

文章编号:1005-4642(2021)02-0016-06

## 符合计数法测量宇生 $\mu$ 子的通量

林海星, 宁云松, 陈 羽, 唐 健

(中山大学 物理学院, 广东 广州 510275)

**摘 要:** 搭建了宇生  $\mu$  子探测器, 采用符合计数法测量了宇生  $\mu$  子通量和空间分布. 探讨了甄别器阈值标定、宇生  $\mu$  子计数率与工作电压的关系、塑料闪烁体板间间距对计数率的影响. 通过改进测量装置的几何结构, 研究了宇生  $\mu$  子空间角的分布情况, 验证了宇生  $\mu$  子计数率与探测器摆放天顶角呈  $\cos^2 \theta$  关系.

**关键词:** 宇生  $\mu$  子;  $\mu$  子探测器; 符合计数法; 甄别器

**中图分类号:** O572

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.02.003

测量宇生  $\mu$  子通量是近代高能物理中探究  $\mu$  子性质的重要途径之一, 在使用单个塑料闪烁体进行测量时, 由于背景噪声等影响, 需要设定合理的阈值对低能量噪声进行筛选, 因此直接测量的方法会导致测量精度下降. 本文采用符合计数的方法, 通过探测同时通过 2 块塑料闪烁体时产生的关联信号确定  $\mu$  子通量, 在一定程度上提高了  $\mu$  子通量测量结果的精度及置信度. 同时, 本实验还探究了塑料闪烁体板间间距对结果的影响, 并采用符合计数的方法测量了宇生  $\mu$  子分布与天顶角的关系.

### 1 宇生 $\mu$ 子

宇宙线是来自宇宙的高能粒子流, 能量跨越了  $10^9 \sim 10^{20}$  eV. 在 TeV 能量段, 宇宙线由质子 (约占 79%)、氦核 (约占 14%)、重子 (约占 5%)、电子 (少于 1%) 和光子 (少于 0.1%) 组成<sup>[1]</sup>. 初级宇宙线的高能粒子进入大气层, 与大气层中的粒子相互作用会产生次级粒子, 次级粒子又与其他粒子碰撞产生新的次级粒子. 这些次级粒子经历散射和吸收, 能量衰减, 持续地横向纵向发展为级联现象. 次级粒子数目增加至极大值后开始减少直到级联结束<sup>[2]</sup>. 由于次级宇宙线分布范围在  $10^2 \sim 10^6$  m<sup>2</sup> 的面积上, 故又称这种级联现象为广

延大气簇射.

宇宙线与大气核子发生相互作用, 产生核子、 $\pi$  介子、少量  $\kappa$  介子和  $\Lambda$  超子等, 其中三重态的  $\pi$  介子占较大比重<sup>[2]</sup>. 这些次级强子部分再次发生衰变:  $\pi^0$  介子衰变成  $\gamma$  射线, 引起电磁级联;  $\pi^\pm$  介子平均寿命为  $2.6 \times 10^{-8}$  s, 其主要衰变过程是  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ;  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ , 产生末态粒子为  $\mu$  轻子及其对应的  $\mu$  型中微子<sup>[2]</sup>, 此带电  $\mu$  子即为宇生  $\mu$  子.

宇生  $\mu$  子不参与强相互作用, 穿越大气层等介质过程中主要发生电离能量损失,  $\mu$  子的平均寿命约 2.2  $\mu$ s. 不考虑相对论效应,  $\mu$  子的平均飞行距离约为 468 m. 实际上, 宇生  $\mu$  子绝大部分处于高速运动, 相对论效应不可忽略, 时间延缓效应作用于宇生  $\mu$  子寿命. 洛伦兹因子的大小与宇生  $\mu$  子相对于实验室参考系的运动速度有关. 因此, 宇生  $\mu$  子可以穿越  $10^4$  m 的大气层直达地面<sup>[2-3]</sup>. 探测宇生  $\mu$  子可以获得一定的初级宇宙线的物理信息: 一方面, 初级宇宙线的成分受到星际物质作用、太阳风磁场对低能宇宙线的扰动、地磁场作用、大气成分等的影响, 使得初级宇宙线所产生的次级宇宙线与很多因素有关, 故对次级宇宙线主要成分宇生  $\mu$  子的探测是天体物理<sup>[4]</sup>、大气物理<sup>[5]</sup>等科学研究的重要手段; 另一方面, 宇生

收稿日期: 2020-10-12; 修改日期: 2020-11-24

基金项目: 中山大学物理学“国家基础科学人才培养基地”本科生科研项目 (No. J1210034); 中山大学校级大学生创新训练计划项目 (No. 20201319)

作者简介: 林海星 (2000—), 男, 广东江门人, 中山大学物理学院 2018 级本科生.

通信作者: 唐 健 (1983—), 男, 湖南衡阳人, 中山大学物理学院副教授, 博士, 从事粒子物理实验研究.  
E-mail: tangjian5@mail.sysu.edu.cn



$\mu$  子作为天然高能粒子源,为集装箱检测、核反应堆事故分析和地质结构分析等无损检测和成像技术应用,提供了新途径<sup>[6-7]</sup>。

## 2 $\mu$ 子探测与符合计数法实验原理

### 2.1 $\mu$ 子探测器

常见  $\mu$  子探测器包含闪烁体探测器、切伦科夫探测器、核乳胶投影室等。实验拟用塑料闪烁体探测器,取自于北京正负电子对撞机实验 BES 升级改造后退役的飞行时间探测器的部件<sup>[8]</sup>。闪烁体探测器由闪烁体、光电倍增管(PMT)、数据采集处理系统、电源等组成。闪烁体探测器根据闪烁体介质状态分为气体探测器、液体探测器和固体探测器。塑料闪烁体具有易加工、可塑性强、发光衰减时间短、光损耗小,可以测量各种粒子的特点而被广泛使用<sup>[9]</sup>。带电粒子射入塑料闪烁体后,使闪烁体内的原子发生电离激发,退激时发出荧光光子,光子通过光导进入 PMT 转为电信号,从而触发数据获取系统被记录。前期我们已经利用蒙特卡罗方法对宇生  $\mu$  子探测器开展仿真研究<sup>[10]</sup>,本文主要讨论宇生  $\mu$  子通量和空间分布情况的测量。

### 2.2 符合计数法

符合计数法是 2 个或 2 个以上的关联信号的时间间隔在符合分辨时间内,产生符合输出的测量方法<sup>[11]</sup>。利用电子学的脉冲符合电路抑制环境本底和电子学噪声的影响,提高数据获取的信噪比。符合计数法应用于宇生  $\mu$  子探测,特指高

能  $\mu$  子几乎同时穿过 2 块塑料闪烁体,产生极短时间内的关联信号。而低能量的  $\mu$  子、环境中其他  $\beta$  或者  $\gamma$  粒子等通常只击中单块塑料闪烁体无法形成关联信号。值得注意的是,宇生  $\mu$  子也会因入射角度偏差而无法同时穿过 2 块闪烁体,也无法产生 2 个关联信号,则不被记录为信号,此影响又叫探测器内禀接受度。内禀接受度与板间距密切联系。

## 3 实验仪器设备及装置

实验用塑料闪烁体的尺寸为  $338.5 \text{ mm} \times 143.5 \text{ mm} \times 84.0 \text{ mm}$ ,包括外部反射层以及尾端与光电倍增管相连接的光导。光电倍增管采用海南展创 XP1912(10 级倍增、直径 19 mm 圆柱形管)。高压电源型号是 CAEN 高压电源机箱 NIM8306(2 个卡槽)、CAEN 高压电源插件 N1470(4 个通道)。示波器为北京普源 RIGOL 的 DS6102 数字存储示波器,带宽为 1 GHz,采样率  $5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 。NIM 核电子学测量系统由国产低压电源机箱、前沿定时甄别器、定标器等组成。详细操作过程已经录制为视频,请观看在线视频<sup>[12]</sup>。

符合计数实验装置示意图如图 1 所示,实验采用 2 块大小相同的塑料闪烁体板,其尾部均通过光导与 PMT 相连,外接 CAEN 高压提供 PMT 的工作电压,将 2 个 PMT 的信号输入甄别器,通过调整甄别器 2 路信号阈值并进行外符合,将符合后的信号输出至定标器,设定计数时间,进行宇生  $\mu$  子通量计数实验。

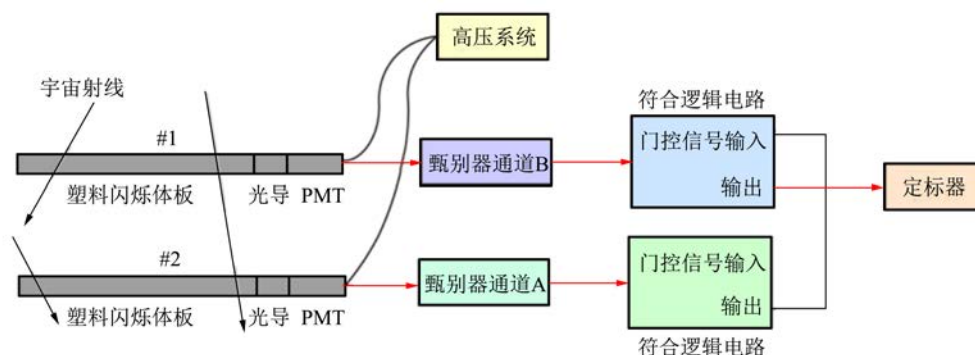


图 1 符合计数实验装置示意图

## 4 实验方案与结果分析

### 4.1 甄别器阈值标定实验

采用 NIM 标准的甄别器,每路甄别器通道可

以独立地进行阈值调节,并且带有独立的符合逻辑电路可以实现符合测量。当符合电路的“门控”设置为“内”模式时,输出的方波脉冲表征单个通道的波形过阈事件;当“门控”设置成“外”模式时,

从外部输入另一个甄别器通道的方波信号作为门控信号,则最终输出的是 2 个通道过阈时刻间隔在一定时间内的事件,从而实现符合测量. 考虑电子学通道间的失配引起的甄别器阈值差异,先进行阈值标定,便于  $\mu$  子计数实验时设定准确的探测器阈值,提高实验可重复性,减小系统误差. 利用函数信号发生器提供不同电压的方波信号,输入信号至甄别器 1 个通道,输出信号与示波器相连. 甄别器面板调节阈值最小标度为 0.02. 阈值起始设置为 0,降低信号发生器的输入电压,直到示波器上信号消失,该电压即为实际阈值. 进一步细调电压范围,得到较精确的阈值. 然后逐步增大甄别器阈值,重复上述步骤,得到如表 1 所示 A 和 B 通道的阈值表.

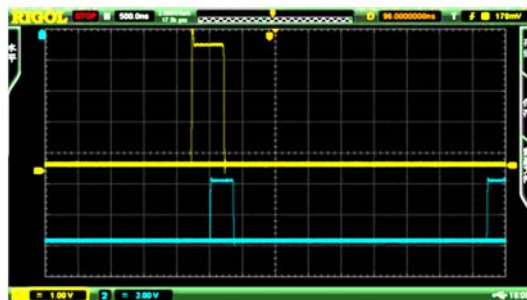
表 1 甄别器双通道阈值标定

$U_{\text{标定}} / \text{mV}$	$U_{\text{实际}} / \text{mV}$	
	A 通道	B 通道
0	35.6	47.4
0.02	39.2	53.2
0.04	42.8	57.0
0.06	46.9	62.0
0.08	50.7	67.3
0.10	55.2	72.1
0.20	75.3	99.6
0.30	98.2	126.1
0.40	119.9	154.6
0.50	142.2	181.0

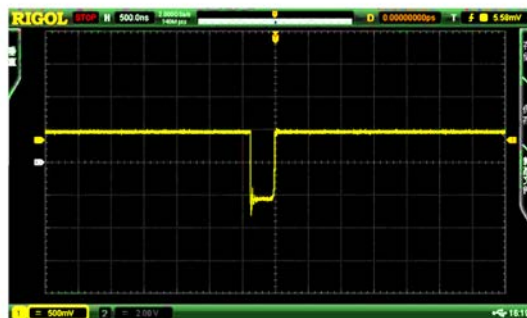
利用上述甄别器的校准数据进行宇生  $\mu$  子的测量,得到图 2 所示 2 块塑料闪烁体探测器的脉冲波形.

图 2 示波器显示 2 块塑料闪烁体的宇生  $\mu$  子脉冲波形

采用甄别器门控模式为“内”,对宇生  $\mu$  子信号分别进行测量,转变为方波信号,得到如图 3 所示方波图.

图 3 经过甄别器处理后的宇生  $\mu$  子信号

将经过甄别器筛选后的塑料闪烁体板( #1) 信号通道的门控模式设置为“外”,用下塑料闪烁体板( #2) 的信号作为门控信号输入,此时输出信号为符合电路输出的有效宇生  $\mu$  子信号,如图 4 所示.

图 4 甄别器外符合后输出的宇生  $\mu$  子信号

#### 4.2 瞬时符合曲线测定实验

符合逻辑电路具有一定的时间分辨能力,符合装置所能够区分的最小时间间隔  $\tau$  即为符合逻辑电路的分辨时间. 该符合分辨时间越短,越有利于减少 2 个探测器中同时产生的噪声、 $\beta$  或者  $\gamma$  粒子等本底信号造成的“偶然符合”事件,从而降低  $\mu$  子通量测量的系统误差. 但是另一方面,宇生  $\mu$  子穿过带间距的 2 块塑料闪烁体板时,由于径迹位置和方向、闪烁光传播、电信号传输过程的差异,最终 PMT 读取的光电信号之间的时间差存在一定的涨落,因此符合分辨时间过小反而会导致真实物理事件的丢失,增大通量测量的统计误差.

实验装置使用的符合逻辑电路采用固定宽度的门控电路,因此其符合分辨时间具有确定的值. 通过测量该电路“瞬时符合曲线”,可以得到装置的符合分辨时间特性,并对偶然符合造成的误差进行估计.

考虑到宇生  $\mu$  子通量较低且很不稳定,采用函数信号发生器,向双通道提供同步的短脉冲信号(频率 5 Hz,脉宽 50 ns)模拟  $\mu$  子探测事件,测量符合电路自身的分辨时间特性. 实验过程中,将 B 通道的 ECL 信号作为 A 通道的门控信号,使用 A 通道信号为符合信号接入定标器中计数. 利用 CAENN106A 延迟调节器人为地改变双通道的信号时间差,从 0 开始(延迟器提供 10.8 ns 的固定延迟),增大延迟器的延长时间,直到定标器上计数率为 0,绘制双通道符合装置的瞬时符合曲线.

为了得到符合分辨曲线,获取的数据远多于图中展示的数据点. 结果如图 5 所示,瞬时符合分辨曲线接近矩形,取该曲线的半高半宽即为符合装置的分辨时间  $\tau = 85.05$  ns.

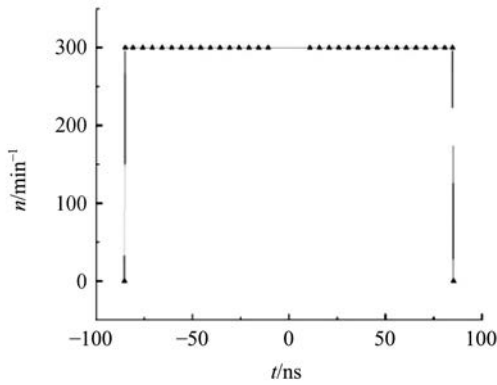


图 5 瞬时符合分辨曲线

### 4.3 宇生 $\mu$ 子计数率与工作电压关系的探究实验

2 块塑料闪烁体板间距为 14 cm, PMT #1 信号接 A 通道, 设阈值为 41 mV, PMT #2 信号接 B 通道, 设阈值为 53 mV, 改变 PMT #1 的工作电压为 1.0, 1.1, 1.2 kV, PMT #2 的工作电压保持 1.0 kV. 计数时间为 20 min, 得到表 2 的结果, 其中  $U_{\text{阈}}$  为阈值,  $U$  为工作电压,  $N$  为事例数,  $n$  为计数率, 实验使用的光电倍增管最大电压为 1.25 kV.

表 2  $\mu$  子计数率与工作电压实验数据

$U_{\text{阈}}/\text{mV}$		$U/\text{kV}$		$N$	$n/(\text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2})$
A	B	A	B		
41	53	1.0	1.0	453	0.059
41	53	1.1	1.0	1378	0.179
41	53	1.2	1.0	1643	0.213

理论上, 垂直入射到地面能量 1 GeV 以上的  $\mu$  子通量约为  $70 \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ , 估计宇生  $\mu$  子击中水平放置的探测器的计数率为  $1 \text{ min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ [13]. 即使外加电压达到 PMT 的额定电压, 实测的计数率仍与理论值有较大的误差. 推测其原因是特定能量区间(Bethe-Bloch 关系中动能损失较低的区间)的  $\mu$  子穿过塑料闪烁体探测器损失能量较少, 闪烁体信号经光电倍增管转换并放大的电信号幅值仍低于设定的甄别器通道阈值, 造成事例丢失, 导致实测事例数少于理论预期.

由表 2 数据可以看出, 随着工作电压的升高, PMT 增益增加, 对低能光信号的探测效率增大, 计数率升高. 但是, 升高 PMT 工作电压也同步增大噪音和本底信号的幅值, 导致更多的偶然符合事件. 因此, PMT 的工作电压不宜过高. 由表 2 可知, PMT #1 工作电压 1.1~1.2 kV, PMT #2 工作电压保持 1.0 kV 为合适的工作电压.

### 4.4 塑料闪烁体板间距对 $\mu$ 子计数率的影响

根据上面的实验结果, 猜测两板间距对  $\mu$  子计数率有一定影响, 故对此进行实验探究. 利用高度可调节的支撑架改变两板间距, 固定工作电压和通道阈值, PMT #1 为 1.1 kV 和 41 mV, PMT #2 为 1.0 kV 和 53 mV. 改变板间距, 计数时间为 1200 s, 得到表 3 数据. 两板间距与  $\mu$  子计数率的关系曲线见图 6.

该符合分辨时间下, 符合装置的偶然符合计数率约为  $9 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 对于实验得到的计数率而言是小量, 因此可以认为偶然符合带来的误差对实验结果影响可以忽略, 实验数据具有一定的可靠性.

表 3 两板间距与  $\mu$  子计数率实验数据

$d/\text{cm}$	$N$	$n/(\text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2})$
5.00	3388	0.440
7.20	2968	0.385
9.30	2449	0.318
11.10	2286	0.297
13.50	1909	0.248
15.40	1715	0.225
17.30	1442	0.182
19.60	1274	0.165

从实验数据可以看出, 减小板间距可以提高宇生  $\mu$  子计数率. 空间接受度与板间距密切联

系,当塑料闪烁体板的间距增大时,空间接受度减少,宇生  $\mu$  子会因入射角度偏差无法产生 2 个关联信号,则不被记录为信号.

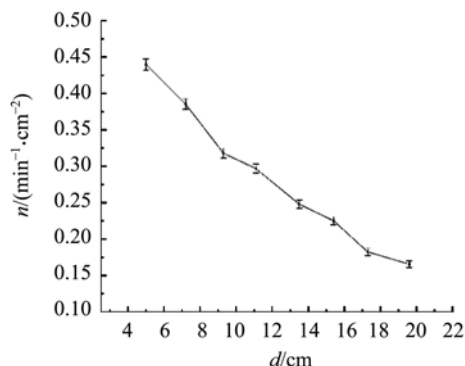


图 6 两板间距与  $\mu$  子计数率的关系曲线

实验数据都略小于理论预期值也易于理解. 宇生  $\mu$  子计数率仍可能受天气变化对宇生  $\mu$  子的影响以及天花板屋顶材料屏蔽效应、经纬度和太阳活动周期等的影响,留待将来继续探究.

#### 4.5 宇生 $\mu$ 子天顶角分布探测实验

由于大气厚度、大气密度率随天顶角变化,大气中所有次级粒子的流量和能谱都随天顶角改变而变化<sup>[2]</sup>. 大量实验证实宇生  $\mu$  子的天顶角分布服从  $\cos^2 \theta$  分布规律<sup>[14]</sup>. 在光学平台上重新搭建实验装置,如图 7 所示,保持 PMT #1 信号工作电压为 1.2 kV,接甄别器的 A 通道,设定通道阈值为 48 mV;PMT #2 信号工作电压为 1.0 kV,接甄别器的 B 通道,设阈值为 195 mV. 改变天顶角,计数时间为 10 min 的数据如表 4 所示. 绘制探测器宇生  $\mu$  子计数率与天顶角  $\theta$  的关系曲线,如图 8 所示.

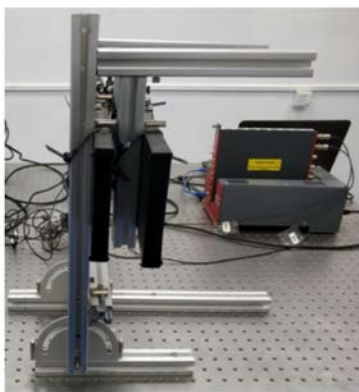


图 7 宇生  $\mu$  子空间角分布测量装置图

表 4 天顶角与  $\mu$  子计数率实验数据

$\theta/(\circ)$	$N$	$n/(\text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2})$
-80	598	0.079
-70	705	0.093
-60	870	0.115
-50	1 053	0.139
-40	1 171	0.155
-30	1 287	0.170
-20	1 497	0.198
0	1 762	0.232
10	1 671	0.220
20	1 443	0.190
30	1 299	0.171
40	1 118	0.148
50	944	0.125
60	791	0.104
70	646	0.085
80	530	0.070
90	523	0.069

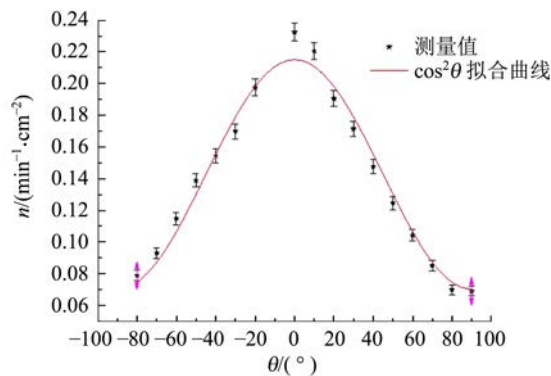


图 8  $\mu$  子计数率与天顶角的关系曲线

可以看出,在塑料闪烁板水平放置时的计数率最大,即竖直入射的  $\mu$  子数最多,与理论预期基本一致. 计数率与天顶角呈  $\cos^2 \theta$  分布,拟合函数为  $n = (0.0699 \pm 0.0032) + (0.1463 \pm 0.0055) \cos^2 \theta, R^2 = 0.97788$ .

#### 4.6 实验注意事项

实验使用光电倍增管的额定电压为 1.00~1.25 kV,需使用直流高压电源. 注意仪器的使用规范及用电安全,以免造成仪器损坏及人身安全问题. 考虑到温度对光电倍增管探测效率的影响,尽可能在避光恒温条件下开展实验.

#### 5 结束语

搭建了宇生  $\mu$  子探测器,采用符合计数法,

测量宇生 $\mu$ 子通量和空间分布. 探讨了甄别器阈值标定、宇生 $\mu$ 子计数率与工作电压和塑料闪烁体板间距的关系. 改进装置的几何结构,研究了宇生 $\mu$ 子空间角分布情况. 得到了宇生 $\mu$ 子计数率随工作电压变化关系,随2块塑料闪烁体探测器板间距变化曲线,验证了宇生 $\mu$ 子计数率与探测器摆放天顶角呈 $\cos^2\theta$ 的关系. 该实验既加深学生对粒子探测原理和宇宙射线相关物理过程的理解,又帮助学生串联起电子学模块化数据采集和分析的相关知识.

致谢:感谢推动该项目进展的本科生同学:2015级卢一凡、刘俭伟、谢天、吴雨旸以及李德馨,2016级许伊欣和卓丹媛,2018级杜希尔和赵先和.

### 参考文献:

- [1] Longair M S. High energy astrophysics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1981:117.
- [2] 阿尔科费尔 O C. 宇宙线入门[M]. 徐春娴,朱清棋,译. 北京:科学出版社,1987:1-2,11-203.
- [3] Eidelman S, Hayes K G, Olive K A, et al. Review of particle properties [Z]. American Physical Society, 2004:1173-1826.
- [4] Cao Z. A future project at Tibet: The large high altitude air shower observatory (LHAASO) [J]. Chinese Physics C, 2010,34(2):249-252.
- [5] Hariharan B, Chandra A, Dugad S, et al. Measurement of the electrical properties of a thundercloud through muon imaging by the GRAPES-3 experiment [J]. Physical Review Letter, 2019,122(10):105101.1-105101.6.
- [6] Borozdin K N, Hogan G E, Morris C, et al. Radiographic imaging with cosmic-ray muons [J]. Nature, 2003,422(6929):277.
- [7] Procureur S. Muon imaging: principles, technologies and applications [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2018, 878: 169-179.
- [8] 苑长征,吕晓睿,李海波. 北京谱仪实验30年[J]. 现代物理知识,2019(4):2-12.
- [9] 闵振. 塑料闪烁体探测器性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2016:23.
- [10] 罗鑫,许伊欣,曹广杰,等. 宇生 $\mu$ 子探测器蒙特卡罗模拟环境的初步搭建[J]. 大学物理,2018,37(11):52-57.
- [11] 程敏熙. 符合测量实验方法研究[J]. 大学物理,2002,21(6):28-32.
- [12] 符合计数法测量宇生 $\mu$ 子通量[EB/OL]. [2020-10-12]. <https://www.bilibili.com/video/av60874256>.
- [13] 谢一冈. 粒子探测器与数据获取[M]. 北京:科学出版社,2003:533-539.
- [14] 王晓添,楼建玲,过惠平,等. 宇生 $\mu$ 子角分布探测装置构建[J]. 核电子学与探测技术,2017,37(1):85-89.

## Measuring cosmic muon flux by coincidence counting

LIN Hai-xing, NING Yun-song, CHEN Yu, TANG Jian

(School of Physics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** A cosmic muon detector based on two plastic scintillators was built, and cosmic muon flux and spatial distribution were measured by coincidence counting method. The threshold calibration of the data acquisition system was carried out, and the relationship between the cosmic muon counting rate and the operating voltage was obtained. The influence of the distance between plastic scintillator plates was discussed. By improving the geometrical structure of the measuring device, the angular distribution of cosmic muons was studied, and the relationship between the cosmic muon counting rate and the zenith angle of the detector was proved to be  $\cos^2\theta$ .

**Key words:** cosmic muon; cosmic muon detector; coincidence counting; discriminator

[责任编辑:任德香]