

## $\sqrt{s} = 3.55\text{GeV}$ 附近的 $R$ 值测量\*

祁向荣 胡海明 李新华 黄光顺 陈江川 胡涛 巨新  
李金 毛泽普 薛生田 郑志鹏 周莉 赵政国

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 利用北京谱仪(BES)在 $\sqrt{s} = 3.55\text{GeV}$ 附近获取的总积分亮度约为 $5\text{pb}^{-1}$ 的实验数据,测量了 $e^+e^-$ 湮没强子产生截面与 $\mu$ 子对产生截面的比值(即 $R$ 值).其测量误差比其它实验组已发表的此能区的测量误差减小约 50%.

**关键词**  $R$  值 强子事例 探测效率 辐射修正 亮度

### 1 引言

$R$  值定义为 $e^+e^-$ 对撞经单光子湮没产生强子的总截面与 $\mu^+\mu^-$ 的最低阶截面之比:

$$R = \frac{\sigma_{\text{had}}^0(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma_{\mu\mu}^0(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} \quad (1)$$

其中 $\mu^+\mu^-$ 产生截面可以由 QED 理论

$$\sigma^0(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = 4\pi\alpha^2/3s \quad (2)$$

精确计算给出.因此 $R$ 值实际上就是对 $e^+e^-$ 湮没经单光子产生强子截面的测量.

从强子产生阈到 $Z^0$ 能标,世界上有许多实验组进行过 $R$ 值测量<sup>[1]</sup>.但是,低能区( $\sqrt{s} < 5\text{GeV}$ ) $R$ 的实验测量值皆在约 20 年前给出<sup>[2-8]</sup>,而且在此能区其实验测量的平均误差高达 15% 以上<sup>[9]</sup>.在这一能区, $R$ 值的精度对标准模型的 QED 跑动精细结构常数 $\alpha_{\text{QED}}(s)$ 的改进和 $\mu$ 轻子的反常磁矩 $a_\mu = (g-2)/2$ 的解释起着重要作用. $\alpha_{\text{QED}}(s)$ 的跑动来自于轻子和夸克的真空极化贡献,其中轻子部分可以很好地计算,但是夸克(强子)的贡献,由于低能区的非微扰特性不能完全通过 QCD 计算出来,必须依靠半唯象的色散理论,通过 $e^+e^-$ 湮没到强子末态的实验数据(即 $R$ 值)的积分得到. $\alpha_{\text{QED}}(M_z^2)$ 的不确定性又会影响标准模型预言的 Higgs 粒子的质量.目前 $\alpha_{\text{QED}}(M_z^2)$ 的不确定性的 50% 来自于 2—5GeV 能区 $R$ 值的实验误差<sup>[10]</sup>.

实验上得到的 $\mu$ 轻子的反常磁矩的测量精度尚低于理论值的计算精度,预计 BNL-E 821 实验组可将其测量精度提高到与目前理论计算精度相当的水平. $a_\mu$ 的标准模型预

1999-07-19 收稿

\* 国家自然科学基金(19991480,19825116,19805009),中国科学院重大及特别支持项目(KJ95T-03)和百人计划基金资助

言的不确定性主要来源于强子的真空极化贡献,其中 20% 的不确定性来自于 2—5GeV 能区的  $R$  值的误差<sup>[10]</sup>. 因此了解强子对  $a_\mu$  的贡献进而探知是否存在新物理是很有必要的.

在北京正负电子对撞机(BEPC)上的粒子探测器——北京谱仪(BES)<sup>[11]</sup>于 1991 年底至 1992 年初在  $\sqrt{s} = 3.55\text{GeV}$  附近 12 个扫描能量点上获取数据,其总积分亮度约为  $5\text{pb}^{-1}$ . 本工作详细描述了对这些数据的分析,包括强子样本的挑选,本底的排除,强子探测效率的估计,数据积分亮度的测量以及辐射修正的计算等.

## 2 $R$ 值测量中的事例分析

实验中, $R$  值是通过下式计算得到的:

$$R = \frac{N_{\text{obs}} - N_{\text{bg}}}{\sigma_{\mu\mu}^0 \cdot L \cdot \bar{\epsilon}_{\text{had}} \cdot \epsilon_{\text{trg}} \cdot (1 + \delta)} \quad (3)$$

式中, $N_{\text{obs}}$ 为观测到的强子事例数; $N_{\text{bg}}$ 为混入的各种本底事例数; $\bar{\epsilon}_{\text{had}}$ 为强子事例的探测效率, $\epsilon_{\text{trg}}$ 为强子事例的触发效率<sup>[12]</sup>, $(1 + \delta)$ 为辐射修正因子, $L$ 是数据总积分亮度, $\sigma_{\mu\mu}^0$ 是由(2)式计算的  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  的最低阶截面.

$R$  值测量中,需要挑选出由单光子湮没产生末态为强子的所有事例,但由于强子事例包括许多已知的或未知的反应道的末态,没有很清晰的运动学和拓扑特性可循,故采用排除法扣除所有可能的本底. 首先,对事例中的每根径迹进行判选,对带电径迹的选择条件为:

- (1) 极角  $\theta$  满足:  $|\cos\theta| \leq 0.8$ ;
- (2) 在主漂移室中有好的螺旋线拟合;
- (3) 径迹起点距对撞点的距离满足:  $V_r \leq 1.5\text{cm}$ ,  $|V_z| \leq 15\text{cm}$ ;
- (4) 粒子飞行时间:  $2\text{ns} < \text{TOF} < 8\text{ns}$ .

对中性径迹的选择条件为:

- (1) 在簇射计数器中的极角  $\theta$  满足  $|\cos\theta| \leq 0.75$ ;
- (2) 在簇射计数器中沉积的最小能量大于  $60\text{MeV}$ ;
- (3) 与带电径迹夹角  $\geq 12^\circ$ .

然后对事例样本按带电径迹数分成两类:对于径迹数  $N_{\text{chg}} \geq 3$  的事例,若能动量满足条件:  $\sum |p_i| + \sum |E_i^{\gamma}| \geq 0.5E_{\text{beam}}$  则认为是好的强子候选者. 而对于  $N_{\text{chg}} \leq 2$  的事例,大部分来自于与束流相关的本底,宇宙线事例以及 QED 本底. 宇宙线事例与  $e^+e^-$  对撞产生的事例径迹的主要差别在于记录的时间起点和位置起点不同,可通过粒子飞行时间关系的选择来排除(如图 1). 与束流-气体相关的本底,如束流同气体分子和管壁相互作用本底、同步辐射等效效应带来的本底,可以用径迹顶点位置(图 2)和能动量前后不对称条件<sup>[13]</sup>来排除. 此外,对于轻子对本底. 如  $e^+e^-(\gamma)$ ,  $\mu^+\mu^-(\gamma)$ ,  $\tau^+\tau^-$  事例,可利用其拓扑性质和运动学特点,借助 BES 各子探测器如簇射计数器,主漂移室和  $\mu$  子计数器信息来排除. 如果质心系能量在  $\tau^+\tau^-$  阈以上,伴随  $\tau^\pm$  衰变的中微子造成较大的能动量丢失,可定

义观测到的净横动量与最大可能丢失能量的比值<sup>[14]</sup>来排除  $\tau$  衰变本底. 另外还有双光子过程本底, 由于两个散射电子沿束流方向发射而不能被观测, 它们带走大部分能量, 可以用能量平衡条件有效地扣除.

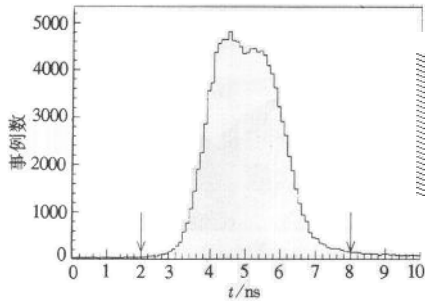


图 1 带电粒子的飞行时间分布及选判条件

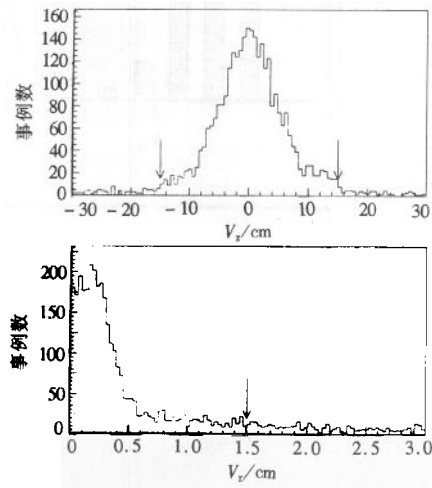


图 2 径迹顶点的  $V_x$ ,  $V_z$  分布及选判条件

对于经过以上事例选择条件后残留的物理本底, 采用 Monte Carlo 方法模拟做出估算并加以扣除. 对选择出来的强子样本, 还需要经过单事例扫描加以确认. 根据事例选择条件、本底扣除并结合单事例扫描的结果, 估计事例选择的总误差为  $\sim 5\%$ .

### 3 $R$ 值测量中强子探测效率

探测效率  $\epsilon$  定义为强子事例被探测器探测到并且通过所有的强子事例判选条件的几率, 通常由下式表示

$$\epsilon = \frac{N_{\text{MC}}^{\text{obs}}}{N_{\text{MC}}^{\text{gen}}} \quad (4)$$

式中,  $N_{\text{MC}}^{\text{gen}}$  是 Monte Carlo 模拟产生的强子事例总数,  $N_{\text{MC}}^{\text{obs}}$  是模拟产生的并经过强子事例判选后的强子事例数. 通过蒙特卡罗模拟方法给出的强子探测效率需要借助于合适的强子事例产生子来得到, 故它依赖于所采用模型的可靠性.

利用 BES 在  $\tau$  质量测量中所获取的大强子事例样本 (超过 4 万个), 将其各种描述强子事例的特征分布 (如多重数、横动量、快度、球度、冲度等) 与 LUND 模型 JETSET74 模拟产生的样本相比较, 细致研究了  $\sqrt{s} = 3.55\text{GeV}$  能量附近强子事例产生性质, 通过协调改变模型碎裂参数及少数物理意义明确的敏感参数, 改善 JETSET 在 BEPC 能区的行为<sup>[15]</sup>, 使其在低能连续区能够更好地与实验符合 (图 3), 从而更为可靠地计算出强子事例探测效率. 考虑了包括模型与真实数据的差异, 不同参数的选取以及事例选择带来的误差, 强子事例探测效率的总误差为  $\sim 3\%$ .

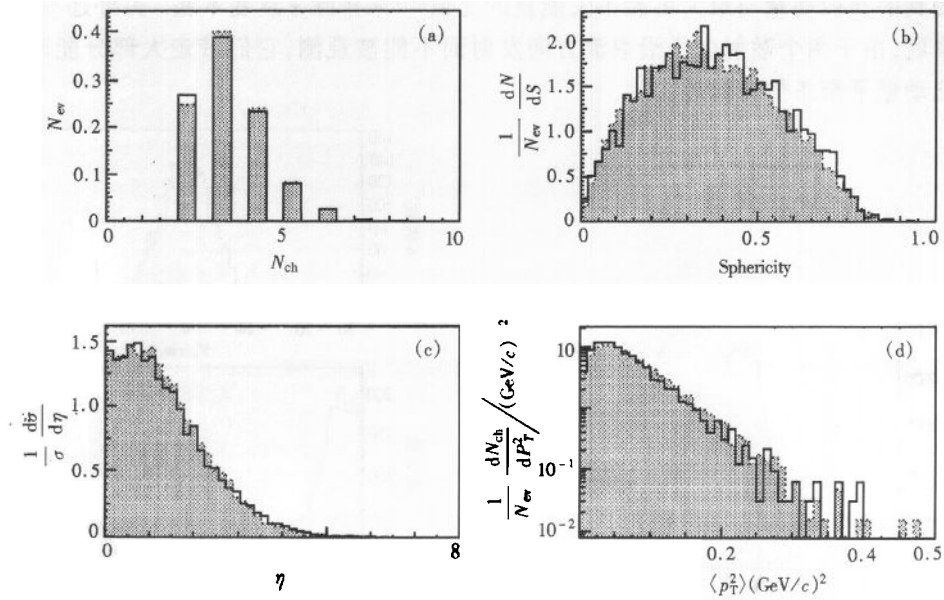


图 3 参数调整后的 LUND 模型(实线)与实验数据(阴影)分布比较  
(a) 多重数; (b) 球度; (c) 快度; (d) 横动量.

#### 4 R 值中的亮度测量

R 值测量是对  $e^+e^-$  湮没产生强子反应截面的绝对测量, 因此要求准确地计算出获取数据的积分亮度. 用于大角度亮度计算的 Bhabha 散射与感兴趣的物理事例(强子事例)具有相同的探测过程, 而且事例特征突出, 剔除背景容易, 由此给出的亮度值更能反应真正的物理过程.

在离线数据分析中多采用大角度 Bhabha 事例来计算亮度, 其表达式为

$$L = \frac{N_{\sigma}^{\text{obs}}}{\sigma_{ee} \cdot \epsilon_{ee} \cdot \epsilon_{\text{trg}}}, \quad (5)$$

其中,  $N_{\sigma}^{\text{obs}}$  为所分析的数据中挑选出的 Bhabha 事例数,  $\sigma_{ee}$  为 Bhabha 散射反应截面, 可由理论精确计算,  $\epsilon_{ee}$  为 Bhabha 事例的探测效率,  $\epsilon_{\text{trg}}$  为 Bhabha 事例的触发效率. 主要采用桶部簇射计数器和主漂移室  $dE/dx$  信息进行 Bhabha 事例的选择, 计算了数据的积分亮度. 考虑以上各项误差来源, 如 Bhabha 事例选择的误差  $\sim 2.5\%$ , 触发效率的误差  $\sim 3.7\%$ , 以及截面计算误差  $< 1\%$  等因素, 得到亮度值的总误差约为  $4.5\%$ .

正负电子对撞机上, 用作亮度测量的物理过程应是理论上能精确计算的, 如以下 3 种 QED 过程:  $e^+e^- \rightarrow e^+e^- (\gamma)$ ,  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- (\gamma)$  和  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma (\gamma)$ . 这 3 个过程的分析相互独立, 其亮度测量可以相互检验, 三者的结果在误差范围内是符合的<sup>[16]</sup>.

### 5 $R$ 值中的辐射修正

$R$  值测量中, 强子截面  $\sigma_0$  只包括最低阶  $O(\alpha^2)$  Feynman 图的贡献, 而实验上测量到的  $\sigma_{\text{had}}^{\text{obs}}$  含有来自高阶电磁作用的贡献。二者关系为:  $\sigma_{\text{had}}^{\text{obs}} = \sigma_0(1 + \delta)$ ,  $1 + \delta$  为辐射修正因子, 它可近似地表示为

$$\delta = \delta_{\text{vert}} + \delta_{\text{vac}}^e + \delta_{\text{vac}}^\mu + \delta_{\text{vac}}^\tau + \delta_{\text{vac}}^{\text{had}} + \delta_{\text{yobs}} \quad (6)$$

其中,  $\delta_{\text{vert}}$  为初态顶点修正,  $\delta_{\text{yobs}}$  为韧致辐射修正,  $\delta_{\text{vac}}$  为真空极化修正。研究并考察了 4 种最典型的辐射修正的理论计算方案: Berends & Kleiss<sup>[17]</sup>, Kuraev & Fadin<sup>[18]</sup>, Bonneau & Martin<sup>[19]</sup> 及 Crystal Ball 实验组所采用的方法<sup>[20]</sup>。远离共振峰处(如  $J/\psi, \psi'$  等), 4 种方案所给出的辐射修正值的误差为 1%—2%, (如图 4)。根据理论计算并考虑到 BES 实验测量强截面的效率因素, 得到在  $\sqrt{s} = 3.55\text{GeV}$  的辐射修正因子  $1 + \delta = 1.121$ 。其误差包括: 输入  $R$  值的实验误差(或微扰 QCD 理论预言  $R$  的不确定性)、Monte Carlo 估计的探测效率  $\epsilon(\kappa)$  的误差以及某些修正项和数值积分的误差, 辐射修正的总误差约为 3%。

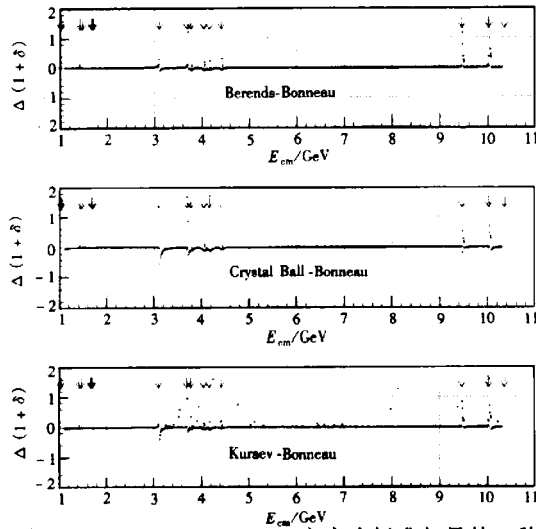


图 4 以 Bonneau & Martin 方案为标准与另外 3 种方案相比得到的强子截面辐射修正因子的相对差值 箭头处为共振态峰位。

### 6 $R$ 值结果与讨论

基于 BES 在  $\sqrt{s} = 3.55\text{GeV}$  附近 12 个能量点获取的实验数据, 经过仔细分析计算, 各点  $R$  值的测量结果如表 1 所示。

表 1 BES 在  $\sqrt{s} = 3.55\text{GeV}$  附近  $R$  值结果

#	$E_{\text{cm}}/\text{GeV}$	$N_{\text{had}}$	$L/\text{nb}^{-1}$	Eff. (%)	$1 + \delta$	$R \pm \text{统计误差} \pm \text{系统误差}$
1	3.54418	2091	188.51	60.00	1.121	$2.48 \pm 0.05 \pm 0.20$
2	3.55190	2487	223.80	59.12	1.121	$2.53 \pm 0.05 \pm 0.20$
3	3.55290	7134	672.55	59.14	1.121	$2.40 \pm 0.03 \pm 0.19$
4	3.55314	2728	259.70	58.90	1.121	$2.40 \pm 0.04 \pm 0.20$
5	3.55324	10367	971.89	59.26	1.121	$2.42 \pm 0.02 \pm 0.20$
6	3.55350	3344	311.13	58.52	1.121	$2.47 \pm 0.04 \pm 0.21$
7	3.55396	3055	283.63	59.08	1.121	$2.46 \pm 0.04 \pm 0.20$
8	3.55698	2724	260.22	58.82	1.121	$2.40 \pm 0.04 \pm 0.20$
9	3.56198	2157	197.70	58.92	1.121	$2.50 \pm 0.05 \pm 0.21$
10	3.56838	2223	200.18	59.22	1.121	$2.53 \pm 0.05 \pm 0.20$
11	3.57910	2346	216.42	59.34	1.121	$2.49 \pm 0.05 \pm 0.20$
12	3.59902	4388	434.92	60.54	1.121	$2.30 \pm 0.03 \pm 0.20$
平均值	$\sim 3.55000$	—	—	—	—	$2.45 \pm 0.04 \pm 0.20$

图 5 给出 12 个能量点的  $R$  值,其总误差为 $\sim 8.5\%$ .图 6 给出 1—5GeV 能区部分  $R$  值的测量结果.不难看出,BES 的测量结果较已发表的此能区的  $R$  值的精度提高了一倍.

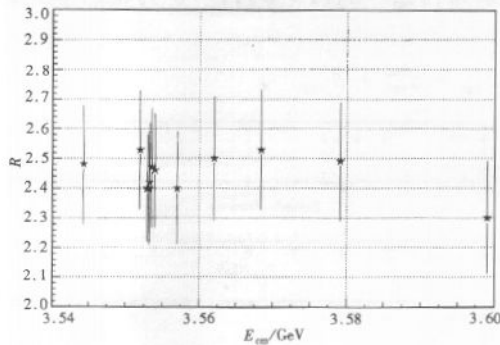


图 5 BES 在 3.55GeV 附近 12 个能量点的  $R$  值测量结果

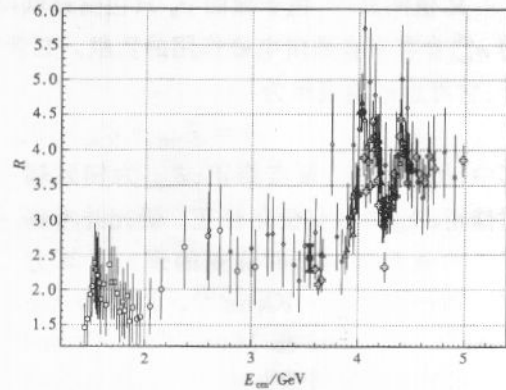


图 6 1—5GeV 能区 BES 及其它实验组的  $R$  值测量结果

○ Gamma2 实验组,◇ MARK1 实验组,△ Crystal Ball 实验组,□ Pluto 实验组,● BES 的实验结果.

BEPC/BES 完成升级改造后的一个重大课题就是在 2—5GeV 能区进行  $R$  值精确测量. BEPC/BES 是目前唯一运行在该能区的加速器/探测器,因此 BES 在该能区进行高精度的  $R$  值测量实验,受到国际高能物理界的广泛关注<sup>[10]</sup>. 1998 年下半年 BES 已经在 2.6,3.2,3.4,3.55,4.6 和 5.0GeV 等 6 个能量点上取数并已取得初步结果<sup>[21—23]</sup>. 目前新一轮  $R$  值细致扫描及物理分析工作正在按计划进行.

作者感谢全体 BEPC 运行人员所做的努力. 本文所采用的 3.55GeV 附近的实验数据是在 BES 合作组全体成员的共同努力下获取的,特别感谢物理一室的张达华、王平、刘怀民在本工作完成过程中有益的讨论.

### 参考文献 (References)

- 1 Caso C et al. European Phys. Journal, 1998, **C3**:1
- 2 Ceradini F et al. Phys. Lett., 1973, **B47**:80;  
Batoli B et al. Phys. Rev., 1972, **D6**:2374;  
Bernardini M et al. Phys. Lett., 1974, **B51**:200
- 3 Cosme G et al. Phys. Lett., 1972, **B40**:685
- 4 Kurdadze M et al. Phys. Lett., 1972, **B42**:515
- 5 Litke A et al. Phys. Rev. Lett., 1973, **B30**:1189
- 6 Blondel A. plenary talk at ICHEP'96, Warsaw
- 7 Pietrzyk B. Rad. Corr. Conf., Cracow, 1996
- 8 Davier M, Hoeker A. LAL 97—85
- 9 Burkhardt H, Pietrzyk B. Phys. Lett., 1995, **B356**:398—403
- 10 Davier M, Hoeker A. Phys. Lett., 1997, **B419**

- 11 BAI JingZhi et al. Nucl. Instrum. Methods, 1994, **A344**:319
- 12 YU ZhongQiang et al. High Energy Physics and Nuclear Physics(in Chinese), 1995, **23**:1062 (郁忠强等. 高能物理与核物理, 1995, **23**:1062)
- 13 ZHU YongSheng et al. Phys. Lett., 1995, **B355**:374—380
- 14 BAI JingZhi et al. Phys. Rev. 1996, **D53**:20
- 15 QI XiangRong, CHEN JiangChuan et al. High Energy Physics and Nuclear Physics(in Chinese), 1999, **23**:1—9 (祁向荣、陈江川等. 高能物理与核物理, 1999, **23**:1—9)
- 16 HUANG GuangShun et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 2000, **24**(5): (黄光顺等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(5):)
- 17 Berends F A, Kleiss R. Nucl. Phys., 1981, **B178**:141
- 18 Kuraev E A et al. Sov. J. Nucl. Phys., 1985, **41**:3
- 19 Bonneau G. Martin F. Nucl. Phys., 1971, **B27**:387
- 20 Edwards C et al. SLAC - PUB - 5160, 1990
- 21 ZHAO ZhengGuo. Talk given at ICHEP'98, Vancouver, Canada, 1999
- 22 Kong D. Talk given at DPF99 at Los Angeles, California, Jan. 5—9, 1999
- 23 QI XiangRong. Talk given at XXXIVth Rencontres de Moriond, Les Arcs, Savoie, France, Mar. 13—20, 1999

## **$R$ Measurement around $\sqrt{s} = 3.55\text{GeV}^*$**

QI XiangRong HU HaiMing LI XinHua HUANG GuangShun  
 CHEN JiangChuan HU Tao JU Xin LI Jin MAO ZePu  
 XUE ShengTian ZHENG ZhiPeng ZHOU Li ZHAO ZhengGuo  
 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** Using the data collected with Beijing Spectrometer (BES), we have measured the total cross section for  $e^+e^-$  annihilation into hadronic final states around center-of-mass energy 3.55 GeV. The values of  $R, \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})/\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$ , are determined with smaller error than the previous result by a factor of two.

**Key words**  $R$  value, hadronic events, detection efficiency, radiative correction, luminosity

---

Received 19 July 1999

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19991480, 19825116, 19805009), The Chinese Academy of Sciences Foundation(KJ95T-03) and 100-Talanted Scientist Foundation