

# 北京谱仪实验上辉煌的陶-R-QCD 物理\*

张建勇<sup>1,†</sup> 周小蓉<sup>2,3,††</sup>

(1 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

(2 中国科学技术大学物理学院 合肥 230026)

(3 核探测与核电子学国家重点实验室 合肥 230026)

2025-03-07 收到

† email: jyzhang@ihep.ac.cn

†† email: zxrong@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20250403

CSTR: 32040.14.wl20250403

## Achievement in Tau-R-QCD physics on the Beijing Spectrometer

ZHANG Jian-Yong<sup>1,†</sup> ZHOU Xiao-Rong<sup>2,3,††</sup>

(1 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(2 School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3 State Key Laboratory of Nuclear Detection and Nuclear Electronics, Hefei 230026, China)

**摘要** 北京谱仪作为高精度前沿实验,在陶粲能区做出了重要工作,包括: $R$ 值的高精度测量;陶轻子质量的测定;重子对阈值附近截面反常行为和振荡效应的观测;用粲偶素的扫描数据测量电磁作用与强作用的相位差,并且确定 $\chi_{c1}$ 的电子道分宽度等。这些结果为标准模型的精确检验提供了实验依据。

**关键词** 陶粲能区, 粲夸克,  $R$ 值, 陶轻子, 质量, 重子, 截面, 相对相角

**Abstract** The Beijing Spectrometer, as a high-precision frontier experiment has performed important achievements in the tau-charm energy region, including high-precision measurements of the  $R$  value, determination of the mass of the tau lepton, observation of the anomalous behaviour and oscillatory effects of the baryon pair cross-section near the threshold, measurement of the phase difference between the electromagnetic and the strong interaction based on the scanning data of the charmoniums, and determination of the width of the electron channel fraction of  $\chi_{c1}$ . These have provided accurate experimental tests of the Standard Model.

**Keywords** tau-charm energy region, charm quark,  $R$  value, tau lepton, mass, baryon, cross-section, relative phase

## 1 引言

1974年,美国布鲁克海文国家实验室(BNL)与斯坦福直线加速器中心(SLAC)几乎同时探测到

了第一个粲粒子 $J/\psi$ ,翻开了粒子物理研究的新篇章。2024年是 $J/\psi$ 粒子发现50周年,经过包括北京正负电子对撞机(BEPC)在内的多台加速器几十年的研究,人们对粲夸克的性质已经有了一定的了解。

BEPC在陶粲能区运行,工作在其上的北京

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2023YFA1606000,2020YFA0406400)资助项目

谱仪(BES, 包括第一代 BES, 第二代 BES II, 和第三代 BES III)在该能区积累了世界上最大的数据样本, 对陶轻子质量、 $R$  值精确测量以及量子色动力学(QCD)检验等方面做出了辉煌的贡献。

## 2 陶粲能区

### 2.1 $R$ 值难题和粲夸克的发现

$R$  值是电子—正电子湮没反应产生的强子截面与产生的  $\mu$  子对截面的比值, 在零级近似下,  $R$  值等于在特定能量下所能产生的所有夸克(包括味道和颜色)的电荷的平方和。它是粒子物理学的重要参数, 不仅有助于理解强子的产生机制, 寻找可能存在的共振态粒子, 而且对标准模型的建立和验证起到了重要作用。自 1960 年在意大利弗拉斯卡蒂小镇上, 世界上首个正负电子对撞机 AdA 成功运行之后, 弗拉斯卡蒂的 Adone 对撞机, 法国奥赛的 ACO 对撞机, 俄罗斯新西伯利亚的 VEPP-2 对撞机, 以及美国斯坦福大学的 SLAC 对撞机纷纷开建。1974 年之前, 在这些对撞机上, 人们对正负电子湮没产生的强子末态进行研究, 计算了强子产生截面和  $R$  值, 其结果如图 1 所示<sup>[1, 2]</sup>。可以发现, 在质心系能量的平方  $s < 9 \text{ GeV}^2$  的能区内,  $R$  值位于 2 至 3 之间, 但随着能量点的增加直至  $25 \text{ GeV}^2$ ,  $R$  值上升到 6 附近。简单的三夸克模型预言  $R$  值应为 2, Han—Nambu 模型预言  $R$  值应为 4, 均与实验的观测值不符, 该异常的  $R$  值现象被称为  $R$  值难题( $R$ -puzzle)。事实上,  $R$  值的异常提供了新的夸克自由度的间接证据。 $J/\psi$  粒子的发现证实了粲夸克的存在<sup>[3-5]</sup>, 考虑到粲夸克的贡献,  $R$  值难题迎刃而解。

随着正负电子对撞技术的发展, 越来越多的实验开展了正负电子湮没到强子截面的研究和  $R$  值的测量, 尤其是 2—5 GeV 能区的  $R$  值, 由于其跨越了 QCD 的微扰和非微扰能区, 且包含丰富的共振态, 该能区  $R$  值的测量一直是高能物理的重要目标。在 BES II 实验之前, 2—5 GeV 能区的  $R$  值不确定度大于 15%。BES II 实验通过能量

扫描方式, 将  $R$  值的测量误差从 15% 降低至 6.6%<sup>[6]</sup>, 整体精度提高 2 倍以上, 大大提高了缪子反常磁矩的精度, 并约束了希格斯粒子质量。BES III 实验进一步将  $R$  值的测量误差降低至 3%<sup>[7]</sup>, 如图 2 所示, 为电磁跑动耦合常数的确定和微扰 QCD 理论的检验提供重要实验依据。 $R$  值的测量是中国对高能物理领域的重要贡献之一。

### 2.2 轻子普适性和陶轻子质量

陶轻子是由马丁·佩尔在 SLAC 上通过寻找  $e-\mu$  事例发现的, 其中第一个事例发现于 1974 年, 经过三年的不懈寻找, 一共找到 105 个事例。通过分析确认了这些事例来自新粒子——陶轻子, 佩尔也因为发现陶轻子获得了 1995 年的诺贝尔物理学奖。

陶轻子与电子、缪子以及相应的中微子构成了标准模型的三代轻子家族。按照标准模型要求, 三代轻子与 W 玻色子的耦合应该相同, 即所谓轻

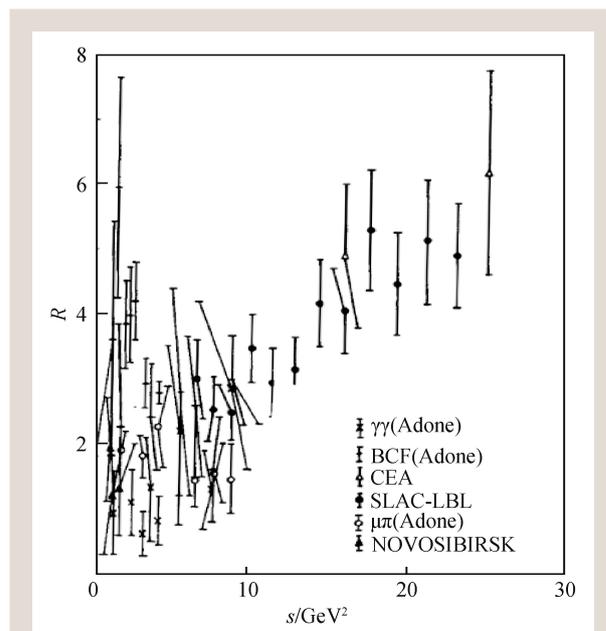


图 1 1974 年之前  $R$  值的实验测量, 来自 Adone-Frascati 实验<sup>[1]</sup>(1.5—9  $\text{GeV}^2$ ), SLAC-LBL-magnetic 实验(7—24  $\text{GeV}^2$ ) 和 CEA 实验<sup>[2]</sup>(25  $\text{GeV}^2$ )。值得一提的是,  $J/\psi$  质量仅比 Adone 对撞机的最大质心能量高出 50 MeV, Adone 对撞机失去了首次发现  $J/\psi$  粒子的机会

子普适性。与电子、缪子相比，陶轻子的质量要大得多，它不但可以衰变到轻子，还可以衰变到介子以及重子。陶轻子衰变到终态的分支比可以由标准模型精确给出，这就为标准模型的检验提供了平台。因此，自陶轻子发现以来，关于陶轻子的研究就如火如荼地开展起来。

作为标准模型的基本参数，陶轻子的质量需要由实验精确给出。在BES数据获取之前，已经有多家实验测量了陶轻子的质量。当时陶轻子质量的世界平均值为  $1784.1^{+2.7}_{-3.6}$  MeV。陶轻子与缪子分别与W玻色子耦合常数的比值  $(g_\tau/g_\mu)^2$  为  $0.941 \pm 0.025$ ，与标准模型要求的1偏离了2.4个标准偏差<sup>[8]</sup>。人们普遍认为，这个偏差是由于陶轻子质量测量的误差大，中心值不可靠，希望实验可以重新测量这个比值。

BES运行在陶轻子的产生阈附近，可以利用阈效应，即产生截面在阈值处从无到有突变的特点，在阈值附近的不同能量点获取数据，通过拟合陶轻子对产生截面精确给出陶轻子的质量。

1991年11月1日，BES陶轻子质量测量实验正式开始，使用数据驱动的方法，即一边收集数据，一边分析已有数据，根据分析结果确定下一个能量点的位置。BES取数80天，在陶轻子阈值附近12个能量点，获取了共计  $5.1 \text{ pb}^{-1}$  的实验数据。通过分析  $e-\mu$  末态事例，获得陶轻子的质量为  $1776.9^{+0.4}_{-0.5} \text{ MeV}$ <sup>[9]</sup>，如图3所示。为了增加统计量，BES合作组分析了含有K、 $\pi$ 末态的6个衰变模式，最终的测量结果为  $1776.9^{+0.18+0.25}_{-0.21-0.17} \text{ MeV}$ <sup>[10]</sup>，比当时的世界平均值小了7 MeV。

联合陶轻子寿命与衰变分支比，耦合常数的比值  $(g_\tau/g_\mu)^2$  变为  $1.0005 \pm 0.0069$ ，轻子普适性经受住了精确的检验。BES的陶轻子质量测量是当时最精确的实验结果，领先世界十余年。粒子数据组认为这一结果是50年来高能物理的最重要实验数据之一。

步入新世纪，BEPC与BES迎来了升级改造。升级后加速器由单环变为双环，亮度提升到原来的100倍，国际领先的陶轻子质量测量也重新提上实验日程。此时陶轻子质量的世界平均值误差在0.2 MeV左右。

精确测量陶轻子质量，需要在提高统计误差与系统误差的精度上面下功夫。尽管统计量已经不是大问题，面对紧张的机器时间，研究人员仍对数据获取方案进行了优化。假定陶轻子质量测量需要  $100 \text{ pb}^{-1}$  的实验数据，用蒙特卡罗模拟与随机抽样的办法，寻找在那些能量布点，每个点上的亮度应当如何分配时测量得到的陶轻子质量统计误差最小的方案。最终采用了三参数(陶轻子质量、本底、效率)拟合下5个点的数据获取方案<sup>[11]</sup>。在系统误差方面，最大的误差来源是束流能量的不确定性。为此，BES III合作组成立了由中

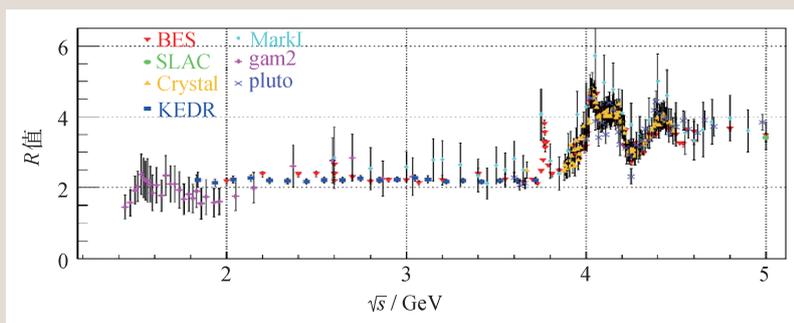


图2 BES III实验在5 GeV以下能区的R值扫描实验结果

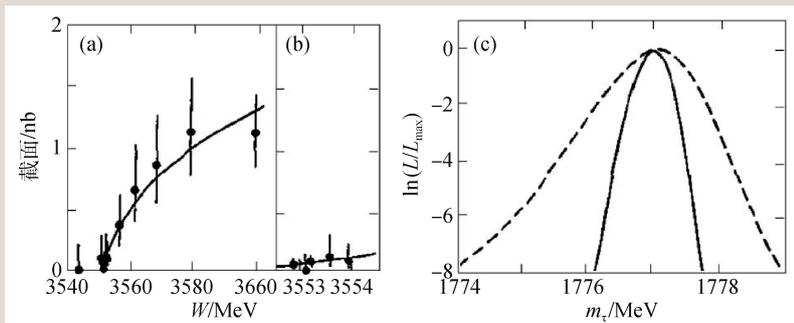


图3 (a) 陶轻子对产生截面的最大似然拟合结果(实线)与实验数据的比较；(b) 陶轻子对产生阈值附近截面的放大显示；(c) 似然函数的对数值随陶轻子质量的变化，这里效率与本底拟合参数固定于其优化拟合值；图中虚线是只利用  $e-\mu$  事例的结果

中国科学院高能物理研究所、俄罗斯布德科尔核物理所(BINP), 以及夏威夷大学组成的课题组, 在 BEPC II 储存环第二对撞点建造束流能量测量系统(BEMS)。BEMS 的工作原理是由激光器提供的激光束经过反射与聚焦后进入束流管, 与正、负电子束相撞, 用高纯锗探测器测量对撞后散射的高能光子, 进而推算出束流的能量, 该系统的测量精度达到  $20 \text{ keV}^{[12]}$ 。

2011 年底, 依照优化方案, 进行了一次尝试性数据获取, 如图 4 所示, 确定出陶轻子质量为  $1776.91 \pm 0.12_{-0.13}^{+0.10} \text{ MeV}^{[13]}$ 。正式的陶轻子阈值附近的精细扫描已经完成, 测量的误差(含统计误差与系统误差)预期将显著改善。

### 2.3 陶粲能区

BES III 的对撞能区位于  $2\text{—}5 \text{ GeV}$ , 是标准模型中基本粒子陶轻子和粲夸克成对阈值大量产生的能量区间, 被称为陶粲能区。陶粲能区是高能粒子物理研究中的重要能区之一。该能区覆盖了大量的粲偶素态如  $J/\psi$ 、 $\psi(3686)$ 、 $\psi(3770)$  和类粲偶素态粒子、正反超子对、陶轻子对的产生阈值, 且正负电子对撞机实验具有本底干净、初态四动量已知等特点。成对产生的正反超子对具有量子自旋关联特性。由此, BES III 实验的取数包括在粲偶素的共振态上收集大量的实验数据研究其衰变性质, 以及通过独特的能量扫描开展一系列物理研究。微观粒子世界充满未知, 扫描实验就像出海探索捕捞, 在不同能量区域“搜寻”, 期待找到新粒子与未知物理规律。在 BES III 上, 除了以上的  $R$  值扫描和陶轻子阈值扫描, BES III 实验还针对重子对阈值和粲偶素能区附近开展了数据扫描, 旨在理解重子电磁结构并研究粲偶素的产生机制。

#### 2.3.1 重子对阈值扫描

随着 1956 年利用电子质子散射首次观测到质子的内部结构, 在类时空间研究重子的电磁形状因子, 成为 Bruno Touschek 等一批正负电子对撞

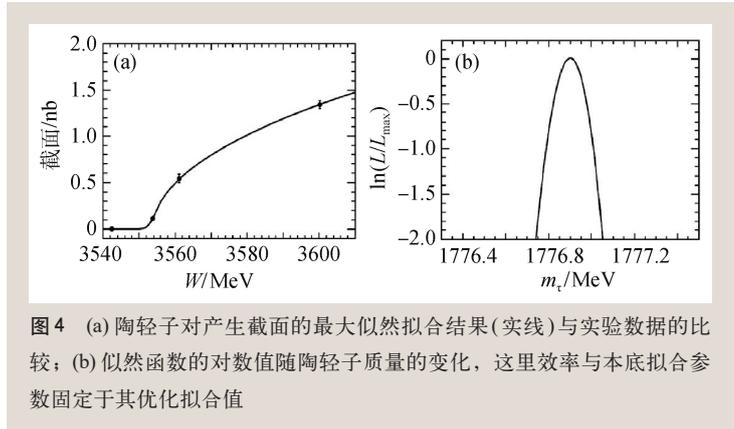


图 4 (a) 陶轻子对产生截面的最大似然拟合结果(实线)与实验数据的比较; (b) 似然函数的对数值随陶轻子质量的变化, 这里效率与本底拟合参数固定于其优化拟合值

技术开创者的研究初衷之一, 同时也促使 Nicola Cabibbo 等理论家开始推导正负电子湮没到不同过程末态的截面表达式<sup>[14]</sup>。之后, 更多的低能区有效理论预言了类时空间电磁形状因子, 并且通过色散关系联合类时和类空实验结果。BES III 实验运行能区覆盖  $SU(3)$  重子八重态成对的产生阈值。利用 BES III 在非共振态能区收集的扫描数据, BES III 系统研究了  $SU(3)$  重子对和粲重子对的产生, 实验结果刷新了类时空间重子电磁形状因子的最好值。然而, 更精确的实验结果催生了更多的问题亟需理论和实验的共同理解, 具体如下:

(1) 反常阈值截面的观测。BES III 测量了正负电子对湮没到  $\Lambda_c$  重子对的玻恩截面, 其精确的实验结果显示阈值附近截面存在一个“平台区”, 与理论预期不符。利用质心能量  $2.2324 \text{ GeV}$  的数据, BES III 测量了正负电子对湮没到  $\Lambda$  重子对的玻恩截面, 观测到中性重子对非零的阈值截面, 亦与理论预期不符。因此, 在带电和中性重子对的阈值附近都观测到了反常的截面增强效应。该实验结果在理论上引起广泛的讨论, 其解释包括末态相互作用、阈值附近共振态效应、索末菲因子进一步修正等。

(2) 有效电磁形状因子的振荡效应。BES III 精确测量正负电子对湮没到核子—反核子对过程的产生截面及有效电磁形状因子, 在核子的电磁形状因子分布上观测到了周期性振荡的结构, 反常的正交振荡结构暗示着核子内部存在未被理解的动力学机制, 可能的解释包括末态散射效应以及共振结构贡献等。

(3)电磁形状因子比值的振荡特性。通过研究角分布, BES III精确测量了电磁形状因子的比值, 结果显示质子和 $\Lambda_c$ 重子对均出现周期性振荡效应, 和类空空间的偶极分布明显不符。该振荡效应的机制目前仍没有确切的理论解释。

(4)电磁形状因子的相位差。由于超子寿命很短, 类空空间下研究超子几乎不可能, 因此只能通过类时空间正负电子对湮灭到超子对的产生实现。类时空间下的电磁形状因子可以为复数, 电磁形状因子之间存在相角差, 该相角差会导致超子极化。研究超子弱衰变到重子和赝标介子的角分布能够确定相角差。BES III首次测量了 $\Lambda$ 重子和 $\Sigma$ 重子的电磁形状因子相位差, 证实了类时空间形状因子的复数特性。按照理论预期, 随着能区的增加, 微扰QCD主导后相位差应趋于零, 然而目前在已测量的能区中仍然有显著的非零相位差, 显示渐进自由能区在此范围仍不适用, 需要往更高的能区继续测量。

### 2.3.2 粲偶素共振态扫描

在 $J/\psi$ 粒子发现伊始, 即发现其存在衰变到轻子对和强子末态的谱形不一致现象, 这是由粲偶素衰变中电磁和强相互作用的不同衰变相位差所致。在共振态峰值附近强子的产生有三种作用方式: 直接通过虚光子的电磁耦合,  $J/\psi$ 的电磁衰变, 及 $J/\psi$ 的强相互作用衰变, 并且三种振幅之间存在相干效应。一般认为两种电磁相互作用的相位相同, 这一点也在研究 $\mu$ 轻子对的谱形研究中被证实。实验上更关注的是电磁和强相互作用对不同的末态, 如矢量介子+赝标介子过程, 重子-反重子对过程, 赝标介子+赝标介子过程等的衰变相位差。2019年 BES III通过 $J/\psi$ 附近的扫描数据, 对 $\eta\pi^+\pi^-$ 和 $5\pi$ 的谱形进行了研究, 并提取出相应的相位角。

物理上, 对于正负电子直接湮灭到电荷共轭宇称为正的过程需要通过双光子圈图或更多虚光子交换进行产生, 其相较于电荷共轭宇称为负的过程被严重压低。然而由于该过程对强子作为夸克-反夸克束缚态的理解有关键作用, 实验上从未停止过寻找此类稀有过程, 包括对 $f_1(1285)$ 、 $\chi_{c1}$ 和 $X(3872)$ 等的直接寻找。由于背景远大于信号,

一直没有观测到该C宇称为正过程的显著信号。BES III实验另辟蹊径, 通过探索信号过程和背景过程直接的干涉, 观测到5.1倍显著度的信号过程。实验首次确定了 $\chi_{c1}$ 的电子道分宽度, 比矢量态粒子的电子分宽度小4个数量级, 符合理论上的预期。该过程的顺利观测为进一步研究非矢量粒子的产生和谱形奠定重要基础, 也充分展示了基于高亮度正负电子对撞机对于稀有粒子的寻找和探索能力。

## 3 总结

BEPC建成时, 改革开放的总设计师邓小平满怀豪情地说, 中国要在世界高科技领域占有一席之地。纵观我国高能物理的发展, 我们不但在陶轻子质量测量、 $R$ 值测量等领域保持领先, 在QCD精确检验、多夸克态的研究以及新物理的寻找等领域保持先进。 $J/\psi$ 粒子发现50周年之际, 让我们缅怀过去, 心向未来, 奋力拼搏, 在BES III上争取有更多新的发现!

## 参考文献

- [1] Bernardini M *et al.* Nuovo Cim. A, 1975, 26: 163
- [2] Tarnopolsky G *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 32: 432
- [3] Aubert J J *et al.* (E598 Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1974, 33: 1404
- [4] Augustin J E *et al.* (SLAC-SP-017 Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1974, 33: 1406
- [5] Bacci C *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 33: 1408
- [6] Bai J Z *et al.* (BES Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2000, 84: 594
- [7] Ablikim M *et al.* (BES III Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2022, 128(6): 062004
- [8] 郑志鹏, 朱永生. 北京谱仪正负电子物理. 南宁: 广西科学技术出版社, 1998
- [9] Bai J Z, Bardon O, Becker-Szendy R A *et al.* (BES Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1992, 69: 3021
- [10] Bai J Z, Bardon O, Becker-Szendy R A *et al.* (BES Collaboration). Phys. Rev. D, 1996, 53: 20
- [11] Achasov M N, Blinov V E, Cai X *et al.* CPC(HEP & NP), 2012, 36: 573
- [12] Abakumova E V, Achasov M N, Blinov V E *et al.* NIMA, 2011, 659: 21
- [13] Ablikim M, Achasov M N, Ai X C *et al.* (BES III Collaboration). Phys. Rev. D, 2014, 90: 012001
- [14] Cabibbo N *et al.* Phys. Rev., 1961, 124: 1577