

BESIII 实验发现新粒子 X(3823)*

刘智青[†]

(美因茨约翰尼斯·古腾堡大学 德国美因茨 55128)

2015-06-22 收到

[†] email: zqliu@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20151205

粒子物理学是一门研究自然界中物质最基本组成单元的科学。现在人们已经知道，自然界的物质都是由微观原子构成的。而微观原子也是有内部结构的，它由位于中心的原子核和核外电子构成。那么原子核有没有进一步的结构呢？答案是有的。粒子物理学家已经探明，原子核由质子和中子构成。那么质子和中子是不是就是物质世界最基本的组成单元？粒子物理学的研究表明，质子和中子还有更基本的内部结构！目前粒子物理学普遍接受的观点认为，物质最基本的组成单元叫做夸克。自然界存在6种夸克，分别是上夸克(up)、下夸克(down)、粲夸克(charm)、奇夸克(strange)、顶夸克(top)和底夸克(bottom)。由这些夸克就可以构成形形色色的粒子。在人们已知的夸克模型中，粒子都是由3个夸克或者由正反夸克对构成。由3个夸克构成的粒子称为重子，例如构成原子核的质子和中子；而由正反夸克构成的粒子称为介子，例如 π 介子、K介子等。由于夸克组合成重子和介子是通过一种相互作用很强、作用范围很短(原子核尺寸，约 $1\text{ fm}=10^{-15}\text{ m}$)的力(叫做强作用力)束缚在一起的，所以重子和介子通常也被称之为强子。

除了重子和介子，自然界是否还存在其他组成形式的强子？目前，粒子物理学中描述强作用最好的理论叫做量子色动力学(QCD)。在QCD中，强作用力将夸克束缚成强子时，对夸克的个数并没有严格的限制。既允许存在由3个夸克构成的重子和正反夸克对构成的介子，也允许存在由4个、5个夸克，甚至多个夸克构成的多夸克态；还允许存在由强子和强子通过相互作用束缚在一起的强子分子态；甚至还允许存在由传播强

作用力的媒介子(胶子)和夸克束缚在一起的夸克胶子混杂态，以及纯粹由胶子形成的胶子球等。除普通重子和介子外的新粒子称为奇特态粒子，它们一直是粒子物理学感兴趣的研究对象。直到近年来随着实验技术手段的不断提高，人们才在粲夸克偶素(粲偶素)能区发现了它们存在的迹象。

粲偶素是由一对正反粲夸克构成的普通介子。由于粲夸克质量较重，因此它们在粲偶素内部的运动相对较慢，可以类比成人们熟知的氢原子系统或者正负电子偶素系统。势模型正是从这个基本假设出发，引入正反粲夸克对之间的相互作用势 $V(r)=-a/r+kr^{11}$ 。将该势函数代入量子力学中的薛定谔方程，则可以求解出该束缚系统的对应各种能级的态，并由此得到整个粲偶素的能谱。在粲介子(D介子)阈值以下，势模型的预言被实验一一证实^[2]，堪称粒子物理学中研究强作用成功的典范。在粲介子阈值以上，目前势模型预言的许多态依然未获实验证实。因此在实验上寻找它们变得十分有意义。另一方面，近十年来实验上在粲介子阈值以上发现了众多新的粒子，引起了人们广泛的兴趣。这些新粒子和势模型的预言很难吻合，很有可能是奇特态粒子^[3]。特别是带电粒子的发现^[4]，更加使人们确信了奇特态粒子的存在^[5]。然而，中性的奇特态粒子很容易和普通粲偶素混淆。因此，在实验上充分理解粲偶素能谱，对于研究粲偶素和鉴定奇特态粒子都十分重要。

势模型预言，D-波态粲偶素的质量紧临粲介子阈值^[6]。根据势模型的标记方法，D-波态粲偶素共有4个，自旋单态 $\psi(1^1D_2)$ 和自旋三重态 $\psi(1^3D_{1,2,3})$ 。其中 $\psi(1^3D_1)$ 是一个矢量态粒子，被普遍认为是目前实验上观测到的 $\psi(3770)$ 粒子^[2]；而其他D-波态粲偶素目前则无任何确切的实验观

* 欧盟第七构架项目资助的玛丽·居里学者(批准号: 627240)

测。1994年,美国费米实验室的E705实验曾报道一个 $\psi(1^3D_2)$ 的候选者^[7]。但是其观测信号的统计显著性仅为 2.8σ (微弱的证据),很难说得上是一个可信的实验信号。2013年,日本KEK的Belle实验通过研究B介子衰变到 $K\gamma\chi_{c1}$ 的方法,在 $\gamma\chi_{c1}$ 的质量谱上发现了一个新共振态X(3823)的实验证据(3.8σ)^[8]。Belle实验测量X(3823)的质量为 $(3823.1\pm 1.8\pm 1.7)\text{ MeV}/c^2$,宽度很窄,被认为是 $\psi(1^3D_2)$ 的一个很好候选者。

北京谱仪BESIII实验于2013年至2014年在正负电子质心系能量4.19—4.60 GeV采集了积分亮度为 4.67 fb^{-1} 的实验数据。BESIII的实验数据样本为研究D-波态粲偶素 $\psi(1^3D_2)$ 提供了良好的机遇。考虑到 $\psi(1^3D_2)$ 的自旋宇称量子数 $J^{PC}=2^{--}$ 以及BESIII通过正负电子对撞湮灭只能产生 $J^{PC}=1^{--}$ 态的特点,BESIII采用了 $\psi(1^3D_2)$ 伴随一对 $\pi^+\pi^-$ 介子同时产生的研究方法去寻找 $\psi(1^3D_2)$ 。目前已知的 $\psi(1^3D_2)$ 的衰变道是 $\gamma\chi_{c1}$,因此BESIII沿用了这一过程。图1显示了BESIII实验测量得到的 $\pi^+\pi^-$ 反冲(即总动量减去 $\pi^+\pi^-$ 的动量)系统的不变质量谱分布。由于能动量守恒的约束, $\pi^+\pi^-$ 反冲不变质量谱等价于 $\gamma\chi_{c1}$ 不变质量谱。之所以研究 $\pi^+\pi^-$ 反冲不变质量谱,是考虑到实验上低动量带电 π 介子的动量测量精度优于高能光子的测量精度,因此获得了更好的实验分辨。从图1中可以看到,在 $3.69\text{ GeV}/c^2$ 附近有一个很大的峰,它是我们熟知的 $\psi(2S)$ 信号;另外 $3.82\text{ GeV}/c^2$ 处还存在一个小

峰,它就是X(3823)粒子的信号。通过对 $\pi^+\pi^-$ 反冲不变质量谱的拟合,BESIII测量出X(3823)粒子的质量为 $(3821.7\pm 1.3\pm 0.7)\text{ MeV}/c^2$,宽度很窄;信号的统计显著性为 6.2σ (即来自背景涨落的概率小于 10^{-9} ,这里 σ 代表标准正态分布的一倍标准偏差)^[9]。

BESIII实验首次以超过 5σ 显著性观测到X(3823),确立了该粒子的存在。对比BESIII和Belle实验的测量结果,发现X(3823)粒子的质量在误差范围内相符合,所以是同一个粒子。根据势模型的预言,D-波态粲偶素的质量位于 $3.82\text{—}3.85\text{ GeV}/c^2$ 之间^[6]。在未观测到的D-波态粲偶素中, $\psi(1^1D_2)$ 衰变到 $\gamma\chi_{c1}$ 过程被C宇称守恒禁戒;而 $\psi(1^3D_3)$ 衰变到 $\gamma\chi_{c1}$ 过程的几率也小到几乎可以忽略^[10]。相反, $\psi(1^3D_2)$ 则被预期主要衰变到 $\gamma\chi_{c1}$ 过程^[11],这和实验观测是一致的。另外,多个理论计算支持 $\psi(1^3D_2)$ 的质量应该在 $3.810\text{—}3.840\text{ GeV}/c^2$ 之间^[12]。这样的话, $\psi(1^3D_2)$ 的质量高于 $D\bar{D}$ 阈值,却低于 $D\bar{D}^*$ 阈值。而 $\psi(1^3D_2)$ 衰变到 $D\bar{D}$ 过程被宇称守恒禁戒,因此它应该是一个非常窄的共振态,这和实验观测也非常一致。再者,BESIII实验还测量了 $\psi(1^3D_2)$ 衰变到 $\gamma\chi_{c2}$ 过程和 $\gamma\chi_{c1}$ 过程的比例,发现在90%置信度水平下小于0.42,这和理论预期也是一致的^[13]。所有这些证据都表明,X(3823)是 $\psi(1^3D_2)$ 态的理想候选者。

BESIII实验虽然发现了X(3823)共振态,但是受统计量的限制,无法对其自旋宇称量子数直接测量;对其质量宽度的测量也不够精确。而正在筹划中的PANDA实验为此提供了可能性。PANDA实验位于德国GSI的FAIR加速器,计划采用反质子和质子碰撞来产生新粒子。由于采用了束流制冷技术,PANDA的反质子束流动量分辨可以达到50 keV水平。这对研究窄共振态是非常大的优势,可以精确扫描其质量和宽度。理论计算预言,X(3823)的宽度在400 keV水平^[13],PANDA实验无疑能够对其质量和宽度做出精确的测量。另外,质子和反质子湮灭产生X(3823)的截面也很可观。以典型的D-波粲偶素 $\psi(3770)$ 为例,其耦合到质子和反质子的分宽度至少在

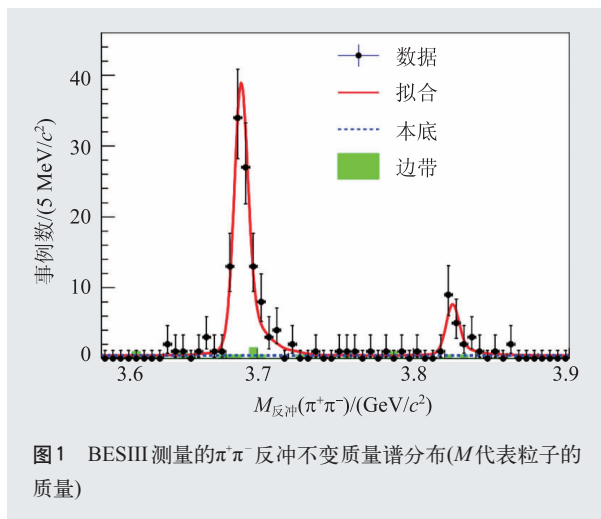


图1 BESIII测量的 $\pi^+\pi^-$ 反冲不变质量谱分布(M 代表粒子的质量)

0.19 keV 水平^[14]。X(3823)是 $\psi(1^3D_2)$ 态的理想候选者，如果认为它和 $\psi(3770)$ 具有同样的耦合到质子和反质子的分宽度，那么PANDA产生X(3823)的截面为1100 nb水平。考虑到X(3823)是窄共振态，可能比 $\psi(3770)$ 耦合到质子和反质子的分宽度小，但即使做最保守估计，以质子和反质子耦合分宽度(0.06 keV^[2])最小的典型粲偶素 χ_{c1} 为参照，PANDA产生X(3823)的截面也在330 nb水平。另外X(3823)的总宽度也可能比理论预期稍大，因此，PANDA产生X(3823)的截面在100 nb水平是一个比较合理的估计。

图2示意了在PANDA实验扫描X(3823)共振态截面随质心系能量的分布。其中X(3823)的质量设为BESIII和Belle测量平均值(3822.2±1.1) MeV，宽度假设为800 keV。图中红色虚线代表X(3823)的本征截面分布，蓝色实线代表PANDA实际产生截面分布。可以看到，50 keV的束流分辨对截面分布几乎没有影响。如果在X(3823)质量±3σ范围内，扫描15个点(束流能量间隔500 keV)，每个点采集0.5 pb⁻¹积分亮度的数据样本，将能很快地寻找到X(3823)共振峰的位置区间。一旦知道了X(3823)质量峰的位置区间，再在其附近精细扫描5—7个数据点(束流能量间隔150 keV)，每个点采集0.5 pb⁻¹积分亮度的数据样本，就能积累足够的统计量来精确测量X(3823)的质量和宽度，以及对其自旋宇称给出直接测量。采用类似的研究方法，PANDA实验还能够寻找目前实验上未观测到的其余两个D-波态粲偶素 $\psi(1^1D_2)$ 和 $\psi(1^3D_3)$ 。

粲偶素谱位于QCD理论微扰与非微扰方法应用的过渡区域。因此，研究粲偶素对于人们理解

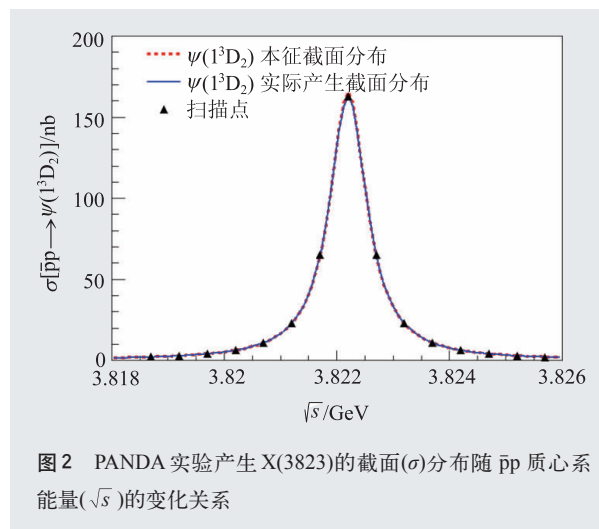


图2 PANDA实验产生X(3823)的截面(σ)分布随 $\bar{p}p$ 质心系能量(\sqrt{s})的变化关系

强相互作用非常重要。在粲介子阈值以下，势模型对粲偶素的描述非常成功。但是到了阈值以上，随着粲夸克对之间相互作用强度变大，势模型开始变得不适用。这给理论和实验研究带来了挑战。另一方面，目前实验上在粲偶素能区观测到了许多新的粒子。它们和势模型预言的粲偶素态不能很好地吻合，因此很有可能是奇特态粒子。然而，由于在粲介子阈值以上势模型对粲偶素态性质的预言本身是不好的，所以很难判定某些新粒子是奇特态粒子还是一个理解不充分的粲偶素态？此次BESIII实验观察到D-波态粲偶素 $\psi(1^3D_2)$ 的理想候选者，是研究粲介子阈值以上粲偶素态一次非常有价值的尝试。该发现不仅证实了一个新的粲偶素态存在，还澄清了粲偶素 $\psi(1^3D_2)$ 和奇特态粒子X(3872)不是同一个粒子^[15]。对于 $\psi(1^3D_2)$ 态性质的更精细研究，未来的PANDA实验凭借独特的优势将作出贡献，并在寻找其他未发现的D-波态粲偶素上提供机遇。

参考文献

- [1] Eichten E *et al.* Phys. Rev. D, 1980, 21: 203; Rev. Mod. Phys., 2008, 80: 1161; Eichten E, Quigg C. Phys. Rev. D, 1995, 52: 1726
- [2] Particle Data Group, Olive K A *et al.* Chin. Phys. C, 2014, 38: 090001
- [3] Brambilla N *et al.* Eur. Phys. J. C, 2011, 71: 1534
- [4] BESIII Collaboration, Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 252001; Belle Collaboration, Liu Z Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 252002
- [5] Swanson E. Physics, 2013, 6: 69
- [6] Godfrey S, Isgur N. Phys. Rev. D, 1985, 32: 18
- [7] The E705 Collaboration, Antoniazzi L *et al.* Phys. Rev. D, 1994, 50: 4258
- [8] Belle Collaboration, Bhardwaj V *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 111: 032001

- [9] BESIII Collaboration, Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 115:011803
- [10] Barnes T, Godfrey S, Swanson E S. Phys. Rev. D, 2005, 72: 054026
- [11] Eichten E, Lane K, Quigg C. Phys. Rev. Lett., 2002, 89: 162002; Cho P, Wise M B. Phys. Rev. D, 1995, 51:3352
- [12] Godfrey S, Isgur N. Phys. Rev. D, 1985, 32:189; Kwong W, Rosner J, Quigg C. Annu. Rev. Nucl. Part. Phys., 1987, 37: 343; Ebert D, Faustov R N, Galkin V O. Phys. Rev. D, 2003, 67: 014027; Eichten E, Lane K, Quigg C. Phys. Rev. D, 2004, 69: 094019; Blank M, Krassnigg A. Phys. Rev. D, 2011, 84: 096014
- [13] Qiao C F, Yuan F, Chao K T. Phys. Rev. D, 1997, 55:4001
- [14] BESIII Collaboration, Ablikim M *et al.* Phys. Lett. B, 2014, 735: 101
- [15] Belle Collaboration, Choi S K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 91: 262001

可用于海军潜艇的量子加速计

英国物理学家正在为皇家海军研制一种新的加速计，目前采用的加速计在一天的航行后能达到的定位精度为1 km。新研制的装置利用超冷原子的量子干涉效应，可以精确地确定潜艇在水下的位置，在经过一天的航行后，定位误差在1 m以内，而不必浮到水面上使用全球定位系统(GPS)定位。经过进一步开发，该装置将可用于石油勘探，甚至可用于对隐藏着的物体进行“引力扫描”。

自从上世纪90年代，物理学家们便能够用超冷原子进行相干测量实验。Stanford大学的Mark Kasevich首先进行的实验中，让原子在地球引力场中下落。用一束激光脉冲照射在该原子上，使之成为两种量子态的叠加状态。这两种量子态沿着不同的轨迹行进，就像光子通过光学相干仪一样。第二束激光脉冲将两种状态的光子重新组合起来，所形成的干涉精确地给出引力的大小，甚至可揭示广义相对论的细微的效应。

这种装置还可用来制做极灵敏的垂直方向的加速计。伦敦帝国学院的Ed Hind进行了一项实验，将装置旋转90度，成为测量水平方向的加速计。该装置使用约1百万个铷原子，这些原子用磁场和激光俘获在集成电路片上。

这种集成电路片的一个重要特点是使用一束激光俘获原子。这束激光照射在一个表面光栅上，产生几束衍射光，这些光束与磁场一起用于俘获原子。

所俘获的这些原子具有两种量子基态，分别标记为 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 。开始时，使系统都处于 $|1\rangle$ 态，然后，用

物理新闻和动态

一束光脉冲照射原子，使之成为 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 的叠加态。这相当于光学中萨格纳克(Sagnac)干涉仪中的第一个分束镜的作用。状态 $|1\rangle$ 不反冲，而状态 $|2\rangle$ 沿着光束的方向发生反冲。然后，再用第二个光脉冲照射原子，使原子的状态发生转换，状态 $|1\rangle$ (无反冲)变成 $|2\rangle$ (有反冲)，而状态 $|2\rangle$ (有反冲)变成 $|1\rangle$ (无反冲)。这类似于光学干涉仪中的两个反射镜，将两束分离的光束反射到第二个分束镜，并重新会聚在一起。最后，使用第三个光脉冲照射原子，这相当于光学干涉仪中第二个分束镜的作用。

然后，测量有多少原子处于 $|1\rangle$ 态，或有多少处于 $|2\rangle$ 态。测量结果可用于计算干涉相位，干涉相位与两种状态的原子所经过的有效路程差有关。这种路程差与原子沿光束方向的加速度成正比。

这种结构简单操作方便的加速计原则上可以小型化，用在潜艇上。实际上，装有原子的容器已经小型化到一块集成电路片上。但是有关的电子学和光学元件仍要安装在仪器架和光学实验桌上。另一个困难是必须使集成片不透氦气，氦气通过器壁会污染装有原子的真空。

研究团队目前在试图缩小加速计的光学和电子学元件的尺寸，以便加速计可以放置在 1 m^3 的空间中，用于装备海军。但要放在钻洞中用于石油或其他矿藏的勘探，则需要进一步小型化。在未来的5—10年内可能用于“引力扫描仪”。

有关集成电路片的论文发表在*Nature Nanotechnology*, 2013, 8: 321—324上。

(周书华 编译自*Physics World News*, 26 May 2014)