

高能物理的实验现状

祝玉灿

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘 要 本文简要介绍国内外高能物理发展的最新状况,概述了国外对顶夸克存在的证据、电弱相互作用的精密检验及重味物理与轻子物理的进展.另外,还介绍了在北京谱仪上,有关 τ 质量测量、 J/ψ 衰变性质、 ψ' 衰变性质及 D_s 衰变性质方面的最新结果.

关键词 北京谱仪, 夸克, 标准模型.

1 国外现状

1.1 顶夸克存在的证据

1977 年,费米实验室找到了 b 夸克存在的第一个证据后,于 1993 年在 Tevatron 质子反质子对撞机上,其质心能量为 1.8TeV,由 CDF 和 D_0 两个实验组分别公布了他们的实验结果,CDF 组找到了顶夸克存在的证据,而 D_0 组认为还没有观察到足够多的事例,其具体的数据情况见表 1.

表 1

衰变模型	CDF		D_0	
	事例	本底	事例	本底
dilepton	2	0.56 ± 0.13	1	0.8 ± 0.1
$e, \mu + \text{jet}(\text{SVX})$	6	2.3 ± 0.3	4	1.8 ± 0.9
Semilepton(SLT)	7	3.1 ± 0.3	2	0.6 ± 0.2
Total	15	5.96 ± 0.44	7	3.2 ± 1.1

由表 1 给出顶夸克的质量为 $174 \pm 10 \pm 13 \text{ GeV}$. 这个结果与标准模型给出的结果存在着惊人的一致.当然,西欧中心 LEP 正负电子对撞机在前一阶段对顶夸克质量的推测结果也起着举足轻重的作用.

1.2 电弱相互作用的检验

自一百年前 β 衰变现象的发现,1973 年中性流和 1983 年 W 玻色子的发现,逐步地在电弱相互作用的描述上形成了量子味动力学,它成功地解释和预言着实验结果.迄今许多实验都在对电弱相互作用的理论进行精密的检验.其实验数据如下:

$$M_Z = 91.1888 \pm 0.0044 \text{ GeV}$$

$$\Gamma_Z = 2.4974 \pm 0.0038 \text{ GeV}$$

$$M_W = 80.23 \pm 0.18 \text{ GeV}$$

$$A_{LR}^e = 0.1637 \pm 0.0075$$

$$\sin^2 \theta_{\text{eff}} = 0.2294 \pm 0.0010$$

$$\sin^2 \theta_{\text{eff}} = 0.2320 \pm 0.0016$$

} 轻子不对称性实验
带电夸克不对称性实验

$$R_1 = \Gamma_{\text{had}} / \Gamma_{\text{lep}} = 20.795 \pm 0.040$$

$$A_{FB}^{0,1} = 0.0170 \pm 0.0016$$

$$A_\tau = 0.143 \pm 0.014$$

$$A_e = 0.135 \pm 0.011$$

$$R_b = \Gamma_{bb} / \Gamma_{\text{had}} = 0.2202 \pm 0.0020$$

$$R_c = \Gamma_{cc} / \Gamma_{\text{had}} = 0.1583 \pm 0.0098$$

$$A_{FB}^{0,b} = 0.0967 \pm 0.0038$$

$$A_{FB}^{0,c} = 0.0760 \pm 0.0091$$

可以看出,实验检验电弱相互作用的精度已经达到千分之几的水平.

1.3 重味夸克物理参数的测量

有关单举 b 寿命的测量,从双极角方法和顶点重建方法对终态为 J/ψ , 强子和轻子全部统计给出 b 的寿命为 $1.55 \pm 0.06 \text{ ps}$.

关于 B_u^+ 和 B_s^0 介子寿命的测量,利用三种不同技术给出 $\tau_{B^+} = 1.652^{+0.035}_{-0.034} \pm 0.060 \text{ ps}$ 和 $\tau_{B^0} = 1.604^{+0.073}_{-0.069} \pm 0.050 \text{ ps}$.

另外,从 D_s^+ 衰变到 $\Phi\pi$ 或者 K^*K 还给出 B_s^0 的寿命为 $1.54^{+0.13}_{-0.11} \pm 0.05 \text{ ps}$. 有关 b 重子寿命测量是通过 Λ 和轻子及 Ξ 和轻子终态给出 $\tau_{\Lambda_b} = 1.16^{+0.10}_{-0.09} \pm 0.05 \text{ ps}$, $\tau_{\Xi_b} = 1.5^{+0.7}_{-0.4} \pm 0.3 \text{ ps}$.

除寿命测量外,LEP、CLEO 和 ARGUS

实验组还给出了 b 的半轻子衰变的分支比, 其结果分别为 $(11.3 \pm 0.3 \pm 0.3)\%$ 、 $(10.98 \pm 0.10 \pm 0.33)\%$ 和 $(9.70 \pm 0.50 \pm 0.40)\%$.

关于 B_s 的质量, 实验上给出 $5368.0 \pm 3.7\text{MeV}$ 而理论上给出 $5367 \pm 10\text{MeV}$.

b 夸克最激动人的发展是检验标准模型的 CP 破坏. 而 CKM 矩阵元的测定又是至关重要. 目前这些最新结果如下:

- $|V_{ud}| = 0.9744 \pm 0.0010$
- $|V_{us}| = 0.2205 \pm 0.0018$
- $|V_{cd}| = 0.204 \pm 0.017$
- $|V_{cs}| = 1.00 \pm 0.02$
- $|V_{cb}| = 0.0387 \pm 0.0027$
- $|V_{tb}| = 0.998 \sim 0.9995$
- $|V_{ub}/V_{cb}| = 0.08 \pm 0.03$
- $|V_{td}/V_{ts}| = 0.12 \sim 0.34$
- $|V_{ts}/V_{cb}| = 0.62 \sim 1.1$

目前美国 SLAC 和日本 KEK 都计划本世纪末建成 B 介子工厂, 重要的物理目标就是探测 CP 破坏的效应.

1.4 轻子物理

电子和 μ 的质量测定已经相当精密, 而 τ 轻子质量和寿命的测量一直吸引着众多的实验室. 目前 τ 的寿命为 $\langle \tau_\tau \rangle = 290.8 \pm 1.5\text{fs}$, 质量为 $\langle m_\tau \rangle = 1777.00 \pm 0.26\text{MeV}$, 北京谱仪给出的数值为 $(m_\tau) = 1776.96^{+0.13+0.20}_{-0.19-0.16}\text{MeV}$, 此值得到了国际上的高度评价. 半轻子衰变的分支比为 $\langle B_r(\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu}) \rangle = (17.66 \pm 0.11)\%$. 前几年对轻子普适性曾一度表示怀疑, 目前的最新结果表明它还是正确的. 具体数据如下: $g_\tau/g_\mu = 0.995 \pm 0.004$, $g_\mu/g_e = 1.003 \pm 0.003$. 另外有关中微子的质量信息也是十分引人注目的, 其电子中微子质量上限为 $\leq 4.5\text{eV}$, 而 τ 中微子的上限为 $\leq 29\text{MeV}$. 许多精细测量的实验安排仍在向前推进.

简而言之, 国际上高能物理的发展趋势正在朝着两个方向前进. 一是超高能, 目标是寻找新粒子, 像顶夸克和 Higgs 的寻找和发现. 二是超流强超精细, 在已经发现的粒子里

寻找新现象, 像 CP 破坏效应的直接观察. 前者的代表是西欧研究中心 LHC 工程计划, 后者的代表是美国和日本的 B 介子工厂建造计划, 相应还有 Φ 介子和 τ -C 介子工厂的考虑.

2 国内现状

北京正负电子对撞机单束能量运行在 $1.5 \sim 2.8\text{GeV}$, 北京谱仪为一个通用型谱仪, 它的物理目标是研究 τ 物理和粲物理. 自 1989 年运行以来, 成功地获取了 $9 \times 10^6 J/\psi$ 事例; 140 万 ψ' 事例; 目前正在增加统计取数; 5pb^{-1} 的 $\tau^+\tau^-$ 供 τ 质量的测量; 22.3pb^{-1} 的 D_s 供 D_s 物理分析. 在此基础上进行大量的数据处理和刻度, 形成供物理分析使用的数据, 进而取得了许多重要的物理结果.

2.1 τ 质量测量

第一阶段基于 14 个 $e-\mu$ 事例给出 τ 质量的测定值为 $m_\tau = 1776.9 \pm 0.4 \pm 0.2\text{MeV}$, 在国际上得到了高度赞赏. 随后, 又增加了新衰变道的分析, 像 $ee, e\mu, e\pi, eK, \mu\mu, \mu\pi, \mu K, \pi\pi$ 和 KK , 总共 64 个事例, 从而, 使统计误差改善, 给出的新测量值为 $m_\tau = 1776.9 \pm 0.2 \pm 0.2\text{MeV}$, 较国外老的测量值低 7.2MeV . 由此轻子的耦合强度比 (g_τ/g_μ) 也由原来的 0.941 ± 0.025 变成 0.995 ± 0.006 , 从而排除了对轻子普适性的怀疑.

2.2 ψ' 衰变性质的研究

轻子的普适性一直为人们所关注, 由 ψ' 衰变到 e, μ 和 τ 对的分支比关系是否遵照如下的关系, 是重要检验途径之一

$$\frac{B_{\tau\tau}}{0.3885} \approx B_{\mu\mu} \approx B_{ee}$$

实验上曾经给出 $B_{\mu\mu}$ 和 B_{ee} 值, 分别为 $(8.8 \pm 1.3) \times 10^{-3}$ 和 $(7.7 \pm 1.7) \times 10^{-3}$. 迄今没有公布过 $\psi' \rightarrow \tau^+\tau^-$ 的分支比, BES 利用 2.1pb^{-1} 积分亮度下的 ψ' 数据, 首次给出了 $B_{\tau\tau}$ 的数据为 $(3.69 \pm 0.71 \pm 0.66) \times 10^{-3}$.

干扰量子色动力学 (PQCD) 对描述强子过程是十分成功的, 它给出如下的预言

$$\frac{B_r(\psi' \rightarrow \text{hadron})}{B_r(J/\psi \rightarrow \text{hadron})} = \frac{B_r(\psi' \rightarrow \text{ggg})}{B_r(J/\psi \rightarrow \text{ggg})} = (14 \pm 2)\%$$

然而, Mark I 发现 ψ' 衰变到 $\rho\pi$ 时, K^*K 并不像以上给出的比例那样, 而是压低的相当大. 对于 $\rho\pi$ 而言, 比例仅仅为 0.5%, 这种现象人们称之为 (V-P) puzzle. BES 基于 $1.27 \times 10^6 \psi'$ 数据, 除了 $\rho\pi$ 压低现象重复以外, 还观察到 $\psi' \rightarrow \omega f_2(1270), f_2(1270) \rightarrow \pi^+\pi^-$ 这个新衰变道也存在着压低现象, 其比例为 0.9%. 这意味着不仅 ψ' 衰变到矢量介子和赝标介子的过程存在压低, 而且 ψ' 衰变到矢量介子和张量介子的过程也存在压低, 为重新认识这一压低现象的起源提供重要的线索.

2.3 D_s 衰变性质的研究

在 B 介子物理中估算 CP 破坏效应, 如果知道顶夸克质量的话, 还需要知道一个常数 f_B , 而用格点规范理论估算 f_B 时, 又需要知道 f_{D_s} , 因此 f_{D_s} 的测量是十分有意义的. BES 基于 22.3 pb^{-1} 的积分亮度, 在 4.03 GeV 质心能量点上的 D_s 数据, 选择 D_s 衰变到 $\mu\nu$ 纯轻子道的事例, 这样可以直接地模型无关地测量到分支比, 即 $B_r(D_s \rightarrow \mu\nu) = (1.4^{+1.2}_{-0.7}) \times 10^{-2}$. 利用如下关系

$$B_r(D_s \rightarrow \mu\nu) = \tau_{D_s} \Gamma(D_s \rightarrow \mu\nu)$$

由 D_s 的寿命值为 $\tau_{D_s} = (4.50^{+0.30}_{-0.26}) \times 10^{-13} \text{ s}$, 便可计算出 D_s 衰变到 $\mu\nu$ 的分宽度 $\Gamma(D_s \rightarrow \mu\nu)$. 而 f_{D_s} 与分宽度 $\Gamma(D_s \rightarrow \mu\nu)$ 之间又存大着如下关系

$$\Gamma(D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu) = \frac{G_F^2 |V_{cs}|^2}{8\pi} f_{D_s}^2 \cdot m_{D_s} \cdot m_\mu^2 \left(1 - \frac{m_\mu^2}{m_{D_s}^2}\right)^2$$

其中, G_F 为费米常数, $|V_{cs}|$ 为 CKM 矩阵元之一, 其数值为 $V_{cs} = 0.974$, 由此可以给出 f_{D_s} 的数值

$$f_{D_s} = (434^{+153+35}_{-133-33}) \text{ MeV}$$

2.4 J/ψ 衰变性质的研究

在这个能区的物理热点之一就是寻找和确认胶子球的存在, BES 紧紧围绕了几个胶子球候选做出有特色的工作.

在 1 GeV 附近 $f_0(975)$ 共振态的发现已有 20 多年的历史了, 但是, 它的性质一直是模糊不清的. 早期, 有人认为它可能是一个胶子球; 后来有人认为它可能是一个四夸克态, 或是一个 KK 分子态, 也可能是一个 $q\bar{q}$ 普通介子态等等. BES 通过 $J/\psi \rightarrow \Phi\pi^+\pi^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \omega\pi^+\pi^-$ 的分析, 发现反冲 Φ 和 ω 的 f_0 , 其质量和宽度都有差异, 其 $\pi^+\pi^-$ 的不变质量谱如图 1 所示. 反冲 Φ 的 $f_0, m = (969 \pm 4) \text{ MeV}$,

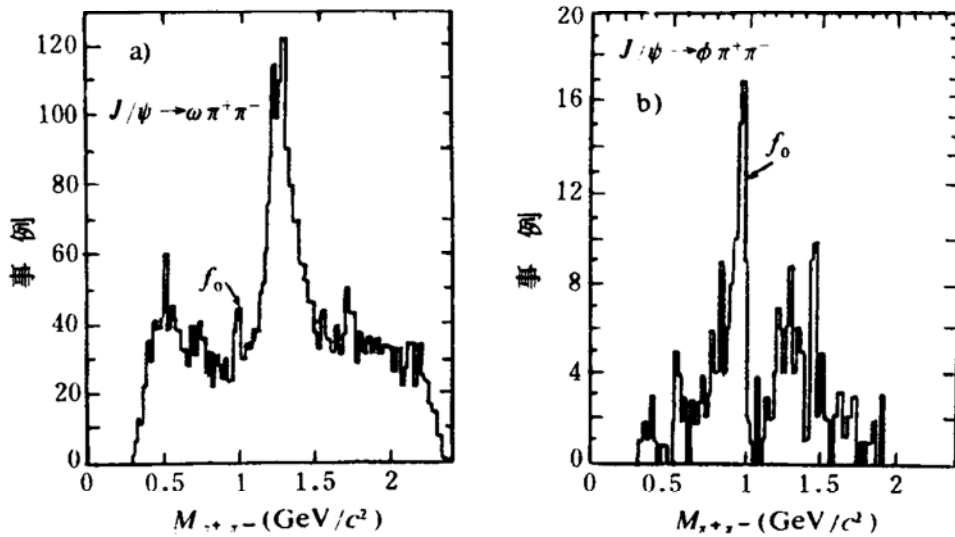


图 1

$\Gamma = (43 \pm 8) \text{MeV}$. 反冲 ω 的 $f_0, m = (985 \pm 9) \text{MeV}, \Gamma = (11 \pm 6) \text{MeV}$.

在 $(1.4) \text{GeV}$ 附近 $\tau(1440)$ 共振态, 是具有复杂结构的宽共振, 其中有两个 0^{-+} 和一个 1^{++} 的成分, 然而 Mark III 和 DM I 给出的

三个成分所对应的质量位置、宽度及衰变模式都有不吻合的地方. BES 企图把这些复杂成分, 通过先选定模式, 再做出不变质量谱. 结果表明, 某个成分可以分离出来, 使分析工作简化, 结论清楚, 如图 2 所示.

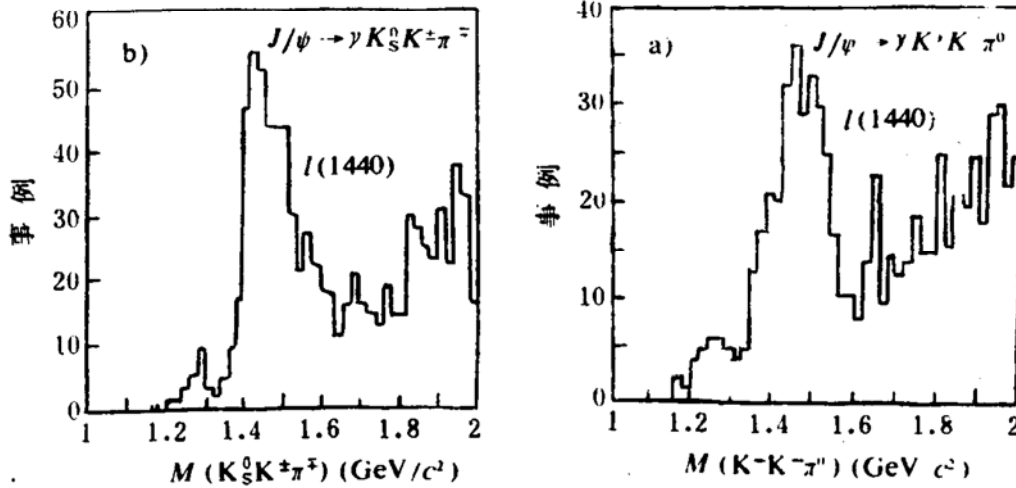


图 2

在 $(1.7) \text{GeV}$ 附近 $\theta(1720)$ 共振态, 早期认为它的自旋宇称为 2^{++} , 1992 年 Mark III 认为, 0^{++} 是一个主要成分; BES 利用矩分析方法, 给出在低质量端为 2^{++} , 在高质量端为 0^{++} 的复杂成分的看法, 见表 2.

表 2

质量区间	事例数	成分比例	
		0^{++}	2^{++}
$(1.65 \sim 1.71) \text{GeV}$	79	15%	85%
$(1.71 \sim 1.85) \text{GeV}$	144	56%	44%

在 $(2.2) \text{GeV}$ 附近 $\xi(2230)$ 共振态, Mark III 通过 $J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma K_S^0 K_S^0$ 观察到它是一个窄共振态, 而 DM I 没有观察到这个共振态. 近几年来, BES 一直投入较多的人力通过多种衰变模式, 研究这一共振态. BES 不仅通过 $J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma K_S^0 K_S^0$ 观察到这个共振态, 而且通过 $J/\psi \rightarrow \gamma P \bar{P}$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^-$ 也观察到它, 其对应的测量结果如下和如图 3 所示.

$$J/\psi \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^-$$

$$M_\xi = (2235 \pm 4 \pm 6) \text{MeV}$$

$$\Gamma_\xi = (19^{+11}_{-11} \pm 12) \text{MeV}$$

$$B_\gamma(J/\psi \rightarrow \gamma \xi) \cdot B_\gamma(\xi \rightarrow \pi^+ \pi^-) = (5.6^{+1.8}_{-1.6} \pm 1.4) \times 10^{-5}$$

$$J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$$

$$M_\xi = (2230^{+6}_{-7} \pm 12) \text{MeV}$$

$$\Gamma_\xi = (20^{+20}_{-15} \pm 12) \text{MeV}$$

$$B_\gamma(J/\psi \rightarrow \gamma \xi) \cdot B_\gamma(\xi \rightarrow K^+ K^-) = (3.3^{+1.6}_{-1.3} \pm 1.1) \times 10^{-5}$$

$$J/\psi \rightarrow \gamma P \bar{P}$$

$$M_\xi = (2235 \pm 4 \pm 5) \text{MeV}$$

$$\Gamma_\xi = (15^{+12}_{-9} \pm 9) \text{MeV}$$

$$B_\gamma(J/\psi \rightarrow \gamma \xi) \cdot B_\gamma(\xi \rightarrow P \bar{P}) = (1.5^{+0.6}_{-0.5} \pm 0.5) \times 10^{-5}$$

$$J/\psi \rightarrow \gamma K_S^0 K_S^0$$

$$M_\xi = (2232^{+8}_{-7} \pm 15) \text{MeV}$$

$$\Gamma_\xi = (20^{+25}_{-16} \pm 10) \text{MeV}$$

$$B_\gamma(J/\psi \rightarrow \gamma \xi) \cdot B_\gamma(\xi \rightarrow K_S^0 K_S^0) = (2.7^{+1.1}_{-0.9} \pm 1.0) \times 10^{-5}$$

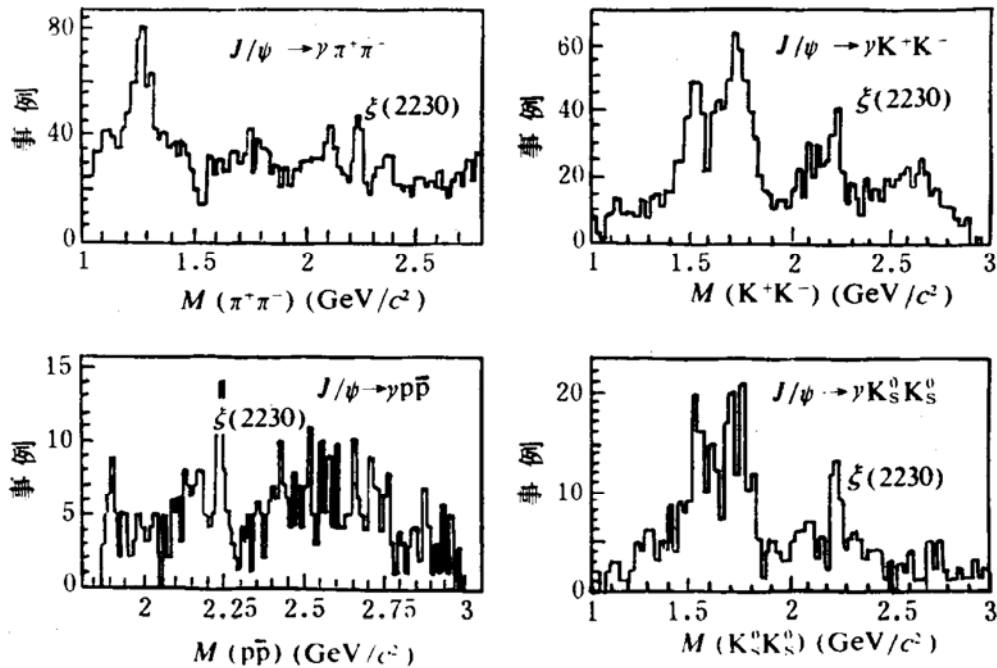


图3

通过分析,可以看出 ξ 的行为服从味对称性;是一个窄共振;在 J/ψ 的辐射衰变中产

生率高. BES的这些结果为确认 ξ 可能是一个胶子球态提供了丰富和重要的论据.

Recent Experiment Status of High Energy Physics

Zhu Yucan

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract The recent experiment status of high energy physics in the world are presented briefly. The evidence for the TOP quark, precision test of EW interaction, heavy flavor physics and lepton physics are summarized in the first part. The second part introduces the new results on τ mass measurement, ψ' decay, D_s decay and J/ψ decay performance from BES.

Key Words Beijing spectrometer, quark, standard model.

(上接 40 页)

The Multi-fragmentation of Hot Nucleus

Dai Guangxi Wu Heyu Li Zuyu Jin Genming Luo QingZheng

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract A summary status of experimental and theoretical research in multi-fragmentation of single hot nucleus both in home and abroad is reviewed, especially some experimental results performed at Lanzhou recently are reported in detail.

Key Words hot nucleus, multi-fragmentation.