

在北京正负电子对撞机上进行的 粲物理与 τ 轻子物理研究

郑志鹏 张长春

(中国科学院高能物理研究所)

[摘要] 标准模型的成功和一系列新粒子的发现,使粒子物理学家们深受鼓舞。标准模型的精确检验已提上日程。在北京正负电子对撞机上开展的 BES 实验,抓住机遇,作出了贡献。实验精确测得的新的 τ 轻子质量在 τ 轻子普适性检验中起了重要的作用。BES 实验在粲物理研究(包括 D_s , J/ψ 和 ψ' 等)中,也取得了可喜的成绩。

70年代以来,粒子物理迅速发展,以弱电统一和量子色动力学标准模型的成功和粲夸克、底夸克、 τ 轻子、 Z^0 、 W^\pm 等一系列新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1月起,中美物理学家合作开展北京谱仪(BES)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/ψ 和 ψ' 等物理领域取得了可喜的成绩。

1. 标准模型

量子场论与规范理论十分成功地描述了粒子及其相互的作用。经过近20多年的探索,逐步建立与发展了一种称之为标准模型的粒子物理理论。标准模型是以三代夸克与轻子,弱电统一理论以及量子色动力学为框架建立起来的。人们在研究强相互作用粒子(简称强子)时,发现它们按照电荷与自旋等特征满足一定的对称性规律。正如原子内核与电子的构成规律解释了元素周期表一样,人们引入了“强子由六个更基本的粒子——夸克(现记为上、下、奇异、粲、底和顶夸克)组成”的概念,且发现这一概念满意地解释强子排列次序的对称性。人们进而将六个轻子和六个夸克划分成三组——即三代。属于第一代的电子和上、下夸克构成现实的物质世界。除了第三代的顶夸克尚没发现外,其它所有轻子与夸克都已在实验中被找到。弱作用与电磁作用统一的理论与实验很好地符合,它预言的三个中间玻色子 W^+ 、 W^- 和 Z^0 已在实验中发现。目前的大量实验事实,在很高精度上证实了弱电统一理论的正确性。量子色动力学是描述强作用的理论。它假设夸克存在“色”荷,正如粒子的电荷一样。同一种夸克允许带有三种不同颜色。作为夸克间相互作用媒介的胶子,也带有“颜色”。夸克之间的强相互作用随距离减小而变弱,即所谓的“渐近自由”。这个理论成功地解释了高能相互作用中强子产生过程。

标准模型的检验是当今粒子物理实验的重大课题。任何可能的不一致和尚未精确测定的物理量,都成了物理学家们研究与探索的目标。理论与实验都在寻求标准模型以外的理论和违反标准模型的实验——一种新物理的诞生。

本文部分工作是国家自然科学基金资助项目。

本文于1993年11月17日收到。

目前正在运行的高能加速器,集中在美国与西欧,主要有美国斯坦福加速器中心的 50×50 GeV e^+e^- 对撞机(SLC),Cornell 大学的 6×6 GeV e^+e^- 对撞机(CESR)和 Fermi 实验室的 1000×1000 GeV $p\bar{p}$ 对撞机;西欧中心的 55×55 GeV e^+e^- 对撞机(LEP)和 315×315 GeV $p\bar{p}$ 对撞机(SPPS),德国的 820 GeV 质子和 26 GeV 电子的 $e p$ 对撞机(HERA)。80 年代起,日本建造了 32×32 GeV e^+e^- 对撞机(TRISTAN)。中国开始步入高能物理研究领域,拥有了自己的 2.6×2.6 GeV e^+e^- 对撞机(BEPC)。这些加速器及其实验分布在粲夸克、底夸克、顶夸克和 Z^0, W^\pm 产生的不同能区。它们的研究目标是检验与发展标准模型理论,寻找顶夸克、Higgs 粒子及其他新现象。BEPC 对撞机的 e^+e^- 总能量较低,但是它的亮度高,BES 探测器的性能好,因此,BES 实验仍能在粲夸克和 τ 轻子能区做出出色的贡献。目前已投入建造的意大利 ϕ 介子工厂(DAONE)以及将投入建造的美国、日本的两座 B 介子工厂,目标都是标准模型的精确检验。

2. τ 轻子的质量与普适性检验

按照弱电统一理论,自然界的轻子应具有以下性质:

- (1) 自旋为 $1/2$;
- (2) 中微子是左旋的;
- (3) 三代轻子: $(e, \nu_e), (\mu, \nu_\mu)$ 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

$$\left(\frac{g_\mu}{g_e}\right)^2 = 0.997 \pm 0.012$$

同标准模型预期值 1 十分一致。因此, e 和 μ 之间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)。这个比值同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值直接有关:

$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)^2 = \left(\frac{\tau_\mu}{\tau_\tau}\right) \cdot B_r(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau) \left(\frac{m_\mu}{m_\tau}\right)^5$$

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 $(294.7 \pm 3.0) \times 10^{-15}$ 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,其中,北京 BES 合作组的精确结果尤其令人注目。

$\tau^+\tau^-$ 轻子对产生所需的最低 e^+e^- 对撞总能量称为 τ 轻子的产生阈值。阈值附近 $\tau^+\tau^-$ 产生截面可以从理论上加以计算。阈值附近 $\tau^+\tau^-$ 产生截面小,事例率低。但是,仔细的研究表明,这个区域对于测定 τ 轻子质量却是十分灵敏的。BES 实验采用阈值附近能量点扫描的方法,以最佳精度测定了 τ 轻子的质量。实验能量点是在阈值附近利用最大似然原理计算选定的,因而最大地提取了阈值附近有否 τ 轻子产生的信息。新测得的 τ 轻子质量为 1776.9 ± 0.3 MeV/ c^2 (c 是光速), 比原先世界平均值下降 7.2 MeV/ c^2 , 精度提高一个量级。其他实验组采用不同的方法,精度均差于 BES 组,但是,所得结果与 BES 组测量一致。

关于 τ 轻子性质的上述三项测量,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。 τ 与 μ 的两个耦合常数之比的最新结果是

$$\frac{g_{\tau\nu}}{g_{\mu\nu}} = 0.996 \pm 0.006$$

同标准模型预期值 1 比较,已相当好地一致。

现在,人们满意地看到, τ 轻子研究已步入精确测量的时代。 τ 轻子同电子、 μ 子一样,是满足轻子普适性假设的。在轻子普适性的这一检验中,北京 BES 合作组得到的 τ 质量新结果起了关键的作用。

3. 粲物理研究

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,成为人们检验标准模型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和中子,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

$$B_r(B^+ \rightarrow \tau^+ \nu) \sim 10^{-4}$$

$$B_r(D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu) \sim 10^{-2}$$

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夸克和奇异夸克的 D_s 介子的纯轻子衰变研究。在 1993 年 8 月国际轻子光子会议上, f_{D_s} 常数的测量成了人们关注的热点之一。

北京 BES 组在 $D_s^+ D_s^-$ 产生阈值附近开展了 D_s 物理研究。 e^+e^- 对撞总能量为 4.03 GeV。经过努力,这个实验找到了 $D_s^+ D_s^-$ 产生的清晰信号,准确测出 D_s 的质量为 1968.9 ± 1.3 MeV,首次测定在 4.03 GeV 下 $e^+e^- \rightarrow D_s^+ D_s^-$ 过程的产生截面。令人鼓舞的是,实验找到了两个作用图象清晰的 D_s 纯轻子衰变事例,一个是 $D_s \rightarrow \mu\nu$ 衰变,另一个是 $D_s \rightarrow \tau\nu$ 衰变。研究表明,来自其他作用过程的背景水平十分低。美国 CLEO 组在底夸克对产生能区寻找 $D_s \rightarrow \mu\nu$ 衰变信号,测出 $f_{D_s} = 344$ MeV,但是,他们的实验无法给出 D_s 纯轻子衰变的单个作用事例,推算中引用了理论模型的结果。这一重要测量面临着机遇与竞争。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谜,有待人们做进一步的研究。例如, $\xi(2.2)$ 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, $\rho\pi$ 疑谜等等。北京 BES 组实验已在这些研究中取得了成果。这个实验从 $J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$, $\gamma K^0 \bar{K}^0$, $\gamma \eta \eta$ 三个不同的衰变道找到了 $\xi(2.2)$ 的清晰信号,确认 ξ 态的存在。 $\theta(1720)$ 被认为是胶球的候选者之一。关于这个态的自旋宇称,实验存在着 2^{++} 与 0^{++} 的两种结果。BES 组的研究表明, $\theta(1720)$ 可能是 2^{++} 与 0^{++} 两种态的复杂结构。 $f_0(975)$ 究竟是 $s\bar{s}$ 夸克对组成的,还是一个 $K\bar{K}$ 分子态,是尚未解决的问题。BES 实验提供了 $f_0(975)$ 是 $K\bar{K}$ 分子态的证据。这些研究结果,已引起了粒

子物理界的兴趣与重视。

今年 8 月举行的国际轻子光子会议上,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粲物理与 τ 轻子物理方面的最新研究成果,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。

CHARM AND τ LEPTON PHYSICS RESEARCH AT BEPC/BES

Zheng Zhipeng Zhang Changchun

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

Abstract

Physicists are greatly inspired by success of the Standard Model and discoveries of a series of new particles. Accurate test of the Standard Model is now put on the order of the day. The BES experiment at BEPC electron-positron collider has seized the opportunity and made its remarkable contribution. The new mass of tau lepton precisely measured by this experiment has played a significant role in the test of lepton universality. Fruitful results in the studies of charm physics, including D_s , J/ψ and ψ' , from BES are obtained.

· 信息 ·

哈勃空间望远镜返回清晰星云照片

美国哈勃空间望远镜科学小组最近展示了哈勃望远镜整修后发回的第一张照片,并宣布,哈勃的整修结果超出他们的预想。

12 月初,工作在航天飞机上的宇航员为哈勃新换了望远镜的宽视野/行星照相机(WFPC)、太阳能极板、旋转望远镜,改进了计算机,安装了透镜系统(COSTAR),该系统的工作已完全恢复。

一些利用这台望远镜的科学研究最近已开始进行。小组的科学家们说,新 WFPC 的图象比维修前的照片,包括用计算机进行处理,消除了缺陷透镜影响的照片,要清楚一倍。

约有 1200—1500 位天文学家正等待使用该望远镜,优先安排的研究项目包括用摄谱图寻找黑洞的证据和寻找围绕其它恒星运行的行星的踪迹。

(孙超 编译自 *Nature*)