

双粲粒子

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Raúl A. Briceño, *Physics*, September 11, 2017)

新粒子的发现，通常是根据粒子物理标准模型的预言，通过长期的实验寻找而实现的。CERN 大型强子对撞机(LHC)上的 LHCb 合作组对双粲重子 Ξ_{cc}^{++} 的探测，首次以高精度观测到含有两个重夸克的重子。为研究人员提供了一个检验量子色动力学(QCD)的独特的系统。

Ξ_{cc}^{++} 像质子一样，由被胶子束缚在一起的3个夸克组成。两者的主要差别在于组成粒子的夸克类型不同。夸克分为轻夸克(上夸克、下夸克和奇异夸克)及重夸克(粲夸克、顶夸克和底夸克)。质子只由轻夸克组成：两个上夸克和一个下夸克。大多数以前观察到的重子至多含有一个重夸克。 Ξ_{cc}^{++} 属于由两个重夸克(粲夸克)和一个上夸克组成的特殊类型的重子。

粲夸克比质子约重40%。其性质与轻夸克十分不同。在强子中，轻夸克不断运动，轻的夸克—反夸克对不时地产生。相反，粲夸克几乎是静止的，成为强子的重心。

研究人员在 LHC 上进行的高能

质子—质子碰撞时发生的反应中产生粲夸克。粲夸克主要与反粲夸克一起生成。为了形成双粲重子，必须同时产生两对这样的粲夸克—反粲夸克对。两个粲夸克必须在碰撞中形成的夸克胶子海中相遇，并且结合一个轻夸克形成 Ξ_{cc}^{++} 重子(见图)。由于反应的复杂性，加之在反应中生成粲夸克的数量少，以及 Ξ_{cc}^{++} 的寿命短(大约 10^{-13} s)，所以很久都没有观察到这个粒子。

Ξ_{cc}^{++} 的发现来自2016年 LHC 的最后一轮实验中 LHCb 合作组所收集的数据。研究团队对质子—质子碰撞中产生的大量粒子的信号进行筛选，寻找 Ξ_{cc}^{++} 衰变所产生的末态粒子(如其他重子、 π 介子、K 介子)。合作组观测到空前数量的与 Ξ_{cc}^{++} 粒子衰变有关的事件，提供了令人信服的统计证据，表明 Ξ_{cc}^{++} 的存在，并以高精度确定了它的质量 ($3621 \text{ MeV}/c^2$)。

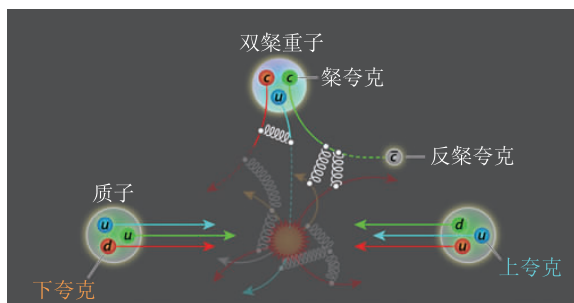
这一结果引出了关于重子 Ξ_{cc}^{++} 的重要问题。QCD 不但预言了 Ξ_{cc}^{++} ，也预言了 Ξ_{cc}^+ 的存在，其夸克组成与 Ξ_{cc}^{++} 相同，只是由一个下夸克取代了一个上夸克。由于这两个夸克的质量几乎相同，这两种双粲重子应具有近似相同的质量。在上夸克与下夸克相互交换时，强子质量的近似退化称作同位旋对称性。 Ξ_{cc}^+ 是 Ξ_{cc}^{++} 的同

位旋伴侣。

2002年费米实验室的研究人员首次报道观测到 Ξ_{cc}^+ ，并推测其质量约为 $3520 \text{ MeV}/c^2$ 。该信息引起大量的理论研究，试图使用格点 QCD 的非微扰方法直接从 QCD 计算证实这一质量。研究中，为简单起见，假定上夸克与下夸克具有相同的质量，换言之，假定 Ξ_{cc}^{++} 与 Ξ_{cc}^+ 的质量相同。然而，所得到的理论预期值与测量到的 Ξ_{cc}^+ 的质量不一致。 Ξ_{cc}^+ 的质量应比观察值重 $50\text{—}100 \text{ MeV}/c^2$ 。保持 QCD 的总特征的近似模型计算结果也与测量值不一致。

如今 LHCb 对 Ξ_{cc}^{++} 的探测为解决这一谜团提供了线索：以前的理论研究精确地预言了 Ξ_{cc}^{++} 的质量。这种一致表明我们进入了 QCD 可以精确地预言强子物理的新时代。当今，理论和实验在这一物理领域几乎完美地一致，只有 Ξ_{cc}^+ 是明显的例外。

这种同位旋伴侣之间前所未有的质量差($100 \text{ MeV}/c^2$)的根源是什么呢？能够用上夸克与下夸克之间微小但非零的质量差引起的效应解释吗？或者可以用这两个重子具有不同的电荷来解释？已有令人信服的理论证据表明，这些效应不可能导致如此大的质量差。需要进一步研究来证实2002年对 Ξ_{cc}^+ 的观测，并精确地测定其质量。如果这两个同位旋伴侣之间的能隙被证实为约 $100 \text{ MeV}/c^2$ ，就需要重新考虑我们的理论框架。因此，实验及时解决这一谜团是最为重要的。



LHCb 合作组提供了双粲重子 Ξ_{cc}^{++} 的证据。该粒子是在高能质子—质子碰撞中产生的两个粲夸克与一个轻夸克结合时形成的