

# 发现“四夸克物质” $Z_c(3900)$

郭玉萍

(复旦大学 200433)

## 一、强子？奇特强子？

在这缤纷多彩的世界中，物质以各种状态和形态呈现。描述物质基本结构和基本相互作用的理论称为标准模型。标准模型中，物质是由六种夸克和六种轻子通过四种相互作用构成的，这是我们当前对物质结构的基本认知。

六种夸克分别叫作上(up)、下(down)、奇异(strange)、粲(charm)、底(bottom)、顶(top)夸克；六种轻子分别为电子( $e$ )和电子中微子( $\nu_e$ )、缪轻子( $\mu$ )和缪子中微子( $\nu_\mu$ )、陶轻子( $\tau$ )和陶子中微子( $\nu_\tau$ )。四种基本相互作用包括引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用，其中前两者是宏观的力，是我们日常生活中的一部分，后两者只在很小的尺度内起作用，在日常生活中感受不到，例如强力只在 $10^{-15}$ 米尺度内有显著作用。

夸克总是以“团体”出现，它们被强力束缚在一起形成强子，分为由一对正反夸克组成的介子和由三个夸克组成的重子，这一简单的图像叫作夸克模型。例如，最轻的强子 $\pi$ 由 $u$ 和 $\bar{d}$ 夸克组成，组成原子核的质子由 $uud$ 组成，而 $J/\psi$ 和 $h_c$ 等被称作粲偶素的粒子由一对正反粲夸克组成。粒子物理理论允许内部结构更加复杂的强子存在，如内部含有四个或更多夸克的多夸克态、由两个或多个介子或重子束缚在一起的强子分子态、由夸克和处于激发态的胶子(胶子是传递强力的媒介粒子)组成的混杂态、只含有胶子的胶球等，这些粒子通常被称为奇特强子(图1)。

发现奇特强子一直是粒子物理研究的目标，虽然经过多年的不懈探索，这一目标仍未达成。在粒子物理的发展进程中，也曾经出现过被认为是“奇特强子”但随后又被证实并不存在的粒子，如著名

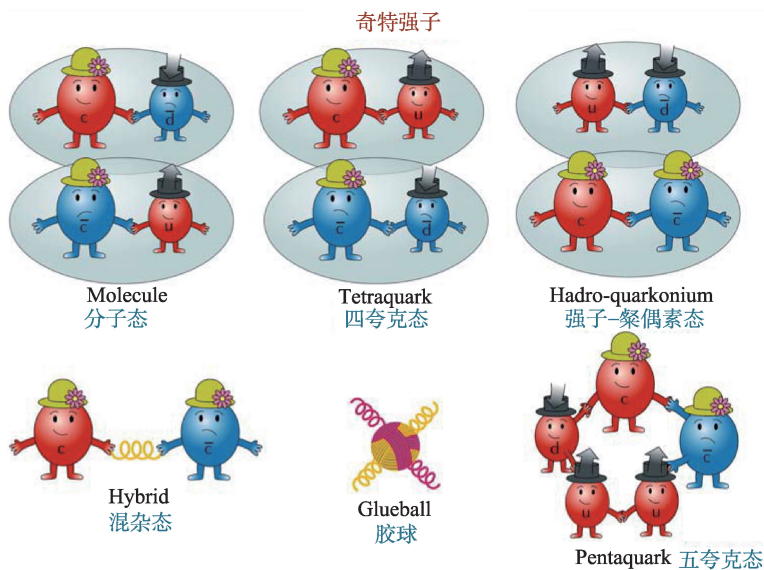


图1 奇特强子示意图<sup>[1]</sup>

的疑似五夸克态  $\Theta(1540)^{[2]}$ 。故事在 2003 年出现转折,2003 年 12 月,位于日本的 Belle 实验发现了一个非常窄的结构,命名为  $X(3872)^{[3]}$ 。由于它性质奇特,很难解释为通常的粲偶素介子,很快被认为是奇特强子候选者,这也激发了人们在其他末态含有重夸克偶素(如由一对正反粲夸克组成的粲偶素和由一对正反底夸克组成的底偶素)的系统中寻找奇特强子的兴趣。2005 年,位于美国的 BaBar 实验发现了一个新的结构  $Y(4260)^{[4]}$ ,因为其衰变性质的奇特行为, $Y(4260)$ 也被认为是奇特强子候选者。这些在粲偶素能区发现的奇特强子被称作类粲偶素或者 XYZ 粒子,括号中的四位数字通常表示粒子发现时的质量,以 MeV 为单位。虽然人们认为  $X(3872)$  和  $Y(4260)$  是奇特强子候选者,但是并没有确切的证据证实它们就是奇特强子,这主要是因为它们都是电中性的,无法完全排除它们是粲偶素的可能性。因此,如果能在实验上找到携带电荷的类粲偶素,它们应当是确定的奇特强子。

## 二、BESIII 实验上的类粲偶素研究——发现“四夸克物质”之前

北京正负电子对撞机(BEPCII)上的北京谱仪 III(BESIII)实验自 2008 年开始运行并采集数据,在粲偶素和类粲偶素研究方面具有独一无二的优势。BESIII 实验可以直接在粲偶素能区采集正负电子对撞数据,实验背景干净并且探测效率高。

2010 年夏季,BESIII 国际合作组年会在沈阳召开,BESIII 实验的粲偶素研究团队提出在  $\psi(4040)$  (矢量粲偶素, $J/\psi$ 粒子的径向激发态)附近采集数据,用来寻找尚未发现的激发态粲偶素和研究已经发现的  $X(3872)$  等类粲偶素。这个数据采集计划在同年 10 月获得批准,计划使用一到两个月的时间在  $\psi(4040)$  附近采集积分亮度(亮度是指单位时间内探测到的事件数与相互作用截面的比值,积分亮度为亮度在时间维度上的积分。实验数据的积分亮度越高,事件数也就越多。)为  $300 \text{ pb}^{-1}$  的数据<sup>[5]</sup>。计

划获得批准之后,粲偶素物理组组织成立了专门的类粲偶素工作小组,组会每两周召开一次,为数据采集作准备并开展物理分析预研究。2011 年 5 月 3 日到 6 月 1 日间,BESIII 实验在质心能量为 4007.6 MeV 处采集了积分亮度为  $482 \text{ pb}^{-1}$  的数据。得益于加速器和探测器优异的工作状态,在预期的一半时间内就采集到了期望数据量的 1.6 倍。

使用这批数据,类粲偶素工作小组的成员对粲偶素之间、粲偶素和类粲偶素之间的跃迁过程,粲介子对产生过程, $D_s$  介子(由粲夸克和奇异夸克组成的介子)衰变过程等进行了研究。观测到了  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$  过程和  $e^+e^- \rightarrow \eta J/\psi$  过程<sup>[6]</sup>,但是没有发现显著的  $e^+e^- \rightarrow \gamma X(3872)$  信号。

## 三、发现“四夸克物质” $Z_c(3900)$

$\psi(4040)$  数据的成功采集增强了 BESIII 合作组在更高能量点采集数据的信心。新的数据采集计划于 2011 年 11 月提出,初始的计划是在质心能量 4210 到 4460 MeV 之间 6 个能量点采集积分亮度共计  $600 \text{ pb}^{-1}$  的数据。经过更仔细的灵敏度分析和深入讨论,在 2012 年 3 月的合作组会上,取数计划修改为在 4260 和 4360 MeV 两个能量点采集积分亮度共计  $500 \text{ pb}^{-1}$  的数据。2012 年 6 月取数计划被批准,决定在 4260 和 4360 MeV 两个能量各采集  $500 \text{ pb}^{-1}$  的数据。2012 年 12 月 14 日,BESIII 合作组首次在 4260 MeV 采集数据,在 30 天内就完成了预期需要 50 天的数据采集任务,随后 BESIII 实验组在 29 天内完成了 4360 MeV 处  $500 \text{ pb}^{-1}$  的数据采集。数据采集期间,加速器和探测器都处于非常稳定的工作状态,既定的任务得以提前完成。利用剩余的时间,BESIII 实验组在 4190 到 4420 MeV 之间 5 个能量点各采集了约  $50 \text{ pb}^{-1}$  数据,用于研究这个能量区间矢量共振态的线型。这都是 BEPCII 加速器首次达到的最高能量。

数据采集过程中,工作小组成员就开始对数据质量进行检查并使用新数据对各种物理过程进行

分析,2012年12月26日的类粲偶素小组组会上,成员就报告观测到了 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ 和 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-h_c$ 过程( $J/\psi$ 和 $h_c$ 都是粲偶素)。新的发现极大地激发了大家的工作热情,小组成员都充满激情,组会讨论常常会持续三到四个小时,数据刻度、重建和检查工作同时也在紧张高效地进行。

在2013年2月的合作组会上,类粲偶素小组成员报告在 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ 和 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-h_c$ 过程中分别发现了新粒子。新粒子均携带电荷,分别衰变到 $\pi^+J/\psi$ 和 $\pi^+h_c$ 末态,因此至少含有四个夸克,这一发现使得整个合作组都处于非常兴奋的状态,各种交叉检查确认很快就被组织起来。在 $\pi^+J/\psi$ 末态发现的新粒子质量位于3900 MeV附近(如图2(a)所示),被命名为 $Z_c(3900)$ 。整个合作组通力合作,仅仅两个月的时间,就完成了 $Z_c(3900)$ 分析备忘录的准备和审查、论文的撰写和修改工作,文章于2013年3月24日投稿至预印本库arXiv和《物理评论快报》<sup>[7]</sup>。

2013年3月30日,在BESIII提交论文不到一个星期,日本的Belle实验组也向arXiv和《物理评论快报》提交了发现 $Z_c(3900)$ 的工作<sup>[8]</sup>,使用的物理过程正是发现 $Y(4260)$ 的初态辐射过程。 $Z_c(3900)$ 是第一个在实验上确认的含有至少四个夸克的,很快也在美国CLEO-c实验4170 MeV处采集的数据中得到证实<sup>[9]</sup>。

2013年6月17日,BESIII实验组的结果和Belle实验组的成果在同一期《物理评论快报》上发表。《物理评论快报》编辑对论文进行了推荐并邀请

著名强子物理学家Eric Swanson作了题为“New Particle hints at four-quark matter(新粒子暗示存在四夸克物质)”的热点评论。评论中指出“此类束缚态此前从未被发现过;如果它的四夸克解释得到确认,粒子家族中就需要加入新成员,我们对夸克物质分类的理解也将进入新的领域。”。次日,《自然》杂志发表了题为“Quark quartet opens fresh vista on matter(夸克“四重奏”打开了物质世界的新大门)”的报道。 $Z_c(3900)$ 的发现在粒子物理学领域掀起了新的热潮,引发了持续热烈的讨论,截至此文撰写之际,依据INSPIRE检索,文章已经被引用超过一千次,是BES、BESII和BESIII实验30多年来引用次数最多的文章。

2013年12月,在 $\pi^+h_c$ 末态发现的另一个带电类粲偶素 $Z_c(4020)$ 的结果也在《物理评论快报》正式发表并被杂志编辑推荐<sup>[10]</sup>(图2右图)。同年,发现 $Z_c(3900)$ 和 $Z_c(4020)$ 粲介子对末态衰变的论文也被提交到arXiv<sup>[11,12]</sup>。2013年12月30日,美国物理学会主编的《物理》杂志公布了当年物理学领域的十一项亮点成果,位于首位的就是“发现四夸克物质”。入选的理由是:“目前的实验结果表明强子是由两个或三个夸克组成的,今年夏天,位于中国的BESIII实验和位于日本的Belle实验分别报告,声明在正负电子对撞过程中发现了一个神秘的含有四个夸克的粒子,命名为 $Z_c(3900)$ 。虽然 $Z_c(3900)$ 的性质可能存在其他解释,但“四夸克态”的解释获得了更多关注;BESIII实验随后又发现了一系列含有

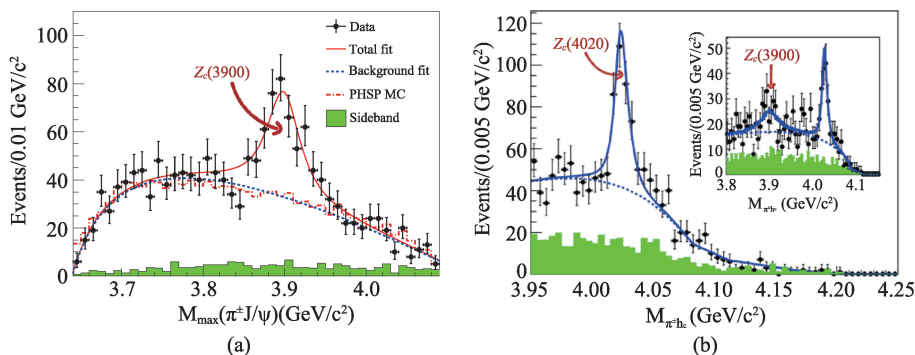


图2 BESIII实验发现的“四夸克物质” $Z_c(3900)$ 和 $Z_c(4020)$ 。图中带误差棒的点为实验数据,实线表示拟合结果,虚线代表本底过程的贡献,绿色直方图为使用数据估计的末态粒子中没有 $J/\psi(h_c)$ 的本底贡献



四个夸克的粒子。”

#### 四、现状和展望

至今,在实验上已经发现了超过十个  $Z_c$  粒子,中国的 BESIII 实验、日本的 Belle 实验和位于欧洲核子中心的 LHCb 实验是这些粒子的主要发现地。结合  $X$  和  $Y$  粒子、 $P_c$  粒子(含有五个夸克的物质)的发现,似乎我们正在经历类似 20 世纪五六十年代井喷式发现众多强子的历程。虽然目前人们对这些新粒子的属性尚无明确的结论,但是这些发现使得粲偶素研究成为粒子物理最活跃的领域之一。

BEPCII 加速器将于 2024 年夏天进行升级,升级之后的最大质心能量将达到 5.6 GeV,同时在 4.7 GeV 处的亮度预计将提高到现在的 3 倍,达到  $1.1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,使 BESIII 实验在类粲偶素研究上的潜力大大提高。相信也期待通过不懈的探索,BESIII 实验能再次做出世界级的发现。升级后的 Belle 实验——Belle II 实验已经正式运行,目前正在低偶素能区采集了约  $400 \text{ fb}^{-1}$  正负电子对撞数据,是 Belle 实验数据量一半,预期将采集 Belle 实验数据量的 50 倍。LHCb 实验已经采集了  $9 \text{ fb}^{-1}$  质子-质子对撞数据,在经过了升级之后正在采集新的数据,预期在 2024 和 2025 年将采集约  $15 \text{ fb}^{-1}$  数据。中国正在筹划的超级陶粲装置(STCF)是新一代的正负电子对撞机,其对撞能量为 2-7 GeV,亮度是 BESIII 实验的 50 倍,将为研究奇特强子提供海量数据。更大的数据样本必然将为类粲偶素研究带来新的实验发现或者更加精确的测量结果,为理解物质结构和强相互作用规律带来新的机遇。

#### 参考文献

- [1] C. Z. Yuan and S. L. Olsen, The BESIII Physics Programme, *Nature Rev. Phys.* 1 (2019) 8, 480-494.
- [2] R. L. Workman et al. [Particle Data Group], Review of Particle Physics, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022 (2022) 083C01.
- [3] S.-K. Choi et al. [Belle Collaboration], Observation of a Narrow Charmoniumlike State in Exclusive  $B^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- J/\psi$  Decays, *Phys. Rev. Lett.* 91 (2003) 262001.
- [4] B. Aubert et al. [BABAR Collaboration], Observation of a Broad Structure in the  $\pi^+ \pi^- J/\psi$  Mass Spectrum around  $4.26 \text{ GeV}/c^2$ , *Phys. Rev. Lett.* 95 (2005) 142001.
- [5] Minghan Ye and Changzheng Yuan, 30 Years of BES Physics, World Scientific Publishing, 2020. <https://doi.org/10.1142/11757>.
- [6] M. Ablikim et al. [BESIII Collaboration], Observation of  $e^+ e^- \rightarrow \eta J/\psi$  at Center-of-mass Energy  $\sqrt{s} = 4.009 \text{ GeV}$ , *Phys. Rev. D* 86 (2012) 071101(R).
- [7] M. Ablikim et al. [BESIII Collaboration], Observation of a Charged Charmoniumlike Structure in  $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$  at  $\sqrt{s} = 4.26 \text{ GeV}$ , *Phys. Rev. Lett.* 110 (2013) 252001.
- [8] Z. Q. Liu et al. [Belle Collaboration], Study of  $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$  and Observation of a Charged Charmoniumlike State at Belle, *Phys. Rev. Lett.* 110 (2013) 252002.
- [9] T. Xiao, S. Dobbs, A. Tomaradze, and Kamal K. Seth, Observation of the Charged Hadron  $Z_c^+(3900)$  and Evidence for the Neutral  $Z_c^0(3900)$  in  $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$  at  $\sqrt{s} = 4170 \text{ MeV}$ , *Phys. Lett. B* 727 (2013) 366.
- [10] M. Ablikim et al. [BESIII Collaboration], Observation of a Charged Charmoniumlike Structure  $Z_c(4020)$  and Search for the  $Z_c(3900)$  in  $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- h_c$ , *Phys. Rev. Lett.* 111 (2013) 242001.
- [11] M. Ablikim et al. [BESIII Collaboration], Observation of Charged  $(D\bar{D}^*)^{\pm}$  Mass Peak in  $e^+ e^- \rightarrow \pi D\bar{D}^*$  at  $\sqrt{s} = 4.26 \text{ GeV}$ , *Phys. Rev. Lett.* 112 (2014) 022001.
- [12] M. Ablikim et al. [BESIII Collaboration], Observation of a Charged Charmoniumlike Structure in  $e^+ e^- \rightarrow (D^+ \bar{D}^*)^{\pm} \pi^{\mp}$  at  $\sqrt{s} = 4.26 \text{ GeV}$ , *Phys. Rev. Lett.* 112 (2014) 132001.