

# ALEPH 实验及其在 LEPI 能区的最新结果<sup>1)</sup>

谢 一 冈

(中国科学院高能物理研究所)

本文介绍目前世界上最高能量正负电子对撞机 LEP 上的四个大型实验之一——ALEPH 探测器的结构和特点, 适宜开展的物理工作, 北京研究组对 ALEPH 国际合作在硬件和软件方面的贡献以及最近在 LEPI 能区运行所得到的最新实验结果, 包括  $Z^0$  共振峰参数和中微子代数的测定, 强子事例的总体形状参数和单举分布参数以及  $Z^0$  的轻子衰变分支比测定等。

1989年8月13日在日内瓦欧洲核子研究中心(CERN)正式建成了目前世界最高能量正负电子对撞机 LEP, 实现了质心系能量在 91 GeV 附近的正负电子对撞, 在 9月20日至10月9日三个星期的物理运行期间, 四个实验组共观察到约 12000 个  $Z^0$  粒子。11月13日举行了庆祝正式运行的盛大的典礼。许多国家的首脑参加了这一盛典。我国电视台也及时地进行了报道。

人们还记得 1983年1月和6月在 CERN 的质子反质子对撞机(sp̄p̄s)上, UA-1 和 UA-2 实验先后发现了带电的中间玻色子  $W^\pm$  和中性中间玻色子  $Z^0$ <sup>[1]</sup>。这一重大发现对于确立弱作用和电磁作用的统一理论和夸克-轻子层次的标准模型有着极其重要的意义。p̄p̄ 对撞产生  $Z^0$  的几率比较小。例如, 在 1983年几个月运行时间内只记录到 100 多个  $Z^0$  粒子, 这对于深入研究  $Z^0$  能区的物理是有很局限性的。10年前欧洲和美国都开始酝酿筹建能产生  $Z^0$  粒子能量的正负电子对撞机。1983年9月在 CERN 正式开始兴建目前世界最高能量的正负电子对撞机 LEP。  $Z^0$  的质量为 91GeV/ $c^2$ , 故 LEP 的第一期工程 LEP I 选为 100 GeV, 即正负电子的束流能量各为 50GeV。几年后 LEP II 的能量将增加为 200GeV。LEP 对撞机这一庞然大物跨越瑞士和法国两国边境。主环的周长长达 27km。正负电子的运行轨道在地下 50—150m 深的隧道中。目前它的

亮度已达到  $1 \times 10^{30}/s \cdot cm^2$  (设计亮度  $\sim 1.7 \times 10^{31}/s \cdot cm^2$ )。国际高能物理界都十分关注 LEP 的运行, 因为 LEP 上的物理工作非常集中地体现了 20 世纪最后 10 年期间高能物理方面最前沿的课题。

在 LEP 上有四个大实验组, ALEPH, DELPHI, L3 和 OPAL。其中 ALEPH 是由著名物理学家、荣获 1988 年诺贝尔奖金物理学奖的斯坦伯格教授领导的。它由 10 个国家的 30 个研究所和大学的 400 余名物理学家与工程师组成。从 1983 年开始筹建起, 中国科学院高能物理研究所就是它的最早成员之一。

下面介绍 ALEPH 探测器及其特点, 其适宜的物理工作课题, 中国科学院高能物理研究所北京研究组的贡献及所得到的最新结果(例如  $Z^0$  峰共振参数, 中微子代数, 强子末态特性和  $Z^0$  的轻子衰变分支比等)。

## 一、ALEPH 探测器及其特点

如图 1 所示, ALEPH 探测器是一个长约 11.5m, 直径为 11m, 重量约为 400t 的圆柱形综合精密粒子分析装置<sup>[2], [3]</sup>。中轴线上是束流管道 BL。最内层是半导体硅条微顶点探测器 MVD, 它紧紧包在对撞点附近的束流管道外面, 可以很精确地测量对撞点附近末态粒子的

1) 编辑部于 1989 年 12 月 5 日收到此文。

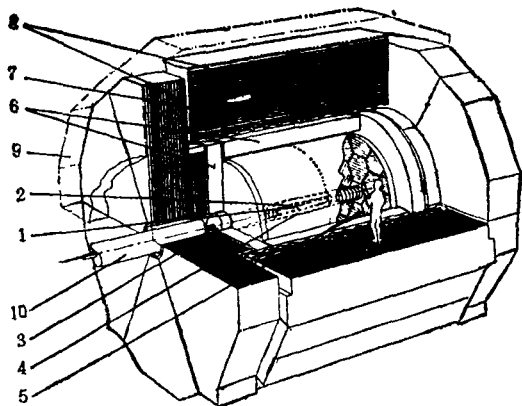


图1 ALEPH 探测器

1.束流管道(BL); 2.微顶点探测器(MVD); 3.亮度监测器(LCAL); 4.内径迹室(ITC); 5.中心探测器(TPC); 6.电磁量能器(ECAL); 7.超导磁体线圈(COIL); 8.强子量能器(HCAL); 9. $\mu$ 探测器(MuD); 10.超导四极磁铁(SQM)

径迹坐标,用以测定短寿命顶点的位置.在对撞点两侧的束流线附近还有亮度监测器LCAL用以测量亮度.在顶点探测器外面是一个小的漂移室ITC,共有八层信号丝平面,它可以提供触发信息和提高束流管道邻近末态粒子位置的识别能力.再外面是中心探测器.它是一个很大的圆筒形时间投影室,外半径为1.77m,内半径为0.33m.灵敏空间的长度为4.4m,由粒子径迹在超导磁场中的弯曲程度确定带电粒子的动量,可以测定21个空间坐标点以确定粒子径迹.同时可以测定320个电离取样( $dE/dx$ ),从而可以辨认粒子.可以说,它是目前世界上最大的时间投影室.在中心探测器外面是电磁量能器ECAL,由2mm厚的铅板和气体正比管构成夹层单元,总厚度为22个辐射长度,共45层,铅的总厚度为11.4cm.利用电磁簇射原理可以精确测定电子和光子的能量.在它外面的超导线圈产生15000G平行于束流方向的磁场,线圈长6.4m.直径5.3m.线圈外面是强子量能器HCAL,由塑料流光管和5cm厚的铁板构成夹层单元.铁板的总厚度是120cm,共23层单元.铁板既作为强子簇射吸收体,又作为磁场的扼铁,同时它也起 $\mu$ 子过滤器作用,即只有 $\mu$ 子能通过这样厚的铁板到达HCAL外

面的 $\mu$ 子探测器MuD.最外面的 $\mu$ 子探测器由相距50cm的内外两层构成,每层又由两层塑料流光管交错叠置而成,以使空间分辨率达到2mm.另外,通过 $\mu$ 子和强子在强子量能器中的图样不同来区别 $\mu$ 子和强子.从上述的几种子探测器器提取的电信号传送至数据获取电子学电路,电子学的路数与探测器输出信号路数相当,多达20余万.它们进而与数十台大中小型计算机连接进行数据预处理和设备控制.对预处理过的数据带再进行离线数据处理过滤、分类以备物理分析之用.

ALEPH 探测器有一系列突出的优点.

1.它是全能探测器,可以在几乎 $4\pi$ 立体角范围内全方位地测量所有高能粒子的动量、能量及空间位置.

2.图形识别能力强.因为有大型时间投影室,可以精确地测定带电粒子轨迹,画出各种复杂作用或母体-子体粒子衰变的图形. $r$ 和 $\phi$ 方向的精度高达 $200\mu\text{m}$ , $z$ 方向精确到1—2mm.

3.动量、能量和空间分辨率高.TPC的动量分辨率高达 $\Delta p/p_{\perp} \sim 1.1 \times 10^{-3} p_{\perp} \text{GeV}/c$ .电磁量能器也有较好的分辨率,

$$\Delta E/E \sim 16\%/\sqrt{E} \text{ GeV}.$$

电磁量能器和强子量能器的能量记录方式都采用了辐射状的微型塔结构,前者的角分辨高达 $\Delta\theta \times \Delta\phi \sim 0.93^{\circ} \times 0.94^{\circ}$ ,后者也小到 $3.7^{\circ} \times 3.7^{\circ}$ .这种极高的角分辨系统特别有利于研究高能下的辐射状的喷注现象.

4.粒子鉴别能力强.利用TPC的 $dE/dx$ 测量,可以鉴别粒子.

5.采用了超导线圈,因其体积较小从而可以充分利用有效空间.

6.微顶点探测器有精密到 $\sigma \sim 20 \sim 25 \mu\text{m}$ 的空间分辨率,可以观测寿命短到 $10^{-13}\text{s}$ 的衰变现象.

1) W. Blum et al., ALEPH Hand Book, ALEPH 89-77 (1989, CERN Yellow Book).

## 二、适宜的物理工作

利用这一性能优越的大型精密的综合粒子探测装置,可以在 LEPI 能区 (100GeV) 和 LEP II 能区 (200GeV) 研究大量直到本世纪末高能物理领域最前沿的物理课题。这些课题涉及的领域很宽<sup>1)</sup>,大致包括以下几个方面:

1. 弱电统一理论的精密验证;  $Z^0$  质量及宽度,中微子的种类(代数),  $Z^0$  衰变产物及其前后不对称性等精密测定。

2.  $\tau$  轻子物理,包括  $\tau$  的末态极化现象、 $\tau$  的衰变方式及  $\tau$  的寿命等的研究。

3. 重味道物理,如 b 夸克物理及 t 夸克素 (tt), b 夸克的稀有衰变等的研究。

4. CP 不守恒现象和  $B^0$ - $\bar{B}^0$  混合等的研究。

5. 新粒子如 t 夸克、Higgs 粒子的寻找。这两种粒子是弱电统一理论和标准模型要求的基本粒子,但至今未找到,它们是当前理论家和实验家注意的对象。

6. 一些新理论要求的粒子,如超对称粒子、新的规范玻色子等的寻找。

7. 粒子的组合性的研究,即研究目前最基本层次的粒子如夸克轻子等是由什么粒子组成的,如激发轻子、激发夸克和激发中微子等。

8. QCD 喷注及软 QCD 过程产生的各种末态粒子产额,以及重夸克喷注特性等的研究。

9. 极化正负电子束对撞的物理现象的研究。在 LEPI 能区研究阶段的后期,计划将正负电子改成极化束,这样碰撞后会产生大量新奇的现象。这是后几年大家感兴趣的课题。

10. LEP II 能区的  $W^+$  和  $W^-$  末态和三规范玻色子顶点的研究。因为产生  $W^+$  和  $W^-$  要求对撞机能量高于  $2M_W$  所对应的能量(即大约为 165GeV),故只有 LEP II 阶段才能研究这类问题。其它还有  $Z^0$  的稀有衰变等,这里就不再一一列举了。

## 三、北京研究组对 ALEPH 合作的贡献

北京组目前作为 ALEPH 实验的一个平等成员,能和其他国家 29 个单位共享物理成果,是和六年来在硬件和软件方面做的大量工作分不开的。

自 1983 年以来,北京组在硬件方面承担了 ALEPH 内层中间角部分及外层全部(桶部、中间角和端盖)  $\mu$  探测器的建造<sup>2)</sup> 以及其所需的 4500 支(共 36000 路)长度由 2—7m 的塑料流光管在北京制造的任务<sup>3)</sup>。制成管子的总长度达 22km,覆盖面积约 1800m<sup>2</sup>。自 1987 年 9 月至今已成功地用北京制造的管子在 CERN 组装成 33 个  $\mu$  探测器室,其中部分已于 1989 年 8 月投入使用。因为外层  $\mu$  探测器是在 ALEPH 装置的最外面,正如外国同行所说,中国组制造的外层  $\mu$  探测器给 ALEPH 这个庞然大物穿上了一件几百平方米的中国外套。

在软件方面,北京组承担了蒙特卡罗模拟有关  $\mu$  探测器方面的大量程序编写。正如实战前需要大量军事演习一样,为了更好地把握住和更快地分析实际正负电子对撞末态的大量复杂数据,需要在正式实验前几年就开始做大量的蒙特卡罗模拟工作。另外,对空间重建程序的数据库与 TPC 图形显示软件 DAL I 等也做了大量工作。三年来已实现通过维也纳由北京至 CERN 的国际计算机联网,成为国际计算机网络的一个 x-25 结点。在北京并建立了完备的软件系统,包括蒙特卡罗模拟软件包 GALEPH、径迹重建程序包 JULIA、物理分析程序包 ALPHA 及其他支持程序。几年来,利用它们对探测器模拟及为进行物理分析做了大量的准备工作,如  $\mu$  探测器计数、多层组合效

1) G. Altarelli et al., Z Physics at LEPI, CERN 89-08, Vol. 1,2 (1989, CERN Yellow Book); J. Ellis et al., Physics at LEP, CERN 86-02, Vol. 1,2 (1986, CERN Yellow Book).  
2) ALEPH Technical Report, Vol.1 (1983); Vol.4 (1984).

率分析,  $e^+e^-$ 湮没产物前后不对称性测量,  $t$  夸克寻找,  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  及  $e^+e^- \rightarrow$  强子的 QCD 过程的各种参数分析, 以及用多元统计方法进行  $\pi-\mu$  鉴别等。中国科学院理论物理研究所、北京大学、清华大学和山东大学等热心地参加了有关的物理分析工作。现在第一批数据磁带已在进行分析。

#### 四、ALEPH 在 LEP1 能区的最新结果

仅在 1989 年 9 月 20 日至 10 月 9 日 LEP 首次物理运行的三周内, ALEPH 组已取得了一批可喜的结果。

##### 1. $Z^0$ 共振峰参数和中微子代数(种类)的测量<sup>[4]</sup>

$Z^0$  粒子是寿命只有  $10^{-23}$ s 的中间态粒子, 由描述中间共振态的 Breit-Wigner 公式可得在共振峰处衰变为末态粒子  $f$  的截面  $\sigma_f^{\text{peak}}$  为

$$\sigma_f^{\text{peak}} = \frac{12\pi \Gamma_{ee} \Gamma_f}{M_Z^2 \Gamma_Z^2} (1 - \delta_{rad})$$

$$= \sigma_f (1 - \delta_{rad}),$$

其中  $\Gamma_Z$  为总的共振峰宽度, 由量子力学可知, 寿命  $\tau$  和  $\Gamma_Z$  遵守  $\tau = \Gamma_Z/\hbar$  ( $\hbar$  为普朗克常数)。

$$\Gamma_Z = N_\nu \Gamma_\nu + 3\Gamma_{ee} + \Gamma_{had},$$

即总宽度为全部可能的末态分宽度之和, 其中  $\Gamma_\nu$ ,  $\Gamma_{ee}$  和  $\Gamma_{had}$  分别为中微子、正负电子和强子的分宽度(还有几种轻子道的分宽度很小, 这里已忽略);  $N_\nu$  为中微子的种类, 它表明中微子有几代, 这个代数与轻子和夸克的代数也是相对应的, 因此是物质构造夸克-轻子层次的一个极为关键的物理量。前面公式中的  $\delta_{rad}$  为辐射修正项。根据产生  $f$  末态事例率  $R$  和对撞机亮度  $L$  的简单关系  $R = \sigma_f \cdot L$ , 就可以由测定强子末态数和  $L$  定出截面  $\sigma_f$ 。亮度  $L$  则是用亮度监测器 LCAL 直接测量巴巴散射, 并通过计算得到。测量了由 89.263 到 93.264 GeV 间七个 LEP 能量下的  $\sigma_f$ , 再利用标准模型提供的  $\Gamma_{ee}$  ( $83.5 \pm 0.5 \text{ MeV}$ ),  $\Gamma_\nu$  ( $166.5 \pm 1.0 \text{ MeV}$ ) 和  $\Gamma_{had}$  ( $1737 \pm 22 \text{ MeV}$ ) 值, 经过共振峰曲线拟合(如图 2 所示), 即可定出  $Z^0$  的质量  $M_Z$  和

$N_\nu$  为

$$M_Z = (91.174 \pm 0.055 \text{ exp} \pm 0.045 \text{ LEP}) \text{ GeV}.$$

$$N_\nu = 3.27 \pm 0.24 \text{ stat} \pm 0.16 \text{ sys} \pm 0.05 \text{ th},$$

括号中的 exp 和 LEP 分别表示来源于实验和 LEP 对撞机本身能量不确定性带来的误差。  $N_\nu$  中 stat, sys 和 th 表示来源于统计、系统和理论的误差。

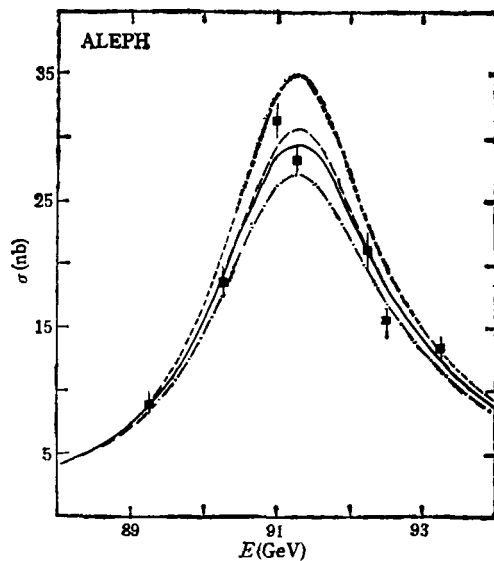


图 2  $Z^0$  共振附近强子截面随能量变化关系及不同  $N_\nu$  的拟合曲线  
——最佳拟合; ---  $N_\nu = 2$ ; ...  $N_\nu = 3$ ; -.-  $N_\nu = 4$

因为我们不可能, 也没有必要记录全部对撞的事例数据, 而只是将那些感兴趣的事例记在数据磁带上, 所以利用一定的触发条件就可以达到这一目的。例如记录强子末态, 就用了在内径迹室 ITC 内至少有六个丝平面(共八个丝平面)和强子量能器 HCAL 中至少有 4—8 个夹层单元(共有 23 个单元)的流光管着火的较宽的条件。

对记录到的事例再独立地用 TPC 径迹法和量能器法进行了强子事例选择。选用一定的好径迹和好事例切割条件后, 用两种方法分别得到 3112 和 3320 个强子+ $\tau$  轻子事例。 $\tau$  轻子事例混在强子事例中的原因是  $\tau$  轻子有很大的几率衰变为二个或三个  $\pi$  粒子。典型的强子事例如图 3 所示。

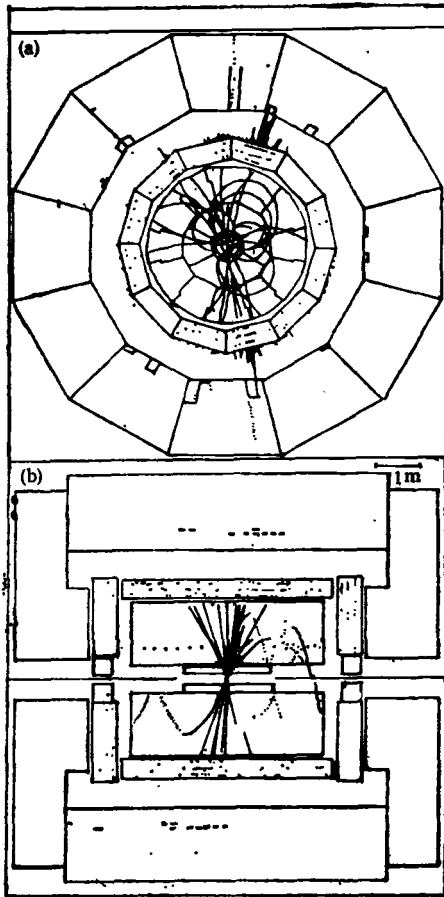


图3 在 ALEPH 探测器中的强子事例  
(a)  $x-y$  平面; (b)  $r-z$  平面

由径迹法和量能器法拟合共振曲线得到的  $Z^0$  质量  $M_Z$ 、共振峰总宽度  $\Gamma_Z$ 、 $\sigma^0$  和  $\sigma^{peak}$  值如表 1 所示。所得到的  $M_Z$  的精度比最近两个最精确的结果还要精确 0.5 倍。

表 1

	强子事例	强子 + $\tau$ 事例	组合
$M_Z(\text{GeV})$	$91.178 \pm 0.055$	$91.170 \pm 0.054$	$91.174 \pm 0.054$
$\Gamma_Z(\text{GeV})$	$2.66 \pm 0.16$	$2.70 \pm 0.15$	$2.68 \pm 0.15$
$\sigma^0(\text{nb})$	$39.1 \pm 1.6$	$40.9 \pm 1.7$	
$\sigma^{peak}(\text{nb})$	$29.3 \pm 1.2$	$30.5 \pm 1.3$	

## 2. 强子事例的总体形状参数和单举分布参数测量<sup>[9]</sup>

极高能量下的正负电子湮没成为强子是量物理

子色动力学 QCD 的一个极为敏感的实验现象。而且强子末态事例往往表现为两个、三个或更多个喷注 (jet)。用球度、冲度、非平面度、扁度、大值和小值等描述事例总体形状的这些参数可以很充分地表示喷注的尖锐程度、相对取向及个数等。因此是高能  $e^+e^-$  湮没中极为重要的参数。

对于每一事例带电粒子径迹  $i$  的动量张量

$$M_{\alpha\beta} = \sum_i p_{\alpha i} p_{\beta i}$$

可找到三个正交基矢  $n_1, n_2$  和  $n_3$ ，由动量在这些轴上的投影值可以得到三个归一化本征值

$$Q_i = \left[ \sum_j (p_j \cdot n_i)^2 \right] / \left[ \sum_j |p_j|^2 \right],$$

其中  $i = 1, 2, 3$ ，即三基矢，且有

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1,$$

$Q_3 > Q_2 > Q_1$ 。如图 4 所示， $n_3$  称为球度轴，球度  $S = (3/2)(Q_1 + Q_2)$ ， $n_2 \cdot n_3$  组成事例平面， $n_1$  则是事例平面的法线，故动量在  $n_1$  方向的分量总和即为事例的非平面度

$$A[A = (3/2)Q_1].$$

图 4 为球度的分布，其结果并与几种 QCD 理论模型进行了比较。另外，由图 4 也可看到，高

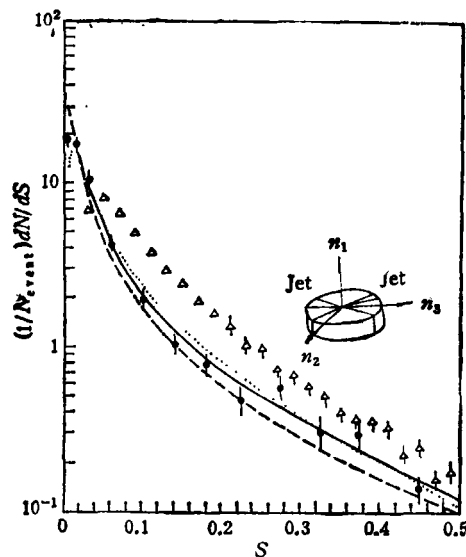


图4 球度  $S$  分布

● ALEPH 91GeV; ▲ Mark II 29GeV; — Lund PS 91GeV; --- Lund ME 91GeV; ... Herwig 91GeV

能下 (91GeV) 比低能下 (29GeV) 低  $S$  的比例大, 这说明高能下喷注事例的比例增多。在 ALEPH 的最新结果中, 单举分布参数即是统计大量事例只着眼单个粒子的行为所对应的参数, 例如多重产生理论最常用的物理量快度

$$Y(Y = (1/2)\ln[(E + p_{||})/(E - p_{||})],$$

这里  $p_{||}$  为单个粒子动量沿球度轴(或喷注轴)的纵动量)分布, 如图 5 所示。其结果也与几种

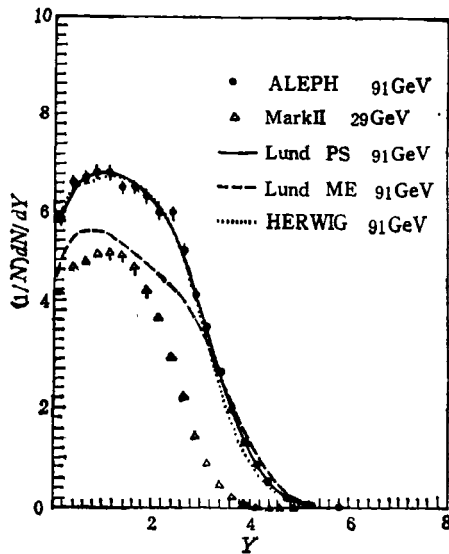


图 5 快度分布

理论模型和低能的结果进行了比较。带电粒子平均多重数  $\langle N_{ch} \rangle$  如图 6 所示。ALEPH 的实验结果为  $21.3 \pm 0.1_{stat} \pm 0.7_{sys}$ 。图中结果与理论和大量的低能实验结果进行了比较。

### 3. $Z^0$ 的轻子衰变分支比的测量<sup>1)</sup>

$Z^0$  衰变为轻子比衰变为强子要少得多。它是弱电统一理论  $Z^0$  能区物理的重要物理量。

先在 2619 个强子事例中选出带电粒子多重数上限为六的事例, 因为这个上限可以把  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-l^+l^-$  ( $l^\pm$  为轻子对, 共四个带电粒子) 和  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  ( $\tau^\pm \rightarrow 2\pi, 3\pi$  共六个带电粒子) 等轻子反应包括进来。再根据电磁量能器中沉积能量大于 40GeV 的条件, 可以选出  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ , 共  $126.7 \pm 15_{stat} \pm 3.4_{sys}$  个事例。故电子对强子的分支比

$$P_e = \Gamma_e/\Gamma_h = 126.7/2619 = 0.047.$$

同样, 由强子量能器中的击中图样和  $\mu$  探测器

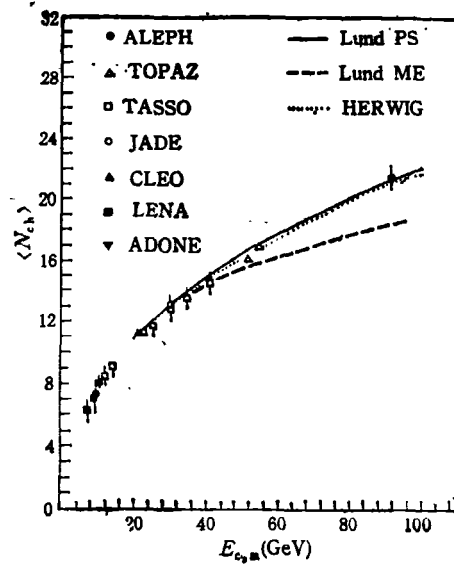


图 6 不同质心系能量  $E_{c.m.}$  的带电粒子平均多重数  $\langle N_{ch} \rangle$

中击中的信息可以鉴别  $\mu$  子。图 7 为一个清晰的  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  ( $\tau^+ \rightarrow 3\pi, \tau^- \rightarrow \mu\nu$ ) 事例。我们共找到  $116.8 \pm 15.8_{stat} \pm 3.0_{sys}$  个事例。判别  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  事例比较复杂。首先找出两个背对背的喷注的冲度轴, 剔除那些粒子径迹与冲度轴夹角大于  $18^\circ$  的强子事例, 并且还要求剔除掉电磁量能器中沉积能量很大 ( $>7\text{GeV}$ ) 的事例, 这样就未态为正负电子和  $\mu$  子对的轻子事例也剔除了, 剩下的只是  $\tau^\pm$  轻子对事例, 共找到  $129.7 \pm 12.7_{stat} \pm 4.6_{syst}$ 。

由公式

$$\sigma_h^0 = \frac{12\pi}{M_Z^2} \frac{\Gamma_e \Gamma_h}{\Gamma_Z^2} = \frac{12\pi}{M_Z^2} B_e \cdot \frac{B_h}{P_l},$$

及由上述实验测到的轻子对强子的分支比  $P_l$  和测得的  $M_Z, P_Z$  和  $\sigma_h^0$ , 定出轻子分支比  $B_l (B_l = \Gamma_l/\Gamma_Z)$ , 结果如表 2 所示。平均轻子分支比  $B_l = 0.032 \pm 0.0013$ , 即

$$\Gamma_l = 85.9 \pm 5.9 \text{ MeV}.$$

它与分宽度理论值 ( $\Gamma_l = 83.2 \text{ MeV}$ ) 极好地符合。

在本文写完的时候, 又得到 LEPH 合作组的几项最新结果, 如中性 Higgs 粒子在 35

(下转第 600 页)

1) D. Decamp et al., CERN-EP/89-141 (1989).