

# 目 录

目录	i
<b>第一章 前言</b>	<b>1</b>
1.1 粒子物理学	1
1.2 BEPCII	3
1.3 BESIII 物理目标	5
1.4 BESIII 探测器	5
1.4.1 MDC	6
1.4.2 TOF	7
1.4.3 EMC	8
1.4.4 $\mu$ 子探测器	8
1.4.5 超导磁铁	8
1.5 TOF	9
1.5.1 粒子鉴别	9
1.5.2 桶部TOF和端盖TOF	10
1.5.3 TOF的电子学系统	10
1.6 论文选题的意义	12
1.7 MRPC刻度方法国内外现状	12
1.8 论文的结构	13
<b>第二章 MRPC 端盖 TOF 离线数据</b>	<b>15</b>
2.1 MRPC硬件和电子学	17
2.1.1 端盖MRPC的结构	17
2.1.2 电子学系统	18
2.2 BESIII离线数据处理和分析系统	19
2.3 端盖TOF数据刻度重建流程	20
2.3.1 事例起始时间重建	20
2.3.2 MDC的径迹外推	21
2.3.3 TOF重建	22
2.4 原始数据分布?	23
2.5 刻度的重点和难点	25
2.5.1 MRPC离线刻度的信息量	25
2.5.2 MRPC离线刻度的时间, TOT, zrhith等的原始分布	25
2.5.3 过阈时间和反射问题	26

2.6 小结 . . . . .	27
参考文献 . . . . .	29

## 表 格

1.1	四种基本相互作用性质的比较 . . . . .	2
1.2	主要高能物理对撞机及其研究重点 . . . . .	3
1.3	BEPCII 和 BEPC 主要设计参数比较 . . . . .	4
1.4	BEPCII运行一年可以积累的事例数 . . . . .	4
1.5	BESIII 和 BESII 探测器的比较 . . . . .	6
1.6	预期的TOF时间分辨率分析 . . . . .	10



## 插图

1.1	标准模型中的基本粒子 . . . . .	2
1.2	北京正负电子对撞机鸟瞰图 . . . . .	3
1.3	BESIII 总体结构端面视图 . . . . .	6
1.4	MDC的结构示意图 . . . . .	7
1.5	EMC晶体分布示意图 . . . . .	8
1.6	TOF探测器原理示意图 . . . . .	9
1.7	TOF探测器测量的飞行时间 . . . . .	9
1.8	飞行时间探测器结构BTOF指的桶部TOF, ETOF指的端盖TOF .	11
1.9	端盖TOF几何尺寸与空间安排 . . . . .	11
2.1	端盖ETO F 的时间分辨: (a)电子和(b) $\mu$ 子 . . . . .	15
2.2	端盖ETO F 的各探测器单元的效率 . . . . .	15
2.3	1.0Gev 下 $\pi$ (a)和 $K$ (b)的时间分辨; (c):端盖 ETO F 不同角度下 的 $\pi/K$ 分辨 . . . . .	16
2.4	BESIII/ETO F 双层MRPC阵列结构示意图 . . . . .	17
2.5	MRPC结构示意图 . . . . .	18
2.6	ETO F 升级MRPC 的结构图 . . . . .	18
2.7	简化的BESIII离线数据处理和物理分析过程 . . . . .	19
2.8	BESIII离线软件平台 . . . . .	20
2.9	BESIII事例重建过程 . . . . .	21
2.10	BESIII事例的时间关系 . . . . .	21
2.11	事例起始时间程序流程图 . . . . .	22
2.12	径迹外推算法的实现流程图 . . . . .	22
2.13	TOF的离线数据重建过程 . . . . .	23
2.14	原始的TDC . . . . .	23
2.15	T-Q匹配后MRPC的原始时间和TOT的分布 . . . . .	24
2.16	事例起始时间的分布 . . . . .	24
2.17	一些原始的分布 . . . . .	26
2.18	反射问题和过阈时间 . . . . .	27



# 第一章 前言

## 1.1 粒子物理学

物质是由什么组成的？这是人们研究自然界的普遍规律时关心的问题。在《庄子·天下篇》中，庄子有“一尺之捶，日取其半，万世不竭”的观点。说的是一尺长的捶子，今天取它一半。明天再取它一半的一半，如此取下去，一万世也取不完。这是古代中国的辩证思想，认为物质的组成是没有极限的。中国夏朝时的“五行学说”认为物质是有金、木、水、火、土组成。古希腊也有物质有水、火、土和空气等基本元素组成的观点，Democritus 认为万物由大小不同、质量不同、有不可入性的原子组成，原子是“不可再分”的。十九世纪初英国的科学家道尔顿提出原子理论。认为，物质世界的最小单位是原子，原子是单一的，独立的，不可被分割的，在化学变化中保持着稳定的状态，同类原子的属性也是一致的。这是真正带有近代性质的原子论。十九世纪，自然学科创立并蓬勃发展，物理学、化学等学科相继诞生，通过实验对物质的研究，提出物质都是有分子组成的，不同分子性质的不同导致物质的物理和化学性质的不同。分子是由原子组成的。门捷列夫的元素周期表则给出了物质是由 110 多种的元素组成的。二十世纪物理学蓬勃发展，量子力学和相对论相继建立并发展起来，实验上各类粒子相继被发现。例如 1897 年汤姆逊发现电子；1901 年普朗克提出光量子假说，1905 年爱因斯坦利用光量子假说成功解释了光电效应；1911 年卢瑟福提出原子核式结构，并于 1919 年利用  $\alpha$  粒子轰击靶原子发现了质子；1932 年查德威克在人工核裂变实验中发现了中子；1932 年在宇宙线实验中发现了正电子，这是人类发现的第一个反粒子；1937 年发现  $\mu$  子；1947 年发现  $\pi$  介子；1950 年发现  $K$  介子， $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ；1955 年发现反质子；1956 年发现反中子；1974 年发现  $J/\Psi$  介子，证实了粲(c)夸克的存在；1975 年发现  $\tau$  轻子；1983 年发现传递弱相互作用的玻色子： $W^\pm$  和  $Z^0$ ；1995 年发现顶夸克(top)；2012 年发现标准模型的最后一个基本粒子希格斯(Higgs) [1][2]。这时候认为原子是有原子核和电子组成的，而原子核是由质子和中子组成的。基本粒子的相继发现，促进了粒子物理学的诞生和发展。粒子物理学认为组成原子核的质子和中子是由夸克组成的。 [3]

粒子物理学是研究基本粒子的性质、运动、相互作用、相互转化的规律的学科，是物理学的基础学科，也是物理学研究的最前沿学科 [4] [5]。

自然界存在的四种基本相互作用分别是：引力相互作用，电磁相互作用，强相互作用，弱相互作用。它们的相互作用特点的比较如表 1.1

其中强相互作用和弱相互作用是短程力，电磁相互作用和引力作用都是长程力。

表 1.1: 四种基本相互作用性质的比较

相互作用	强度	力程	媒介子	参与作用粒子	束缚态
强作用	1	$10^{-15}\text{m}$	胶子	夸克, 胶子	强子
电磁作用	1/137	$F \propto 1/r^2$	光子	带电粒子	原子
弱作用	$10^{-5}$	$< 10^{-15}\text{m}$	$W^{\pm}, Z^0$	费米子	无
引力	$10^{-39}$	$F \propto 1/r^2$	引力子?	所有粒子	太阳系等

标准模型 (Standard Model, SM) 是一套目前描述强相互作用 (strong interaction)、弱相互作用 (weak interaction) 和电磁相互作用 (electromagnetic interaction) 这三种基本相互作用以及基本粒子最成功的理论 [5] [6]。图 1.1 是基本粒子的示意图。

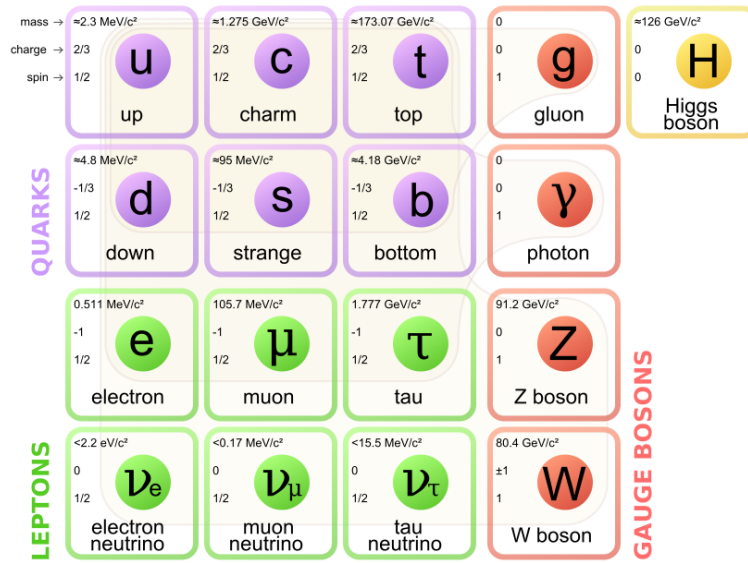


图 1.1: 标准模型中的基本粒子

粒子物理学是一门实验科学。宇宙线，高能物理加速器和粒子探测器是高能物理实验的主要手段 [7] [8] [9][10]。研究越深层次的物质结构需要越精细的探针：即更高能量的入射粒子。高能加速器具有高能量，高亮度的特点，可控制产生实验所需要的高能粒子束流。

加速器物理实验利用粒子加速器将带电粒子的能量提高到一定状态，通过对撞或者打靶让高能粒子之间（对撞机实验）或者高能粒子和其他物质之间（固定靶实验）发生相互作用，相互作用后产生的末态粒子会在探测器中留下电子学信号。通过测量这些电子学信号，并经过一定的物理计算和分析可以得到末态粒子的诸如电荷，质量，动量等物理信息，进而研究它们的性质和相互作用规律。对撞机实验和固定靶实验是加速器物理实验的两种方式，它们各有利弊。对撞机实验的优点是加速器的束流能量能够被完全的利用，缺点在于束流种类、反应末态和对撞亮度等均受到限制。固定靶实验的优点是可以使用的束流和粒子种类多，反应的末态也比较丰富，但缺点是束流的能量不能完全的被



利用。

对撞机实验在加速器实验中有着很重要的地位。 $J/\Psi$  粒子、 $\tau$  轻子和  $\Upsilon$  粒子都可以在对撞实验中被发现，高能量的  $Z^0$  粒子、 $W^\pm$  粒子、t 夸克和 higgs 粒子都是在对撞实验中被发现的。表 1.2 列出了世界上主要的加速器及其研究重点。

表 1.2: 主要高能物理对撞机及其研究重点

名称	国家	粒子源	能量( Gev )	研究重点
BEPC(BEPCII)	中国	$e^+/e^-$	2~5	粲夸克、 $\tau$ 粲能区物理
CESR	美国	$e^+/e^-$	10	b 夸克
CESR-c	美国	$e^+/e^-$	3-11	粲偶素、D 物理
HERA	德国	$e^-/\bar{p}$	30/820	质子结构
TEVATRON	美国	p/p	1800	t 夸克
PEPII	美国	$e^+/e^-$	3.1/9	b 介子、CP 破坏
KEKB	日本	$e^+/e^-$	3.5/8	b 介子、CP 破坏
RIHC	美国	A/A	200	重离子对撞
LHC	瑞士(CERN)	p/p(Pb/Pb)	14000(2700)	Higgs、b 介子、CP 破坏、重离子

其中北京正负电子对撞机 [11] [12] [13] 实验最重要的物理成果有： $\tau$  轻子质量的精确测量、2-5Gev 强子反应界面的精确测量、X(1835) 共振态的发现和  $Z_c(3900)$  [14] 共振态的发现等。

## 1.2 BEPCII

坐落于北京西郊的北京正负电子对撞机(Beijing Electron Positron Collider, BEPC)及其配套装置北京谱仪 [15](Beijing Spetrometer, BES)建于 1988 年。1994 年到 1996 年，进行了升级改造，对撞机仍称 BEPC，谱仪则称为 BESII。图 1.2 给出了北京正负电子对撞机鸟瞰图示意图。

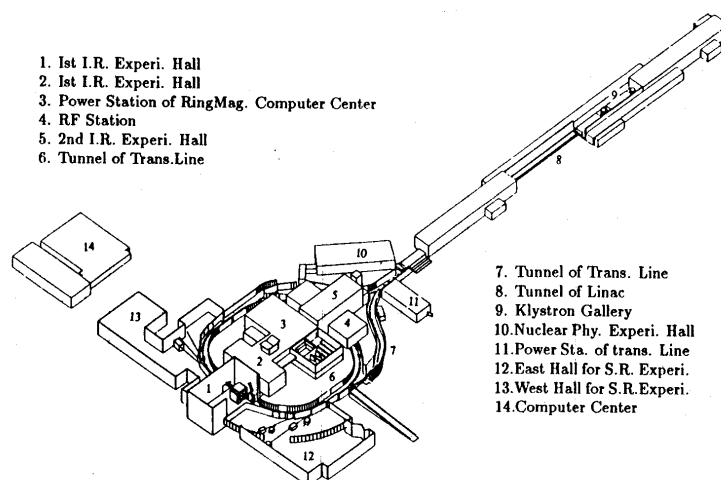


图 1.2: 北京正负电子对撞机鸟瞰图

2004 年到 2008 年, BEPC 和 BESII 完成升级改造, 升级后的对撞机称为 BEPCII, 谱仪称为 BESIII [16]。表 1.3 列出了 BEPCII 主要设计参数。

表 1.3: BEPCII 和 BEPC 主要设计参数比较

参数	BEPCII	BEPC
质心能量 (GeV)	2-4.6	2-5
储存环长度 (m)	237.5	240.4
环的数目	2	1
高频频率 $f_{rf}$ (MHz)	499.8	199.5
$2 \times 1.89$ GeV ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) 下的峰值亮度	$\sim 10^{33}$	$\sim 10^{31}$
束团个数	2	1
束团流强 (A)	$2 \times 0.91$	$2 \times 0.035$
束团间隔 (m/ns)	2.4/8	-
束团长度 ( $\sigma_z$ ) cm	1.5	$\sim 5$
束团宽度 ( $\sigma_x$ ) $\mu\text{m}$	$\sim 380$	$\sim 840$
束团高度 ( $\sigma_y$ ) $\mu\text{m}$	$\sim 5.7$	$\sim 37$
相对能散	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
对撞点束流夹角 (mrad)	$\pm 11$	0

升级后的 BEPCII 是一个多束团的双环对撞机。双环指的是正负电子束流分别注入在两个彼此独立的储存环中, 经加速后在对撞点发生对撞。多束团对撞可以大幅度的提高亮度。BEPCII 的峰值亮度设计为在 1.89Gev 处达  $1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。高亮度意味着可以获得大量的物理事例, 为诸多基于巨大统计量的物理过程的研究和分析提供良好的实验基础。因此 BEPCII 可以对  $\tau$  轻子和粲夸克进行高精度精确测量并寻找新的物理现象。表 1.4 列出了 BEPCII 运行一年可以累积的各种物理事例数。

表 1.4: BEPCII运行一年可以积累的事例数

物理	质心系能量 (Gev)	峰值亮度 ( $10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	物理截面 (nb)	每年产生事例数
$J/\Psi$	3.097	0.6	$\sim 3400$	$10 \times 10^9$
$\tau$	3.670	1.0	$\sim 2.4$	$12 \times 10^6$
$\Psi'$	3.686	1.0	$\sim 640$	$3 \times 10^9$
D	3.770	1.0	$\sim 6.5$	$32 \times 10^6$
$D^s$	4.040	0.6	$\sim 0.32$	$1 \times 10^6$
$D^s$	4.160	0.6	$\sim 1.0$	$3 \times 10^6$

### 1.3 BESIII 物理目标

BEPCII 运行在  $\tau$ -粲能区( $\approx 3 \text{ GeV}$ ), BESIII 是运行在 BEPCII 上的大型通用探测器, 通过收集  $\tau$ -粲能区的正负电子对撞产生的末态粒子进行  $\tau$ -粲物理研究。BESIII 主要研究的物理目标有: 轻强子谱、粲物理、QCD 与  $\tau$  物理 [17] [18]。

### 1.4 BESIII 探测器

谱仪是各种粒子探测器的组合, 通过观察和测量粒子对撞后产生的次级粒子的动量、能量、位置、质量等各种参数, 重建各类反应过程, 进而研究物理的基本性质。BEPCII 是高亮度、多束团的对撞机, 其设计亮度比 BEPC 高 100 倍, 高亮度带来的高统计量使 BESIII 的统计误差减少到 BESII 的  $1/10$ , 这些都需要有一个与之相匹配的高质量的探测器。因此 BESIII 探测器需要满足多束团、高计数率下的取数要求; BESIII 探测器的系统误差应该减少到之前 BESII 的  $1/10$  下才匹配。基于此, BESIII 的设计必须满足以下要求:

- 10MeV 到 2.5GeV 内, 有好的能量分辨率, 位置分辨率和光子识别能力;
- 50Mev 到 2.5GeV 内, 能精确的测量带电粒子的动量和方向;
- 50Mev 到 2.5GeV 内, 有好的粒子鉴别能力;
- 电子学和数据获取系统能够适应多束团模式和高数据率取数。

为满足以上要求, BESIII 探测器的最终设计为:

- 采用单丝分辨率好于  $130\mu\text{m}$  的小单元氦基气体漂移室作为径迹探测器;
- 采用  $C_sI$  晶体量能器探测鉴别光子和电子;
- 采用塑料闪烁体构成的飞行时间探测器作为粒子鉴别探测器;
- 采用场强为 1.0T 的超导螺线管磁铁;
- 采用阻性板探测器的  $\mu$  子室;
- 采用基于流水线技术的前端电子学系统适应多束团模式和高数据率的数据获取系统。

表 1.5 列出了 BESIII 各组成部分的主要性能。

图 1.3 给出了北京谱仪总体结构端面视图。由内到外分别是: 束流管 (Beam Pipe), 主漂移室 (Main Drift Chamber, MDC), 飞行时间探测器 (Time ofFlight Counter, TOF), 电磁量能器 (Electromagnetic, EMC), 超导磁铁 (Superconducting Magnet, SM),  $\mu$  子探测器。此外, BESIII 还具有用于监

表 1.5: BESIII 和 BESII 探测器的比较

子系统	BESIII	BESII
主漂移室	$\sigma_{xy} = 130 \mu\text{m}$	$250 \mu\text{m}$
	$\Delta p/p = 0.5 \% @ 1 \text{ GeV}$	$2.4 \% @ 1 \text{ GeV}$
	$\sigma_{dE/dx} = 6 \%$	$8.5 \%$
电磁量能器	$\sigma_E/E = 2.5 \% @ 1 \text{ GeV}$	$20 \% @ 1 \text{ GeV}$
	$\sigma_{x,y} = 0.6 \text{ cm} @ 1 \text{ GeV}$	$3 \text{ cm} @ 1 \text{ GeV}$
飞行时间探测器	$\sigma_T = 100 \text{ ps} (\text{桶部})$	$180 \text{ ps} (\text{桶部})$
	$\sigma_T = 110 \text{ ps} (\text{端盖})$	$350 \text{ ps} (\text{端盖})$
$\mu$ 子计数器	9 层	3 层
磁铁	1.0T	0.4 T

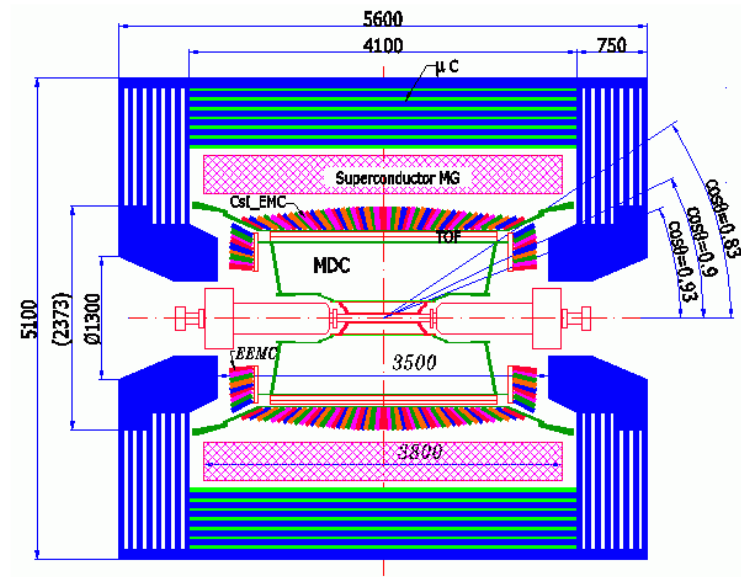


图 1.3: BESIII 总体结构端面视图

视谱仪各部分的运行并记录其运行参数的分布式的慢控制系统 (slow control system)；高保真读出各探测器信号的电子学系统 (read-out electronics system)；在线选择感兴趣的事例的触发系统 (trigger system)；在线数据获取系统 (data acquisition system, DAQ)，以及用于处理记录下来的数据的离线数据系统 (offline data processing system)。

#### 1.4.1 MDC

主漂移室是 BESIII 的主要子探测器之一：主要任务是：

- 精确测量从相互作用点产生的带电粒子动量和方向；

- 为带电粒子的粒子鉴别提供足够好的电离能损 ( $dE/dx$ ) 测量;
- 对带电粒子的测量有尽量大的立体角覆盖 ( $\sim 97\% 4\pi$ )
- 对低动量带电粒子径迹有尽可能大的重建效率;
- 为带电粒子的一级硬件触发提供信号。

主漂移室中带电粒子的动量测量依赖于其在漂移室磁场中飞行轨迹的测量, 具体就是带电粒子在漂移室中击中位置越多, 重建处的粒子的飞行径迹就越确定, 测得的动量就越准确。对于低动量带电粒子, 影响动量测量精度的是在飞行过程中与探测器中的物质发生的多次库仑散射。为减少多次库仑散射的影响, 需要尽可能的选用低原子序列的材料作为漂移室的气体 and 场丝。

漂移室采用小单元结构, 使用镀金铝丝作为场丝, 使用  $H_e/C_3H_8(60/40)$  作为工作气体。立体角覆盖  $\Delta\Omega/4\pi=0.93$ , 单丝的位置精确度为  $130\mu m$ 。对于动量为 1 Gev 的带电粒子动量分辨率为 0.5 % 左右; 在粒子的入射角为  $90^\circ$ ,  $dE/dx$  分辨 6 % 下,  $\pi/K$  的分辨能力( $3\sigma$ )可达到 770 Mev/c。

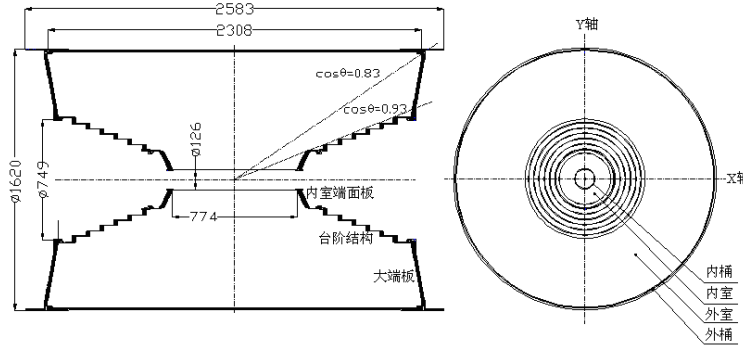


图 1.4: MDC的结构示意图

#### 1.4.2 TOF

BESIII的飞行时间探测器主要是用来做粒子鉴别。鉴别能力大小由相同动量粒子的飞行时间差和自身的时间分辨率所决定。飞行时间探测器由桶部和端盖构成。其中, 桶部部分固定在主漂移室上, 采用双层结构, 每层 88 块, 每块长 2.32 m, 厚 5 cm, 截面为梯形。信号由双端读出。端盖固定在端盖电磁量能器上, 有东西两部分, 每部分 48 个扇形闪烁体。桶部的立体角覆盖为  $|\cos(\theta)| < 0.83$ ; 端盖的立体角覆盖为  $0.85 < |\cos(\theta)| < 0.95$ ; 桶部的设计时间分辨是 100 ps, 在粒子的入射角为  $90^\circ$ ,  $\pi/K$  的分辨能力 ( $3\sigma$ ) 大约达到 700 Mev/c。

### 1.4.3 EMC

电磁量能器用来精确测量的光子的能量和提供触发中性事例的信号。在动量大于 200 MeV/c 下有好的  $e/\pi$  的分辨能力。EMC 有桶部和端盖组成，有 6240 块晶体，桶部内半径 94 cm，内长 275 cm，覆盖角  $|\cos(\theta)| < 0.82$ ；端盖覆盖角为  $0.83 < |\cos(\theta)| < 0.93$ 。EMC 的能量覆盖范围为 20 MeV  $\sim$  2 GeV，在 1 GeV 下，能量分辨率为  $\Delta E/\sqrt{E}=2.5\%$ ，位置分辨率为  $\sigma=0.6\text{cm}/\sqrt{E}(\text{E in GeV})$ 。

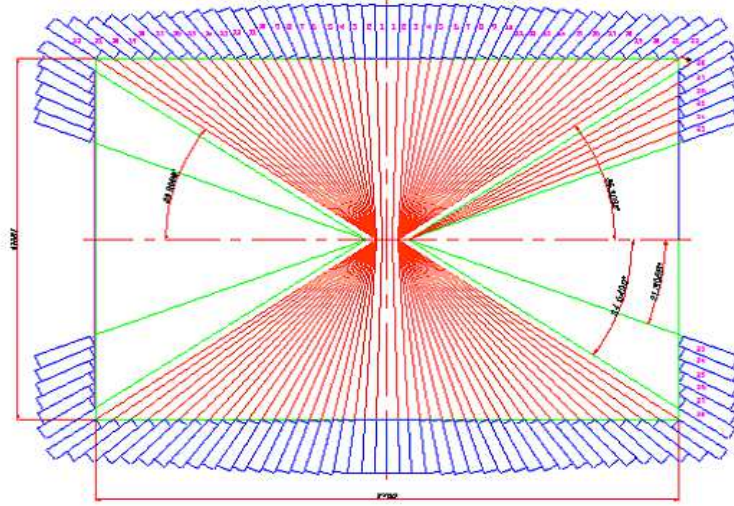


图 1.5: EMC晶体分布示意图

### 1.4.4 $\mu$ 子探测器

$\mu$  子探测器位于 BESIII 探测器的最外层，包括  $\mu$  子探测器和强子吸收体主要功能是从末态的带电粒子中区分出  $\mu$  子和  $\pi$  等其他带电强子。 $\mu$  子探测器选用的是阻性板计数器(resistive plate counters, RPC)。 $\mu$  子探测器设计成桶部和端盖两部分以增大立体角覆盖。桶部  $\mu$  子探测器内半径为 170 cm，外半径为 262 cm，共有 8 层厚度为 3-8 cm 的 RPC 和吸收铁，按照八角形排列。吸收铁和 RPC 采用夹层结构，两层铁之间夹缝为 4 cm，RPC 位于其中。端盖采用 8 层吸收铁和 8 层 RPC 的夹层结构。桶部端盖总的覆盖立体角为 0.85，其中桶部最内层为 0.75，最外层为 0.60。动量大于 0.4 GeV 的  $\mu$  子在不同入射角度的探测效率均可达到 95%。

### 1.4.5 超导磁铁

超导磁铁是 BESIII 的一个重要组成部分，利用钨铁作为磁场回路提供高强度和一定均匀度的轴向磁场，用来供 MDC 测量带电粒子的径迹。磁铁长 4.91 m，内直径 2.75 m，为直径为 3.4 m，线圈长度 3.52 m，中心直径 2.95 m。钨铁分为桶部和端盖两部分，除了作为磁场回路外，也做  $\mu$  子探测器的吸收体。较高的磁场强度可以提高 MDC 中带电粒子的动量分辨率，但过高的磁场长度会

对低动量的径迹测量带来困难。综合考虑，超导磁铁的中心磁场强度设计为  $(0.0, 0.0, 1.0)$  T，径迹区内磁场的不均匀度  $\leq 5\%$ ，磁场测量的精度  $\leq 0.1\%$ 。

## 1.5 TOF

### 1.5.1 粒子鉴别

飞行时间探测器是用来测量带电粒子的飞行时间。说是测量飞行时间，其实是测量粒子到达飞行时间探测器的时刻，然后减去束流在对撞顶点发生对撞的时刻( $t_0$ ),就是粒子从对撞点飞行到飞行时间探测器的时间。(见图 1.6，图 1.7)粒子鉴别正是利用得到的测量飞行时间结合利用主漂移室测量的粒子动量  $p$  和飞行径迹  $l$  得到的预期飞行时间完成的。

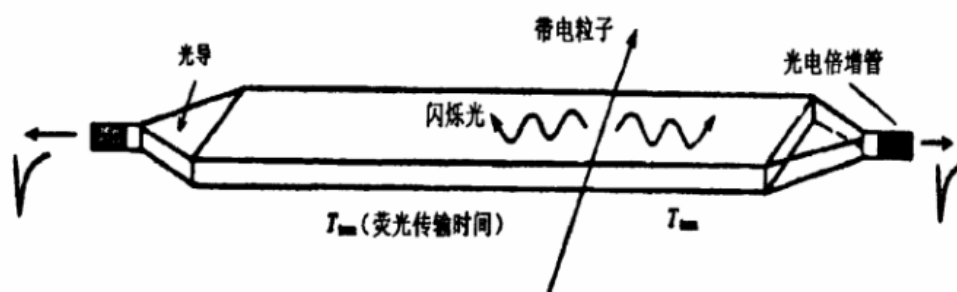


图 1.6: TOF探测器原理示意图

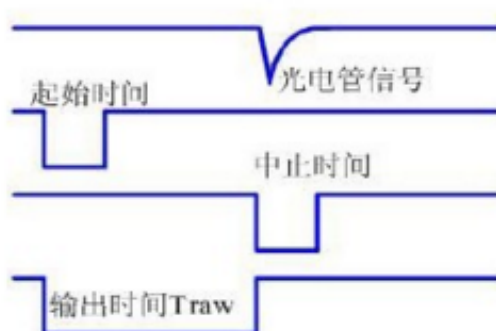


图 1.7: TOF探测器测量的飞行时间

$$t = L/\beta c \quad (1.1)$$

$$\beta = p/\sqrt{p^2 + m^2} \quad (1.2)$$

由公式 1.1 和 1.2 即可求出粒子的本征质量 $m_0$ ,鉴别出带电粒子。

对动量相同, 质量不同的粒子, 由公式 1.1 和 1.2 得

$$\frac{1}{\beta_2^2} - \frac{1}{\beta_1^2} = \frac{m_2^2 - m_1^2}{p^2} \quad (1.3)$$

$$t_2 - t_1 = \frac{L}{c\beta_2} - \frac{L}{c\beta_1} = \left(\frac{L}{c}\right)\left(\frac{m_2^2 - m_1^2}{p^2}\right)\left(\frac{\beta_1\beta_2}{\beta_1 + \beta_2}\right) \leq \left(\frac{L}{c}\right)\left(\frac{m_2^2 - m_1^2}{2p^2}\right) \quad (1.4)$$

由公式 1.4 可知, 粒子飞行距离越长, 粒子动量越小, 则粒子的鉴别能力越好。

TOF的粒子鉴别能力还受自身探测器的时间分辨(也就是本征时间分辨)所限。影响TOF的时间分辨的因素很多, 总的时间分辨可以写成:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{TOF}^2 + \sigma_{bunch-time}^2 + \sigma_{bunch-length}^2 + \sigma_{Z-position}^2 + \sigma_{electronics}^2 + \sigma_{expect}^2 + \sigma_{time-walk}^2}$$

表 1.6 列出了预期的TOF时间分辨率分析。

表 1.6: 预期的TOF时间分辨率分析

时间分辨项目	桶部时间分辨率	端盖时间分辨率
单层TOF本征事假分辨率(对1Gev的 $\mu$ 子)	80-90ps	80ps
束团时间的不确定性	5ps	5ps
束团长度的不确定性	15mm,35ps	15mm,35ps
MDC外推的定位精度	5mm,33ps	5-10mm,47-95ps
电子学测量的精度	25ps	25ps
预期飞行时间精度	30ps	40ps
时幅修正	10ps	10ps
单层TOF总的时间分辨率	100-110ps	110-137ps
双侧TOF总的时间分辨率	80-90ps	无

### 1.5.2 桶部TOF和端盖TOF

桶部TOF的径向半径从 810 mm到 925 mm。桶部闪烁体选用的是长度为 2.3 m, 宽度约为两英寸, 厚度为 5 cm, 型号为 BC408 闪烁体。

端盖TOF的塑料闪烁体的长度短于桶部 TOF, 选用的是 BC404 信号的闪烁体, 可以充分发挥 BC404 光产额高, 时间快的优势。

### 1.5.3 TOF的电子学系统

飞行时间探测器的电子学系统的基本功能是进行带电粒子的飞行时间测量。简单讲, 测量的是正负电子对撞时刻与次级带电粒子击中飞行时间探测器刻度之间的时间间隔。现代粒子物理实验测量时间最有效的定时方法依然是快前沿定时。为了校正前沿定时方法中时间游走(time-walk)效应带来的测量误差, 系统还必须对光电倍增管输出信号的幅度(电荷)进行测量。此外, 飞行时间探测器的另一个主要功能是提供粒子击中的快时间响应信号给触发系统。基于此, TOF 电子学系统需要完成三项基本功能: 时间测量, 电荷测量, 提供粒子击中的快时间响应。



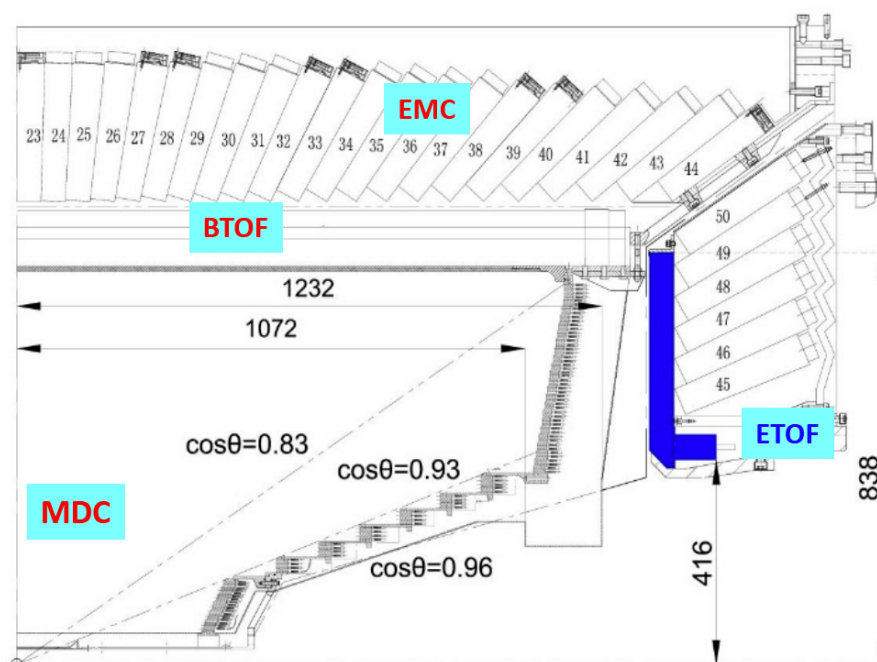


图 1.8: 飞行时间探测器结构BTOF指的桶部TOF，ETOF指的端盖TOF

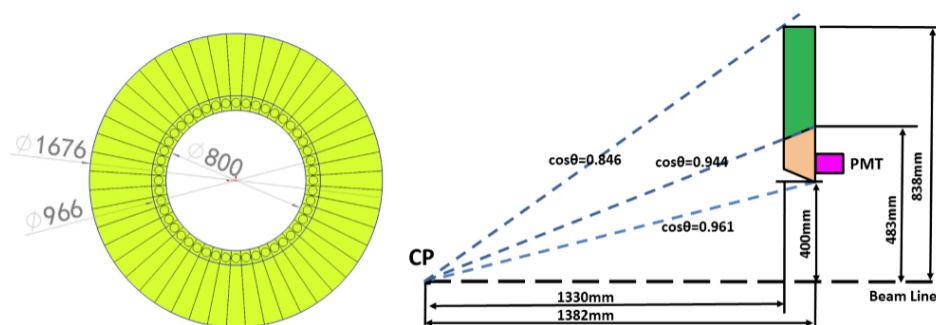


图 1.9: 端盖TOF几何尺寸与空间安排

TOF的读出电子学系统由前置放大器部分和读出电子学VME系统组成。前置放大器对光电倍增管输出的探测器信号进行 10 倍的放大，输出的差分信号经过 18 米的差分屏蔽电缆送入到读出电子学VME系统进行数字化处理。

TOF前端电子学系统采用的是 VME 9U 作为 TOF 前端读出电子学系统的硬件平台；采用全差分的信号处理和传输技术；对时间和电荷量的测量采用统一的数字化处理。时间测量采用的是快前沿定时甄别+ HPTDC 数字化技术。TOF 采用阈值甄别技术，只有高于阈值的信号才能被电路输出。HPTDC 时间测量直接测量的是粒子到达探测器的“hit”时间。飞行时间需要通过离线数据分析，得到对撞时间所对应的的时钟的时刻，再通过束团之间固定的时间关系，然后相减得到。

## 1.6 论文选题的意义

通过触发判选和在线选择的事例，由在线数据系统获取系统以二进制文件的形式记录下来。这种数据称为原始数据，主要包含的是探测器的电子学信号的时间和幅度信息。这样的原始数据是不能直接被物理分析使用的。原始数据需要经过一定的处理才能得到物理分析所需要的包括能量，动量，运动方向等信息。经过的这些处理就是离线刻度和重建。离线刻度可以消除实验中的各种外部条件和探测器自身条件对电子学信号和物理测量量之间转化带来的影响。离线刻度对每个不同的子探测器分别进行，生成刻度常数。重建就是利用刻度常数将原始的数据转化为粒子的动量，能量，运动方法等物理量，生成重建数据。物理分析就是利用重建数据进行的。 [19]

BESIII实验在2015年夏季完成端盖飞行时间探测器的升级改造，用多气隙电阻性板室（Multi-gap Resistive Plate Chamber，简称MRPC）替代现有的闪烁体。MRPC探测器具有较小的时间分辨，同时又能保证足够的探测效率。为与探测器硬件升级相适应的离线数据处理和分析系统需要完成MRPC端盖TOF的软件开发和数据处理方面的研究。

对端盖MRPC-TOF探测器的刻度方法进行研究，建立一套稳定并行之有效的刻度流程，满足数据刻度和重建的需要，把优秀的探测器指标转化为物理分析中的优良的粒子鉴别能力，是论文研究的主要内容。研究采用了样条插值和构造公式两种方法。下面的章节会详细探讨在研究中遇到的难点，以及采用何种方法进行解决。

## 1.7 MRPC刻度方法国内外现状

美国布鲁克海文国家实验室(BNL)的相对论重离子对撞机RHIC上的螺旋径迹探测器STAR实验[20][21]的主要科学目标是寻找可能存在的新物质形态夸克-胶子等离子体，并研究极端高温、高密下的强相互作用物质的演化动力学。欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机LHC上的大型离子对撞机ALICE实验[22][23]是在极端能量密度下研究强相互作用物理，寻找夸克胶子等离子体，研究量子色动力学。这两个实验都采用MRPC做为飞行时间探测器。

STAR的TOF由3840块MRPC组成，每块有6个读数条。刻度样本选择的是动量在0.3—0.6Gev/c的 $\pi$ 介子。由于信号在读出条内的反射，每个电子学读出通道的TOT（time-over-threshold [24]，简称TOT）分布存在多峰，且各不相同，时幅修正的刻度采用样条拟合（spline-fit）的方法。信号在读出条上的传输时间依赖信号传播距离，击中位置的修正只考虑沿读出条方向的效应。扣除起始时间晃动55 ps后，时间分辨为75 ps [24]。

ALICE的TOF由1593块MRPC组成，每块面积为7.4 cm×120 cm，每个模块96个读出端，每个读出端面积为2.5 cm×3.5 cm。刻度样本需要完整的径迹重建。TOF刻度分为三个步骤：（1）一个整体的偏移；（2）每个电子学通

道的偏移；(3) 每个电子学通道的时幅修正。时幅修正采用的是 TOT 的 5 阶多项式拟合。扣除事例起始时间的影响后，时间分辨为 80 ps [25]。

## 1.8 论文的结构

根据论文的主要内容，论文的结构安排如下：第一章是论文的前言部分，简单介绍了粒子物理学和 BESIII 实验的基本知识，然后介绍了论文选题的背景和意义，以及国内外关于 MRPC 探测器数据刻度方法。第二章介绍了 BESIII 实验的 MRPC 端盖 TOF，刻度重建流程，以及刻度中的重点和难点问题。第三章介绍利用插值方法对 BESIII 的 MRPC 端盖 TOF 进行离线数据刻度的研究。第四章介绍利用构造公式对 BESIII 的 MRPC 端盖 TOF 进行离线数据刻度的研究。第五章介绍利用双端数据采用插值和构造公式两种方法对 BESIII 的 MRPC 端盖 TOF 进行离线数据刻度的研究。第六章对论文的内容进行总结。



## 第二章 MRPC 端盖 TOF 离线数据

原来的端盖 TOF 采用的塑料闪烁体，分东西两部分，每部分单层结构，闪烁体为扇形，光电倍增管垂直耦合，放置于扇形闪烁体的内端。每部分有 48 块。图 2.1 给出了 ETOF 的时间分辨。对于双  $\mu$  事例样本，时间分辨为 110ps，Bhabha 事例中，时间分辨为增至 148ps [26]。分辨率的差异主要来自不同粒子与实验装置材料不同作用的差别，由于  $\mu$  散射最小，击中塑料闪烁体的位置不确定性较小，相比较 Bhabha 中的电子事例而言（由于位置的不确定性以及多次散射）非本征的时间分辨贡献小，因而时间分辨较好。图 2.2 给出了 ETOF

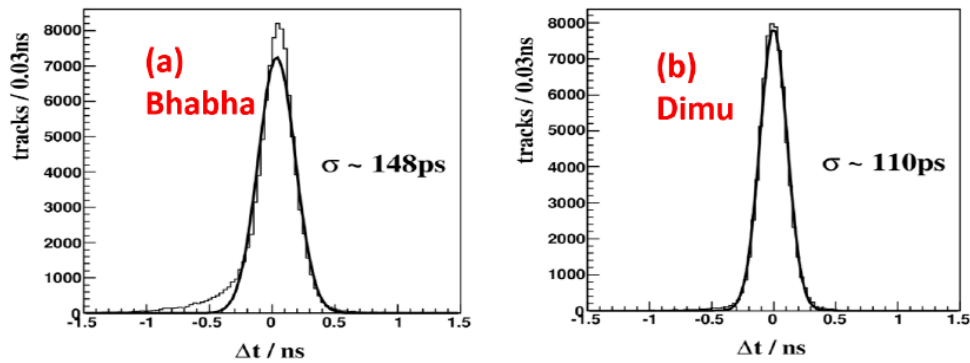


图 2.1: 端盖ETO F 的时间分辨: (a)电子和(b)  $\mu$  子

的各探测单元的效率。探测效率大致为 96% [27]。

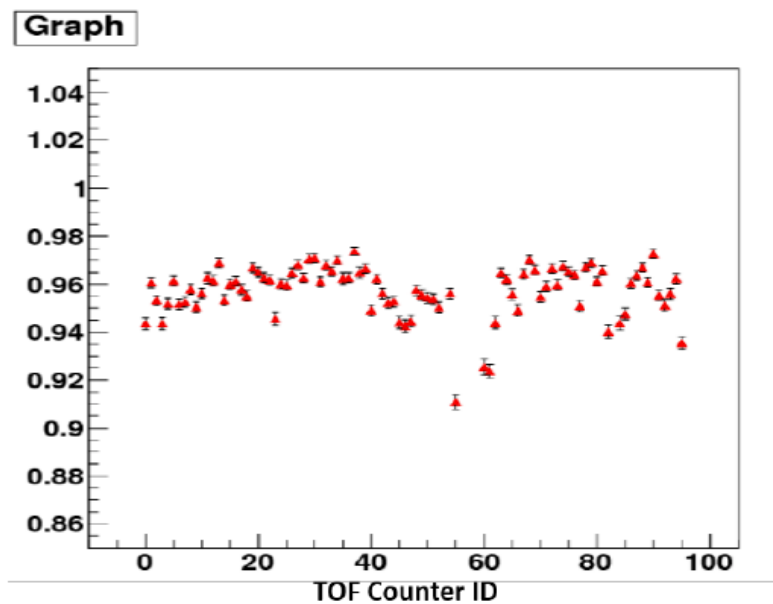


图 2.2: 端盖ETO F 的各探测器单元的效率

对于 ETOF 而言, 由于多次击中粒子, 导致性能相比桶部明显较差。ETOF 的  $\pi/K$  的分辨能力如图 2.3 [26]所示, 在 95.4%( $2\sigma$ ) 正确率下, 基本满足动量 1.1GeV 以内的  $\pi/K$  介子的鉴别。

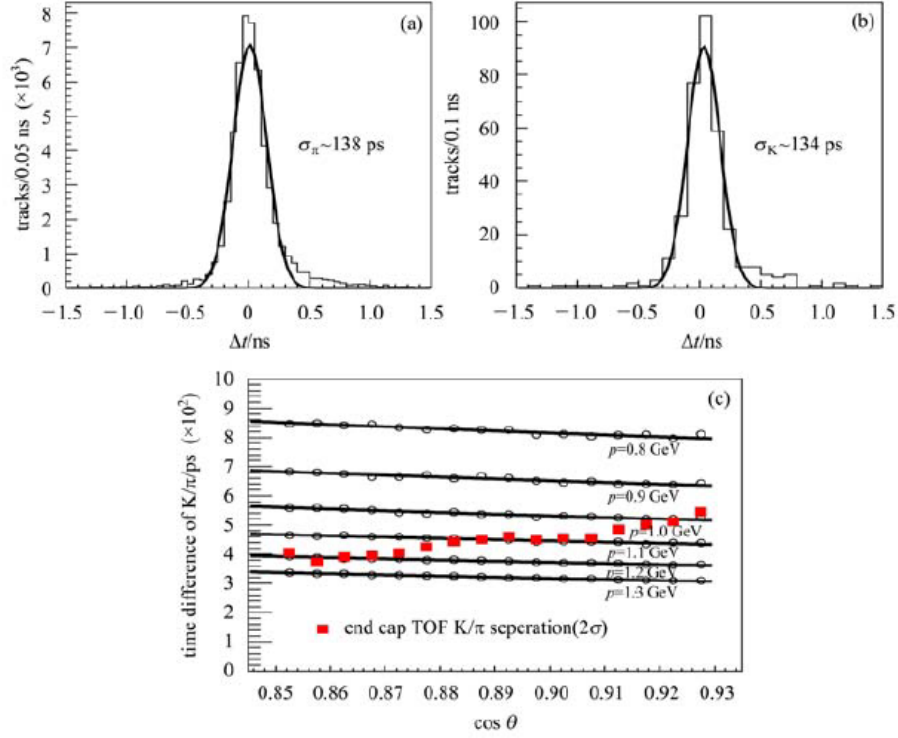


图 2.3: 1.0Gev 下  $\pi$  (a)和  $K$  (b)的时间分辨; (c):端盖 ETOF 不同角度下的  $\pi/K$  分辨

相比于桶部 TOF (双层闪烁体)的性能指标, BESIII 端盖 TOF, 由于端盖 TOF 是单层闪烁体, 以及端盖部分多次散射的影响较大, 其本征时间分辨和非本征时间分辨都比较大。

BESIII 谱仪的设计目标是在  $\tau$ -粲能区的高精度测量, 在这一能区  $J/\psi$  衰变是最主要的物理过程。模拟结果显示,  $J/\psi$  衰变强子动量分布可以达到 1.5GeV/c, 虽然在 0.95GeV/c 以上的强子占的比例较小, 但是, 对于 BES 物理追求的高精度测量以及稀有衰变事例的研究仍然是非常重要的。因此进一步提高其粒子鉴别能力, 对于提升整个谱仪粒子鉴别能力, 完成 BES 物理目标具有重要意义。

测量中性 D 介子系统的 CP 破坏和混合参数是 BESIII 的物理目标之一。D 介子是唯一没有被测量到 CP 破坏的重味介子。测量 D 介子混合的黄金衰变道是  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ ,  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  由于  $K$  和  $\pi$  介子的动量分布在 0.8-1.05GeV, 这样我们需要很好的  $\pi/K$  粒子鉴别, 要达到较显著的测量结果, 要求  $\pi/K$  误鉴别率在 1.05GeV 时要达到 1% 以下。

而 BESIII 目前的端盖 TOF 时间分辨为 140ps,  $\pi/K$  的误鉴别率在 1.05GeV

时约为 5% 左右，使得中性 D 介子的混合参数测量显著性很大程度上下降。由于 D 介子系统的 CP 破坏很小，粒子物理的标准模型预言 CP 破坏的大小在千分之一左右，要求测量的寻迹系统误差很小，同时也要求  $\pi/K$  的误鉴别应该在 1% 以下。端盖 TOF 的改造不仅改善对带电径迹的粒子鉴别，同时好的飞行时间测量也能提高主漂移室对带电径迹的测量精度，改善寻迹的系统误差，特别是端盖小角度的误差和误鉴别率的改善。当然对于 D 介子的半轻子衰变和形状因子以及 CKM 矩阵元  $V_{cs}$  和  $V_{cd}$  的测量，改造后的 TOF 端盖会降低由于粒子误鉴别造成的本底，提高这些物理量的测量精度。

## 2.1 MRPC 硬件和电子学

### 2.1.1 端盖 MRPC 的结构

升级后的端盖 TOF 采用了 MRPC 技术。利用 MRPC 做成的飞行时间探测器有好的时间分辨，同时又能保证探测效率，有高的粒子鉴别能力，而且价格也便宜。从 MRPC 探测原理分析，当带电粒子穿过 MRPC 时，其原初电离的雪崩放大过程是在多个气隙中进行，因此气隙的宽度与数目是决定 MRPC 性能的重要的参数。采用较小的气隙宽度可以降低工作电压提高工作稳定性；增加气隙数目，由于增加了带电粒子在气隙中产生雪崩的几率，可以提高其探测效率；减小了雪崩过程的统计涨落有利于提高时间分辨。

采用 MRPC 的端盖 TOF 的具体阵列设计如图 2.4 所示，每层 18 个模块，采用双层结构，通过相邻模块间的交叠可以减少死区，提高探测效率。

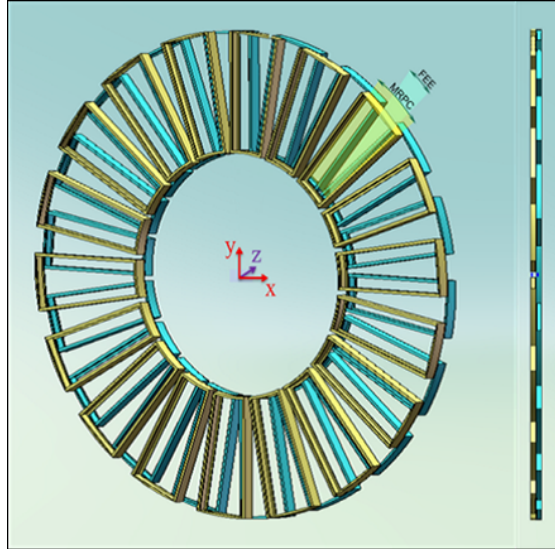


图 2.4: BESIII/ETOF 双层 MRPC 阵列结构示意图

每个模块的 PCB 的设计如图 2.5 所示。每个模块采用梯形结构，共有 12 个读数条，读数条宽 2.4cm，相邻读数条之间的距离为 3mm。读数条最短的是 9.1cm，最长的是 15.1cm。每个读数条采用双端读出，共有 24 路读出信号通道。



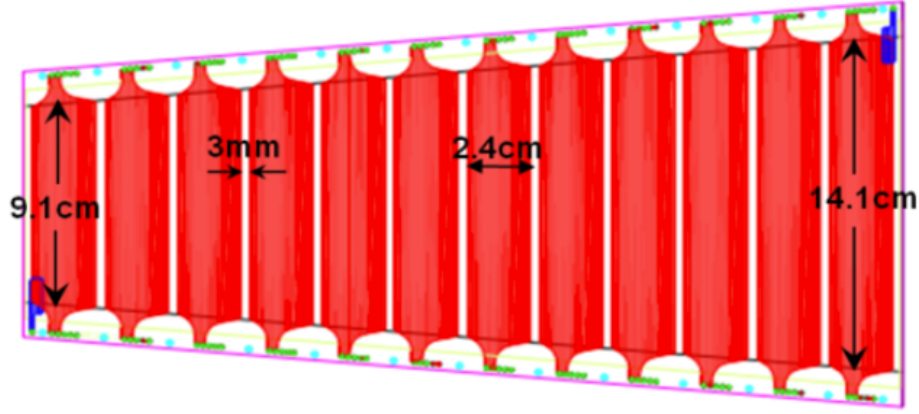


图 2.5: MRPC结构示意图

MRPC模型几何结构如图 2.6 所示。模块采用双层堆叠的设计方式，一共2\*6个气隙，每个气隙 $220\text{ }\mu\text{m}$ ，每个模块的厚度 $<2.4\text{ cm}$ ，双层总厚度 $<5\text{ cm}$ ；环状探测器外半径为 $844\text{ mm}$ ，内半径为 $454\text{ mm}$ 。

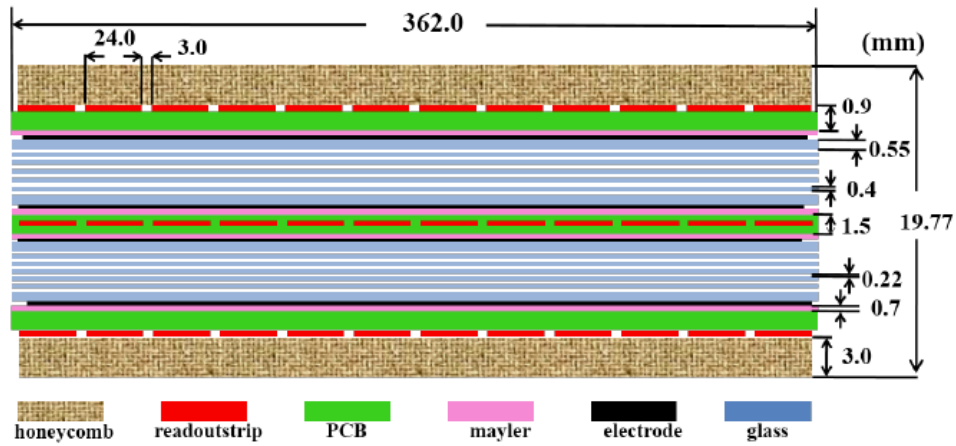


图 2.6: ETOF 升级MRPC 的结构图

MRPC 需要工作在气密的环境下，工作气体组分是 $90\% \text{ Freon} + 5\% \text{ SF}_6 + 5\% \text{ iso-C}_4\text{H}_{10}$ 。

### 2.1.2 电子学系统

MRPC的电子学系统设计方案和电子学系统包含前端放大甄别FEE(Front end Electronics)模块、飞行时间测量TDIG(Time to Digital module)插件、提供阈值和电源给FEE模块并传输击中信息至触发系统等功能的CTTP (Coincidence Test Threshold Power module)插件，时钟扇出插件硬件系统和数据获取软件和控制软件系统。



整个系统共72个FEE模块，FEE模块采用基于TOT技术的NINO芯片，每个FEE模块含有4片NINO芯片，产生24路LVDS电平的输出信号，共完成1728路信号的放大甄别。MRPC输出电荷约为几十fC，脉冲上升时间 $<1\text{ns}$ ，实验上必须对输出信号电流进一步放大和成形。NINO-ASIC芯片采用差分的输入，全线路的差分信号处理，最大程度的利用了MRPC本身产生的差分信号。NINO对输入信号进行快放大，同时NINO将输入的信号电流转换为输出的信号宽度，以满足TOT测量的需要。飞行时间数字化插件TDIG。使用HPTDC芯片，接收和数字化前端电子学输出的信号并根据数据格式打包，经VME总线上传至DAQ系统。NINO配合HPTDC同时测量出信号过阈时间的前沿时间(leading edge)和后沿时间(trailing edge)。其中前沿时间用来定时，结合前沿时间和后沿时间的TOT用来修正过阈时间不同引起的时间晃动。ETOF电子学系统中，CTTP插件共两块，一个CTTP插件对应36个FEE模块。插件接收NINO芯片产生的击中信息，通过光纤上传至触发系统；为NINO芯片提供阈值电压，电源和测试信号，使芯片正常运行和满足测试需求。CTTP插件同时还完成快控制功能。时钟扇出插件为TDIG和CTTP插件提供同步时钟信号。

## 2.2 BESIII离线数据处理和分析系统

BESIII 离线数据处理和分析系统是为 BESIII 实验开发的全新软件系统，包括软件平台、模拟、刻度、重建和物理分析工具等部分。它的主要任务是将探测器和模拟产生的原始数据进行离线处理，生成物理分析使用的包含末态粒子各种信息的数据(DST数据)，同时提供物理研究需要的各种软件工具，是连接物理分析和探测器的桥梁。BESIII 的简化的离线数据处理过程如图 2.7 所示。

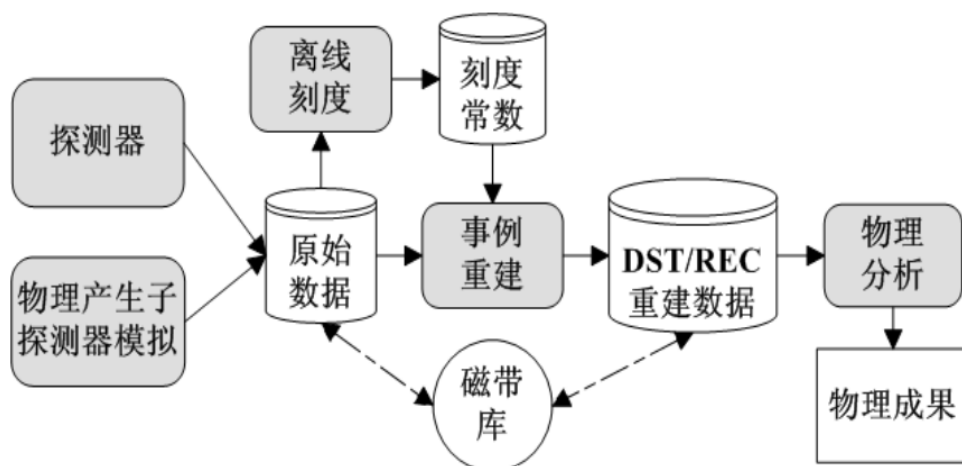


图 2.7: 简化的BESIII离线数据处理和物理分析过程

离线数据处理和分析软件平台 [28](BOSS)是BESIII离线软件系统的核心。BOSS 是以欧洲核子中心 LHCb 实验开发的通用高能物理实验底层软件 GAUDI [29]为基础，根据 BESIII 实验的具体需求，以C++语言为主开发的全新离线数

据处理软件。

BOSS软件平台可以为包括离线刻度、事例重建、事例分类、蒙特卡罗模拟和物理分析等阶段的离线数据处理提供有效的数据管理工具。软件平台根据数据处理各阶段的特点,设计了符合探测器特点的数据结构,然后利用专门的数据管理服务对这些数据进行管理。BOSS软件平台实现动态库的链接机制,可以有有效的缩短再编译的时间。软件系统也采用了国际高能物理实验室的开源软件库和各种工具软件,如ROOT [30], CERNLIB [31]等。

图 2.8给出了BESIII离线软件平台的整体结构图。其中的模拟、刻度、重建和物理分析算法是离线数据处理和物理分析的核心。

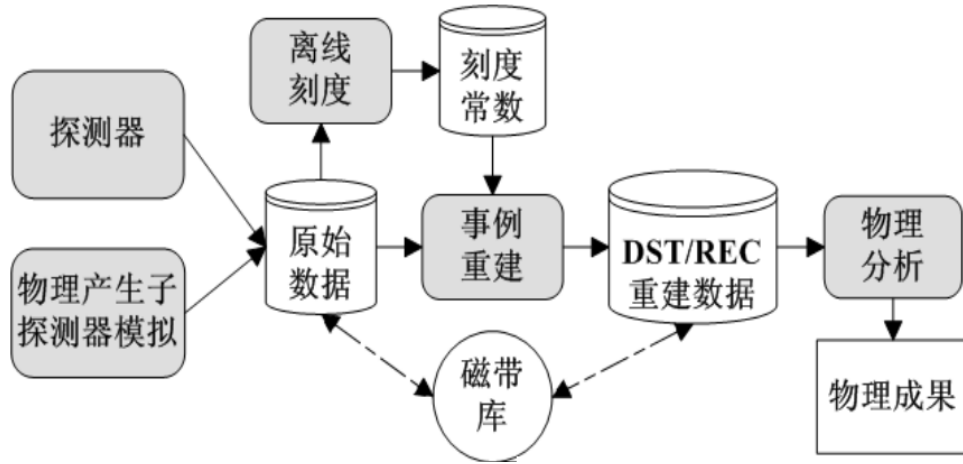


图 2.8: BESIII离线软件平台

BESIII数据处理和物理分析软件系统包含超过200个软件单元,采用软件包的形式来组织和管理软件。BESIII采用配置管理工具(Configuration Management Tool,CMT)来规范软件开发和发布过程,并且为该过程提供一套完整的配置管理工具。

## 2.3 端盖TOF数据刻度重建流程

BESIII 离线事例重建软件系统由MDC、EMC、TOF和MUC子系统以及径迹外推和匹配部分组成。BEPCII 采用了多束团对撞机制,每个束团的时间间隔为6ns,而BESIII触发系统的工作周期为24ns,即每个触发周期内有4个束团对撞。因此每个事例产生的准确时间不能有在线系统直接给出,必须通过离线软件通过事例重建,主要是MDC径迹重建,寻找最可几事例起始时间。

事例重建系统的一般流程如图 2.9。

### 2.3.1 事例起始时间重建

BEPCII采用多束团对撞机制, BEPCII的高频时钟为499.8MHz,周期为2ns,储存环中共有93个束团,每个束团之间的时间间隔为6ns。BESIII触

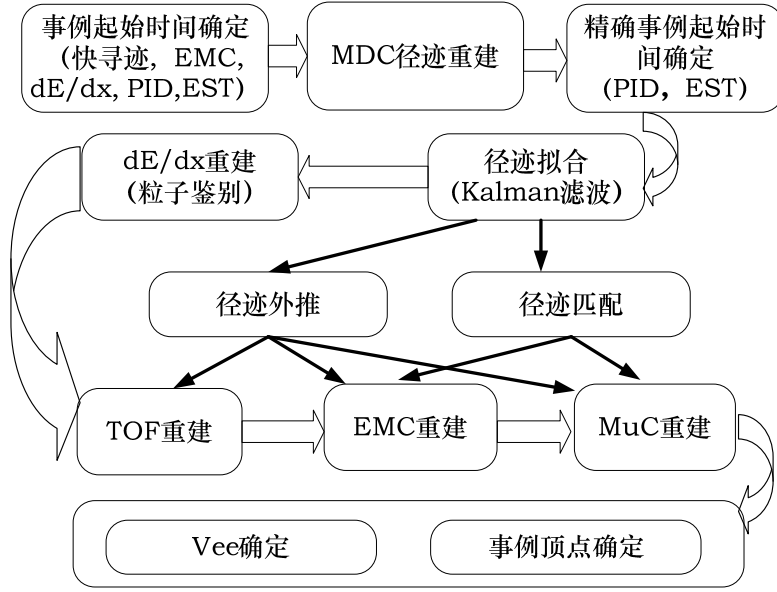


图 2.9: BESIII事例重建过程

发系统的周期为24ns，因此每个触发周期内有4个束团对撞，准确的事例起始时间无法由在线系统给出。图 2.10给出了BESIII的时间测量系统。事例的起始时间 $T_{est}$ 可以表示为： $T_{est}=T_{DCM}-T_{ev}$ 。其中 $T_{est}$ 为事例起始时间，即实际对撞时刻与触发周期前沿时刻的时间差； $T_{DCM}$ 为电子学给出的TOF测量到的TDC时间， $T_{ev}$ 为粒子从对撞点到给出信号的探测器之间的飞行时间。

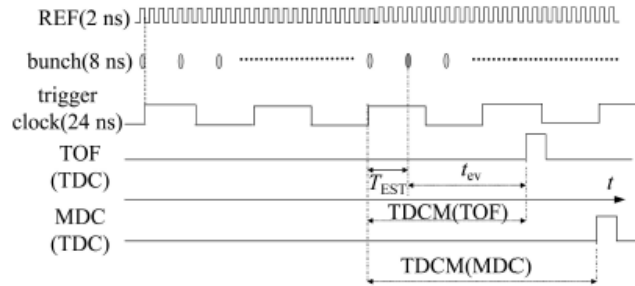


图 2.10: BESIII事例的时间关系

图 2.11 给出了计算事例起始时间 $T_{est}$ 的程序流程图。主要包括快重建 [32]和时间起始时间重建两部分 [33]。在MDC快重建和粒子鉴别完成后， $T_{est}$ 由 MDC 和 TOF 分别计算得到，具体的计算方法见文献 [34]。其中TOF得到的 $T_{est}$ 精确度高。

### 2.3.2 MDC的径迹外推

BESIII 主漂移室重建径迹的外推算法采用面向对象的设计方法，利用 GEANT4 部分代码开发实现，它提供主漂移室带电径迹外推到外部其他子探测器上的预期径迹信息。该算法的外推过程考虑了带电径迹在磁场中的偏转以及

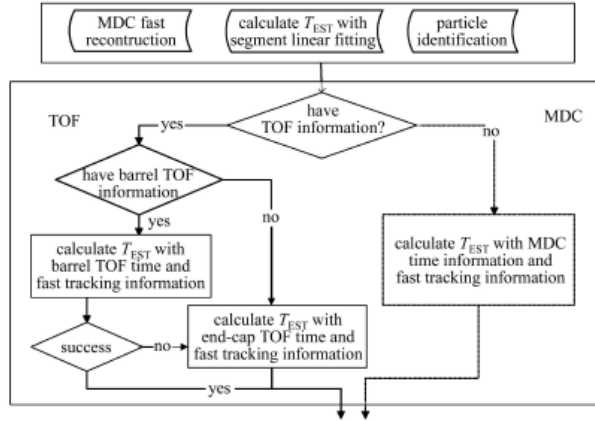


图 2.11: 事例起始时间程序流程图

与探测器物质相互作用造成的电离能损, 并为径迹参数计算考虑了库仑多次散射效应影响在内的参数误差矩阵。

在考虑带电粒子的磁场偏转、电离能损的情况下较精确的计算径迹预期参数的一个常用方法是小步长外推。该方法把径迹近似为螺旋线, 在每个小步长结束时从粒子动量中减去该步长的电离能损, 然后再进行下一个小步外推, 直到推至要求的位置 [35]。图 2.12 给出了径迹外推程序 TrkExtAlg 流程图。

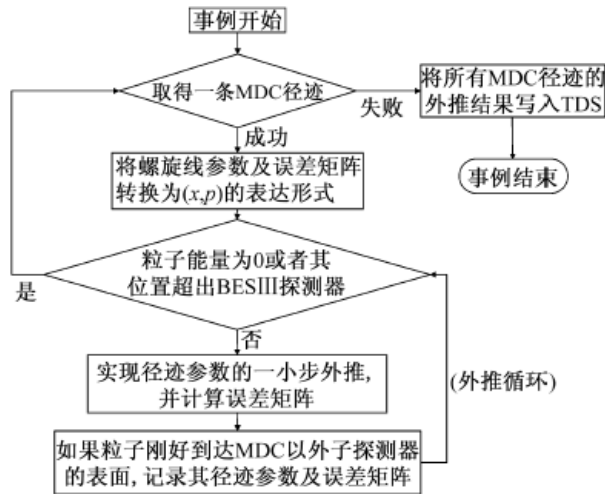


图 2.12: 径迹外推算法的实现流程图

### 2.3.3 TOF重建

TOF离线数据重建流程如图 2.13 所示。TOF电子学系统给出TOF的时间信号和幅度信号。MDC重建和KalmanFilter径迹拟合得到带电径迹的动量和径迹长度等信息 [36] [37], 进而计算出粒子飞行的预期时间, 径迹外推给出击中TOF的位置信息 [35], 事例起始时间算法 [34]给出 $t_0$ 信息, 利用这些信息结合刻度得到的刻度常数完成TOF的离线数据重建。

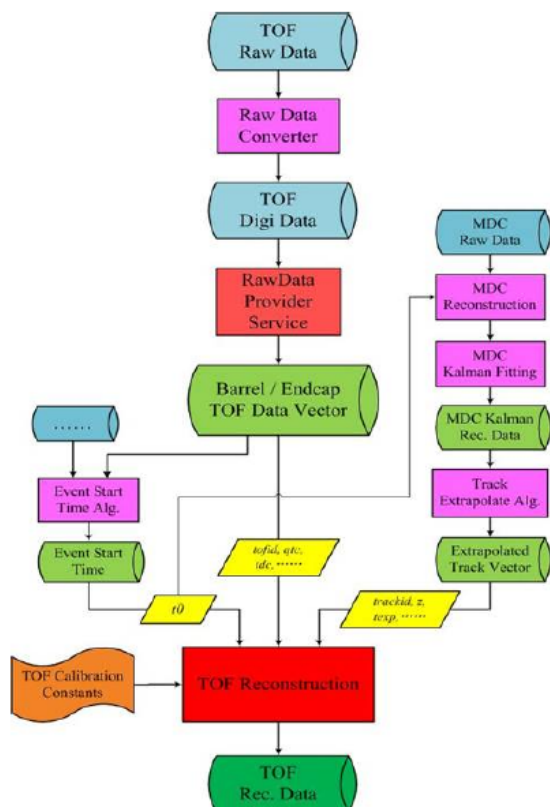


图 2.13: TOF的离线数据重建过程

## 2.4 原始数据分布？

图 2.14 给出了MRPC端盖TOF的原始的TDC的信息。

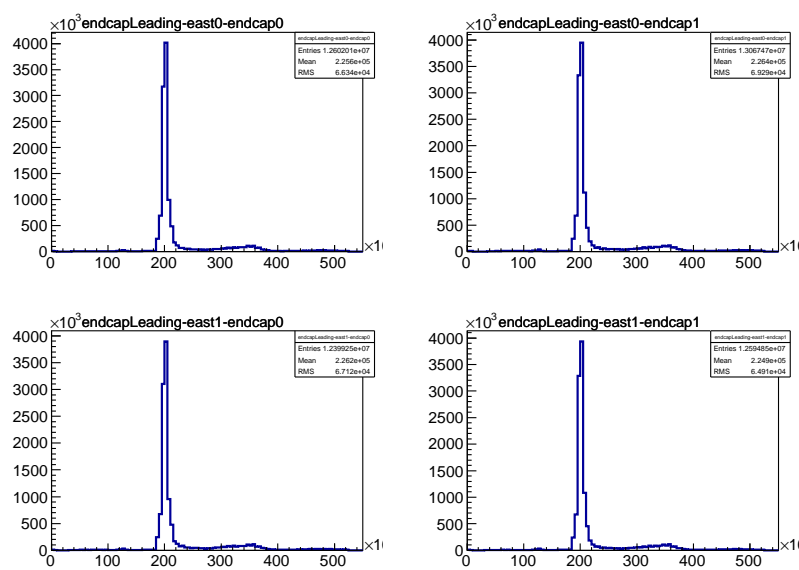
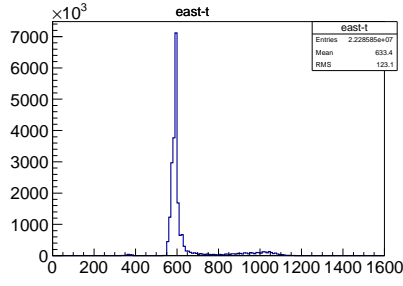
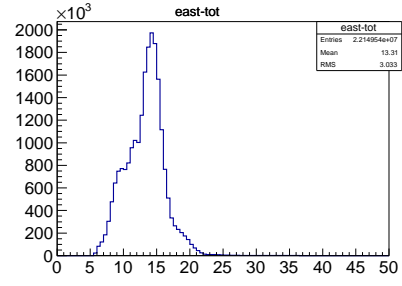


图 2.14: 原始的TDC

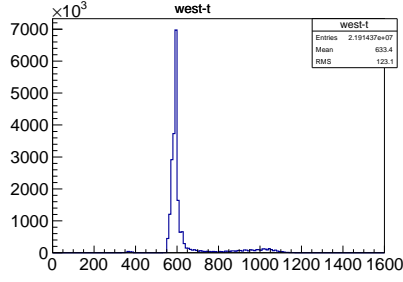
图 2.15 给出了T-Q匹配后MRPC端盖TOF的原始的T和TOT的分布。



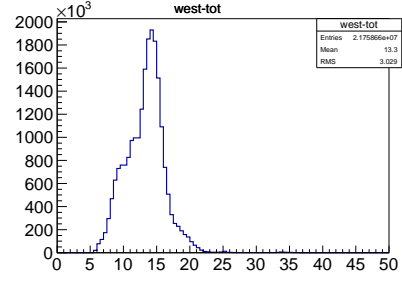
(a) 东端的原始时间



(b) 东端的原始TOT



(c) 西端的原始时间



(d) 西端的原始TOT

图 2.15: T-Q匹配后MRPC的原始时间和TOT的分布

图 2.16 给出了事例起始时间的分布。

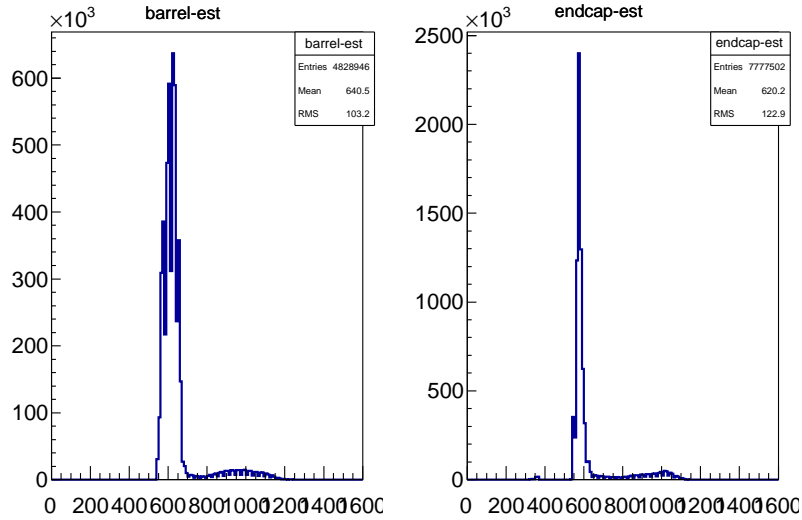


图 2.16: 事例起始时间的分布

原始测量的时间信号TDC包括事例的起始时间  $t_0$ ，对撞事例从对撞顶点到TOF探测器的飞行时间  $t_{tof}$ ，信号在读数条的传播时间  $t_{pro}$ ，电子学的延迟  $t_{ele}$ ，过阈时间的晃动  $t_{time-walk}$ 。即： $TDC=t_0+t_{tof}+t_{pro}+t_{ele}+t_{time-walk}$ ，所以飞行时

间  $t_{tof} = TDC - (t_0 + t_{pro} + t_{ele} + t_{time-walk})$ ，其中TDC是TOF探测器测量到的原始时间信号，对于MRPC来讲，采用的双端读数，所以一个事例有两个TDC时间信号。 $t_0$ 由事例起始时间算法给出， $t_{pro}$ 对于MRPC来说是信号在对数条的传播时间。这个是刻度的主要内容之一。 $t_{ele}$ 是电子学延迟项，是一个常数项。 $t_{time-walk}$ 对于MRPC来说是TOT的晃动。

## 2.5 刻度的重点和难点

### 2.5.1 MRPC离线刻度的信息量

前面已经介绍了MRPC直接测量的是时间信号TDC，还有过阈时间TOT。MRPC的读数条采用的是双端的读出形式。所以对应一个事例测量的有两个时间信号TDC1, TDC2；有两个过阈时间TOT1, TOT2。在这里定义：

$$tleft = TDC1 - t_0 \quad (2.1)$$

$$tright = TDC2 - t_0 \quad (2.2)$$

则tleft和tright为事例从对撞点时刻到电子学读出的过阈时间前沿的时刻之间的间隔。包括从对撞点飞行到MRPC探测器的飞行时间，信号在读数条中的传播时间，信号在电缆等的传播时间，电子学的时延，过阈时间的晃动等部分。

刻度的目的正是修正除了飞行时间外的其它时间的贡献。其中信号在电缆的传播时间和电子学的时延是常数项，信号在读数条的传播时间是一个依赖击中位置的时间量。过阈时间的晃动是和信号的大小有关的量。

BESIII系统的坐标定义为：正Z轴沿着束流方向，水平向东；正Y轴指向天空，竖直向上；正X轴取水平向北。取对撞点为坐标原点O(0,0,0)。空间某一点P(x,y,z)的方位角定义为直线OP从正X轴沿逆时针在Z—Y平面投影的角度 $\phi$ ，在端盖MRPC中对应的不同模块的编号tofid和相同模块不同的击中位置zrhith(来自径迹外推)。OP的极角定义为OP和正Z轴的夹角 $\cos\theta$ ，在端盖MRPC中对应的是读数条的编号strip。

之前已经介绍了利用MDC重建和卡曼滤波径拟合可以得到带电径迹的动量和径迹长度的信息，进而可以求出带电粒子的预期飞行时间 $t_{exp}$ 。

至此，刻度需要的所有相关量已经介绍完了。包括电子学系统测量的量：初始时间tleft, tright (TDC扣除 $t_0$ 的时间在本论文中仍旧称为初始时间), 过阈时间qlleft, qright (测量的两个TOT的值在本文中都表示成qlleft, qright的形式); 外推的量：击中位置zrhith, 预期时间 $t_{exp}$ ，以及模块的编号tofid, 读数条的编号strip。

### 2.5.2 MRPC离线刻度的时间，TOT，zrhith等的原始分布

图2.17给出了MRPC离线刻度的一些原始的分布。上面的三幅图是原始的时间，过阈时间和击中位置分布的一维图，其中2.17a是原始的时间tleft的

分布；2.17b 是原始的过阈时间 $q_{left}$ 的分布，可以明显看出，存在多峰现象；2.17c 是击中位置 $z_{rhit}$ 的分布，可以看出事例数随着 $z_{rhit}$ 是分布均匀的。下面三幅图是原始的时间，过阈时间和击中位置相互关系的二维图，其中 2.17d 表示时间随击中位置的分布，这个关系近似线性，这是刻度的主要项之一；2.17e 表示时间随过阈时间的分布，关系分布复杂，这也是刻度的主要项之一；2.17f 表示过阈时间和击中位置的分布。

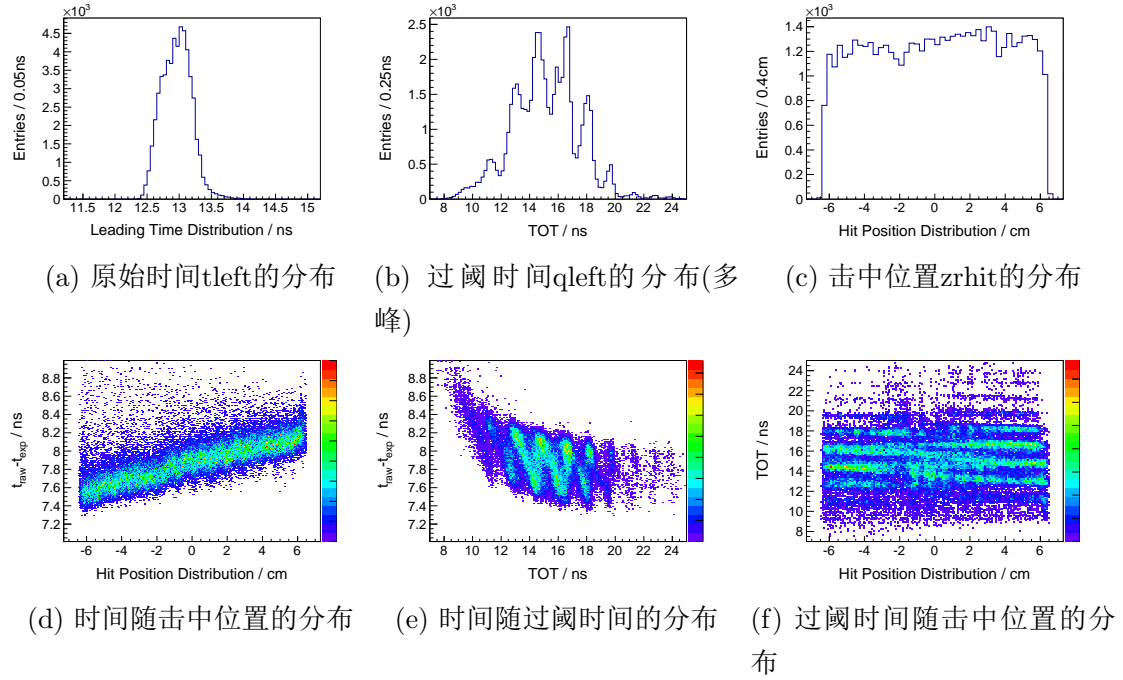


图 2.17: 一些原始的分布

### 2.5.3 过阈时间和反射问题

刻度的主要内容包括：信号在读数条的传播时间项，过阈时间的修正项。

其中信号在读数条的传播时间和信号在读数条的击中位置以及信号在读数条的等效传播速度有关。对于MRPC的每条读数条而言，长度以及工艺上的差别，导致信号在每个读数条的等效速度不尽相同，因此需要分别对每条读数条进行离线刻度。

信号在读数条的传播时间项如图 2.17d 所示，近似是一个线性的关系。预估采用低阶多项式即可完成修正。而过阈时间修正项如图 2.17e 所示，可以看出时间对TOT的分布存在折线关系，分布复杂，需要分析这种折线分布背后的产生的机制。采用合适的方式处理这种关系。图 2.18a 是信号的过阈时间。对于一定的阈值，幅度大小不同的信号，对应的过阈时间不同。信号幅度越大，过阈时间也就越大。图 2.17b 中 TOT 的多峰来自于反射。图 2.18b 是 MRPC 读数条的反射问题，分为近端反射和远端反射。由于读数条本身较短，反射信号只是比真实信号时间晚不到1ns，这样导致反射信号和原来的真实信号叠加。测量的



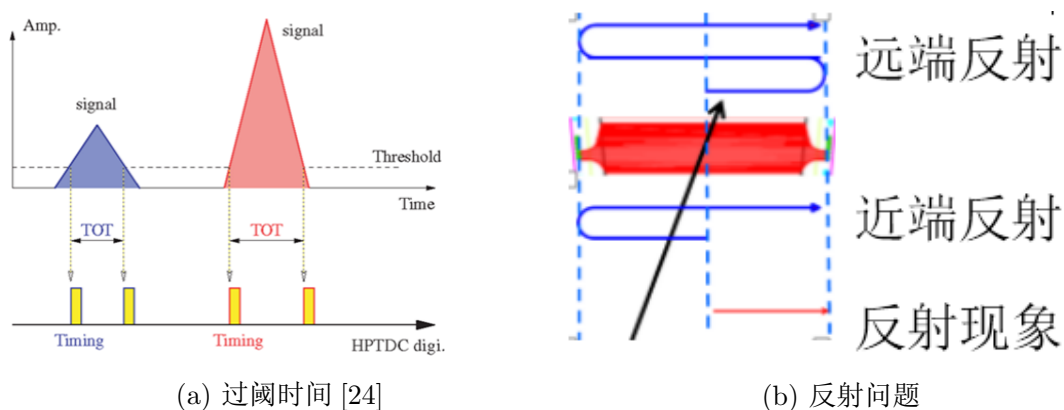


图 2.18: 反射问题和过阈时间

TOT 也就变大了。正是由于过阈时间和反射问题的存在，导致时间对 TOT 的分布复杂。对时间和 TOT 的关系的研究也刻度研究的重点和难点部分。

## 2.6 小结

本章首先介绍了原来的端盖闪烁体 TOF 的时间分辨等性能，由于时间分辨达不到 BESIII 实验高精度测量的要求，端盖 TOF 在 2015 年完成了升级改造，换成了时间分辨更好的 MRPC 探测器。MRPC 探测器作为一种新型的飞行时间探测器，具有时间分辨好，探测效率高，造价便宜等优势。之后介绍了 BESIII 实验的 MRPC 的结构。BESIII 的离线数据处理和分析系统可以处理包括模拟、刻度、重建和物理分析等一系列的物理问题，其中 BOSS 是整个离线软件的核心。然后介绍了事例起始时间的重建，MDC 的径迹外推，以及 TOF 的离线数据重建过程。最后介绍了 MRPC 端盖 TOF 的一些原始分布以及刻度的主要内容，由于反射的原因，导致时间和 TOT 的关系分布复杂。过阈时间的修正是刻度的重点和难点部分。



## 参考文献

- [1] G. Aad. et al. (ATLAS Collaboration). *Phys.Lett.B*, 716:1–29, 2012.
- [2] S.Chatrchyan. et al. (CMS Collaboration). *Phys.Lett.B*, 716:30–61, 2012.
- [3] 吕才典. 粒子物理学. 讲义, 中科院高能所, 2014.
- [4] 章乃森. 粒子物理学[M]. 北京科学出版社, 北京, 1968.
- [5] 杜东生, 杨茂志. 粒子物理导论. 北京科学出版社, 2014.
- [6] S. Weinberg.. A Model of Leptons[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 19, 1967.
- [7] 唐孝威主编. 粒子物理实验方法. 高等教育出版社, 1982.
- [8] 徐克尊等编. 粒子探测技术. 上海科学技术出版社, 1981.
- [9] 谢一冈等主编. 粒子探测器与数据获取. 科学出版社, 2003.
- [10] 薛凤家等主编. 诺贝尔物理学奖百年回顾. 国防工业出版社, 2003.
- [11] 谢家麟等. 北京正负电子对撞机和北京谱仪. 浙江科学技术出版社, ISBN7-5341-0721-0, 1996.
- [12] 中国科学院高能物理研究所. BEPCII初步设计报告. 2003.
- [13] 中国科学院高能物理研究所. 北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII). 2006.
- [14] M.Ablilim. et al. (BESIII Collaboration). *Phys.Rev.Lett*, 110:252001, 2013.
- [15] 郑志鹏主编. 北京谱仪II正负电子物理(第一版). 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [16] M.Ablikim. et al. Design and Construction of the BESIII Detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 614:345–399, 2010.
- [17] 王贻芳主编. 北京谱仪(BESIII)的设计与研制. 上海科学技术出版社, 2011.
- [18] Kuang ta chao and yifang Wang. PHYSICS AT BESIII. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MODERN PHYSICS*, 24:1–794, May.2009.
- [19] 王贻芳主编. 北京谱仪(BESIII)的设计与研制. 上海科学技术出版社, 2011.

- [20] 阮丽娟等. TOF在STAR实验中的标定. 高能物理与核物理, 29, 2005.
- [21] jian wu. et al. The performance of the TOF tray in STAR. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 538:243–248, 2005.
- [22] A. Alici. Status and performance of the ALICE MRPC-based Time-Of-Flight detector. *Jinst*, 7, 2012.
- [23] A. Alici. Particle identification with the ALICE Time-Of-Flight detector at the LHC. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 766:288–291, 2014.
- [24] Ming Shao. et al. Upgrade of the calibration procedure for a STAR time-of-flight detector with new electronics. *IOP science.*, 20:025102, 2009.
- [25] A. Akindinov. et al. Performance of the ALICE Time-Of-Flight detector at the LHC. *Eur. Phys. J. Plus*, 128, 2013.
- [26] ZHAO Chuan. et al. Time calibration for the end cap TOF system of BESIII. *Chinese Physics C*, 35(1):72–78, Jan., 2011.
- [27] 王小状. 北京谱仪端盖飞行时间探测器升级改造的MRPC性能研究. 中国科学技术大学博士论文, 2016.
- [28] Liu H M. Li W D et al. Proceeding of CHEP06. February 13-17,2006.
- [29] Barrand G. et al. Proceeding of CHEP2000. February 6-12,2000.
- [30] root. <http://root.cern.ch/>.
- [31] cern. <http://cernlib.web.cern.ch/cernlib/>.
- [32] 张晓梅等.
- [33] 马想等.
- [34] Ma Xiang. et al. Determination of event start time at BESIII. *Chinese Physics C.*, 32(9), Sep., 2008.
- [35] 王亮亮等. BESIII主漂移室径迹的外推和径迹匹配. 高能物理与核物理, 31(2), Feb.,2007.
- [36] 伍灵慧. BESIII漂移室离线刻度研究及模型的束流测试. 中国科学院高能物理研究所博士论文, 2007.

- [37] 王纪科. *BESIII*径迹拟合算法与*GPUPWA*的相关开发. 中国科学院高能物理研究所博士论文, 2009.
- [38] M. Ullrich. et al. Implementation of a Multigap-Resistive Plate-Chamber as Time of Flight Detector into the BOSS Framework. April 6,2014.
- [39] K.L.He. Status and Plan for Analysis and Tools software. *BESIII Collaboration Meeting*, 2007.
- [40] BIAN jian Ming. et al. Absolute photon energy calibration for the BESIII EMC. *Chinese Physics C*, 34:72–77, 2010.
- [41] Bauer A J M. BaBar Note 521. 2000.