

·学科进展·

## 2—5 GeV 能区 $R$ 值的测量

赵政国

(中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

**[摘要]** 2—5 GeV 能区的  $R$  值对于精确确定 QED 跑动精细结构常数  $\alpha(M_Z^2)$ 、进而确定黑格斯粒子的质量具有重要意义,同时对  $\mu$  子反常磁矩  $a_\mu$  的物理解释也有重要贡献。北京正负电子对撞机(BEPC)/北京谱仪(BES)在该能区进行了  $R$  值扫描测量,本文给出 85 个扫描点的初步结果,误差降低到原有水平的一半左右。

**[关键词]**  $R$  值,强子产生总截面,精细结构常数, $\mu$  子反常磁矩

### 引言

物质结构研究是当代物理学最活跃的前沿领域之一。人类对物质世界基本组成成分的认识是不断深入的,分子、原子、原子核、质量、中子以及多种介子都曾被看作基本粒子。在今天的实验手段和认识水平下,基本粒子是在轻子和夸克这一层次。

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是标准模型。在标准模型的框架内,轻子和夸克都有三代之分,夸克不仅有味道(flavor),而且有颜色(color),介子和重子均由夸克组成。标准模型作为一个基本的规范理论取得了很大的成功,由标准模型出发所得到的一切结论和推论都不与现今的实验相悖。标准模型是在规范变换下的不变性或对称性等基础上建立起来的,但其中含有一些作为基本物理量的模型参数却不能在模型的框架内确定下来,如 QED 精细结构常数  $\alpha$ 、强相互作用跑动耦合  $\alpha_s$ 、弱电混合角(即 Weinberg 角)  $\sin^2\theta_W$  等等。它们在理论计算中被作为基本参数,必须由实验决定。标准模型还预言了 Higgs 粒子的存在, $\mu$  轻子的反常磁矩  $a_\mu$ 。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。

在弱电理论中,模型的基本参数很多,通常的做法是用实验误差最小的量,如: $\alpha$ 、 $G_F$ 、 $M_Z$  等,由理论拟合得到其他参数。在现有的实验条件下,标准模

型的精确检验受到理论计算常常碰到的非微扰效应和输入参数的不确定性限制。所以,在利用电磁精细结构常数  $\alpha(0)$  进行理论精确计算时,一般采用实验上测量的强子产生截面(即  $R$  值)作为输入参数,从  $\alpha(0)$  的实验值得到  $\alpha(M_Z^2)$  理论值,以回避难以处理的非微扰效应问题。另外, $\mu$  轻子反常磁矩  $a_\mu$  的理论精确计算也会遇到非微扰效应,同样要用  $R$  值作为输入参数。由此可见,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。

目前,理论计算的精度主要受低能区( $< 5.0$  GeV)  $R$  值测量的不确定性制约, $R$  值的实验误差在 15% 以上。北京正负电子对撞机/北京谱仪(BEPC/BES)的工作能区在 2.0—5.0 GeV,是该能区唯一仍在运行的加速器/探测器,因此,在改进后的 BEPC/BES 上测量  $R$  值具有不可替代的重要意义,倍受国际高能物理界关注。

### 1 $R$ 值定义

$R$  值定义式为:

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

式中, $\sigma_{had}$  是  $e^+e^-$  对撞经单光子湮灭产生强子的最低阶总截面; $\sigma_{\mu\mu}$  是  $e^+e^-$  经单光子湮灭产生  $\mu^+\mu^-$  的最低阶截面(Born 截面),可由 QED 理论精确计算得到。

本文于 2000 年 9 月 14 日收到。

$$\sigma_{\mu\mu} = \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \quad (2)$$

正负电子对撞直接产生的是夸克对,夸克的强子化过程不影响其截面的大小。所以,强子的产生截面实际上就是夸克的产生截面。夸克和  $\mu^+ \mu^-$  都是最基本的费米子,它们的产生机制相同,只是电荷不同。按照 QED 理论在不考虑任何微扰 QCD 修正的情况下,由夸克一部分子模型给出的  $R$  值为:

$$R^{(0)} = 3 \sum_q Q_q^2 \quad (3)$$

式中  $Q_q$  为夸克  $q$  的电荷。因为强子事例是具有各种颜色 ( $N_c = 3$ ) 和各种味道的夸克演变而来,所以应对色和味自由度求和。由此可知,  $R$  值直接反映了夸克的种数,早期  $R$  值曾是夸克具有颜色自由度的有力证据之一。可以预期,  $R$  值在非共振区域是常数,当质心系能量高到足以产生新的夸克种类时,  $R$  值会有突变。在 2—5 GeV 能区,有粲粒子的产生阈(3 770 MeV),在阈值以下,  $R$  值为 2,在阈值以上,  $R$  值为 10/3。

## 2 $R$ 值测量的实验现状

从强子产生阈到  $Z$  能标的很大能区范围里,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)在其最近出版的手册中汇总了各家测量结果<sup>[1]</sup>。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,在低能区误差较小,在高能区误差较大。在质心系能量小于 5 GeV 的能区,Orsay、Frascati 和 SLAC 等实验组给出  $R$  值的不确定性为 15%—20%<sup>[2]</sup>,在 5—10 GeV 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 5%—10%,在  $b$  夸克阈以上,PEP、PETRA、TRISTAN 和 LEP 对撞机上的实验组给出的误差为 2%—7%。

以上数据表明,  $R$  值测量的不确定性主要集中在低能区。目前中国和俄罗斯都在进行  $R$  值测量研究,两家覆盖的能区是互补的,但也存在着某种竞争。俄罗斯 Novosibirsk 的 VEPP-2M 对撞机运行能区为 0.6—1.4 GeV,并计划进一步扩展,有 CMD2 和 SND 两台探测器用于  $R$  值扫描测量。BEPC/BES 在 2—5 GeV 能区对  $R$  值进行高精度的细致扫描测量,不仅是必要的,也是完全可能的。利用 BES 在

$\sqrt{s} = 3.55$  GeV 的实验数据所做的预研表明, BEPC/BES 完全有能力将这一能区  $R$  值测量的实验误差降低到 7% 左右。

## 3 2—5 GeV 能区 $R$ 值扫描测量的意义

在 2—5 GeV 能区精确测量  $R$  值,降低实验误差,其意义主要体现在两个方面,首先是大大减小 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  $\mu$  轻子的反常磁矩  $a_\mu$ 。

### 3.1 QED 跑动精细结构常数 $\alpha(s)$

标准模型的弱电统一理论是建立在  $SU(2) \times U(1)$  基础上的。标准模型的输入参数,有些已经测得十分精确,如  $\alpha(M_Z)$ ,  $G_F$  和  $M_Z$ ;有些只是近似值,精度不高,如几个轻夸克的质量  $m_q$  ( $q = u, d, s, c, b$ ) 和  $\alpha_s(M_Z)$ ;有些则还很不确定,如  $m_t$  和  $M_H$ 。这些参数彼此之间不是完全独立的,从若干精确测定的参数可以导出另外一些参数,进而跟实验作比较。

就 3 个已精确测定的参量  $\alpha(s)$ ,  $G_F$  和  $M_Z$  而言, QED 跑动耦合常数  $\alpha(s)$  是最大的不确定性来源。当对不同能区进行相关测量时,测量到的精细结构常数在变化,其演化可表述为:

$$\alpha(s) = \frac{\alpha(0)}{1 - \Delta\alpha(s)} \quad (4)$$

其中  $\Delta\alpha(s)$  是轻夸克的光子真空极化的贡献,由单粒子不可约光子自能可表示为:

$$\Delta\alpha(s) = \Pi'_{\gamma}(0) - \text{Re}\Pi'_{\gamma}(s) \quad (5)$$

$\Delta\alpha(s)$  按其起源可以表示为轻子 ( $e^+$ ,  $\mu^+$ ,  $T^+$ ) 的贡献  $\Delta\alpha_l$ , 5 个轻夸克 ( $u, d, s, c, b$ ) 的贡献  $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}$  及顶夸克 ( $t$ ) 的贡献  $\Delta\alpha_{\text{top}}$  之和:

$$\Delta\alpha(s) = \Delta\alpha_l + \Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)} + \Delta\alpha_{\text{top}} \quad (6)$$

式中,轻子的贡献可以很好地解析计算得到,顶夸克 ( $m_t \gg M_Z$ ) 的贡献可表示为

$$\Delta\alpha_{\text{top}} \approx -\frac{\alpha}{3\pi} \frac{4}{15} \frac{M_Z^2}{m_t^2} \rightarrow 0 \quad (7)$$

问题在于  $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}$  不能完全由微扰 QCD 计算,这是受轻夸克质量  $m_u$  和  $m_d$  定义的模糊性以及低能标下的非微扰特性所限制的。实际的做法是利用色散关系由  $e^+e^-$  湮灭的强子截面计算:

$$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(s) = -\frac{s}{4\pi^2\alpha} \text{Re} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} \frac{ds' \sigma_{\text{had}}(s')}{s' - s - i\epsilon} \quad (8)$$

$$= -\frac{\alpha s}{3\pi} \text{Re} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} \frac{ds' R(s')}{s' - s - i\epsilon} \quad (9)$$

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。图 1 显示,  $\Delta\alpha(M_Z)$  的不确定性一半以上来源于低能区(2—5 GeV) R 值的误差。计算表明, 如果 R 值的实验误差在 1—2 GeV 范围内从 15% 降到 10%, 在 2—5 GeV 范围内从 15% 降到 5%, 则  $\alpha(M_Z)$  的不确定性将比现有水平降低 40%。

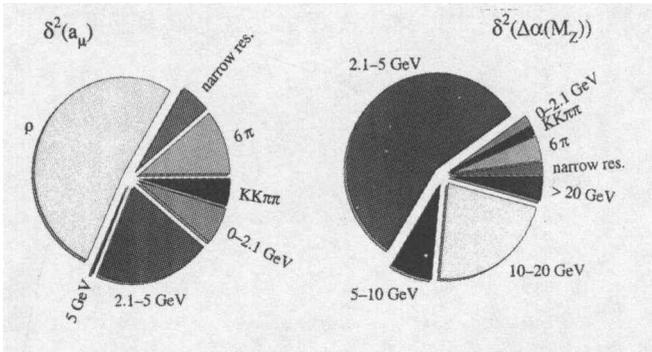


图 1 不同能区及产生道对  $\alpha_\mu$  和  $\Delta\alpha(M_Z)$  误差的相对贡献

此外, 在粲粒子产生阈附近可能存在共振结构的问题也有待研究。DASP 研究小组<sup>[3]</sup>指出在 4.04 GeV 和 4.16 GeV 有共振态。Mark I 的数据<sup>[4]</sup>表明, 伴随着 3.77 GeV 共振态, 在 4.04, 4.2 和 4.4 GeV 还有较宽的增强。PLUTO 组也观察到了 4.4 GeV 的共振态, 但给出的共振峰高度和宽度都不相同。重新测量粲阈附近强子产生截面预期能够搞清这些共振结构, 进而对精密确定  $\alpha(M_Z)$  起到作用。

$\alpha(M_Z)$  的值影响与  $m_t$  和  $M_H$  有关的弱电修正的确定。用实验确定的  $\alpha(M_Z)$  做输入参数, 并在其他约束条件下, 可对 Higgs 质量做标准模型拟合。理论上的不确定性, 主要来自 Higgs 质量对弱电修正的贡献。目前  $\alpha(M_Z)$  的实验误差造成的影响大于理论预言, 所以  $\alpha(M_Z)$  精度的提高, 有助于更准确地确定 Higgs 质量。

目前在用精密的弱电数据确定  $m_t$  方面,  $\alpha(M_Z)$  数值不确定性引起的误差也大于理论不确定性的影响。最新的  $\alpha(M_Z)$  结果为  $\alpha(M_Z) = 1/(128.89 + 0.09)$ , 对于固定的  $M_H$ , 给  $m_t$  带来的误差为 4 GeV; 给标准模型预言值  $\sin\theta_{eff}^{lep} = 0.23167$  带来的误差为 0.00023。

### 3.2 $\mu$ 轻子反常磁矩 $\alpha_\mu$

根据 Dirac 理论, 轻子作为类点粒子, 其磁矩为:

$$\mu = g\mu_B S \quad (10)$$

这里  $\mu_B$  为玻尔磁子,  $S$  为轻子自旋。Dirac 理论预言对于  $S = 1/2$  的费米子  $g = 2$ 。从理论上来说, 轻子的反常磁矩  $\alpha_l = (g - 2)/2$  对大能标、高级辐射贡献、新自由度的产生和相互作用是直接相关的<sup>[6]</sup>。因此它可以为弱电理论提供很好检验, 并且还可为

能偏离标准模型的所谓“新物理”给出重要的暗示<sup>[7]</sup>。

三代轻子(e,  $\mu$ ,  $\tau$ )中, 电子质量太小, 其弱相互作用和真空极化效应是完全观察不到的, 而  $\tau$  又因为其寿命很短, 这使得  $\alpha_\tau$  的测量非常困难。对  $\mu$  来说, 其较大的质量, 相对长的寿命, 使得  $\alpha_\mu$  是一个理论上可以计算得很精确, 而实验上又能高精度测量的量。目前,  $\mu$  的反常磁矩  $\alpha_\mu$  理论值为 116 591 877 (176), 而 CERN 的  $\mu$  储存环给出的实验值为 116 592 300(840) 这是物理测量中最好的数值结果之一。Brookhaven 的 E821 组计划进行的新实验将把现有精度再提高两个量级, 届时必须有新的理论与之相适应, 弱作用(由虚 W, Z 和 Higgs 交换)效应的贡献也将变得不可忽略。

理论上根据不同的起源, 可以把  $\alpha_\mu$  分解为以下几项:

$$\alpha_\mu^{the} = \alpha_\mu^{QED} + \alpha_\mu^{had} + \alpha_\mu^{weak} + \alpha_\mu^{new} \quad (11)$$

其中:

$\alpha_\mu^{QED}$ : QED 贡献是最大的一项, 已经被计算到  $O(\alpha^5)$ ;

$\alpha_\mu^{weak}$ : 包括由 W, Z 和 Higgs 粒子交换引起的标准模型效应;

$\alpha_\mu^{had}$ : 夸克和 QCD 贡献, 目前是最大的误差来源;

$\alpha_\mu^{new}$ : 可能超越标准模型的其他来源的贡献。

由于理论的不确定性主要来自于强作用, 而低能强作用不能由微扰 QCD 计算, 只能依靠色散关系与实验测量到的 R 值来估算:

$$\alpha_\mu^{had} = \frac{1}{4\pi^3} \int_{4m_\pi^2}^{\infty} ds' \sigma_{had}(s') K(s') \quad (12)$$

$$= \left(\frac{\alpha m_\mu}{3\pi}\right)^2 \int_{4m_\pi^2}^{\infty} ds' \frac{R(s') \hat{K}(s')}{s'^2} \quad (13)$$

被积函数中存在因子  $1/s'^2$ , 因此  $\alpha_\mu^{had}$  对中低能区( $\sqrt{s} = 1-5$  GeV)的 R 值的依赖强烈。此能区已有 R 值的实验误差约为 15—20%, 它传递给  $\alpha_\mu^{had}$  的误差为  $154 \times 10^{-11}$ 。图 1 给出了不同能区对  $\alpha_\mu$  和  $\Delta\alpha(M_Z)$  的误差贡献, 可见低能区的不确定性占主导地位。重新测量  $e^+e^-$  湮灭为强子的截面(即 R 值), 把带给  $\alpha_\mu$  的不确定性降至  $60 \times 10^{-11}$ , 其物理成就等同于 LEP 甚至于 LHC 的物理成就<sup>[5]</sup>。

提高  $\alpha_\mu$  理论计算精度的重要意义在于探索新物理。误差减小到一定程度, 就有可能显露出原来隐藏于不确定性中的  $\alpha_\mu^{new}$ 。Novosibirsk 的 VEPP2M

和 Frascati 的 DAΦNE 实验将在 0.5—1.5 GeV 能区开展研究,其结果将更有利于解释 Brookhaven 的  $g-2$  测量实验<sup>[8]</sup>,DEPC/BES 在 2—5 GeV 能区对  $R$  值的精确测量对  $g-2$  问题的分析也会做出应有的贡献。

#### 4 BEPC/BES 上的 $R$ 值测量实验

北京正负电子对撞机/北京谱仪(BEPC/BES)是我国唯一的高能加速器/探测器,始建于 1984 年,1988 年建成并投入运行,1996 年完成升级改造。BEPC/BES 运行以来,取得了  $\tau$  轻子质量精密测量等一系列具有重要影响的物理成果,为中国在国际高能物理界中赢得了一席之地。 $R$  值测量则是 BEPC/BES 升级改造后的第一个重大项目。

由式(9)和(13)可以看到, $\alpha_\mu^{had}$  积分正比于  $R_{had}/s^2$ ,而  $\Delta\alpha(M_Z)$  积分正比于  $R_{had}/s$ ,这意味着  $\alpha_\mu^{had}$  对低能区的  $R$  值依赖更为强烈。所以 BEPC/BES 的  $R$  值扫描结果将主要对重新评价  $\alpha(M_Z)$  做出贡献,同时也有助于对  $\mu$  子反常磁矩  $\alpha_\mu$  的更好解释。

1998 年和 1999 年两个春季, BEPC/BES 成功地进行了两轮  $R$  值扫描测量实验,分别测量了 6 个和 85 个扫描点。第一轮实验数据已全部分析完毕,结果表明  $R$  值的实验误差降低到原有水平的一半左右,达到 7%—10%,基于第一轮实验 6 个能量点分析结果的论文已发表在国际物理学权威刊物<sup>[9]</sup>。第二轮实验数据的分析工作也已接近尾声,初步结果表明能够达到相近的精度。BEPC/BES 的  $R$  值测量实验引起了国际高能物理界的广泛关注,迄今所取

得的阶段性成果已在若干国际高能物理会议上做了报道,受到国内外同行的高度重视和好评。最新结果在第 30 届国际高能物理大会上报道后,即被数次引用,并被录入大会总结报告,充分显示了这项工作的重要意义。BEPC/BES 的  $R$  值测量项目所取得的巨大成功,为中国高能物理在世界上赢得了声誉。

#### 参 考 文 献

- [1] Particle Data Group. Review of Particle Physics. Eur. Phys. J., 2000, C15:229.
- [2] Swartz L. Reevaluation of the hadronic contribution to  $\alpha(M_Z^2)$ . Phys. Rev., 1996, D53:5 268—5 282.
- [3] Brandelik R et al. Total cross section for hadron production by  $e^+e^-$  annihilation at center of mass energies between 3.6 and 5.2 GeV. Phys. Lett., 1978, B76:361—365.
- [4] Siegrist J L et al. Hadron production by  $e^+e^-$  annihilation at center-of-mass energies between 2.6 and 7.8 GeV. Phys. Rev., 1982, D26:969—1 012.
- [5] Nasrallah N F. Hadronic contributions to the running fine structure constant  $\alpha(M_Z^2)$  from QCD sum rules. Phys. Lett., 1997, B393:419—422.
- [6] Broadhurst D J et al. Analytical onshell QED results: 3-loop vacuum polarization, 4-loop  $\beta$ -function and the muon anomaly. Phys. Lett., 1993, B298:445—452.
- [7] Mery P et al. Constraints on nonstandard effects from present and future  $g_\mu-2$  measurements. Z. Phys., 1990, C46:229.
- [8] Roberts B L. The new muon ( $g-2$ ) experiment at Brookhaven. Z. Phys., 1992, C56:S101—S108.
- [9] Bai J Z et al. Measurement of the total cross-section for hadronic production by  $e^+e^-$  annihilation at energies between 2.6—5 GeV. Phys. Rev. Lett., 2000, 84:594—597.

### R MEASUREMENT BETWEEN 2—5 GeV

Zhao Zhengguo

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

**Abstract** With an upgraded Beijing Spectrometer(BESII) at the Beijing Electron Positron Collider(BEPC), the BES collaboration finished an  $R$  scan in the energy region from 2 to 5 GeV. Preliminary  $R$  values for all 85 scanned energy points are presented. This measurement will make an important contribution to the precision determination of  $\alpha(M_Z^2)$ , the QED coupling constant evaluated at the  $Z$  pole. The present uncertainty is a serious limit to further progress in the determination of the Higgs mass from radiative corrections in the Standard Model. The results can 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