

BES III 测量了 $Z_c(3900)$ 的 自旋宇称量子数

朱凯

(中国科学院高能物理研究所 100049)

自有人类以来,人们对自然界的好奇与探索从未停止。其中一个核心的问题便是这个世界由什么构成的,它们之间的相互作用又是怎么样的?现代物理科学认为自然界存在四种基本的相互作用:强相互作用、弱相互作用、电磁相互作用与引力相互作用。其中强相互作用使得夸克可以组成质子与中子,而质子与中子又能组成原子核。原子核加上外层电子可以组成原子,原子还可以组合成分子。原子与分子构成了我们绝大部分的可见世界。注意到质子和中子都是由三个夸克通过胶子传递强相互作用组成的。那么如果不是三个夸克,而是两个夸克(事实上是正反夸克对)能不能构成一个相对稳定的结构呢?答案是肯定的。这种构成称为介子。第一个被发现的介子是 π 介子,它是在1948年由英国物理学家鲍威尔等人在高空宇宙线实验中发现的。因为当时质子与中子的质量比 π 介子大,所以人们把由三个夸克组成的粒子称为重子,而两个夸克组成的粒子称为介子。虽然后来又发现了比质子质量大得多的介子,但此名称一直延续了下来。利用宇宙线实验毕竟是“靠天吃饭”,为了加快对亚原子粒子的研究,实验物理学家们开始兴建加速器,发展高能粒子探测技术。在此之后,加速器实验中又发现大量不同的介子和重子,总计约两百多种。注意到介子和重子里的夸克数目不是两个就是三个,那么有没有四个或者五个甚至更多夸克组成的粒子呢?从理论上这是可以的,但是在实验上一直没有发现确切的证据。寻找四夸克态、五夸克态、乃至多夸克态一直是高能粒子物理实验上的一个吸引人的课题,它对我们更深入地去理解强相互作用很有帮助。

北京谱仪 III (BES III) 是工作在北京正负电子对撞机 II (BEPC II) 上的通用谱仪,主要研究 20~46 亿电子伏能量附近的物理。最近 BES III 合作组报道

了新发现的带电粒子 $Z_c^+(3900)$ (参见 BES III 合作组文章: *Phys. Rev. Lett.* 110, 252001 (2013))。这个粒子的发现是通过观察它的衰变末态的不变质量得到的。当一个母粒子衰变到几个子粒子时,我们可以通过子粒子的质量、飞行速度与方向反推出母粒子的质量。 $Z_c^+(3900)$ 是通过它们的衰变末态 J/ψ 和 π^+ 得到的。从图 1 中我们可以清晰地看到 $Z_c^+(3900)$ 的共振峰形态。因为我们知道 J/ψ 是由比较重的正反粲夸克组成,它们不容易从真空拉出,因此这一对正反粲夸克很可能是 $Z_c^+(3900)$ 的固有成分之一。同时 $Z_c^+(3900)$ 不是中性粒子,它带电,所以它不可能是传统的介子态。因此 $Z_c^+(3900)$ 很有可能携带有四个或者四个以上的夸克,是科学家们长期寻找的四夸克态。想要对 $Z_c^+(3900)$ 的本性进行一个令人信服的解释,迫使我们去收集更多关于 $Z_c^+(3900)$ 的知识。对于粒子来说,它们的基本特征有质量、寿命、中性或者带电,这就好比一个人的体重、身高、性别一样。另外粒子还有些量子特征,比如它的自旋与宇称,这就好比一个人的血型与肤

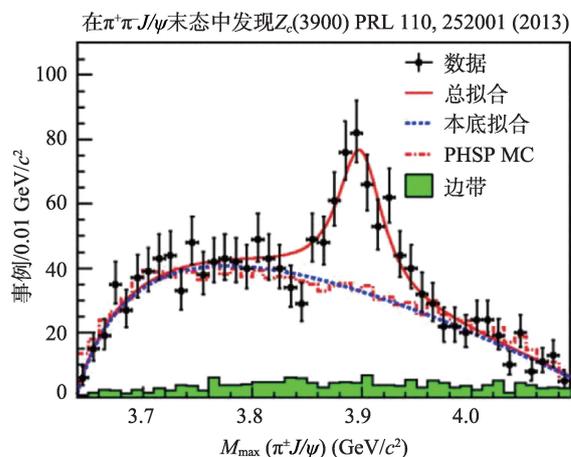


图1 $\pi^+ J/\psi$ 不变质量分布图上清晰的 $Z_c^+(3900)$ 峰状结构

色。因此如果我们能知道 $Z_c^+(3900)$ 的自旋-宇称, 那就意味着我们对 $Z_c^+(3900)$ 的了解又上了一个新的台阶。但是 $Z_c^+(3900)$ 产生出来后会飞快的衰变掉, 要想知道它的自旋与宇称我们还是得回到分析它衰变出来的粒子上。

一个粒子的自旋与宇称是它的内禀属性, 通常我们用 J^P 表示, 这里 J 表征自旋而 P 表征宇称。自旋可以是 0, 1, 2 等, 而宇称有正负。比如说, 粒子物理里常见的标量粒子、赝标量粒子、矢量粒子、轴矢量粒子的自旋和宇称分别是 $J^P = 0^+, 0^-, 1^-, 1^+$ 。那我们怎么才能知道一个粒子的自旋与宇称呢? 在粒子物理实验上的常见方法是通过研究它的衰变。母粒子的自旋与宇称决定了从它衰变出来的子粒子的飞行方向, 通过分析这些子粒子的飞行方向(专业术语叫角分布)我们可以得到母粒子的自旋与宇称。但在实际的操作中, 即物理实验分析中会有一些困难, 其中最大的困难就是干涉对角分布的影响: 从图 1 我们可以看出, 我们其实很难得到百分之百纯度的信号, 在信号下面总是有一些本底。这些本底的存在会使得得到的子粒子的角分布并不完全来自母粒子; 更糟糕的是由于量子效应, 相同末态的本底与 $Z_c^+(3900)$ 的信号会发生干涉, 这使得我们从中抽取信号的角分布形状会更加困难。为了解决这个问题, BES III 合作组采取了一种名为“分波分析”的方法, 它构造了信号与本底的螺旋度复数振幅, 并以此为出发点来拟合数据; 这样前面提到的本底的影响以及干涉效应就能被合理处理了。在构造振幅的过程中, 除了考虑共振态 Z_c , 还考虑了四种衰变到 $\pi^+\pi^-$ 的共振态: $\sigma, f_0(980),$

$f_2(1270), f_0(1370)$ 。采取这种分波分析的方法, BES III 合作组利用在质心能量为 42.3 与 42.6 亿电子伏两个能量点分别所取的大批量数据 (1.92 fb^{-1}), 通过重建 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ 过程挑选出 6000 多个事例(其中本底大约 600 个), 在 $Z_c^+(3900)$ 粒子取各种自旋-宇称量子数的情况下拟合数据。如图 2 所示, 当我们比较数据与各种假设的 Z_c 与 J/ψ 的极化角分布可以发现, 当自旋-宇称 $J^P = 1^+$ 的情况下, 假设与数据达到最佳匹配。这个结果发表在《物理评论快报》(*Physical Review Letters*)上(参见 BES III 合作组文章: *Phys. Rev. Lett.* 119, 072001 (2017)), 并被《物理》(*Physics*)杂志编辑作为特色研究论文推介。在这篇题为“完善四夸克态档案”(Filling in a Tetraquark's Profile)的推介文章中, 编辑写道:“对正负电子对撞数据的分析确定了含四夸克粒子的自旋和宇称”。

值得一提的是, BES III 还通过粲介子对的末态发现了 $Z_c^+(3885)$ (参见 BES III 合作组文章: *Phys. Rev. Lett.* 112, 132001(2014))。 $Z_c^+(3885)$ 与 $Z_c^+(3900)$ 的质量与寿命都很接近, 但它们是否是同一个粒子还不清楚。最近的关于 $Z_c^+(3900)$ 的结果与测得的 $Z_c^+(3885)$ 的自旋-宇称是一致的, 支持它们是同一个粒子的结论。

本文受到如下基金支持, 表示感谢

基金中文名称: 国家重点基础研究发展计划

基金英文名称: National Key Basic Research Program of China

基金号: 2015CB856700

备注: 973 计划

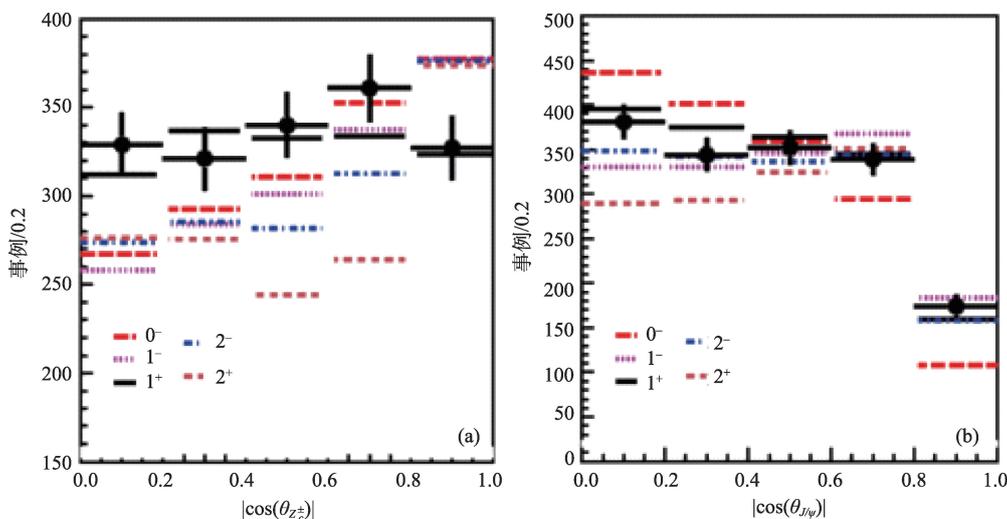


图 2 Z_c 与 J/ψ 的极化角分布。带误差棒的点为数据, 与各种不同的量子数假设下所得到的结果相比较可以看到与 $J^P = 1^+$ 的假设最为符合