

含有四个夸克或更多夸克的奇特粒子

(中国科学院高能物理研究所 赵强 编译自 Stephen Lars Olsen. *Physics Today*, 2014, (9): 56)

在粒子物理的所谓“标准模型”中发生强相互作用的基本粒子是带有分数电荷的夸克，这些夸克被电中性的类似光子的“胶子”捆绑在一起形成强子(包括重子和介子)。目前标准模型中包含6种不同“味道”的夸克：上夸克(u)、下夸克(d)、奇异夸克(s)、粲夸克(c)、底夸克(b)和顶夸克(t)；它们各自的反粒子(反夸克)被标志为 \bar{u} 、 \bar{d} 、 \bar{s} 、 \bar{c} 、 \bar{b} 、 \bar{t} 。每一种味道的夸克又带有强作用的3种不同的“色荷”之一的“色荷”。之所以称之为“色荷”是因为强相互作用将这些带色荷的夸克束缚在一起形成强子的法则很容易让我们类比到对颜色的感知。我们姑且把这3种色荷称为红色、绿色和蓝色；它们相应的反夸克的颜色就对应到互补色：蓝绿色、紫红色和黄色。

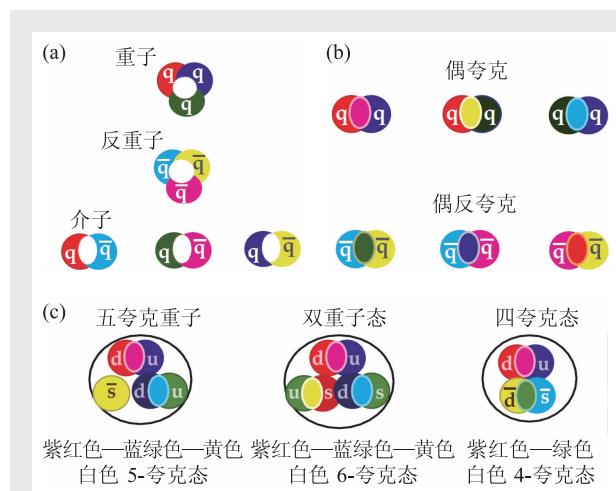


图1 传统和奇特的夸克组合 (a)3种不同颜色的夸克形成重子；3种不同颜色的反夸克形成反重子。夸克与带有相应的互补色的反夸克形成介子；(b)两个不同颜色的夸克形成具有互补色的偶夸克结构；(c)只要最终能保证是白色，任何数量的夸克可能结合在一起形成粒子

量子色动力学(QCD)是描述夸克和胶子相互作用的基本理论。根据QCD理论，自然界观测到的粒子都是夸克组成的“白色”的集体。带有颜色的单个夸克或夸克集体，是不能孤立存在或者被直接观测到的(见图1(a))。或者说，如果将红色、绿色和蓝色的3个夸克融合在一起，我们可以得到白色的、可观测的粒子(称为“重子”)。另一种形成白色的粒子的方法是将一个带色的夸克和一个具有相应的互补色的反夸克结合在一起(见图1(a))形成白色的、含有偶数个夸克的“介子”。

更复杂的结构如图1(b)所示，一个绿色和一个蓝色的夸克可以形成蓝绿色的“偶夸克”结构。它可以与相应的偶反夸克形成具有4个夸克的白色粒子。因此可以利用这样一个“颜色的关联”来构造具有多夸克

的白色的粒子(见图1(c))。

尽管物理学家们普遍认为多于3个夸克的多夸克态在物质世界应该存在，然而让粒子物理学家们困惑不已的是在过去30多年的实验研究中还没有找到无可辩驳的实验证据。

在过去十年中，国际高能物理实验进入了一个全新的阶段，

特别是在美国SLAC和日本KEK的B介子工厂开展了大量强子谱学的实验研究。其中一个重要的结果是，KEK的Belle合作组于2007年在 $B \rightarrow K\pi^+\psi'$ 过程的研究中发现的 $Z(4430)^+$ 。该粒子是衰变到 $\pi^+\psi'$ 的中间态粒子。由于我们已经熟知 ψ' 的性质，所以 $Z(4430)^+$ 衰变到 ψ' 和 π^+ 粒子表明，其不仅含有电中性的 $c\bar{c}$ 成分，同时也含有提供其正电荷的轻夸克成分，因此其最简单的夸克结构将是四夸克 $c\bar{c}u\bar{d}$ 。

Belle合作组还在2012年发现2个带电荷的介子态， $Z_c(10610)^+$ 和 $Z_c(10650)^+$ ，这两个介子最简单的夸克结构是四夸克 $b\bar{b}u\bar{d}$ 。2013年北京正负电子对撞机上的BESIII合作组发现了两个带电的、具有类似 $Z(4430)^+$ 的四夸克结构 $c\bar{c}u\bar{d}$ 的介子态： $Z_c(3900)^+$ 和 $Z_c(4020)^+$ 。Belle合作组随后确定了 $Z_c(3900)^+$ 的存在，并提供了更多关于 $Z(4430)^+$ 存在的实验证据。

2014年西欧核子中心(CERN)的LHCb合作组在高统计量的实验数据分析中证实了 $Z(4430)^+$ 的存在。这些结果有力地支持这些最近发现的带电的Z粒子具有四夸克结构。然而我们还不能确定它们是否是QCD预期的偶夸克—偶反夸克构成的粒子。由于我们不能直接观测粒子内部的颜色结构，因此想要区分各种对多夸克结构进行解释的模型是一件很困难的事情。我们或许应该寄希望于发现更多这样的多夸克态，系统测量它们的各种性质，从其表现出的一些模式中找到规律，以此来区分各种不同的理论解释。