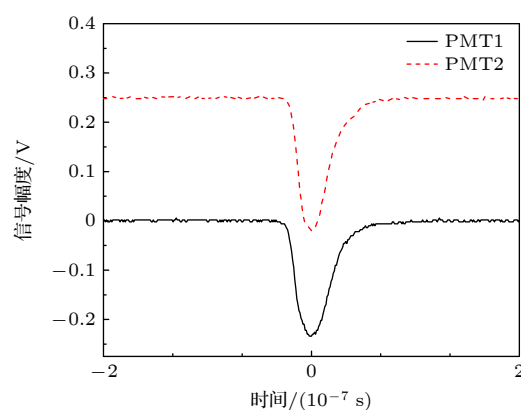


图 2 示波器上输出的两端 PMT 的过阈信号

Fig. 2. The over threshold signal of PMT at both ends output on the oscilloscope.

在确定输入电压之后, 将信号直接输入到 DT5720B 中, 在 COMPASS 软件中直接对两端

PMT 信号进行分析和处理. 由于 PMT 上存在热噪声和余波效应, 而宇宙线缪子信号在闪烁体两端在时间上有符合特性, 因此本实验采用双端读出方式, 来减小单端读出探测器的噪声干扰. 这种双端读出的方法在长条形塑料闪烁体探测器中常有应用^[17], 通过符合测量技术对关联事件的符合时间窗进行研究, 发现合适的符合时间窗设置可以提高真事件探测效率并降低本底噪声的影响. 除此之外, 在国内大型高能物理实验终端 RIBLL 中的粒子径迹探测器 PPAC 也曾采用类似的双端读出技术^[18–20], 以提高探测精度和降低噪声干扰. 这些实验通过在探测器的两端设置读出装置, 利用符合测量原理, 有效地区分了真实信号和噪声信号, 与本实验的双端读出方式具有相似的原理和目的.

因缪子与物质相互作用发出的光在 1 m 长的闪烁体中传播时间约为 5 ns, PMT 上升时间为 7 ns, 考虑到数据获取的响应, 最终确定当两路 PMT 在 15 ns 时间范围内同时测量到信号时, 才被认定为有效缪子事件, 并被数据获取所记录. 使用数字脉冲处理固件 (digital pulse processing firmware) 对信号进行在线处理, 获得缪子计数谱.

2.2 能量刻度

为了提高缪子能量测量的准确性, 本实验使用 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 标准 γ 源对塑料闪烁体探测器进行能量刻度. 由于探测器的能量分辨率会导致光输出谱具有一定的展宽, 无法直接确定康普顿电子的最大能量, 因此利用 γ 光输出谱中康普顿边缘的位置确定道址和能量的关系. 康普顿反冲电子的最大能量 E_c 由以下公式计算^[21]:

$$E_c = E_\gamma \frac{\frac{2E_\gamma}{m_e c^2}}{1 + \frac{2E_\gamma}{m_e c^2}}, \quad (1)$$

式中, E_γ 为标准放射源的入射能量, $m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$ 为电子的能量. 除标准 γ 源 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 外借助天然环境本底中的 ^{40}K 对测量的光输出谱进行了高斯拟合, 结果如图 3(a) 所示. 在康普顿边缘分布最大高度的 81% 位置确定了最大康普顿电子能量的准确位置^[22]. 结果显示, 探测器在 477, 1116 和 1243 keV 处的刻度点与理论值符合良好. 最终利用一阶线性公式对数据进行拟合, 得到的能量刻度曲线如图 3(b) 所示.

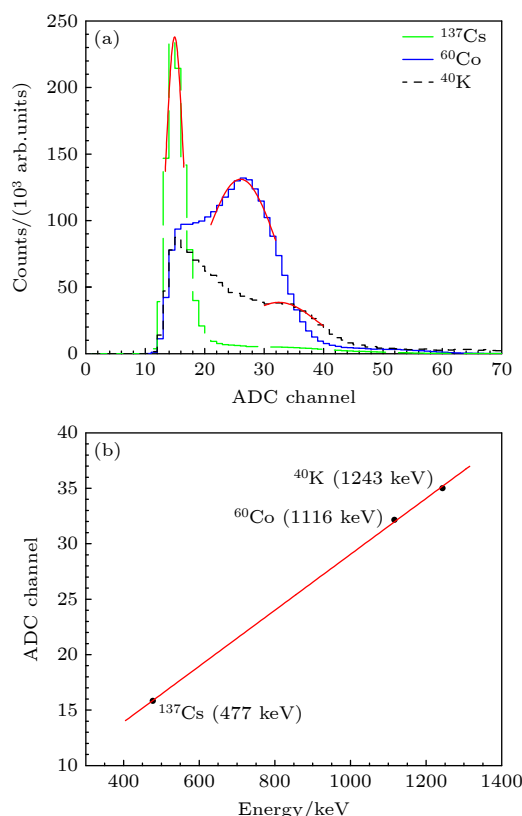


图 3 (a) 标准 γ 源光输出谱; (b) 能量刻度曲线

Fig. 3. (a) Standard γ source light output spectrum; (b) energy scale curve.

本实验测量时间从 2023 年 12 月 9 日持续至 2024 年 2 月 11 日, 利用 COMPASS 软件的循环存储功能, 每小时自动将当前计数谱数据存储在 txt 和 root 文件格式. 本次实验共收集到 1424 个文件, 使用欧洲核子中心开发的 root 软件包对实验数据进行离线处理和分析.

2.3 气象效应修正

当宇宙射线进入地球大气层后, 由于不同高度的温度和气压的变化使得宇宙线次级粒子的产生条件和通过大气的传输条件都发生了变化, 导致最终到达地球表面的缪子计数发生改变, 这就是宇宙线的气象效应^[7,9,13,23]. 因此为了研究地表的宇宙线缪子计数, 需要对其进行气象效应修正. 对于缪子计数关于气压和温度的修正公式可以表示为

$$I = I' \times f(T) \times g(P), \quad (2)$$

式中, I 是修正后的缪子计数, I' 是初始的缪子计数, $f(T)$ 是温度修正函数, $g(P)$ 是气压修正函数. 温度和气压修正函数可分别表示为

$$f(T) = 1 + \alpha_T I_0 \frac{T - T_0}{T_0}, \quad (3)$$

$$g(P) = e^{-\beta \times (P - P_0)}, \quad (4)$$

其中 α_T 是温度修正系数, I_0 是实验期间的缪子平均计数, T 是实际环境温度, T_0 是实验期间的平均环境温度 [24]. β 是气压修正系数, P 是实际气压, P_0 是实验期间的平均气压. 实验期间每日的气象数据 (温度和气压) 主要由通辽市气象局提供, 如图 4(a) 所示.

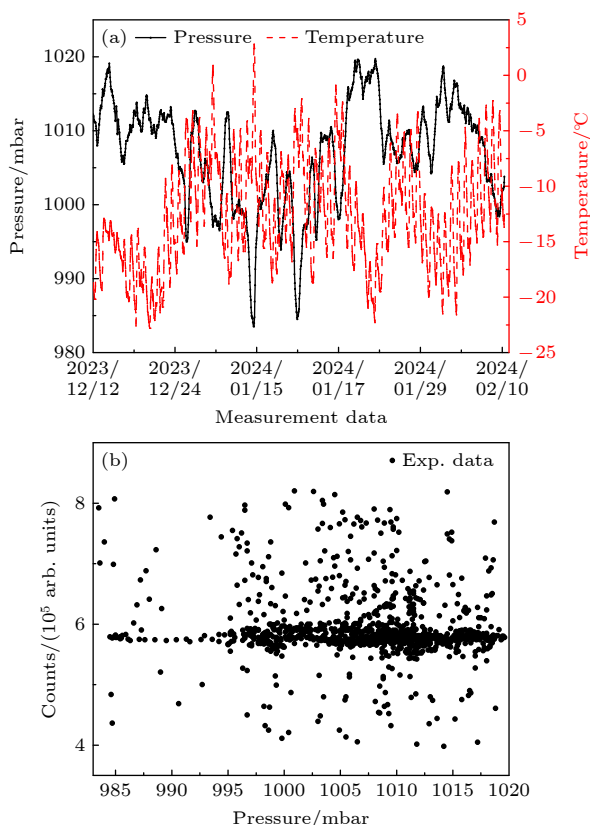


图 4 (a) 实验期间的气象数据信息图; (b) 气压修正后的计数

Fig. 4. (a) Meteorological data information chart during the experiment; (b) count after pressure correction.

大气温度影响初级宇宙射线相互作用, 随着大气温度升高气体密度降低, 初级宇宙线相互作用概率减小, 使地表观测到的缪子计数率降低. 根据文献 [25] 可知, 缪子计数与大气温度变化之间的相关系数 $\alpha_T = 0.873$. 在本次实验中, 虽然温度修正函数是气象效应修正的重要组成部分, 但经分析发现其对最终结果的影响相对较小. 这主要是因为实验期间的温度波动范围有限, 例如, 实验期间最高温度与最低温度的差值相对较小, 使得 $\frac{T - T_0}{T_0}$ 的值

变化不大. 同时, 结合温度修正系数 α_T 以及其他因素综合考虑, 温度修正对缪子计数率的改变幅度不如气压修正明显.

有研究表明 [26], 宇宙射线强度与环境气压之间存在线性相关, 因此可以采用线性回归法计算气压相关系数 β :

$$\beta = r(\sigma_I/\sigma_P), \quad (5)$$

式中 σ_I 和 σ_P 为强度和气压的标准差, 分别表示为 $\sigma_I^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_0)^2$, $\sigma_P^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - P_0)^2$, r 为回归系数 $r = \frac{1}{\sigma_I \sigma_P N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_0)(P_i - P_0)$. 将实验时得到的每小时缪子计数以及相应时间的气压参数代入 (5) 式, 并采用最小二乘法进行拟合, 得到 $\beta = -0.16$. 最终修正后的气压和缪子计数的关系如图 4(b) 所示.

3 结果与讨论

3.1 宇宙线缪子计数谱

本实验所测量的缪子主要是由宇宙银河射线产生的. 缪子与闪烁体反应产生电子, 由于电子能量较高, 闪烁体体积较小, 高能缪子在能谱中的贡献较小, 因此测量得到的计数谱和文献中的能谱有较大差异. 对于高能缪子, 其在塑料闪烁体中的比动能损失为 2 MeV/cm [27], 当其竖直穿过厚度为 50 mm 的探测器时, 最大损失能量为 10 MeV. 图 5 为本实验中测量得到的缪子计数谱, 从图中可以看出康普顿边缘在 10 MeV 存在一个高斯峰, 这与理论计算的能谱结果是比较符合的.

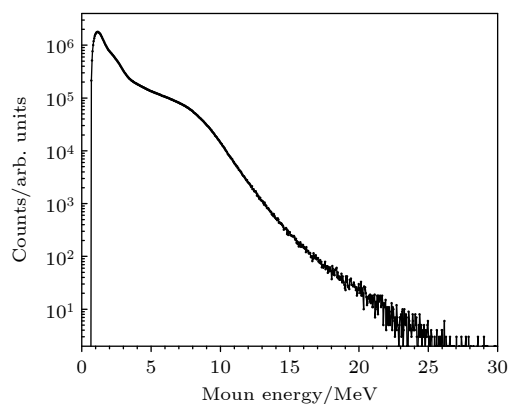


图 5 本实验中的测量宇宙线缪子计数谱

Fig. 5. Measurement of cosmic ray muon spectra in this experiment.

3.2 太阳对宇宙线各向异性的调制效应

由于本文测量的缪子主要是银河宇宙线进入大气层后反应产生的. 当银河宇宙线在进入太阳系并穿越太阳风区域时, 会受到太阳活动的影响而发生变化. 这些变化包括宇宙线强度、方向、成分和能谱等方面的调制^[4]. 图 6 展示了本次实验中测量日期和时间相关的计数变化, 上方图时间为时间累积下的计数分布, 右侧图则是每日 24 小时内的缪子计数变化.

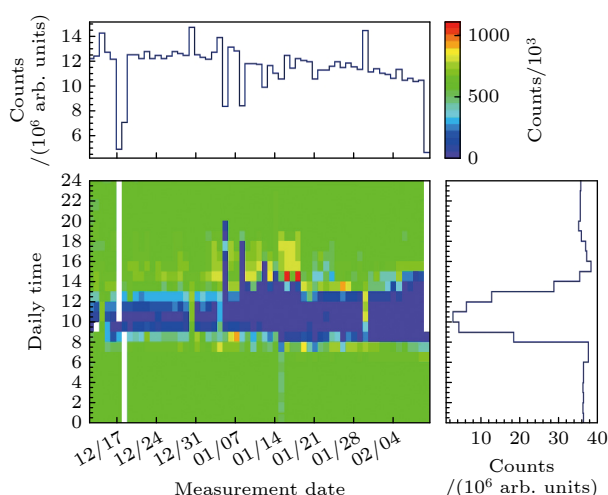


图 6 本实验中的测量日期与时间相关的二维计数谱及其在 x 轴和 y 轴上的投影

Fig. 6. The two-dimensional counting spectra of measurement dates and daily time in this experiment, as well as their projections on the x and y axes.

从实验结果可以看出, 从 2023 年 12 月至 2024 年 2 月, 测量地点的缪子计数呈现出显著的日周期性变化特征. 每天 8 时至 13 时, 缪子计数明显较低, 而其他时间段则相对较高. 这种计数变化趋势与太阳调制效应密切相关^[6].

随着地球自转, 观测点与太阳位置的相对关系变化导致昼夜间计数的波动. 白天 8 时至 13 时期间, 太阳位于观测点上方, 太阳对来自该方向的银河宇宙线形成遮挡, 导致这段时间内的缪子计数减少. 相反在晚间, 观测点远离太阳方向, 宇宙线缪子计数随之增加. 实验结果与理论模型一致, 进一步揭示了太阳调制效应对地表宇宙线缪子分布的影响机制^[6].

3.3 羊八井数据验证

在宇宙线缪子相关研究领域, 羊八井观测站在

宇宙线观测方面具有极高的国际知名度. 多年来, 该观测站积累了大量高质量、长周期的数据, 其在宇宙线研究领域的权威性得到了广泛认可^[6,28,29]. 这些数据为全球范围内的宇宙线相关研究提供了重要的参考依据, 能够为我们的实验结果提供一个具有公信力的对比基准. 因此, 为了验证本文实验数据的准确性与观测结果的普适性, 选取羊八井宇宙线观测站中子-缪子望远镜在相同时间段内的观测数据^[30]进行对比分析 (见图 7). 羊八井观测站的数据同样表现出每天 8 时至 12 时计数较低的特点, 其变化趋势与本实验中的缪子探测计数变化相似, 这种变化与该地区太阳辐照度的“单峰”倒“U”形分布相关联. 这一现象验证了太阳对宇宙线的各向异性调制效应在不同地区的普遍性, 并在一定程度上说明塑料闪烁体探测器在宇宙线缪子计数观测中的有效性.

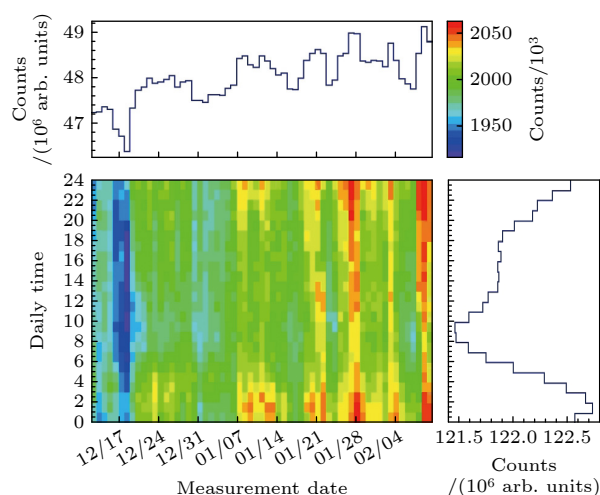


图 7 同一日期下的羊八井宇宙线观测站中子-缪子望远镜的计数二维谱以及其在 x 轴和 y 轴上的投影

Fig. 7. The two-dimensional spectrum of the count of the neutron muon telescope at the Yangbajing Cosmic Ray Observatory on the same date, as well as its projection on the x and y axes.

然而, 由于探测器灵敏度和能量范围的差异, 在全天的其他时间段内, 计数变化仍然存在微小差异. 羊八井站的中子-缪子望远镜对高能缪子的探测灵敏度较高, 而本文使用的塑料闪烁体探测器对较低能量的缪子有更高的灵敏度. 该差异体现了设备响应范围的不同, 同时表明未来在多种探测器之间进行交叉校准的必要性, 以便更全面地探测宇宙线粒子.

本实验所获得的宇宙线缪子计数与羊八井实

验结果对比如图 8 所示. 从图中可以看出, 本实验和羊八井实验所获得的归一化宇宙线缪子计数在 2023 年 12 月至 2024 年 2 月期间都呈现出一定的周期性波动. 两条曲线的波动模式在某些时间段较为相似, 例如在 12 月下旬到 1 月上旬, 以及 1 月中旬到下旬, 都有较为明显的上升和下降趋势. 尽管整体趋势相似, 但在具体的计数数值上存在一定差异. 羊八井实验的数据在大部分时间内波动幅度相对较大, 而本实验的数据波动相对较为平缓. 这种差异可能是由于两个实验所处的地理位置不同, 导致地磁截止刚度不同. 不同的地磁截止刚度会影响宇宙线缪子到达探测器的数量和能量分布. 也可能是实验装置的差异, 导致计数结果的不同. 本实验使用的是双端输出型长条塑料闪烁体探测器, 而羊八井实验采用的是中子-缪子望远镜探测器阵列.

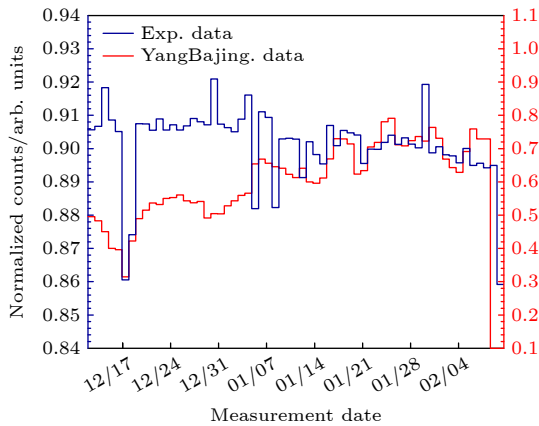


图 8 归一化后的本实验所获得的宇宙线缪子计数与羊八井实验结果对比

Fig. 8. Comparison between the normalized cosmic ray muon counts obtained in this experiment and the results of the Yangbajing experiment.

4 结 论

本研究通过双端输出型长条塑料闪烁体探测器, 实验测量了宇宙线缪子的计数谱数据及其计数率的日周期变化特征, 进一步验证了太阳调制效应在宇宙线缪子中的表现形式. 通过长时间的观测和双端符合测量方法, 我们降低了单端探测器的噪声影响, 获得了缪子的计数谱数据. 实验结果显示, 在一天的 24 小时内, 缪子计数表现出显著的日周期性波动, 特别是每天 8 时至 13 时计数最低, 这一现象与太阳对银河宇宙线的遮挡效应一致, 证实了太阳调制效应在地表宇宙线缪子观测中的影响.

为验证观测数据的可靠性, 将本实验结果与羊八井宇宙线观测站的数据进行了对比分析, 发现两地观测数据的变化趋势表现出较高的一致性, 尤其是在缪子计数的日周期变化方面, 这一现象进一步支持了太阳对宇宙线各向异性调制的普适性, 并验证了塑料闪烁体探测器在中低能宇宙线缪子观测中的可靠性. 基于本实验中双端读出方式所展现的优势, 进一步优化双端读出的信号处理算法至关重要. 可以借鉴对符合时间窗的设置和优化方法, 并探索采用更先进的数字信号处理技术, 如基于机器学习或人工智能算法对信号进行分类和识别, 提高数据处理效率和准确性. 同时, 开展多探测器联合研究, 例如, 结合不同类型的探测器 (如塑料闪烁体探测器与半导体探测器), 并利用多端读出技术进行协同探测, 可获取更全面的宇宙线粒子信息, 为深入研究宇宙线的物理特性提供更有力的手段.

感谢中国科学院高能物理研究所张吉龙老师为本文提供的羊八井宇宙线观测站的关键数据及有益讨论.

参考文献

- [1] Liu J, Cao Z 2024 *Physics* **53** 237 (in Chinese) [刘佳, 曹臻 2024 *物理* **53** 237]
- [2] Li C, Yang R Z, Cao Z 2024 *Chin. Sci. Bull.* **69** 2698 (in Chinese) [李聪, 杨睿智, 曹臻 2024 *科学通报* **69** 2698]
- [3] Axi Kugu, Zhou X X, Zhang Y F 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 129201 (in Chinese) [阿西克古, 周勋秀, 张云峰 2024 *物理学报* **73** 129201]
- [4] Compton A H, Getting I A 1935 *Phys. Rev.* **47** 817
- [5] Song X J, Luo X 2022 *Proc. of the Joint Annual Meeting of Chinese Earth Sciences-1* (Beijing: Beijing Botong Press) p9 (in Chinese) [宋小健, 罗熙 2022 年中国地球科学联合学术年会论文集-1 (北京: 北京伯通电子出版社) 第 9 页]
- [6] Tong F, Jia H Y, Zhou X X, et al. 2015 *Nucl. Phys. Rev.* **32** 286 (in Chinese) [仝帆, 贾焕玉, 周勋秀等 2015 *原子核物理评论* **32** 286]
- [7] Liu J, Zhou D W 2007 *J. Zhengzhou Univ. (Nat. Sci. Ed.)* **01** 75 (in Chinese) [刘珺, 周德文 2007 *郑州大学学报 (理学版)* **01** 75]
- [8] Liu J, Jia H Y, Huang Q 2004 *Nucl. Phys. Rev.* **01** 38 (in Chinese) [刘珺, 贾焕玉, 黄庆 2004 *原子核物理评论* **01** 38]
- [9] Jia H Y, Cao Z, Zhang H M 1994 *High Energy Phys. Nucl. Phys.* **09** 788 (in Chinese) [贾焕玉, 曹臻, 张慧敏 1994 *高能物理与核物理* **09** 788]
- [10] Liu Y, Niu H R, Li B B, et al. 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 140202 (in Chinese) [刘烨, 牛赫然, 李兵兵等 2023 *物理学报* **72** 140202]
- [11] Aemnomori M, Ayabe S, Cui S, et al. 2005 *The Astrophysical Journal* **626** L29
- [12] Wang Q Q, Zhang X, Tian L C, et al. 2023 *J. Nucl. Tech.* **46** 17 (in Chinese) [王启奇, 张湘, 田立朝等 2023 *核技术* **46** 17]
- [13] Liu X M, Song X J, Geng Z K, et al. 2024 *Chin. J. Geophys.*

- 67 1299 (in Chinese) [刘新铭, 宋小健, 耿泽坤等 2024 地球物理学报 67 1299]
- [14] Xiao Z Y, Wang Z C, Huang X, et al. 2022 *Guangxi Phys.* **43** 8 (in Chinese) [肖政耀, 王梓丞, 黄新等 2022 广西物理 43 8]
- [15] He W J, Li B 2024 *College Phys.* **43** 60 (in Chinese) [何韦杰, 李波 2024 大学物理 43 60]
- [16] Yin J, Zhang Y P, Ni F F, et al. 2017 *Nuclear Electronics Detection Technology* **37** 929 (in Chinese) [尹俊, 张亚鹏, 倪发福等 2017 核电子学与探测技术 37 929]
- [17] Pi B S, Wei Z Y, Wang Z, et al. 2017 *J.Nucl.Tech.* **40** 61 (in Chinese) [皮本松, 魏志勇, 王振等 2017 核技术 40 61]
- [18] Han J X, Ye Y L, Lou J L, et al. 2023 *Commun. Phys.* **6** 220
- [19] Geng P, Duan L M, Ma Peng, et al. 2010 *Nuclear Phys. Rev.* **27** 450 (in Chinese) [耿朋, 段利敏, 马朋等 2010 原子核物理评论 27 450]
- [20] Hao J X, Guo G, Sun B H 2024 *College Phys.* **43** 55 (in Chinese) [郝佳欣, 郭戈, 孙保华 2024 大学物理 43 55]
- [21] Chang L, Liu Y D, Du L, et al. 2015 *J. Nucl. Tech.* **38** 46 (in Chinese) [常乐, 刘应都, 杜龙等 2015 核技术 38 46]
- [22] Zhang S Y L T, Chen Z Q, Han Rui, et al. 2013 *Chin. Phys. C* **37** 71
- [23] Tang Q Y, Lu H, Le G M, et al. 2004 *Chinese Journal of Space Science* **24** 219 (in Chinese) [唐云秋, 卢红, 乐贵明等 2004 空间科学学报 24 219]
- [24] Xu C L, Wang Y, Qin G, et al. 2023 *Res. Astron. Astrophys.* **23** 025010
- [25] Adamson P, Andreopoulos I C, Arms K E, et al. 2010 *Phys. Rev. D* **81** 012001
- [26] Dorman L I 1974 *Cosmic Rays, Variation and Space Exploration* North-Holland
- [27] Erhart A, Wagner V, Wex A, et al. 2024 *Eur. Phys. J. C* **84** 1
- [28] Zhou X X, Wang X J, Huang D H, et al. 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 149202 (in Chinese) [周勋秀, 王新建, 黄代绘等 2015 物理学报 64 149202]
- [29] Zhang J L, Tan Y H, Wang H, et al. 2010 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **623** 1030
- [30] Institute of High Energy Physics (ihep.ac.cn) <http://yb.jnm.ihep.ac.cn/>.

Observation and research on cosmic ray muons and solar modulation effect based on plastic scintillator detector^{*}

WANG Dexin¹⁾²⁾ ZHANG Rui¹⁾ YU Dekang³⁾ NA Hui¹⁾ YAO Zhanghao¹⁾
 WU Linghe¹⁾ ZHANG Suyalatu^{1)2)†} LIANG Tairan¹⁾
 HUANG Meirong¹⁾²⁾ WANG Zhilong¹⁾²⁾ BAI Yu¹⁾²⁾
 HUANG Yongshun¹⁾²⁾ YANG Xue¹⁾²⁾ ZHANG Jiawen³⁾
 LIU Mengdi³⁾ MA Qiang³⁾ YU Jing³⁾ JI Xiuyan³⁾
 YU Yiliqi³⁾ SHAO Xuepeng^{3)‡}

1) (College of Physics and Electronics, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao 028043, China)

2) (Institute of Nuclear Physics, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao 028043, China)

3) (Tongliao Meteorological Bureau, Tongliao 028000, China)

(Received 10 December 2024; revised manuscript received 24 December 2024)

Abstract

Cosmic rays, originating from stars, supernovae, and other astrophysical sources, are composed of high-energy particles that enter Earth's atmosphere. Upon interaction with atmospheric nuclei, these primary cosmic rays generate secondary particles, including neutrons, electrons, and muons, with muons constituting a dominant component at ground level. Muons, due to their relative abundance, stability, and well-characterized energy loss mechanisms, serve as critical probes for investigating the fundamental properties of cosmic rays.

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12365018, U2032146, 12465024), the Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region, China (Grant Nos. 2023MS01005, 2024ZD23, 2024FX30), and the Program of Innovative Research Team and Young Talents of Science and Technology in Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, China (Grant Nos. NMGIRT2217, NJYT23109).

[†] Corresponding author. E-mail: zsylt@imn.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: shaouxuepeng78@163.com

Studies of muon energy distribution, diurnal anisotropy, and their modulation by solar activity provide critical insights into the mechanism of particle acceleration in cosmic ray sources and the effects of solar and atmospheric.

This study aims to characterize the counting spectra and anisotropic properties of cosmic ray muons by using a plastic scintillator detector system. The experiment was conducted over a three-month period, from December 2023 to February 2024, leveraging long-bar plastic scintillator detectors equipped with dual-end photomultiplier tubes (PMTs) and a high-resolution digital data acquisition system. A dual-end coincidence measurement technique was used to enhance the signal-to-noise ratio by suppressing thermal noise and other background interferences. Comprehensive calibration of the detection system was performed using standard gamma-ray sources, including ^{137}Cs , ^{60}Co , and ^{40}K , thereby ensuring precise energy scaling and reliable performance.

The observed energy spectra of cosmic ray muons are in excellent agreement with theoretical predictions, which explains the energy losses caused by muons passing through the detector. Diurnal variations in muon count rates exhibit a pronounced pattern, with a systematic reduction occurring between 8:00 AM and 1:00 PM. This phenomenon is attributed to the solar shielding effects, where enhanced solar activity during daytime hours modulates the flux of galactic cosmic rays reaching Earth's surface. To account for atmospheric influences, meteorological corrections are performed using temperature and pressure adjustment functions derived from regression analysis. These corrections indicate that atmospheric pressure and temperature are significant factors affecting muon count rates, and a clear linear relationship is observed.

The study further corroborates these findings through cross-comparisons with data from the Yangbajing Cosmic Ray Observatory. Minor discrepancies, primarily in low-energy muon count rates, are attributed to variations in detector sensitivities and local atmospheric conditions. These observations underscore the robustness of the plastic scintillator detector system for capturing detailed muon spectra and anisotropic patterns.

This research establishes a reliable experimental framework for analyzing cosmic ray muons and their modulation by solar and atmospheric phenomena. The results contribute to a more in-depth understanding of anisotropy of cosmic rays and the interaction between astrophysical and geophysical processes. Furthermore, these findings provide valuable insights for optimizing detection technologies and enhancing the accuracy of cosmic ray studies.

Keywords: cosmic rays, muons, anisotropy, plastic scintillator, solar modulation

PACS: 92.60.Pw, 95.55.Vj

DOI: [10.7498/aps.74.20241704](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241704)

CSTR: [32037.14.aps.74.20241704](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20241704)

基于塑料闪烁体探测器的宇宙线缪子与太阳调制效应观测

王德鑫 张蕊 尉德康 那蕙 姚张浩 吴凌赫 张苏雅拉吐 梁泰然 黄美容 王志龙 白宇 黄永顺 杨雪 张嘉文
刘梦迪 马菁 于静 纪秀艳 于伊丽琦 邵学鹏

Observation and research on cosmic ray muons and solar modulation effect based on plastic scintillator detector

WANG Dexin ZHANG Rui YU Dekang NA Hui YAO Zhanghao WU Linghe ZHANG Suyalatu
LIANG Tairan HUANG Meirong WANG Zhilong BAI Yu HUANG Yongshun YANG Xue ZHANG
Jiawen LIU Mengdi MA Qiang YU Jing JI Xiuyan YU Yiliqi SHAO Xuepeng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 059201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241704

CSTR: 32037.14.aps.74.20241704

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241704>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

机器学习在宇宙线粒子鉴别中的应用

Application of machine learning in cosmic ray particle identification

物理学报. 2023, 72(14): 140202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230334>

宇宙线高能粒子对测试质量充电机制

Mechanism of cosmic ray high-energy particles charging test mass

物理学报. 2021, 70(22): 229501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210747>

高海拔宇宙线观测实验中scaler模式的模拟研究

Simulation study of scaler mode at large high altitude air shower observatory

物理学报. 2021, 70(19): 199301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210632>

一种用于Z箍缩实验的软X射线成像系统

Soft x-ray imaging system used for Z-pinch experiments

物理学报. 2021, 70(4): 045203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200957>

太阳宇宙线地面增强事件(GLE72)峰值能谱研究

Research on the peak energy spectrum of the solar cosmic ray ground level enhancement event (GLE72)

物理学报. 2021, 70(10): 109601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201662>