

L₃ 实验两年来的主要物理结果

金炳年

L₃ 是在欧洲核子中心的 LEP (Large Electron-Positron) 对撞机上进行高能物理实验的一个国际合作组,由 14 个国家、43 个研究单位共 581 位物理学家参加。我国有中科院高能物理研究所,上海硅酸盐研究所,合肥中国科技大学和台湾高能物理组参加。

LEP 是目前世界上最大的正负电子对撞机,共有四个对撞点,分别由 ALEPH, DELPHI, L₃ 和 OPAL 合作组进行实验。各组的探测器都有一些各自的特点。L₃ 探测器的最大特点是精确测量 μ 子动量和电子及光子的能量。在 z^0 能区,测量 μ 子对的不变质量可精确到 $(\frac{\Delta m}{m})_{\mu\mu} \sim 1.4\%$ 。能量大于 ZGeV 时,

电子和光子的能量分辨率 $\Delta E/E \sim 1\%$ 。能量为 100 MeV 时,这一分辨率为 5%。图 1 是 L₃ 探测器的示意图。图 2 表示正负电子对撞后产生光子、电子、 μ 子

和强子。

经过了近十年的设计建造,LEP 已于 1989 年秋投入运行,直至 1991 年底 L₃ 组共收集了近五十万个 z^0 事例。随着 LEP 亮度的提高和 L₃ 探测器前后向区覆盖立体角的改善,预期至 1993 年底将可收集到近三百万个 z^0 事例,为精确检验标准模型和寻找新物理现象提供更高的统计精度。

两年来用已积累的五十万个 z^0 事例开展了多方面大量的物理分析,得到了很多有意义的物理结果,发表了近 60 篇文章。

一、精确测定了 z^0 共振峰的参数

传递弱相互作用的中间玻色子 W^\pm 和 z^0 是 1983 年在 CERN 的 SPS 质子反质子对撞机上由 UA1 实验组发现的。在 LEP 投入运行前积累的事例有限,对 z^0 的参数不可能精确测量。

L₃ 目前给出的结果为: $M_{z^0} = 91.181 \pm 0.010 \pm 0.020$ GeV; $\Gamma_{z^0} = 2501 \pm 17$ MeV; $\Gamma_b = 1742 \pm 19$ MeV; $\Gamma_c = 83.3 \pm 1.1$ MeV; $\Gamma_\mu = 84.5 \pm 2.0$ MeV; $\Gamma_\tau = 84.0 \pm 2.7$ MeV; $\Gamma_l = 83.6 \pm 0.8$ MeV。

M_{z^0} 为中性中间玻色子 z^0 的质量, Γ_{z^0} 是 z^0 共振峰的总宽度, $\Gamma_b, \Gamma_c, \Gamma_\mu, \Gamma_\tau$ 分别为 z^0 衰变到强子、 e^+e^- 、 $\mu^+\mu^-$ 和 $\tau^+\tau^-$ 道的分宽度, Γ_l 是在轻子普适性假设下测得的 z^0 衰变到某一对带电轻子的分宽度。从 Γ_e, Γ_μ 和 Γ_τ 测量值可以看出它们在误差范围内是一致的,这是轻子普适性的一个实验验证。

二、确定了中微子种类的数目 $N_\nu = 3$

每一种带电的轻子都有自己的中性

度有如下关系式:

$$\begin{aligned} \Gamma_{z^0} &= \Gamma_b + 3\Gamma_l + N_\nu \Gamma_\nu^{SM} \\ &= \Gamma_b \left(1 + 3 \frac{\Gamma_l}{\Gamma_b} + N_\nu \frac{\Gamma_\nu^{SM}}{\Gamma_b} \right) \end{aligned}$$

这里 Γ_ν^{SM} 是由标准模型计算得到的 z^0 衰变为某一对中微子的宽度, N_ν 是中微子的种类数。关系式中所

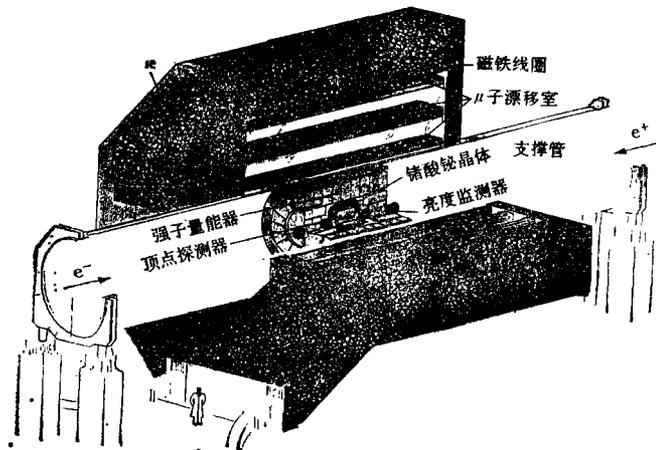


图 1 L₃ 探测器示意图

伴侣——中微子,已发现的轻子有电子、 μ 子和 τ 子。实验上已直接探测到的中微子有电子中微子, μ 子中微子。轻子到底有多少种是粒子物理的一个根本问题。LEP 的运行行为实验物理学家提供了回答这一问题的可能。

在轻子普适性的假设下, z^0 衰变的总宽度和分宽

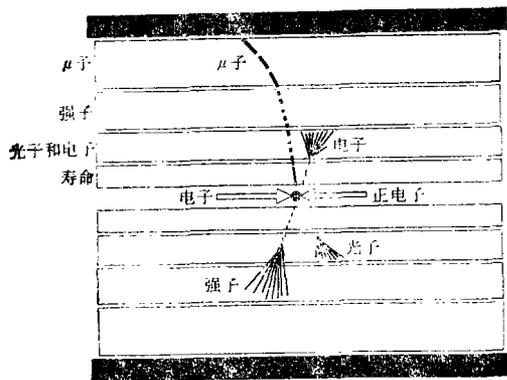


图2 e^+e^- 对撞后来态粒子示意图

以用宽度比值 Γ_b^M/Γ_h 是为了避免 Γ_b^M 对目前还没有测定的 t 夸克质量 m_t 和 Higgs 玻色子质量 M_H 的依赖。L3 实验结果给出：

$$N_b = 3.05 \pm 0.10.$$

这表明 $N_b = 3$, 自然界只有三种中微子, 即三种带电的轻子。

三、给出了 t 夸克质量的预期范围

标准模型认为夸克和轻子之间有一定的对应关系。实验上现在已找到的有 u, d, s, c 和 b 五种夸克。理论上认为应该存在第六种夸克 t 。但实验测量的 z^0 衰变到强子的宽度

$$\Gamma_h = 3(\Gamma_{u\bar{u}} + \Gamma_{d\bar{d}} + \Gamma_{s\bar{s}} + \Gamma_{c\bar{c}} + \Gamma_{b\bar{b}}),$$

没有包括 $\Gamma_{t\bar{t}}$, 这里右边括号前的 3 是颜色因子。这一实验结果说明 z^0 的质量还不够衰变到 $t\bar{t}$ 末态。因此 $m_t > \frac{1}{2} M_{z^0}$ 。尽管 z^0 不能直接衰变到 $t\bar{t}$, 但通

过辐射修正, z^0 共振峰的参数与 m_t 有关。这样通过 z^0 参数测量值和考虑了辐射修正后的理论预期值的比较 L3 组给出了 m_t 的预期值

$$m_t = 193^{+55}_{-40} \pm 16(\text{Higgs}) \text{ GeV}$$

这里第二项误差是考虑 Higgs 质量从 50 到 1000 GeV 范围内变化而引起的误差。

四、量子色动力学 (QCD) 的检验

L3 实验在以下三个方面对 QCD 检验提供了新的实验验证：

1. 胶子的自旋。 e^+e^- 对撞产生的三喷注强子事例为胶子的存在提供了实验证据。其中能量最小的喷注能量与束流能量之比的分布与胶子的自旋有关。图 3 中实线为矢量胶子的预期分布, 虚线为标量胶子的预期分布。L3 测量结果与矢量胶子的分布相符, 证实了胶子的自旋为 1。

2. 强相互作用耦合常数 α_s 的测量。实验上可以通过强子末态事例的多喷注分布或喷注能量间的关联来确定 α_s 。L3 实验由强子末态多喷注分布给出：

$$\begin{aligned} \alpha_s(\sqrt{s} = 91.22 \text{ GeV}) & \\ &= 0.115 \pm 0.005 (\text{实验}) \\ &\quad + 0.012 (\text{理论}) \\ &\quad - 0.010 \end{aligned}$$

由喷注能量间的关联给出：

$$\begin{aligned} \alpha_s(\sqrt{s} = 91.22 \text{ GeV}) & \\ &= 0.121 \pm 0.004 (\text{实验}) \\ &\quad + 0.011 (\text{理论}) \\ &\quad - 0.009 \end{aligned}$$

从图 4 可以看到 α_s 随质心系能量上升而下降。

z^0 衰变到 $b\bar{b}$ 的分支比为 14.6%。又由于 b 夸克的质量大, 由 b 衰变产生的 μ 子相对于 b 碎裂形成的喷注的横动量 p_T 比较轻夸克的相应情况大。因此我

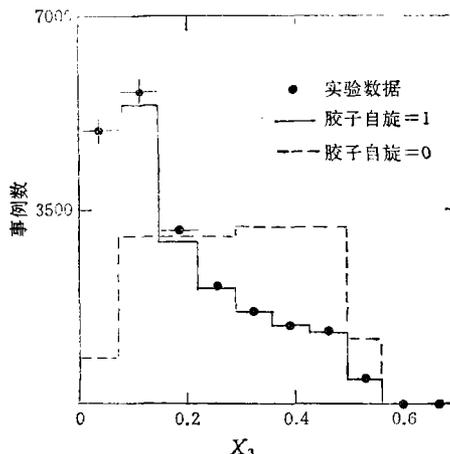


图3 3喷注事例的 $X_3 = E_3/E$ 束流分布

们可利用这一特性从强子末态事例中挑选出部份 z^0 衰变到 $b\bar{b}$ 的事例, 测量这一事例集的 α_b^0 。并与其他强子集的 $\alpha_r^{uds c}$ 比较, 得到: $\alpha_b^0/\alpha_r^{uds c} = 1.00 \pm 0.08$ 。这样证实了 α_r 与夸克味道无关。

3. 胶子的自耦合: 胶子与光子的主要区别之一是光子没有自耦合, 一个光子不会变为二个光子。但胶子有自耦合, 一个胶子可以变为二个胶子。这是因为 QCD 具有非阿贝尔群的对称性。实验上可以用四喷注事例的 Nachtmann-Reitel 角 θ_{NR}^0 分布来检验。 θ_{NR}^0 定义为喷注 1 和 2 的动量矢量差与喷注 3 和 4 的动量矢量差之间的夹角。从图 5 可以看到测量结果与 QCD 非阿贝尔群模型相符, 而与阿贝尔群模型不相符。由此证实了胶子的自耦合和 QCD 的非阿贝尔群对称性。

五、 B^0 和 \bar{B}^0 的混合

B^0 和 \bar{B}^0 是含 b 夸克的介子, 它们与含 s 夸克的 K^0 和 \bar{K}^0 介子相似。因而也应有类似的混合现象。当 z^0 衰变为 $b\bar{b}$ 后, 碎裂产物包含 $B^0\bar{B}^0$ 对。如果没有 $B^0\bar{B}^0$ 的混合, 则它们衰变产生的轻子具有相反的电荷。如果有 $B^0\bar{B}^0$ 混合, 则它们衰变产生的部分轻子会具

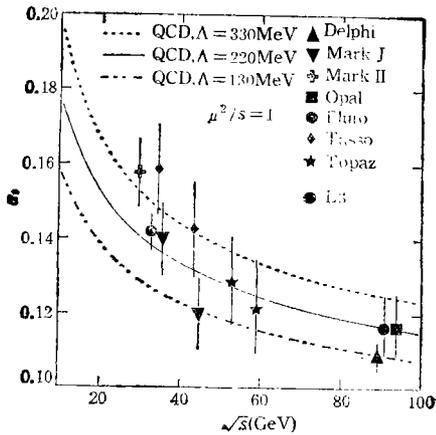


图4 强相互作用耦合常数 α_s 随 e^+e^- 对撞质心系能量 \sqrt{s} 的变化

有相同的电荷。定义混合参数 χ_B 为一个 B^0 强子在衰变时振荡到 \bar{B}^0 的几率,则有 $\chi_B = f_d \chi_d + f_s \chi_s$, 其中 f_d 和 f_s 分别为 B_d^0 和 B_s^0 产生的比例,而 χ_d 和 χ_s 分别为它们的混合参数。L3 实验的结果观察到了 $B^0 - \bar{B}^0$ 的混合,并给出: $\chi_B = 0.178 \pm 0.046$ 。

六、寻找新粒子

1. 寻找 Higgs 玻色子, 尽管是否存在 Higgs 粒子理论上尚有争议, 但实验家已作了很多努力去寻找它。L3 实验的结果表明, 如果存在 Higgs, 则它的质量下限为 53 GeV。LEP 另三个实验组也给出了相近的质量下限。

2. 寻找激发态轻子。L3 实验通过:

$$e^+e^- \rightarrow e^+ \tau^+ e^- \rightarrow e^+ e^- \gamma \gamma \text{ 和 } e^+e^- \rightarrow e^+ e^- \rightarrow e^+ e^- \gamma$$

反应寻找了激发态的 e^* , μ^* 和 τ^* 。还通过 $e^+e^- \rightarrow \nu \nu^*$ 和 $\nu^* \rightarrow e W$ 及 $\nu^* \rightarrow \nu \gamma$

反应寻找了激发态的 ν^* 。实验结果在目前可以达到

(上接第 15 页)

低能范围内得到了很好的检验, 然而在更高能量下辐射修正效应不可忽略, 规范玻色子的直接耦合效应出现, ……都需要在高能物理实验中得到检验。又如量子色动力学理论能够很好地解释强子内夸克和胶子结构函数的演化效应, 然而在更高能量下将揭示很小 x 区域的结构函数的性质, 这已超出了微扰量子色动力学理论的预言范围进入了非微扰区域, 为发展量子色动力学理论的非微扰方法提供了实验基础。因此在更精确、更高能量范围内检验标准模型理论必将进一步发展标准模型理论。

十多年来, 人们在检验标准模型理论的同时探讨和提出了各种超出标准模型理论的尝试。有些尝试是企图寻找更高对称性减少标准模型理论中的参数, 例

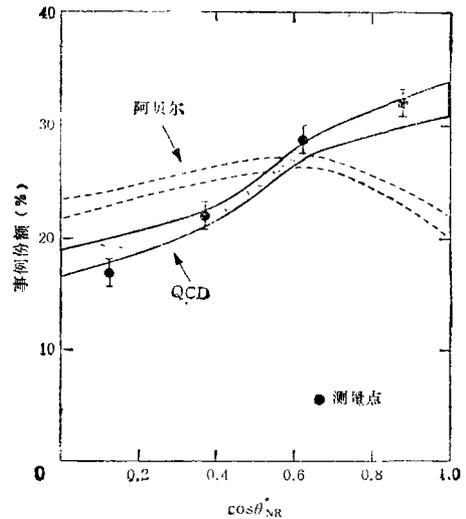


图5 4 喷注事例的 Nachtmann-Reitel 角 (θ_{NR}) 分布

的能区否定了激发态轻子的存在, 并给出了它们的质量下限: $m_{e^*} > 86.8 \text{ GeV}$; $m_{\mu^*} > 87.6 \text{ GeV}$; $m_{\tau^*} > 89.3 \text{ GeV}$; $m_{\nu^*} > 91 \text{ GeV}$ 。

3. 超对称性粒子的寻找。L3 实验在这方面也作了一些尝试。迄今为止, LEP 的四个实验组都没有找到任何超对称性粒子。L3 给出了标量电子 \tilde{e} 、标量 μ 子 $\tilde{\mu}$ 和 W 中间玻色子的超对称性伴侣 \tilde{W} 的质量下限: $m_{\tilde{e}} > 41 \text{ GeV}$; $m_{\tilde{\mu}} > 41 \text{ GeV}$; $m_{\tilde{W}} > 44 \text{ GeV}$ 。

LEP 计划在 z^0 能区运行至 1993 年底, 从 1994 年 LEP 将开始运行在 W^+W^- 对产生的能区。随着 z^0 能区数据的进一步积累, 和转入新能区的研究, 必将取得更多更精确的物理结果。能否发现新的物理现象是很难预言的。但全世界的高能物理界将投入更大的人力和物力继续向物质的更深处探索。

如大统一理论、超对称性理论、超弦理论等。有些尝试是企图寻找轻子、夸克、媒介子这些基本单元的下一层次物理, 例如轻子和夸克的复合模型理论、中间玻色子的复合模型理论、多彩夸克理论等。现有的高能物理实验结果虽然已排除了一些理论上的尝试, 然而还不足以对各种尝试给予最后的判断。超导超级对撞机必将进一步肯定和否定这些尝试以及新的尝试, 也必将揭示下一层次的新物理的标度和内容。

总之, 物理学的本质在于揭示未知世界, 高能物理学是探索微观物理世界最前沿的科学。相对论和量子力学已在 20 世纪科学技术发展中起到了决定性作用, 高能物理研究必将推进未来的科学技术发展, 超导超级对撞机是在世纪之交时一个重要的发展计划, 人们相信它将成为推动 21 世纪物理学发展的第一步。