

L3 量能器束流测试中的 e/π 分辨研究*

陈国明 陈和生 金炳年 唐孝威

童国梁 吴义根 仲崇昌

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘要

本文分析了 L3 实验的量能器束流测试数据, 提出了用“key cut”和“ Δ cut”作为 e/π 分辨的手段。结果表明, 在 4—20 GeV 能量区域内, e/π 分辨均高于 93.7%。

一、引言

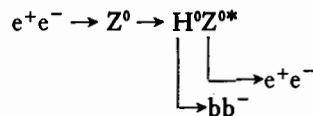
在 L3 实验中, 大角度 Bhabha 事例是不难被鉴别出来的。假设束流能量为 $\sqrt{s} = 91$ GeV, 在 $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+e^-$ 中, e^+ 和 e^- 各带有 45.5 GeV 的能量, 它们中的绝大多数都停止在电磁量能器 (BGO) 里, 而相同能量的强子一般都能穿过 BGO, 将能量大部分沉积在强子量能器里。但在

$$\tau^- \rightarrow e^- \nu_e \bar{\nu}_\tau, \quad (1)$$

$$\tau^- \rightarrow \pi^- \nu_\tau, \quad (2)$$

过程中, e 和 π 的能量是连续分布的, 低能的 π 容易被误判成 e , 反之, 高能的 e 则容易被误判成 π 。

过程 (2) 是很有意义的, 因为根据 π 的能谱可以确定 τ 的极化不对称性, 进而确定标准模型中的重要参数 $\sin^2\theta_w$, 而 e/π 分辨则是其关键所在。另外作为 L3 实验的一项基础性工作, e/π 分辨对其它物理过程也是很有意义的, 比如



是一个用于寻找 Higgs 的过程, 其信号是 e^+e^- 外加两个 jets, 如果 e^+e^- 实际上是强子, 那么找到的 Higgs 就是赝品。

L3 探测器的量能器由电磁量能器 (BGO) 和强子量能器组成。在分别进行了束流测试以后, 于 1987 年夏进行了两者合在一起的束流测试^[1]。测试中所用的束流由 210 GeV 的质子轰击铍靶而得到, 它可以提供 μ 、 e 、 π 束流, 能量范围在 2 至 50 GeV 内可

本文 1991 年 3 月 4 日收到。

* 国家自然科学基金资助。

调,动量分辨 $\Delta p/p$ 小于 1%, 这次用于分析的能量为 4, 8, 12, 20 GeV.

在束流测试中所用的量能器与最后安装在 L3 探测器中的量能器是完全一致的. 每块晶体是一棱台, 向着束流的面为 $2 \times 2 \text{ cm}^2$, 另一面为 $3 \times 3 \text{ cm}^2$, 长度为 24 cm, 具有 22 个辐射长度和 0.93 个核作用长度. 强子量能器有 4 个模块, 每个模块由 60 层多丝正比室和 58 层 U^{238} 及一层不锈钢板夹层而成. 关于束流测试的实验装置见参考文献[1], 电磁量能器 (BGO) 的结构、刻度见[4], 强子量能器的结构、刻度见参考文献[2,3]和[5].

二、束流的纯度检验和量能器能量校正

如果在 π 束流中混有电子, 或者在电子束流中混有 π , 势必影响 e/π 分辨的结果. 另外量能器的标定如果不正确, 也将给 e/π 分辨带来困难. 因此纯度检验和量能器能量校正是必要的步骤. 纯度检验的目的是要排除杂质, 而能量校正的目的是要使量能器能量响应的峰值恰好在束流能量上. 纯度检验可用 E_B-E_H 散点图来完成, 能量校正则要复杂一些. 下面先讨论电子, 其次 π .

(1) 电子

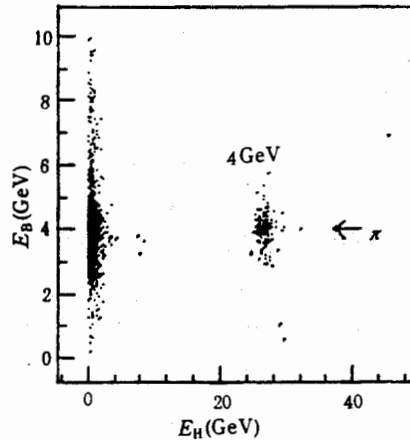


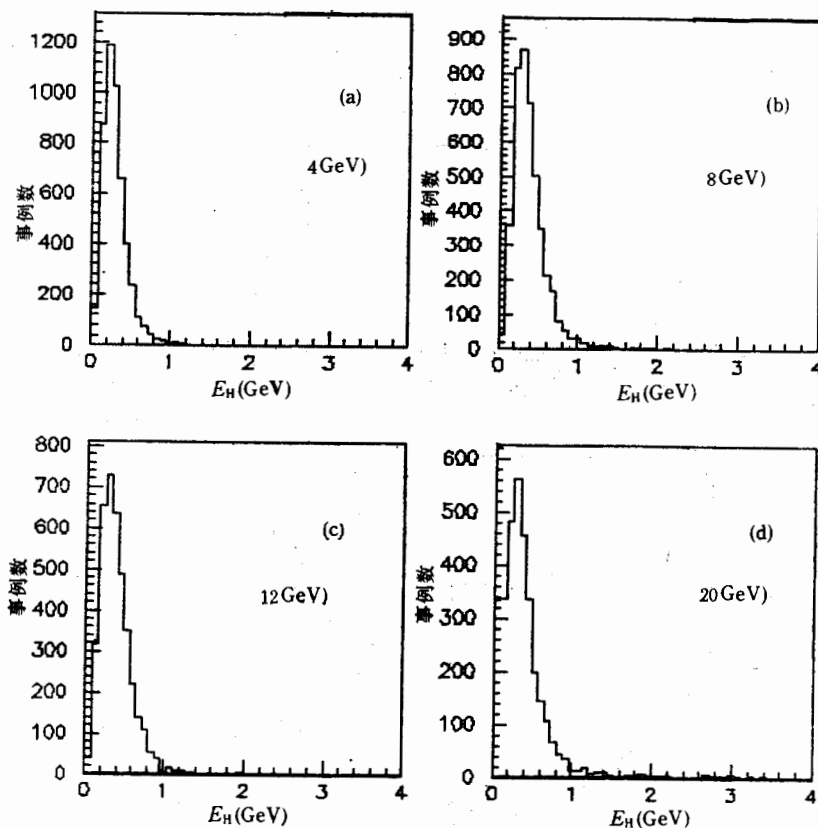
图1 4 GeV 电子的纯度检验

图1表示 4 GeV 电子的 E_B-E_H 散点图. E_B 为 BGO 的能量输出, E_H 为强子量能器的能量输出. 对真正的电子, E_H 都很小, E_H 大的一小堆是 π , 这些 π 应该在分析中扣掉.

如前所述, BGO 和强子量能器已在这次测试之前分别进行了束流测试和刻度. BGO 是以电子束刻度的, 强子量能器则以 π 束刻度. 一般地, 电子的测量能量可由下式计算:

$$E^e = G_B^e \cdot C_B \cdot E_B + G_H^e \cdot C_H \cdot E_H, \quad (3)$$

式中, E_B, E_H 都是由原束流测试刻度的, 由于条件不完全相同, 因此需要一个修正, C_B, C_H 即为修正因子. G_B 和 G_H 是几何因子. 由于 BGO 是由电子刻度的, 因此 $G_B^e = 1$,

图 2 电子的 E_H 分布

而强子量能器由 π 刻度,一般地 $G_H^c < 1$. 能量修正的目的就是要确定 C_B, C_H .

图 2 表示电子在强子量能器中的能量响应。可以看到电子在强子量能器中的能量沉积并未因束流能量的提高而增大。图 3 表示电子的 R_f 分布, $R_f = E_f/E_{tot}$, 其中 E_f 是强子量能器中前二层的能量输出, E_{tot} 则是强子量能器的总能量。可以看到不同能量的 R_f 分布是一致的,绝大多数事例都在 $R_f = 0$ 附近, $\langle R_f \rangle < 0.2$. 从图 2 和图 3 可以推断,对于 4—20 GeV 的电子,强子量能器的能量输出来源于 U^{238} 的放射性,称之为铀噪音,因此不应计入电子的能量,即在 (3) 式中 $E_H = 0$, 从而

$$E^c = G_B^c \cdot C_B \cdot E_B = C_B \cdot E_B.$$

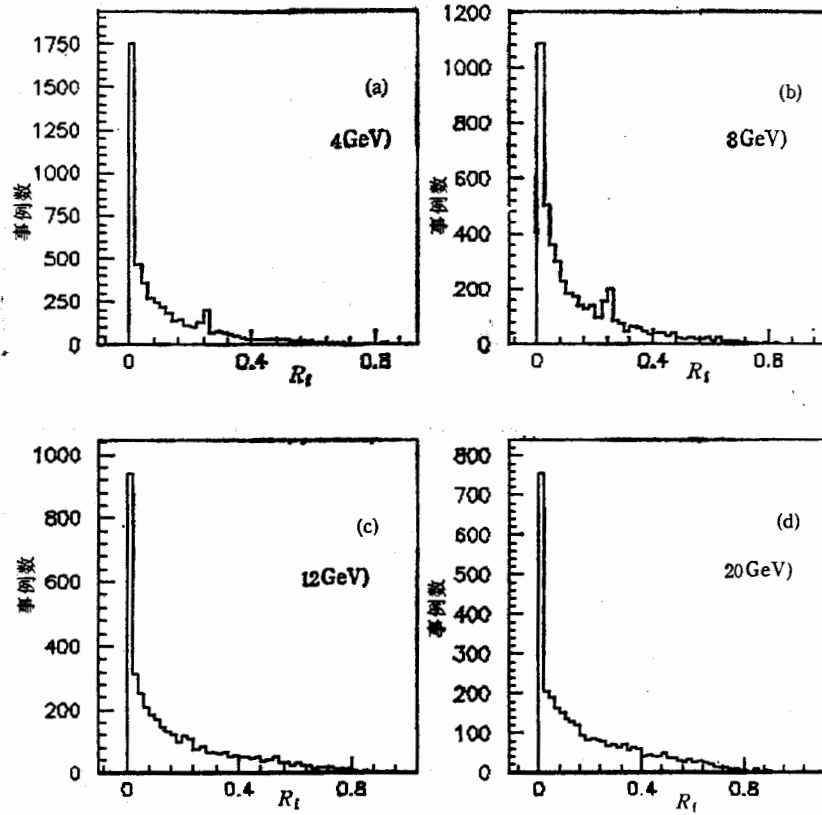
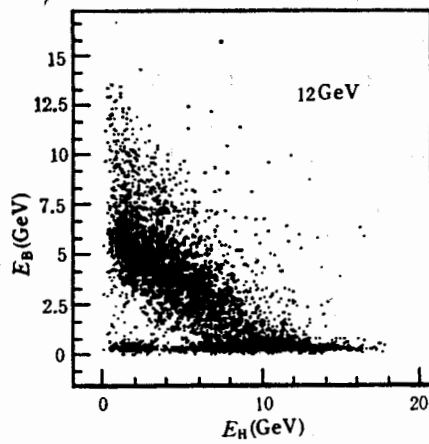
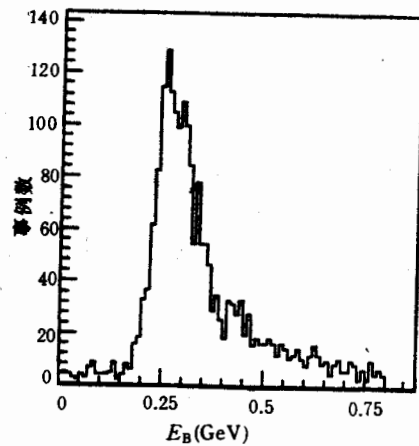
令:

$$E_{Beam} = E^c,$$

则可得 C_B . 调整 C_B , 使得 E^c 的峰在束流能量上。这实际上是对 E_B 重新进行刻度。下文中的 E_B 都是指经过校正的。

(2) π

图 4 是 12 GeV π 的 E_B-E_H 散点图。可以看到,在底部,即 BGO 能量很小的区域有密集的事例分布。对于 π , 这样的分布是正常的。对于 4 个能量的 π 都看不出有明显

图3 电子的 R_f 分布图4 12 GeV π 的纯度检验图5 12 GeV π 的 E_B 分布 ($E_B < 0.8 \text{ GeV}$)

的杂质混入。

图5是图4中底部 ($E_B < 0.8 \text{ GeV}$) 事例的 E_B 分布。峰值在 $E_B = 0.26 \text{ GeV}$ 上。已知一个最小电离粒子穿过 BGO 的电离能损为 0.21 GeV ，乘以相对论上升因子 1.3，

为 0.288 GeV. 由此可以推断, 这些 π 在 BGO 中没有产生簇射, 只留下电离能损. 所有这些穿过 BGO, 没有簇射开的事例称为“BGO 无簇射事例”. 图 6 则是由这些事例引起的强子量能器能量输出 E_H 的分布. 由图可见, 这些事例的 E_H 分布有两个峰. 大峰意味着绝大多数这样的 π 在强子量能器中产生簇射, 入射能量也在其中全部消耗. 小峰意味着有少量这样的 π 穿过强子量能器, 没发生簇射, 只留下电离能损. 这些小峰中的事例被称为“直穿”(sailing through) 事例.

图 6 中大峰事例可以被用来作强子量能器的能量校正. 因为这些事例在 BGO 中只留下电离能损, 且在强子量能器中簇射, 能量没有泄漏:

$$E_{\text{beam}} = E_{\pi}, \quad (4)$$

$$E_{\pi} = G_B \cdot E_B + G_H \cdot C_H \cdot E_H. \quad (5)$$

(5) 式中 E_B 已得到了校正. 由于这些事例在 BGO 中只留下电离能量, 因而 E_B 是电离性质的, 所以 $G_B = 1$, 又因 E_H 由 π 刻度, 所以 $G_H = 1$, 于是

$$E_{\text{beam}} = E_B + C_H \cdot E_H.$$

由此可见, 只要调整 C_H , 使得 E_{π} 的峰值在 E_{beam} 上, 即可对 E_H 进行校正. 图 6 是校正后的 E_H 分布.

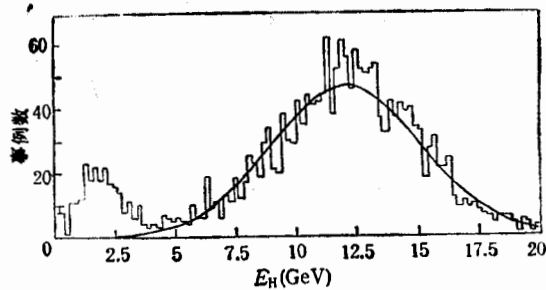


图 6 12 GeV π 的 E_H 分布 ($E_B < 0.8 \text{ GeV}$)

三、 e/π 分辨的方法及结果

(1) R_9 的比较

$R_9 = E_9/E_{25}$. 这个量来自于电磁量能器. 如果有带电粒子击中某块晶体而产生簇

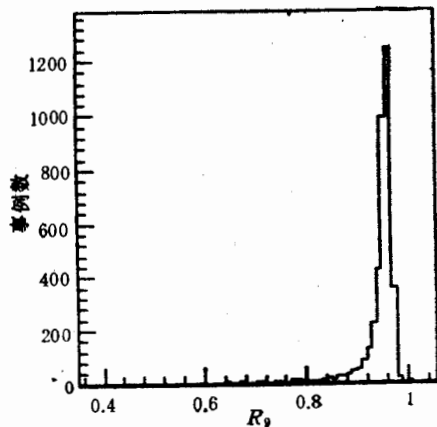


图 7 12 GeV 电子的 R_9 分布

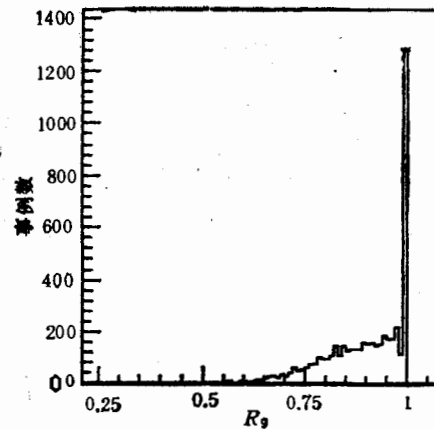


图 8 12 GeV π 的 R_9 分布

射,则往往这块晶体能输出最高的能量,边上几块晶体次之,从而形成了能量在空间分布上的一个峰——簇射峰。 E_9 就是具有最大能量输出的晶体及周围8块晶体输出能量之和。同样 E_{25} 是环绕最大输出晶体的25块晶体的能量之和。 R_9 反映了BGO簇射的横向分布。在分析中,程序先寻找具有最大能量输出的BGO晶体,然后按定义算出 E_9 和 E_{25} 。

图7和图8分别为12 GeV的 e 和 π 的 R_9 分布。电子的峰值在0.94上,一般都大于0.90,但 π 的分布较宽,而且约有1/3事例的 $R_9=1$,实际上这些是BGO无簇射事例,着火的晶体只有一两块,自然 $R_9=1$ 。

由此可见用 R_9 是不能区分 e/π 的。

(2) R_B 的比较

$R_B = E_B / (E_B + E_H)$ 。图9为12 GeV电子和 π 的 R_B 分布,从中看到,相互交叉的区域很小,因此 R_B 是一个较好的区分标准。

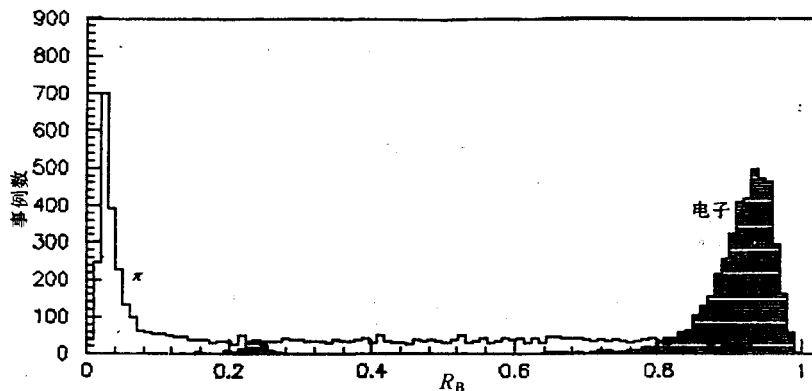


图9 12 GeV 电子和 π 的 R_B 分布

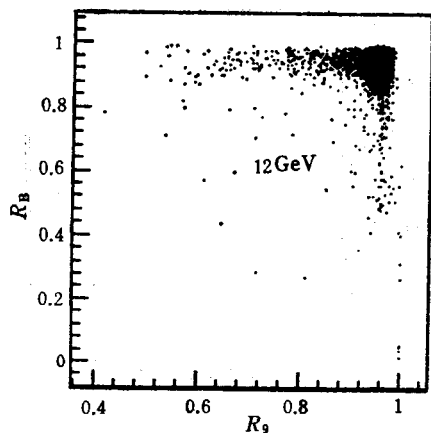


图10 12 GeV 电子的 R_B-R_9 散点图

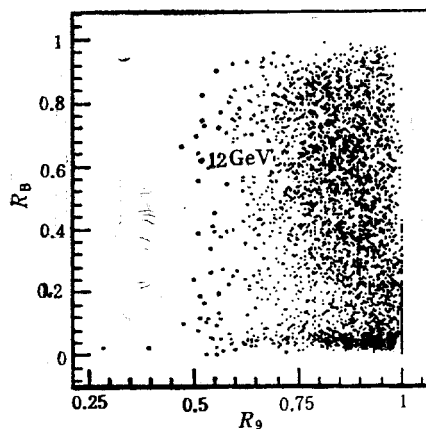


图11 12 GeV π 的 R_B-R_9 散点图

(3) R_B 和 R_9 的关系

仔细的研究发现, R_B 和 R_9 具有互补性。从图 9 知, 有一些 π 的 R_B 也很大, 即在 BGO 中沉积的能量很高, 若光用 R_B 来判别则容易被误判成 e 。但是这些 π 事例由于在 BGO 中沉积了很高能量, 其簇射的横向分布则比电子大, 因而可由 R_9 区分之。反之, 对 $R_9 = 1$ 的 π , 不能用 R_9 来区分, 但由于这些 π 在 BGO 中只留下电离能量, 因而可由 R_B 区分之。图 10 表示 12 GeV e 的 R_B - R_9 散点图, 而图 11 则为 12 GeV π 对应的散点图。可以看到, 对于 e , 事例都集中在 $R_B \approx 1$, $R_9 \approx 1$ 的区域, 而 π 的分布很广, 而且在 $R_B \approx 1$, $R_9 \approx 1$ 的区域上分布较疏。

如果使用“cut”, 即: $R_B > 0.86$ 或 $R_B > 0.60$ 且 $R_9 > 0.94$ 时为电子, 否则为 π , 则可以得到表 1 所示的结果。由于这个“cut”在 R_B - R_9 散点图上形状如钥匙, 因而被称为“key cut”。

表 1

能量 (GeV)	粒 子	效率 (%)
4	π	91.3
	e	97.8
8	π	92.3
	e	91.9
12	π	93.0
	e	97.7
20	π	94.1
	e	98.9

从表 1 中看到, “key cut” 在 高能区域的效果比低能区域好。

(4) 动量和 BGO 能量的关系

在束流测试中, 动量被非常精确地测出, 但在具体的 L3 实验中, 动量依靠漂移室测出, 具有一定的测量误差。在本文的分析中, 使用 Monte Carlo 方法对动量值进行抽样, 动量分辨此设计指标要大一些:

$$\Delta p = 2\% p^2 + 1\% p,$$

这样对 $p = 20\text{GeV}$, $\Delta p = 8.2\text{GeV}$ 。

对于能量是几个 GeV 以上的 e 和 π , 质量相比于动量可以忽略, 于是在自然单位制中, $p = E$ 。对于电子, 特别是低能的电子, 能量都沉积在 BGO 中, 因此, $p_{\text{TEC}} = E_B$, 其中 p_{TEC} 为漂移室测出的动量。研究中发现, 由于 p_{TEC} 和 E_B 都有其测量误差, 用 $p_{\text{TEC}} - E_B$ 作为区分 e/π 的手段结果不理想。因此要识别将能量都沉积在 BGO 中的 π , 还须寻找别的方法。

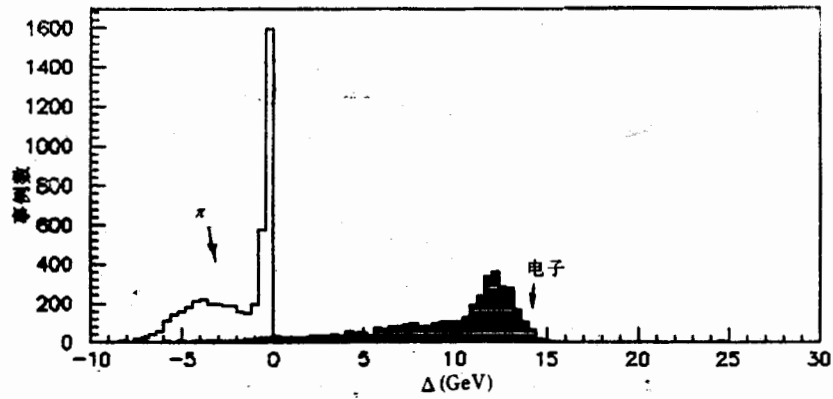
图 12 12 GeV 电子和 π 的 Δ 分布

表 2

能量 GeV	粒 子	效率(%)
4	π	96.3
	e	97.3
8	π	95.1
	e	98.8
12	π	91.2
	e	95.0
20	π	92.2
	e	87.2

如果定义

$$\Delta = |2E_B - p_{TBC}| - |E_B - p_{TBC}|,$$

则 12 GeV 的 e 和 π 的分布如图 12 所示,在这个图中, e 和 π 基本分开。对于 e, $\Delta > 0$, π 则反之。这个“cut”被称为“ Δ cut”,由此可以得到表 2 的结果。从表中可见,这个“cut”对低能区域更有利。

四、结 果

从以上的讨论中,不难得到 e/ π 分辨的方案:

对于 $(E_H + E_B) > 10$ GeV, 满足“key cut”的为 e, 否则为 π 。

对于 $(E_B + E_H) < 10$ GeV, 满足“ Δ cut”的为 e, 否则为 π 。

使用这个方案,对于 4 个能量的 e、 π 粒子分别检验了约 5000 个事例,得到的结果如表 3。

表 3

能量 (GeV)	粒子	效率(%)
4	π	95.7
	e	97.3
8	π	95.3
	e	94.7
12	π	93.7
	e	96.8
20	π	94.9
	e	99.3

五、讨 论

由表 3 可见,在 4—20 GeV 能量区域内, e/π 分辨都在 93.7% 以上,不很完美,但是可以接受。对于实际事例,能量区域更大,另外,在真实事例的数据处理中还有一些细微的不同之处,因此不能武断地说,这些“cut”可以放心地用于真实事例的处理中。但是束流测试中的 e 和 π 与 L3 实验中出现的 e 和 π 必然遵循相同的规律,“key cut”和“ Δ cut”必将是有效的区分手段,只不过要用大量的真实事例做离线刻度,以确定具体的“cut”值。

参 考 文 献

- [1] 童国梁等人,高能物理与核物理, 15 (1991), 865.
- [2] A. Arefiev et al., Proportional Chamber For Barrel Hadron Calorimeter of the L3 Experiment, to be published.
- [3] H. S. Chen, NIM, A256(1987), 261.
- [4] J. A. Bakken et al., NIM, A254(1987), 535.
- [5] C. Chen et al., NIM, A272 (1988), 713.

e/π Separation analysis from L3 Calorimeter Beam Test

CHEN GUOMING CHEN HESHENG JIN BINGNIAN TANG XIAOWEI TONG

GUOLIANG WU YIGEN ZHONG CHONGCHANG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)

ABSTRACT

The L3 calorimeter beam test data were analyzed. An e/π separation scheme including “key cut” and “ Δ cut” is suggested. We show that, using the scheme, in the energy range 4–20 GeV, e/π separation is better than 93.7%.