

# 闪烁光纤量能器单元模型的宇宙线测试

周莉 夏小米 赖元芬 尚雷 王曼 吕军光

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 介绍闪烁光纤量能器单元模型宇宙线测试采用的简易实验装置和测量步骤,以及实验数据的分析处理方法.对来自意大利 KLOE 的铅-光纤量能器单元模型进行了宇宙线测试,对实验数据进行了分析和修正,给出了该单元模型的时间分辨(252ps)和位置分辨(4.1cm)等参数.

**关键词** 闪烁光纤量能器 最小电离能损 时间分辨 位置分辨

## 1 引言

闪烁光纤具有探测效率较高、响应时间快的特点.此外它还具有探测单元粒度小、可塑性强、易于制成密闭性好的探测器的突出优点,在高能物理实验、核物理实验、核医学仪器等方面都有很强的应用潜力.近年来,闪烁光纤的种类和特性有了很大的发展.同时,光探测器在探测效率、单光子灵敏度、定位精度、信噪比、时间响应、长期稳定性等方面也有很大的提高<sup>[1-3]</sup>,价格也达到了可实用的水平.这些都使得闪烁光纤探测器在粒子物理实验中得到广泛应用,例如,带电粒子径迹测量、有源靶、量能器、飞行时间系统等<sup>[4,5]</sup>.

北京谱仪的改进<sup>[6]</sup>采用闪烁光纤和铅组成的取样量能器作为电磁量能器的候选方案之一,使能量分辨率达到 $\sim 60\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$ 的水平.作为电磁量能器升级的预制研究,曾对美国 Bicron-BCF10 和日本 Kuraray-SCSF81 两种闪烁光纤的性能进行了研究和测试<sup>[7]</sup>.在量能器的建造中,量能器单元的宇宙线测试是必不可少的步骤.它将给出量能器单元的初始刻度参数:最小电离能损、衰减长度、光的传播速度和分辨时间等.长期监测这些参数可以检查整个量能器及其电子学的稳定性.本文仅介绍对铅-闪烁光纤量能器单元模型进行宇宙线测试的实验装置,并给出实验结果.

## 2 实验装置和测量目的

为了模拟加速器实验中的实际情况,并且尽可能多地去除本底噪声,采用图 1 所示的实验装置.为提高宇宙线的触发效率,用两个条型触发闪烁计数器选取入射宇宙线粒子,将待测闪烁光纤量能器单元模型放在两个触发闪烁计数器之间.上下两个触发计数器除提供触发信号外,还可利用光在闪烁体中传输时间来确定宇宙线入射粒子的位置.通过归一化穿过单元模型的宇宙线轨迹的长度,可得到归一化轨迹在单元模型中的沉积能量的分布.铅-闪烁光纤量能器单元模型来自意大利 KLOE 实验组.模型长 49.5cm,宽 3.5cm,高 3.9cm,其中包括  $27 \times 32 = 864$  根闪烁光纤.模型一端通过有机玻璃光导由 XP2020 型光电倍增管读出信号.光电倍增管工作电压为 2045V,通过单光电子测量<sup>[7]</sup>得到此时光电倍增管的增益为  $1.56 \times 10^7$ .上下两个触发计数器由  $(70 \times 4 \times 2.5)\text{cm}^3$  的 NE110 条状闪烁体和 XP2020 光电倍增管组成.测量了光在闪烁条中的传播速度,可以利用时间信息确定入射粒子的位置.上下两个触发计数器相距 27cm.

图 2 是触发与读出电路框图.触发计数器 1,2 两端光电倍增管(PMT1, PMT2 和 PMT3, PMT4)的输出信号经过定时甄别器(CDF)后,分别得到两路输出信号,其中一路经过二重符合给出触发计数器 1,

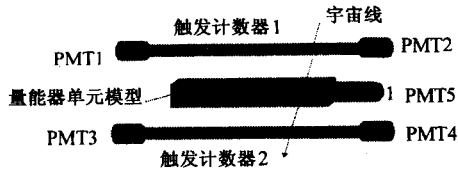


图 1 量能器单元模型宇宙线测量的实验装置

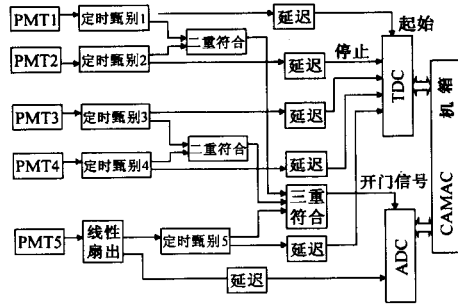


图 2 触发与读出电路框图

2 输出信号,以降低光电倍增管的本底噪音;而甄别器的另一路输出信号,经过不同的延迟送到 Lecroy TDC2228 作为起始或停止信号。量能器单元模型光电倍增管(PMT5)的输出信号经过线性扇入/扇出分成两路,其中一路经过适当延迟送到 Lecroy ADC2249W 进行幅度(电荷)测量;另一路经过定时甄别器得到两个输出信号,其中的一路经过延迟送到 Lecroy TDC2228 作为停止信号;另一路送到三重符合单元。由触发计数器 1,2 的输出信号和量能器模型信号的重符合去选通 ADC2249W。这样,只有同时穿过上下两个触发计数器并且又穿过单元模型的粒子才认为是好事例被记录。这套测量装置立足于同时获取每个好事例的全部时间信息( $T$ )和幅度信息( $Q$ )。最后用 PAW-Ntuple<sup>[8]</sup> 对每个事例的数据进行分析和统计。

### 3 测量结果与分析方法

#### 3.1 触发计数器的刻度与性能

用放射源  $^{90}\text{Sr}$  放在触发计数器不同位置,测量两端 PMT 的时间差,得到触发计数器 1 和 2 的位置-时间关系(图 3)。由此求出触发计数 1(上部)和 2(下部)中闪烁光的传播速度分别为:14.33cm/ns 和 14.13cm/ns。

由触发计数器两端输出信号的时间差( $T_2 - T_1$ )和( $T_4 - T_3$ )以及闪烁光在触发计数器中的传播

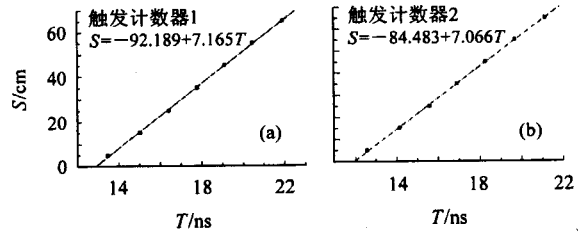


图 3

- (a) 触发计数器 1 的位置 - 时间的关系;
- (b) 触发计数器 2 的位置 - 时间的关系。

速度可以确定宇宙线在上、下触发计数器中的击中位置。图 4 和图 5 分别是宇宙线事例数随触发计数器 1 和 2 的读出时间差的分布。时间分布的对称中心处对应于触发计数器和量能器单元的中心位置。由此可进一步确定宇宙线在闪烁光纤量能器单元模型中的击中位置。图 6 为宇宙线在闪烁光纤量能器单元模型中的击中位置的分布。

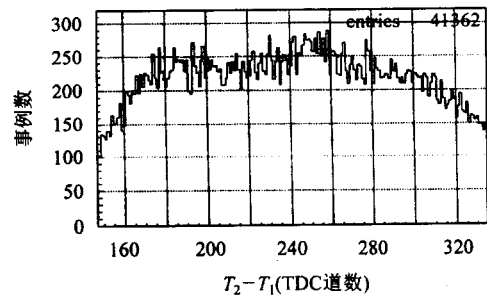


图 4 宇宙线事例数随触发计数器 1 读出时间差的分布

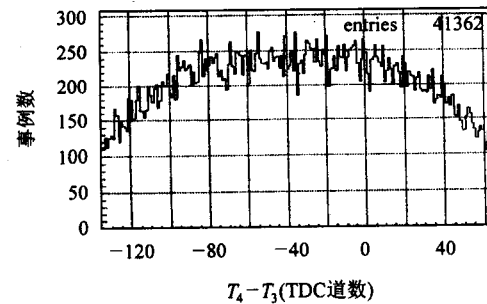


图 5 宇宙线事例数随触发计数器 2 读出时间差的分布

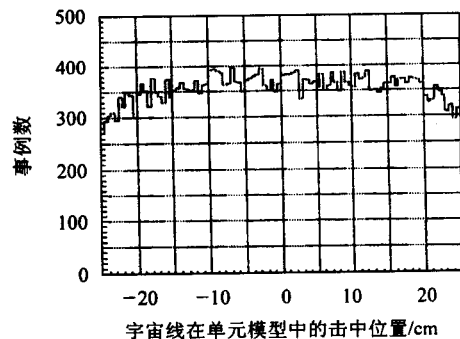


图 6 宇宙线在闪烁光纤量能器单元模型中击中位置的分布

本实验中利用闪烁光在触发计数器中的传输时间来确定入射粒子的位置,位置分辨取决于时间分辨. 实验中由  $T_1$  作为起始信号,测得  $T_3 - T_1$  的时间分布如图 7(a). 该时间分布较宽,主要包含了斜射宇宙线传输时间差的影响,因此需要进行修正. 为此,在原来  $T_3 - T_1$  时间分布基础上,将斜射的宇宙线修正到从触发计数器的中心垂直入射的情况,得到修正后的  $T_3 - T_1$  分布图 7(b). 该分布不是单一的高斯分布,用双高斯拟合符合得较好. 此分布中包含了位置分辨本身的误差、不同动量宇宙线粒子飞行时间的误差、触发计数器宽度(4cm)造成的径迹入射方向的分散以及经过量能器单元模型产生的散射和次级粒子造成的径迹偏离等. 其中,动量大于  $\sim 60\text{MeV}$  的宇宙线  $\mu$  子即可穿过量能器模型,它们的速度在大约  $15\text{--}30\text{cm/ns}$  之间. 上下两个触发计数器相距  $27\text{cm}$ ,不同动量  $\mu$  子飞行时间的差别较大,约为  $(500\text{--}900)\text{ps}$ . 此外,海平面宇宙线粒子中  $75\%$  为动量  $> 0.3\text{GeV}/c$  的硬成分,它的能谱近似为  $\sim 1/E^2$ <sup>[11]</sup>. 所有这些都使得时间差( $T_3 - T_1$ )的分布不是单高斯的.

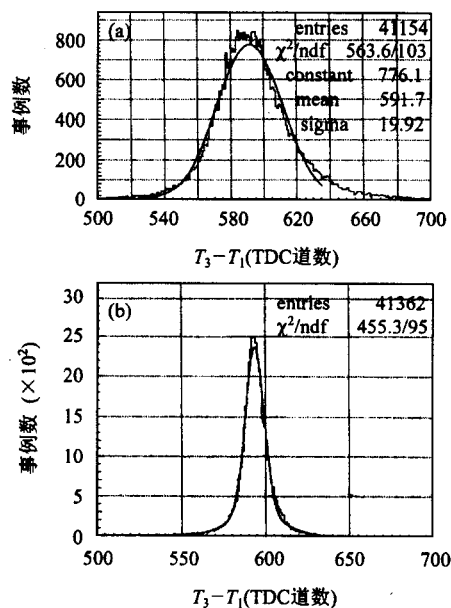


图 7

- (a) 位置修正前  $T_3 - T_1$  的时间分布;  
(b) 位置修正后  $T_3 - T_1$  的时间分布.

作双高斯拟合得到,两个高斯拟合面积各占  $0.27$  和  $0.73$ . 由此计算出总的时间分辨为,

$$\sigma_{\Delta T} \approx \sqrt{0.27 \times 16.34^2 + 0.73 \times 5.597^2} \approx 9.7 \text{ 道} \approx 485\text{ps},$$

位置分辨为,  $\sigma_x = \frac{1}{2} V \sigma_{\Delta T} \approx 3.4\text{cm}$ .

如果设法排除上述各种影响时间分辨的因数或进行彻底修正,则触发计数器的时间分辨将取决于较窄的高斯分布,时间分辨和位置分辨将有所改善,可以达到:

$$\sigma_{\Delta T} \approx 5.6 \text{ 道} \times 50\text{ps/道} \approx 280\text{ps},$$

$$\sigma_x = \frac{1}{2} V \sigma_{\Delta T} \approx 2.0\text{cm}.$$

### 3.2 宇宙线在量能器单元模型中的沉积能量及平均光电子数

图 8(a) 为量能器单元模型中宇宙线的沉积能量分布. 图 8(b) 是对斜射宇宙线径迹进行修正后的沉积能量分布. 其中的修正因子是宇宙线倾斜角度  $\theta$  的余弦值. 图 9 为所测宇宙线事例倾斜角修正因子的分布. 可以看出进入量能器单元模型的宇宙线大部分是垂直入射的. 再将  $49.5\text{cm}$  的光纤闪烁体

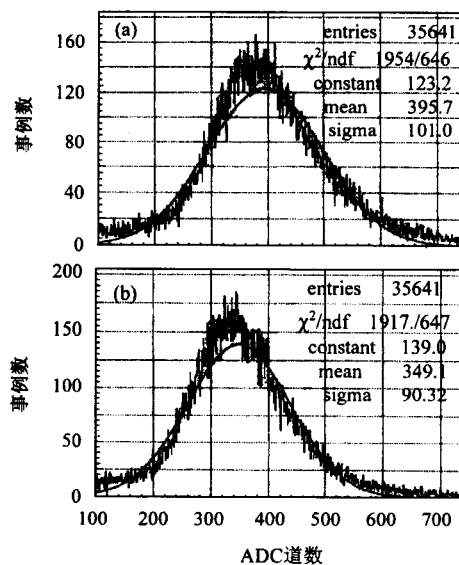


图 8 宇宙线在量能器单元模型中沉积能量分布  
(a) 未对斜射宇宙线径迹修正;(b) 对斜射宇宙线径迹修正后.

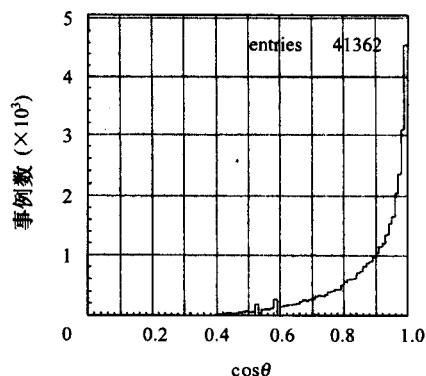


图 9 宇宙线事例倾斜角修正因子的分布

模型分成每 5cm 一段,统计出每段的光输出 ADC 道数如图 10 所示. 它显示光输出量与宇宙线在单元模型中击中位置的关系,光输出不均匀性  $\approx 4.3\%$ , 其中靠近光电倍增管的一端光输出量较大.

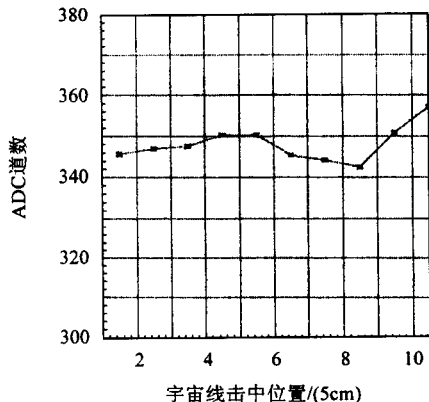


图 10 宇宙线击中单元模型不同位置光输出量的分布

由图 8(b) 的电荷分布谱求得宇宙线垂直穿过单元模型所产生的平均光电子数为:

$$N_{p.e.} = \frac{\overline{ADC} \times 0.25 \times 10^{-12} (c)}{G \times 1.6 \times 10^{-19} (c)} \approx 35,$$

其中,  $G = 1.56 \times 10^7$

根据 KLOE 的工作<sup>[9]</sup>, 宇宙线在单元模型中能量沉积约为 28.4MeV. 我们的测量给出沉积能量的相对均方根偏差为:  $\sigma / (ADC)_{mean} \approx 25.9\%$ .

### 3.3 单元模型时间特性的分析

图 11 和图 12 分别是 PMT1 和 PMT2 作为 TDC 的起始信号时所测得的时间谱. 应该指出, 由于单元模型是单端读出的, 所以用 PMT1 的信号和用 PMT2 的信号作 TDC 的起始信号所测到的时间分布是不同的. 由于大部分宇宙线是垂直入射的, PMT2 与 PMT5 在探测器的同一侧, 它们输出信号的时间差基本上是固定的, 它们时间谱为图 12 的窄峰. 而 PMT1 和 PMT5 分处于探测器的两侧, 输出信号的时间差与宇宙线入射位置有关, 具有较宽的时间分布 (图 11). 图 11 的时间谱已进行过处理, 去除了少量因光导中切伦科夫辐射引起的符合事例.

下面对单元模型的时间特性作粗略估算. 已知单元模型的长度为  $Z = 49.5\text{cm}$ , 从图 11 时间分布的半高宽  $\Delta t = 130 \text{道} \times 50\text{ps/道} = 6.5\text{ns}$ . 由图 13 所示的几何关系可以粗略求得时间分布的半高宽与光在触发计数器 1 中的传播速度  $V_1$  及光在模型中的传播速度  $V$  之间有关系式:

$$\Delta t = (T_5 - T_1)_{\text{最大}} - (T_5 - T_1)_{\text{最小}} = \frac{Z}{V} + \frac{Z}{V_1}.$$

由此, 得到  $V \approx 16.25\text{cm/ns}$ .

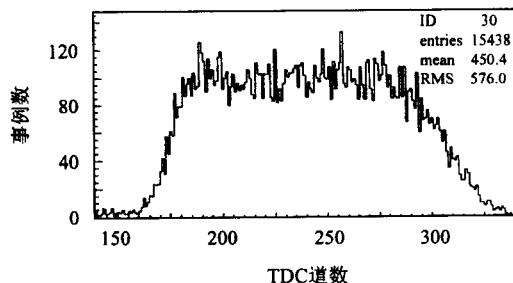


图 11  $T_1$  作起始信号的时间分布

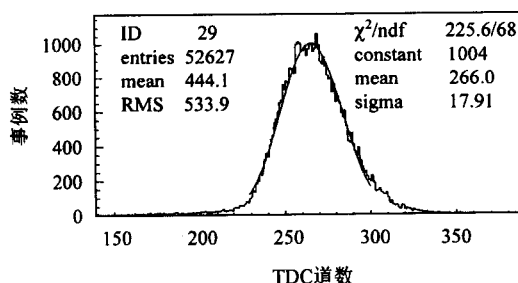


图 12  $T_2$  作起始信号的时间分布  
(宇宙线击中模型的所有事例)

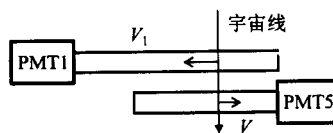


图 13 触发计数器 1 与量能器模型几何位置的关系

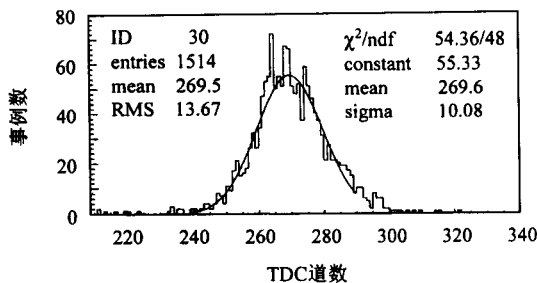


图 14  $T_2$  作起始信号时间分布  
(只取宇宙线击中模型的中心约 5.5cm 宽的事例)

图 12 和图 14 是以  $T_2$  为起始信号时, 量能器模型的时间分布. 其中, 图 14 只选取了宇宙线击中模型的中心约 5.5cm 宽的事例. 从图 14 时间分布, 得出包括系统在内的总时间分辨:

$$\sigma_{t(\text{total})} = 10.08 \text{道} \times 50\text{ps/道} = 504\text{ps}$$

其中, 由前面的讨论得到触发计数器信号的时间涨

落  $\sigma_{t(\text{start})} \approx \frac{\sigma_{\Delta T}}{\sqrt{2}} \approx 342\text{ps}$ ; 由于所选事例分布在模型中心 5.5cm 宽的区域, 入射粒子不同位置引起的时间涨落约为

$$\sigma_{t(\text{position})} \approx \frac{1}{\sqrt{12}} \cdot \frac{5.5\text{cm}}{16.25} \approx 98\text{ps}$$

总时间分辨减去起始信号的涨落及入射粒子不同位置引起的时间涨落, 可得到量能器模型单端输出的时间分辨约为

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{t(\text{total})}^2 - \sigma_{t(\text{start})}^2 - \sigma_{t(\text{position})}^2} \approx 357\text{ps}.$$

如果量能器模型为双端读出定位, 对应的位置分辨为

$$\sigma_{x, \text{双}} = \sigma_t / \sqrt{2} \cdot v \approx 4.1\text{cm}.$$

对应的时间分辨为:  $\sigma_{t, \text{双}} \approx 252\text{ps}$ .

上述实验结果与 KLOE 组给出的宇宙线测试结果<sup>[10]</sup> (时间分辨  $\sim 520\text{ps}$  (未修正);  $\sim 260\text{ps}$  (修正

后), 位置分辨  $\sim 5\text{cm}$ ) 相符合. 本实验的单元模型比 KLOE 组的短, 因此时间分辨也较好.

本工作的实验装置及其电子学系统都比较简单. 由于触发计数器覆盖了整个待测单元模型, 提高了宇宙线的触发效率, 加快了测量速度. 测量中采用按单个好事例记录数据的办法, 因而可用 Ntuple 对事例进行分析统计和进行一系列修正. 实验结果表明: 虽然此实验装置定位精度不太高, 但在对实验数据进行了分析和修正后, 仍给出了满意的测量结果. 这一简易测量装置适用于定位精度约为几厘米的测量, 对于定位精度更高的测量, 则需要对触发计数器的粒度和读出方法加以改进和提高.

感谢高能所谢一冈研究员和 KLOE 国际合作组为本工作提供 KLOE 的闪烁光纤量能器单元模型以及相关资料.

## 参考文献 (References)

- 1 Breskin A. Nuclear Instrument and Methods, 1997, **A389**:1
- 2 Okusawa T et al. Nuclear Instrument and Methods, 2000, **A440**:348
- 3 DeSalvo R et al. Nuclear Instrument and Methods, 1992, **A315**:375
- 4 Kirkby J. CERN-EP/87-60
- 5 Ambrosio C D et al. CERN-PPE/96-65 "Particiale Tracking with Scintillating Fibers"
- 6 BAI J Z et al. Nuclear Instruments and Methods 1994, **A344**:319
- 7 CHI Shao-Peng et al. HEP&NP, 2003, **27**(3):257 (in Chinese) (迟少鹏等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(3):257)
- 8 CERN Program Library Writeup Q121, PAW (Physics Analysis Workstation)
- 9 Antonelli M et al. ICHEP'96, Warsaw, Juli 1996
- 10 Adinolfi M et al. N.I.M., 2002, **A482**:364
- 11 Hessey N et al. ATL-MUON-98-266

## Cosmic Ray Test for Scintillating Fiber Calorimeter Module

ZHOU Li XIA Xiao-Mi LAI Yuan-Fen SHANG Lei WANG Man LÜ Jun-Guang  
(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** A simple cosmic ray stand for testing sampling scintillating fiber calorimeter module has been constructed. The measurement and analyses method is reported. A module of sampling scintillating fiber calorimeter from KLOE (INFN, Italy) is tested by using cosmic ray and the preliminary results for time resolution (252ps) and spacial resolution (4.1cm) are obtained.

**Key words** scintillating fiber calorimeter, minimum ionization loss, time resolution, spatial resolution