

用于飞行时间测量的大面积闪烁 计数器定时性能研究

王殿荣 邢士林 林建锋 徐雨林
姜婴嫒 奚基伟 陈元柏 王朝俊
(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

我们研制了用于飞行时间测量的大面积闪烁计数器 ($80 \times 10 \times 1 \text{ cm}^3$), 并对此定时系统进行了时间性能的测量. 对影响定时性能的各种因素进行了研究.

一、引 言

大面积闪烁计数器飞行时间 (TOF) 测量技术广泛地应用于高能物理实验中. 用它不但可以排除本底, 而且还可以鉴别粒子的种类.

在高能物理实验中, 特别是在稀有事例实验中, 鉴别本底, 从大量的本底中挑出少数真实的事例是极其困难和重要的工作. 用 TOF 测量技术不但可以鉴别出杂乱(随机)本底(如宇宙线或其它反应道产物), 而且还可以排除偶然符合本底. 提高 TOF 的时间分辨, 就相当于提高信噪比, Bloom^[1] 已经把 TOF 测量技术用在 SLAC 的实验 $e + p \rightarrow e' + p' + x$ 上来排除本底, 得到了满意的结果.

粒子鉴别是高能物理实验中的重要工作, 近年来粒子鉴别技术得到很大的发展, 目前高能物理实验中常用的粒子鉴别技术有三种: 契伦柯夫计数器, dE/dx 测量和 TOF 测量, 在动量区域 $800 \text{ MeV}/c - 2.0 \text{ GeV}/c$ 内, TOF 测量占了重要地位(这三种技术的详细比较请见文献[2]).

用 TOF 鉴别粒子, 除了要测量它的飞行时间外, 还需测量它的动量, 根据公式(1)可以确定该粒子的质量.

$$M^2 = P^2[\tau^2 c^2 / L^2 - 1] \quad (1)$$

式中 τ : 飞行时间, L : 飞行距离, c : 光速

由于 TOF 测量的时间分辨 $\Delta\tau$ 而引起的质量分辨 ΔM 为

$$\Delta M^2 = 2P^2 \sqrt{\frac{M^2}{P^2} + 1} \left(\frac{\Delta\tau c}{L} \right) \quad (2)$$

对于固定的 $\Delta\tau$, ΔM^2 近似随 P^2 增长, 所以用 TOF 鉴别粒子有一个动量上限, 目前对

本文 1982 年 8 月 19 日收到.

π/K 可分辨的最大动量在 2 GeV 左右 ($\Delta\tau = \pm 0.25$ ns, $L = 5$ 米).

要想提高粒子可分辨的最大动量,必须提高 TOF 的时间分辨.

TOF 测量的时间分辨取决于很多因素,主要有以下几个方面:

(1) 在光电倍增管中,光电子在倍增过程中产生时间离散.即电子渡越时间的涨落,它的大小与在光阴板上打出的光电子数目有关.

(2) 闪烁体的发光时间和光在收集过程中的时间离散.

(3) 由于带电粒子穿过闪烁体的位置不同而引起光脉冲到达光电倍增管光阴极的时间也不同,产生严重的时间离散.

(4) 电子学线路在接收各种前沿和幅度的快脉冲时,产生定时时间的离散.这种时间离散的主要贡献来自于恒比定时甄别器.

本工作是为研制大面积闪烁计数器 TOF 测量系统而做的定时性能研究,对上述几个主要因素进行了初步的探索与研究.

二、测试系统的性能测量和校正

在做大面积闪烁计数器定时性能研究之前,对测试设备的性能进行了一系列的测量与校正.简单描述如下.

(1) FH-451 型 1024 道分析器

用 FH1013A 型精密脉冲产生器测量了 1024 道分析器的线性和稳定性,在 400mV—4V 范围内,其线性好于 1%.8 小时稳定性好于 1 道(4 mV).其中包括精密脉冲产生器.

(2) 时间幅度转换器 (TAC)¹⁾

我们用如下装置测量了它的线性和时间分辨,并对它的刻度进行了校正.

CFD*——恒比定时甄别器.

τ^* ——步进式延迟线(步长 0.5 ns) 最大 32 ns.

TAC*——时幅转换器.

MCA——1024 道分析器



图 1 测量 TAC 线性和时间分辨的示意图

CFD: 恒比定时甄别器

TAC: 时间幅度转换器

MCA: 多道脉冲幅度分析器

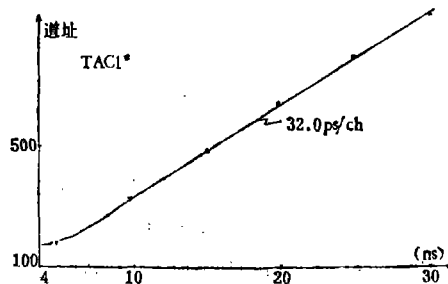


图 2 TAC 线性和校正值

改变延迟时间,由 TAC 把起始脉冲到终止脉冲之间的时间间隔变成幅度,由多道脉

1) 为本所电子车间研制.

冲幅度分析器测量相应的幅度(由道址表示),其测量曲线如图 2 所示。

在 10—30 ns 范围内,其线性好于 1%。

时间离散性 FWHM 约一道 (32 ps)

预热 1 小时后,八小时时间漂移 2~3 道, (小于 100 ps)。

其刻度为 32.0 ps/ch。

(3) 恒比定时甄别器 (CFD*)

CFD 不仅是测试设备中的重要部分,而且也是 TOF 测量装置的关键部分。其测量方法如图 3 所示。

由脉冲产生器输出前沿 ~2 ns, 脉宽 ~5 ns 的不同幅度的脉冲, 分成二路, 分别送到二个性能相近的 CFD (其阈值为 100 mV), 其中一个 CFD 输出脉冲送到 TAC 的起始端, 另一个 CFD 输出经过延迟线送到 TAC 的终止端。

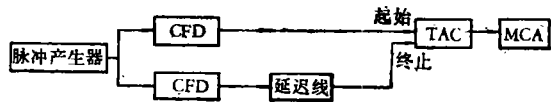


图 3 恒比定时甄别器定时性能测量示意图

输入幅度从 -150mV 变到 -3500 mV 时, 多道分析器测量的峰位变化约八道 (相应时间移动为 ~250 ps), 其峰的 FWHM 约 2 道(相应时间的 FWHM 约 64 ps)。

(4) δ 脉冲光源

我们所使用的 δ 脉冲光源是根据 261 厂提供的资料仿制的。它是利用汞湿式舌簧管在高电压下产生弧光放电的原理制成的。用放电弧光做为脉冲光源, 用放电脉冲做时间信号。用 TEKTRONIX 7904 示波器 (500 MHz) 测得电脉冲的前沿 ~1.5 ns, 半宽 1.7ns, 底宽 ~2.7 ns。 δ 光源的光强可通过偏振片连续调节。

由于舌簧管发光位置受外界影响发生变化, 时间性能和幅度性能都不十分稳定。我们后来又改用氙闪光管 FX 210U 做成 δ 脉冲光源。其电脉冲的前沿 ~1.5 ns, 半宽 1.9 ns, 时间性能与舌簧管差不多, 但稳定性却大大提高了。

三、大面积闪烁计数器定时性能测量

我们所研制的大面积闪烁计数器如图 4 所示。

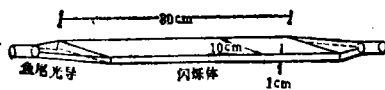


图 4 大面积塑料闪烁计数器的几何示意图

闪烁体采用 1 厘米厚的 NE110 塑料闪烁体板材, 切割成 $80 \times 10 \text{ cm}^2$ 的长条。切割面抛光, 用普通有机玻璃制成鱼尾型光导, 粘在闪烁体二端成为整体, 裹一层铝箔, 外面再包黑色胶带, 两端用 XP 2020 光电倍增管收集光, 光导圆柱面与光电倍增管光阴极面之间用硅油耦合。

在 TOF 测量中, 对时间分辨的贡献, 除了闪烁计数器之外, 更重要的是电子学线路, 尤其是 CFD。为了研究在 TOF 测量中各自对时间分辨的贡献, 我们对每一部分的时间性能都做了研究和测量, 以下仅作简单的描述。

(1) 恒比定时甄别器 (CFD) 时间分辨的测量

首先用放射源 Co^{60} 测量了 CFD 的阈值与其时间分辨的关系, 测量方法如图 5 所示。

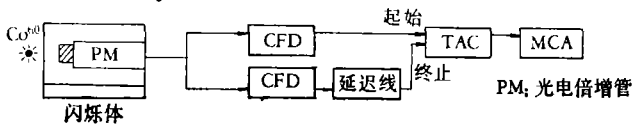


图 5 CFD 阈值与时间分辨测量方块图

同时改变两个 CFD 的阈值, 测得从 CFD 阈值到 Co^{60} 康普顿最大幅度间脉冲幅度谱所引起的 CFD 定时时间离散性(又称 CFD 的时间分辨)。其测量结果如图 6(已折合到一个 CFD)。

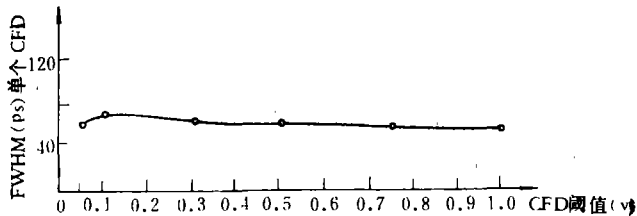


图 6 CFD 时间峰 FWHM 与其阈值的关系

用 Co^{60} 放射源, 光电倍增管最大输出脉冲幅度为 5V, 即输入脉冲幅度从 0.1—5 V 的动态范围内, CFD 的时间分辨小于 80ps, 随着阈值的增高, 时间分辨平缓的变好。

其次我们用 δ 脉冲光源代替 Co^{60} , 测量了 CFD 的时间分辨与光强的关系。测量方法如图 7 所示。

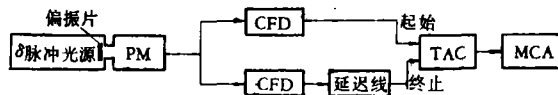


图 7 用 δ 脉冲光源测 CFD 时间分辨与光强关系的方块图

为了方便, 用光在光电倍增管光阴极上打出的光电子数目多少来代替光的强弱。为了标定光电倍增管光阴极发射的平均光电子数目, 首先测量了单光电子的幅度 (V_e), 在同样的条件下, 测量光电倍增管输出脉冲幅度 (V_0), 平均光电子数目可以由 $N_e = V_0/V_e$ 估计。测量结果如图 8 所示。

(2) 光电倍增管时间分辨的测量

从光电倍增管光阴极发射的光电子经倍增极的倍增而到达阳极的时间称为光电倍增管的渡越时间。由于电子在倍增过程中的统计性质以及电子的初速度效应及轨道效应,

1) 该 CFD 是方澄同志的研究生傅玉珊同志的样机。

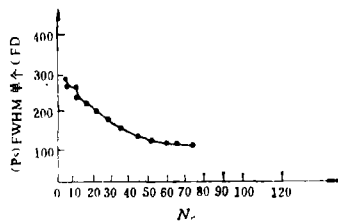


图 8 CFD 时间分辨与光电子数目的关系

产生了电子渡越时间的离散性, 称此为时间分辨. 它不但与光电子发射的角度和位置有关, 还与光电子数目有关, 随着光电子数目的增加, 其时间分辨迅速变好.

用 δ 脉冲光源测量了光电倍增管时间分辨与光强的关系. 其测量方法如图 10 所示.

δ 光源的电脉冲经过衰减, 延迟, 快甄别到 TAC 的终止端. 该电脉冲幅度大而固定, 时间离散性可忽略. δ 光源的光脉冲经过偏振片调节光强后通过 1 cm^2 的准直孔入射到光电倍增管的光阴极, 其输出脉冲由 CFD 甄别定时后送到 TAC 的起始端, 多道脉冲幅度分析器测量时间峰的 FWHM.

用这种方法测量的结果, 不单是光电倍增管的时间离散, 还包括了 δ 光源的时间离散和 CFD 的时间离散 (TAC 的时间离散可以忽略). 即 (δ 光源 + PM + CFD) 系统的时间离散. 在与 CFD 时间分辨测量条件相同的情况下, 测得的结果如图 10 所示.

把图 8 的 CFD 曲线移到图 10 的 (c), 就可以得到 (δ 脉冲光源 + PM) 系统的时间分辨与光电子数目的关系.

在光电子数目 ~ 100 时, (PM + δ) 系统的时间峰 FWHM $\sim 160 \text{ ps}$, 相应的时间分辨率 $\sigma = 66 \text{ ps}$ (FWHM = 2.355σ).

与文献 [3] 给出的数据相近. 从 (PM + δ) 系统中分离出 δ 光源的贡献, 从而得到 PM 的时间分辨, 这是十分困难的. 目前我们还没有条件做到.

用 δ 脉冲光源测量时, 光电倍增管输出的脉冲幅度有一个分布, 随着 δ 光强的增加, 幅度分布变窄, 而 CFD 的时间分辨与幅度分布有关, 随着幅度分布变窄而时间分辨变好, 在该测量中没有反应出幅度分布的因素.

(3) 闪烁体一般性能测量

要提高大面积闪烁计数器 TOF 测量的时间分辨, 必须选用发光时间短, 发光效率高, 自吸收系数小的闪烁体. 闪烁体的发光时间和发光效率的物理测量十分复杂, 由于条件的限制, 我们只是对闪烁体的衰减长度 (自吸收系数的倒数) 做了测量.

通常使用的是闪烁体的技术衰减长度, 它是在物理实验的实际条件下测量的, 这与闪

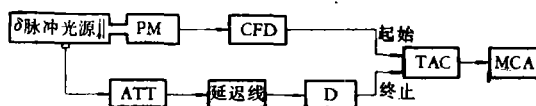


图 9 测量 PM 时间分辨与光强关系的方块图

ATT: 步进式衰减器

D: 快甄别器

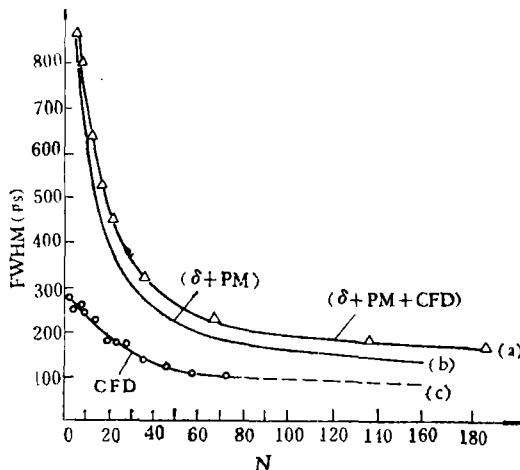


图 10 (a)、(b)、(c) 系统的时间峰 FWHM 与电子数目的关系

烁体的几何和收光好坏有关。

技术衰减长度的测量方法如图 11。

用准直源 Sr^{90} 在闪烁体长度方向上(即 x 方向上)移动,每次移动 10cm,用多道脉冲幅度分析器测量 Sr^{90} 最大幅度的道址的变化。其测量结果如图 12 所示。

由图 12 可见,实验曲线分成二段,在 $x = 20\text{cm}$ 左右有一个拐点,小于 20cm 的一段,光衰减很快,文献[4]对此做了解释。

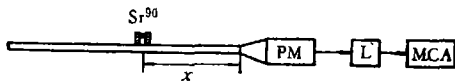


图 11 闪烁体技术衰减长度测量方块图

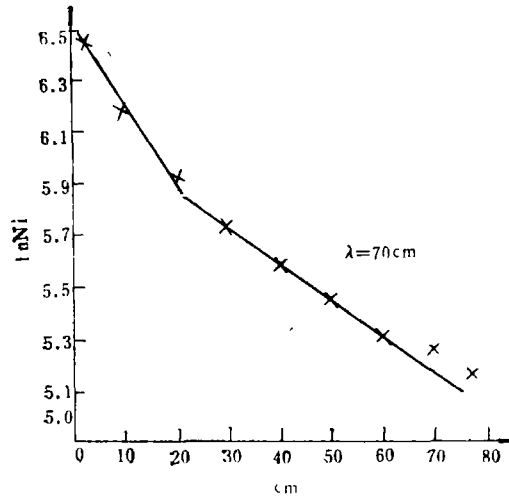


图 12 闪烁体衰减长度测量曲线

大于 20 cm 的一段,基本服从于指数衰减,按公式: $\lambda = \frac{x_1 - x_2}{\ln N_1 - \ln N_2}$ (3)

衰减长度 $\lambda = 70\text{cm}$ 。与用宇宙线 μ 子测量的结果相近。

(4) 闪烁光在闪烁体内的传播速度测量

闪烁光在具有一定几何的闪烁体内的传播速度^[5]为: $V_{\text{eff}} = (c/n) \frac{1}{f}$ (4)

其中 n 为介质的折射系数,对 NE 塑料闪烁体, $n = 1.58$, f 是几何校正因子, c 为光在真空中的传播速度。

当带电粒子落入闪烁体内不同位置时,所产生的闪烁光到达光电倍增管光阴极的时间也不同,如果知道它的传播速度,由它的传播时间就可以定出闪烁点的位置。借此可以确定带电粒子落入闪烁体内的位置。

我们用二种方法测量了闪烁光在闪烁体内的传播速度。

(i) 用一块定位闪烁体做起始信号,测量闪烁光在闪烁体内的传播速度,测量方法如图 13。

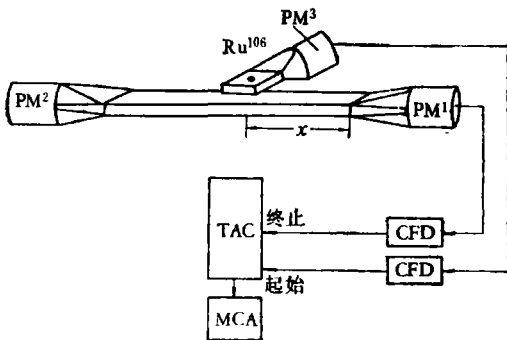


图 13 闪烁光在闪烁体内传播速度测量示意图

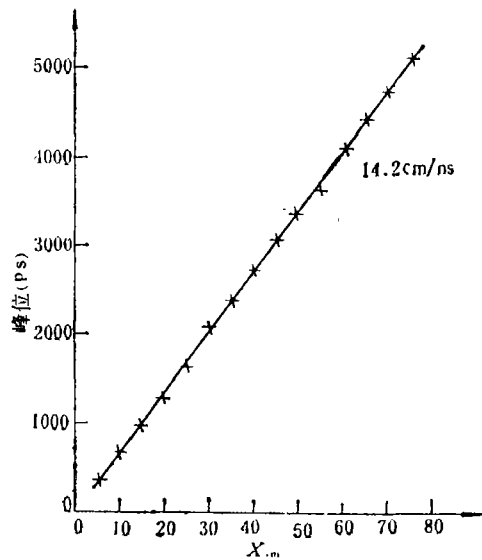


图 14 闪烁光在闪烁体内传播速度测量曲线

在事先做好位置刻度的长条闪烁体上, 和准直 $Ru^{106}\beta$ 源一起沿 x 方向移动定位闪烁计数器 PM3 (其大小为 $4 \times 3 \times 0.2 \text{ cm}^3$), 用 TAC 和 MCA 测量时间峰位的移动, 其测量曲线如图 14 所示: $V_{\text{eff}} = \frac{x}{\Delta t} = 14.2 \text{ cm/ns}$

(ii) 测量闪烁光在闪烁体内的平均传播速度.

在 (i) 项测量中, 选择时间性能相近的二个光电倍增管及其相应的工作条件, 测量它们的平均传播速度, 测量方法如图 15.

准直 $Ru^{106}\beta$ 源沿闪烁体表面移动, 测量时间峰位的移动. 其测量曲线如图 16 所示.

$$V_{\text{eff}} = \frac{2x}{\Delta t} = 14.2 \text{ cm/ns}$$

二种方法测量结果一致, 代入

(5) 式, 可得 $f = 1.28$.

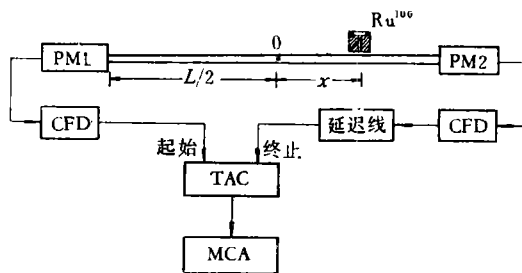


图 15 用 Ru^{106} 测量闪烁光在闪烁体内的传播速度方块图

(5) 闪烁光在闪烁体内的传输对其时间分辨的影响

带电粒子落入闪烁体内不同位置, 形成的闪烁光在向光电倍增管光阴极传输的过程中, 产生时间离散和光子数目的衰减, 因此, 随着传输距离的增加, 其时间分辨变坏. 我们用图 13 的方法测量了这种影响.

测量结果如图 17 所示, $\Delta FWHM \sim 8.1 \text{ ps/cm}$, 文献 [6] 对此也做了详细的测量.

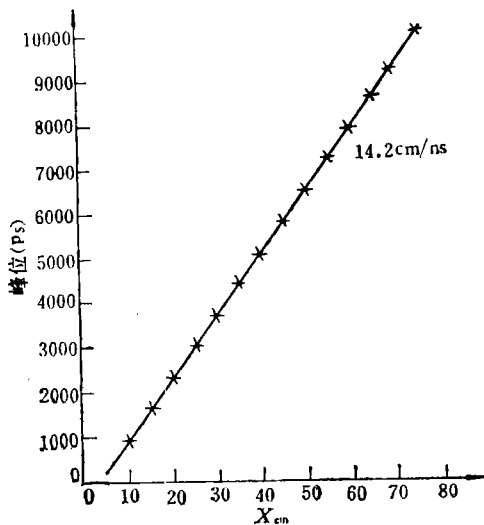


图 16 用 Ru^{106} 测量闪烁光在闪烁体内平均传播速度

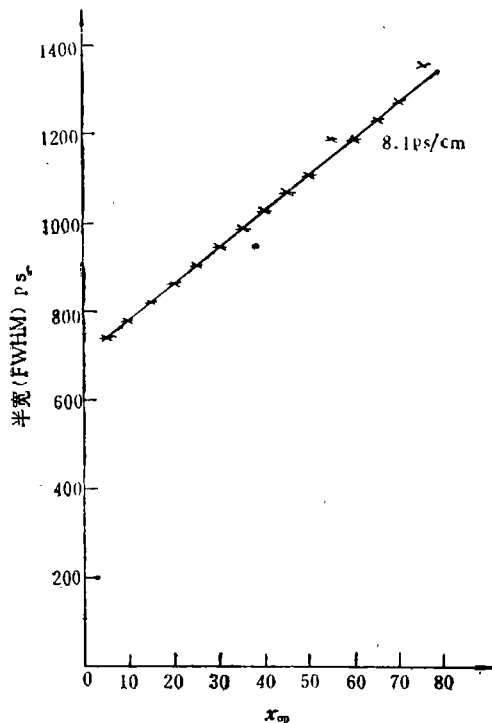


图 17 测量时间峰 FWHM 与 Ru^{106} 位置的关系

四、结 束 语

在用于飞行时间测量的大面积闪烁计数器定时性能研究中,我们力求把各种影响时间分辨的因素分离出来,加以研究,但实际上是很困难的.在测量中,有些数据和曲线是在特定条件下测得的.

在定时性能研究中,我们还仿制了 Lecroy 公司的 624 型时间平均器 (Mean-Timer) 插件,对整个系统的定时性能有明显的改善.基本上消除了系统的时间分辨与 Ru^{106} 源位置的依赖关系.但该插件的稳定性很差,数据不可靠,在本文中并没有给出这部分的测量数据,目前正在研制一种新型的时间平均器.

在实验研究中,得到了谢一冈,张家铨,赵海泉,郑志鹏,章乃森,张天保,方澄,傅玉珊,丁之慧,王曼,徐德琪,杨春敏等同志的大力协助,在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] E. D. Bloom et al., SLAC-PUB-955 (1971).
- [2] William B. Atwood, SLAC-PUB-2620 (1980).
- [3] Branko Leskovic et al., IEEE Trans. on Nuc. Sci. Vol. NS-25, 1(1978), 582.
- [4] D. R. Nicoll et al., "Organic scintillator and Liquid Scintillators", 279, (1971).
- [5] C. WARD et al., Nucl. Instr. & Meth., 30(1964), 61.
- [6] J. Andrejok et al., Nucl. Instr. & Meth. 167(1979), 313.

STUDY OF THE TIMING PERFORMANCE OF A LARGE AREA PLASTIC SCINTILLATION COUNTER FOR TOF MEASUREMENT

WANG DIAN-RONG XING SHI-LIN LIN JIAN-FENG XU YU-LIN
JIANG YING-YUAN XI JI-WEI CHEN YUAN-BAI WANG CHAO-JUN
(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

A large area plastic scintillation counter ($80 \times 10 \times 1 \text{ cm}^3$) for TOF measurement has been made and the timing performance of this system has been measured. Various effects on the timing performance have been studied.