

发现新型四夸克态 Zcs(3985)

李培荣¹ 吕晓睿² 郑阳恒²

(1. 兰州大学 730000; 2. 中国科学院大学 100049)

2020年11月16日,北京谱仪 III(BESIII) 实验国际合作组利用在疫情期间采集的实验数据,发现了一个新型的奇特态,命名为 Z_{cs}(3985)。该成果在 arXiv 预印本网站发表不久后便被引用近 40 次。该结果最终于 2021 年 3 月 11 日发表在国际权威物理期刊 *Physics Review Letters* (PRL) 上,并被 PRL 选为当期编辑推荐文章,在美国物理学会网站做推广介绍。这是国际上首次发现含有奇异夸克的隐粲四夸克态信号。该发现之所以如此吸引人们的关注,还得从粒子物理中量子色动力学(QCD)和奇特强子态说起。

从公元前 4 世纪古希腊的德谟克里特和亚里士多德开始就对物质的基本结构开始了思考和探索。我国在战国时期以公孙龙为代表的思想家提出了物质无限可分思想。在 19 世纪,科学家逐渐了解到,组成我们周围物质的基本单元是由原子构成并且不同元素的物理化学性质具有周期性,进而由俄国科学家门捷列夫总结出了元素周期表。但随着科学技术的发展,20 世纪开始,人们逐步认识到,原子并非最基本的单元,它具有内部结构,是由原子核和电子组成的(如图 1 所示)。而原子核则进一步由质子和中子组成,质子和中子则是由夸克通过强相互作用力(下面简称强力)吸引在一起组成

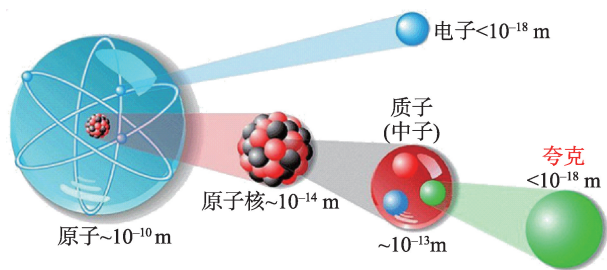


图1 原子内部结构

的。描述物质最基本组成结构和基本粒子间相互作用的理论被称为标准模型,它已经被大量实验证实。在标准模型的框架下,参与强作用的基本粒子包含了三代共 6 味夸克和它们的反夸克(图 2)。强力把多个夸克束缚在一起形成强子,包括在实验上确认的含 2 个夸克的介子(如 J/ψ 粒子、D 介子)和含 3 个夸克的重子(图 3)。我们熟悉的质子和中子就属于重子。1974 年丁肇中先生因为发现 J/ψ 粒子,

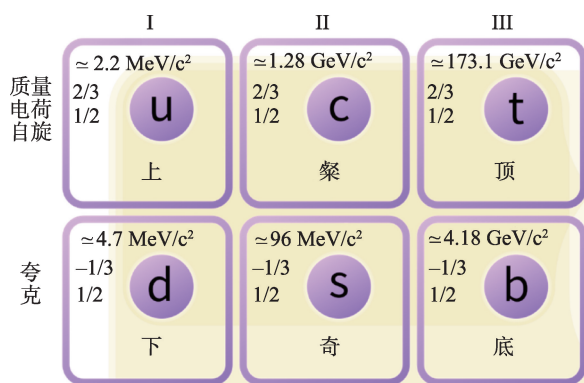


图2 三代 6 种夸克

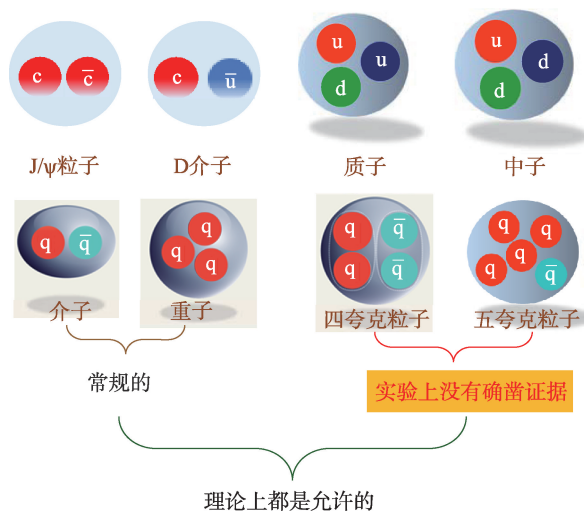


图3 QCD 理论中预言的强子态

从而确认了粲夸克(c夸克)的存在而获得了1976年的诺贝尔物理学奖。人们不禁要问,既然强子是由夸克通过强力组成的,那么除常规的重子和介子之外是不是还存在含有4个夸克甚至5个夸克的兄弟粒子呢?

我们现在知道,描述强相互作用的理论是QCD。QCD理论告诉我们强子是由更基本的夸克和胶子组成的,并且对构成强子的基本组成夸克并没有数目限制。除了已经被证实的2夸克介子和3夸克重子,QCD理论也允许存在其他多种形式的强子组态。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组成的多夸克态、由纯粹的胶子构成的胶子球、由若干夸克和胶子形成的夸克胶子混杂态,等等。所有这些都与常规介子和重子不同的强子组态统称为奇特强子态。然而QCD理论在计算奇特强子态方面还存在很多困难,这主要是由于非微扰能区的红外发散问题导致计算非常繁杂,高阶效应不再是微扰可忽略的,甚至可能变得更重要。因此,在实验上寻找和确认奇特态强子的存在则显得至关重要,对检验QCD的非微扰性质有重要意义。研究人员相信实验上如果能找到更多的奇特强子态证据,那么就能够帮助人们更准确地理解此类强子的行为,进而挖掘更深层次的物理规律。

要从实验上寻找奇特强子态存在的证据,人们需要找到判别奇特态强子的特征信号,否则即便发现了一些新的强子信号,也难以判断该信号是奇特强子还是常规强子,这也正是寻找奇特态强子的困难所在。比如,对于胶球的寻找,实验上也有若干个候选态,然而由于胶球的很多性质与某些普通2夸克介子激发态很相近,并且两者间还会存在一定程度的量子混合,因此使得在实验上确认纯胶球变得非常困难。再比如,2003年位于日本筑波高能加速器研究机构的Belle实验在B介子衰变过程中发现的X(3872)粒子,其宽度非常窄(小于1 MeV),质量非常接近 DD^* 质量阈值,且在B介子衰变和强子对撞中大量产生,其衰变到同位旋破坏过程比常规粲偶素态的同位旋破坏衰变的相对概率要高很多,因此它很像由强子构成的分子态或者四夸克奇特

态。由于X(3872)是电中性的,其质量与理论预言的粲偶素激发态 2^3P_1 的质量接近,因此目前尚不清楚X(3872)是一个常规粲偶素激发态,还是一个奇特强子态,甚至是它们的混合态。以上例子表明,奇特强子态的确认,需要有别于常规强子态的特殊性质。否则实验和理论上很难判断它是否是奇特态。

升级改造后的北京正负电子对撞机二代(BEPCII)是我国重大科学工程装置,是运行在陶-粲物理能区国际领先且独特的高亮度实验装置。BEPCII可以加速正反电子实现正反物质的湮灭,产生约为46.8亿电子伏特的对撞质心系能量。根据爱因斯坦的质量和能量的转换方程 $E=Mc^2$,这些能量将转化为新的物质质量,其中预期会有一定的概率产生四夸克态物质 Z_{cs} ,反应过程如图4所示。产生后的 Z_{cs} 寿命很短(约为 10^{-24} 秒),马上会衰变到质量更轻的稳定粒子。BESIII实验利用高精密的探测装置,实时监控这些反应过程,捕捉产生的四夸克态信号。

BESIII实验团队通过分析2020年新采集的46.8亿电子伏特(4.68 GeV)正负电子对撞能量的数据,在 $e^+e^- \rightarrow K^+(D_s^-D^{*0} + D_s^-D^0)$ 反应过程中,发现在 $D_s^-D^{*0}$ 和 $D_s^-D^0$ 的质量阈值附近存在一个清楚的增强结构(图5)。细致研究表明,该增强结构无法用任何已知的传统粲介子激发态来解释,但可以通过引入一个新的共振态 $Z_{cs}(3985)$ 来描述,与实验数据吻合的非常好。通过测量得到了127个 $Z_{cs}(3985)^- \rightarrow D_s^-D^{*0} + D_s^-D^0$ 信号事例,全局意义上

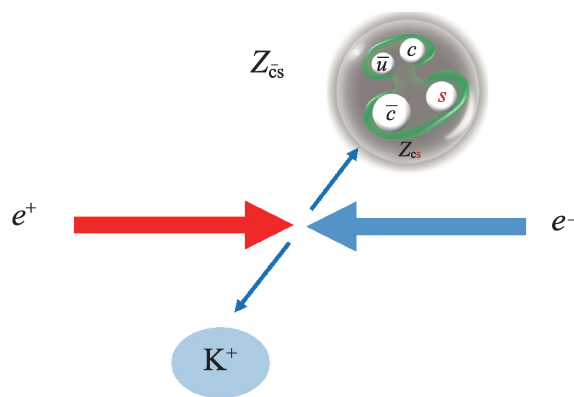
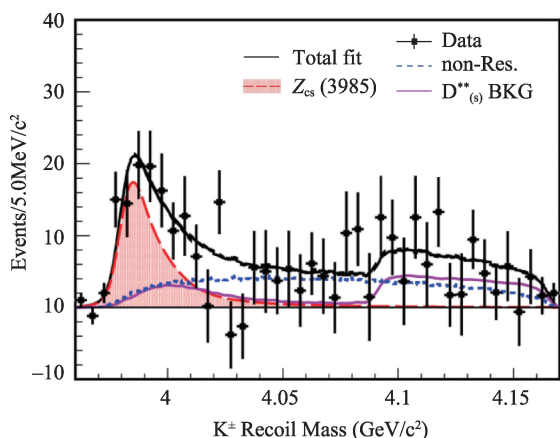


图4 四夸克物质 Z_{cs} 产生示意图

图5 发现 $Z_{cs}(3985)$ 信号

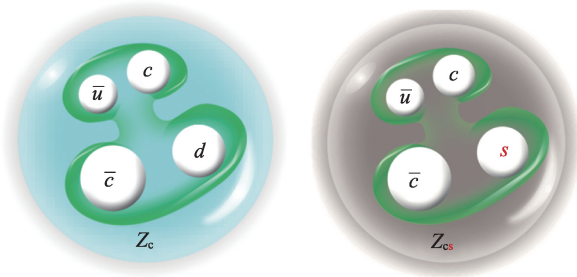
信号显著性达到了5.3个标准偏差(意味着该发现来自本底涨落形成假信号的概率小于 10^{-7})。

此次发现的 $Z_{cs}(3985)$ 质量约为39.8亿电子伏特(GeV),相当于质子质量的4倍还多;衰变宽度约为13兆电子伏特(MeV)。因 $Z_{cs}(3985)^-$ 衰变到1个中性粲介子(夸克成分 $c\bar{u}$)和1个带电且含奇异夸克(s)的粲介子(夸克成分 $c\bar{s}$),所以 $Z_{cs}(3985)^-$ 是带电的,其电量与电子电量相同,而常规粲偶素态是中性不带电的,这样可以排除它是粲偶素态的可能。如果 $Z_{cs}(3985)^-$ 是2夸克介子态,那么其夸克成分必须是 $(\bar{u}s)$,即一个K介子激发态。但考虑到 $Z_{cs}(3985)^-$ 的质量很大,远远高于QCD理论预言的常规的K介子激发态的质量,这表明 $Z_{cs}(3985)^-$ 不符合2个夸克K介子激发态的性质。此外,BESIII实验上测量到的 $Z_{cs}(3985)^-$ 的衰变宽度很窄,大约为13 MeV,而高质量的K介子激发态的衰变宽度通常很宽,至少在100 MeV以上。所以 $Z_{cs}(3985)^-$ 必然要包含至少四个夸克成分($c\bar{c}s\bar{u}$),即一个四夸克奇特强子态。虽然目前还不能确定该共振态是何种类型的四夸克态,是紧致的还是类似于强子分子态类型的,但是其至少应当是一个有别于常规强子态的奇特强子态。

北京谱仪III实验在2013年发现了四夸克粒子 $Z_c(3900)$ 和 $Z_c(4020)$ 的可能信号,它们的夸克成分为 $(c\bar{c}d\bar{u})$,不含奇异夸克。此次发现的 Z_{cs} 与之前

发现的 Z_c 有很多相通的物理性质,但 $Z_{cs}(3985)$ 由于含有更重的奇异夸克质量变得更大,内部性质值得后续进一步研究。目前理论上关于 $Z_{cs}(3985)$ 的研究非常热烈,给出了各种可能的内部结构的解释,比如紧致型四夸克态、强子分子态、夸克对-反夸克对态,等等。此外欧洲核子中心大型强子对撞机上的LHCb实验在2021年3月在底介子到 ϕ 介子、 J/ψ 粲偶素和带电K介子的衰变过程中发现了衰变到粲偶素 J/ψ 和带电K介子的两个新的奇特四夸克态 $Z_{cs}(4000)$ 和 $Z_{cs}(4220)$,质量分别为4.003 GeV和4.216 GeV,衰变宽度分别为131 MeV和233 MeV。这进一步确认了含奇异夸克的隐粲四夸克态 Z_{cs} 的存在。

$Z_{cs}(3985)^-$ 的发现将加深我们对量子色动力学理论中非微扰效应的理解,对认识强物质微观结构具有里程碑式的意义。我们期望BESIII实验未来在4.68 GeV附近获取更大统计量的数据,这将对进一步理解 Z_{cs} 的产生机制,测量其自旋宇称量子数,寻找中性 Z_{cs}^0 同伴及更重的高激发伴随态都有重要意义。相信随着实验数据的积累,BESIII实验将会在奇特强子态研究领域做出更多重要成果。此外LHCb实验和Belle II实验也将积累更高统计量的数据,在 Z_{cs} 的研究方面也将发挥重大作用。

图6 四夸克粒子 Z_c 和 Z_{cs} 的夸克成分示意图

致谢:

科技部国家重点研发计划资助(2020YFA0406400)、国家自然科学基金资助(11805086, 11822506, 11935015)、中央高校基本科研业务费专项资金资助