

北京谱仪 BESIII 上的 τ 轻子 与量子色动力学实验研究

周小蓉

(中国科学技术大学 230026; 核探测与核电子学国家重点实验室 230026)

1. 引言

BEPCII/BESIII 自投入运行以来,取得了一系列成果,截至2023年5月已发表学术论文500篇。BESIII 物理研究分为五个方面,本文介绍其中的 τ 轻子及量子色动力学实验研究(τ -QCD),主要内容包括 τ 轻子相关物理研究、低能非微扰能区强相互作用性质研究、强子产生截面精确测量、强子内部结构探索、低能区新强子态寻找等。

2. τ & QCD 组的取数回顾

BESIII 实验于2009年正式运行。在此之前, τ 轻子质量测量和单举强子产生的 R 值测量作为第一代和第二代 BES 实验的亮点工作,对精确检验标准模型和深入理解量子色动力学 QCD 起到了关键作用,反映出陶粲能区实验装置的独特性。 τ 质量和 R 值测量亦是同年出版的 BESIII 物理黄皮书^[1]的重要研究内容。

BESIII 实验上的 τ & QCD 物理组成立于2009年,首轮取数是2011年为期9天的 τ 轻子对产生阈值扫描,2018年再次进行了为期20天的 τ 轻子对产生阈值扫描。2012年至2015年间 BESIII 实验进行了为期三轮的 R 值取数,即2012年在质心能量为2.2324至3.4 GeV 区间4个能量点、2014年在类粲偶素能区3.85至4.6 GeV 区间108个能量点以及2015年在低能区2.0至3.08 GeV 区间22个能量点的扫描数据。此外,还有2012年在 J/ψ 和2017年在

χ_{c1} 峰值质量附近累积的扫描数据。 τ & QCD 组的能量扫描数据覆盖了质心能量从2.0至4.6 GeV 的150多个能量点,成功的取数充分体现了 BEPCII 的在大能量跨度下的束流调节能力。

利用这些数据, τ & QCD 物理组不仅获得了世界上最精确的 τ 轻子质量和2.2至3.7 GeV 能区 R 值测量,并且在重子电磁形状因子、轻味矢量介子、碎裂函数、强和电磁相互作用相位等方面都产出了一系列成果^[2],以下将从这几个方面分别阐述 BESIII 上的 τ & QCD 物理的研究亮点。

3. 精确检验标准模型

标准模型被认为是描述基本粒子及其相互作用最为成功的理论模型,在实验上得到了充分的检验。但科学界普遍认为它不是终极模型。除了未包含引力相互作用,无法完全解释宇宙中的正反物质不对称和暗物质等现象外,标准模型还包含过多需要实验输入的参数,这在一个基本理论中显得不太“完美”。标准模型的输入参数包括6味夸克和3代轻子的质量、Z 中间矢量玻色子和 Higgs 玻色子质量,描述三种相互作用的三个变量:电磁耦合常数 α_{EM} 、强相互作用耦合常数 α_s 、费米常数 G_F ,和描述夸克混合 CKM 矩阵的四个变量:三个混合角 θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} 和一个相角 δ 。在这些参数中, BESIII 通过精确测量 τ 轻子质量,并通过测量单举强子产生 R 值对电磁耦合常数 α_{EM} 和强相互作用耦合常数 α_s ,为标准模型提供了重要输入。此外,还通过检验轻子普适性

和缪子反常磁矩等对标准模型开展精确检验,为新物理的寻找提供能量标度。

3.1 τ 轻子质量测量

τ 轻子质量是标准模型的基本参数之一,其精确测量对于多个物理量的检验至关重要。标准模型预言三代轻子弱带电流的耦合强度应相同,即轻子普适性。通过测量 τ 轻子和 μ 轻子的寿命比值,可以提取耦合强度,这种耦合强度与轻子质量的五次方成正比。然而,与 μ 轻子质量的精度为 $O(10^{-8})$ 相比, τ 轻子质量的精度要差4至5个量级,因此高精度的 τ 轻子质量测量对于检验轻子普适性至关重要。另外两个重要因素是 τ 轻子的衰变几率及其寿命精度。此外, τ 轻子质量的测量对于计算 τ 轻子的各种强子末态衰变几率以及在四动量转移在 τ 质量处的强耦合常数的确定都具有重要意义。

实验上测量 τ 质量的方式分为两种,一种通过阈值质量扫描方式测量,需要在 τ 轻子对阈值附近重建 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 过程,采用该方式的实验包括DELCO, BES, KEDR 和 BESIII 等实验。2014年, BESIII 利用在4个能量点上收集的 24 pb^{-1} 数据,通过阈值扫描方法,精确确定了 τ 轻子质量,总误差为 170 keV ,精度达到 $O(10^{-4})$ 。实验在 $O(10^{-3})$ 精度下精确检验了轻子普适性^[3]。该测量中系统误差和统计误差相当,主要的系统误差来自能量测量系统及粒子鉴别误判率的影响。新一轮的 τ 质量取数提高了10倍的亮度,统计误差相较于上个实验降低三倍,并且更新了能量测量系统,使相应系统误差降低,该测量预期能够将 τ 质量的精度提高至近 80 keV 。另一种测量 τ 轻子质量的方法为“赝”质量端点确定法,主要是高能区运行的实验上使用,包括 ARGUS, OPAL, BELLE, 和 BABAR 等。这种方法通过假设中微子质量为零,以及衰变末态中的中微子和强子系统的夹角为零,利用探测器测量的强子体系的四动量计算出的 τ 轻子“赝”质量。“赝”质量满足一定的谱形分布,截断处即为 τ 轻子真实质量。最近, Belle II 实验利用超过1.75亿 τ 轻子事例,通过 $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$

过程,将 τ 轻子质量的误差降至 140 keV ,并且统计误差已显著小于系统误差^[4]。主要的系统误差来源于束流能量的确定以及末态带电粒子的动量修正项。

3.2 单举强子截面测量

R 值是正负电子湮没产生强子与一对正负 μ 轻子的领头阶截面之比,是粒子物理学中最重要的物理量之一。精确的 R 值数据对缪子反常磁矩的理论计算具有重要意义。理论上通过缪子与光子的作用顶点计算缪子反常磁矩,其中强相互作用的贡献最难计算,包括强真空极化和强光子-光子散射两部分,而强真空极化对缪子反常磁矩的误差影响最大。理论上强真空极化对缪子反常磁矩的贡献主要来源于低能量区,即微扰计算不适用的能区,只能采用色散积分的方法通过测量正负电子对湮没到强子末态的截面作为输入来计算。在这些过程中,主要贡献来自正负电子对湮没到 $\pi^+\pi^-$ 过程,其次来源于 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 、 $K\bar{K}$ 、 4π 过程。这些过程也构成了目前缪子反常磁矩的主要误差来源。当 $\sqrt{s} > 2 \text{ GeV}$,由于阈值的打开,强子末态过程更多,通过累加的方式获取强子总截面已不现实。更为可靠的方式是通过单举方式测量强子总截面,即 R 值的测量。2021年费米实验室缪子反常磁矩的实验测量值和理论计算值的差别达到约4.2倍标准偏差^[5],这暗示着可能存在新物理的迹象。最近,费米实验室利用了更多的统计量更新了缪子反常磁矩的实验结果,与之前实验完美吻合,且实验误差达到了惊人的 0.2 ppm (即 2×10^{-7})^[6],该高精度实验结果对理论计算提出了挑战。

R 值测量对缪子反常磁矩相关新物理机制的研究具有重要意义。此外,高精度的 R 值对跑动电动力学耦合常数的理论计算亦是不可缺少的输入参数,是精确检验标准模型的另一个重要途径。BESIII 实验在2021年发表了新的 R 值测量结果,在质心能量为 2.2 至 3.671 GeV 区间精确测量了14个能量点的 R 值结果,并最终给出 3.1 GeV 以下好于 2.6% 、在 3.1 GeV 以上好于 3.0% 的世界最高实验精

度^[7],如图1。值得一提的是,实验在充分完善现有单举强子事例模拟模型的基础上,创造性地提出并实现了充分利用已知遍举过程的强子事例混合产生器。经过多轮迭代和完善,这两种强子模型均能重现正负电子湮没产生强子的复杂物理过程,与实验数据符合得很好,为后续其他单举产生过程的研究奠定基础。此外,BESIII实验利用3.773 GeV收集的2.93 fb⁻¹数据,通过初态辐射方法测量了能量范围为600~900 MeV的 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ 截面,总误差为0.9%^[8]。

理论上计算缪子反常磁矩仍需要更多的工作,首先格点QCD和利用强子单举截面输入计算的强真空极化贡献项存在显著差别,其次,不同实验测量的强子截面存在的明显差异。如近期CMD3实验得到的结果和之前结果有很大的差异^[9]。目前,多个实验仍在不断分析已有数据或通过更大统计量研究关键过程 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$,如BaBar, KLOE, SND, BESIII和Belle II等。未来,BESIII将在多个方面对缪子反常磁矩做出直接贡献:进一步在2.0至4.6 GeV的大能区范围内精确测量 R 值,对激发态粲偶素的质量宽度进行精确测量;利用在3.773 GeV收集的20 fb⁻¹数据,将 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ 的截面测量误差降至0.5%,厘清不同实验之间的差异,并以高精度研究其他对强真空极化有贡献的强子末态过程;在2.0 GeV及更低能区通过累加所有可能的强子过程的截面,与单举方式测量强子总截面结果相比较,理解在该能区实验测量与微扰QCD预言的差异。

4. 强子结构和强子谱研究

QCD理论是描述夸克和胶子间强相互作用的理论,由于色禁闭效应,实验上无法观测到带色荷的部分子,只能探测到色中性的强子。由于强子大多形成在QCD的微扰展开不适用的低能区,对于其结构的研究需要实验上关键的数据作为输入或者检验众多有效理论或模型。BESIII实验利用低能区 R 值的扫描数据,从多个角度对强子的性质开展研究,包括强子碎裂函数、重子电磁形状因子和轻味矢量介子谱的测量。

4.1 强子碎裂函数

碎裂函数描述了部分子的强子化过程,对其的研究是理解强子产生机制的重要手段。碎裂函数可以在多种实验方式中获得,如电子-质子深度非弹散射实验、质子-质子对撞实验以及正负电子湮没实验。其中,正负电子湮没实验中单举强子的产生被认为是研究碎裂函数最干净的过程,其测量结果能够作为其他两种实验的输入,用于提取部分子分布函数等信息。

2016年,BESIII实验利用了3.65 GeV获取的数据通过重建 $\pi^+\pi^-+X$ 的过程,对于极化的夸克形成强子的Collins效应进行了研究^[10]。实验在较大的横动量和较大的能量组分发现了显著的方位角不对称现象,该不对称正是Collins效应存在的必要条件。实验结果体现了在夸克强子化过程中自旋的效应

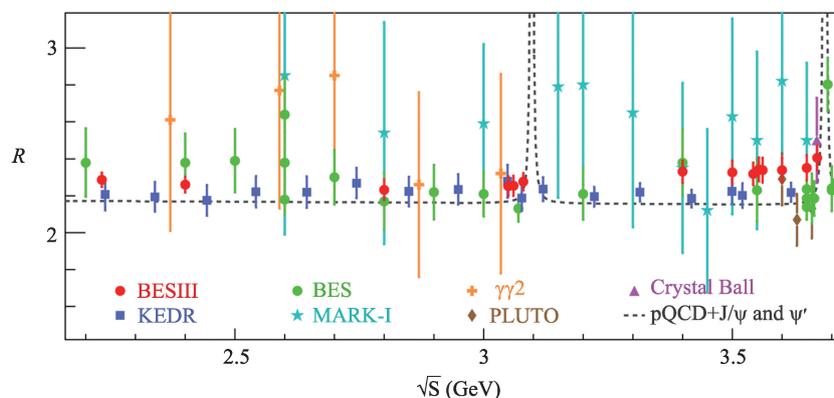


图1 能量区间为2.2至3.7 GeV的 R 值(图片来自文献[7])

对于强子化过程不可忽略的影响。最近, BESIII 实验利用在低能区 2.0 到 3.6 GeV 的多个能量点的扫描数据, 开展了单举过程 π^0+X 和 K_S+X 的研究, 精确测量了中性 π 介子和 K 介子单举产生微分截面^[11]。实验最高精度达 4%, 为之前实验数据误差的五分之一。这是实验上首次在低能区开展了强子的碎裂过程的研究, 填补了一直以来在低能区强子单举产生的实验空白。理论上通过在高能区获取的正负电子湮没的单举强子产生事例或深度非弹散射实验提取的碎裂函数外推到低能区与实验结果进行比对, 发现了显著的不同, 这一不同暗示在理解低能区的强子化过程仍需要理论和实验的共同努力。值得庆幸的是, 该部分的实验家和理论家已经形成了团队共同开发低能区碎裂函数的研究潜力。

4.2 电磁形状因子的测量

1961 年, 意大利理论学家 Cabibbo 和 Gatto 提出了正负电子对湮没到自旋 1/2 重子对的产生截面, 可以用重子的电和磁形状因子分别描述。1972 年, 在意大利的 ADONE 实验上首次通过正负电子湮没实验测量了质子的电磁形状因子。在这之后, 多个实验, 如 DM2, FENICE, CLEO, CMD, SND, BaBar, Belle, BESIII 等, 都开展了电磁形状因子的实验测量。通过正负电子对湮没到重子对过程研究电磁形状因子, 实验上有能量扫描和初态辐射两种方式。BESIII 实验是唯一可以结合两个研究方法的实验装置, 且 BEPCII 的运行能量覆盖了大多超子对的产生阈值。因此, BESIII 实验在研究重子电磁形状因子上具有显著的优势。利用 2015 年获取的扫描数据, BESIII 实验在电磁形状因子的测量中取得了一系列重要的实验成果。

4.2.1 精确的核子电磁形状因子

核子的电磁形状因子实验上有诸多测量, 大多利用电子-核子散射研究类空的电磁形状因子。1956 年美国物理学家霍夫斯塔特通过电子-质子的散射首次确定了质子的半径。由于正负电子对撞技术在 1960 年后才逐渐发展, 因此关于类时电磁形状因子测量晚于类空的实验结果。1972 年, ANDONE 实

验首次通过火花室重建了 $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ 过程, 利用火花室在 21901 张照片中找到了 25 个类信号事例。在这之后的 30 年, 实验也仅在 DM1, DM2 和 FENICE 上收集了近 200 个信号事例, 且能量区间较集中。2005 年和 2013 年 BESII 和 BaBar 实验收集了更多的事例, 特别是 BaBar 实验通过初态辐射方式将能量区间从产生阈值扩展到 3.0 GeV, 并发现了质子对产生阈值的截面反常值。2020 年, BESIII 实验利用扫描数据获得了超过 8 万个 $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ 信号事例^[12], 获得了世界上最高精度的质子对产生截面, 并通过角分布分析确定了电磁形状因子的绝对值, 首次观测到电磁形状因子比值的阻尼振荡。1998 年, FENICE 实验首次测量了类时空间中子电磁形状因子, 实验结果表明光子-中子相互作用强于光子-质子相互作用, 与夸克模型理论预期不符。然而, 由于中子难以探测, 相关的实验测量比较匮乏, 该问题长期未能解决。2021 年, BESIII 实验通过能量扫描方法, 利用北京谱仪 BESIII 实验在质心能量 2.0~3.08 GeV 的对撞数据, 精确测量正负电子对湮没到中子-反中子对过程的产生截面及有效电磁形状因子^[13]。总的统计量达到 FENICE 实验的 60 倍以上。实验结果清楚地表明光子与质子耦合更强, 解决了长期存在的光子-核子耦合问题。此外, 实验还在中子的电磁形状因子分布上观测到了周期性振荡的结构, 其振荡频率与质子相同, 相位接近正交。反常的正交振荡结构暗示着核子内部存在未理解的动力学机制, 可能的解释包括末态散射效应以及共振结构干涉等。2023 年, BESIII 实验首次在五个能量区间确定了中子的电磁形状因子比值, 确定了非零的中子电磁形状因子, 并与多个唯象理论进行比较^[14]。

4.2.2 重子对阈值截面

通过对电磁形状因子的参数化, 能够完全确定正负电子对湮没到重子对的产生截面。理论上有很多模型描述了电磁形状因子, 包括 ChEFT, VMD, Relativistic CQM, parton model 和 pQCD 等。电磁形状因子大多遵循偶极分布, 不同的理论描述电磁

形状因子随能量的演化及极点位置的不同。考虑了带电重子对的库伦修正后,正负电子对湮没到重子对产生截面的谱形能够大体确定。对于带电重子对,由于库伦修正,其阈值截面不为零,且在阈值处截面随着相空间的增加不断递增,到速度为 $0.2c$ 至 $0.3c$ 处再逐步降低;中性重子对阈值截面为零,其余趋势与带电重子对类似。2018年,BESIII实验在质心能量 4.5745 至 4.5995 GeV处测量了正负电子对湮没到 Λ_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”,观测到了反常的阈值结构^[15]。最近,BESIII实验在更高的能区内精确测量了 Λ_c 重子对的玻恩截面^[16]。结果显示该阈值结构仍然存在。但是Belle实验之前在 4.63 GeV附近 $\Lambda_c\bar{\Lambda}_c$ 截面谱上观测到的共振态消失了,这在当时被认为是重子偶素态候选者^[17]。BESIII的实验结果无疑将引领新一轮的理论讨论。另外,BESIII还在质心能量 2.2324 GeV处测量了正负电子对湮没到 Λ 重子对的玻恩截面^[18],以及 2.3094 GeV处测量了 $\Lambda\Sigma^0$ 重子对的玻恩截面^[19],均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、Sommerfeld因子进一步修正等。第三种解释由该研究的合作者之一、意大利INFN研究所的物理学家Rinaldo Baldini Ferroli提出,他认为在库伦相互作用中需要考虑重子的非点状性,通过在Sommerfeld因子中引入强相互作用耦合,可以分别解释实验上观测到的 Λ_c 和 Λ 重子对阈值附近反常的截面增强效应。BESIII对重子对产生截面系统性的研究成果总结在图2中。

4.2.3 电磁形状因子相位测量

不同于电子-核子散射过程的共轭振幅和自身相同,正负电子湮没至重子对过程的共轭振幅和自身并不相同。因此类时空间的电磁形状因子具有复数性。电磁形状因子之间存在相对相位。非零的相位会造成末态重子的横向极化,该特性已在1961年Cabibbo的文章中提出,1996年A.Z. Dubnickova具体给出极化率与相位的关系。实验上,通过测量末态重子的极化,联合角分布分析,可以完全确定电磁形状因子的大小和相位。对于核子极化的测量,需要专门测量极化的仪器,影响探测器的接收度。利用超子的弱衰变性质,上一级的极化信息会体现到末态粒子的角分布不对称度中,从而能够通过测量极化确定电磁形状因子的相位。反过来,该实验结果对于检验多种理论对电磁形状因子的演

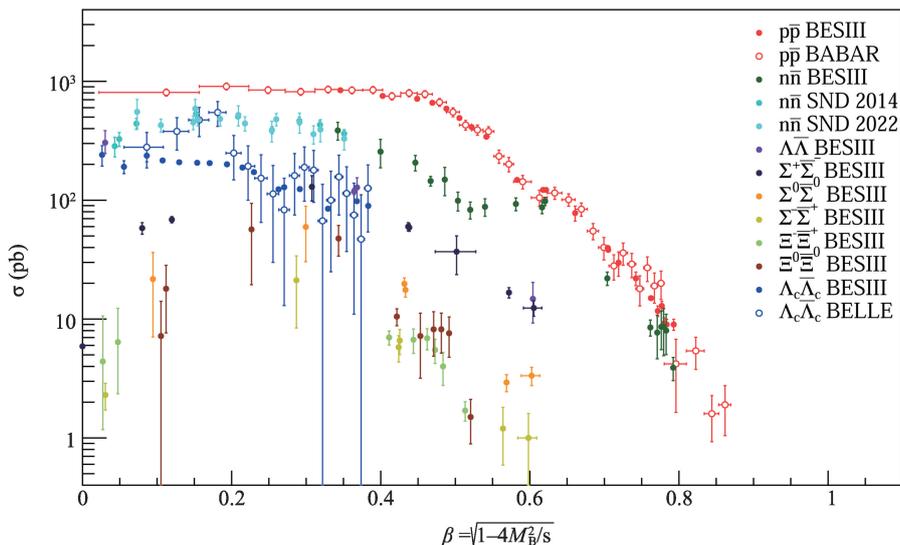


图2 正负电子对湮没到重子对过程随重子相空间的产生截面(图片来自文献[20]并更新)

化的描述具有重要作用。2018年, BESIII 实验在质心能量为 2.396 GeV 收集数据, 重建了 $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ 过程, 通过完整的角分布分析确定了电磁形状因子比值及相角差^[21]。测量得到的非零相角差证实了类时空形状因子的复数特性, 并且表明通过非极化的正负电子束流可以产生极化的 Λ 。最近, 该方法应用到 Σ^+ 超子研究中^[22], 并且在更大的四动量转移区间测量了电磁形状因子相位的演化, 提供了重要的完整电磁形状因子的信息, 为研究超子的动力学演化机制提供重要参考。

总之, BESIII 分别在电磁形状因子的精确测量, 阈值产生截面的系统研究, 以及电磁形状因子相位的测量三个方面做出了重要的贡献, 刷新了类时空电磁形状因子的图像。接下来 BESIII 实验还会利用有限的的数据, 进一步深度开展重子电子形状因子的实验研究, 充分挖掘其中蕴藏的物理意义。

4.3 轻味矢量介子研究

利用在低能区扫描的数据, BESIII 实验对轻味矢量介子进行了系统性的研究。轻味矢量介子是指由 u、d、s 夸克组成的 ρ 、 ω 或 ϕ 激发态。由于它们形成在相对论极限下, 普通的势模型很难计算其谱形, 这也造成分析 2-3 GeV 能区共振态的复杂性。其中备受关注的是 $\phi(2170)$ 粒子, 或者称为 $Y(2170)$,

它首次在 BaBar 实验中发现。 $\phi(2170)$ 是含有 $s\bar{s}$ 夸克成分的共振态, 但由于其质量靠近 $\Lambda\bar{\Lambda}$ 阈值并且与理论预言的 3D 或 2S 态不符, 关于它的内部成分一直存在争论, 理论上的解释包括混杂态, 四夸克态或者 $\Lambda\bar{\Lambda}$ 分子态等。BESIII 实验通过正负电子对湮没到轻强子末态过程的截面测量对 $\phi(2170)$ 的性质进行了系统性的研究。2019 年, BESIII 在 K^+K^- 谱中看到了显著的共振态信号^[23], 但是由于同位旋的不确定性, 不能确定该粒子是 $\phi(2170)$ 还是 $\rho(2170)$ 。2020 年, 通过对 $K^+K^-\pi^0\pi^0$ 的分波分析^[24], 提取了中间共振态的谱形, 并确定了 $\phi(2170)$ 衰变到 $K(1460)K, K_s(1400)K, K_s(1270)K$ 和 K^*K^* 的分宽度, 厘清多个对 $\phi(2170)$ 的模型解释。进一步地, BESIII 实验分析了 $\phi\eta'$, $KK\pi$ 等过程, 对 $\phi(2170)$ 的性质和衰变机制有了充分的了解。此外, BESIII 上还通过分析 $\omega\eta'$, $\omega\pi\pi, \pi^+\pi^-\pi^0$ 等过程对 ω^* 进行了性质研究, 以及通过 $\omega\pi^-, \eta'(\pi)\pi\pi$ 对 ρ^* 进行研究。图 3 总结了 BESIII 利用多个过程对轻味矢量介子态共振参数测量的结果。

4.4 两个专门的扫描数据

除了 BESIII 上的 τ 轻子质量扫描和 R 值扫描数据, τ & QCD 组另有两个更专门的扫描样本, 以进行特定的物理课题分析研究。

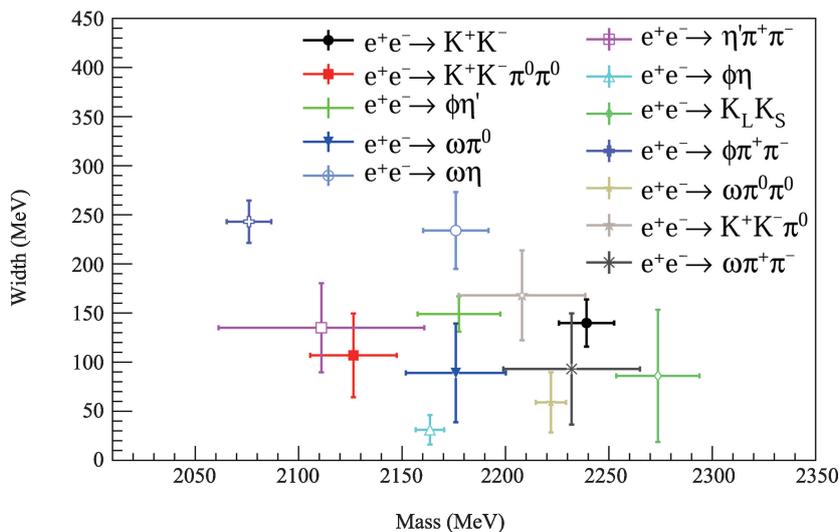


图3 BESIII 上低能区各种轻强子谱中发现的轻味矢量介子共振参数

4.4.1 粲偶素衰变中电磁和强相互作用的衰变相位差

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/ψ 的电磁衰变,及 J/ψ 的强相互作用衰变,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 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 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的衰变相位差。该相位差对不同的末态,如矢量介子+赝标介子过程,重子-反重子对过程,赝标介子+赝标介子过程等是不同的?还是相同的?2019年BESIII通过16个能量点的扫描数据,对 $\eta\pi\pi$ 和 5π 的谱形进行了研究,并提取出相应的相位角^[25]。2021年,针对衰变相位差研究, τ & QCD组成立了研究专题小组,利用这批独特的数据开展更多的相位差研究,如 $\phi\eta$, KK , $B\bar{B}$ 等过程。

4.4.2 正负电子对湮没到轴矢量粲偶素的直接产生

物理上,对于 e^+e^- 直接湮没到电荷共轭(C)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,相较于C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 $e^+e^- \rightarrow f_1(1285)$, $e^+e^- \rightarrow \chi_{c1}$, $e^+e^- \rightarrow X(3872)$ 等。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。BESIII实验另辟蹊径,通过探索信号过程 $e^+e^- \rightarrow \chi_{c1} \rightarrow \gamma J/\psi \rightarrow \gamma \mu^+\mu^-$ 和背景过程 $e^+e^- \rightarrow \gamma_{ISR} \mu^+\mu^-$ 的干涉^[26],观测到5.1倍显著度的信号过程,见图4。实验首次确定了 χ_{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。

5. 总结

BESIII实验作为研究非微扰量子色动力学的

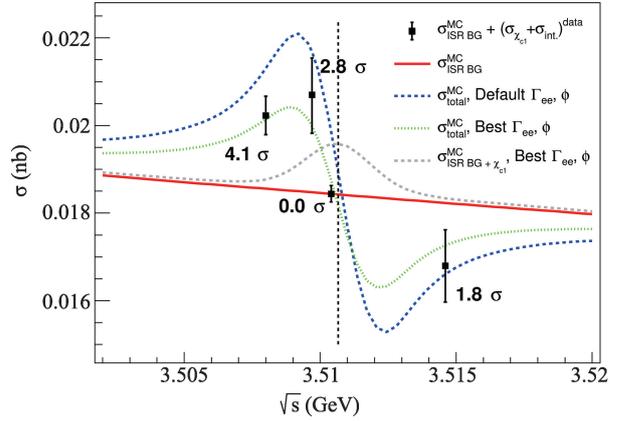


图4 $e^+e^- \rightarrow \gamma J/\psi \rightarrow \gamma \mu^+\mu^-$ 的截面谱测量,干涉部分显示信号过程 $e^+e^- \rightarrow \chi_{c1}$ 参与的贡献,灰色区域是拟合的信号过程(图片来自文献[26])

独特平台,在低能区QCD研究中取得了一系列重要进展。不仅赓续传承BES和BESII的物理研究,精确测量了 τ 轻子质量和 R 值,还首次测量了低能区极化和非极化的强子碎裂函数、精确测量类时空间重子电磁形状因子、系统研究了轻味矢量介子的性质、研究了矢量粲偶素衰变中的电磁和强相互作用相位、首次发现了正负电子湮没直接到轴矢量介子的过程。实验发表了40多篇论文到高水平国际期刊,包括10篇*Physics Review Letter*,以及1篇*Nature Physics*封面文章,总引用超过1500次。在此能区仍有大量的丰富的物理有待挖掘,未来将会进一步优化取数计划,对低能区QCD物理展开充分细致的研究。

致谢

感谢黄光顺、鄢文标和夏磊在文章写作过程中给予的帮助,感谢王维平和雷天天在绘图中的帮助。

参考文献

- [1] D. M. Asner, *et al.* "Physics at BES-III," *Int. J. Mod. Phys. A* 24, S1-794 (2009)
- [2] M. Ablikim *et al.* [BESIII], "Future Physics Programme of BES-III," *Chin. Phys. C* 44, no.4, 040001 (2020)
- [3] M. Ablikim *et al.* [BESIII], "Precision measurement of the mass of the τ lepton," *Phys. Rev. D* 90, no.1, 012001 (2014)
- [4] I. Adachi *et al.* [Belle-II], "Measurement of the τ -lepton mass with

- the Belle II experiment,” Phys. Rev. D 108, no.3, 032006 (2023)
- [5] B. Abi *et al.* [Muon g-2], “Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm,” Phys. Rev. Lett. 126, no.14, 141801 (2021)
- [6] D. P. Aguillard *et al.* [Muon g-2], “Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.20 ppm,” [arXiv:2308.06230 [hep-ex]].
- [7] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Measurement of the Cross Section for $e^+e^- \rightarrow$ Hadrons at Energies from 2.2324 to 3.6710 GeV,” Phys. Rev. Lett. 128, no.6, 062004 (2022)
- [8] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ cross section between 600 and 900 MeV using initial state radiation,” Phys. Lett. B 753, 629-638 (2016) [erratum: Phys. Lett. B 812, 135982 (2021)]
- [9] F. V. Ignatov *et al.* [CMD-3], “Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ cross section from threshold to 1.2 GeV with the CMD-3 detector,” [arXiv:2302.08834 [hep-ex]].
- [10] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Measurement of azimuthal asymmetries in inclusive charged dipion production in e^+e^- annihilations at $\sqrt{s}=3.65$ GeV,” Phys. Rev. Lett. 116, no.4, 042001 (2016)
- [11] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Measurements of Normalized Differential Cross Sections of Inclusive π^0 and K_S^0 Production in e^+e^- Annihilation at Energies from 2.2324 to 3.6710 GeV,” Phys. Rev. Lett. 130, no.23, 231901 (2023)
- [12] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Measurement of proton electromagnetic form factors in $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ in the energy region 2.00 - 3.08 GeV,” Phys. Rev. Lett. 124, no.4, 042001 (2020)
- [13] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Oscillating features in the electromagnetic structure of the neutron,” Nature Phys. 17, no.11, 1200-1204 (2021)
- [14] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Measurements of the Electric and Magnetic Form Factors of the Neutron for Timelike Momentum Transfer,” Phys. Rev. Lett. 130, no.15, 151905 (2023)
- [15] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Precision measurement of the $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$ cross section near threshold,” Phys. Rev. Lett. 120, no.13, 132001 (2018)
- [16] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Measurement of the Energy-Dependent Electromagnetic Form Factors of a Charmed Baryon,” [arXiv:2307.07316 [hep-ex]].
- [17] G. Pakhlova *et al.* [Belle], “Observation of a near-threshold enhancement in the $e^+e^- \rightarrow \Lambda_{b,c}^+\Lambda_{b,c}^-$ cross section using initial-state radiation,” Phys. Rev. Lett. 101, 172001 (2008)
- [18] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Observation of a cross-section enhancement near mass threshold in $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$,” Phys. Rev. D 97, no.3, 032013 (2018)
- [19] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Measurement of the $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Sigma}^0 + c.c.$ cross sections at \sqrt{s} from 2.3094 to 3.0800 GeV,” [arXiv:2308.03361 [hep-ex]].
- [20] G. Huang *et al.* [BESIII], “Probing the internal structure of baryons,” Natl. Sci. Rev. 8, no.11, nwab187 (2021)
- [21] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Complete Measurement of the Λ Electromagnetic Form Factors,” Phys. Rev. Lett. 123, no.12, 122003 (2019)
- [22] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Complete determination of Σ^+ electromagnetic form factors via $e^+e^- \rightarrow \Sigma^+\bar{\Sigma}^-$,” [arXiv:2307.15894 [hep-ex]].
- [23] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Measurement of $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ cross section at $\sqrt{s} = 2.00 - 3.08$ GeV,” Phys. Rev. D 99, no.3, 032001 (2019)
- [24] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Observation of a Resonant Structure in $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0\pi^0$,” Phys. Rev. Lett. 124, no.11, 112001 (2020)
- [25] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “Measurement of the phase between strong and electromagnetic amplitudes of J/ψ decays,” Phys. Lett. B 791, 375-384 (2019)
- [26] M. Ablikim *et al.* [BESIII], “First Observation of the Direct Production of the x_{c1} in e^+e^- Annihilation,” Phys. Rev. Lett. 129, no.12, 12 (2022)

