

一对重夸克，一类新物质*

郭玉萍^{1,†} 刘智青^{2,††} 朱 凯^{3,†††}

(1 复旦大学现代物理研究所 上海 200433)

(2 山东大学前沿交叉科学青岛研究院 青岛 266237)

(3 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2025-01-15 收到

† email: guoyup@fudan.edu.cn

†† email: z.liu@sdu.edu.cn

††† email: zhuk@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20250305

CSTR: 32040.14.wl20250305

A pair of heavy quarks, a new type of matter

GUO Yu-Ping^{1,†} LIU Zhi-Qing^{2,††} ZHU Kai^{3,†††}

(1 Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

(2 Institute of Frontier and Interdisciplinary Science, Shandong University, Qingdao 266237, China)

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

摘 要 J/ψ 粒子的发现不仅在理论上推动了标准模型的广泛接受，还为后续粲偶素及类粲偶素的研究打开了大门。北京谱仪Ⅲ实验在粲偶素与类粲偶素方面进行的研究包括但不限于：寻找新的粒子，确定粒子的内部结构、质量与宽度、跃迁与衰变，寻找新的产生和衰变过程等，取得了一批重要的物理成果。文章将着重介绍北京谱仪Ⅲ实验关于粲偶素与类粲偶素的代表性工作，包括精确测量 $\eta_c(1S)$ 粒子共振参数、发现 D 波自旋三重态 $\psi(1^3D_2)$ 、发现正负电子湮灭直接产生 $\chi_{c1}(1P)$ 、发现带电四夸克粒子、矢量类粲偶素粒子与中性 $X(3872)$ 粒子的系列前沿研究等。这些实验结果丰富了人们对基本粒子世界的认识，有助于更深入地理解强相互作用与宇宙中的物质构成。

关键词 J/ψ 粒子，北京谱仪Ⅲ，粲偶素，类粲偶素

Abstract The discovery of the J/ψ particle not only promoted the widespread acceptance of the Standard Model in theory, but also opened the door for subsequent research on charmonium and charmonium-like states. The Beijing Spectrometer Ⅲ experiments on charmonium and charmonium-like particles include but are not limited to searching for new particles, determining the internal structure of particles, measuring their mass and width, studying their transitions and decays, and exploring new production and decay processes. A number of important physics results have been achieved. This article focuses on representative work at the Beijing Spectrometer Ⅲ on charmonium and charmonium-like particles, including the precise measurement of resonance parameters for the $\eta_c(1S)$ particle, the discovery of the D -wave spin triplet $\psi(1^3D_2)$, the direct production of the $\chi_{c1}(1P)$ from electron-positron annihilation, the discovery of charged tetraquark particles, and a series of cutting-edge studies on vector charmonium-like particles and the neutral $X(3872)$ particle. These experimental results enrich our understanding of the world of fundamental particles, helping us to delve deeper into the understanding of strong interaction and the composition of matter in the universe.

Keywords J/ψ particle, BES Ⅲ, charmonium states, charmonium-like states

* 国家重点研发计划(批准号: 2020YFA0406300)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB00000)、国家自然科学基金(批准号: 50875132; 60573172; 12375083)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2011AA06Z228)、山东省自然科学基金(批准号: ZR2022JQ02)资助项目

1 引言

2024年6月24日,2023年度国家科学技术奖励大会在人民大会堂隆重召开,“‘四夸克物质’ $Z_c(3900)$ 的发现”荣获国家自然科学奖二等奖。在中国科学院高能物理研究所的新闻通报中写到:“……2013年,项目组利用该实验在质心系能量4.26 GeV采集数据,发现了一个新的带电粒子 $Z_c(3900)$ 。该粒子内部至少含有4个夸克,首次以确切的实验证据表明自然界存在多夸克物质。……该成果是半个多世纪以来人们探索物质结构的重大突破,被美国物理学会*Physics*杂志评选为11项‘年度亮点’重大进展之首并入选2013年‘中国科学十大进展’等国内标志性重大科技成果。四夸克粒子的发现使得我国在该领域达到世界领先水平,成果被写入国外本科生英文教科书等,推动了相关学科的发展……”。

新闻稿中没有提到的是, $Z_c(3900)$ 粒子的发现与另一个粒子—— J/ψ 粒子——密不可分。实验物理学家们不仅可以通过 J/ψ 粒子重建出 $Z_c(3900)$,并且通过 $Z_c(3900)$ 能衰变到 J/ψ ,从而推测出 $Z_c(3900)$ 内部至少含有4个夸克。而 J/ψ 粒子的发现,则要追溯到50年前,一项引发了被称为粒子物理“十一月革命”的重大发现。

让我们把时光拨回到1974年。正是在那一年,美国布鲁克海文国家实验室的丁肇中和他领导的麻省理工学院团队在质子轰击铍靶的实验中,清楚地观察到总能量约为3.1 GeV的大质量矢量介子,他们将其命名为 J 。此发现立即得到了斯坦福直线加速器中心由里克特领导的SLAC团队进行的正负电子对撞实验的确认。他们将这个由正负电子湮灭产生的、质量约为3.1 GeV的中性粒子命名为 ψ 。比较数据后,实验者们意识到他们实际上发现了具有相同量子特征的、类似光子但具有较大质量的粒子,自那时起,这个粒子一直被称为 J/ψ 粒子。两个研究团队决定同时公开他们的发现:于1974年11月11日向《物理评论快报》提交他们的论文^[1-3]。

J/ψ 粒子的发现对粒子物理学的发展和我们

现在称之为粒子物理标准模型的接受至关重要,其中包括称为量子色动力学(QCD)的夸克—胶子规范理论和格拉肖—温伯格—萨拉姆的电弱统一理论。

在 J/ψ 粒子发现之前,格罗斯和威尔切克在1973年证明无质量规范场理论具有渐近自由性质,已经使许多理论物理学家相信强子是由参与强相互作用的分数电荷粒子所组成。之前这些粒子已经在1964年独立地由茨维格和盖尔曼假设提出,并将其命名为夸克。然而,直到20世纪70年代初,因为从未在实验中检测到分数电荷的粒子,夸克的本体地位仍然非常有争议。理论学家不得不假设夸克永久被困在其电荷为电子电荷整数倍的更大粒子中——这种性质被称为夸克禁闭。另一个问题则涉及夸克的数量。直到1970年,理论方案通常基于这样的假设,即有三种味道的夸克:上夸克、下夸克和奇异夸克。这三种夸克被认为是所有已观察到的强子的基本组成部分。然而,在将格拉肖—温伯格—萨拉姆电弱相互作用规范理论(成功地描述了轻子的相互作用)应用到夸克时出现了一些困难。1970年,格拉肖—伊利奥保罗—马亚尼提出了一种基于存在称为粲的第四种夸克的弱相互作用机制,即GIM机制,成功地解释了夸克味道不变中性流的缺失。但没有实验证据直接表明存在其中假设的第四种夸克。

在发现 J/ψ 粒子后,理论物理学家立即开始推测它的性质(限于篇幅,此处略去他们所做的大量精彩卓绝的工作)。到1976年7月,人们一致认为 J/ψ 粒子就是粲夸克及其反夸克的最简单束缚态。一旦大多数物理学家接受了 J/ψ 粒子的粲解释,它的发现也就自然被认为是证明粲夸克存在的重要一步,同时也证明了GIM机制在电弱相互作用中的有效性。换句话说, J/ψ 粒子的发现为格拉肖—温伯格—萨拉姆统一的电弱相互作用理论和夸克胶子的规范场理论提供了实证证据^[4-8]。1976年12月,在他们的成果首次公布两年后,丁肇中和里克特被授予诺贝尔奖——“因为他们在发现一种新型重粒子方面所做的开创性工作”。为了强调这一发现的重要性,物理学家们将 J/ψ 粒子的发现及随后其被解释为正反粲夸克束缚态的事件称为

“十一月革命”。

一些理论物理学家在此后发展了粲偶素模型——以类比电子—正电子对的束缚态来解释 J/ψ 粒子的性质。粲偶素模型令人满意地解释了观察到的粒子长寿命和衰变性质，并允许计算具有不同自旋、宇称的正反粲夸克的其他共振态的性质。之后多个实验组发现了许多与粲偶素模型计算性质相一致的粒子，为理论模型的有效性提供了进一步的证据。但物理学家们也发现，目前还存在众多与理论模型不一致的实验结果，特别是在粲介子对质量阈值以上发现的一类新的、与粲偶素类似但很可能并非粲偶素的粒子，预示我们对此能区的物理还有相当多不了解之处。除了理论上的努力之外，还需要更多的实验数据。而北京谱仪Ⅲ(BESⅢ)的粲偶素物理工作组在此领域进行了大量的测量工作，得到了一系列有价值的结果。接下来的两章将分别介绍 BESⅢ 实验关于粲偶素与类粲偶素的一些具有代表性的工作。

2 BESⅢ上的粲偶素研究

2.1 正负电子对撞实验上的粲偶素产生机制

粲偶素指由一对正反粲夸克($c\bar{c}$)组成的介子，正反粲夸克总自旋角动量及其之间轨道角动量的不同组合构成了粲偶素家族。粲偶素家族中第一个被发现的粒子就是 J/ψ 粒子。 J/ψ 粒子的量子数为 $J^{PC} = 1^{--}$ (J 表示粒子的自旋， P 表示宇称， C 表示电荷共轭宇称)，是矢量粒子，在 SPEAR 加速器上是通过电子和正电子碰撞湮灭产生的。利用相同的产生机制，通过调整发生碰撞的电子和正电子的能量，同年， J/ψ 粒子的径向激发态粒子 $\psi(2S)$ 也在 SPEAR 上被发现。在正负电子对撞实验中，电子和正电子主要通过一个虚光子湮灭产生矢量粒子，其他量子数的粲偶素通常由矢量粲偶素通过辐射跃迁或者强子跃迁产生，例如 $J/\psi \rightarrow \eta_c(1S)$ ， $\psi(2S) \rightarrow \pi^0 h_c(1P)$ 等^[9]，其中 $\eta_c(1S)$ 是 S 波自旋单态， $J^{PC} = 0^{-+}$ ， $h_c(1P)$ 是 P 波自旋单态， $J^{PC} = 1^{+-}$ 。在正负电子对撞机上，如

果电子和正电子交换两个虚光子发生相互作用，可以直接产生量子数 $J^{PC} = 0^{-+}, 0^{++}, 1^{++}, 2^{++}$ 等电荷共轭宇称数值为正的粒子，但其产生几率比通过湮灭产生矢量粒子的几率要低几万倍。

北京谱仪 BESⅢ 实验自 2008 年开始采集正负电子对撞数据以来，累计采集了 27 亿 $\psi(2S)$ 事例和 100 亿 J/ψ 事例，是目前世界上静止产生的最大的 J/ψ 和 $\psi(2S)$ 样本，同时在质心能量位于 3.5—4.95 GeV 之间的一百多个能量点采集了积分亮度约为 46 fb^{-1} 的正负电子对撞数据，为研究粲偶素粒子的基本性质和寻找尚未发现的激发态粲偶素提供了独一无二的样本。基于这些数据，BESⅢ 实验精确测量了 $\eta_c(1S)$ 粒子的共振参数，精确测量了 $h_c(1P)$ 粒子的共振参数与衰变几率，发现了磁偶极跃迁过程 $\psi(2S) \rightarrow \gamma \eta_c(2S)$ ，发现了 $h_c(1P)$ 粒子辐射衰变到轻强子过程 $h_c(1P) \rightarrow \gamma \eta'$ ，发现了 D 波自旋三重态粒子 $\psi(1^3D_2)$ ，发现了正负电子湮灭直接产生 $J^{PC} = 1^{++}$ 的粒子 $\chi_{c1}(1P)$ 等等。这些发现得益于 BESⅢ 实验采集的大统计量数据和 BESⅢ 探测器优异的性能，为检验量子色动力学理论模型和理解强相互作用的非微扰机制提供了标杆。

2.2 $\eta_c(1S)$ 粒子共振参数的精确测量

$\eta_c(1S)$ 是粲偶素家族的基态粒子，1980 年，MARK II 实验通过辐射跃迁过程 $\psi(2S) \rightarrow \gamma \eta_c(1S)$ 首次发现了 $\eta_c(1S)$ ，测量了其质量 $M = 2980 \pm 8 \text{ MeV}/c^2$ 和 90% 置信度下的宽度上限 $\Gamma < 40 \text{ MeV}/c^2$ ^[10]。随后的 30 年中，不同实验组通过 B 介子衰变、双光子过程产生、质子—反质子湮灭产生等方式对 $\eta_c(1S)$ 粒子的质量和宽度进行了测量，但通过辐射跃迁过程测量的结果与其他机制测量的结果存在很大差异，辐射跃迁过程测量的质量更高、宽度更大^[11]。2009 年，CLEO 实验组基于 2450 万 $\psi(2S)$ 事例，在 J/ψ 和 $\psi(2S)$ 粒子的辐射跃迁过程中观测到 $\eta_c(1S)$ 粒子共振谱形存在严重的左右不对称现象，并将其归因于磁偶极跃迁振幅对辐射光子能量的依赖^[12]。

利用 2009 年采集的 1.06 亿 $\psi(2S)$ 事例，BESⅢ

实验通过6个主要强子衰变末态来重建 $\eta_c(1S)$ ，从数据中观测到约7000个 $\eta_c(1S)$ 事例，确认了CLEO实验发现的 $\eta_c(1S)$ 共振谱形左右不对称现象，如图1所示^[13]，共振谱形不对称现象无法使用跃迁振幅对辐射光子能量的依赖进行解释。而 $\eta_c(1S)$ 衰变振幅与 $J^{PC} = 0^{-+}$ 连续振幅之间的干涉效应可以完美地描述共振谱形的不对称现象，干涉现象的统计显著性为 15σ 。BESⅢ实验精确测量了 $\eta_c(1S)$ 的质量和宽度，结果分别为 $M = (2984.3 \pm 0.6 \pm 0.6) \text{ MeV}/c^2$ 和 $\Gamma = (32.0 \pm 1.2 \pm 1.0) \text{ MeV}$ ，是当时世界上20余个测量中精度最高的结果，并保持到了2020年。BESⅢ测量的质量中心值比当时世界平均值高 $3.3 \text{ MeV}/c^2$ ；宽度的结果与通过其他产生机制测量得到的结果更接近，表明此前通过粲偶素辐射过程测量的结果存在偏差，原因在于实验测量中没有考虑共振态衰变与非共振态振幅的干涉效应，成功解释了此前不同产生机制中测量结果不一致的疑难。

2.3 发现D波自旋三重态 $\psi(1^3D_2)$

粲夸克质量($1.3 \text{ GeV}/c^2$)比 $c\bar{c}$ 的结合能(几百MeV)大很多，因此可以使用非相对论量子力学方

法求解粲偶素能谱，常用的描述夸克间相互作用势的势模型是 $V(r) = -a/r + kr$ 。根据势模型计算，D波粲偶素共有4个，包括1个自旋单态 $\psi(1^1D_2)$ 和3个自旋三重态 $\psi(1^3D_{1,2,3})$ 。其中， $\psi(1^3D_1)$ 是矢量粒子，实验上观测到的 $\psi(3770)$ 被普遍认为是 $\psi(1^3D_1)$ 态。 $\psi(1^3D_2)$ 态的量子数 $J^{PC} = 2^{-}$ 。2013年位于日本KEK的Belle实验在B介子衰变中发现了一个新粒子X(3823)，统计显著度为 3.8σ ^[14]，其质量 $M = (3823.1 \pm 1.8 \pm 0.7) \text{ MeV}/c^2$ ，主要衰变到 $\gamma\chi_{c1}$ 末态，这些性质与理论预言的 $\psi(1^3D_2)$ 态性质相符。因此X(3823)被认为是 $\psi(1^3D_2)$ 态很好的候选者。

利用质心能量位于 $4.19\text{--}4.6 \text{ GeV}$ 之间数据样本(数据积分亮度为 4.67 fb^{-1})，BESⅢ实验对 $\psi(1^3D_2)$ 粒子进行了实验寻找。考虑到 $\psi(1^3D_2)$ 粒子的量子数以及衰变模式，BESⅢ的研究通过 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-X$, $X \rightarrow \gamma\chi_{c1}(1P)$ 过程开展。首次以超过 5σ 的显著度观测到了X(3823)，确认了该粒子的存在，如图2所示^[15]。BESⅢ实验测量的X(3823)质量为 $(3821.7 \pm 1.3 \pm 0.7) \text{ MeV}/c^2$ ，与Belle实验的测量结果在误差范围内一致。利用质心能量位于 $4.23\text{--}4.7 \text{ GeV}$ 之间采集的新数据样本，2022年BESⅢ实验更新了对 $\psi(1^3D_2)$

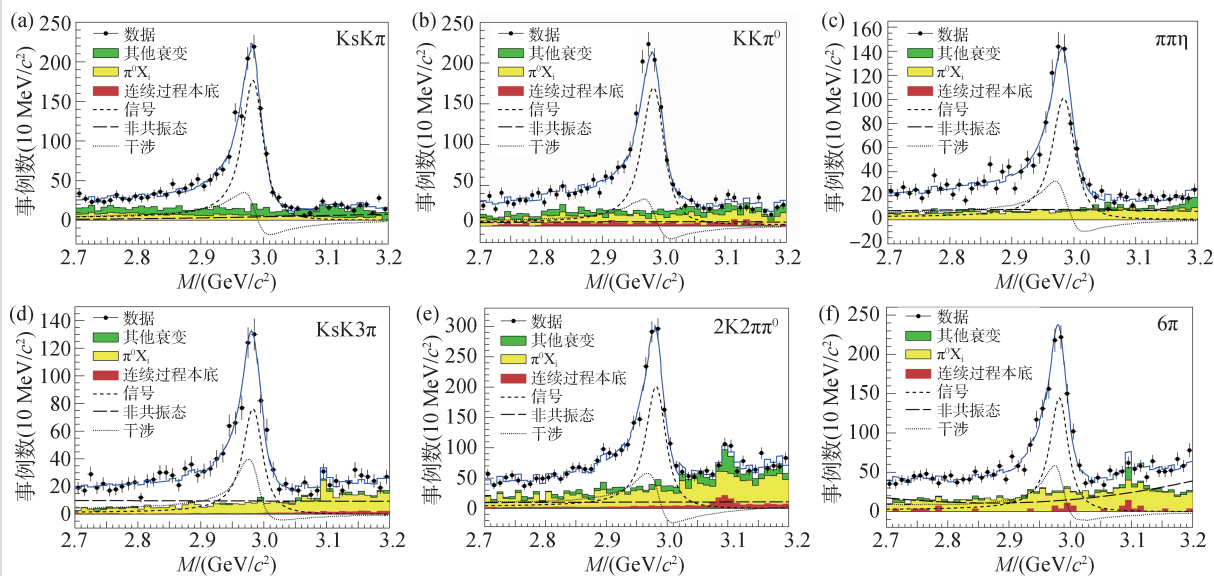


图1 6个强子衰变过程中观测到的 $\eta_c(1S)$ 信号区附近的不变质量谱以及考虑了 $\eta_c(1S)$ 共振态衰变与 $J^{PC} = 0^{-+}$ 非共振态振幅干涉的拟合结果

的测量，提高了质量的测量精度，同时在 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\psi(1^3D_2)$ 反应截面线型上发现共振结构^[16]。

2.4 发现正负电子湮灭直接产生 $\chi_{c1}(1P)$

在正负电子对撞机上，电子和正电子交换两个虚光子可以直接产生C宇称为正的粒子，但是一直未在实验上被证实。自1988年起，位于VEPP-2M和VEPP-2000加速器上的ND实验、SND实验和CMD-3实验，先后对多个C宇称为正的轻强子在正负电子湮灭中的直接产生过程进行了寻找，但均未发现信号。正负电子湮灭直接产生C宇称为正粒子的几率与其电子宽度 Γ_{ee} 成正比，理论上对 $\chi_{c1}(1P)$ 电子宽度的预言依赖于模型，但在0.1—0.5 eV之间。此外， $e^+e^- \rightarrow \chi_{c1}(1P)$ 过程与本底过程间可能存在干涉效应，从而改变其产生截面的线型，使得产额最大的能量点从 $\chi_{c1}(1P)$ 峰值(3.510 GeV)下移到3.509 GeV处^[17]，如图3所示。

BESⅢ实验团队于2013年提出在 $\chi_{c1}(1P)$ 峰值附近采集数据的计划，用于寻找正负电子湮灭交换两个虚光子直接产生 $\chi_{c1}(1P)$ 过程，实验数据于2017年采集完成，3周内4个能量点采集了积分亮度为445 pb⁻¹的数据。当制定数据采集计划时，充分考虑到了 $e^+e^- \rightarrow \chi_{c1}(1P)$ 过程与本底过程间可能存在的干涉效应，在3.5080—3.5104 GeV处分别采集了积分亮度约为180 pb⁻¹的数据，在3.5097—3.5146 GeV处数据样本大小约为40 pb⁻¹。 $\chi_{c1}(1P)$ 粒子使用其黄金衰变模式 $\gamma J/\psi$, $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ 进行重建，BESⅢ实验发现了 $e^+e^- \rightarrow \chi_{c1}(1P)$ 过程^[18]，统计显著度为5.1 σ ，同时发现信号过程与本底过程之间存在显著的干涉效应。BESⅢ实验还首次测量了 $\chi_{c1}(1P)$ 粒子的电子分宽度， $\Gamma_{ee} = 0.12^{+0.13}_{-0.08}$ eV。这是历史上首次在正负电子湮灭过程中观测到量子数与矢量粒子不同的粒子，提供了测量粒子轻子宽度的新实验方法，可以对其他类似粒子，例如 $\chi_{c2}(2P)$ 、X(3872)等进行测量。

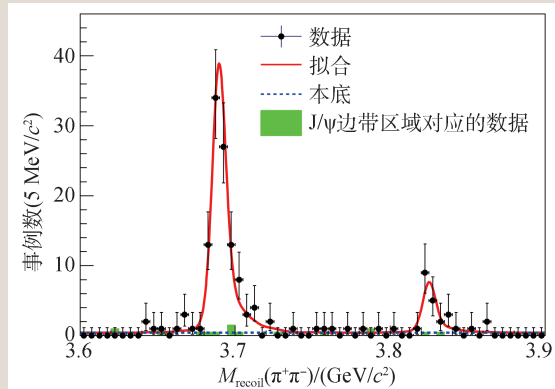


图2 BESⅢ实验发现的X(3823)信号。图中左侧的共振态峰为 $\psi(2S)$ ，右侧为 $\psi(1^3D_2)$

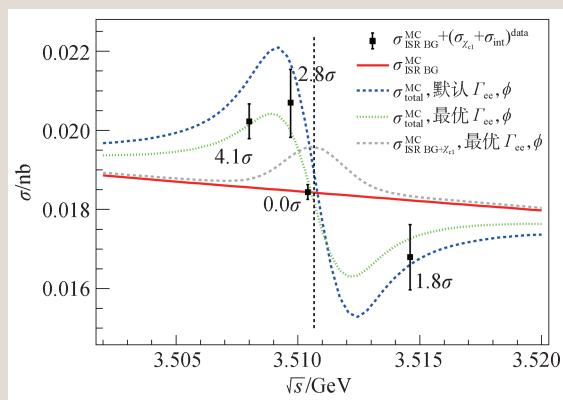


图3 BESⅢ实验观测到的 $e^+e^- \rightarrow \chi_{c1}(1P)$ 和 $e^+e^- \rightarrow \gamma_{\text{ISR}}\mu^+\mu^-$ 过程的总截面。其中，图中灰色虚线表示信号过程与本底过程没有干涉情况下的总截面，蓝色和绿色虚线表示存在干涉情况下的总截面，带误差棒的点代表数据测量结果，红线表示本底过程

3 BESⅢ上的类粲偶素研究

3.1 类粲偶素简介

J/ψ 粒子的发现，不仅证实了自然界存在第四味粲夸克，同时也打开了粲偶素谱这个新的研究领域。在长达50年的时间中，人们在理论和实验两方面对粲偶素谱进行研究并取得许多前沿进展。步入21世纪，随着B介子工厂、陶—粲工厂等高亮度正负电子对撞机实验的陆续运行，人们在粲偶素能区发现了越来越多的新粒子，比如日本Belle实验发现的X(3872)^[19]、美国BaBar实验发现的Y(4260)^[20]等。这些新发现的粒子，一方面在势

模型理论^[21]预言的粲偶素能谱上很难找到对应的谱线,另一方面和普通粲偶素粒子的性质迥异。基于这些原因,很难把它们归类为粲偶素粒子。考虑到它们的质量位于粲偶素能区,人们称之为类粲偶素粒子(亦称XYZ粒子)。

类粲偶素粒子之所以吸引了人们极大的关注,是因为它们很可能是一类新型强子态的候选者。众所周知,1964年提出的夸克模型^[22]认为3个夸克构成重子,2个正反夸克构成介子。虽然当时也提到了更多夸克组成粒子的可能性,但是实验上发现的粒子都能用3个夸克和2个夸克来解释。1973年发展起来的量子色动力学(QCD)理论是一个规范场论,它允许存在结构比重子和介子更复杂的粒子,例如多个夸克构成的多夸克态,夸克和胶子(传播强相互作用的媒介粒子)形成的混杂态,甚至由纯胶子构成的胶子球等。所有这些新型的粒子统称为奇特态。理论上虽然预言了奇特态粒子,但是多年来一直未有确切的实验证据表明奇特态粒子的存在。直到类粲偶素粒子的发现,人们纷纷觉得它们应该就是长期搜寻的奇特态。这个观点在北京谱仪Ⅲ实验发现带电类粲偶素粒子 $Z_c(3900)$ ^[23]时得到了进一步的确认。

3.2 带电四夸克粒子的发现

实验上寻找奇特态粒子时,需要有别于普通粒子的关键特征。位于3—5 GeV能区的类粲偶素粒子,内部应当含有一对正反粲夸克。倘若该类粲偶素粒子带有电荷,那么它必定不是普通的粲偶素——因为粲偶素都是电中性的。因此,实验

上寻找带电类粲偶素粒子成为了“冒烟的枪”(smoking gun),它们是奇特态存在最有力的证据。

早在2008年,日本Belle实验曾宣布发现一个带电类粲偶素粒子 $Z(4430)$ ^[24]。然而令人遗憾的是,次年该粒子被美国BaBar实验在相同的物理过程中否定^[25],直到2014年才重新被LHCb实验用振幅分析方法确认^[26]。2013年,北京谱仪Ⅲ通过在正负电子质心能量4.26 GeV采集的525 pb⁻¹数据样本,发现了一个新的带电类粲偶素粒子 $Z_c(3900)$ ^[23]。图4(a)显示了北京谱仪Ⅲ测量的 $Z_c(3900)$ 质量谱。要解释 $Z_c(3900)$ 带电的特征,在含有正反粲夸克的基础上,至少需要引入一对额外正反夸克。如此一来, $Z_c(3900)$ 就是一个含有4个夸克的奇特态粒子。图4(b)是美国*Physics*杂志设计的 $Z_c(3900)$ 内部结构示意图。 $Z_c(3900)$ 的发现随后得到了日本Belle实验^[27]、美国CLEO-c实验^[28]以及美国D0实验^[29]的证实,因此它的存在是确定无疑的。美国*Physics*杂志和英国*Nature*杂志评价“ $Z_c(3900)$ 是第一个确认的四夸克粒子”^[30, 31]。继 $Z_c(3900)$ 发现之后,北京谱仪Ⅲ实验又陆续发现了 $Z_c(4020)$ ^[32]和 $Z_{cs}(3985)$ ^[33]等更多的四夸克粒子。

3.3 矢量类粲偶素粒子

正负电子对撞通过湮灭成虚光子进而产生粲偶素粒子。在这个过程中,末态粲偶素粒子和光子具有相同的对称性质,即它们的自旋和宇称量子数都是 1^{--} ,被称为矢量粒子。第一个矢量类粲偶素粒子 $Y(4260)$ 由美国BaBar实验发现。它的质量约为4.26 GeV,在粲偶素谱上很难找到对应的谱线,且在含有正反粲夸克对的所谓隐粲末态中被发现。这些性质和势模型的理论预期有很大的矛盾。之前格点QCD理论计算出含粲夸克对的混杂态粒子质量约为4.28 GeV^[34],因此 $Y(4260)$ 粒子一度被认为是一个混杂态。

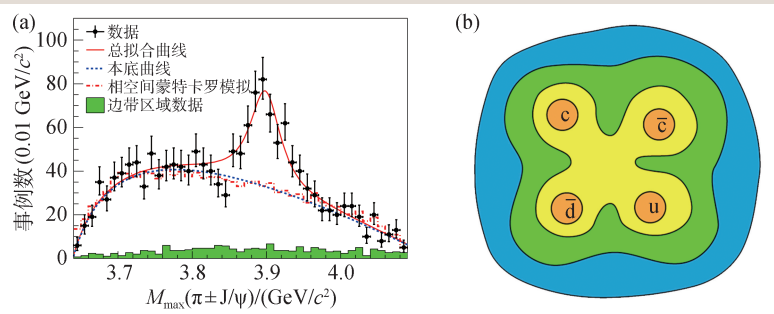


图4 (a)北京谱仪Ⅲ测量的 $Z_c(3900)$ 粒子质量谱;(b)美国*Physics*杂志设计的 $Z_c(3900)$ 内部结构示意图

北京谱仪Ⅲ实验是一台对称的正负电子对撞实验,能够在陶一粲能区进行高精度的扫描。2017年,北京谱仪Ⅲ通过精确测量,发现了Y(4260)粒子存在精细结构^[35],测量的质量比BaBar实验低很多,改变了人们对该粒子的认识。图5显示了北京谱仪Ⅲ和BaBar实验测量的Y(4260)粒子线型

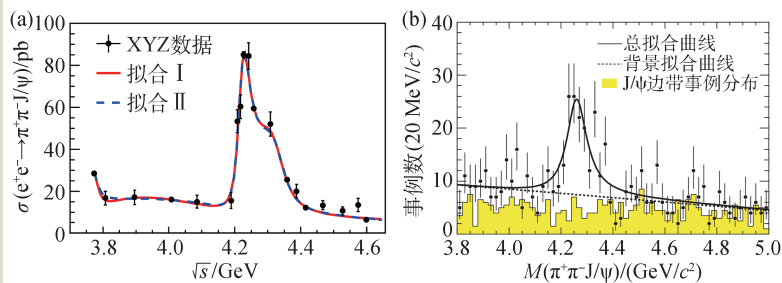


图5 北京谱仪Ⅲ(a)和BaBar(b)测量的Y(4260)粒子线型

子线型,可以看到北京谱仪Ⅲ的结果显示出双结构的复合线型。后来通过一系列高精度的测量,还发现了Y(4260)粒子的显粲衰变过程。这些对Y(4260)粒子本质的理解产生了重要影响。

除Y(4260)以外,北京谱仪Ⅲ利用自身的独特优势,发现了多个新的矢量类粲偶素粒子,包括Y(4390)^[36]、Y(4500)^[37]、Y(4710)^[38]、Y(4790)^[39]等,其本质尚待研究。所有这些新发现的类粲偶素粒子,加上已知的粲偶素粒子,个数已经大大超过了势模型理论的预期,这意味着这些粒子中必定存在奇特态。

3.4 中性X(3872)粒子

X(3872)粒子是第一个被发现的类粲偶素粒子,它于2003年被日本Belle实验在B介子衰变过程中观测到。而后,世界上多个合作组纷纷对它开展研究。X(3872)粒子的自旋宇称量子数和势模型预言的粲偶素粒子 $\chi_{c1}(2P)$ 一致。然而实验上测量的质量却比理论预期低得多,且X(3872)是个非常窄的粒子,这些都和理论预期有巨大差别。另一方面,X(3872)粒子的衰变性质也很古怪,存在非常大的同位旋破坏效应,这在通常的粲偶素粒子中非常罕见(概率约为千分之一)。由于X(3872)粒子这一系列不同寻常的行为,人们认为它不是普通的粲偶素粒子,而是一个奇特态。

考虑到X(3872)粒子的质量非常靠近一对中性DD*介子的质量阈值,人们推测X(3872)可能是一个由DD*介子通过残余的核力松散束缚的粒子,称为分子态^[40]。这一解释得到了比较多的实验证据支持,例如X(3872)有非常大的DD*衰变概率

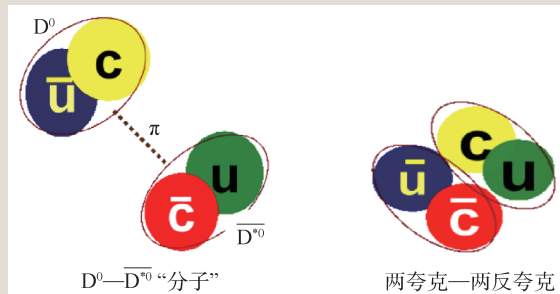


图6 X(3872)粒子可能的内部结构:(a)分子态;(b)四夸克态

(约50%)等^[41]。然而也和实验观测存在一些矛盾,例如在高能量强子对撞中的高产额问题^[42]。目前,人们似乎更倾向于将X(3872)解释成分子态与粲偶素的混合^[43]。另外,也有理论将X(3872)解释成一个四夸克态的粒子^[44]。图6显示了X(3872)粒子的两种结构示意图。

北京谱仪Ⅲ实验在X(3872)的研究方面起步较晚。2014年,首次通过辐射跃迁过程观测到X(3872)粒子信号^[45]。虽然北京谱仪Ⅲ产生X(3872)的截面较低,统计量和其他实验相比没有优势,但是可以进行非常有特色的研究。北京谱仪Ⅲ测量了X(3872)的辐射跃迁产生截面,结果强烈地支持X(3872)粒子信号来自Y(4260)粒子的衰变^[46]。这一新的实验观测首次把两个不同的类粲偶素粒子联系起来,揭示了它们的本质存在共同点^[47],为理解类粲偶素粒子提供了崭新的思路。

4 结语

毫不夸张地说,作为基态矢量粲偶素,J/ψ粒子的发现为后继粲偶素及类粲偶素的研究打开了

大门、铺平了道路,而 BES, BES II, BES III 合作组将粲偶素能区的实验在广度与深度上都极大向前推进。如前文所述, BES 实验研究粲偶素与类粲偶素的性质,其研究内容包括但不局限于:寻找新的粒子态、确定粒子的内部结构、测量它们的质量与宽度、测量它们的跃迁与衰变、寻找新的衰变过程,并取得了一批重要的物理成果。这

些实验结果丰富了我们在此能区的知识,有助于更加深入地理解强相互作用与宇宙中的物质构成。最近 BES III 实验获取了 27 亿的 $\psi(2S)$ 的峰上数据,远远超过世界上其他实验室。并且,在即将完成的 BEPC II 升级之后, BES III 计划在 4 GeV 以上获取更多的扫描数据。在不远的将来, BES III 必将产出一批新的重要物理成果。

参考文献

- [1] Aubert J J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 33: 1404
- [2] Augustin J E *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 33: 1406
- [3] <https://mediatheque.lindau-nobel.org/laureates/ting/research-profile>
- [4] Abrams G S *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 33: 1453
- [5] De Rujula A, Glashow S L. Phys. Rev. Lett., 1975, 34: 46
- [6] Callan C G, Kingsley R L, Treiman S B *et al.* Phys. Rev. Lett., 1975, 34: 52
- [7] Appelquist T, De Rujula A, Politzer H D *et al.* Phys. Rev. Lett., 1975, 34: 365
- [8] Eichten E, Gottfried K, Kinoshita T *et al.* Phys. Rev. Lett., 1975, 34: 369
- [9] Navas S *et al.* Phys. Rev. D, 2024, 110: 030001
- [10] Himel T *et al.* Phys. Rev. Lett., 1980, 45: 1146
- [11] Beringer J *et al.* Phys. Rev. D, 2012, 86: 010001
- [12] Mitchell R E *et al.* Phys. Rev. Lett., 2009, 102: 011801; Phys. Rev. Lett., 2011, 106: 159903
- [13] Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 222002
- [14] Bhardwaj V *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 111: 032001
- [15] Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 115: 011803
- [16] Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2022, 129: 102003
- [17] Czyż H, Kühn J H, Tracz S. Phys. Rev. D, 2016, 94: 034033
- [18] Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2022, 129: 122001
- [19] Choi S K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 91: 262001
- [20] Aubert B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95: 142001
- [21] Eichten E *et al.* Phys. Rev. D, 1978, 17: 3090; 1980, 21: 203; Godfrey S, Isgur N. Phys. Rev. D, 1985, 32: 189
- [22] Gell-Mann M. Phys. Lett., 1964, 8: 214; Zweig G. CERN Report 8182/TH.401.1964, p1
- [23] Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 252001
- [24] Choi S K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 142001
- [25] Aubert B *et al.* Phys. Rev. D, 2009, 79: 112001
- [26] Aaij R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 112: 222002
- [27] Liu Z Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 252002
- [28] Xiao T *et al.* Phys. Lett. B, 2013, 727: 366
- [29] Abazov V M *et al.* Phys. Rev. D, 2019, 100: 012005
- [30] Swanson E. Physics, 2013, 6: 69
- [31] Powell D. Nature, 2013, 498: 280
- [32] Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 111: 242001; 2014, 112: 132001
- [33] Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 126: 102001
- [34] Liu L *et al.* J. High Energy Phys., 2012, 07: 126
- [35] Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 118: 092001
- [36] Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 118: 092002
- [37] Ablikim M *et al.* Chin. Phys. C, 2022, 46: 111002
- [38] Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2023, 131: 211902
- [39] Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2023, 131: 151903
- [40] Guo F K *et al.* Rev. Mod. Phys., 2018, 90: 015004
- [41] Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2020, 124: 242001
- [42] Bignamini C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2009, 103: 162001
- [43] Takizawa M, Takeuchi S. PTEP 2013: 093D01
- [44] Maiani L *et al.* Phys. Rev. D, 2005, 71: 014028
- [45] Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 112: 092001
- [46] Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 122: 232002
- [47] Olsen S L. Rev. Mod. Phys., 2018, 90: 015003

读者和编者

《物理》有奖征集封面素材

为充分体现物理科学的独特之美,本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。要求图片清晰,色泽饱满,富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用,均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至: physics@iphy.ac.cn; 联系电话: 010-82649029。

《物理》编辑部