利用 ICCD 定位宇宙线来测量探测器时间分辨的方法研究*

吕绮雯[1)†] 郑阳恒[2)] 田彩星[1)] 刘福虎[1)] 蔡啸[3)] 方建[3)] 高龙[3)]
葛永帅[3)] 刘颖彪[3)] 孙丽君[3)] 孙希磊[3)] 牛顺利[3)] 王志刚[3)] 谢宇广[3)]
薛镇[3)] 俞伯祥[3)] 章爱武[3)] 胡涛[3)] 吕军光[3)]

1) (山西大学理论物理研究所, 太原 030006)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

3) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

(2011 年 11 月 2 日收到; 2011 年 11 月 30 日收到修改稿)

本研究采用双层 150 mm×150 mm 闪烁条阵列定位宇宙线的入射和出射位置. 阵列信号光使用波移光纤吸收传输, 在 ICCD 相机前插入前置像增强器, 使信号光延迟大于 200 ns, 使 ICCD 可以由外部高速触发信号控制, 有效记录随机触发事例. 该宇宙线定位系统可以同时多点密集测量通用探测器测试平台的时间分辨和闪烁光的渡越时间. 该新方法与传统时间分辨测量方法相比提高了 30 倍以上的效率. 实验结果显示: 时间探测器的时间分辨好于 200 ps, 满足通用探测器测试平台的设计要求.

关键词: ICCD, 宇宙线定位, 时间探测器, 时间分辨

PACS: 29.40.Mc

1 引 言

大尺寸粒子探测器的性能测量由于受放射源带电粒子的穿透能力的限制, 多采用加速器束流或宇宙线 (近地成分主要为 μ 子) 进行时间和位置标定的刻度和测试, 并给出探测器的探测效率与时间分辨等参数. 目前在国内只有高能物理研究所一条正规的粒子试验束流 [1], 可以提供单粒子 ($e^{\pm}$, $\pi^{\pm}$, $P^{\pm}$) 试验束, 由于该试验束仅能在同步辐射专用模式运行的空余时间使用, 运行使用时间和周期受到比较大的制约. 基于使用时间与单粒子束流效率问题, 以及国内粒子物理实验探测器的性能研究需求等考虑, 拟建立一个提供用户使用的利用宇宙线进行探测器性能测试的通用实验平台.

设计中的通用探测器测试平台由时间探测器和位置探测器组成. 时间探测器由 6 个 BC408 厚塑料闪烁体模块并排排列组成, 每个模块闪烁体尺寸为 1100 mm×156 mm×50 mm, 两端通过透紫有机玻璃光导过渡耦合, 由快光电倍增管 (PMT) 读出. 其主要用途如下: 为电子学系统提供触发时间; 给出宇宙线事例的时间起点, 精度要求好于 200 ps, 以满足一般丝室探测器对时间起点的要求; 给出宇宙线击中的区域范围, 设计中的平台位置探测器电子学读出按区域采用域编码读出, 有效减少读出电子学读出道数.

为了研究此实验平台时间探测器的时间分辨参数, 本文采用 ICCD 并行读出定位法, 利用宇宙线给出了时间探测器的时间分辨.

* 中国科学院 "百人计划" 基金和国家基础科学人才培养基金 (批准号: J1103210) 资助的课题.

† E-mail: luqw@ihep.ac.cn

© 2012 中国物理学会 Chinese Physical Society

2 测量原理和方法

2.1 测量系统的触发和两系统时间符合

如图 1 所示整个测量系统分为三部分: 触发系统; ICCD 定位读出系统; CAMAC 读出系统 (读出光电倍增管 PMT 的 TDC 和 ADC 信息). 两个读出系统采用同一时间触发.

测量时将三块被测厚闪烁体竖直层列, 将两组闪烁条阵列垂直对齐分别放置于三块飞行时间闪烁体上下以重建宇宙线径迹. 用与闪烁条阵列相同面积的塑料闪烁体 (BC408) 作为触发闪烁体, 采用单端光电倍增管 (PMT) 读出, 保证信号为穿过上层闪烁体阵列的宇宙线信号, 提高有效数据记录. 五重符合信号作为两个系统的同步时间触发信号, 五重符合信号分别为三层闪烁体最上和最下两块被测厚闪烁体的双端光电倍增管读出信号和触发闪烁体光电倍增管读出信号. 实际取数事例率为 1—1.4 Hz.

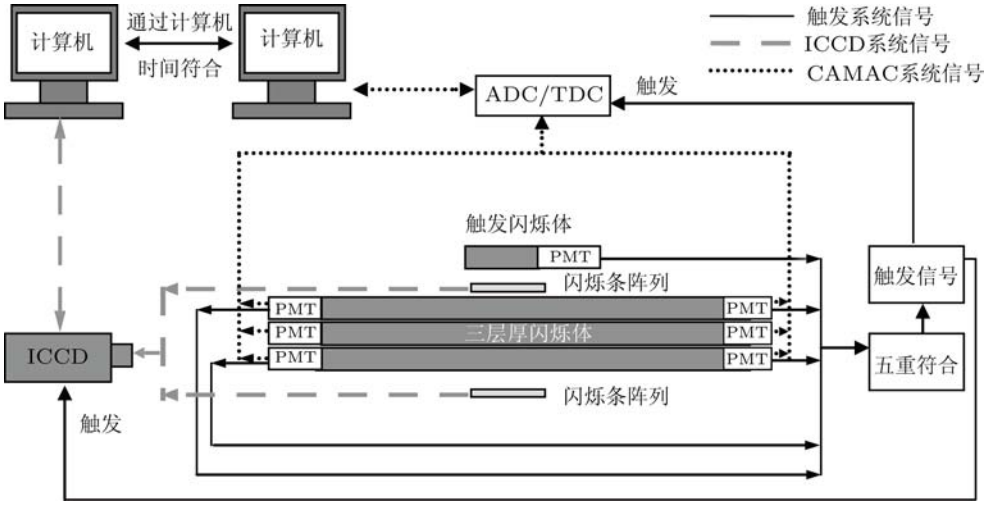

图 1 探测系统原理框图

由于 ICCD 读出系统与 CAMAC 读出系统分别使用了两台计算机采集数据, 为保证离线数据事例正确重建, 两组系统保存数据时记录了事例时间, 时间同步精度为毫秒, 实际取数事例时间差为 0.7 s—1 s, 因此可以通过时间符合保证两组系统记录数据一一对应.

2.2 ICCD 系统定位原理

如图 2 所示, 当宇宙线穿过触发闪烁体和被测厚闪烁体, 首先给出整个系统触发信号, 宇宙线穿过闪烁条阵列时, 击中的闪烁条发出闪烁光, 波移光纤吸收闪烁光信号, 将信号传输到 ICCD, ICCD 根据触发信号和设置的开门时间 (即曝光时间) 开始曝光采集图片. 将上下两层闪烁条阵列按照图 2 从左到右编号从 1 到 15. 通过离线图像识别处理得到具体击中的闪烁条编号, 从而得到宇宙线入射和出射位置.

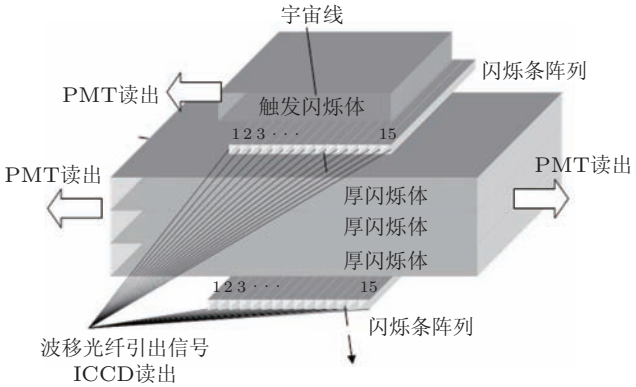

图 2 测量设备摆放结构

3 测量装置原理

ICCD 宇宙线定位系统主要由高速 ICCD 成像系统和两组塑料闪烁条阵列构成. 对于被测厚闪烁

体长度方向, 其定位精度为 10 mm, 精度可以满足该时间探测器对时间分辨的要求.

3.1 ICCD 成像系统

测量使用的 ICCD 系统, 包含三部分, 分别为 ICCD 相机, 相机镜头和前置像增强器.

ICCD 相机是 Stanford Computer Optics 公司生产的商业增强型高速 CCD 相机, 型号为 4 Quick Edig, 具有较强的单光子探测能力, 其最高分辨像素为 780×580, 本实验中使用的是 390×288 像素分辨率, 该分辨率下读出速度可以达到 66 fps[2], 该读出速度已经可以满足宇宙线事例率的要求.

ICCD 相机没有镜头焦距光圈控制信号接口, 所以配备了 Nikon 全手动镜头, 型号为 35 mm f/1.4. 使用时将光圈调至最大, 焦距通过手动调整.

镜头前加装了一个国产 1XZ18/18W 前置像增强器, 像增强器能够使光放大 10^4 倍. 该前置像增强器除了可以增大光强, 另一个主要功能是延迟光传输. ICCD 系统采用外触发信号工作, 相机接收到触发信号后启动相机内部像增强器高压然后开始工作, 记录信号, 这一过程慢于信号光的传递, 因此需要将信号光延迟. 前置像增强器的工作高压处于常开状态, 经过测量该像增强器能使光传递延迟大于 200 ns, 从而能够保证信号光到达时 ICCD 已处于工作状态.

3.2 塑料闪烁条阵列

塑料闪烁条阵列共有两组, 每组塑料闪烁条阵列由 15 根长度为 160 mm 截面为 10mm×10 mm 的塑料闪烁条 (BC408) 拼成. 每根塑料闪烁条外垂直缠绕 3 圈 Φ1 mm 波移光纤 (BCF-92) 如图 3 所示. 塑料闪烁条的发光波长峰位为 425 nm, 波移光纤吸收谱为 350—450 nm, 发射谱峰位为 492 nm[3], 增加缠绕光纤圈数可以增加波移光纤对闪烁光的吸收表面积, 从而提高对信号光的输出效率; 每根闪烁条最外层使用双层 Tyvek 白纸包裹, 闪烁条的包装材料在光的收集方面起到重要作用, 将闪烁条发出的闪烁光漫反射回闪烁条, 提高波移光纤吸收闪烁光概率, 同时阻止单元之间信号光相互干扰.

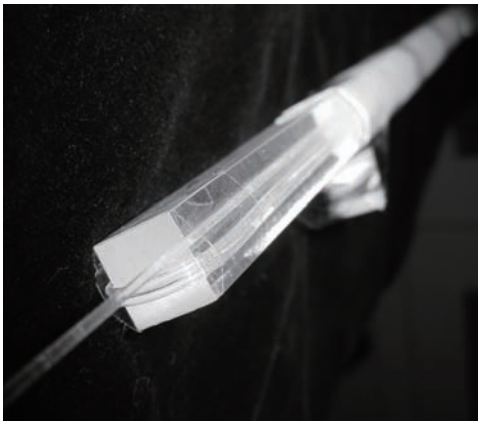

图 3 单根塑料闪烁体单元结构

图 4 30 根波移光纤固定在金属块上

两组阵列共 30 根波移光纤引出, 将光纤固定在 Φ18 mm 小金属块上, 如图 4 所示, 金属块直径大小与 ICCD 前置像增强器入射窗口相匹配, 硅油耦合后, 通过 ICCD 成像系统读出信号. 整个系统都要经过严格避光处理.

4 图像识别和数据处理

4.1 ICCD 刻度与图像识别处理

由于更换测量位置会造成固定金属圆块与前置像增强器之间产生轻微位移, 所以在每次取数前后, 都会进行一次刻度, 保证位移不会影响到离线数据处理.

测量装置整体使用黑塑料布和黑胶带避光处理, 所以刻度方法是预先将一根透明光纤 (BCF-98) 插入波移光纤束中, 强光通过光纤传导照亮全部波移光纤, 用 ICCD 记录下全部光纤位置. 图 5

为 ICCD 得到的一帧刻度图像, 图中白色亮点为信号, 根据亮点得到刻度圈, 每个圈内区域对应一根光纤输出的全部信号. 图 6 为 ICCD 得到的一帧宇宙线击中图像, 可以看到有两个圈内有信号输出, 根据排布可以得到对应的光纤位置为上层第 4 根和下层第 4 根, 从而确定宇宙线入射和出射位置.

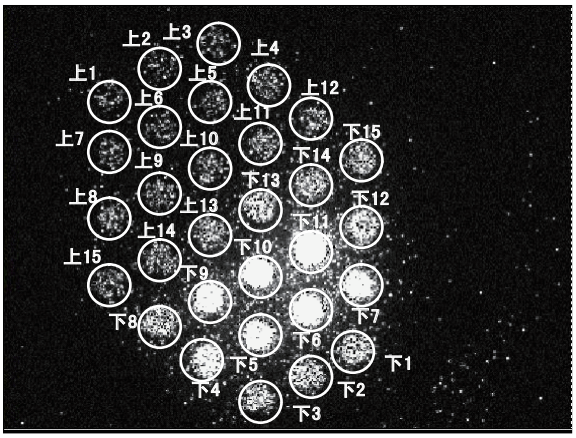

图 5 刻度帧图像

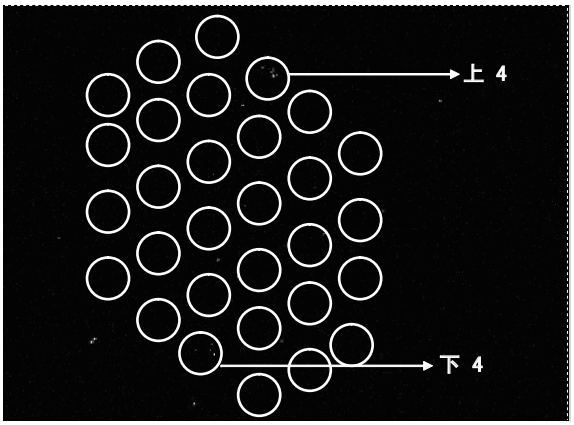

图 6 宇宙线击中帧图像

4.2 击中位置归一化

测量数据除了可以使用垂直入射的宇宙线数据, 还可以通过对宇宙线入射出射位置归一化, 使用部分斜射数据. 以宇宙线穿过被测厚闪烁体径迹中心位置为标准, 将上下阵列都有击中信息的宇宙线 (小角度斜射宇宙线上下击中点跨度间距不超过 6 根闪烁条) 分为 15 组, 每组数据为 10 mm 间隔. 数据中两端组 1 组与 15 组, 处在测量最边缘, 斜射宇宙线统计量与其他组数据相比会减少, 这两组测量结果会有较大统计涨落.

4.3 时间分辨

假设被测厚闪烁体两端 TDC 测量给出的飞行时间分别为为 T_1 和 T_2(已知), 相对于触发时间 t_0 的时间差值则为 $\mathrm{d}t_1$ 和 $\mathrm{d}t_2$.

$$\begin{cases} T_1 = \mathrm{d}t_1 + t_0, \\ T_2 = \mathrm{d}t_2 + t_0, \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} T_+ = \frac{T_1+T_2}{2} = \frac{\mathrm{d}t_1+\mathrm{d}t_2}{2} + t_0, \\ T_- = \frac{T_1-T_2}{2} = \frac{\mathrm{d}t_1-\mathrm{d}t_2}{2}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_+^2 = \sigma^2_{\frac{T1+T2}{2}} = \sigma^2_{\frac{\mathrm{d}t1+\mathrm{d}t2}{2}} + \sigma^2_{t0}, \\ \sigma_-^2 = \sigma^2_{\frac{T1-T2}{2}} = \sigma^2_{\frac{\mathrm{d}t1-\mathrm{d}t2}{2}}. \end{cases}$$

根据误差传递公式则有

$$\sigma^2_{\frac{\mathrm{d}t1+\mathrm{d}t2}{2}} = \sigma^2_{\frac{\mathrm{d}t1-\mathrm{d}t2}{2}} = \sigma^2_{\frac{T1-T2}{2}},$$

所以 σ_- 为平均时间分辨.

触发时间 t_0 的时间分辨 σ_0 大小由触发闪烁体的体积大小决定, 采用大尺寸触发闪烁体, 会造成 t_0 涨落比较大, 通过两端测量值相减可以消除 t_0 涨落影响得到平均时间分辨 σ_-, 通过上面公式推出 t_0 的时间分辨 σ_0,

$$\sigma_0^2 = \sigma_+^2 - \sigma_-^2.$$

根据以上公式可以推出加权平均时间分辨 σ_t,

$$\sigma_t^2 = \frac{\sigma^2_{\mathrm{d}t1} \cdot \sigma^2_{\mathrm{d}t2}}{\sigma^2_{\mathrm{d}t1} + \sigma^2_{\mathrm{d}t2}} = \frac{\sigma^2_{T1} \cdot \sigma^2_{T2} - \sigma_0^4}{\sigma^2_{T1} + \sigma^2_{T2} - \sigma_0^2}.$$

4.4 时间 - 幅度修正

通过测量得到原始幅度谱和时间谱, 由于在测量中使用的是前沿定时甄别器, 信号幅度涨落造成定时时间晃动, 因此需要对测量结果进行时间 - 幅度修正 [4]

$$T' = T_{\mathrm{measure}} - p_0 - \frac{p_1}{\sqrt{A_{\mathrm{measure}}}}.$$

式中 T_{measure} 为 TDC 插件记录的时间, A_{measure} 为 ADC 插件记录的幅度, p_0 和 p_1 分别为时间与幅度关系曲线拟合的参数, T' 为修正后的时间. 图 7 和图 8 分别为修正前和修正后时间与幅度散点图, 时间单位为每道 24.7 ps, 幅度单位为每道 0.25 pC. 通过散点图可以看出, 经过修正后时间随幅度的变

化而变化的程度明显减小.

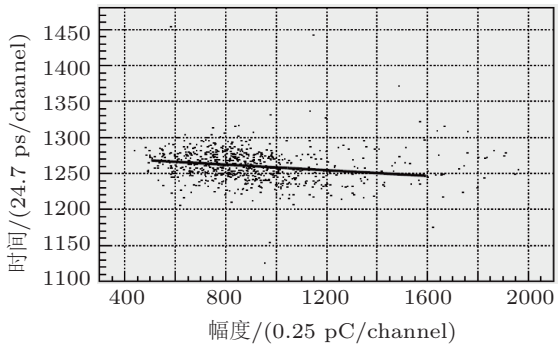

图 7 时间 - 幅度修正前

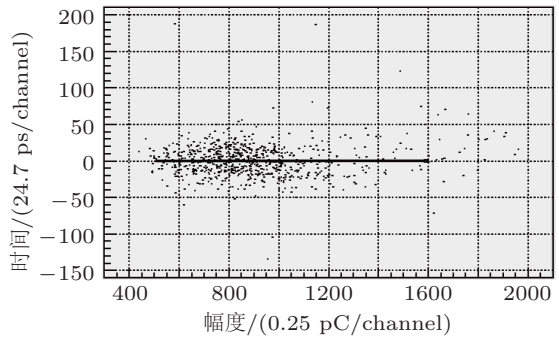

图 8 时间 - 幅度修正后

5 测量结果与讨论

5.1 时间分辨

每一组测量数据为间距 10 mm 的 15 个点, 在被测厚闪烁体上不同长度位置一共测量了四组数据, 每组数据中最两端数据由于统计数少, 统计涨落比较大. 图 9 中 σ_+ 为双端光电倍增管包含 t_0 涨落的平均时间分辨, σ_- 为双端光电倍增管平均时间分辨, σ_t 为双端光电倍增管加权平均时间分辨.

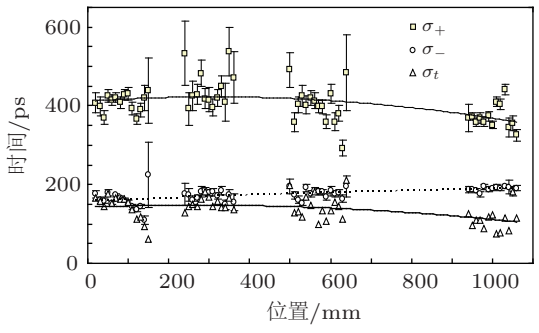

图 9 时间分辨分布图

被测厚闪烁体采用原 BESII 时间探测器备件, 左端采用原备件 R549-5 光电倍增管, 右端采用时间分辨稍好的 xp2020 型光电倍增管.

5.2 闪烁光渡越时间分布

对四组数据的时间差进行拟合, 如图 10 所示, 纵轴为两端光电倍增管测量的时间差, 单位为 ps, 横轴为被测厚闪烁体长度方向坐标, 单位为 mm. 通过拟合可以求出闪烁光在塑料闪烁体中的渡越时间为 7.06 ps/mm, 图中 R^2 为拟合曲线置信度. 闪烁光渡越时间用于对宇宙线击中位置定域, 通过时间探测器测量得到的时间直接初步判断粒子击中的区域, 位置分辨约为 4 到 6 倍时间分辨除以渡越时间, 约为 140 mm, 设计中的通用探测器测试平台的位置探测器电子学读出可以根据粗估的击中区域采用域编码读出, 有效减少读出电子学读出道数.

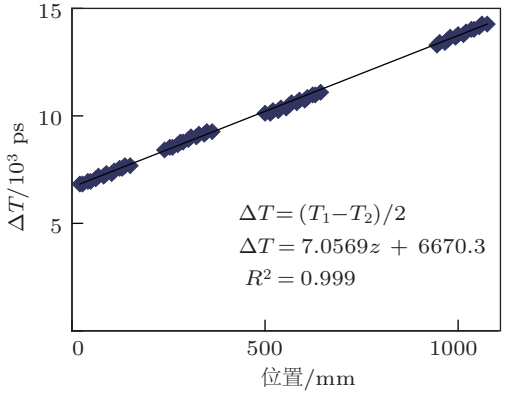

图 10 $\frac{T_1-T_2}{2}$ 时间差分布

5.3 结果讨论

本实验利用 ICCD 定位宇宙线测量, 可以用于探测器的时间分辨测量. 该方法与目前束流实验的测量方法相比, 不受加速器束流实验条件限制, 可以在普通实验室条件下利用宇宙线进行测量, 可以密集多点取数, 长时间测量. 传统利用宇宙线测量法 [5], 由于不能分辨宇宙线位置, 所以只能使用小尺寸塑料闪烁体作为时间起点标记, 测量单点数据. 根据闪烁光渡越时间和闪烁体时间分辨, 可以估算出小尺寸塑料闪烁体尺寸, 测量方向的宽度原则上不超过 20 mm, 才可以忽略触发时间涨落和位置不确定涨落. 根据宇宙线流量, 此方法测量非常困难. 而 ICCD 定位方法可同时测量得到 15 个点的数据, 可以通过位置修正使用部分小角度斜射宇宙线位

置, 提高效率, 所以与传统宇宙线测量方法相比, 新方法取数效率提高 30 倍以上. 适合在没有粒子束流条件下对探测器性能测试研究.

目前市场上商用 ICCD 造价比较高, 本实验利用实验室现有 ICCD 系统, 一共使用 30 路闪烁条信号读出, 平均每路与普通电子学读出造价相比并不具有优势, 由于测量系统规模比较小, 所以没有完全发挥出此系统的多通道优势. 但是通过本实验的方法研究, 为多通道位置探测器信号读出提供了另一种新的思路.

[1] Li J C, Wu Y M, Cui X Z, Zhang L S, Zhou B Q, Liu Z Q, Zhang S P, Liu S X, Sun C C, Shen J, Ying Z J, Zhang Y M, Chen Z X, Zhang Z X, Zhang C D, Zheng L S 2004 *CPC.(HEP. & NP.)* **28** 1269

[2] The most compact intelligent ICCD nano-fast camera system, Stanford Computer Optics Inc. http: // www. stanfordcomputeroptics. com/PDF/4e-data. pdf [2011-10-8]

[3] Plastic Scintillating Fibers, Saint-Gobain Ceramics & Plastics Inc. http: // www. detectors. saint-gobain. com / uploadedFiles / SGdetectors / Documents / Brochures / Scintillating-Optical-Fibers-Brochure. pdf [2011-10-8]

[4] Lu J G, Hu J L, Zheng Y H, Kichimi H, Li J 1999 *CPC (HEP & NP)* **23** 505

[5] Fu Z W, Qian S, Ning Z, Liu S D, Chen X H, Heng Y K, Wang Y F, Qi M, Yang S, Sun Y J, Shao M, LI C, Zheng Y H 2011 *CPC* **35** 946

The study of time-resolved measurement using ICCD positioning cosmic rays*

Lü Qi-Wen[1)†] Zheng Yang-Heng[2)] Tai Cai-Xing[1)] Liu Fu-Hu[1)] Cai Xiao[3)]
Fang Jian[3)] Gao Long[3)] Ge Yong-Shuai[3)] Liu Ying-Biao[3)] Sun Li-Jun[3)]
Sun Xi-Lei[3)] Niu Shun-Li[3)] Wang Zhi-Gang[3)] Xie Yu-Guang[3)] Xue Zhen[3)]
Yu bo-Xiang[3)] Zhang Ai-Wu[3)] Hu Tao[3)] Lü Jun-Guang[3)]

1) (*Institute of Theoretical Physics, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*)

2) (*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

3) (*Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing* 100049, *China*)

(Received 2 November 2011; revised manuscript received 29 November 2011)

Abstract

Double layers of 150 mm×150 mm plastic scintillator arrays are used to locate the cosmic ray. Both layers of arrays are read out by wavelength-shifting fibers, which are bundled and coupled to image intensifier and ICCD camera. The light signal is delayed more than 200 ns by the image intensifier, so the ICCD can be pre-triggered by an external fast coincident signal. This cosmic ray positioning system is used to measure the time resolution and photon transfer time of the time-of-fly detector for the common test platform based on cosmic ray. Compared with traditional cosmic rays test, the data-taking efficiency of this system increases more than 30 times because of multi-point readout and higher position resolution. The test results show that the time resolution of the time-of-fly detector is better than 200 ps, which satisfies the requirement of the common platform based on cosmic ray.

Keywords: ICCD, cosmic rays positioning, TOF detector, time resolution

PACS: 29.40.Mc

* Project supported by the "100 Talents Project" of Chinese Academy of Sciences, China and National Fundamental Fund of Personnel Training (Grant No. J1103210).

† E-mail: luqw@ihep.ac.cn