

# BES III 实验发现奇特 强子态 $Z_c(3900)$

刘智青 苑长征

2013年3月26日，北京谱仪III（BES III）实验国际合作组宣布，在最近采集的一批实验数据中，发现了一个新的共振态结构，暂时命名为  $Z_c(3900)$ 。该消息立刻被新华社、《光明日报》、《科技日报》等多家媒体转载发布，美国费米实验室《对称》杂志（*symmetry*）也于当日以《BES III 合作组捕获新粒子》为标题报道了这个发现。究竟是什么原因使得该发现如此吸引人们的注意呢？这还得从奇特强子态的由来说起。

## 夸克模型

随着科学技术的进步和发展，现在人们已经知道，自然界的物质是由微观原子构成的。1897年，英国科学家汤姆孙第一次从阴极射线管实验中证明了电子的存在，敲开了人们研究微观世界的大门。1911年，卢瑟福的  $\alpha$  粒子散射实验，成功地证明了原子的核式结构模型，即原子是由位于中心的原子核与核外电子构成的。原子核的尺寸非常小，大约为费米量级（ $10^{-15}$  m）。原子核既然这么小，那它是不是就是自然界最基本的物质组成单元呢？

对于这个问题，科学家们进行了长期的努力和探索。答案是否定的，原子核有内部结构！原子核由带正电的质子和不带电的中子构成。自然界最简单的原子——氢原子，其原子核就是一个质子，而它的同位素氘核中则有一个质子和一个中子。那么质子和中子是不是就是自然界最基本的物质组成单元呢？答案还是否定的！质子和中子也有内部结构，它们由一种叫作夸克（quark）的粒子构成。夸克模型指出，夸克带有分数电荷，总共有6种（粒子物理学上称之为6种“味道”），分别是上夸克（u）、下夸克（d）、粲夸克（c）、奇异夸克（s）、顶夸克（t）和底夸克（b）。

另外，每一种味道的夸克还存在一个相应的反夸克。除了带有相反的电荷以外，反夸克的其他性质和夸克一模一样。质子和中子都是由3个夸克构成的，分别是  $uud$  和  $udd$ 。由3个夸克构成的粒子称为重子。夸克除了能够组成重子外，还可以组成介子，例如在宇宙线实验中观测到的  $\pi$  介子、K 介子等。介子由一对味道相同或不同的正反夸克构成。由于夸克组成重子和介子时需要由强作用力束缚在一起，因此重子和介子统称为强子。

既然强子是由夸克组成的，那么人们自然要问：“有没有4个夸克、5个夸克或者更多夸克构成的强子呢？”这些粒子就是下面将要讨论的奇特态强子（也称奇特强子态）。

## 奇特态强子和量子色动力学

20世纪粒子物理学的研究就是从强子开始的。人们首先在原子核中发现了质子和中子，在宇宙线中又发现了  $\pi$  介子、K 介子、 $\Lambda$  重子等，在高能加速器实验中发现了  $\pi^\pm$ 、 $\pi^0$ 、 $\rho^\pm$ 、 $\rho^0$ 、 $\omega$ 、 $\phi$  介子等众多强子。将现在人们发现的强子全部列出来，其总数有数百种之多，形成了一个相当庞大的粒子家族。如果数百种强子之间没有任何规律可循的话，那么想要研究清楚它们是一件非常费力的事情。物理学正是一门研究自然界规律的科学，因此，早在20世纪，物理学家们就开始了强子谱规律的寻找。20世纪60年代，美国物理学家盖尔曼利用群论的数学语言，成功地将人们在实验上观测到的所有强子进行了分类，提出了夸克模型。按照夸克模型分类方法，强子之间都存在某种特殊的对称性，在数学上用  $SU(3)$  对称群来描述。重子可以和  $SU(3)$  对称群中3个张量的直乘（群论中的一种乘法规则）对应起来，因此重子是由3个

夸克构成的；介子也可以和 SU(3) 对称群中两个共轭张量的直乘对应起来，因而介子是由正反夸克对构成的。按照这个分类规则，当时实验上看到的所有强子几乎都可以各得其所。除此以外，盖尔曼还按照这个规则预测了含有 3 个奇异夸克的  $\Omega$  重子的存在。1964 年，美国布鲁克海文 (BNL) 实验室发现了该重子，并且性质和盖尔曼的预言一致。至此，强子的分类取得了巨大的成功，也使得人们相信重子确实是由 3 个夸克构成的，介子是由正反夸克对构成的。

夸克模型虽然成功，但却没有提供夸克间相互作用的动力学机制。我们现在知道，强子是由夸克通过强作用束缚在一起的体系。目前描述强作用最好的理论是量子色动力学 (QCD)。从 QCD 的第一原理出发，对构成强子的基本组成并没有太多的限制，除了夸克模型中提到的介子和重子，还可以有很多种不同形式的强子组态的存在。例如，由 4 个夸克组成的四夸克态、由 5 个夸克甚至多个夸克构成的多夸克态，由纯粹的胶子（传播强作用的粒子）构成的胶子球，由若干个夸克和胶子形成的夸克胶子混杂态，以及由若干个普通强子形成的强子分子态，等等。所有这些都与普通重子和介子不同的强子组态统称为奇特态强子。

然而 QCD 理论至今却不能确切地计算出这些可能的奇特态强子是否真的存在，如果存在，它们的质量、寿命以及其他的量子数是什么。原因在于，QCD 理论在强子谱为主的能量区域计算非常繁杂，目前还没有可靠的方法能够精确计算普通的介子和重子，更不要说含有更多个组分的奇特态强子了。虽然现在也有一些理论方面的努力，但在这些计算中需要作大量的简化和近似，这无疑大大降低了这些模型预言的可靠性。

然而通过发展模型，理论家还是对奇特强子态的性质进行了多个方面的探索，提出了在各种可能的过程中产生的奇特态粒子。基于这些模型，实验上也进行了各种各样的寻找，并发现了一些可能的迹象。然而很多结果最后都被证明并不可靠，还有一些则只在一个实验中被发现，不能或没有被其他实验证实。著名粒子物理学家、奇特态粒子研究倡导人之一杰斐 (Jaffe) 曾经无奈地评论道：“不存在奇特态粒子是

QCD 最重要的特征之一”；而由于发展 QCD 而获诺贝尔奖的维尔切克 (Wilczek) 在得知曾经轰动粒子物理界的五夸克态候选者  $\Theta(1540)$  只不过是统计涨落时说：“这个五夸克态事件表明我们对 QCD 的理解多么肤浅！”。

### 实验上寻找奇特态强子

要从实验上寻找奇特态强子存在的证据，首先需要找到判别奇特态强子的特征信号。否则，即便在实验上找到了新的强子信号，也难以判断该信号是奇特态强子，还是常规的重子或者介子。这也正是寻找奇特态强子最困难的地方。

人们对于不含夸克的奇特态——胶子球的寻找可谓历史悠久。实验上也存在若干个候选者，然而由于普通介子可能与胶子球具有同样的性质并且二者之间可能存在很强的混合，人们一直无法确定胶子球是否已经出现。这是困扰了强子谱理论和实验学家们几十年的问题。

B 介子工厂实验，包括位于斯坦福直线加速中心的 BABAR 实验和位于日本筑波高能加速器研究机构的 Belle 实验，凭借其加速器高亮度的特点，在 21 世纪初对 3 ~ 5 GeV 之间可能存在的奇特态强子进行了大量的研究工作，发现了一系列新的共振结构，并且有一些性质奇特。如在 B 介子衰变过程中发现的 X(3872) 粒子、在初态辐射过程中发现的 Y(4260) 粒子等。X(3872) 宽度非常窄（小于 1 MeV），质量非常接近  $\bar{D}^0 D^{*0}$  阈值，并且在 B 介子衰变和强子对撞中大量产生；Y(4260) 质量位于粲介子对阈值以上，却和粲偶素耦合很强。这些新发现的粒子是不是奇特态强子，目前还难以下结论，原因就是它们没有区分于普通强子的特征信号。例如，X(3872) 很像强子分子态，但很难和普通的 P-波激发态粲偶素区分，Y(4260) 很可能是夸克胶子混杂态，也可能是多夸克态或者强子分子态，但难以和普通矢量态粲偶素区分。目前人们对这些新发现的粒子的性质有很多猜测，但都没有确凿的证据能表明它们就是奇特态强子，而不是常规的介子。

一种可能的区分常规介子与奇特态粒子的方法是寻找带有特殊量子数的粒子，如自旋为 1，宇称为负

而电荷共轭宇称为正的粒子。因为两个夸克不可能组合出上述量子数，这种结构一旦确认，必然是奇特态强子。不幸的是这种量子数的粒子被淹没在大量具有通常量子数的介子的海洋中，实验分析具有巨大的挑战性。目前的实验尚未给出令人信服的结论。

另一种方法是寻找最小可能的夸克组合为4个的粒子，这在寻找含有c或b等重夸克的粒子中尤其有效：如果有一个带电粒子的强衰变中含有粲偶素（如 $J/\psi$ ），我们可以断定其中必然含有一对粲夸克和反粲夸克；但由于其带电荷，所以至少还有一对夸克、反夸克提供电荷。这样的粒子应当至少含有4个夸克。虽然我们不能确定这样的粒子是四夸克态还是强子分子态，但至少应当是一个奇特态。BES III实验就是通过这种方法发现了 $Z_c(3900)$ 。

图1简单地示意了介子、重子和含有4个夸克的奇特态强子的夸克组分。

#### BES III实验发现 $Z_c(3900)$

BES III实验位于北京正负电子对撞机（BEPC）

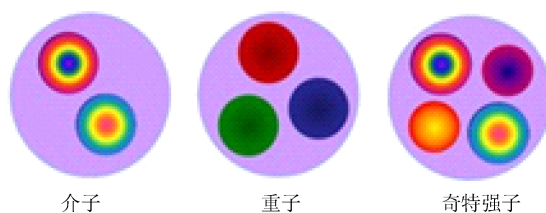


图1 介子、重子和奇特态强子的夸克组分示意图

国家实验室。图2显示了北京正负电子对撞机的鸟瞰图。BES III实际上是探测器的名字，坐落在对撞机南端的谱仪大厅，负责记录对撞机加速的正负电子束团对撞后的反应产物。北京正负电子对撞机自2004年开始改造升级，到2008年正式完成投入运行。和以前相比，第二代北京正负电子对撞机（BEPC II）性能有了很大的提升。目前，加速器能够在 $2 \sim 4.6$  GeV稳定运行，其最高对撞亮度已经达到了 $7 \times 10^{32}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。

发现 $Z_c(3900)$ 的这次对撞实验，北京正负电子对撞机运行的正负电子质心系能量为4.26 GeV。该能量点恰好就在著名的 $Y(4260)$ 粒子产生截面的峰值区域。



图2 北京正负电子对撞机鸟瞰图

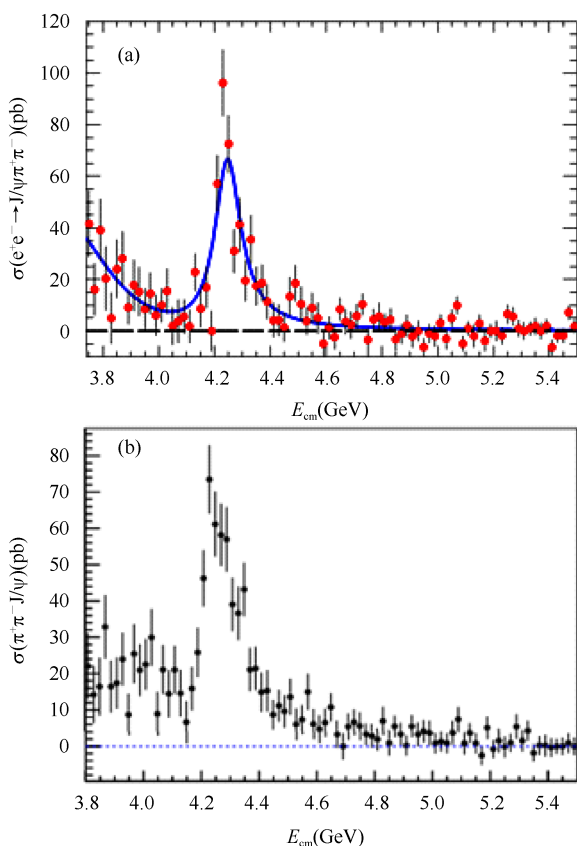


图3 B 介子工厂实验测量 Y(4260) 截面的结果，

(a) 为 BABAR 实验结果，(b) 为 Belle 实验结果

国际上对 Y(4260) 粒子已经有了大量的研究。图 3 显示了 B 介子工厂 BABAR (上) 和 Belle 实验 (下) 对  $Y(4260) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$  过程产生截面的测量结果。

从 2012 年 12 月 14 日至 2013 年 1 月 14 日，BES III 实验在该能量点用了一个月的时间采集数据，数据样本的积分亮度达到了  $525 \text{ pb}^{-1}$ ，是此前美国 CLEO-c 实验数据量的 40 倍。数据采集过程中，BES III 各个子部分工作状态都正常稳定，噪声和本底水平很低。对数据中多个特征信号的检查表明 BES III 探测器采集的数据质量很高。

所有这些研究都保证了 BES III 实验的测量是正确可靠的。因此可以利用 BES III 采集的数据样本进行新的研究工作。BES III 研究了正负电子在该能量点对撞产生的  $\pi^+ \pi^- J/\psi$  事例，其中  $J/\psi$  粒子很快衰变成  $\mu^+ \mu^-$  或  $e^+ e^-$ 。图 4 显示了这些  $\pi^+ \pi^- J/\psi$  事例在 BES III 探测器内被捕捉到的情形。左图显示的是  $\pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$  事例，右图显示的是  $\pi^+ \pi^- e^+ e^-$  事例。

BES III 实验对  $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$  的截面测量结果

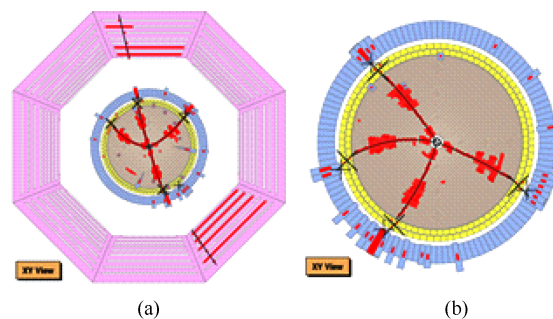


图 4 BES III 探测到的  $\pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$  (a) 和  $\pi^+ \pi^- e^+ e^-$  (b) 事例

为  $(62.9 \pm 1.9 \pm 3.7) \text{ pb}$ ，和其他国际实验组测量的结果吻合得非常好，并且测量的精度更高。这同时也证明了 BES III 实验测量是正确可靠的。

对这些选择出来的  $\pi^+ \pi^- J/\psi$  事例进行分析，我们发现，在  $\pi^+ J/\psi$  和  $\pi^- J/\psi$  的不变质量谱上，在 3.9 GeV 处都存在一个结构。图 5 显示了 BES III 实验测量一个事例中  $\pi^+ J/\psi$  和  $\pi^- J/\psi$  的不变质量中较大者的分布，数据中 3.9 GeV 处的结构清晰可见。对新发现的共振态信号做各种检查，都证明这是一个新的信号，其统计显著性大于  $8\sigma$  (即：来自本底的可能性小于一千万亿分之一)。通过对图 5 中的分布进行拟合，我们可以测量出该共振结构的质量为  $M = (3899.0 \pm 3.6 \pm 4.9) \text{ MeV}$ ，比一个氢原子核略重；宽度为  $\Gamma = (46 \pm 10 \pm 20) \text{ MeV}$ ，相当于寿命约为  $10^{-23} \text{ s}$ 。我们将该共振态命名为  $Z_c(3900)$ 。

$Z_c(3900)$  共振态衰变末态中含有一个带电的  $\pi$  介子和一个不带电的  $J/\psi$  介子，因此它本身是带电的。

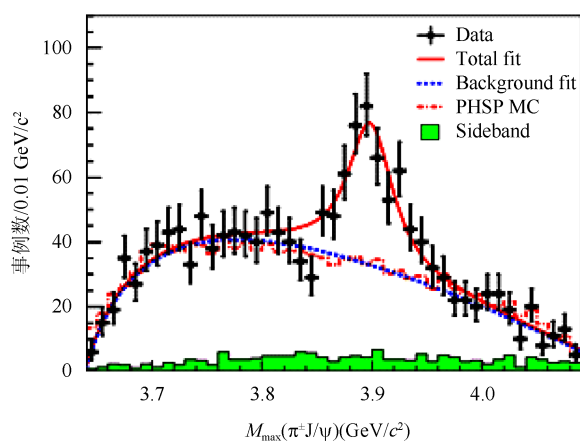


图 5 BES III 测量的  $\pi^+ J/\psi$  的不变质量分布中的  $Z_c(3900)$  信号及拟合结果

# 她用物理的情趣，引我们科苑揽胜； 她用知识的力量，助我们奋起攀登！

## 欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn，并将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用，作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有，并签署《现代物理知识》版权转让协议书（全部作者签名），如不接受此协议，请在投稿时予以声明。来稿一经发表，将一次性酌情付酬，以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目，并于 2009 年增加了彩色中心插页。

2013 年《现代物理知识》每期定价 9 元，全年 6 期 54 元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

编辑部订阅 汇款到：北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要过去杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1994 年合订本，22 元；1994 年增刊，8 元；1994 年附加增刊合订本，36 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2000 年附加增刊合订本，38 元；2000 年增刊，10 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007 ~ 2011 年单行本每期 8 元；2012 ~ 2013 年单行本每期 9 元；2007 ~ 2012 年合订本每本 50 元。

又由于  $J/\psi$  介子是由一对粲夸克和反粲夸克组成的典型的粲偶素，因此  $Z_c(3900)$  共振态中含有正反粲夸克对——这显然不是通常的介子共振态。一种合理的解释是  $Z_c(3900)$  内部除了正反粲夸克对以外，还含有至少两个轻夸克（u 夸克或者 d 夸克等）。如果真的是这样的话，那么  $Z_c(3900)$  共振态就是一个奇特态强子，我们就从实验上发现了奇特态强子存在的证据。

### 总结和讨论

有关  $Z_c(3900)$  共振态的本质，目前依然是个谜。随着 BES III 实验发现  $Z_c(3900)$  共振态，最近也出现了大量的理论模型计算，试图解释  $Z_c(3900)$  的本质。例如，阿里（Ali）和马雅尼（Maiani）等人认为这是一个四夸克态，并对其可能的衰变模式进行了预言；赵强等认为这是由于  $\bar{D}D_1(2420)D^*$  的三角图造成的；刘翔等人认为这是由于单个  $\pi$  介子的发射机制造成的；而沃洛申（Voloshin）则认为这可能是四夸克态或者分子态中的一种。

值得指出的是，在 BES III 实验公布研究结果之后不到一周，日本高能加速器研究机构的 Belle 实验也宣布发现了  $Z_c(3900)$  共振态信号（Belle 实验将其命名为  $Z(3900)^\pm$ ）。虽然 Belle 实验采用的研究方法和 BES III 不一样（Belle 在正负电子质心系能量 10.58 GeV 附近采集数据，采用了初态辐射的方法），但是 Belle 观测到的信号和 BES III 实验的报道在误差范围内一致。这有力地证明了  $Z_c(3900)$  共振态是真实的。 $Z_c(3900)$  是目前唯一一个同时被两个大型国际实验观测到的奇特态强子。

为了对  $Z_c(3900)$  共振态的性质，例如自旋宇称量子数、产生与衰变机制等做更多更精细的研究，BES III 实验决定在该能量点采集更多的数据。预计到 2013 年夏天，BES III 积累的数据量会达到现在的 4 倍，即  $2000 \text{ pb}^{-1}$ 。相信利用更多的实验数据，BES III 实验将会在奇特强子态研究领域做出更多的贡献。

（中国科学院高能物理研究所 100049）