

# 强子事例分析

董宝中

(中国科学院高能物理研究所,北京)

## 摘 要

这里发表的是 Mark-J 合作组获取的终态为强子的实验数据分析. 质心系能量由 12GeV 到 46.78GeV, 总的时间积分亮度为  $128.06\text{Pb}^{-1}$ . 通过  $R$  值的测量可以确定是否有新的夸克产生. 实验结果给出, 在这个能量范围内  $\langle R \rangle = 3.85 \pm 0.02 \pm 0.12$ , 与五味夸克的 QCD 预期值 3.9 一致, 表明没有顶夸克产生. 在能量范围 39.79GeV 到 46.78GeV 寻找顶夸克素的窄共振态, 发现最大的  $B_h \cdot \Gamma_{ee}$  值在  $\sqrt{S} = 45.12 \pm 0.04\text{GeV}$  处,  $B_h \cdot \Gamma_{ee}$  的上限为 3.00keV (95% 置信度).

## 一、引 言

丁肇中教授领导的 Mark-J 合作组利用西德汉堡电子同步加速器研究所 (DESY) 的 PETRA 正、负电子对撞机作高能物理实验. 作者于 1983 年 10 月至 1985 年 3 月参加了该合作组的强子离线分析工作. 1984 年底在 PETRA 运行至最高能量 (46.78GeV) 后, 作者计算了不同质心系能量下的接收度, 重新确定了  $\tau$  事例和双光子事例对  $R$  值的污染, 重新计算了 Mark-J 合作组自 1979 年 9 月开展实验工作以来各扫描能量 (从 12GeV 到 46.78GeV) 下的  $R$  值, 并以此为基础作了一系列的数据分析工作.

测量正、负电子单光子湮灭过程中强子的总截面和角分布, 可以寻找新的夸克及其窄共振态. 由于强子截面也对虚光子  $\gamma$  和  $Z^0$  干涉效应敏感, 所以亦可以此确定电弱混合角  $\sin^2\theta_w$ . 下面将叙述这些实验结果.

## 二、强子总截面

通常将正、负电子湮灭过程的强子截面表示为:

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子})}{\sigma_{\text{point}}} \quad (1)$$

这里  $\sigma_{\text{point}}$  是正负电子湮灭中类点粒子对产生的 QED 截面:

$$\sigma_{\text{point}} = \frac{4\pi\alpha^2}{3S} = 86.85\text{nb} \frac{\text{GeV}^2}{S} \quad (2)$$

其中,  $\alpha$  是电磁耦合常数,  $\alpha = \frac{1}{137.04}$ ;  $S$  是质心系能量的平方。

根据夸克——部分子模型 (QPM)  $R$  值为:

$$R_{\text{QPM}} = 3 \sum_i^{N_f} Q_i^2 \quad (3)$$

其中,  $Q_i$  表示味道为  $i$  的夸克的电荷;  $\sum_i^{N_f}$  表示对所有产生的夸克味道求和; 乘以因子 3 是由于夸克存在三种颜色。

根据量子色动力学 (QCD), 在计算  $R$  值时还必须考虑胶子的辐射和高次效应的影响, 加上这些修正后强子截面应为<sup>[1]</sup>:

$$R_{\text{QCD}} = R_{\text{QPM}} \left[ 1 + \frac{\alpha_s}{\pi} + (1.98 - 0.115 N_f) \frac{\alpha_s^2}{\pi^2} \right] \quad (4)$$

其中  $\alpha_s$  是强相互作用耦合常数;  $N_f$  是所产生的夸克的数目。

如再考虑电弱效应的影响,  $R$  的理论值应为<sup>[2]</sup>:

$$R_{\text{QCD,EM}} = 3 \sum_i^{N_f} \left\{ Q_i^2 - 2 \cdot S \cdot g \cdot Q_i \cdot g_V^e \cdot g_V^q \cdot \eta \right. \\ \left. + S^2 \cdot g^2 \cdot [(g_V^e)^2 + (g_A^e)^2] \cdot [(g_V^q)^2 + (g_A^q)^2] \cdot \eta^2 \right\} \\ \cdot \left[ 1 + \frac{\alpha_s}{\pi} + (1.98 - 0.115 N_f) \cdot \frac{\alpha_s^2}{\pi^2} \right] \quad (5)$$

其中  $g_V$  和  $g_A$  表示电子或夸克的弱中性流矢量和轴矢量耦合常数;

$$g = \frac{1}{4 \sin^2 \theta_w \cdot \cos^2 \theta_w \cdot M_Z^2} = \frac{G_F}{2 \sqrt{2} \pi \alpha}; \quad \eta = \frac{M_Z^2}{S - M_Z^2}$$

$M_Z$  是  $Z^0$  的质量。

按照 Glashow-Weinberg-Salam 理论  $g_V$  和  $g_A$  与电弱混合角  $\sin^2 \theta_w$  有如表 1 所示的关系。

表 1 电子和夸克的矢量和轴矢量耦合常数

粒 子	$g_V$	$g_A$
电 子	$-1/2 + 2 \cdot \sin^2 \theta_w$	$-1/2$
$u, c, t$ 夸克	$1/2 - 4/3 \cdot \sin^2 \theta_w$	$1/2$
$d, s, b$ 夸克	$-1/2 + 2/3 \cdot \sin^2 \theta_w$	$-1/2$

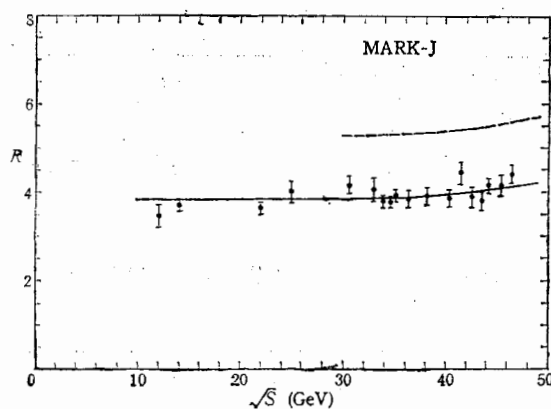
图 1 是 Mark-J 合作组测得的  $R$  值的数据。表 2 列出了不同质心系能量区间内  $R$  的平均值。数据是由 42768 个强子事例得出的, 相应的时间积分亮度为  $128.06 \text{ Pb}^{-1}$ 。已经对实验数据作了辐射修正和接收度的修正; 扣除了来自  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \text{强子} + X (\Delta R_{\tau\tau} = 0.18)$  和来自  $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + \text{强子} (\Delta R_{\tau\tau} = 0.02)$  的本底。在我们使用的判选条件下和 PETRA 的能量范围内,  $e^+e^- \rightarrow \text{强子}$  反应的接收度为 80—85%。辐射修正值为  $1.192 + 0.004476 \sqrt{S}$ , 是随质心系能量变化的。

表 2  $R$  的实验值

质心系能量 $\sqrt{s}$ (GeV)	$R$	误差
12.000	3.47	0.27
14.033	3.71	0.13
21.993	3.65	0.14
25.003	4.02	0.24
30.605	4.17	0.20
32.978	4.07	0.27
33.883	3.80	0.13
34.633	3.80	0.12
35.118	3.94	0.13
36.360	3.86	0.19
38.143	3.92	0.20
40.359	3.88	0.20
41.503	4.44	0.25
42.502	3.89	0.23
43.510	3.81	0.20
44.234	4.15	0.15
45.481	4.17	0.23
46.472	4.42	0.22

$R$  的平均值  $\langle R \rangle = 3.85 \pm 0.02 \pm 0.12$

注:  $R$  值的误差包括统计误差和逐点的系统误差 3%, 这两项是平方相加的。

图 1  $e^+e^- \rightarrow$  强子的截面值  $R$ 

• 实验点 — 5 夸克预期值 --- 6 夸克预期值

图 1 中的实线是由 (5) 式算出的对五味夸克的  $R$  预期值, 它与实验数据符合得很好。计算时选取参数值  $\alpha_s = 0.13$ ,  $\sin^2\theta_w = 0.23$ 。图 1 中的虚线是对六味夸克的预期值。

### 三、寻找“开放”顶夸克

在强子连续区寻找顶夸克  $t$  (即第六味夸克) 是极为重要的。如上节所述,  $R$  值对夸

克的味道数极为敏感, 如在我们所测的能量范围内存在顶夸克, 那么测得的  $R$  值应约为 5.3 (如图 1 虚线所示)。如表 2 所示, 实验测得的  $\langle R \rangle = 3.85 \pm 0.02 \pm 0.12$ , 与五味夸克的预期值 3.9 是一致的, 没有迹象表明存在顶夸克。

当出现顶夸克阈值时, 研究冲度分布是另一种十分敏感的方法。在 Mark-J 数据分析中,

$$T = \max_i \frac{\sum_i |\mathbf{E}_i \cdot \mathbf{e}_L|}{\sum_i |\mathbf{E}_i|} \quad (6)$$

其中  $\mathbf{E}_i$  是击中量能器第  $i$  单元的一个粒子或一组粒子的能流矢量;  $\mathbf{e}_L$  是单位矢量, 改变它的方向, 直到使 (6) 式的右边取最大值为止。如果一个虚光子转化为夸克和反夸克对, 且每个夸克的质量都接近束流能量, 那么这对夸克在产生时将几乎是静止的, 它们碎裂而成的强子应该各向同性, 冲度  $T$  约为 0.5, 这是  $T$  的一个极限值; 反之, 远离上述阈值而产生的夸克和反夸克对作高速运动, 对实验系而言, 其强子碎裂产物经洛伦兹变换形成集中在原始夸克方向上的强子喷注。束流能量越高, 喷注变得越窄, 冲度接近于 1。因此, 若跨越一个新夸克的阈值, 则低冲度事例应明显增多。图 2 中圆点表示由实验数据得出的归一化的冲度分布曲线, 质心系能量范围为 39.79 到 46.78 GeV, 实线表示用蒙特卡洛方法求出的五味夸克的 QCD 预期冲度分布曲线, 两者符合得很好。虚线表示的是六味夸克的预期分布曲线。由冲度分布推出的结论与  $R$  值是一致的。

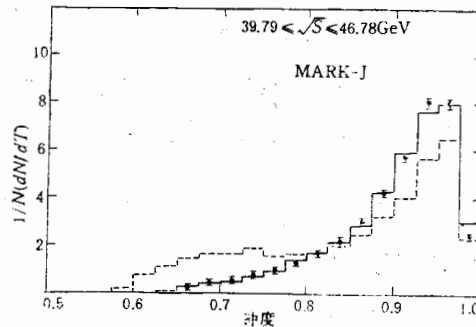


图 2  $e^+e^- \rightarrow$  强子事例的冲度分布

● 实验点 — 5q-MC --- 6q-MC

#### 四、寻找“隐藏”的顶夸克

顶夸克除对强子连续态有贡献外, 与  $(c\bar{c})$  和  $(b\bar{b})$  束缚态类似, 顶夸克素 ( $t\bar{t}$ ) 系统亦应形成束缚态。尤其是  $1s$  态及  $2s$  态作为窄共振态应该更容易观察到。为了寻找窄共振态, 在下述质心系能量范围内进行了精细能量扫描 (步长  $\Delta\sqrt{S} = 20$  或  $30 \text{ MeV}$ )

$$29.90 \text{ GeV} \leq \sqrt{S} \leq 31.46 \text{ GeV}$$

$$33.00 \text{ GeV} \leq \sqrt{S} \leq 36.72 \text{ GeV}$$

$$37.94\text{GeV} \leq \sqrt{S} \leq 38.63\text{GeV}$$

$$39.79\text{GeV} \leq \sqrt{S} \leq 46.78\text{GeV}$$

为了得到窄共振态产生截面的上限,用函数

$$R = R_0 + R_{res}(M_x, B_h \cdot \Gamma_{ee}) \quad (7)$$

对实验值进行拟合. 这里  $R_0$  是连续区的  $R$  值, 为常数;  $R_{res}(M_x, B_h \cdot \Gamma_{ee})$  是描述顶夸克共振态的函数, 已作了辐射效应<sup>[3]</sup>和对撞机能量分辨率的修正;  $M_x$  是假设的共振态质量;  $B_h$  是共振态衰变成强子的分支比;  $\Gamma_{ee}$  是衰变成正、负电子对的宽度.

在能量扫描范围 39.79GeV 到 46.78GeV 内进行拟合, 得到与数据一致的最大  $B_h \cdot \Gamma_{ee}$  值在  $\sqrt{S} = 45.12 \pm 0.04\text{GeV}$  处. 图 3 给出了在这个能量附近的  $R$  值和共振曲线. 图中的实线和虚线分别对应于 68% 和 95% 置信度的情况.  $B_h \cdot \Gamma_{ee}$  的上限为 3.00keV (95% 置信度).

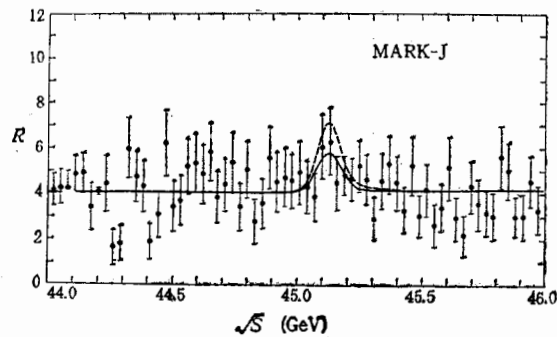


图 3  $e^+e^- \rightarrow$  强子截面  $R$  与能量的函数关系

由实验事实得知, 矢量介子基态  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $J$  和  $Y$  的  $\Gamma_{ee}/e_q^2$  约为  $10\text{keV}^{[4]}$ , 且预期  $B_h$  的量级为 80%<sup>[5]</sup>, 若夸克的电荷为  $\frac{2e}{3}$ , 那么产生由夸克和反夸克束缚态所构成的基态矢量粒子的  $B_h \cdot \Gamma_{ee}$  应为  $3.5\text{keV}$ . Mark-J 合作组的能量扫描数据, 排除了在上述能区存在产生这种基态矢量粒子的可能性.

## 五、电弱效应

由第二节的叙述知道, 强子总截面对电弱效应也是敏感的. 用(5)式对测量的  $R$  值作

表 3  $\sin^2\theta_w$  的拟合结果

	$g = \frac{G_{\text{Fermi}}}{8\sqrt{2}\pi\alpha}$
$\sin^2\theta_w$	$0.28 \pm 0.05$ $0.04$
95% 置信度	$0.21 \leq \sin^2\theta_w \leq 0.63$
$\chi^2$	14.0
$R$ 值的点数	17

拟合,得到的  $\sin^2\theta_W$  值列在表 3 中。

图 4 给出了  $R$  的实验值和由 (5) 式算出的  $R$  的预期值曲线, 其中各曲线分别对应于  $\sin^2\theta_W = 0.23, 0.28, 0.34$  和  $0.40$ ;  $\alpha_s = 0.13$ 。由图可以看出弱电统一理论标准模型给出的  $R$  值与实验结果符合得很好。

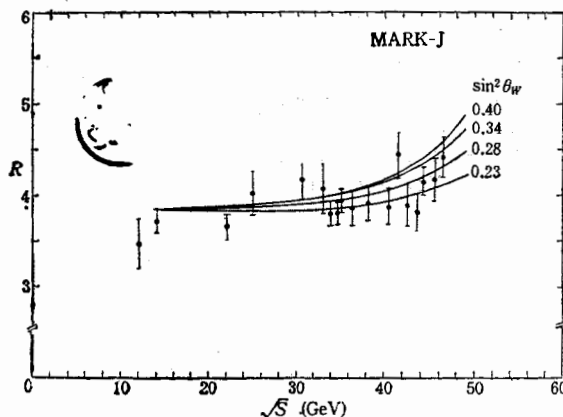


图 4 不同  $\sin^2\theta_W$  值的  $R$  理论曲线与实验值比较  
 • 实验点 — 不同  $\sin^2\theta_W$  下的理论值

由公式(5)可知  $R$  的理论值对  $\sin^2\theta_W$  和  $M_{Z^0}$  敏感, 故以  $\sin^2\theta_W$  和  $M_{Z^0}$  作为两个参数进行  $R$  理论值与实验值的拟合。图 5 给出了  $\sin^2\theta_W - M_{Z^0}$  平面中  $\chi^2$  的等值曲线, 其中实线对应 68% 置信度, 虚线对应 95% 置信度。

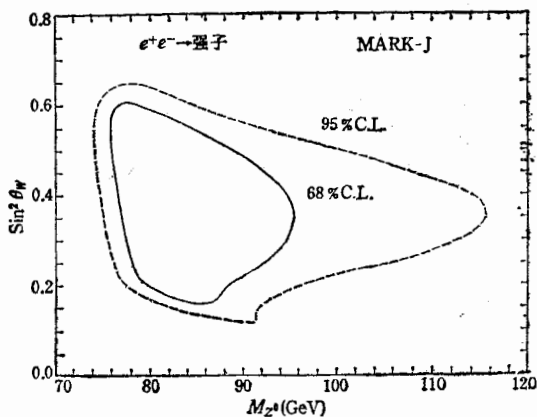


图 5  $\sin^2\theta_W - M_{Z^0}$  平面的  $\chi^2$  等值曲线

## 六、结 论

综上所述,在 PETRA 对撞机目前的能量下没有发现顶夸克的存在。

作者在此感谢丁肇中教授给予的大力帮助和支持。感谢陈敏教授, A. Böhm 教授,

7)  
夸  
态  
·  
线.  
GeV

预期  
基态  
能区  
值作

H. RYKACZEWSKI 博士和 Mark-J 合作组全体成员给予的帮助。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] K. G. Chetyrkin et al., *Phys. Lett.*, **85B**(1979), 227.  
M. Dine and J. Sapiersstein, *Phys. Lett.*, **43**(1979), 668.  
W. Celmaster and R. Gonsalves, *Phys. Lett.*, **44**(1980), 560.
- [ 2 ] R. Budny, *Phys. Lett.*, **55B**(1975), 227.  
J. Ellis and M. K. Gaillard, "Physics With Very High Energy e e Colliding Beams", CERN 76-18(21).
- [ 3 ] J. D. Jackson and D. L. Scharre, *Nucl. Instrum. Meth.*, **B128**(1975), 13.
- [ 4 ] M. Krammer et al., DESY 80/25(1980).
- [ 5 ] J. P. Leveille, Proc. Z Theory, Ithaca, N. Y. 1981, p241.  
S. Pakvasa et al., *Phys. Rev.*, **D20**(1979), 2862.

## ANALYSIS OF HADRONIC EVENTS

DONG BAO-ZHONG

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

### ABSTRACT

In this paper I summarize some results obtained from analyses of hadronic final state events. The analyzed data sample comes from Mark-J collaboration and covers an energy range from  $\sqrt{s} = 12$  GeV to  $\sqrt{s} = 46.78$  GeV. The integrated luminosity is  $128.06\text{Pb}^{-1}$ . We can search for production of open top quarks and toponium by measuring the total hadronic cross-section  $R$ .  $\langle R \rangle = 3.85 \pm 0.02 \pm 0.12$  was measured in the above mentioned energy range. It is consistent with  $R \approx 3.9$  as expected from QCD for five different quark flavors. We search for the narrow bound states of the toponium from 39.79 GeV to 46.78 GeV. The most prominent resonance signal is at a c.m. energy  $\sqrt{s} = 45.12 \pm 0.04$  GeV and results in an upper limit of  $B_n \cdot \Gamma_{ee} \leq 3.00$  keV (95% C. L.).