

L3 宇宙线实验触发系统和触发效率的测量*

李忠朝 郁忠强 过雅南 徐玉朋 姚志国 李德

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 介绍了在欧洲核子研究中心(CERN)的 L3 探测器上进行的宇宙线实验的触发系统判选过程,还介绍了使用蒙特卡洛模拟检验触发系统和计算触发效率的方法,并给出了实际数据的测量结果和误差.结果已用于 L3 宇宙线实验的 μ 谱的测量中.

关键词 宇宙线实验 粒子探测器 触发系统 触发效率

1 引言

L3 宇宙线实验(L3 + Cosmics)^[1]是中国科学院高能物理研究所和德国的 DESY-Zeuthen, 瑞士的 ETH, 荷兰的 NIKHEF 等国外几所大学和研究所合作,利用高精度测量动量的 L3 μ 漂移室和 L3 探测器^[2]顶部的闪烁计数器收集宇宙线 μ 子的数据.它的物理目标是精确测量从 20—2000GeV/c 宇宙线 μ 谱,以及在宇宙线中寻找重质量的新粒子^[3]. 同时还能兼顾其它一些宇宙线和天体-粒子物理的课题,如:寻找点源, γ 暴,与多 μ 相关的宇宙线物理,寻找与太阳耀斑相关的 μ 子暴以及对太阳和月亮阴影的研究等.

由于 L3 宇宙线实验数据采集是独立于 L3 对撞实验,要求能和 L3 实验同时取数又不会影响 L3,因而 L3 宇宙线实验有独立于 L3 的电子学、触发系统和数据采集系统.

根据 L3 宇宙线实验的物理目标,需要判选的主要有两类事例,宇宙线的 μ 子事例及可能的重粒子事例. μ 子是宇宙线中的主要成分,要寻找的重粒子事例率比 μ 子低得多(可能低约 9 个数量级).触发判选系统应同时满足多物理目标的要求.

目前国内外通过实验和模拟的两种方法对触发效率进行测量.在北京谱仪(BES)的触发判选系统效率的测量中,根据 BES 触发系统的特征,改变各个触发条件表来得到一些专门用于触发效率测量的数据,只用实验数据就能确定 BES 触发系统对各事例类型的触发效率^[4].

我们用实验数据,同时采用蒙特卡洛模拟的方法检验触发系统和测量触发效率,对于 μ 谱的测量和其它课题都是必需的.

2001-04-28 收稿

* 国家自然科学基金(19999500)和中国科学院资助

2 L3宇宙线实验探测器简介^[5]

2.1 μ 子漂移室

为了测量粒子动量,利用了L3谱仪的 μ 漂移室.L3谱仪位于欧洲粒子物理研究中心(CERN,东经 6° ,北纬 46°),在地下30m处,穿透成分为动量大于 $15\text{GeV}/c$ 的宇宙线 μ 子.L3谱仪的特点是有有一个巨大的常规磁铁和高精度的漂移室.其磁铁部分外围($H \times L$) $15.0\text{m} \times 13.6\text{m}$,内径 $11.4\text{m} - 11.9\text{m}$,提供空间 1000m^3 的大强度 0.51T 磁场.

L3的 μ 漂移室分成8个卦,每卦有外,中,内3个P室(Precision Chamber)(MO,MM,MI),每室分别有42,30,19个单元,每单元信号丝数分别为16,24,16.图1为 μ 子漂移室轴向投影图.

除偏转方向的漂移室外,每卦还有上下Z室各一个,每室2层,共960丝.在P室和Z室中的每根丝,都有前置放大器和甄别器相连.甄别后的漂移室丝信号被送到L3对撞实验的TDC,再送到它背面的CPC插件(Cosmic Personality Cards),CPC的功能主要是测量丝信号到达时间,同时实现触发的Majority逻辑功能.

2.2 T_0 探测器

由于宇宙线在时间上是随机分布的,不象对撞实验知道精确的对撞时间,所以对触发判选和电子学系统来说,没有一个类似于对撞实验那样的起始时刻.因而在L3探测器的顶部的3个面上分别安装了 $72, 72$ 和 58m^2 的 T_0 探测器来测量粒子击中探测器的起始时间.在卦1,2分别有12个模块,卦3有10个模块(图1).每个闪烁体模块由6块 1m^2 大小的铝盒组成, 1m^2 大小的铝盒又由16片大小为 $25\text{cm} \times 25\text{cm} \times 2\text{cm}$ 的闪烁体瓦片组成.

每个模块有左右两个光电倍增管输出,信号被送到闪烁体CPC(Scintillating Cosmic Personality Cards,闪烁体CPC主要用TDC测量闪烁体信号的到达时间和进行闪烁体触发信号的一级处理)^[6]读出,同时送到VME触发插件CTT(Cosmic Trigger and Timing module,宇宙线触发和时序插件)^[7]中进行触发类型组合,产生宇宙线事例的触发.

3 触发判选过程

触发判选的任务是根据实验的要求,利用经过甄别的探测器(μ 漂移室和 T_0 探测器)的信号进行一定的逻辑选择,对可能的好事例给出触发信号.同时,要尽可能地排除本底,使得通过触发判选的事例率不要过高,保证在线计算机能够有效地将这些事例记录下

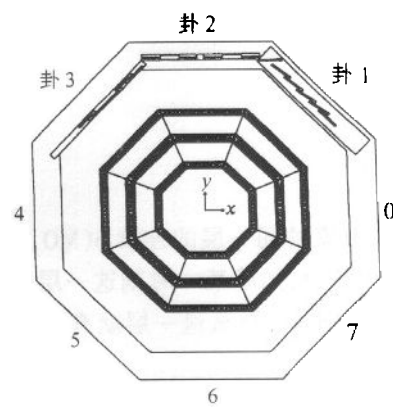


图1 L3 + CT_0 闪烁体及 μ 子漂移室轴向投影图

来。

从本底的来源考虑,由于对撞产生的事例率较低,实验的本底主要来自 μ 探测器中漂移室丝的随机发火. 它主要是通过 CPC 板的 Majority 逻辑和 CTT 的寻迹分组逻辑来排除. 另外,由于对撞机同步辐射等原因造成 T_0 探测器的本底,一方面通过左右光电倍增管的符合而大大减少,同时要求和 μ 室的 Majority 信号时序符合 (Have a Look), 触发判选的过程见图 2.

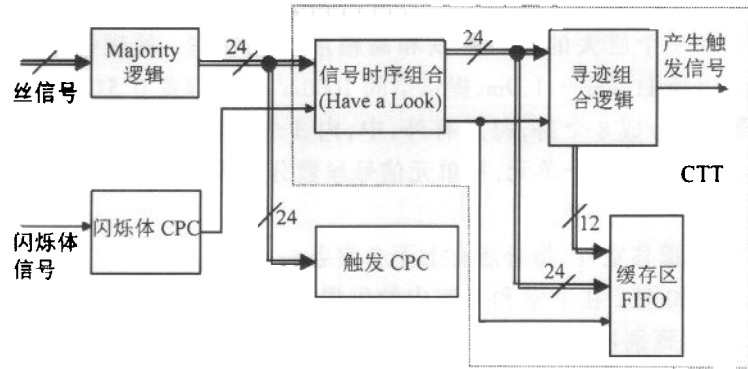


图 2 触发判选过程逻辑图

P 室的同一层的连续 6(MO, MI 层)或 4 个(MM 层)单元中的 96 个丝信号被送到同一个 CPC 中,如果某一时刻这一层的任何一个 CPC 中(96 道)有超过 7 根丝着火,就认为这一层被击中,那么这一层就有 Majority 信号输出. 这就是 Majority 逻辑. 电路逻辑原理如图 3.

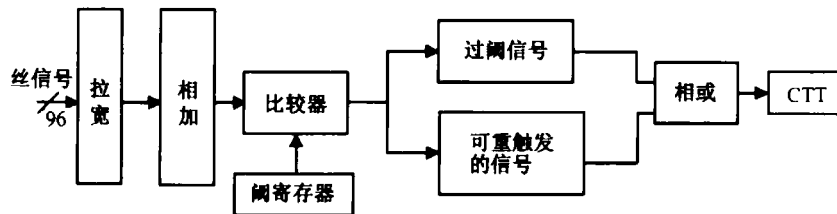


图 3 Majority 逻辑电路图

由于漂移室的最大漂移时间是 $1.2\mu\text{s}$,同一事例最早和最晚到达的丝击中信号可以相差 $1.2\mu\text{s}$. 所以每个丝击中信号要拉宽到 $1.2\mu\text{s}$. 同时为了信号的同步,要求在下一个时钟周期才拉宽丝信号,增加一个时钟周期. 每隔一个时钟周期就检查有多少根丝着火,然后和一个预先设定的值(现设值是 7)比较,如果超过了,则开始一个过阈的信号. 为了使最后的 Majority 的宽度至少有 7 个时钟周期,这个过阈信号会启动一个可重触发的单稳态. 最后输出到 CTT 的 Majority 信号是这两个信号的或;同一层的各 CPC 的 Majority 信号相或(图 4). 24 层 Majority 信号在送往 CTT 的同时,会把前沿和后沿的时间信号送到触发 CPC(Trigger CPC,它的功能是记录 Majority 信号以及闪烁体触发信号的前后沿)中,由 TDC 将前、后沿的时间信息经过电子学系统和在线计算机记录在磁带上(图 2).

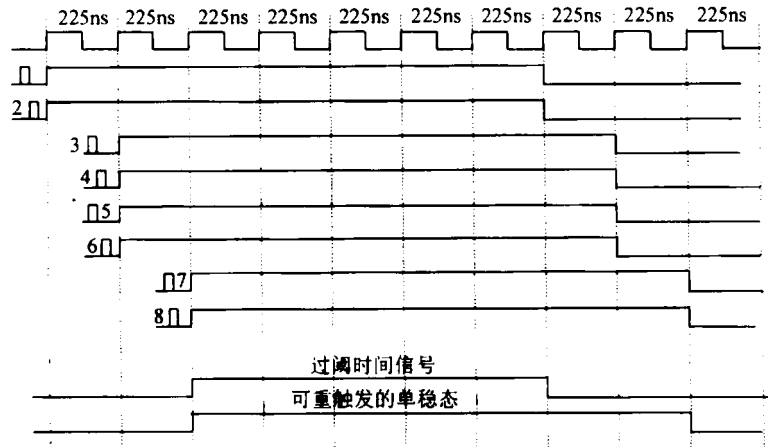


图 4 丝信号和产生的 Majority 信号时序图

为了和丝室的 Majority 信号在时序上同步,所有的闪烁体信号或起来后,拉宽至适当个时钟周期,再延迟后送到 CTT 进行时序符合。

为了排除假的 Majority 信号和闪烁体信号,要求他们的信号时序满足一定关系.把 24 层的 Majority 信号相加,当第一个下降沿到来,看各个信号在这个时刻是否高电平.如果时序不能符合,则认为不是这次击中产生的 Majority 信号(图 5).若时序符合,则把结果锁存,送到寻迹分组逻辑,同时写到 CTT 的缓存区(FIFO)。

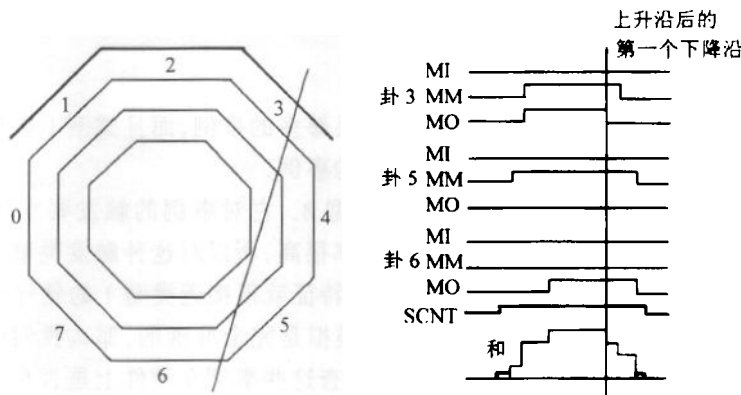


图 5 信号时序组合的原理

分组寻迹逻辑^[8]是把来自于 P 室的 24 个信号分组.一个卦中三层都有 Majority 信号输出,称为 Triplet.有两层为 Doublet,仅有一层的为 Singlet.然后和闪烁体信号一起根据物理的要求组合出 12 种触发类型(见表 1)。

其中,类型 4,8,9 由于事例率较高,所以要求预定标(取值范围在 1—255 之间),即触发系统每接收到预定个这种触发类型的事例,才记录最后的一个事例,否则整个系统的触发率会超出在线系统所能承受的范围。

产生触发后,先把触发信号寄存在一个触发信号的临时寄存器中(为了减少死时间,

这个寄存器可以有多个触发信号在等待). 然后按寄存的顺序, 等上个事例读完, 新的触发信号开始通知电子学读出 TDC 中的数据. 同时把触发类型的信息写入 CTT 的缓存区. 因此在 CTT 的缓存区中记录了触发的在线信息. 宇宙线 μ 谱的测量中仅应用了触发条件是类型 1 的事例.

表 1 触发类型

类型	2000 年运行时各触发类型定义
1	任何一个卦中有 Triplet, 同时要求 T_0 击中信号
2	在水平方向的两个卦 0 或 4 中有一个是 Triplet, 同时要求没有 T_0 击中信号
3	卦 1 或 2 或 3 中有一个是 Triplet, 同时要求没有 T_0 击中信号
4	卦 5 或 6 或 7 中有一个是 Triplet, 同时要求没有 T_0 击中信号
5	在相邻的三个卦中有三个 Singlet, 同时要求 T_0 击中信号
6	两个 Doublet, 同时要求 T_0 击中信号
7	至少一个 Doublet, 两个 Singlet, 同时要求 T_0 击中信号
8	两层或两层以上 μ 室着火
9	三层或三层以上 μ 室着火
10	Triplet 和至少有一层 μ 室着火, 对 T_0 击中信号无要求
11	五层 μ 室着火, 对 T_0 击中信号无要求
12	六层或六层以上 μ 室着火, 对 T_0 击中信号无要求

在 2000 年的运行中, 按照以上的触发设置, 总触发率是 420Hz, 类型 1 的触发率大约为 150Hz.

4 触发效率的测量原理

因对于 μ 谱测量来说, 只选用类型 1 就有足够多的事例, 而且类型 1 在探测器上留下的信息是最完整的, 所以我们需要研究类型 1 的事例.

为了测量触发效率, 我们专门设定触发类型 8. 它对事例的触发要求不高 (在 24 层中, 只要任何两层着火), 因而这种类型的事例率很高, 所以对这种触发类型采用了预定标的方法, 预定标的因子是 100. 这样的事例样本特征就很接近类型 1 的硬件触发前的宇宙线事例. 让类型 8 的事例通过模拟程序, 假定模拟是完全准确的, 那么我们就知道有多少事例应该通过触发类型 1 (假定为 N_{sim}). 然后检查这些事例在硬件上是否真的通过触发类型 1 (CTT 的缓冲区记录了触发信息), 就可知道实际记录了多少事例 (N_{simtrg}). N_{simtrg}/N_{sim} 就得到触发类型 1 的触发效率.

5 触发系统的模拟和检验

5.1 触发系统的模拟

由于在测量 μ 谱时, 都是选用闪烁体噪声低的数据, 所以在测量触发效率时也选用了同样的数据. 图 6 是闪烁体信号相对触发的时间分布, 认为时间在 250—1600ns 以外的闪

烁体信号不是真正的闪烁体击中信号, 对这样的事例是不进行模拟的.

用 C 语言实现了以上触发过程的模拟, 具体模拟过程如下:

1) 根据触发信息, 筛选出用于触发效率测量的事例, 即类型 8 的事例, 模拟只对这些事例进行;

2) 从原始数据中读入 μ 室击中丝的信号;

3) 检查各层(24 层)中各个 CPC(96 道)中是否有大于 7 根丝着火, 然后把同一层的 Majority 信号相‘或’, 送往 CTT;

4) 读入闪烁体击中信息, 先把击中的模块的光电倍增管的左右输出相‘与’, 然后把所有击中信号相‘或’, 送往 CTT;

5) 在 CTT 中进行 Have a Look 的时序检查的模拟;

6) 在 CTT 中模拟寻迹逻辑组合, 触发类型的分类和硬件的相同;

7) 根据模拟的结果和磁带记录的触发信息, 在模拟出的类型 1 的事例中 (N_{sim}), 统计出有多少事例在硬件上是通过的 (N_{simrg}).

用 75 个 RUN 的数据, 得到 $N_{sim} = 105958$, $N_{simrg} = 105142$.

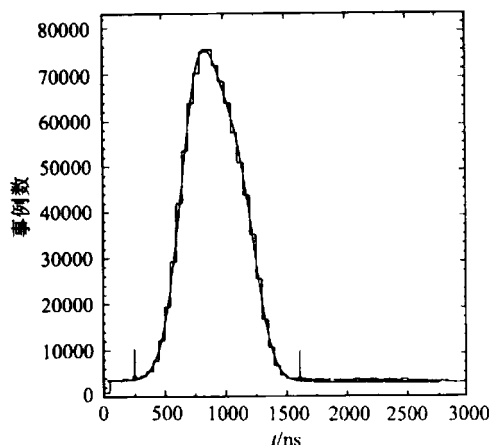


图 6 闪烁体信号的时间分布

5.2 各触发类型的模拟和实验数据的一致性

图 7 是各触发类型占总触发事例的比例以及模拟和实验的比值. 从图可知模拟和实

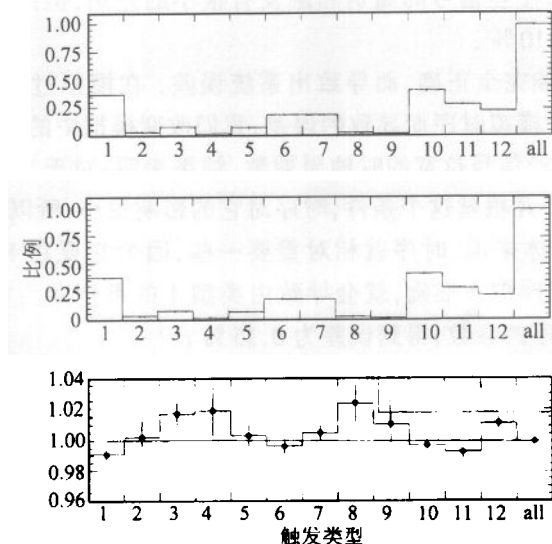


图 7 实验数据(a)和模拟计算(b)中的各触发类型占总触发事例的比例, (c)是模拟和实验的比值

验的比值在一定的可信度内是一致的,表明触发设置是按预先设计的,同时也说明模拟是和硬件基本符合的.

6 触发效率的测量结果和讨论

6.1 宇宙线 μ 子的触发效率

根据以上原理,得到宇宙线 μ 子的触发效率 ϵ_{trg} 为

$$\epsilon_{\text{trg}} = N_{\text{simtrg}} / N_{\text{sim}} = 105142 / 105958 = 99.23 \% .$$

6.2 宇宙线 μ 子的触发效率误差分析

6.2.1 统计误差

N_{simtrg} 服从二项式分布,因而它的方差为

$$\sigma^2 = N_{\text{sim}} \cdot \epsilon_{\text{trg}} \cdot (1 - \epsilon_{\text{trg}}),$$

则效率的统计误差为

$$\sigma_{\text{stat}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{trg}} \cdot (1 - \epsilon_{\text{trg}})}{N_{\text{sim}}}},$$

$$N_{\text{sim}} = 105958, \epsilon_{\text{trg}} = 99.23 \% \text{ 时, } \sigma_{\text{stat}} = 0.03 \% .$$

6.2.2 系统误差估计

系统误差主要有 3 个方面的来源:

1) 在硬件上, TDC 中丝信号的甄别和触发有很小的差别,但这个引起触发效率的变化很小,估计误差为 0.10% .

2) 由于模拟不可能完全正确,而导致出系统误差. 在模拟过程中,最困难的是时序的模拟. 为了估计由于模拟时序而导致的误差,我们改变模拟中的一些参数值,如增大或减小时钟周期的宽度、丝信号拉宽的时钟周期数,结果表明:对于 Majority 逻辑的模拟,起关键作用的是要求大于几根丝这个条件,时序对它的影响很小,所以导致的误差不会超过 0.05% ;但是对于闪烁体来说,时序就相对重要一些,因为它要在 Have a Look 逻辑中和 Majority 信号匹配,如果模拟不准确,就会导致由类型 1 的事例变为类型 2 或 3 或 4 的事例. 同样,通过改变时序的参数,得到误差为 0.15% .

3) 选定的闪烁体时间 250—1600ns,并不一定和做 μ 谱的时间一致,当闪烁体时间选在 100—1700ns 和 350—1500ns,分别得到效率为:99.02% 和 99.45% .

综合以上因素,得到系统误差为 0.29% .

因而对于宇宙线 μ 谱的事例的触发效率为

$$\epsilon_{\text{trg}} = (99.23 \pm 0.03 \pm 0.29) \% .$$

感谢 L3 宇宙线合作组中荷兰 NIKHEF 的同事 Bert Peterson 和 Charles Timmermans 关于

触发系统的讨论,使我的工作能顺利完成.感谢朱清棋研究员和 L3 + Cosmics 合作组内其他成员的有益的讨论.

参考文献(References)

- 1 Webpage of L3 + C, http://l3www.cern.ch/l3_cosmics/
- 2 Adeva B et al. Nucl. Instr. And Meth., 1990, **A289**:35
- 3 CHEN He-Sheng et al. Phys. Reports, 1997, **282**:1
- 4 YU Zhong-Qiang et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1995, **19**:1062(in Chinese)
(郁忠强等. 高能物理和核物理, 1995, **19**:1062)
- 5 L3 + C Collab. The L3 + C Detector, a New Tool-Set to Study Cosmic Ray Muons., Nucl. Instr. & Meth., 2001, to be published
- 6 Groenstege H I. et al. CPC for the L3 + Cosmics Experiment, NIKHEF ETR 99 - 02, 1999
- 7 Verkooijen H. CTT - 2, Cosmics Trigger and Timing Module for Phase 2 of the L3 + Cosmics Project, NIKHEF ETR 99 - 01, 1999
- 8 LI De. Design and Implement on Trigger System in Phase II of L3 + Cosmics Experiment, Ph. D. Thesis, IHEP, 1998 (in Chinese)
(李德. L3 + Cosmics 实验 Phase II 的触发判选系统的设计与实现, 博士论文, 中国科学院高能物理研究所, 1998)

Introduction of the Trigger System and the Measurement for Trigger Efficiency at L3 + Cosmics Experiment*

LI Zhong-Chao YU Zhong-Qiang GUO Ya-Nan XU Yu-Peng YAO Zhi-Guo LI De

(Institute of High Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract The trigger process of L3 + Cosmics experiment at CERN is introduced briefly. Also we checked whether the settings of L3 + Cosmics trigger system by simulation are correct or not and introduced a method on trigger efficiency calculation. To get trigger efficiency for μ spectrum measurement, an experimental data sample, which includes events passing the trigger set to measure the μ spectrum and not passing, is needed. Then L3 + C trigger process is simulated with these events in this sample to know how many events should pass the trigger. By checking a trigger bit recorded in the experimental data, one can know how many events passed the trigger in hardware in these simulated events. The ratio then determines the trigger efficiency for μ spectrum measurement. And the systematic error is analyzed. The results on trigger efficiency have been used to the measurement of μ spectrum.

Key words cosmic experiment, particle detector, trigger system, trigger efficiency

Received 28 April 2001

* Supported by NSFC (19999500) and CAS