

BESIII-CsI(Tl) 晶体量能器时间信息的研究

单利民^{1;1)} 尚雷¹ 王志刚^{1,2} 谢文杰^{1,2} 秦纲¹ 刘春秀¹ 俞伯祥¹ 董明义¹
蔡啸¹ 周莉¹ 夏小米¹ 赖元芬¹ 王曼¹ 刘万金¹ 孙丽君¹
方建¹ 何苗¹ 胡涛¹ 吕军光¹

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (山西师范大学 临汾 041004)

摘要 BESIII-CsI(Tl) 晶体量能器采用FADC的DAQ电子学读出系统. 通过扫描信号幅度的分布寻找信号峰位. 为了降低扫描时间窗内(3 μ s)的低能本底计数、提高能量分辨和降低无效计数率, 除了传统的输出信号峰位(表征沉积能量)之外, 我们引出另一个较粗的时间信息, 即对应信号峰位的扫描步长数, 其步长精度为50ns. 本文将通过电子束流实验研究对这一时间信息的特点及如何利用时间信息进行详细的分析和讨论.

关键词 CsI(Tl)量能器 FADC 能量分辨率 时间信息

1 时间信息的引出

BESIII-CsI(Tl) 量能器^[1] 总共有6240路探测单元. 如图1, 每个探测单元, 由一块CsI(Tl)晶体(典型尺寸: 两端面分别为5.0cm \times 5.0cm和6.5cm \times 6.5cm, 长28cm)和两片面积为1.0cm \times 2.0cm的Hamamatsu 2744-08型硅光二极管组成. 电子学为两路独立的电荷灵敏放大器, 然后相加耦合到一路主放. 信号并联输出到3路(倍增系数分别为1/2, 2, 16)FADC(20MHz)分别对应3个能区, 扫描数据循环暂存(深度为100位). 从主放大器输出的典型信号峰的半宽为3 μ s, 每50ns有一个FADC扫描数值, 由3路FADC构成有效15bit(2GeV)的能区. 实际运行中一旦有好事例的触发启动, 3路FADC将以对应信号峰前沿的一半处对暂存数据进行逐点比较确定幅度最大值, 同时

也确定从触发起点到峰位对应的FADC的扫描步长数, 即时间信息. 幅度信息的每个能区有不同的电子学台阶和不同的放大系数, 而时间信息适当调整可使3路台阶达到一致(如图2), 并且, 能量越大的区, 时间误差越小.

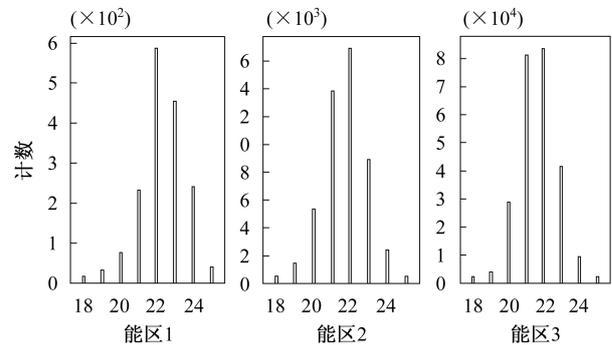


图2 3个能区的时间信息分布图

横轴: 峰位扫描步长数, 每一道50ns; 纵轴: 计数.

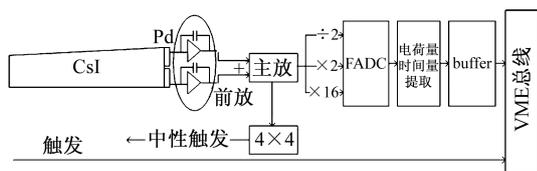


图1 晶体探测单元读出电子学框图

2 CsI(Tl) 探测器的本底来源

CsI(Tl) 探测单元的本底含物理本底和电子学噪声. 物理本底指晶体内部的放射性杂质、环境放射性

2006 - 03 - 07 收稿, 2006 - 05 - 08 收修改稿

1) E-mail: lm_shan@ihep.ac.cn

及BESIII运行中束流丢失造成的辐射背景;电子学噪声指电子学本身受周围环境的热噪声和电磁干扰引起的噪声.这些噪声构成探测器中的小脉冲输出,如果在正常的好事例触发时间窗(3 μ s)中符合出现,其中幅度超过预先设置的等效能量阈值时,将被输出记录为一个正常小信号.

对于量能器,为得到好的能量分辨,须仔细研究本底的来源和如何尽量扣除本底.

2.1 实验室中探测单元的本底计数率

在实验室,单个探测单元的本底计数率和对应能量阈的分布如图3,此图是从固定时间测量本底能谱计数分布转换过来的(并做死时间修正),积分单位时间内过某能量阈的总计数即为此能量阈的本底计数率.从图中可以看到,在0.4MeV以下,计数急剧上升,可认为主要是电子学噪声的贡献,平均噪声水平约为200keV;在0.4MeV附近为拐点,大于0.4MeV的计数多为环境本底如 ^{40}K 和晶体内部钷系级联衰变粒子.当阈值超过0.5MeV,计数率为1.5kHz,若单是以此估算,对任意的一次随机触发(相当于3 μ s),量能器(6240道)约有30个探测单元有本底计数.

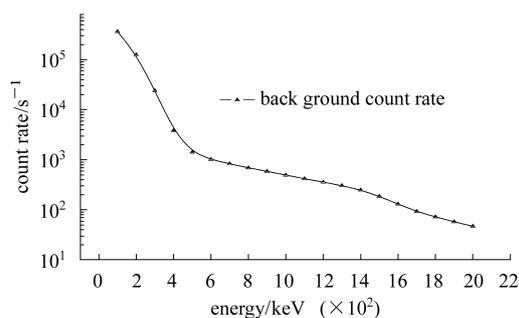


图3 单个晶体探测单元的本底计数率随不同能量阈的分布

2.2 在谱仪运行中的束流本底

束流运行中的本底辐射有多种情况^[2],包括低能同步辐射,电子束打在真空管道中的残余气体的作用,束流的韧致辐射,在对撞区的正负电子束相互作用和在对撞近点的超导聚焦磁铁所造成的非聚焦丢失电子,其中以最后者为重.在这一区域的束流丢失比贮存环中平均值高50%.由加速器的运行参数^[3]: e^+e^- 对撞间隔8ns,在大于1.5GeV能区,束流流强接近1A,束流寿命 $<2\text{h}$.以此估计:在BESIII谱仪区丢失正负电子数约高达80个/ μs .这些高能电子,在超导聚焦磁铁和轴屏蔽罩中产生簇射(对直射和斜射:分别约为11和15个辐射长度),簇射尾部泄漏的低能 γ 射线将在晶体中沉积能量.每个1.5GeV电子簇射,大约有

50MeV的能量从屏蔽体泄漏,若一次平均有4块晶体被簇射尾部泄漏的低能 γ 射线击中,并超过0.5MeV的能量阈值,在3 μs 内(相当于一次触发)约有近1000路的晶体探测单元有束流本底计数.

BESIII正常好事例的触发率约接近2kHz,加上本底触发事例约为4kHz.任意的一次触发将会有很多晶体单元通道有过阈信号.如此多的本底输出,将会对数据获取构成压力.

另外,在离线数据分析中,首先是对 γ 重建中的 3×3 或 5×5 晶体阵列进行能量积分,本底计数的进入将造成能量分辨变差;其后在物理分析中的两 γ 组合成 π^0 , η 过程中,必须要分别用多个 γ 轮番进行两两组合,构成 π^0 , η 的不变质量,并以此判定哪两个 γ 为 π^0 , η 衰变产生的子粒子,假 γ 本底的存在会造成大量的错误组合计算,并增加错误组合的可能.

3 时间起点的涨落

时间信息的精度包括触发时间(T_0)的精度和CsI(Tl)探测单元本身的时间精度.根据物理要求,BESIII设定了几种触发方式,对应的触发时间涨落有:

1) 带电粒子触发.由BESIII飞行时间探测器完成,主要由带电粒子的飞行时间和击中位置导致的闪烁光传输时间而定,触发时间涨落约 $<30\text{ns}$.

2) 中性 γ 触发.由晶体量能器的高能量(总能量大于400MeV)沉积产生.时间精度由量能器多块晶体(4×4)的信号相加,经过类似恒比定时电子学的信号处理给出定时信号.最大时间涨落 $<100\text{ns}$.

3) 纯径迹室触发.对于稀有的重粒子末态物理道.在1T的轴向磁场中,重带电粒子由于较低的横动量,可能穿不透径迹室,到达不了飞行时间探测器,并且也没有高能 γ 沉积在量能器中产生中性触发,其触发只能由径迹室提供.时间涨落由漂移室单元的漂移时间变化确定.由于同时有多单元击中,可能引起的最大时间涨落 $<400\text{ns}$.

4 时间信息的利用方法

根据物理和电子学整体系统调整的要求,量能器单元需设置一个3 μs 宽的FADC扫描时间窗.面临如此多的本底计数通道,只有在电子学DAQ中输出一个粗的时间信息,用来压制本底计数.

由于触发时间的不确定性,再加上探测单元本身的时间精度,测量时间不宜直接运用.由于簇射能量主要沉积在中心区1—3块晶体内,而且沉积的能量

越大时间精度会越好, 可以选一个沉积能量最大的探测单元的时间信息作为种子信号的时间信息, 所有其他探测单元的时间信息与之相减, 其时差就已经扣除了触发信息的涨落. 通过束流实验, 用高能(约 1GeV)的电子击中阵列晶体中心的一块晶体, 产生簇射过程, 由于中心晶体沉积能量高, 把它作为种子晶体. 通过测量所有晶体的时间信息与种子晶体的时间差, 并确定其误差大小. 在真实的运行中, 可以依此误差设置一个时间差范围, 范围之内的认为是由同一粒子簇射产生的信号, 范围之外的认为是束流本底将其扣除. 在以后离线数据处理中, 在先扣除本底通道的情况下再进行多块晶体的总能量积分和多 γ 的组合.

5 时间信息的束流实验

为了研究时间信息, 在高能物理研究所试验束^[4] E3 束上进行了 6×6 晶体阵列的束流试验. E3 束由 E2 电子束打靶产生次级粒子 ($\gamma, e^\pm, \pi^\pm, p$, 以及 π^\pm 衰变产生的 μ^\pm 等), 次级电子引出采用钨碳复合靶或铜靶, 利用四极磁铁收集从 15° ‘产生角’ 出射的带电粒子. 通过偏转磁铁与狭缝一起选择所需种类的带电粒子 (正电荷粒子或负电荷粒子) 和所需动量的粒子, 动量连续可调. 束流环境和晶体阵列见图 4 和图 5, 主要由一个契伦科夫计数器、两个闪烁计数器、3 个 2 维读出的多丝正比室加上晶体阵列组成. 晶体阵列束流试验

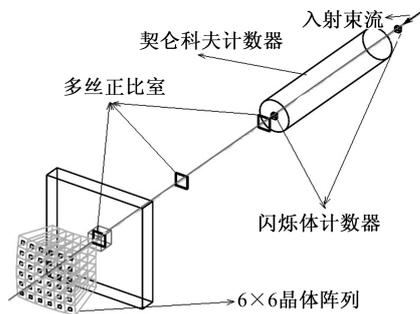


图 4 束流入射环境

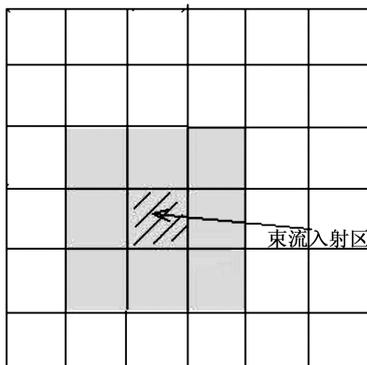


图 5 6×6 晶体阵列 (前端面)

采用的是 BESIII 量能器真实的电子学系统 (前放、主放和 VME-DAQ), 由多丝正比室给出电子击中晶体阵列的坐标信息, 由闪烁计数器和丝室信号符合给出触发信号, 时间精度约 200ps. 实验主要对 6×6 晶体阵列进行了 1GeV 电子束的定点扫描.

6 实验数据分析

晶体探测单元的正常信号和前端噪声信号如图 6, 由于前放为电荷灵敏放大, 它们的信号都是通过前放的积分和主放的微分, 波形基本形状相似, 只是幅度相差很大, 上升沿时间也基本相同, 小于 $3\mu s$.

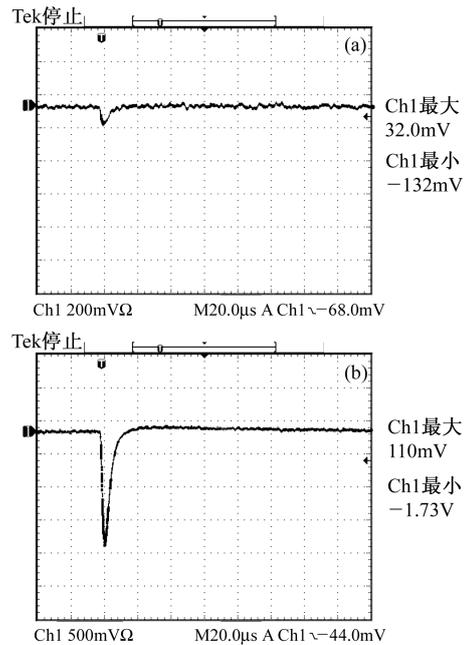


图 6 噪声和信号波形

(a) 噪声信号; (b) 宇宙射线打在晶体上产生的信号.

在无束流情况下, 利用随机触发测量电子学噪声的台阶信息, 其对应的的时间信息如图 7, 在 $3\mu s$ 的时间窗内是一个均匀分布.

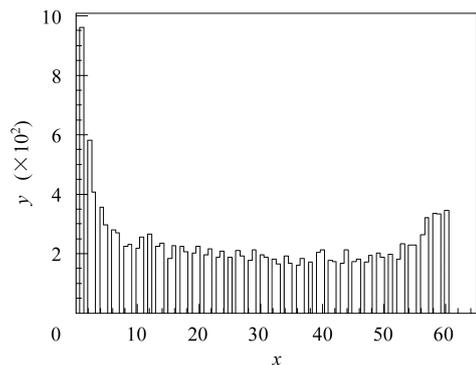


图 7 随机触发时噪声信号寻峰的时间信息分布
x: 峰位扫描步长数; y: 计数每一道对应 50ns.

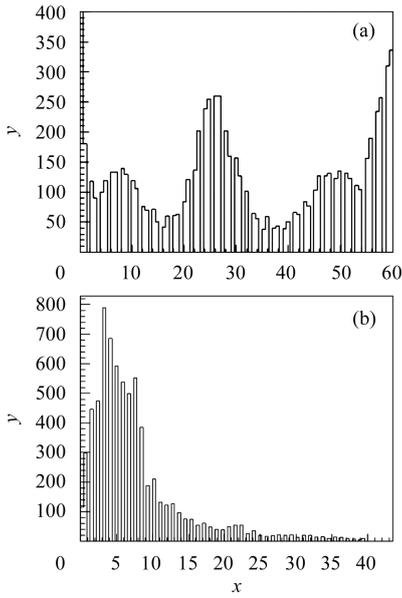


图 8 边角探测单元的时间分布和对应的噪声能谱 (每一道对应 50ns)
 (a) 束流环境的实际噪声对应的时间分布(x : 峰位扫描步长数; y : 计数); (b) 噪声能量沉积分布(x : ADC 峰位; y : 计数).

当有束流击中 6×6 晶体阵列的中心晶体时将产生事例触发, 此时阵列边角探测单元的时间信息如图 8(a) 和幅度信息如图 8(b) 所示. 时间信息分布基本上

为噪声时间分布和少量的与束流有关的时间分布(中间区), 幅度分布主要是噪声分布(已减电子学台阶, 60keV/道).

通过对中心区 3×3 晶体输出时间信息的分析, 可以得到粒子击中中心晶体探测单元的时间精度 σ_t 接近 60ns, 从周围晶体与中心晶体时间差的分布(图 9), 可以得到每块晶体相对于中心晶体的时间差误差 $\sigma_{\Delta t}$ 小于 150ns.

研究了 3×3 晶体阵列的能量分辨随设置不同时间差范围的变化. 电子的入射能量为 1GeV, 击中在中心晶体的中心区 2cm^2 内, 每个事例只取 3×3 晶体阵列中时间差范围 $\pm N \times \sigma_{\Delta t}$ (每块晶体 $\sigma_{\Delta t}$ 由图 9 拟合得出约 150ns) 内的沉积能量. 当 N 取不同值时, 分辨率变化如图 10, $N=6$ 时分辨率最好, N 太大或太小分辨都略变差, N 太大会积分进较多本底计数, N 太小会扣除掉较多真信号.

由于束流试验中的数据分析去掉的多是探测单元本身的噪声计数, 所以对能量分辨率的改善有限. 但实际运行中, 主要去掉的是束流丢失的物理本底计数, 这些本底的计数率高, 能量分布也大, 所以在将来的 BESIII 实际运行中, 通过时间差窗的选择将会对能量分辨率改善产生较大的影响.

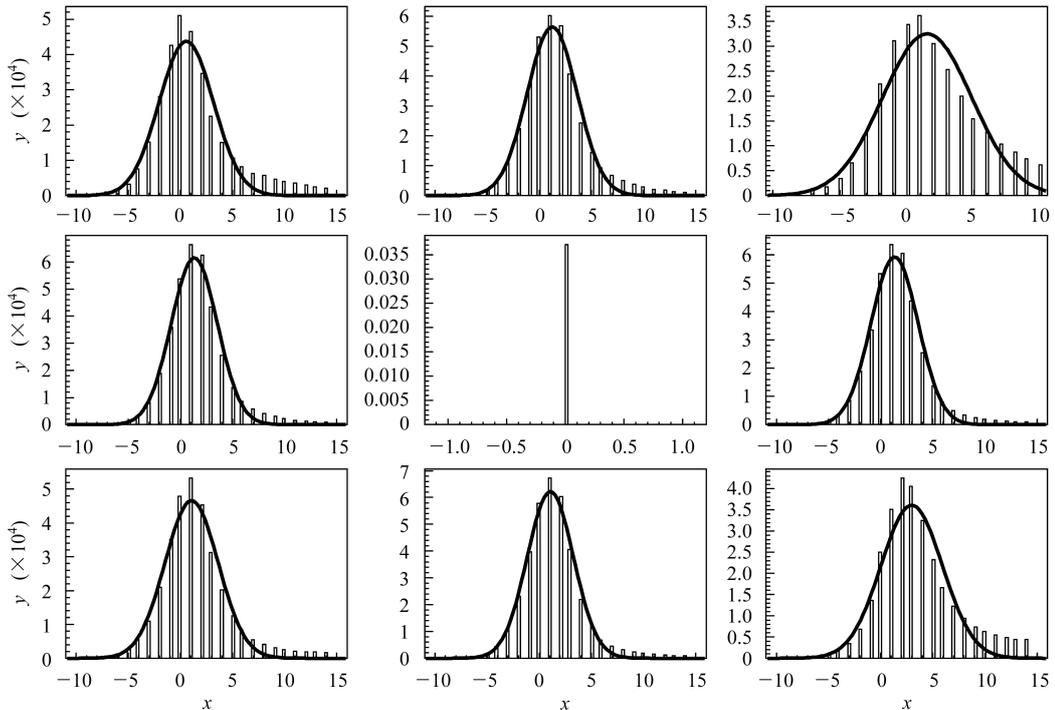


图 9 3×3 晶体阵列的时间差分布
 x : 时间差(峰位扫描步长数差), 每一道对应 50ns; y : 计数.

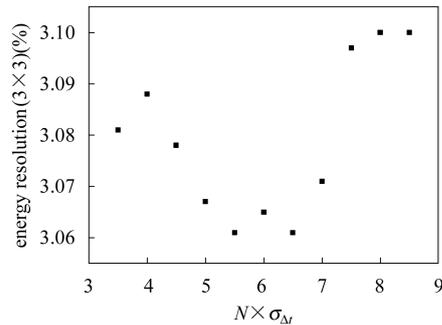


图 10 积分 3×3 晶体阵列的时间差范围 $\pm N \times \sigma_{\Delta t}$ 内的沉积能量对能量分辨率的影响

7 结论

通过对 6×6 晶体阵列的 1 GeV 电子束流的实验研究, 得到了中心晶体探测器单元的时间信息精度 (~ 60 ns) 和相对中心晶体的时间差的精度 (< 150 ns). 对每个事例, 只积分 3×3 晶体阵列中 $\pm 6\sigma_{\Delta t}$ 时间差范围内 ($\sim 1.8 \mu$ s) 晶体的沉积能量, 在主要减小探测单元本身噪声计数的情况下, 有一定的能量分辨率改善. 预期在真实的对撞运行中, 对束流本底计数的压制效果会更好, 可能去除约 50% 的本底信号.

参考文献(References)

- 1 Preliminary Design Report of the BESIII Detector. 2003, 119—133 (in Chinese)
(BESIII 初步设计报告. 2003, 119—133)
- 2 JIN Da-Peng et al. HEP & NP, 2003, **27**(10): 846—851 (in Chinese)
- 3 Design Report of BEPC II (Accelerator Part) (in Chinese)
(BEPC II 初步设计报告(加速器部分))
- 4 LI Jia-Cai et al. HEP & NP, 2004, **28**(12): 1269—1277 (in Chinese)
(李家才等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(12): 1269—1277)

Time Information Study of CsI(Tl) Crystal Calorimeter of BESIII

SHAN Li-Min^{1,1)} SHANG Lei¹ WANG Zhi-Gang^{1,2} XIE Wen-Jie^{1,2} QIN Gang¹ LIU Chun-Xiu¹
YU Bo-Xiang¹ DONG Ming-Yi¹ CAI Xiao¹ ZHOU Li¹ XIA Xiao-Mi¹ LAI Yuan-Fen¹
WANG Man¹ LIU Wan-Jin¹ SUN Li-Jun¹ FANG Jian¹
HE Miao¹ HU Tao¹ LÜ Jun-Guang¹

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

2 (Shanxi Normal University, Linfen 041004, China)

Abstract The read out system of BESIII-CsI(Tl) calorimeter is based on FADC. The energy corresponds to the peak of signal waveform obtained by the scanning. In order to reduce the incoherent noise counts and improve the energy resolution a rough time information can also be fetched by counting the timing step number in FADC with a precision of 50 ns besides the read out of energy information. The time information and the usage of this information in beam test are presented and discussed.

Key words CsI(Tl) calorimeter, FADC, energy resolution, time information