

配有 BGO 晶体阵列的 L3 强子 量能器性能的模拟测试

吴义根 陈国明 陈和生
张守宇 唐孝威 童国梁

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

M. Bocciolini C. Civinini R. D'alessandro M. Meschini

M. Pieri P. Spillantini 王贻芳

(意大利佛罗伦萨大学物理系)

H. Hofer P. LeCoultre B. Spiess J. Ulbricht

(瑞士苏黎世高等工业大学)

摘 要

本文介绍了配有 BGO (锗酸铋) 晶体阵列的 L3 铀强子量能器性能的模拟测试。对 L3 强子量能器以及测试实验作了简要介绍, 并给出了该量能器对 4—20GeV 能量范围的 π 介子的能量分辨率、 e/π 响应比、角分辨、能量分辨率随入射 π 介子方向的变化以及强子穿透率等实验结果。

一、引 言

L3 谱仪中的量能器用于欧洲核子中心 (CERN) 的 LEP 正负电子对撞机上, 它由 BGO 电磁量能器和铀强子量能器组成。L3 量能器的用途是: 1) 测量强子簇射的能量, 2) 与 μ 子过滤器一起, 吸收除了 μ 子以外的所有其它粒子。

我们已经报告过铀量能器特性测量的实验结果^[1-3]。1987 年秋, 为了进一步研究 L3 量能器对强子探测的性能, 又对强子量能器桶部进行了模拟测试, 本文报告测试的结果。

二、用于模拟测试的 L3 量能器探测装置

L3 强子量能器由三部分组成: 中央桶部 (HB)、端盖 (HC) 以及围绕桶部的 μ 子过滤器 (MF)。L3 强子量能器桶部在沿 LEP 的正负电子束的方向上分成九个环, 中央三个环为长模块, 其余为短模块, 每个环均由十六个模块围成^[4]。

长模块由一块不锈钢板、58块5mm厚的铀板和60个平面丝室组成；短模块由51块5mm厚的铀板和53层平面丝室组成。相邻层丝室阳极丝的方向互相垂直，阳极丝与正、负电子束流平行的多丝室称为“ ϕ ”室，这些室用来测定 e^+e^- 反应后产生的终态粒子的方位角 ϕ ；阳极丝与正负电子束流方向垂直的室称为“ z ”室，它们用来决定终态粒子的 z 坐标（正电子束方向定义为 z 轴方向， e^+e^- 对撞中心处取作 $z=0$ ），于是由对撞中心以及“ z ”室测得的 z 坐标，便可以确定终态粒子相对于 z 轴的方向。铀吸收板和平面丝室放置在气密的不锈钢罩内，钢罩内还包括讯号、高压和气体系统。丝室工作在正比模式。第一个丝室前放置4cm厚的不锈钢板，正比室由紧挨的截面为 $5 \times 10\text{mm}^2$ ，管壁厚为0.3mm黄铜管组成，铜管中央布以直径为 $50\mu\text{m}$ 的镀金钨丝作为阳极丝。 ^{238}U 的天然放射性会在丝室中产生本底，因此用0.7mm厚的黄铜片把丝室的灵敏体积与铀板隔开以达到部分屏蔽的目的。丝室的工作气体由80%的Ar和20%的 CO_2 组成。模块读出道的数目由于对丝室丝的合并编组而大大减少。编组的设计是通过强子事例的蒙特卡罗模拟计算以及技术考虑得出的，编组在同一道输出的铜管组呈塔形，故也称这些输出道为“塔”。HB的长模块计有2763根丝，编组成180个塔输出，沿着 R 方向分成10个塔层，而沿 ϕ 和 z 投影方向分为9组；短模块的2490根丝编组成144个塔输出，沿 R 方向分成8个塔层，沿 ϕ 和 z 投影方向也分为9组。图1给出了长模块丝的编组。每塔输出电子学由一个预放

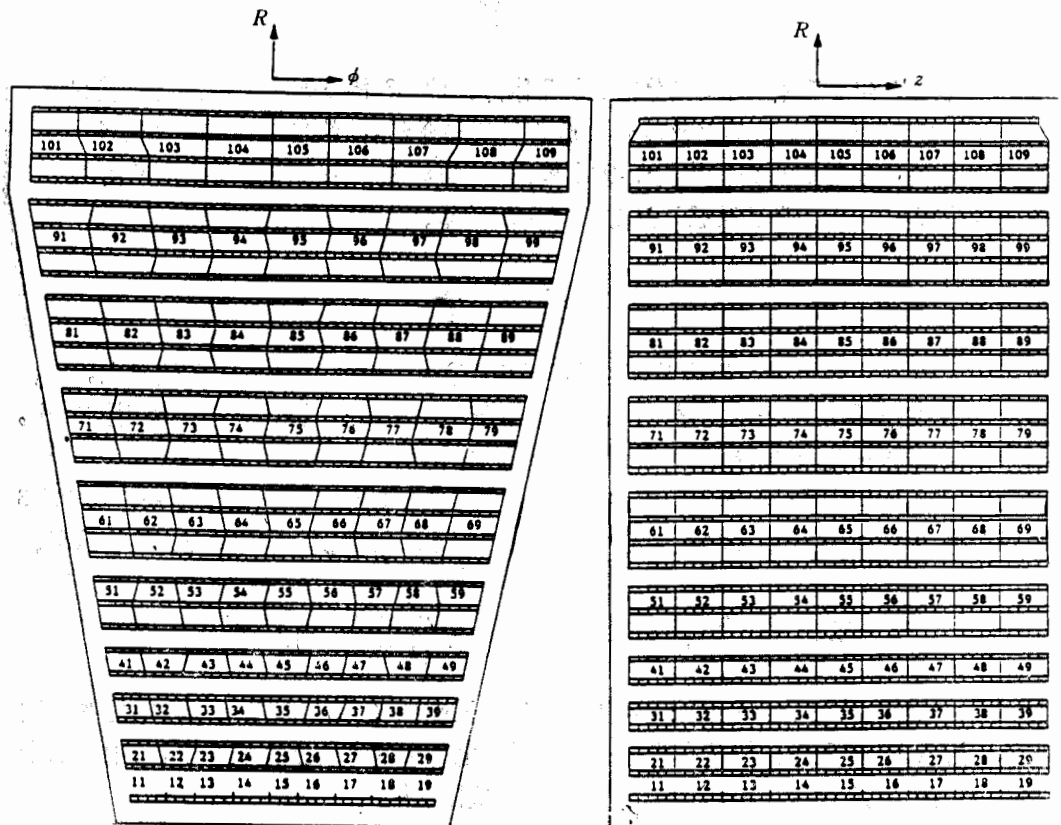


图1 长模块丝的编组，(a) ϕ 投影 (b) z 投影

大器、40 米长电缆、接收网络以及一个充电积分 ADC 组成,ADC 选用 96 道的 Le Croy 1882,灵敏度为每道 50fC,事例触发后经 ADC 数字化,最后送到 VAX 在线机上记录。

本实验使用的探测装置除了上面介绍的强子量能器模块外还包括分别在其前后放置的 BGO 晶体阵列和 μ 子过滤器。BGO 晶体阵列放在强子量能器模块前面,它是由 10×10 根 BGO 晶体组成,每块 BGO 晶体是前后端截面分别为 $2 \times 2\text{cm}^2$ 和 $3 \times 3\text{cm}^2$ 的四棱台,具有 22 个辐射长度(或 0.93 个 π 介子作用长度)。BGO 晶体表面进行了打毛处理并包以镀铝薄膜以达到闪烁光收集的均匀性^[1]。闪烁光用胶合在晶体底面的硅光电二极管收集。

试验束实验所使用的 μ 子过滤器放在强子量能器后 1 米的地方,它由 5 层横截面为 $8.4 \times 5\text{mm}^2$ 的黄铜计数管组成,这些管子平行于 z 轴,并在各层之间插入 1cm 厚的黄铜吸收体。逐管读出讯号(被击中的管子可以给出离对撞点的距离以及方位角 ϕ)。这些讯号可用来与 μ 子过滤器后面放置的 μ 漂移室中候选的 μ 子径迹匹配。

三、试验束实验安排

CERN SPS 的 X3 束线是用 210GeV 的质子轰击铍靶提供能量在 2—50GeV 范围内可调、粒子种类可选择的次级 π , μ 子和电子束流。在 4—20GeV 能量范围内,束流动量分散度 $\Delta p/p$ 小于 1%。X3 束流由两个闪烁计数器 S_1 和 S_2 选定,多丝室 W_1 和 W_2 用来确定束流粒子的轨迹,两个阈式契伦柯夫计数器 \check{C}_1 和 \check{C}_2 用于选择电子,铁吸收体后面的闪烁计数器 S_3 则用于选择 μ 子的触发,试验束实验的安排见图 2。

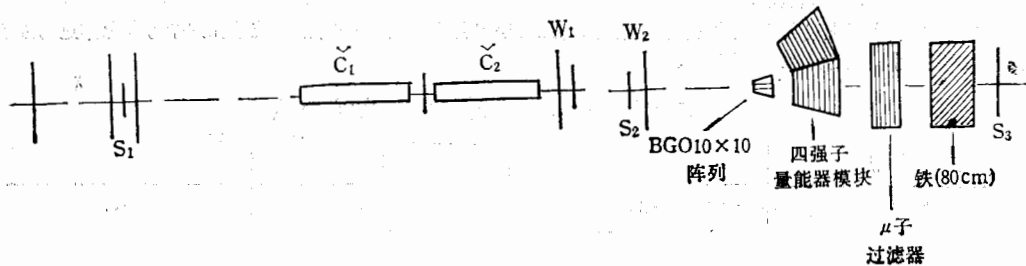


图2 试验束实验的安排

本实验中用来模拟 e^+e^- 对撞所产生的次级强子的测试束(π 束)的方向是固定的,四个强子量能器模块(二排二列)安置在一个专门设计的转台上,这个转台可以在水平和垂直两个方向上移动和转动,于是通过在转台放置三种不同的量能器模块的组合:即四个长模块(图 3 中的 *1,*2,*3 和 *4)、两个长模块两个短模块(图 3 中的 *3,*4,*5 和 *6)以及四个短模块(*5,*6,*7 和 *8)就可以模拟研究 L3 强子量能器桶部对次级粒子的探测。图 3 展示了本实验所模拟的 L3 量能器桶部的各个入射点,图上 1, 2, 3, ..., 11 各列和 A,B,C 各排分别对应了次级粒子不同的入射方向。表 1 给出了 A 排上各列的 θ 值;表 2 给出 A、B 和 C 各排的 ϕ 值。

实际的 L3 实验中,由 e^+e^- 对撞中心入射到第 9 列的粒子已打到 L3 BGO 桶部的

边缘,而对于第10和11入射列,入射粒子已在L3 BGO桶部以外,本实验也模拟了这些情况。

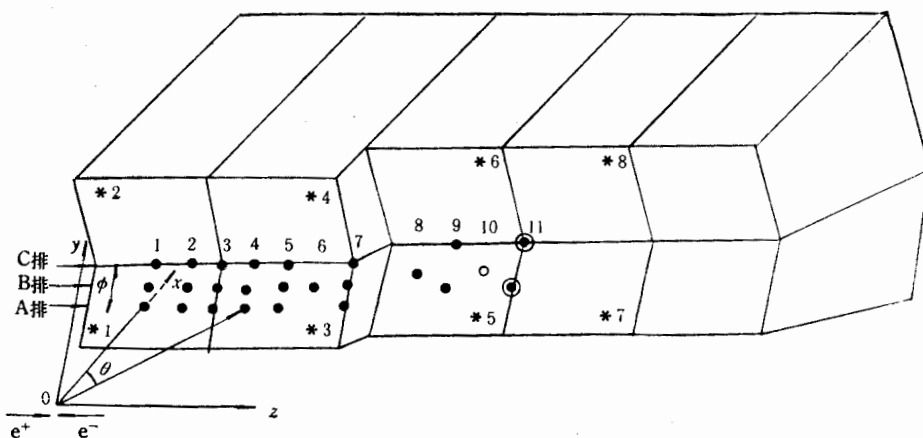


图3 实验模拟的各入射点总貌。图上带*的编号(例如*1,*2,...,*8)为模块号;
不带*的编号(例如1,2,...,11)为入射点
● 4,8,12,20GeV π 介子束 ○ 4,8GeV π 介子束 ⊙ 4,8,12GeV π 介子束

表1 对应于图3上各入射点的 θ 值

入射点 (A排)	1	2	3	4	5	6	7*	8	9	10	11
$\theta(^{\circ})$	0.0	8.6	16.6	20.6	30.4	35.5	39.0	42.4	45.8	49.3	51.6

* 第7入射点实际上没有用,因为利用两长两短的四模块组合模拟这一入射点时,粒子在这个方向上穿过的强子量能器的厚度太小,与实际情况相差较大。

表2 对应于A、B和C各排入射点的方位角 ϕ 值

入射点	A	B	C
$\phi(^{\circ})$	-2.3	4.6	9.7

四、标 定

强子量能器模块各塔读出道的台阶值由加上高压后的随机触发记数确定。我们取各塔台阶谱峰值一半以上的各道的平均值作为该塔的台阶值。随机触发谱的后尾部对应于铀放射性讯号。分析发现,每个模块每次触发中铀噪声的平均值对应于0.25GeV的强子能量。由于本实验中采用四模块组合,所以铀噪声总共造成1.0GeV的本底,在能量分析中,这部分本底需要扣除。

实验期间,模块中的所有塔均用动量为20GeV/c的 μ 子进行扫描,通过分析 μ 子数据,得出了各塔之间的内部标定常数。为了使 μ 子谱与台阶谱拉开,在 μ 子扫描时所取的高压(-1700V)比通常的强子实验所取的高压(-1550V)高。各塔的最小电离粒子响应

(mip)定义为 μ 子谱峰值一半以上的各道的平均值除以该塔的丝平面数。测量表明,强子模块各塔 mip 的平均值为 29.5ADC 道。各塔的内部标定常数定义为该塔 mip 的 ADC 道数除以整个模拟的平均 mip 值。

天然 ^{238}U 的 γ 射线在每个塔中产生本底讯号,这些讯号也被用来作各塔之间的内部标定。

为了减少由于那些没有真正能量沉积的塔引入的涨落以求改善能量分辨率,在对各塔 ADC 求和时,不计及那些 ADC 道数与该塔台阶值之差小于台阶分布的两倍标准偏差的塔。

分析表明,用 μ 子扫描和铀的放射性两种不同的内部标定方法对能量分辨率的影响可以忽略(约为 1%—1.5%)。

每块 BGO 晶体精确的台阶值和增益用于计算在 BGO 中的沉积能量。BGO 晶体的标定已在参考文献[5]中描述过了。

五、测试结果

1. 能量分辨率

一般来讲, π 介子的沉积能量包括两部分,即在 BGO 晶体阵列中沉积的能量和在强子量能器中沉积的能量。事例的总能量 E_{tot} 可以表示为

$$E_{\text{tot}} = G_b E_b + G_h E_h, \quad (1)$$

式中 E_b 为在 BGO 中测得的并以电子束标定的能量, E_h 为四个强子量能器模块中测得的而以 μ 子标定的能量。式(1)中的两个被称为几何因子的参数 G_b 和 G_h 通过对下列(类似的) χ^2 函数取极小求得:

$$\chi^2(G_b, G_h) = \sum_i (E_{b, \text{beam}} - E_{\text{tot}, i})^2 / \epsilon^2, \quad (2)$$

式中, $\epsilon^2 = \sqrt{E_{b, \text{beam}} E_{\text{tot}}}$, $E_{b, \text{beam}}$ 表示束流能量, 求和是对样本中的所有事例作出的, $E_{b, \text{beam}}$ 和 E_{tot} 的单位为 GeV。和在文章[3]中的约定一样,能量分辨定义为总能量分布半高全宽 FWHM/2.36。

表 3 列出了实验测得的四个长模块组合时入射到 A-1 点(即图 3A 排第 1 点)的 4、8、12 和 20GeV 的 π 介子的能量分辨率和几何因子 G_b 和 G_h , 这些结果是通过式(2)的拟合得出的,与文献[3]一致。

表 3 能量分辨率和几何因子

束流能量 (GeV)	分辨率 (%)	G_b	G_h
4	31.4 ± 3.0	1.52 ± 0.15	1.95 ± 0.20
8	24.0 ± 2.7	1.64 ± 0.16	1.85 ± 0.19
12	21.0 ± 2.3	1.42 ± 0.14	1.93 ± 0.19
20	19.7 ± 2.0	1.48 ± 0.15	2.28 ± 0.23

表 3 中能量分辨率的误差主要来自系统的不确定性: 1) 在计算 E_h 时, 各塔内部标

定常数的不确定性;2) G_b 和 G_h 的误差 ($\sim 10\%$ 左右); 3) BGO 阵列内部标定的不确定性。由统计引入的误差并不重要(这方面的贡献小于 0.5%)。

表 3 中各种能量下的能量分辨率也可拟合如下式表示:

$$\Delta E/E = \left[\frac{(42.3 \pm 5.0)\%}{\sqrt{E}} + (9.6 \pm 2.0)\% \right], \quad (3)$$

式中, ΔE 和 E 均以 GeV 为单位。拟合的结果展示于图 4。式(3)中的常数项来源于电磁量能器 (BGO 阵列) 和强子量能器对粒子的响应有显著差别^[6], BGO 晶体有较大的 e/π 比 (见下面介绍), 而铀气体取样强子量能器对强子簇射中消耗的能量得不到完全的补偿。

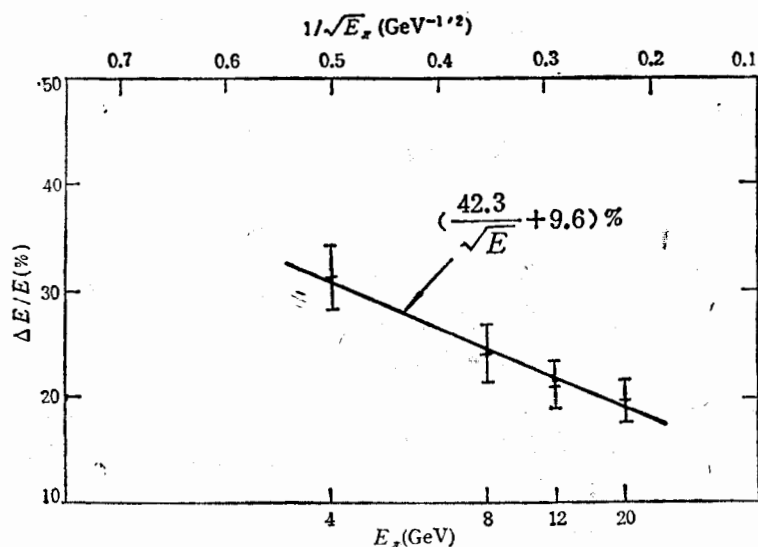


图 4 π 介子的能量分辨率

2. 能量分辨率随入射粒子方向的变化

本实验模拟了 4, 8, 12 和 20 GeV π 介子从 L3 实验的 e^+e^- 对撞点以不同的方向入射到 L3 量能器桶部情况。

图 5 展示了对以不同方向入射的 π 介子的能量分辨率。可以看到能量分辨率随着入射角 θ (见图 3) 的增加而变坏。这个结果可以归因为取样效应^[7], 因为对最小电离粒子取样单元中的能量损失按 $1/\cos\theta$ 变化。

3. L3 强子量能器模块的 (e/π) 比

强子量能器模块对电子和 π 介子的响应比分别用人射到模块(这时模块前不放 BGO 晶体阵列)的 10 GeV 能量的电子束和 π 介子束测得。测量结果:

$$e/\pi = 1.2 \pm 0.1, \quad (4)$$

式中, e/π 是指对电子和 π 介子响应的平均值之比。图 6 展示了强子量能器模块对 10

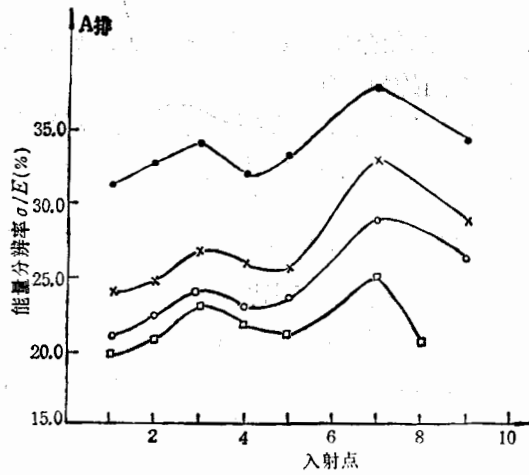


图 5 能量分辨率随入射粒子方向的变化

● 4GeV × 8GeV ○ 12GeV □ 20GeV

GeV 的电子和 π 介子的响应, 实线是对电子的响应, 虚线是对 π 介子的响应。

4. 角度分辨

强子在量能器模块中发生簇射并把能量沉积在模块的每一塔层中。由 ϕ 室和 z 室每一塔层的能量重心, 可以分别计算出强子入射的 ϕ 和 θ 方向, 例如:

$$\phi = \frac{\sum_i [\phi_i \cdot E_i]}{\sum_i E_i}, \quad (5)$$

式中, ϕ_i 表示量能器模块 ϕ 室的第 i 个塔层所决定的 ϕ 方向, E_i 为在该塔

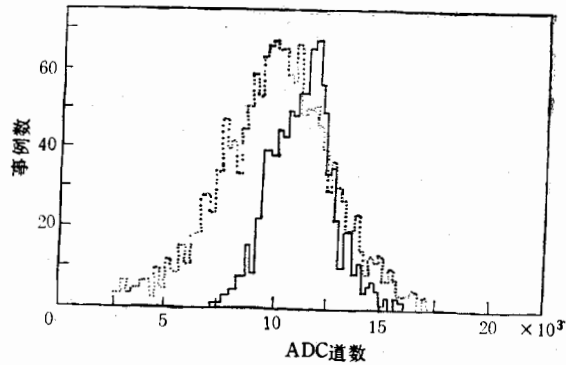


图 6 强子量能器模块对 10GeV 电子和 π 介子的响应。

层中沉积的能量。入射的 θ 角可由相同的方法利用 z 室中的沉积能量的分布求出。每一轮实验有几千事例, 由上述方法计算得到的 ϕ 和 θ 的分布即可得到强子量能器模块的角

表 4 强子量能器对 π 的角分辨($^\circ$)

束流能量 (GeV)		入 射 点									
		1		3		5		9		11	
8	C 排			2.8	3.6	3.2	3.1	2.7	2.8	2.4	2.5
	A 排	2.7	2.8	3.3	2.8	3.4	3.1	2.7	1.8	2.2	1.7
12	C 排	2.3	2.3	2.3	1.9	3.1	2.5	3.1	3.3	1.8	2.0
	A 排	1.8	1.5	2.7	1.5	2.4	2.0	2.3	1.8	1.7	1.5
20	C 排					2.4	3.1	1.9	2.3		
	A 排	1.5	1.8			2.2	2.3	3.3	2.0		

分辨。

表4展示了不同入射方向的角分辨。表中每一入射方向对应于两个数：第一个为 ϕ 方向的角分辨，第二个为 θ 方向的角分辨。

量能器对上述能量的 π 介子的角分辨为 2° 左右，由表4还可以看出，对大的 θ 角分辨较好，因为那个方向上强子量能器模块前面没有BGO晶体。

5. 强子穿透 (Punch through) 和径迹穿透 (Track through)

“穿透”^[8]通常定义为至少有一个粒子到达探测器一定深度的事例的百分比。这些穿透粒子包括强子簇射的泄漏，衰变产物， δ -射线，韧致辐射以及穿过探测器时没有发生强相互作用的强子。有时，强子穿透在 μ 子过滤器中产生一条单径迹，这样的强子穿透称为径迹穿透。径迹穿透可以造成 μ 子漂移室的本底。

图7展示了在HB和MF中测得的强子穿透几率的分布。图上，每种能量的前6个点对应于HB的最后6个塔层深度测得的穿透几率。在测量中，要求在对应的 ϕ 塔层与 z 塔层（组成这一对 ϕ 和 z 塔层的丝室互相交叉，见图1）中沉积能量能互相匹配。通过这个要求来排除铀噪音本底。

图7展示了在HB和MF中测得的强子穿透几率的分布。图上，每种能量的前6个点对应于HB的最后6个塔层深度测得的穿透几率。在测量中，要求在对应的 ϕ 塔层与 z 塔层（组成这一对 ϕ 和 z 塔层的丝室互相交叉，见图1）中沉积能量能互相匹配。通过这个要求来排除铀噪音本底。图上每种能量的最后两点对应于MF的第2和第5层。ALEPH谱仪也得到了类似的结果^[9]。

图8为径迹穿透的测量结果。该图展示了在MF中具有一条清晰径迹的事例的几率。这里在MF中的“径迹”定义为MF的5个平面中有4个或5个着火点，并且这些着火点都沿着同一条直线。

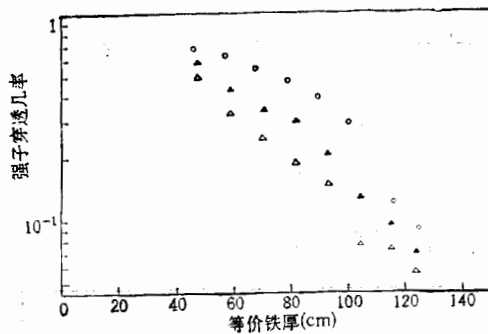


图7 L3量能器的强子穿透率随深度的变化
○ 20 GeV ▲ 12 GeV △ 8 GeV

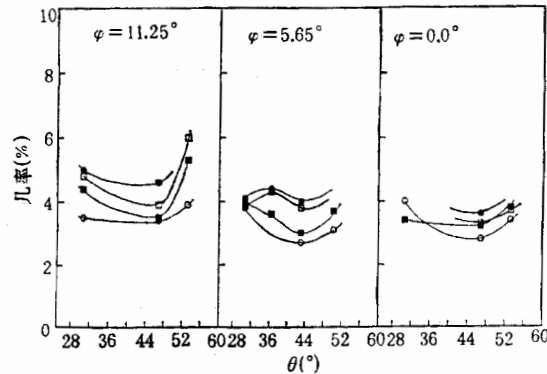


图8 在 μ 子过滤器(MF)中发现一条径迹的几率
● 20 GeV □ 12 GeV ■ 8 GeV ○ 4 GeV

六、结 论

配有 10×10 BGO 晶体阵列的四模块 L3 量能器对 4—20 GeV 能量范围的 π 介子的能量分辨率为 $[(42.3 \pm 5.0)/\sqrt{E} + (9.6 \pm 2.0)]\%$, 角分辨为 2° 左右。强子量能器模块的 e/π 比为 1.2 ± 0.1 , 这些性能达到了 L3 实验对强子能流测量的要求。实验还展示 π 介子的能量分辨率随入射角 θ 的增大而缓慢变坏, 这来源于强子量能器的取样效应。

在包括 μ 子过滤器 (MF) 的整个量能器系统中, 强子穿透随着能量的增加而变大在实验的能量范围内, 强子穿透在 4% 到 7% 之间, 其中的一半多为径迹穿透。

实验所使用的试验束是由 CERN 的试验束组提供的, 10×10 BGO 晶体阵列是由 L3 实验的 BGO 组提供的, 这里对他们的支持与合作谨致谢意。同时也感谢 ITEP 组、Michigan 组和 PSI 组在实验中所给予的合作, 感谢朱国义、徐鸿章和许国发同志参加实验测量工作。同时对长期以来对我们的工作一直支持与合作的高能所计算中心, 深表谢意。

最后感谢丁肇中先生对我们的支持。

参 考 文 献

- [1] F. Celletti et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A225**(1984), 493.
- [2] A. Arefiev et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A245**(1986), 71.
Yu. Galaktionov et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A251**(1986), 258.
- [3] C. Chen et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A272**(1988), 713—721.
- [4] L3 collaboration, The construction of L3 experiment. *Nucl. Instr. and Meth.*, **A289**(1990), 35—102.
- [5] J. A. Bakken et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A254**(1987), 535.
- [6] M. De Palma, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A277**(1989), 68;
G. Bagliesi et al., CERN-EP/89—63;
C. Y. Chang et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A264**(1988), 194.
- [7] C. W. Fabjan, Calorimeter in High Energy Physics, CERN-EP/85—54.
- [8] A. Grant, *Nucl. Instr. and Meth.*, **131**(1975), 167;
T. Gabriel, *Nucl. Instr. and Meth.*, **155**(1978), 81.
A. Bodek, Preprint UR911, 1985. Talk at 1985 SSC meeting.
- [9] R. Albrizio, et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A271**(1988), 449.

The Measurement of the Performance of L3 Hadron Calorimeter With BGO

CHEN GUOMING CHEN HESHENG TANG XIAOWEI TONG GUOLIANG
WU YIGEN ZHANG SHOUYU

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

M. BOCCIOLINI C. CIVININI R. D'ALESSANDRO M. MESCHINI M. PIERI
P. SPILLANTINI WANG YIFANG

*(Istituto Nazionale Di Fisica Nucleare, Sezione Di Firenze Di Dipartimento
Di Fisica Dell 'Universita' Di Firenze, Italy)*

H. HOFER P. LECOULTRE B. SPIESS J. ULBRICHT
(Eidgenossische Technische Hochschule, ETH Zurich, Switzerland)

ABSTRACT

The four L3 hadron calorimeter modules with BGO have been tested with pion beams of energies between 4 and 20 GeV. L3 calorimeter, the gas sampling Uranium module and its test with beam are briefly described. The energy resolution for pions with energies between 4 and 20 GeV were measured. The e/π ratio, angular resolution, dependence of the energy resolution on the direction of incident pions, hadron punch through and track through also were measured and analyzed.