

北京谱仪上的 R 值测量

黄光顺

(1. 核探测与核电子学国家重点实验室 230026; 2. 中国科学技术大学近代物理系 230026)

北京正负电子对撞机(BEPC)/北京谱仪(BES)是我国第一个也是到目前为止唯一的基于加速器的高能物理实验装置。BEPC/BES 始建于1984年,至1988年建成并实现正负电子对撞,1989年开始正式实验运行,视为第一代(BEPC I/BES I)。经过1993年至1997年的升级改造,加速器仍视为第一代,谱仪则称为第二代(BES II),于1998年恢复运行。2004年至2008年再次进行了重大升级改造,加速器采用了双环、多束团方案,对撞亮度提高100倍,为第二代(BEPC II);全新建造的谱仪采用了超导磁铁、全吸收型电磁量能器,性能大幅提升,故称为第三代(BES III)。BEPC II/BES III从2009年开始实验运行,正源源不断地获取海量数据。北京谱仪实验迄今已经30年,取得了一些在国际高能物理界有影响的重要研究成果,如 τ 轻子质量的精确测量、2~5 GeV能区正负电子对撞产生强子截面(R 值)的精确测量、发现奇特XYZ粒子态等,本文介绍其中的 R 值测量。

R 值是正负电子对撞产生强子(hadrons)的零阶总截面与产生 $\mu^+\mu^-$ 轻子对的零阶截面之比:

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

其中 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 零阶截面可由量子电动力学(QED)理论计算,所以 R 值测量实际上就是强子产生总截面的测量。 $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ 过程的本质是正负电子湮没产生正反夸克对 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$,由于轻子和夸克都是最基本的费米子,上述两个产生过程有相同的物理机制,其截面之间存在简单的关系,取决于夸克的电荷及种类数(包括味道与颜色),即

$$R = C \sum_f Q_f^2 / Q_\mu^2 = C \sum_f Q_f^2 \quad (2)$$

这里 C 表示夸克的颜色种类数,夸克有红、绿、蓝三种颜色即 $C=3$; Q_f 是味道为 f 的夸克携带的电荷量,其绝对值为 $1/3$ 或 $2/3$,夸克共有6种味道,能够产生多少味道种类的夸克取决于对撞的质心能量; μ 轻子的电荷量 Q_μ 为单位电荷。上式表明在零级近似下 R 值等于在特定能量所能产生的所有种类夸克的电荷的平方和,所以 R 值随能量变化表现为阶梯式的平台:随着新的味夸克产生阈的打开 R 值会出现跳变。由于对称性要求而引入的夸克颜色量子数在早期是受到强烈质疑的, R 值测量实验结果为此提供了有力证据。此外,原初夸克-反夸克在碎裂强子化过程中会给电磁相互作用顶点引入附加的修正,即量子色动力学(QCD)高阶微扰贡献,其强度与强相互作用耦合常数 α_s 有关,

$$R = C \sum_f Q_f^2 \left[1 + \left(\frac{\alpha_s(s)}{\pi} \right) + c_1 \left(\frac{\alpha_s(s)}{\pi} \right)^2 - c_2 \left(\frac{\alpha_s(s)}{\pi} \right)^3 + \dots \right] \quad (3)$$

其中 c_1, c_2 为常数,因此精确测量的 R 值反过来亦可用于确定 α_s 。

R 值是重要的基本物理量,对粒子物理标准模型的发展和精确检验具有非常重要的意义。由于低能区(5 GeV以下)微扰QCD不适用,在电弱理论的精确计算中,涉及强相互作用的贡献都需要用强子产生截面(即 R 值)作为基本输入参数,其中最典型的例子如电磁跑动耦合常数 $\alpha(s)$ 和 μ 子反常磁矩($g_\mu-2$)的理论计算,都强烈依赖于低能区的 R 值。曾有评论认为,若借助于精确的强子截面测量能把($g_\mu-2$)的理论计算不确定性减小到 6×10^{-10} ,其物理成就等价于大型正负电子对撞机(LEP2)甚至大型强子对撞机(LHC)。

从强子产生阈到 Z^0 中间玻色子(质量约为91

GeV)对应能标的能量范围内,世界上许多实验组都进行过 R 值测量,但在不同能区, R 值的测量误差有很大的差别,在10 GeV以上高能区精度接近于1%,在低能区则误差较大,尤其是在北京谱仪工作的2~5 GeV能区,此前其他实验组给出 R 值的不确定性为15%~20%。北京谱仪BES II以 R 值测量为第一个研究课题,是非常合适的选择。由于理论计算的输入是以 R 值的积分形式出现,所以 R 值测量通常以一定能量间隔在多个能量点进行,故称为“扫描”测量。

在实验上, R 值可通过下面的表达式来确定:

$$R = \frac{N_{had}}{\sigma_{\mu\mu}^0 \times \varepsilon_{had} \times \varepsilon_{urg} \times (1 + \delta) \times L} \quad (4)$$

式中 N_{had} 为实验观测的强子事例数, ε_{had} 为强子探测效率, ε_{urg} 为强子事例触发效率, $(1+\delta)$ 为初态辐射修正因子, L 为数据积分亮度; $\mu^+\mu^-$ 截面 $\sigma_{\mu\mu}^0$ 如前所述可由理论计算。

北京正负电子对撞机/北京谱仪的建成运行及 τ 轻子质量精确测量等成果的取得,实现了中国高能物理在世界占有一席之地的愿望。升级后的北京谱仪BESII拟开展 R 值测量工作,预期在2~5 GeV能区将 R 值测量精度提高一倍以上,从而对标准模型理论计算有较大帮助。为此在北京谱仪升级期间利用 τ 质量测量数据进行了 R 值测量的可行性研究,该批数据是BESI探测器于1991年底至1992年初在 $\tau\tau$ 产生阈附近的12个能量点获取的,质心能量加权平均值为3.55 GeV,总积分亮度约为 5 pb^{-1} , R 值测量结果为 $2.45 \pm 0.04 \pm 0.20$,相对误差约为8%,基本满足精度要求,证明在北京谱仪测量 R 值是完全可以行的。通过 R 值测量可行性研究,建立起了数据分析的整套方法,包括强子事例选择、背景事例扣除、强子探测效率确定、积分亮度测量、辐射修正计算等,为后续在BES II开展 R 值测量专门实验研究奠定了基础。

1998年春季北京谱仪BESII开始运行,进行了第一轮 R 值测量试验运行,持续时间约一个月,在连续能区的6个能量点获取了数据,质心能量分别

为2.6、3.2、3.4、3.55、4.6、5.0 GeV,总积分亮度 0.928 pb^{-1} 。试验扫描以较少的时间在有限的几个有代表性的能量点取数,目的在于检验谱仪的运行状况,确定 R 值取数的触发条件;研究强子事例、大角度巴巴事例的选择方法,根据强子谱形调整强子模拟产生器LUND模型参数,由大角度巴巴事例确定积分亮度;了解每个能量点真正需要的取数时间,以便正式扫描更有针对性地安排实验。试验扫描有助于避免实验的盲目性,有效地发现可能存在的问题,并及时找出解决方案,从根本上说是为了保证正式扫描的顺利进行,也是为了节省束流时间。为满足精度要求,每个能量点达到至少1000个强子事例,将统计误差控制在3%以内;在2.6和3.55 GeV为模型参数调整需要,成倍增加了数据量。为了研究束流相关本底,在每个能量点都做了相应的分离束实验,并且在3.55 GeV还分别做了正、负电子的单束实验。扫描过程中,利用狭窄共振峰 J/ψ 和 $\psi(2S)$ 穿插进行了5次能量刻度,并做了2次触发效率研究。此外,还获取将近6个小时的宇宙线数据。为了检验谱仪的稳定性和实验的重复性,3.4 GeV能点的取数分两个阶段,其间隔大约是两个星期。当年年底,基于试验扫描数据的研究分析给出了初步结果,各项误差均控制在合理范围,6个能量点的误差在7%~10%之间,比原先减小一半。 R 值测量初战告捷,为第二轮扫描实验做了很好的准备。

1999年春季北京谱仪BES II进行了第二轮细致扫描测量实验,历时约四个月,能量范围2~4.8 GeV,取数能量点85个,每个能量点的强子事例数1000个左右,数据总积分亮度 4.64 pb^{-1} 。由于低能区加速器亮度低,为节省束流时间在2~3 GeV之间只取了9个能量点,间隔为100或200 MeV。高能区覆盖4个重粲偶素共振态 $\psi(3770)$ 、 $\psi(4040)$ 、 $\psi(4160)$ 和 $\psi(4415)$,是扫描测量的重点区域,步长最大20 MeV,最小2 MeV,共76个能量点。本轮实验仍然做了能量刻度和触发效率研究,在24个能量点获取了分离束数据,在7个能量点获取了单束数据。随

着能量升高噪声变大,另外进入夏季加速器磁铁散热问题无法解决,细致扫描停止于4.8 GeV,不过此能量已进入平台区,而且第一轮扫描中能量最高已达5.0 GeV,可以说已经做到2~5 GeV全覆盖。

完成 R 值扫描取数实验是整个项目的第一步,更艰巨的工作是之后的物理和数据分析,为此研究团队付出了巨大的精力和时间。例如,为了得到强子探测效率,需要适合本能区的强子事例模拟产生器,而以往的产生器都是在高能区开发的,为此我们与瑞典Lund大学弦碎裂模型作者Bo Andersson合作,针对低能区的特点依据弦碎裂演化中的面积定律对原产生器做了拓展,使之能够描述少体产生。经过20年的发展和完善,基于面积定律的强子产生器如今成为GeV能区的通用产生器,被高能物理实验组广泛采用。

2004年北京正负电子对撞机BEPC II/北京谱仪BES III重大升级改造行将开始,BES II的绝唱是在低能区的3个能量点2.6、3.07、3.65 GeV获取了较大统计量的 R 值测量数据,积分亮度达到 10 pb^{-1} ,进一步将 R 值的实验误差降低到3.5%。这是BEPC I/BES II实验条件下所能达到的极限,同时也预示了未来BES III在数据统计量不是制约因素情

况下 R 值测量的潜力。图1显示了5 GeV以下能区 R 测量情况。

通过 R 值扫描测量,BES II还研究了重粲能区复杂的共振态结构,首次对4个粲偶素高激发态 $\psi(3770)$ 、 $\psi(4040)$ 、 $\psi(4160)$ 、 $\psi(4415)$ 做了统一分析,在考虑干涉和相位的情况下给出了其共振参数,如图2所示。该结果发表于2008年(Phys. Lett. B660, 315),其后迅速被权威的粒子物理数据手册收录。

北京谱仪BESII将2~5 GeV能区 R 值的测量误差从(15~20)%降低到平均6.6%,是中国对高能物理研究的一个重要贡献。BES II的 R 值测量结果对粒子物理标准模型精确检验意义重大,2~5 GeV能区测量精度提高2~3倍被称为“北京革命”。引入BES II测量结果以后,来自5种较轻夸克的贡献 $\Delta\alpha_{had}^{(5)}(M_Z)$ 的理论评估值由 0.0280 ± 0.0007 变为 0.02761 ± 0.00036 ,相应地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。这一改进使Higgs粒子的理论拟合质量从 62_{-30}^{+53} GeV变到 98_{-38}^{+58} GeV,质量上限从170 GeV变到210 GeV(如图3所示),这样才与当时欧洲核子中心LEP2实验对Higgs粒子的寻找结果不矛盾。与此类似,此前 $a_\mu=(g_\mu-2)/2$ 的实验值 $a_\mu(\text{exp})=11659203$

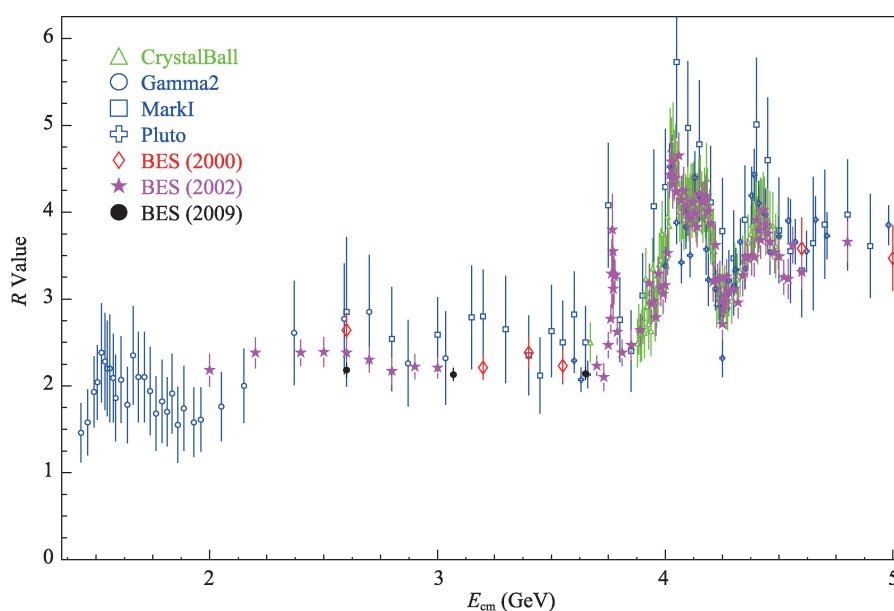


图1 5 GeV以下能区BESII R 测量与其他实验组的比较

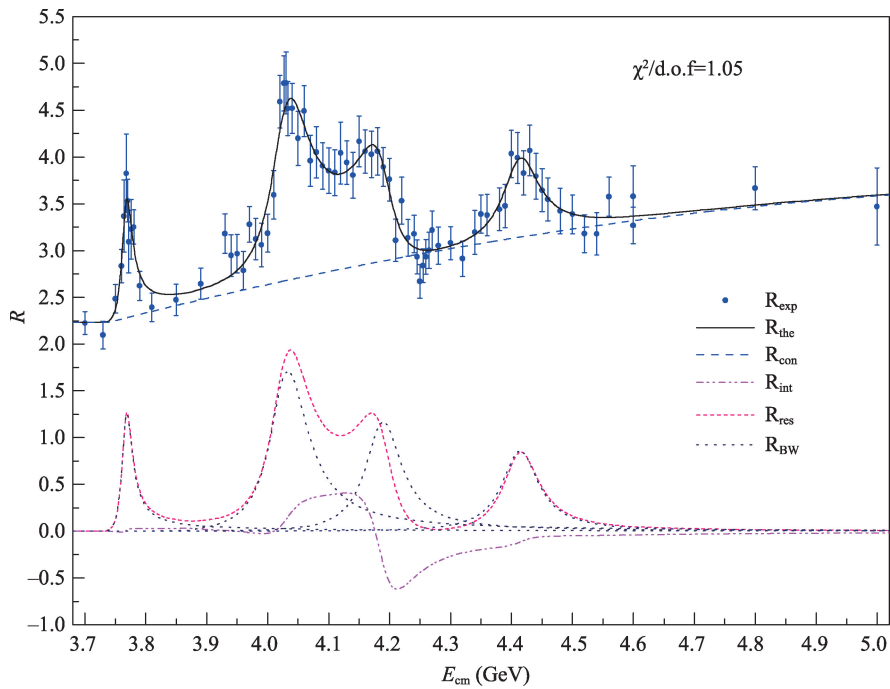


图2 重粲偶素结构分析: $\psi(3770)$, $\psi(4040)$, $\psi(4160)$ 和 $\psi(4415)$ 之间的干涉及相位差不可忽略

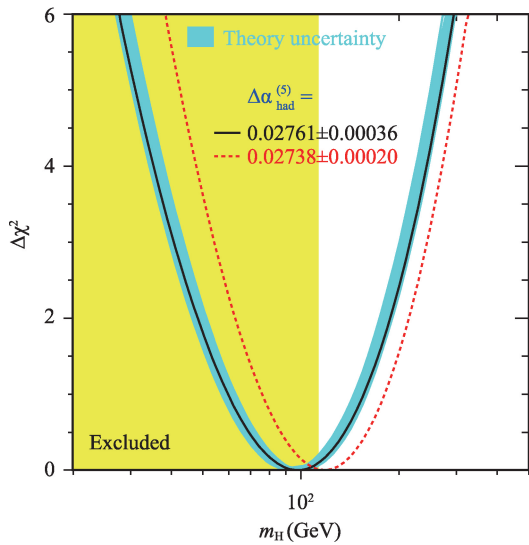


图3 标准模型理论拟合引入BESII的R值测量结果以后,使Higgs粒子的最可几质量变为 $m_H = 98^{+58}_{-38}$ GeV,在95%置信度水平下的质量上限变为 $m_H < 212$ GeV

$(15) \times 10^{-10}$ 与标准模型预言值 $a_\mu(SM) = 11659159.6 (6.7) \times 10^{-10}$ 之间存在 2.6 倍标准偏差(σ)的差别,采用 BES II 的 R 值做输入,其中强相互作用相关部分 a_μ^{had} 由 $(696.7 \pm 15.6) \times 10^{-10}$ 变为 $(698.75 \pm 11.11) \times 10^{-10}$,从而使得 a_μ 的理论值与实验值的差别小于 1.5σ ,在当时

被视为解决了一个危机。

R 值测量是 BES II 的一个重要工作,自结果发表直到 Higgs 粒子被发现的十几年间,应邀在众多国际会议上报告并被反复引用和强调,如两年一次的重要论坛国际高能物理大会、国际轻子光子大会、欧洲物理大会等。著名电弱理论专家 Bolek Pietrzyk 在 2000 年大阪国际高能物理大会上公开评论说,“要不是 BES II R 值测量结果,我们已经排除了标准模型中的 Higgs 粒子”。这一重要成就也因此吸引了国内媒体注意,如《科技日报》报道:“国际高能物理界高度评价北京谱仪实验结果,我国一篇论文受到国际科学界如此广泛好评和重视,为多年来所少见”。BES II R 值测量成果先后获得 2003 年度中国科学院杰出科技成就奖、2003 年度北京市科学技术奖一等奖、2004 年度国家自然科学奖二等奖。

2008 年北京正负电子对撞机/北京谱仪完成重大升级改造,次年正式开始物理运行。第三代北京谱仪 BES III 继续开展 R 值测量工作,目标是使测量精度再提高一倍左右,即误差降低到 $\sim 3\%$ 。按照三阶段实验规划,2012 年夏天首先进行了 R 值扫描试运行,用了 8 天时间在 4 个能量点 2.2324、2.4、2.8 和

3.4 GeV 获取了 12 pb^{-1} 数据,初步分析表明能够达到预期精度;随后 2013 年底至 2014 年初历时一个半月完成重粲能区 3.85~4.6 GeV 精细扫描,取数能量点 104 个,总积分亮度~800 pb^{-1} ;2015 年初又历时四个月完成低能区 2.0~3.08 GeV 扫描,取数能量点 21 个,总积分亮度~525 pb^{-1} 。由于 BEPC II 亮度提高约 100 倍,BES III 获取的数据统计量是空前的,每个能量点的强子事例数至少在 10 万以上,对于 R 值测量而言统计误差下降到很次要的地位,利用 R 值数据开展强子形状因子测量、碎裂函数提取、重子产生阈研究、奇特强子态寻找等量子色动力学相关实验研究亦成为可能。

R 值测量属于高精度测量,研究过程精益求精,需要经过严苛的内部和外部检查及审核,因此从实验到结果发表是一个漫长过程。BES II 首轮实验的初步结果发布于 1998 年底,正式结果迟至 2000 年才发表在著名物理期刊《物理评论通讯》(Phys. Rev. Lett. 84, 594);第二轮精细扫描的初步结果发

布于 2000 年,两年以后正式发表(Phys. Rev. Lett. 88, 101802);末轮实验结果更是发表于取数 5 年以后的 2009 年(Phys. Lett. B 677, 239)。 R 值分析工作的精雕细琢赢得了国际高能物理领域的信任和尊重,长期以来曾是北京谱仪被引用次数最多的研究成果。如今 BES III 首轮 R 值实验已过去 7 年,结果仍然没有发表,尽管有各种各样的原因,但也充分展现了基础研究的艰辛。然,浮云遮目终将去,守得云开见月明,凭十年磨一剑之独孤勇气、逆急功近利之大潮,相信北京谱仪 R 值必将再次惊艳于世。

北京谱仪实验已经 30 年了,开展 R 值测量研究也已 20 多年。 R 值测量起步于北京谱仪最艰难的时期,其巨大成功在相当长的时间里曾是中国高能物理领域唯一的亮点成果,因而不夸张地说帮助中国高能物理度过了危机和低迷。今天高能物理研究在全国遍地开花,一派欣欣向荣,并且有领先世界的梦想和机会,应该感谢北京谱仪 R 值测量的历史功绩。

科苑快讯

大城市会自己造云

浪漫主义诗人写的很对:城市的生活更阴郁。众所周知,混凝土森林形成的城市常常比树木繁茂的农村高几度,科学家现在已经确定城市也有能力扩展自己上空的云层。

通过研究伦敦和巴黎的卫星图像,科学家发现,春夏期间,现代大都市在下午和晚上持续多云,比附近的农村高出几个百分点。结果令人惊讶:城市因缺乏植被变得干燥,这会导致更少的水蒸发而不利于云的形成。

利用伦敦的地面观测数据,研究人员看到,建筑保存的热量到了下午以后,会在空气中引起湍流,给云层补充水分。他们在《npj 气候与大气科学》(npj Climate and Atmospheric Science)上做了报告。尽管



只研究了欧洲两个城市的长时间云层,但是有理由相信,类似现象从墨西哥城(Mexico City)到波兰的罗兹市(Łódź)都很常见。

(高凌云编译自 2019 年 5 月 28 日 www.sciencemag.org)