$\sqrt{s}=3.55$ 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$\sqrt{s}=3.55$ GeV附近获取的总积分亮度约为$5pb^{-1}$的实验数据，测量了e^+e^-湮没强子产生截面与μ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$\mu^+\mu^-$产生的最低阶截面之比:

$$R=\frac{\sigma^0_{had}(e^+e^-\to hadrons)}{\sigma^0_{\mu\mu}(e^+e^-\to\mu^+\mu^-)}, \tag{1}$$

其中$\mu^+\mu^-$产生截面可以由QED理论

$$\sigma^0(e^+e^-\to\mu^+\mu^-)=4\pi\alpha^2/3s \tag{2}$$

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[1]。但是, 低能区($\sqrt{s}<5$ GeV)R的实验测量值皆在约20年前给出[2–8], 而且在此能区实验测量的平均误差高达15%以上[9], 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$\alpha_{QED}(s)$的改进和μ轻子的反常磁矩$a_\mu=(g-2)/2$的解释起着重要作用。$\alpha_{QED}(s)$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

*国家自然科学基金资助项目(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项目

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。$\alpha_{QED}(M_Z^2)$的不确定性又会影响标准模型预言的Higgs 粒子的质量。目前$\alpha_{QED}(M_Z^2)$的不确定性的50%来自于2-5 GeV能区R值的实验误差[10]。

实验上得到的μ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-E821实验组可将其测量精度提高到与目前理论计算相当的水平。a_μ的标准模型预言的不确定性主要来源于强子真空极化的贡献, 其中20%的不确定来自于2-5 GeV能区的R值的误差[10], 因此了解强子对a_μ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)[11] 于1991年底至1992年初在$\sqrt{s}$=3.55 GeV 附近12个扫描能量点上获取数据, 其总积分亮度约为$5pb^{-1}$。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，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:

$$R = \frac{N_{obs} - N_{bg}}{\sigma^{\circ}_{\mu\mu} \cdot L \cdot \bar{\varepsilon}_{had} \cdot \varepsilon_{trg} \cdot (1+\delta)}. \tag{3}$$

式中, N_{obs}为观测到的强子事例数; N_{bg}为混入的各种本底事例数; $\bar{\varepsilon}_{had}$为强子事例的探测效率, ε_{trg}为强子事例的触发效率[12], $(1+\delta)$为辐射修正因子, L是数据总积分亮度, $\sigma^0_{\mu\mu}$是由(2)式计算的$e^+e^- \to \mu^+\mu^-$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末态，没有很清晰的运动学拓扑特性可循，故采用排除法扣除所有可能的本底。首先, 我们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θ满足: $|\cos\theta| \le 0.8$;

(2) 在主漂移室中好的螺旋线拟合;

(3) 径迹起点距对撞点的距离满足: $V_r \le 1.5$cm, $|V_Z| \le 15$cm;

(4) 粒子飞行时间: 2 ns $< TOF <$ 8 ns.

对中性径迹的选择条件为:

(1) 在簇射计数器中的极角满足: $|\cos\theta| \leq 0.75$;

(2) 在簇射计数器中沉积的最小能量大于60 MeV ;

(3) 与带电径迹夹角$\geq 12°$.

然后对事例样本按带电径迹数分成两类: 对于径迹数$Nchrg \geq 3$的事例, 若能动量满足条件: $\sum|p_i| + \sum|E_i^{\gamma}| \geq 0.5E_{beam}$则认为是好的强子候选者。而对于$Nchrg \leq 2$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、同步辐射等效应带来的本底, 可以用事例顶点位置(图2)和能动量前后不对称条件[13] 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μ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[14]来排除τ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，它们带走大部分能动量, 可以用能动量平衡条件有效地扣除。

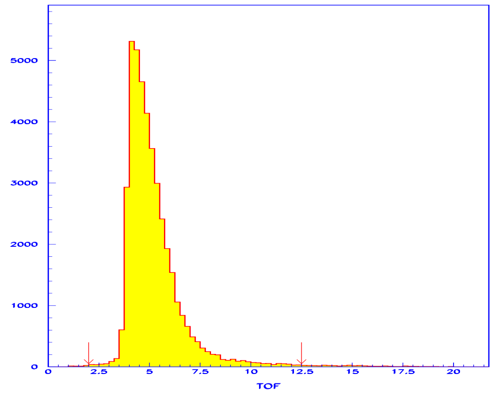

图1 带电粒子的飞行时间分布及选判条件

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$\sim 5\%$。

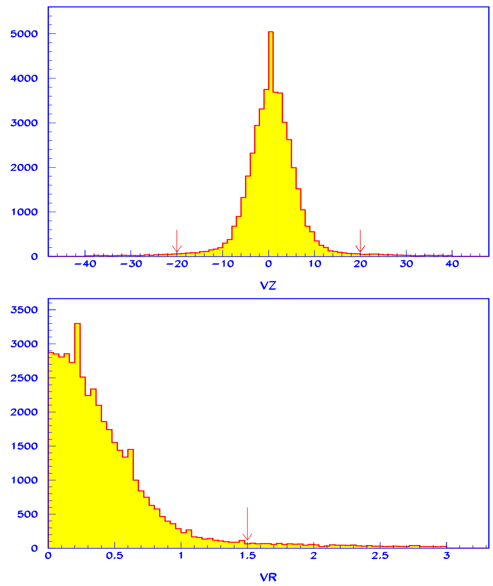

图2 径迹顶点的V_Z (cm)、V_r(cm) 分布及选判条件

3 R值测量中强子探测效率

探测效率ε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

$$\varepsilon = \frac{N_{MC}^{obs}}{N_{MC}^{gen}}. \tag{4}$$

式中, N_{MC}^{gen}是Monte Carlo模拟产生的强子事例总数，N_{MC}^{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τ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$\sqrt{s} = 3.55GeV$ 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[15], 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$\sim 3\%$。

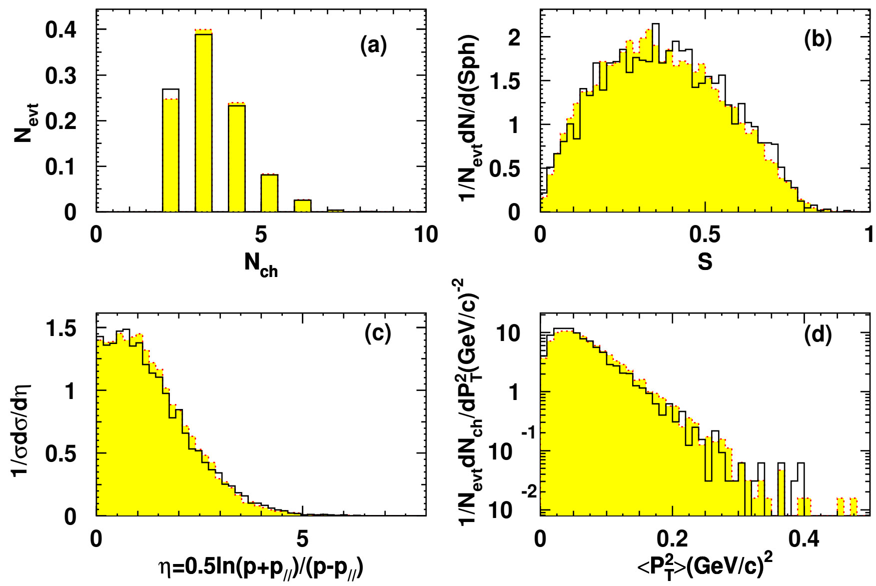

图3 参数调整后的LUND模型(实线)与实验数据(阴影)分布比较。(a)多重数; (b)球度; (c)快度; (d)横动量.

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

$$L = \frac{N_{ee}^{obs}}{\sigma_{ee} \cdot \epsilon_{ee} \cdot \epsilon_{trg}}, \tag{5}$$

其中, N_{ee}^{obs}为所分析的数据中挑选出的Bhabha事例数，σ_{ee}为Bhabha散射反应截面, 可由理论精确计算，ϵ_{ee}为Bhabha事例的探测效率, ϵ_{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。考虑以上各种误差来源, 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是理论上能精确计算的, 如以下三种QED过程：$e^+e^- \to e^+e^-(\gamma)$，$e^+e^- \to \mu^+\mu^-(\gamma)$和$e^+e^- \to \gamma\gamma(\gamma)$ 。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[16]。

5　R值中的辐射修正

R值测量中, 强子截面σ_0只包括最低阶$O(\alpha^2)$ Feynman 图的贡献, 而实验上测量到的σ_{had}^{obs}含有来自高阶电磁作用的贡献。二者关系为: $\sigma_{had}^{obs}=\sigma_0(1+\delta)$, $1+\delta$为辐射修正因子, 它可近似地表示为

$$\delta=\delta_{vert}+\delta_{vac}^{e}+\delta_{vac}^{\mu}+\delta_{vac}^{\tau}+\delta_{vac}^{had}+\delta_{\gamma obs} \qquad (6)$$

其中, δ_{vert}为初态顶点修正，$\delta_{\gamma obs}$为韧致辐射修正，δ_{vac}为真空极化修正。研究并考察了四种最典型的辐射修正理论计算方案: Berends & Kleiss [17], Kuraev & Fadin [18], Bonneau & Martin [19] 及Crystal Ball 实验组所采用的方法[20]。远离共振峰处(如J/ψ、ψ'等), 四种方案所给出的辐射修正值的误差为$1\sim2\%$(如图4)。根据理论计算并考虑到BES实验测量强子截面的效率因素, 得到在$\sqrt{s}=3.55$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$\epsilon(k)$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%。

6　R值结果与讨论

基于BES在$\sqrt{s}=3.55$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。

图5给出12个能量点的R值, 其总误差为$\sim8.5\%$。图6给出1 - 5 GeV能区部分R值的测量结果。实心点为本工作给出的平均结果, 空心点代表已发表的R值结果。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。

BEPC/BES完成升级改造后的一个重大课题就是在2 - 5 GeV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[10]。1998年下半年BES已经在2.6、3.2、3.4、3.55、4.6和5.0 GeV等6个能量点上取数并已取得初步结果[21−23]。目前新一轮R值细致扫描及物理分析工作正在按计划地进行。

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。

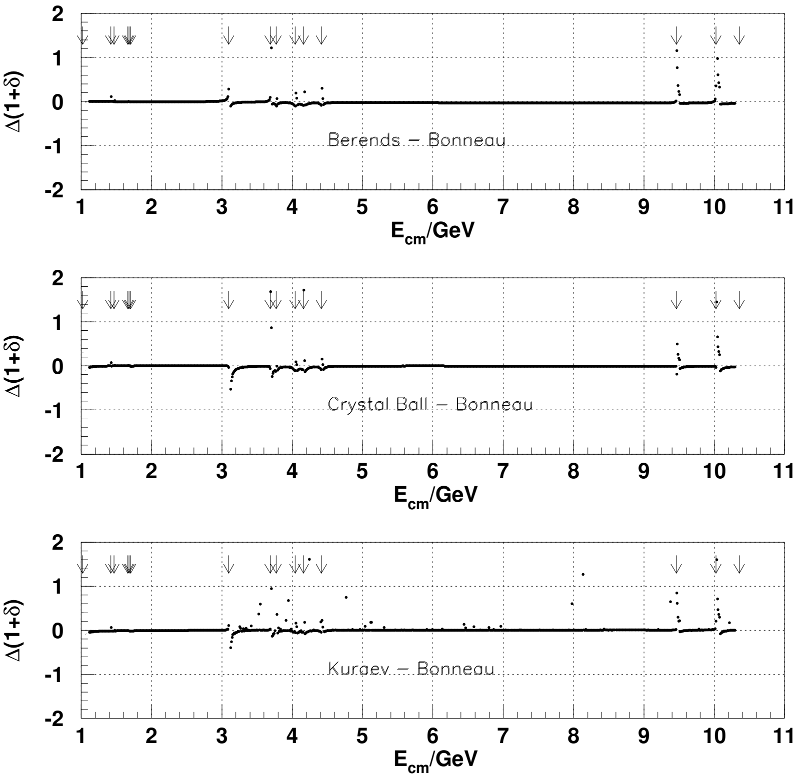

图4 以Bonneau & Martin 方案为标准与另外3种方案相比得到的强子截面辐射修正因子的相对差值(箭头处为共振态峰位)

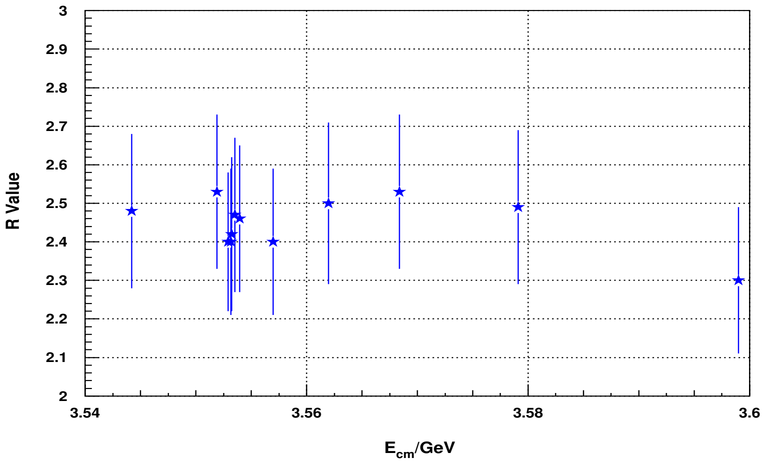

图5 BES在3.55GeV附近12个能量点的R值结果

表1 BES在$\sqrt{s}=3.55$GeV附近R值结果

#	E_{cm}/GeV	N_{had}	L/nb^{-1}	Eff.(%)	$1+\delta$	R± 统计误差±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	~ 3.55000	-	-	-	-	$2.45 \pm 0.04 \pm 0.20$

参 考 文 献

[1] Caso C et al. European Phys. Journal 1998, C3:1

[2] F. Ceradini et al. Phys. Lett. 1973, B47:80
B. Batoli et al. Phys. Rev. 1972, D6:2374
M. Bernardini et al. Phys. Lett. 1974, B51:200

[3] G. Cosme et al. Phys. Lett.1972, B40:685

[4] M. Kurdadze et al. Phys. Lett. 1972, B42:515

[5] A. Litke et al. Phys. Rev. Lett. 1973, 30: 1189

[6] A. Blondel, plenary talk at ICHEP'96, Warsaw

[7] B. Pietrzyk, Rad. Corr. Conf., Cracow 1996

[8] M. Davier, A. Hoeker, LAL 97-85

[9] H. Burkhardt, B, Pietrzyk, Phys. Lett. 1995, B356:398-403

[10] A.Blondel, plenary talk at ICHEP'96, Warsaw
B. Pietrzyk, Rad. Corr. Conf. Cracow,1996
M.Davier and A. Hocker, Phys. Lett. 1997, B419

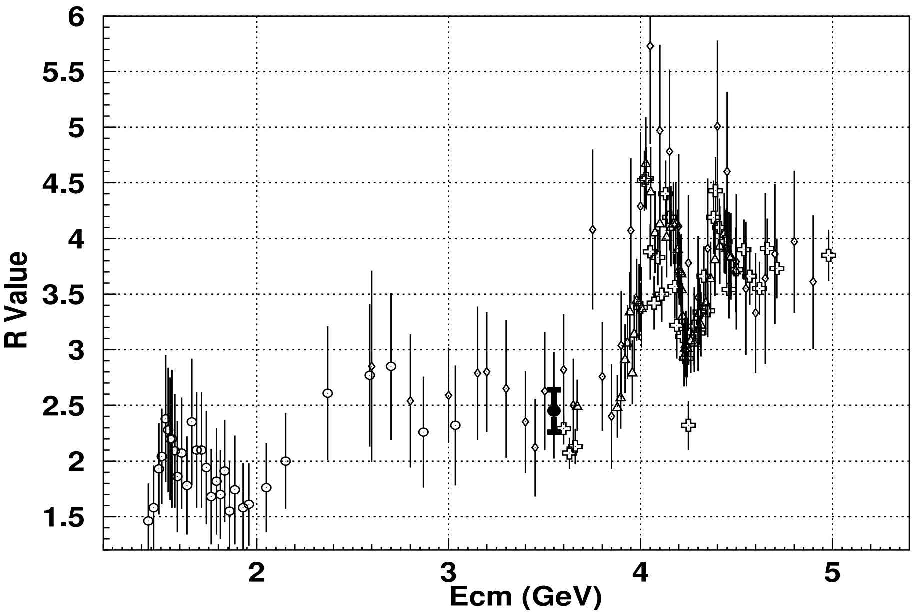

图6 1- 5 GeV能区BES及其它实验组的R值结果

[11] Bai J Z et al. Nucl. Instrum. Methods 1994, A344:319

[12] Yu Zhongqiang. 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 Y S et al. Phys. Lett., 1995, B355:374-380

[14] Bai J Z et al. Phys. Rev. 1996, D53:20

[15] Qi X R,Chen J C 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 G S et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese)
(黄光顺等, 高能物理与核物理, 已接收)

[17] F.A.Berends and R. Kleiss, Nucl. Phys. 1981, B178:141

[18] E.A.Kuraev et al., Sov. J. Nucl. Phys. 1985, 41:3

[19] G.Bonneau and F. Martin, Nucl. Phys. 1971, B27:387

[20] C.Edwards et al. SLAC-PUB-5160, 1990 (T/E)

[21] Zhao Z G. Talk given at ICHEP'98, Vancorver, Canada

[22] D. Kong, Talk given at DPF99 at Los Angeles, California, Jan. 5-9, 1999;hep-ph/9903521

[23] Qi X R. Talk given at XXXIVth Rencontres de Moriond Mar. 13-20, 1999, Les Arcs, Savoie, France

R Measurement Around $\sqrt{s} = 3.55$ 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)

Abstract Using the date 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, $\sigma(e^+e^- \to \text{hadrons})/\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)$, are determined.

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