

当前粒子物理研究中的几个热点

——记第 16 届国际轻子光子会议

郑志鹏 张长春

(中国科学院高能物理研究所研究员)

去年 8 月,第 16 届轻子光子国际会议在美国 Cornell 大学召开。来自世界各高能物理实验室的七百余名物理学家齐聚一堂,听取了实验与理论的近 30 篇专题报告。弱电统一和 QCD 标准模型获得实验更精确的检验,但是,顶夸克和 Higgs 粒子的寻找仍然是悬而未决的课题。

1. 轻子普适性经受了检验

按照弱电统一理论,自然界的轻子应具有以下性质,(a) 自旋为 $1/2$, (b) 中微子是左旋的, (c) 三代轻子: (e, ν_e) , (μ, ν_μ) 和 (τ, ν_τ) 具有完全相同的弱电统一相互作用。人们研究了 τ 轻子到 $e\bar{\nu}_e\nu_e$ 和 $\mu\bar{\nu}_\mu\nu_\mu$ 的衰变过程,测出 e 和 μ 的两个带电流弱作用耦合常数之比为 $\left(\frac{g_{\mu\nu}}{g_{e\nu}}\right)^2 = 0.997 \pm 0.012$, 同标准理论预期值 1 十分一致。因此, e 和 μ 之间良好的普适性得到了检验。但是,当人们观察 μ 和 τ 粒子的两个耦合常数之比时,却发现存在着可能的不一致(两倍标准偏差之外)。这个比值直接依赖于当时尚未精确测定的 τ 轻子的寿命 τ_τ 、质量 m_τ 和电子道衰变分支比, $\left(\frac{g_{\tau\nu}}{g_{\mu\nu}}\right)^2 = \left(\frac{\tau_\mu}{\tau_\tau}\right) \cdot B_r(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau) \left(\frac{m_\mu}{m_\tau}\right)^5$, 式

中 g_i 是耦合常数, τ_i 是轻子寿命, m_i 是轻子质量。世界高能物理界给予这一可能的差异以极大的关注。一年多来, τ 的电子道衰变分支比 B_r 的测量精度提高一倍,但其值改变甚微。这表明,原先的分支比值是正确的。1992 年以来,美国和西欧中心的五个实验组对 τ 轻子寿命做了比较精确的测量,新的世界平均值为 $(294.7 \pm 3.0) \times 10^{-13} \text{sec}$, 比原先的值下降 3.4%, 测量精度提高一倍。同一时期,世界上三个实验组发表了 τ 轻子质量的最新测量结果。北京的 BES 合作组采用 τ 对产生阈值附近扫描的方法,以最佳精度测出新的 τ 轻子质量为 $1776.9 \pm 0.3 \text{MeV}/c^2$, 比原先的值下降 $7.2 \text{MeV}/c^2$, 精度提高了一个量级。其他组采用不同方法,精度差于 BES 组,但所得结果与 BES 组一致。关于 τ 轻子性质的这三项测量,尤其是新的 τ 质量值,对 τ 轻子的普适性检验起了举足轻重的作用。现在, τ 与 μ 的两个耦合常数之比的最新结果是

$$\frac{g_{\tau\nu}}{g_{\mu\nu}} = 0.996 \pm 0.006, \text{ 同标准模型预期值 1 比较,已}$$

相当好地一致。会议总结报告指出, τ 质量、 τ 寿命和电子道衰变分支比已在一倍标准偏差内满足标准模型预期关系, $e - \mu - \tau$ 普适性在 $\pm 0.5\%$ 偏差内成立。

此外,物理学家们还研究了 $z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$ 中 τ 前后电荷不对称性和 z^0 的衰变宽度。结果也精确地证明: τ 轻子同电子、 μ 子一样,是满足轻子普适性假设的。现在,人们满意地看到, τ 轻子研究也步入了精确测量的时代。

2. LEP 实验精度进一步提高

在 CERN 中心 LEP 正负电子对撞机上,四个探测器已获得总数约 700 万 z^0 , 它们对 z^0 的质量和宽度以及其它标准模型参数的测量精度又有所提高。 M_z 的精度已达万分之一, Γ_z 的精度为千分之三。 $\sin^2 \theta_w$ 测量值为 0.2318 ± 0.001 。强作用耦合常数 $\alpha_s(M_z^2) = 0.120 \pm 0.006$ 。根据已测得的标准模型参数推算出顶夸克质量 $M_t = 164 \pm 17^{+18}_{-16} \text{GeV}$ 。

LEP 实验曾报道在 $e^+e^- \rightarrow z^0 \rightarrow f\bar{f}X, X \rightarrow \gamma\gamma$ 过程中,可能存在质量为 60GeV 的新粒子 X 。据这次会议的报告, LEP 上四个探测器,共找到 15 个 $e\bar{e}\gamma\gamma$ 和 $\mu\bar{\mu}\gamma\gamma$ 事例,它们的 $\gamma\gamma$ 不变质量落在 50 至 70GeV 之间。其中 9 个事例可以用已知 QED 过程解释。目前,尚不能确认衰变到 γ 对的 60GeV 新粒子的存在。积累更多的事例数目才能作出是与否的正确判断。

3. HERA 获得有兴趣的实验数据

人们十分关心 30GeV 电子和 820GeV 质子对撞后的实验结果。其上的两个实验 H1 和 ZEUS 在质子结构函数测量方面已获得一批有意义的结果。人们期待着,随着亮度的提高, HERA 的实验精度将不断改善,结果将更加丰富。

4. 粲夸克研究的进展

1974 年粲夸克的发现,拓宽了人们对粒子物理世界的认识范围。重夸克的性质及其衰变行为,成为人们检验标准理论正确性的重要领域。目前,中国、美国、

德国和西欧中心多个实验组活跃在这个领域,开展着十分有效的研究。

人们知道,上与下两种夸克是稳定的。作为物质世界组份的质子与中子,是由上、下夸克组成的,因而也是稳定的。奇异夸克的衰变早在 50 年代就有了研究,且发现了 $K^0 - \bar{K}^0$ 混合。粲夸克同上、下、奇异夸克相比,重得多,它的寿命比奇异夸克寿命小五个量级。理论计算表明,含底夸克的 B 介子和含粲夸克的 D_s 介子衰变到 $\tau\nu$ 的分支比分别为: $Br(B^+ \rightarrow \tau^+\nu) \sim 10^{-4}$, $Br(D_s^+ \rightarrow \tau^+\nu) \sim 10^{-2}$ 。因此,从实验的角度看,粲夸克在重夸克衰变性质的研究中起着十分重要的作用。为了弄清混合和 CP 破坏现象,人们以极大的兴趣期待着含重夸克的介子衰变常数 f_D 和 f_B 的实验测定。由于复杂的背景, B 介子的纯轻子衰变研究具有很大的难度。可望获得实验结果的将是含粲和奇异夸克的 D_s 介子的纯轻子衰变研究。在本届轻子光子国际会议上, f_{D_s} 常数的测量成了人们关注的热点之一。美国 CLEO 组在顶夸克对产生能区寻找 $D_s \rightarrow \mu\nu$ 衰变信号,测出 f_{D_s} 为 344 MeV。北京 BES 组在 D_s 对产生阈值附近也开展了 D_s 物理研究,且找到了清晰的 D_s 到 $\tau\nu$ 和 $\mu\nu$ 两个纯轻子衰变事例。人们预测,未来一、二年中, f_{D_s} 的测量将有一系列重要结果出现。北京 BES 组实验正精心取数与分析,准备抓住这一机遇,作出新的贡献。

粲粒子物理领域尚留有一批有兴趣的问题和疑难,有待人们做进一步的研究。例如, $\epsilon(2,2)$ 态的确认与自旋宇称研究, $f_0(975)$ 的行为, $\theta(1720)$ 附近的复杂结构, $\rho\pi$ 疑难等等。北京 BES 组实验已在这些研究中取得了引人注目的成果。此外,在粲夸克寿命测量和半轻子衰变研究方面,许多实验取得了进展,理论计算也趋于完善。

5. CP 破坏

早在二十几年前,人们就在 K^0 介子的研究中发现了 CP 破坏现象。但是,它的来源一直是粒子物理最基本的疑难之一。人们已经知道,CKM 矩阵将夸克质量本征态和弱作用本征态相互联系起来。在标准模型中,这个矩阵的复相位直接导致 CP 破坏的发生。根据这个机制,标准模型预言在中性 B 系统中存在一个较大的 CP 破坏效应。

美国 Fermi 实验室和西欧 CERN 中心的一些实验,正在对 CP 破坏现象进行研究。但是, K^0 系统的已有实验精度仍无法验证标准模型关于 CP 破坏的预期是否正确。人们期待着这些实验的更高统计的观察和其他新的更精确实验的开始。值得注意的是,意大利将于 1996 年建成 ϕ 介子工厂,日本与美国正考虑建造 B 介子工厂。同 K^0 系统一样, $B^0 - \bar{B}^0$ 混合是随时间变化的。这一点已被近期的实验所证实。混合的大小用 $B^0 - \bar{B}^0$ 质量差 Δm 与 B^0 衰变宽度 Γ 之比

描述,即 $x_d = \Delta m/\Gamma$ 。目前实验给出 B^0 介子的混合 $x_d = 0.65$ 至 0.75 。人们相信, K 和 B 介子的大量产生将有助于澄清 CP 破坏现象的奥秘。

6. 顶夸克和 Higgs 粒子的寻找

顶夸克和 Higgs 粒子的存在是标准模型所预言的,但是,长期以来一直未能在实验中找到。在轻子光子会议前夕,盛传美国 Fermi 实验室 CDF 和 D0 组将报告顶夸克存在的实验证据。但是,在他们的正式报告中,背景与可能的信号处于同一水平,他们未能给出顶夸克存在的证据。从顶夸克不同衰变道的研究中,目前实验给出的顶夸克质量下限于 113 和 140 GeV/ c^2 之间。有人根据标准模型作了一项估算:假设 Higgs 粒子质量为 300 GeV/ c^2 ,那么,从 LEP, CDF, D0 和中微子实验数据推算,顶夸克的质量预期为 164 GeV/ c^2 左右。美国 Fermi 实验室的 $P\bar{P}$ 加速器的对撞总能量可达 2000 GeV,在这座加速器上运行的 CDF 和 D0 组被认为是现在唯一有望找到顶夸克的两个实验组。由于在 $P\bar{P}$ 对撞中顶夸克对产生的截面依赖于顶夸克的质量。质量愈大,截面愈小,因而实验所需观察的时间愈长。然而,小截面的测量将面临大量背景水平的挑战。机遇与困难并存。人们期待着这两个实验的成功。

Higgs 粒子的预期质量范围相当之宽。实验的寻找仍停留在艰苦的探索阶段。目前,实验给出的 Higgs 质量下限为: $m_H > 63.5$ GeV/ c^2 (从最低限度标准模型出发), $m_H > 43.7$ GeV/ c^2 (从非最低限度标准模型出发)。

7. 结语

会议报告的实验结果丰富多采,本文没有全部收集与描述。例如 CLEO 实验找到了 8 个 B 介子衰变到 $K^*\tau$,并测到了分支比值。十多年前理论预言了这种称之为“企鹅图”过程,现在首次得到了实验证实。

70 年代以来,粒子物理迅速发展,以弱电统一和 QCD 标准模型的成功和 c, b 夸克、 τ 轻子、 $Z^0, W^\pm$ 等一系列粒子的发现达到高峰。人们在这个领域内不断探索与创造,新的发现层出不穷。1988 年 10 月,北京正负电子对撞机投入运行。1991 年起,中美物理学家合作开展北京谱仪实验。这个实验在 τ 轻子质量测量中取得成功,并且,在 $D_s, J/\psi$ 和 ψ' 等物理领域取得了可喜的成绩。去年 8 月轻子光子国际会议上,中国科学院高能物理所郑志鹏做了题为“BEPC/BES 进展”的学术报告,介绍了近一年来北京谱仪实验在 $\tau, D_s, J/\psi$ 和 ψ' 物理研究方面的最新成果,受到与会者的好评。人们有理由相信,在粒子物理世界的探索中,中国的实验与理论物理学家将会做出越来越多的贡献。