

R 值测量与标准模型检验*

黄光顺¹⁾

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

(中国高等科学技术中心 北京 100080)

摘要 北京正负电子对撞机(BEPC)/北京谱仪(BES)在 2—5GeV能区进行了两轮 R 值扫描测量,把该能区 R 值的误差降低到原有水平的一半左右.这一结果对于精确确定QED跑动精细结构常数 $\alpha(M_z^2)$ 、进而确定Higgs粒子的质量具有重要意义,同时对 μ 子反常磁矩 a_μ 的物理解释也有重要贡献.

关键词 R 值 强子产生总截面 精细结构常数 μ 子反常磁矩

1 引言

标准模型是描述轻子和夸克的性质、运动及其相互作用规律的基本理论.标准模型的一些基本参数,如QED精细结构常数 α 、强相互作用跑动耦合常数 α_s 、弱电混合角(即Weinberg角) $\sin^2\theta_w$ 等,必须由实验决定.标准模型预言了Higgs粒子的存在和 μ 轻子的反常磁矩 a_μ .因此,从实验方面确定标准模型的基本参数和对标准模型的预言作精确检验是粒子物理学的重要课题.受非微扰效应的限制,利用标准模型做精确理论计算时,一般采用实验上测量的强子产生截面(参数化即为 R 值)作为输入参数,所以降低非微扰区 R 值的实验误差对于标准模型的精确检验具有非常重要的意义.

从强子产生阈直到 Z 能标的能量范围内,世界上许多实验组都进行过 R 值测量,粒子物理实验数据的权威评测机构粒子数据组(PDG)在其最新手册中汇总了各家测量结果^[1].总的来说,实验给出的 R 值与理论预言值是一致的,这说明三色夸克的假设是合理的.在不同能区, R 值的测量误差是有差别的.大体上说,在 高能区误差较小,在低能区误差较大.在质心系能量小于 5GeV的能区,Orsay, Frascati和SLAC等实验组给出 R 值的不确定性为 15%—20%^[2],在 5—10GeV能区(即粲夸克和底夸克的产生阈之间),MARKI, DASP, PLUTO, Crystal Ball, LENA, CLEO, CUSB, DESY, Heidelberg 等合作组进行 R 值测量,所给出的不确定性约为 5%—10%,在 b 夸克阈以上,PEP, PETRA, TRISTAN和LEP

* 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)和中国科学院百人计划基金资助

1) E-mail: huanggs@mail.ihep.ac.cn

对撞机上的实验组给出的误差为 2%—7%.

北京正负电子对撞机/北京谱仪(BEPC/BES)^[3]的工作能区在 2—5GeV,是该能区唯一仍在运行的加速器/探测器,而标准模型理论计算的精度主要受低能区(<5.0GeV) R 值测量的实验误差(>15%)制约,因此在BEPC/BES上进行 R 值测量受到国际高能物理界高度关注.

2 北京谱仪 2—5GeV 能区 R 值测量

R 值定义为正负电子对撞通过虚光子湮没到强子与到双 μ 的零阶截面的比值,即

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

其中 $\sigma_{\mu\mu}$ 可由QED理论精确计算得到, $\sigma_{\mu\mu}=4\pi\alpha^2/3s$.

实验上, R 值是通过下式计算得到的

$$R = \frac{N_{\text{had}}^{\text{obs}} - N_{\text{bg}}}{\sigma_{\mu\mu} \cdot \varepsilon_{\text{had}} \cdot \varepsilon_{\text{trg}} \cdot (1 + \delta) \cdot L}, \quad (2)$$

其中 $N_{\text{had}}^{\text{obs}}$ 是观测到的强子事例数, N_{bg} 是本底事例数, ε_{had} 是强子的探测效率, ε_{trg} 是强子的触发效率, δ 是辐射修正因子, L 为积分亮度.在 R 值取数期间,触发条件的设置很宽松,保证了触发效率为 100%^[4].

2.1 强子事例选择

R 值测量实际上是强子产生总截面的测量,因此强子事例选择是一个遍举选择过程,不必判别强子末态.强子事例没有明确的运动学和拓扑特征,只能采用排除法扣减各种可能的本底^[5].首先排除Bhabha事例,因为它的产生截面很大,事例特征又很突出.其次是径迹级的选择,选择条件有:极角范围 $|\cos\theta| < 0.84$;在MDC有好的螺旋线拟合($MFIT=2$ 或 -19), $MFIT$ 是反映径迹拟合优度的指标,其中 $MFIT=2$ 更优;若 $MFIT=2$,顶点位置 $V_r < 2.0\text{cm}$;若 $MFIT=-19$,在MDC中 dE/dx 击中层数 $N_{dE/dx} > 16$;动量 $p < p_{\text{beam}} + 5 \times \sigma_{p_{\text{beam}}}$, p_{beam} 和 $\sigma_{p_{\text{beam}}}$ 分别是束流动量和分辨;能量 $E < 0.6E_{\text{beam}}$, E_{beam} 是束流能量;不能是确定的 μ 径迹,即在 μ 计数器中击中数 $N_{\mu\text{hits}} < 5$;若有好的TOF击中,则要求飞行时间 $2 < t < t_p + 5 \times \sigma_t(\text{ns})$,其中 σ_t 是时间分辨, t_p 是质子假设下的预期飞行时间.然后是事例级的选择条件:通过径迹判选的好带电径迹数 $N_{\text{good}} \geq 2$,其中 $MFIT=2$ 的径迹数 $N_{MFIT=2} \geq 1$;总的沉积能量 $E_{\text{sum}} > 0.28E_{\text{beam}}$;事例不能具有前冲性;对两叉事例,两条好径迹不能背对背,且必须有两个以上孤立光子.最后通过拟合事例顶点沿束流方向的分布,用Gauss函数代表好事例,用二次多项式代表本底来得到强子事例数.对于残留的轻子对本底,还用Monte Carlo方法估算并进一步扣除.

2.2 探测效率

探测效率是强子事例被探测器记录并通过判选条件的几率,借助于强子事例产生器来得到. LUND模型能够较好地描述强子产生机制,其产生器JETSET在高能区被广泛采用. 通过参数调整,使JETSET74与实验数据在多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)相符合,由此得到适用于2—5GeV能区的产生器并用之于确定探测效率^[6,7]. 另一方面,R值组与LUND组合作开发了严格基于LUND弦碎裂模型强子化面积定律的新产生器LUARLW^[8],它不再采用JETSET中的高能近似,所以尤其适用于描述低能区少体产生行为. 由这两种产生器得到的效率差别在1%—2%,作为系统误差的一部分.

2.3 辐射修正

R值的定义中只包含零阶截面,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. 两者关系为: $\sigma_{\text{had}}^{\text{obs}} = \sigma(1 + \delta)$,这里 $1 + \delta$ 即为辐射修正因子,它可近似地表示为

$$\delta = \delta_{\text{vert}} + \delta_{\text{vac}} + \delta_{\text{yobs}}, \quad (3)$$

其中 δ_{vert} 为初态顶点修正, δ_{vac} 为真空极化修正, δ_{yobs} 为韧致辐射修正. 由于虚修正项 δ_{vert} 和 δ_{vac} 与实验因素无关,而实修正项 δ_{yobs} 受探测效率影响,所以实验上的处理是把辐射效应对探测效率的影响合并到辐射修正因子之中,即作如下替换: $\varepsilon_{\text{had}}(1 + \delta) \rightarrow \varepsilon(0)(1 + \delta_{\text{obs}})$. 分析比较了3种典型的计算方案,数值差别在连续区约为1%,在共振区接近2%^[9]. 辐射修正因子的计算选用Berends方案,这一方案也为Crystal Ball实验组所采用.

2.4 亮度测量

用大角度 Bhabha 事例确定数据获取的积分亮度,表达式为

$$L = \frac{N_{\text{ee}}^{\text{obs}}}{\sigma_{\text{ee}} \cdot \varepsilon_{\text{ee}} \cdot \varepsilon_{\text{trg}}}, \quad (4)$$

其中 $\sigma_{\text{ee}}^{\text{obs}}$ 为观测到的Bhabha事例数, σ_{ee} 为模拟产生Bhabha事例的截面, ε_{ee} 是从模拟数据得到的Bhabha事例探测效率, ε_{trg} 为Bhabha事例的触发效率. Bhabha事例的选择可

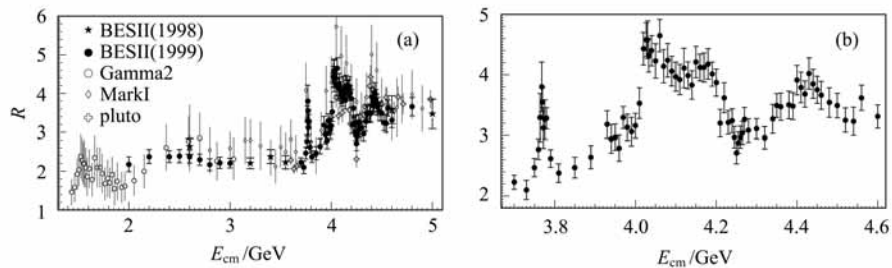


图1 (a) 1.4—5GeV 能区 R 值汇编; (b) 3.7—4.8GeV 共振区域新测 R 值

以根据桶部簇射计数器的能量沉积和主漂移室 dE/dx 信息^[10]。此外,亮度测量结果还用 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma)$ 和 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$ 两种过程做了检验,彼此在误差范围内是符合的^[11]。

2.5 R 值测量结果

两轮 R 值扫描实验分别测量了 6 个和 85 个能量点, R 值的平均误差降低到 6.6%, 精度比原有水平提高一倍以上^[12,13], 如图 1 所示。

3 对标准模型检验的贡献

在 2—5 GeV 能区精确测量 R 值, 其意义主要体现在两个方面, 首先是减小 QED 跑动耦合常数 $\alpha(s)$ 的不确定性, 因而能够提高理论拟合 Higgs 粒子质量 (M_H) 的精度, 其次是有助于更好地解释 μ 轻子的反常磁矩 a_μ 。

3.1 QED 跑动精细结构常数 $\alpha(s)$

在标准模型的 3 个输入参数中, $\alpha(s)$ 是误差最大的。 $\alpha(s)$ 随能量的演化关系为

$$\alpha(s) = \frac{\alpha(0)}{1 - \Delta\alpha(s)}, \quad (5)$$

其中 $\Delta\alpha(s)$ 是轻子和夸克的光子真空极化的贡献, 它可以表示为

$$\Delta\alpha(s) = \Delta\alpha_l + \Delta\alpha_{\text{had}}^{(s)} + \Delta\alpha_{\text{top}}, \quad (6)$$

式中轻子和顶夸克的贡献都可以精确计算。但是 $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(s)}$ 不能完全由微扰 QCD 计算, 实际的做法是利用色散关系由 e^+e^- 湮没到强子的截面计算

$$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(s)}(s) = -\frac{s}{4\pi^2\alpha} \text{Re} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} \frac{ds' \sigma_{\text{had}}(s')}{s' - s - i\varepsilon}, \quad (7)$$

$$= -\frac{\alpha s}{3\pi} \text{Re} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} ds' \frac{R(s')}{s' - s - i\varepsilon}, \quad (8)$$

这里需要 R 值作输入, 故 R 值的误差限制了 $\alpha(M_Z)$ 理论评估的精度。

北京谱仪 R 值测量结果发布以后, 欧洲核子中心的专家对 $\alpha(M_Z)$ 重新作了评估, 发现 $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(s)}(M_Z)$ 由 0.0280 ± 0.0007 变到 0.02761 ± 0.00036 , 2—5 GeV 能区的 R 值对 $\Delta\alpha(M_Z)$ 的误差贡献从超过 50% 减小到 30% 左右^[14]。这一改进使 Higgs 粒子的拟合质量从 62_{-30}^{+53} GeV 变到 98_{-38}^{+58} GeV, 质量上限从 170 GeV 变到 210 GeV^[15], 对于 Higgs 粒子的实验寻找有重要的指导意义。

3.2 μ 轻子反常磁矩 a_μ

根据E821 组最新实验结果， a_μ 的世界平均值为 $a_\mu(\text{exp})=11659203(15) \times 10^{-10}$ ，与标准模型预言值 $a_\mu(\text{SM})=11659159.6(6.7) \times 10^{-10}$ 相差 $2.6\sigma^{[16]}$ 。但是这里引用的理论值尚未吸收北京谱仪R值测量结果。

按照标准模型， a_μ 可以分解为以下几项：

$$a_\mu^{\text{the}} = a_\mu^{\text{QED}} + a_\mu^{\text{had}} + a_\mu^{\text{weak}}, \quad (9)$$

其中QED贡献 a_μ^{QED} 已经被计算到 $O(\alpha^5)$ ； a_μ^{weak} 是来自于弱作用的贡献； a_μ^{had} 来自于夸克和QCD贡献，是最大的误差来源，而它也依赖实验测量的R值：

$$a_\mu^{\text{had}} = \frac{1}{4\pi^3} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} ds' \sigma_{\text{had}}(s') K(s') \quad (10)$$

$$= \left(\frac{cm_\mu}{3\pi} \right)^2 \int_{4m_\pi^2}^{\infty} ds' \frac{R(s') \hat{K}(s')}{s'^2}. \quad (11)$$

以BES的R值做输入，得到 a_μ^{had} 由 $(696.7 \pm 15.6) \times 10^{-10}$ 变为 $(698.75 \pm 11.11) \times 10^{-10}$ 。^[17]

采用新的 e^+e^- 实验数据和改进理论计算方法，发现 a_μ 的理论值与实验值的差别实际上小于 $1.5\sigma^{[18]}$ ，这说明并不存在所谓 $(g-2)$ 危机，也不能由此断言偏离标准模型的新物理的存在。

作者代表 BES 合作组感谢 M. Tigner, B. Andersson, M. Davier, B. Pietrzyk, T. Sjstrand, A. D. Martin, M. L. Swartz, 赵光达教授、黄涛、吴济民、张肇西和张新民研究员对 R 值课题的关心和帮助；感谢电子学室、加速器中心和运行车间全体人员在 R 值取数期间的大力协作和支持。

参考文献(References)

- 1 Particle Data Group. Eur. Phys. J., 2000, **C15**(PDG 2000): 229
- 2 Swartz M L. Phys. Rev., 1996, **D53**: 5268—5282
- 3 BAI Jing-Zhi et al. Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res., 2001, **A458**: 627
- 4 HUANG Guang-Shun et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2001, **25**(9): 889—897(in Chinese)
(黄光顺等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(9): 889—897)
- 5 HUANG Guang-Shun. The R Value Measurement Between 2.6—5GeV. Ph. D. Thesis, IHEP, 1999 (in Chinese)
(黄光顺. 2.6—5GeV 能区 R 值测量, 博士论文, 中国科学院高能物理研究所, 1999)
- 6 QI Xiang-Rong et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1999, **23**(1): 1—9(in Chinese)
(祁向荣等. 高能物理与核物理, 1999, **23**(1): 1—9)
- 7 CHEN Jiang-Chuan et al. Phys. Rev., 2000, **D62**: 034003

- 8 HU Hai-Ming et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2001, **25**(11): 1035—1043 (in Chinese)
胡海明等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(11): 1035—1043)
- 9 HU Hai-Ming et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2001, **25**(8): 701—709 (in Chinese)
(胡海明等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(8): 701—709)
- 10 WANG Zhi-Yong et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2001, **25**(2): 89—94 (in Chinese)
(王至勇等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(2): 89—94)
- 11 HUANG Guang-Shun et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2000, **24**(5): 373—378(in Chinese)
(黄光顺等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(5): 373—378)
- 12 BAI Jing-Zhi et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **84**: 594—597
- 13 BAI Jing-Zhi et al. hep-ex/ 0102003
- 14 Pietrzyk B. Phys. Lett., 2001, **B513**: 46—52
- 15 Tournefier E. hep-ph/0105091
- 16 Brown H N. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 2227—2231
- 17 Jegerlehner F. hep-ph/0104304
- 18 Trocóniz J F, Ynduráin F J. hep-ph/ 0106025

***R* Measurement and Standard Model Test^{*}**

HUANG Guang-Shun¹⁾

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

(China Center of Advanced Science and Technology, Beijing 100080, China)

Abstract With an upgraded Beijing Spectrometer (BESII) at the Beijing Electron Positron Collider (BEPC), the BES collaboration finished two runs of R scan in the energy region from 2 to 5 GeV. R values for all 6+85 scanned energy points are presented, with an average uncertainty of 6.6%, which represents an improvement by a factor of 2—3. These measurements make an important contribution to the precision determination of $\alpha(M_Z^2)$, the QED coupling constant evaluated at the Z pole. The results also contribute to the interpretation of muon $g - 2$ measurement.

Key words R value, hadron production cross section, fine-structure constant, muon ($g_\mu - 2$) factor

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

1) E-mail: huanggs@mail.ihep.ac.cn