

双层飞行时间探测器(TOF)的性能研究

吕军光¹ 胡敬亮¹ 郑阳恒² H.Kichimi³ 李 金¹

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2 (Hawaii University, USA)

3 (KEK, Japan)

摘要 利用 BC408 塑料闪烁体直接耦合 R2490-05 高抗磁光电倍增管, 组成双层飞行时间探测器. 通过 2GeV 的 π^- 束流测量, 结果表明其本征时间分辨(标准偏差) $\leq 50\text{ps}$. 利用该探测单元组成的飞行时间探测器系统, 以其时间性能、结构、技术成熟和价格的优势, 可以应用到 τ -c 工厂的带电粒子鉴别系统上.

关键词 粒子鉴别 闪烁体 双层 TOF 时间分辨

1 引言

在 τ -c 工厂的探测器设计中, 带电粒子鉴别系统需满足下面的要求: (1) 在物理方面, 其 K/π 分辨能力在动量至 $1.5\text{GeV}/c$ 的区域内要达到 3σ ($\sim 95\%$); (2) 与电磁量能器的能量分辨性能 ($\sim 2\%/\sqrt{E}$) 匹配并尽可能地降低其造价; (3) 提供整个谱仪的带电粒子触发和排除宇宙射线的功能. 根据上述设计要求, 在北京 τ -c 工厂可行性研究^[1]中, 对此系统提出了: Aerogel Cherenkov + TOF, 石英条 Cherenkov + TOF 和双层 TOF 3 个候选方案. 对这 3 个方案的选择基准是: 在满足基本要求的前提下更着重于方案的技术成熟、结构简单以及造价便宜.

对于 Aerogel Cherenkov 方案^[2], 无论是采用高抗磁光电倍增管直接读出 Aerogel Cherenkov 光, 还是通过波移光导间接读出, Cherenkov 探测器所采用的光电倍增管数量、造价和必需的 Aerogel 层的厚度所增加的电磁量能器的造价都很可观. 石英条 Cherenkov 方案^[3]通过双端直接耦合高抗磁的光电倍增管读出^[4,5], 其带电粒子鉴别能力, 刚好覆盖 τ -c 物理能区, 结构简单、径向空间小, 是一个很好的候选方案. 只是石英条的加工精度要求极高, 造价也很可观. 双层 TOF 的方案采用快塑料闪烁体, 直接耦合高抗磁光电倍增管, 技术成熟、结构简单, 造价也大为减少, 但该方案的关键技术是能否满足 50ps 的时间分辨率. 理论计算表明: 带电 K 、 π 粒子在不同极角方向击中半径约为 85cm 的双层 TOF 系统时, 除 0° 极角小区外, 大部分区域在动量覆盖到 $1.5\text{GeV}/c$ 的情况下, 可达到 K/π 分辨 3σ 水平.

2 双层飞行时间探测器的结构

一个完整的双层 TOF 单元设想如图 1 所示. 它由两层 TOF 组成, 长短闪烁体块各层交迭放置, 以覆盖中间部位安装有光电倍增管的死区. 在这一区域只有单层闪烁体被粒子击中, 其余为双层闪烁体击中.

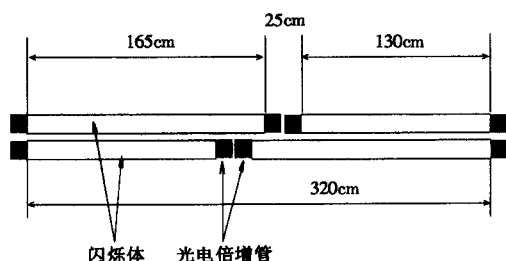


图1 双层TOF单元模型示意图

提供作实验测量的简化模型, 只利用了两块长度各为 165cm, 130cm 的塑料闪烁体 (BC408), 截面为 5cm(厚) \times 5.5cm(宽), 是从一块存放了 3 年的大块样品中切割、机加工, 经人工抛光而成. 闪烁体外面包装了镀铝塑料膜反射层, 实验中测到的衰减长度只有 $\sim 1.5\text{m}$. BC408 闪烁体的发光衰减时间为 2.3ns. 实验采用 4 只直径 51mm 抗磁光电倍增管, 直接耦合到闪烁体两端. 在测量时, 两块闪烁体迭起, 一端对齐, 取相同的长度坐标. 光电倍增管的型号为 R2490-05, 灵敏窗直径 36mm. 分压器电路参照 HAMAMATSU 产品说明书, 自行设计和制成. 工作电流取 0.3mA, 只有阳极信号输出, 未接输出负载电阻.

本文将给出该双层 TOF 简化模型在日本 KEK 2GeV/c 动量的 π^- 束下测量中得到的时间分辨性能.

3 束流实验安排

实验是在日本 KEK 实验室利用 2GeV/c 动量的 π^- 束完成的. 图 2 和图 3 分别表示实验的安排和电子学的布局. 探测器 A 和 B 为被测的双层 TOF 模型, A1 和 B1 位置拼齐放置, 并做为坐标 $z = 0$ 起点. 实验束流从垂直长度方向照射闪烁体模型. 从 $z = 5\text{cm}$ 到 $z = 125\text{cm}$ 取 9 个位置点, 在 50mV 和 30mV 不同的甄别阈下, 每个位置分别取大约 2000 个事例. 探测器靠人工移动和标定位置.

对每路 S, A, B 的光电倍增管信号, 分别记录了积分脉冲电

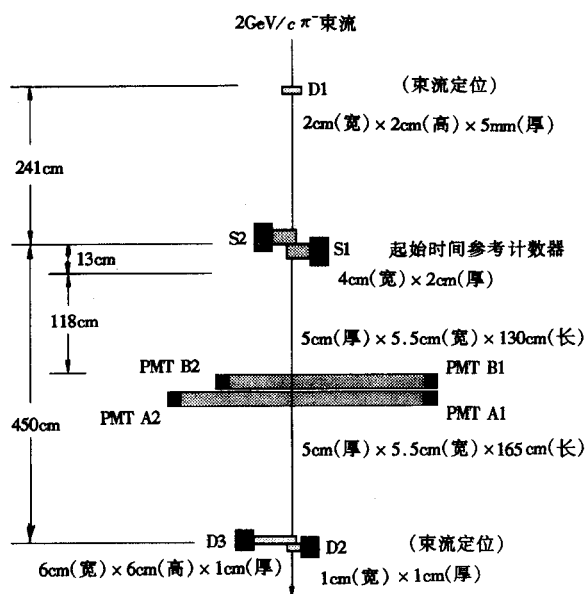


图2 双层TOF模型实验的安排

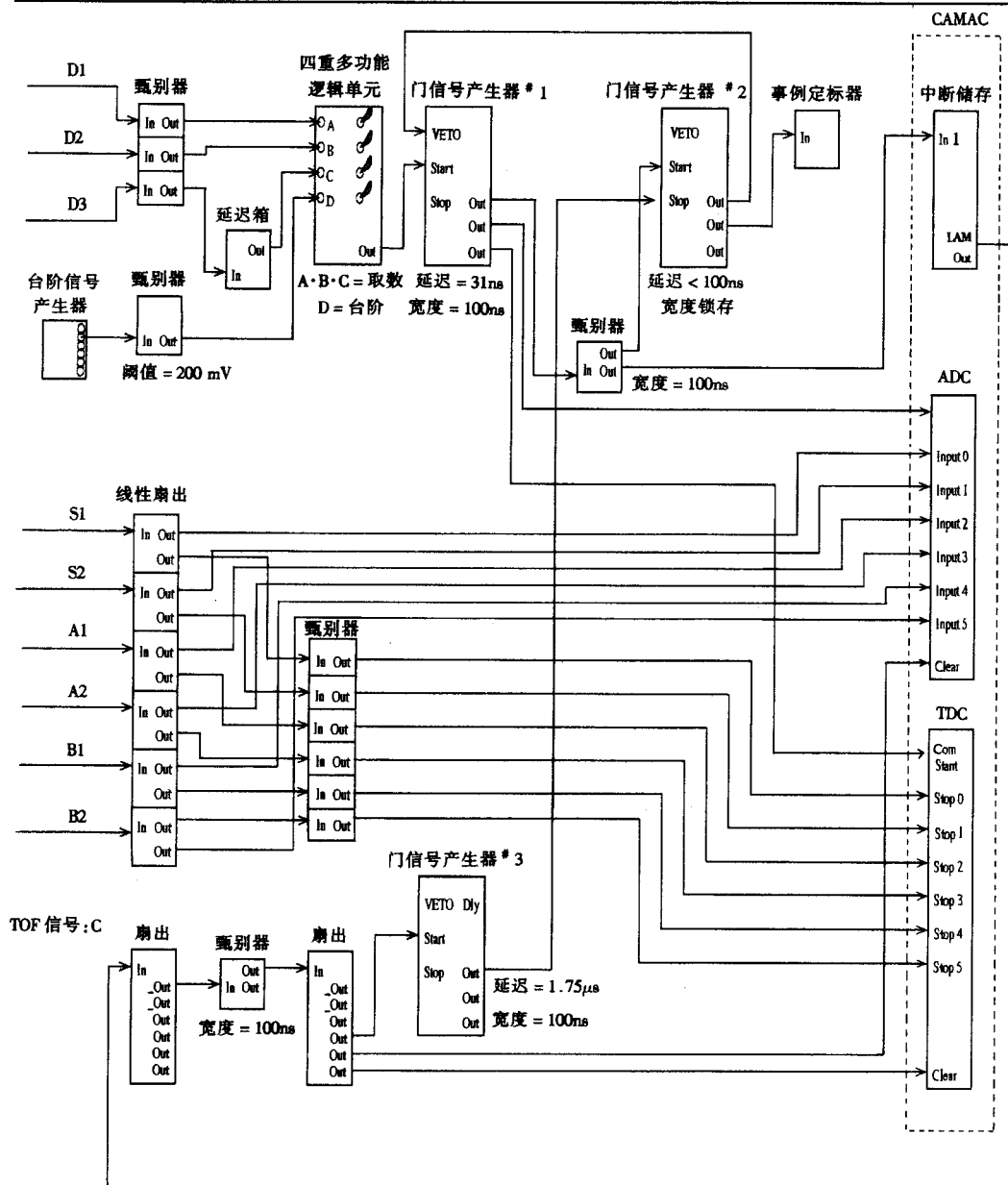


图3 双层TOF模型实验的电子学的布局

荷 Q 和时间间隔 t (相对于由 D1, D2, D3 的符合信号提供的公共起始时间)。通过下式:

$$T = t - T_s, \quad T_s = \frac{1}{2} (t_{s1} + t_{s2}) \quad (1)$$

计算, 将 t 转换为时间间隔 T (各路相对于参考时间 T_s)。这里 t_{s1}, t_{s2} 为时间参考探测器的原初时间间隔, 但已经过时幅修正。由于实验中束流的前部定位主要由束流出口的狭缝宽度确定, 约 4mm, 参考时间的误差 σ_s 可近似用 $T_s = \frac{1}{2} (t_{s1} - t_{s2})$ 分布的误差 (平均为 40ps) 代替。

4 实验数据处理

时间间隔 T 又可以定义为:

$$T = t_0 + t_\tau + t_1 + t_2(Q, Z) + Z / v_{\text{eff}}. \quad (2)$$

t_0 为一常数, 表示参考时间 T_s 与各路终止时间之间的电缆、电子学等固有延迟时间之差; t_τ 表示粒子由 S 探测器击中到 TOF 探测器的飞行时间; t_1 为系统的时间偏差; 它至少包括了参考时间、TOF 终止时间的时间偏差和由于 z 坐标的不确定而导致的时间偏差; t_2 为前沿定时甄别器甄别对于脉冲幅度大小造成的时间偏差. z / v_{eff} 是闪烁光在闪烁体内传播的等效时间, v_{eff} 为等效速度. 在整个 z 的区域内 v_{eff} 并不总是常数. 采取以下两种方法对数据进行处理.

(1) 与击中坐标无关的处理

在此分析中, 只考虑各路中的时间—幅度的修正, 且修正与各击中的 z 坐标不发生关系:

$$T' = T - \alpha / \sqrt{Q}. \quad (3)$$

通过上式拟合, 从各点击中的数据获得各路的 α 参数, 将数据用此式再重建, 得到新的数据组 T' . 利用高斯拟合 T' 的分布, 得到各路的 σ 值, 先扣除起始参考时间误差 (平方差), 经平方和计算给出单层和双层 TOF 探测器的时间分辨分布 (图 4). 从结果看, 在两层闪烁体击中区域 ($< 130\text{cm}$), 时间分辨 $< 50\text{ps}$ 、单层击中区 ($\geq 130\text{cm}$) 为 65ps 的结果.

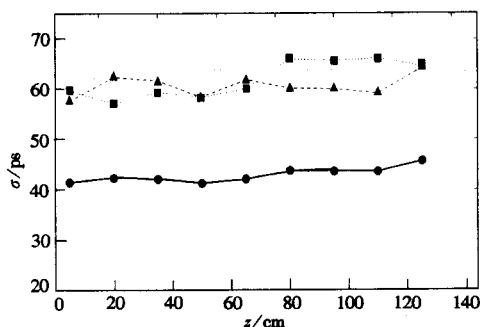


图 4 时间分辨分布图

■ 165cm 长闪烁体的时间分辨, ▲ 130cm 长闪烁体的时间分辨, ● 双层闪烁体的时间分辨. 阈值 = 30mV.

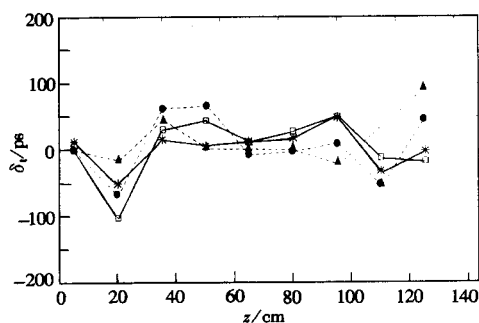


图 5 平均时间差 δ_t 的分布

□, * 分别表示由 B1、B2 端测得的时间偏移, ▲, ● 是由 A1、A2 端测得的时间偏移. 阈值 = 30mV.

(2) 与击中 z 坐标相关的处理

利用经验公式

$$T' = T - c_1 - [c_2 + c_3 \times z] / \sqrt{Q} - [c_4 + c_5 \times z] / Q - [c_6 + c_7 \times z] \times z - c_8 / (1.1 + z^2) \quad (4)$$

来描述时间—幅度修正以及这种修正对不同 z 位置的差异. 纯 z 项是描述闪烁光在闪烁体中的有效传输时间, 包括了高阶项的修正, 负 z 项是修正闪烁体近端传输时间的非线性变化的.

选用各 z 点击中的一半数据 (各点约 1000 事例), 经多参数迭代程序运算, 给出各路参数 c_i 的拟合值, 然后重建另一半的事例, 得到一组新的时间 T' . 经高斯拟合数据 T' 的分布, 给出各路、各点的时间分辨 σ_i , 与上一种做法相比, 得到的各点 σ_i 值变化不大, 稍好一些, 没有大的改善. 利用新的数据, 进行下边两项检验.

(A) 时间偏移检验. 利用公式

$$\delta_i = T - T' + c_1 + [c_2 + c_3 \times z] / \sqrt{Q} + [c_4 + c_5 \times z] / Q + [c_6 + c_7 \times z] \times z + c_8 / (1.1 + z^2) \quad (5)$$

对于各路、各点, 得到了不同的平均时间差 δ_i , 其分布如图 5. 偏移量基本是无规的, 但有些点的偏移超过 100ps. 这些偏移的来源可能是实验中人工移动探测器定位造成的.

(B) 分辨率检验. 以各路、各点的时间分辨率为权 ($w_i = 1 / \sigma_i^2$), 对测量时间 T 作加权平均计算. 由加权平均得到的平均时间 T 的分布, 经高斯拟合即可获得各点的单层、双层时间分辨. 如果将各点的 T 都折算到中心点进行计算, 单层的时间分辨分别为 83ps、76ps, 双层为 66ps. 这个结果包括了参考时间误差, 束流定位误差导致的时间误差、各点的时间偏差和 TOF 本征的误差.

对于束流定位不确定导致的时间误差, 从渡越时间分布曲线得到一个结果: 在闪烁体的端区, 偏离线性较大; 远离光电倍增管的位置, 线性较好. 单层闪烁体的平均时间 $T = \frac{1}{2}(T_{B1} + T_{B2})$ 的分布曲线也有类似现象: 中间大部分区域接近常数, 端区发生畸变. 说明端区定位误差导致的时间误差较大.

为了得到 TOF 探测器的本征时间分辨, 利用经方法 (2) 修正后的数据组 T' . 通过公式

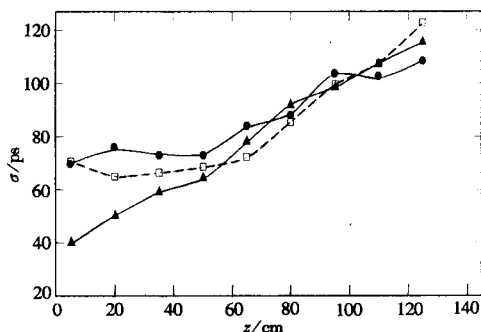
$$T = (T'_{A1} - T'_{B2}) / \sqrt{2} \quad (6)$$

进行了单事例运算, 得到各点 T 分布的时间误差 σ , 由于 T'_{A1} 和 T'_{B1} 都包含有相同的参考时间误差、束流定位误差, T 的分布已经消除这些时间误差, 只保留本征误差. 可以近似地认为两路的本征误差相同, 即

$$\sigma_{A1} \approx \sigma_{B1} = \sigma. \quad (7)$$

图 6 给出了 σ 和由方法 (2) 得到的两路误差 (扣除 σ_s) 的分布及比较. 可以看到在近端区 σ 要小得多, 远端差别不大.

同样, 假设 T'_{A2} 、 T'_{B2} 端的本征时间分辨也分别类同于 T'_{A1} 、 T'_{B1} , 即在近端 < 50cm 内, 均取对应的 $(T'_{A1} - T'_{B1}) / \sqrt{2}$ 的 σ 值, 远端仍然取方法 (2) 得到的时间误差值. 利用平方和的关系式计算, 分别得到单层、双层 TOF 的本征时间分辨, 如图 7 分布. 从分布中可以看

图 6 σ 和两路误差时间的分布

□, ●, ▲分别代表 T_{A1} , T_{B1} (已扣除 σ_s) 和 $(T_{A1} - T_{B1}) / \sqrt{2}$ 得到的时间误差. 阈值 = 30mV.

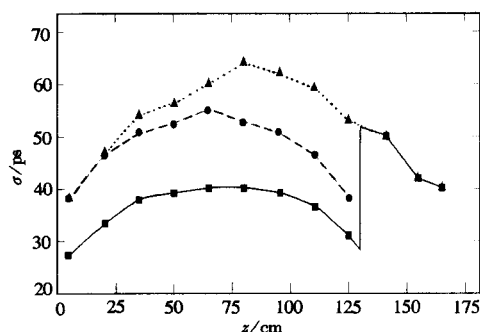


图 7 单层、双层 TOF 的本征时间分辨

▲165cm 长闪烁体的时间分辨, ●130cm 长闪烁体的时间分辨, ■双层闪烁体的时间分辨. 阈值 = 30mV.

到, 在双层闪烁体击中区域, 本征时间分辨可以达到 40ps; 在单层闪烁体击中区, ≤ 50 ps. 这个结果可以满足双层 TOF 的方案设计要求.

5 讨论

利用 BC408 闪烁体和 R2490-05 (灵敏窗为直径 36mm 的高抗磁光电倍增管) 建立的双层 TOF 探测器, 通过 2GeV 的 π^- 束测量, 结果表明双层 TOF 探测器的本征时间可以达到 50ps 的分辨. 该探测器以其性能、技术成熟和价格的优势, 可以应用于 τ -c 工厂或相同能区的正负电子对撞机谱仪上的带电粒子鉴别系统. 另外, 该探测器还可通过以下几种方法得到改善:

(1) 使用发光更快的 BC404 型闪烁体和灵敏窗直径 40mm 的光电倍增管.

(2) 适当提高工作高压. 在模型实验中, 光电倍增管的工作高压使用较低, 近端平均 ADC 道均小于 1000 道 (饱和 4000 道). 从甄别阈值 30mV 和 50mV 的结果比较, 阈值为 30mV 时的时间分辨对各路均比 50mV 时小 5—10ps.

(3) 实际上, 布置 2 只高抗磁光电倍增管只需 20cm 长的空间. 将 130cm 长的闪烁体增长到 145cm, 那么时间分辨相对较差的单层击中区将缩短.

(4) 因条件所限, 本束流实验是在未加磁场的情况下完成的. 但 KEK B 工厂的 TOF 组在这方面做了大量的实验研究. 根据文献 [2], 虽然光电倍增管在磁场中输出幅度下降很大, 但当外磁场场强 < 1 T 时, 时间分辨变化较小; 当磁场达到 1.2T 时, ~ 100 ps 的分辨约增加 10ps. τ -c 工厂的设计磁场 < 1 T, 而且有望采用抗磁性能更好的光电倍增管.

BES 的 TOF 组在实验模型的制作过程中, 给予了我们大力支持。在 KEK 所做的束流实验得到了中国科学院高能物理研究所的张长春教授、日本 KEK 研究所的 F. Takasaki 教授、夏威夷大学的 S. Olsen 教授和 G. Varner 博士等以及 Belle TOF 组所有成员的帮助, 在此向他们一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Feasibility Study Report on Beijing Tau-Charm Factory, IHEP-BTCF Report-03, Oct. 1996
- 2 The Belle Collaboration. Technical Design Report, KEK Report 95-1
- 3 The BarBar Collaboration. Technical Design Report, SLAC-457, 1994
- 4 Honscheid K et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., 1994, A343:306
- 5 Kichimi H et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., 1996, A371:91

Performance Study of Double-layer TOF Detector

Lü Junguang¹ Hu Jingliang¹ Zheng Yangheng² H. Kichimi³ Li Jin¹

1 (Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

2 (Hawaii University, Honolulu, HI 96822, USA)

3 (KEK, National Laboratory for High Energy Physics, 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibarakiken 305, Japan)

Abstract We have studied the performance of a doublelayer TOF unit, which is made of two BC408 scintillators coupled directly with high antimagnetic R2490-05 PMTs. The experimental results using a 2GeV π^- beam show that its time resolution is less than 50ps. With the good time resolution, simple construction, mature technique and low price, the TOF detector composed of the unit studied herein is capable to be applied in the PID system in the τ -c factory.

Key words particle identification, scintillator, double-layer TOF, time resolution