

北京谱仪(BES)轻子识别研究

——Monte Carlo结果

孔令华

(应用物理系)

摘要 这项工作是详细研究北京谱仪(BES)轻子识别的一部分。本文报告了 π/μ 、 π/e 分辨的Monte Carlo结果。结果表明:在北京谱仪中 π/μ 分辨有两个有效的截断,即位置与方向。对于 π/e 分辨也有两个有效的截断,即总电荷量沉积和二极矩。

关键词 谱仪, 轻子, 粒子分辨, 漂移透过, 簇射透过

分类号 O572.32

1974年 J/ψ 粒子的发现开创了粲粒子这一粒子物理的新领域。虽经过十几年的努力,仍然有许多重要的问题等待进一步弄清。这些问题对基本粒子理论本身有重大影响。要回答这些问题,在数据处理中正确分辨粒子是重要的[1],[2]。

在确保北京谱仪探测效率和分辨本领的基础上,积累人们感兴趣的物理事例数与讨论清楚由于粒子之间分辨的局限性所造成的本底具有同样的重要意义。一方面,事例数的多少直接影响能否得出正确的物理结论;另一方面,粒子分辨能力的高低也会影响结果的可靠程度。具体讲,对于某一物理目标,在事例数一定的条件下,由于粒子之间分辨不清或对粒子混淆所至的背景估计过低或过高,也会对实验结果错判。例如, D^0 的衰变道中有两个: $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ 和 $D^0 \rightarrow K^- \mu^+ \nu_\mu$ 。其中衰变产生的中微子 ν_μ 在北京谱仪(BES)中不可测。 π^+ 和 μ^+ 的分辨不清会给它们分别的分支比的精确测量带来坏的影响。因此,在测量一个衰变分支比时(如 $D^0 \rightarrow K^- \mu^+ \nu_\mu$)有必要把做为本底的 π^+ 的混淆讨论清楚。另外,在研究 D^0 、 \bar{D}^0 混合的测量时也有类似的问题。测量 D^0 、 \bar{D}^0 混合的方法之一是测量 D^0 、 \bar{D}^0 半轻子衰变中轻子电荷同号的事例。具体讲,是寻找 $D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu_e$, $\bar{D}^0 \rightarrow D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu_e$ 的事例。但如果事例的一侧本是 $\bar{D}^0 \rightarrow K^- \pi^+$,而由于 π/e 混淆,导致它被误认为是 $D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu_e$,则整个事例可能被误认为是 D^0 、 \bar{D}^0 混合。

1989年7月4日收稿

所以， π/μ 和 π/e 分辨问题是精确研究粲物理首先要讨论清楚的问题^{[3][4]}。

1 BES硬件与其Monte Carlo模拟

BES是工作在北京正、负电子对撞机（质心能量为3~5.6GeV，以下简称BEPC）上的一个量能器类型的大型谱仪。图1绘出了BES的结构。为了明确，图中只标出了与我们Monte Carlo工作有关的三个部分，对BES硬件中每一部分的详细介绍可以在[5]中找到。

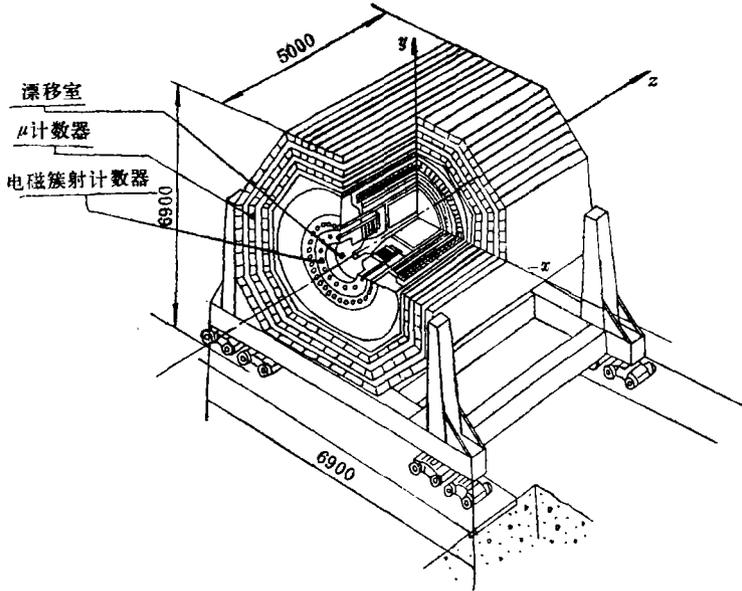


图1 BES的结构图

a. 漂移室

它是紧包在束流管之外的一个探测器。其外围的线圈在其中造成沿 z 轴方向的强度为4000.0高斯的磁场。正因为这一点，它可以测量次级带电粒子的动量或方向。应该强调的是，BES在漂移室外无测量粒子方向的探测器，因此，在讨论电磁簇射计数器和 μ 子计数器中粒子分辨问题中，涉及粒子运动方向时就以粒子在漂移室中的外推方向代之。

b. 电磁簇射计数器

这个探测器的设计使得电子和光子把全部的能量都交给它，而使得其它粒子基本上在丢掉部分能量后顺利地通过它。这个计数器含有24个铝—铅—铝与气体放电取样计数器夹层。总辐射长度为12%，气体放电采用自猝灭流光(SQS)方式，使用的是有机混合气体。

c. 这个系统由三层 μ 计数器夹三层铁组成。计数器中的 μ 管采用正比放电方式。讨论分辨问题(π/μ , π/e)基本上是在b与c计数器中进行的。

BES整体的 Monte Carlo 模拟是用 GEANT3.10 这个软件包完成的。它是模拟在给定的探测器中粒子的轨迹和探测器响应的一个程序包，并且包括了粒子径迹和探测器响应的一个程序包。具体讲它允许用户：

- (1) 以一定的方式简便地描述探测器装置，包括探测器的介质（纯元素介质或化合物介质）；
- (2) 由Lund产生器产生符合标准模型的终态；
- (3) 控制粒子在探测器中的输运且同时考虑几何介面和粒子与介质的各种相互作用；
- (4) 记录粒子轨迹和所诱导的灵敏探测器的信号；
- (5) 采用方便的输入和输出方式。具体讲，输入采用西欧中心（CERN）程序库中的 FFREAD 方式，输出的数据（可以是某个探测器的某种模拟结果）可以由 HPLOT 直接画图或处理。

BES 无论在其结构方面和其各子探测器中所充的介质方面都是相当复杂的。要使计算方法真正在计算机中成为有效，就必须对 BES 的结构及 Monte Carlo 模拟做一些简化：

① 结构方面的简化

比如，电磁簇射计数器含有24个铝—铅—铝与气体放电取样计数器夹层。这个结构当然可以定义到GEANT3.10中去，但这样做对计算机模拟是不利的，甚至是不可能的，因为界面过多或过细使得模拟一个事例所需要的CPU时间过多。所以，这个探测器中的介质和界面用铝、铅的适当的混合无界面介质代替。

② 模拟中低能截断的选取

有许多相互作用在能量较低时截面是较小的，为了减少CPU时间，对该相互作用的模拟从能量的某个截断开始模拟： γ 与电子的截断能量为5MeV，中性及带电强子的截断能量为10MeV。

计算与实验的比较表明这两种简化是合理的〔6〕。

2 μ 识别

在BES中 μ 的识别是靠外推漂移室中的径迹的外推位置与 μ 计数器中着火点(hit)位置关系解决的，即把这些径迹与 μ 计数器中着火点位置联系起来。在考虑了多次散射和测量误差后，如果外推径迹与 μ 计数器的着火位置符合，那么这个带有 μ 计数器着火位置的径迹被认为是 μ 信号。当然，多次散射造成的误差范围应以 μ 的相应量为标准。图2表达了这个情形，其中的阴影代表了由多次散射所造成的误差范围（以位置为例）。应当指出，在以上的误差范围内，绝大多数 μ 信号均被识别出来。但是，在这个范围内不可避免地会混进其它粒子的信号，其中包括漂移室透过的 π 和簇射透过的 π 。通常，这种混入只有

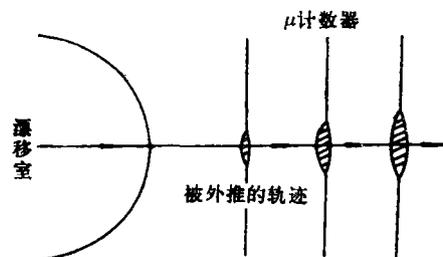


图 2

10%左右(两者之和)。但是,当我们研究的物理问题中原始 π 数目较多时(由BEPC中正、负电子对撞后产生的次级粒子的能量为几十个MeV到几百个MeV,这些粒子与探测器介质相互作用恰使 π 是很丰富的),那么这种混淆程度是相当可观的。如果这种背景不清楚,会给我们的数据分析带来绝对大的误差,甚至得到错误的结果。

2.1 漂移透过

作为 μ 信号的背景之一的是漂移透过。这是由于 π 有一定几率根本不与 μ 计数器中的铁发生核相互作用而进入 μ 计数器中。由于这部分 π 没有与铁发生作用,它在位置和方向这两个方面偏离外推径迹的程度在多次散射的范围(由 μ 的多次散射确定)内。尽管我们小心地按照 μ 的飞行方向考虑了多次散射和测量误差产生的位置截断与方向截断,漂移通过的 π 中的绝大多数还是混进了 μ 信号。

2.2 簇射透过

作为 μ 信号的背景之二的是簇射透过。我们希望 π 与 μ 系统中铁发生相互作用而把能量全部交给铁。但是,正因为这样,会有一些核相互作用之后的次级 π 粒子进入 μ 计数器中。 μ 信号的这部分背景较有特点,因为它们的作用方式使得次级粒子偏离原来入射方向和位置较大。

2.3 截断的选取

在有关截断(即Cut)的讨论中,下述三个定义是必须明确的:

(a) 在一定的截断下,即一定的空间位置范围内和一定的方向范围内, μ 信号被认为是同时存在于这两个范围中的hit且 μ 系统至少有一层发现有该hit与外推的漂移室的径迹相符合。当然,三层计数器中同时有两层或三层全部都有hit的情形被包括在上述定义之内。

(b) μ 计数器中说一个粒子的方向,则总是讲这个粒子在相邻两层中hit的连线方向。若这个粒子在 μ 计数器的三层中均有hit,那么把方向定义为第一层hit与第三层hit的连线方向,常用 $\Delta\theta$ 来表示。

(c) μ 计数器中一个hit(在某一层中)的位置总是由一个量来刻画,即在这一层中外推漂移室中的径迹与这一层的交点到该hit的距离,常用 ΔR 来表示。图3中有这两个量的表示。Cut的大小直接导致各种接收度的大小。对各种信号的接收度计算公式为:

$$P = P_{01}P_1 + P'P_{21}P_{22}P_{02} + P''P_{31}P_{32}P_{03}$$

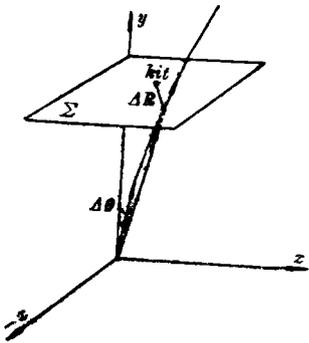


图3 ΔR 和 $\Delta\theta$ 的表示(Σ -计数器的一层)

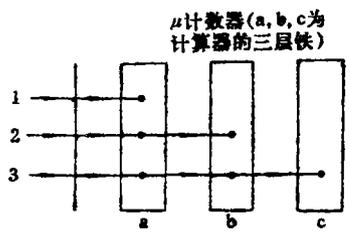


图4 一个 μ 到达 μ 系统的三种情况(1,2和3)

其中的各量由表1~表3给出。 P' 和 P'' 是发生在图4中第2种和第3种情况相对于第1种情况的相对几率。 P_{0i} ($i=1,2,3$)是几何接收度。

表1 图4中发生1, 2, 3种情况的比例

	μ	π	由 π 诱导的次级粒子
P'	0.0715	0.708	0.606
P''	0.464	0.952	0.825

表2 加上各种Cut后各种粒子的透过几率

μ 计数器的第 <i>i</i> 层	Cut种类 (cm)	Cut值 (cm)	接收度	μ (%)	π (%)	由 π 诱导的次级粒子 (%)
1	ΔR	6.00	P_1	61.24	51.53	54.70
		10.00		79.93	69.12	72.31
		17.00		86.87	80.83	87.41
		21.00		87.17	83.13	90.22
2	ΔR	12.00	P_{21}	84.17	72.92	74.41
		18.00		96.15	94.21	88.62
		24.00		99.51	94.24	95.81
		30.00		99.96	98.12	99.51
		0.12		75.01	61.81	63.91
2	$ \sin\Delta\theta $	0.18	P_{22}	90.71	77.32	78.51
		0.24		97.21	85.71	89.12
		0.40		99.65	94.64	98.54
		18.00		88.32	80.00	78.44
3	ΔR	24.00	P_{31}	96.33	92.01	84.52
		30.00		98.83	92.02	84.63
		37.00		99.54	92.01	84.62
		0.24		92.13	84.01	84.13
3	$ \sin\Delta\theta $	0.28	P_{32}	95.31	84.11	84.14
		0.34		97.96	84.17	84.14
		0.44		98.81	84.13	84.12
		36.00		83.75	2.20	1.68
P				68.13	3.20	2.44
				81.37	3.91	3.10
				83.75	4.15	3.35

表3 BES的 μ 计数器中第*i*层的几何接收度

第 <i>i</i> 层	P_{0i} ($i=1,2,3$)		
	μ	π	次级粒子
1	0.976	0.050	0.040
2	0.906	0.0147	0.016
3	0.485	7.140×10^{-4}	2.770×10^{-4}

2.4 结果与讨论

图5给出了接收度曲线。比如,当我们选取Cut使 μ 系统接收到81.37%的 μ 信号,

同时也要接收到3.91%的漂移透过 π 和3.10%的簇射透过 π ，这是就 e^+ 、 e^- 一次对撞中 π 和 μ 等几率产生的情况。下面进一步解释接收度的物理意义。假设 e^+ 、 e^- 一次对撞中产生 N_π 个 π 和 N_μ 个 μ 。在取一定的Cut下(为确定起见，取 μ 计数器第一层位置Cut为17.0cm，第二层位置与方向Cut分别为24.0cm和 $|\sin\Delta\theta|=0.24$ ，第三层位置与方向Cut分别为30.0cm和 $|\sin\Delta\theta|=0.34$ ，见表2)，若在

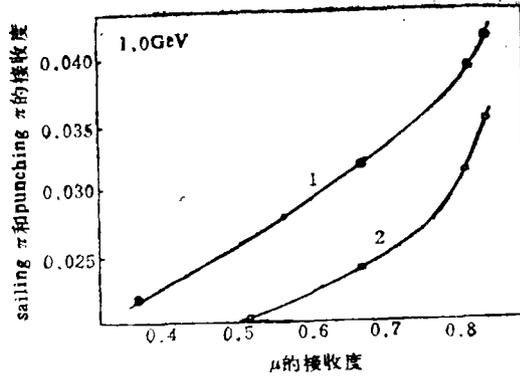


图 5

μ 计数器中声称测量到了一个 μ ，那么其中必有 $81.37\% \cdot \frac{2N_\mu}{N_\pi + N_\mu}$ 的几率真正是 μ ，同时也有 $(3.10\% + 3.91\%) \cdot \frac{2N_\pi}{N_\pi + N_\mu}$ 的几率是漂移透过和簇射透过 π 引起的伪 μ 。

3 e 识别

尽管BES中电磁簇射计数器的吸收长度($\approx 10\text{cm}$) \gg 辐射长度(0.7cm)，但是除了电子之外的其它粒子在经过它时也还是把一部分能量交给它了，而强子还有一定的几率发生核相互作用。能量沉积的涨落和核相互作用的存在造成电子与其它粒子一定程度的混淆。我们试探着研究了 π 和 e 的混淆问题。

3.1 截断的选取

由于粒子与铅作用本质上的差别，即电磁辐射在铅中产生大量次级粒子，而强子产生的次级粒子很少，所以，总电量沉积应当是一个有效的截断。另外，不同粒子在电磁簇射计数器中产生簇射的横向展宽的程度有相当大的差别，特别是电子与强子之间。所以，这个量可以被选做有效的截断，用 φ 方向的双极矩来标志它，见图6。

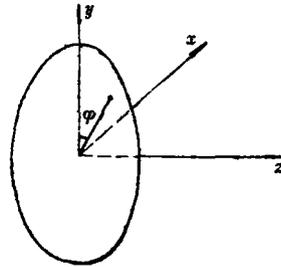


图 6 φ 方向的表示

值得指出的是，电磁簇射计数器共有6个电子学输出(24个灵敏区的适当组合)。总电量(对一个事例讲)沉积该是6个电子学输出之和。

3.2 Monte Carlo 模拟总电量和 φ 方向的双极矩

图6的原点产生了 μ 、 π 和 e 的事例，然后在BES的电磁簇射计数器中统计其6个输出总电量 Q 和 S_φ (φ 方向双极矩)。我们计算了6个输出的总电量沉积 Q 。从中可以看出由 μ 诱导的 Q 是非常小的，考虑了统计涨落后， μ 对 e 的混淆是不大的。故此，以下讨论分辨问题时将不再涉及 e/μ 分辨，而只是 e/π 分辨。图7是就入射能量分别为

0.5GeV、1.0GeV和1.5GeV时做的 e 和 π 的接收度曲线。从图中看出，能量越小则 e/π 识别就越困难。

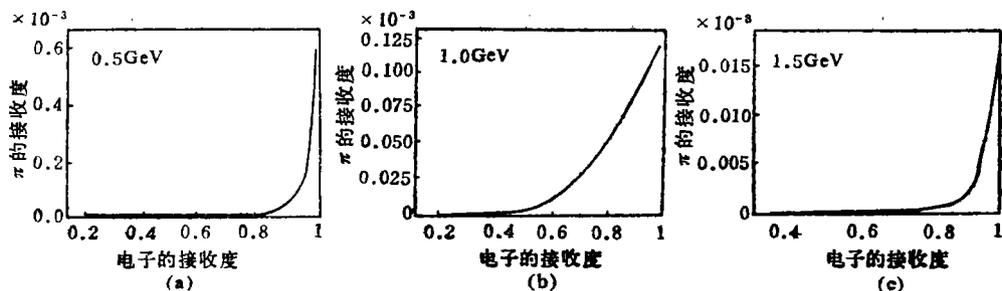


图 7

3.3 结果与讨论

我们来解释在 e/π 分辨中接收度（或曲线）的物理意义。在 1.0GeV 的情况下，当我们选取截断使 e 的接收度为 80%，同时接收到大约 5.2% 的 π ，即若在计数器中声称测量到了一个电子，那么其中必有 $80\% \cdot \frac{2N_e}{N_e + N_\pi}$ 的几率真正是 e ，同时也有 $5.2\% \cdot \frac{2N_\pi}{N_e + N_\pi}$ 的几率是 π 在计数器中引起的伪 e 。其中， N_e 和 N_π 是 e^+ 、 e^- 一次对撞中电子和 π 的产额。

由于模拟计算中没有考虑电磁计数器中 SQS 的死区效应，使得这个计算与实验有些偏差。

4 整体讨论

我们的 M.C. 模拟结果的可靠性来自 M.C. 本身的程序的正确性。为了检验我们的 M.C.，程序中 BES 几何与介质换成某些特殊情况，计算后把结果与实验数据相对比。在 1.0GeV 下，把 BES 几何和介质换成文 [7] 中的那样，用 π 来入射，结果表明：M.C. 结果与实验符合得相当好。

参 考 文 献

- [1] 唐孝威. 粒子物理实验方法. 科技出版社, 1982
- [2] The Simulation of Hadronic Showers. CERN, 1983
- [3] Trilling C H. The Properties of Charmed Particles. Stanford University, 1976
- [4] Wang T J. Properties for D Meson Physics at BES. 北京高能物理研究所, 1983
- [5] BEPC Designing Report. 北京高能物理研究所物理一室, 1982
- [6] GEANT3.10. CERN, 1987
- [7] NIM. 1978, (1): 155

Studies of the Lepton Identification in BES

—Monte Carlo Results

Kong Linghua

(Department of Applied Physics)

Abstract

This work is one of the series, which studies the lepton identification in the BES (Beijing Spectrometer) in detail. The preliminary M.C. results about the discrimination between muon, electron and the other secondaries generated by hadron punch-through, especially by pion, are reported. The results show that there are two efficient cuts, i.e. the total charge Q and the second moment S for the discriminating of electron and pion in barrel shower counter, and there are also two cuts, i.e. position for direction for the discriminating of muon and pion in muon—system of BES. Thus the BES is of the good ability for the lepton identification.

Key words spectrometers, leptons, particle discrimination, sailing-through, punching-through