

## 2—5 GeV能区的 R 值测量\*

赵政国 薛生田

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 作为粒子物理中的一个基本参数, R 值在发展粒子物理理论及检验标准模型(SM)方面起着重要的作用. 在低能区精确测量 R 值的实验努力对于弱电精确物理是至关重要的. R 值测量不仅对  $\alpha(M_Z^2)$  的计算及  $a_\mu$  的解释是重要的, 而且对强子产生机制和经  $e^+e^-$  湮没产生的粲偶素本身的理解也是必须的. 文章简要报道了在北京正负电子对撞机(BEPC)和升级的北京谱仪(BES-II)上完成的 R 扫描及其物理结果.

**关键词** R 值测量, 弱电物理, 标准模型

### MEASUREMENT OF R AT ENERGIES BETWEEN 2—5 GeV

ZHAO Zheng Guo XUE Sheng Tian

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

**Abstract** Being one of the fundamental parameters in particle physics, the R value plays an important role in the development of the theory of particle physics and in testing the Standard Model(SM). Experimental efforts to precisely measure R value at low energies are crucial for the electroweak precision physics. The R measurements are not only important for the evaluation of  $\alpha(M_Z^2)$  and for the interpretation of  $a_\mu$ , but also necessary for the understanding of the hadron production mechanism and the charmonium itself produced via  $e^+e^-$  annihilation. This article briefly reports the R scan done with the upgraded Beijing Spectrometer(BES-II) at the Beijing Electron Positron Collider(BEPC) and its physics results.

**Key words** R measurement, electroweak physics, standard model(SM)

#### 1 R 值测量的物理意义

R 值测量是  $e^+e^-$  对撞机上的一个重要实验项目. 从  $e^+e^-$  对撞机建造的历史来看, 几乎每一个新能区的  $e^+e^-$  对撞机建成后的第一批实验总是与能量扫描的 R 值测量相关. R 值的定义是

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{强子})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$

即 R 值是  $e^+e^-$  经单光子湮没产生强子的总截面与  $e^+e^-$  经单光子湮没产生  $\mu^+\mu^-$  对的 Born 截面的比值, 其中  $\mu^+\mu^-$  对产生截面可由量子电动力学(QED)精确计算, 即  $\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-) = 4\pi\alpha^2/3s$ , 其中  $\alpha$  为精细结构常数,  $s$  为质心系能量的平方, 故 R 值测量实际上就是  $e^+e^-$  湮没过程中的强子产生总截面的测量. 按照简单的夸克-部份子模型(QPM), R 值只与产生的夸克种类(味道)和颜色相关, 即  $R = 3 \sum_q Q_q^2$ , 其中  $\sum_q Q_q^2$  是对可能产生的夸克

克种类的电荷平方求和, 3 则来自夸克有 3 种颜色. 显然, 当只有 3 种夸克(u, d, s)时,  $R = 2$ ; 而当粲夸克(c)出现时,  $R = 10/3$ ; 当底夸克(b)出现时,  $R = 11/3$ ; 即每一代新夸克出现时, R 值将上一个台阶. R 值的实验测量值基本上与这一理论预言相符, 这是对夸克有 3 种颜色的理论的一个强有力的支持. 实际上, 由于强子产生过程比较复杂, R 值应借助于量子色动力学(QCD)来描述. 在微扰 QCD 适用的能量范围, 有

$$R(s) = 3 \sum_q Q_q^2 \sqrt{1 - 4m_q^2/s} (1 + 2m_q^2/s) \cdot (1 + a + c_1 a^2 + c_2 a^3 + \dots)$$

其中  $a = \alpha_s(s)/\pi$ , 在最小减除方案( $\overline{MS}$ )下,  $c_1 = 1.9857 - 0.1153 N_f$ ,  $c_2 = -6.6368 - 1.2002 N_f -$

\* 国家自然科学基金(批准号:19991480, 19825116)资助项目; 中国科学院重大及特别支持项目(批准号:kj95T-03)  
2000-07-18 收到初稿, 2000-08-11 修回

$0.0052 N_f^2 - 1.2395 (\sum Q_q)^2 / (3 \sum Q_q^2)$ ,  $N_f$  为在能量  $\sqrt{s}$  下起作用的夸克味道数. 从  $R$  值的这个表达式可以看出, 在微扰 QCD 适用的能量范围, 即较高能区, 通过  $R$  值的测量可以给出有关  $\alpha_s$  的一些信息, 高能区的  $R$  的测量值与微扰 QCD 的预言符合得很好, 使之成为测量跑动强耦合常数  $\alpha_s$  的手段之一. 但在低能区, 由于微扰 QCD 的计算已变得不再十分可靠, 故低能区的  $R$  值测量的实验就显得十分重要.

当前国际高能物理学界对低能区的  $R$  值测量的实验表示了极大的兴趣和关注, 其主要原因在于它涉及到目前粒子物理的两大精密实验, 即测量  $\mu$  子反常磁矩  $a_\mu$  的  $(g-2)$  实验及在欧洲核子研究中心 (CERN) 和美国的斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 的两大  $e^+e^-$  对撞机 LEP 和 SLC 上  $Z^0$  能区检验标准模型 (SM) 理论的精密实验<sup>[1]</sup>.

测量  $\mu$  子反常磁矩  $a_\mu$  的  $(g-2)$  实验被公认为迄今为止检验 QED 理论的最完美的实验. 在 CERN, 从 1958 年至 1975 年完成的三个  $(g-2)$  实验已给出  $a_\mu = (g_\mu - 2)/2 = 11659229(85) \times 10^{-10}$ , 即已达到 7.3 ppm 的实验精度. 而计划中的 BNL-E821 实验将改进实验精度 20 倍, 即达到 0.35 ppm 的实验精度. 与之相比, 其理论计算值为  $a_\mu^{\text{th}} = a_\mu^{\text{QED}} + a_\mu^{\text{had}} + a_\mu^{\text{weak}}$ , 其中  $a_\mu^{\text{QED}}$  是纯 QED 的贡献, 理论计算已达到令人满意的精度,  $a_\mu^{\text{QED}} = 1165846951(52) \times 10^{-12}$ ;  $a_\mu^{\text{weak}}$  是来自 W, Z 和 Higgs 的弱作用的贡献, 由 SM 理论也可给出满足一定精度的计算,  $a_\mu^{\text{weak}} = 195(10) \times 10^{-11}$ ; 唯独  $a_\mu^{\text{had}}$  来自真空极化强子的贡献, 无法给出满意的理论计算, 因为此时微扰 QCD 理论已变得无能为力. 然而,  $a_\mu^{\text{had}}$  却可以利用实验的  $R$  值通过色散积分

$$a_\mu^{\text{had}} = \left| \frac{am_\mu}{3\pi} \right|^2 \int_4^{m_\pi^2} ds \frac{R(s) \hat{K}(s)}{s^2}$$

来计算, 其中  $R(s)$  即实验的  $R$  值, 积分中  $1/s^2$  因子表明低能区的  $R$  值测量对  $a_\mu^{\text{had}}$  有更大的影响. 目前的  $R$  值测量得到的  $a_\mu^{\text{had}} = 7027(175) \times 10^{-11}$ , 总的  $a_\mu^{\text{th}} = 116591917(176) \times 10^{-11}$ . 可以看出, 理论计算的主要误差来自  $a_\mu^{\text{had}}$  的计算, 也即主要来自  $R$  值测量的实验误差. 2—5 GeV 能区的  $R$  值测量的实验误差 (目前约为 15%) 对  $a_\mu^{\text{had}}$  的误差的贡献占全能区的 20%. 目前  $a_\mu^{\text{exp}} - a_\mu^{\text{th}} = (38 \pm 87) \times 10^{-10}$ , 实验误差仍占主导地位. 但对计划中的 BNL-E821 实验, 当实验精度提高 20 倍之后, 其实验误差已与理论误差水平相当, 对 QED 和 SM 中弱作用理论的检

验及对新物理的探测将达到一个新的水平, 进一步提高理论计算的精度已刻不容缓. 这就是为什么从事  $(g-2)$  实验的理论和实验物理学家一再呼吁在低能区重测  $R$  值的原因所在.

在 LEP/SLC 上  $Z^0$  能区检验标准模型 (SM) 理论的精密实验目前已达到相当高的实验精度, 而 SM 理论预言的所有可观测量均是通过三个重要参数, 即  $G_F$ ,  $M_Z$  和  $\alpha(M_Z^2)$  实现的, 其中 QED 精细结构常数  $\alpha(s)$  起着至关重要的作用.  $\alpha(s)$  已不同于零动量即 Thomson 极限下的  $\alpha = 1/137$ ,  $\alpha(s)$  随能量  $s$  也在跑动, 即  $\alpha(s) = \frac{\alpha}{1 - \Delta\alpha(s)}$ , 其中  $\Delta\alpha(s)$  即光子真空极化的贡献.  $\Delta\alpha = \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)} + \Delta\alpha_{\text{top}}$ , 其中轻子贡献  $\Delta\alpha_1$  容易计算,  $\Delta\alpha_{\text{top}}$  较小, 而  $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}$ , 即来自 5 个轻夸克的贡献, 也无法以微扰 QCD 给出令人满意的理论计算, 而只能利用色散关系和光学原理通过对实验的  $R$  值的色散积分得到, 即

$$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(M_Z^2) = -\frac{\alpha M_Z^2}{3\pi} \text{Re} \int_4^{m_\pi^2} ds \frac{R(s)}{s(s - m_Z^2 - i\epsilon)}$$

目前得到的  $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(M_Z^2) = 0.0280 \pm 0.0007$ ,  $\alpha^{-1}(M_Z^2) = 128.89 \pm 0.09$ , 其中主要误差来自低能区的  $R$  值测量的实验误差. 2—5 GeV 能区的  $R$  值测量的实验误差对  $\alpha(M_Z^2)$  的误差的贡献约占全能区的 50%.  $\alpha(M_Z^2)$  的误差带给  $\sin^2 \theta_{\text{eff}}^l$  的 SM 理论预言的误差约为 0.0003, 已接近目前 LEP 上达到的实验误差  $\delta \sin^2 \theta_{\text{eff}}^l \cong 0.0004$ . 在标准模型拟合中, 目前  $\alpha(M_Z^2)$  的不确定性带给理论预言的顶夸克质量  $M_t$  和 Higgs 粒子质量  $M_H$  的不确定性分别大约为 4 GeV 和 150 GeV, 它已成为由标准模型的量子修正来进一步精确确定 Higgs 粒子质量  $M_H$  的严重障碍. 因此进一步减小  $\alpha(M_Z^2)$  的误差也已成为当务之急. 这就是为什么在 LEP/SLC 能区工作的理论和实验物理学家一再呼吁在低能区重测  $R$  值的原因所在.

鉴于上述的物理意义, 欧洲核子研究中心 (CERN) 的物理学家 A. Blondel 在 1996 年国际高能物理会议上的大会报告中特别指出: “重新测量低能区的  $R$  值的意义相当于所有测量弱混合角  $\sin^2 \theta_{\text{eff}}^l$  的总和. 测量  $R$  值并将  $a_\mu$  值的不确定性降至  $60 \times 10^{-11}$ , 其意义相当于建造 LEP2 (改进后的欧洲核子研究中心的  $e^+e^-$  对撞机) 甚至 LHC (已获批准将在欧洲核子研究中心建造的迄今世界上能量最高的强子对撞机)”<sup>[2]</sup>. 由此可见低能区的  $R$  值测量实验的重要性以及被国际高能物理界所关注的程度.

此外,对  $e^+e^-$  湮没产生强子过程的研究也是精确检验强相互作用理论 QCD 的重要场所.在高能量下( $\sqrt{s} \geq 10 \text{ GeV}$ ),实验上已有大量数据对 QCD 进行检验.基于弦碎裂的 LUND 模型能很好地描述高能量下的强子产生,因而基于该模型的强子事例产生子 Jetset74 被广泛接受和采用.但在 2—5 GeV 能区,由于缺少实验数据与其进行全面的比较,LUND 模型尚未真正在这一能区受到检验.由于非微扰强子化过程的典型能标约为几个 GeV,因此在这一能区研究强子产生机制就显得格外重要.利用 R 值测量实验中所收集到的大统计量的强子数据,全面研究反映其动力学机制的多重数、横动量、角分布、快度、球度等各种分布,精确测量强子产生截面,测量矢量粒子与赝标粒子、张量粒子与赝标粒子产生率之比,将为研究强子产生机制、改进强子产生模型和检验 QCD 理论提供重要的实验依据.鉴于该项研究工作的重要性,多年从事 LUND 模型研究的瑞典 LUND 大学的理论物理学家 B. Andersson 对此也表示了浓厚兴趣和合作意向.

鉴于低能区 R 值测量的特殊重要性,目前在低能区从  $\pi$  对产生阈至 1.5 GeV 已有俄罗斯的新西伯利亚的 VEPP-2  $M e^+e^-$  对撞机上的 CMD-2 实验组和意大利的 Frascati 的 DAΦNE  $e^+e^-$  对撞机上的 KLOE 实验组正在或正准备进行低能区的 R 值精细扫描测量.再高一些能区,特别是 2—5 GeV 能区,目前国际上只有北京正负电子对撞机和北京谱仪(BEPC/BES)运行在这一能区并可进行这一测量,故 BEPC/BES 上进行 R 值测量早已成为国际高能物理界关注的焦点.

## 2 北京谱仪(BES)上的 R 值测量

实验上测量 R 值实际上是相当复杂的,由下面的表达式

$$R = \frac{N_{\text{had}}^{\text{obs}} - N_{\text{bg}} - \sum_i N_{\text{ll}} - N_{\text{YY}}}{\sigma_{\mu\mu} \cdot L \cdot \epsilon_{\text{had}} \cdot \epsilon_{\text{trg}} \cdot (1 + \delta)}$$

可以看出,它包含了许多需要由实验上直接测量或由 Monte Carlo 计算或由理论计算给出的量,其中  $\sigma_{\mu\mu} = \alpha e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^- = 4\pi\alpha^2/3s$ ,即  $\mu^+\mu^-$  对产生的 Born 截面,可以直接计算; $N_{\text{had}}^{\text{obs}}$  为实验上观测到的  $e^+e^-$  对撞产生的强子事例数; $N_{\text{bg}}$  为束流相关的本底事例数,可由单束或分离束实验确定; $\sum_i N_{\text{ll}}$  和  $N_{\text{YY}}$  为误判的轻子对和来自双光子过程的事例数,需由 Monte Carlo 计算给出; $L$  为积分亮度,可由大角度 Bhabha 事例测量给出; $\epsilon_{\text{had}}$  为强子事例接收度,需由 Monte Carlo 计算给出; $\epsilon_{\text{trg}}$  为触发判选效率,需由专门实验数据确定; $(1 + \delta)$  为初态辐射修正,可由理论计算给出.

北京谱仪(BES)上的 R 值测量是分阶段完成的:

BES 首先利用早期获取的  $\sqrt{s} = 3.55 \text{ GeV}$  的约  $5 \text{ pb}^{-1}$  的数据开展 R 值测量的预先研究,着重研究了强子产生的各种形态特征分布,与描述强子产生的 LUND 模型产生子 Jetset74 的 Monte Carlo 数据比较,通过调整原产生子的参数,首次获得了适合于低能区的强子事例产生子,从而比较可靠地确定了探测效率.

随后,BES 于 1998 年进行了 R 值扫描测量的首轮实验,进一步研究了与 R 值测量有关的各种因素,如强子事例挑选、本底扣除、亮度测量、辐射修正和效率计算,以及与 BEPC 束流协调等问题.首轮实验在 6 个能量点(2.0, 3.2, 3.4, 3.55, 4.6 和 5.0 GeV)上获取了每点大约 1000—2000 个强子事例,初步分析结果曾在 1998 年国际高能物理大会上报告<sup>[3]</sup>,受到与会者的赞赏和重视.基于上述 6 个点分析结果的论文已发表在国际物理学权威刊物《Physical Review Letters》上<sup>[4]</sup>.

在此基础上,BES 于 1999 年 2 月至 6 月在 BEPC 上进行了 2—5 GeV 全能区的精细 R 扫描测量,除连续区外,着重在 3.77—4.50 GeV 的多共振区进行了仔细测量,获取了 85 个能量点的数据.此外,为进行探测器刻度、对撞能量刻度及扣除束流相关本底,还获取了一批  $J/\psi$  数据, $J/\psi$  和  $\psi(2S)$  共振峰扫描数据及单束或分离束数据.目前数据仍在紧张的分析中,部分能量点的初步结果已在 1999 年国际轻子-光子大会(LP99)和国际强子谱学大会(Hadron99)上报告,受到与会者的高度重视和好评.全部能量点的分析结果预计将在 2000 年国际高能物理大会上报告.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Eidelman S, Jegerlehner F. Z. Phys. C. 1995, 67:585
- [ 2 ] Blondel A. In: Ajduk Z, Wroblewski A K eds. Proceedings of the 28th International Conference on High Energy Physics. Singapore: World Scientific, 1996. 205
- [ 3 ] Zhao Z G. In: Astbury A, Axen D, Robinson J eds. Proceedings of the 29th International Conference on High Energy Physics. Singapore: World Scientific, 1998. 535
- [ 4 ] Bai J Z, Ban Y, Bian J G *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84:594