

有第4代夸克吗？

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Thomas Elias Cocolios. *Physics*, November 27, 2023)

在粒子物理的标准模型中，物质是由称作夸克和轻子的基本粒子组成的。6种已知的夸克——上夸克与下夸克、粲夸克与奇异夸克、顶夸克与底夸克——分为3代。但是，有没有第4代夸克呢？为了回答这一问题，需要进行数百项物理学与核物理学的测量。然而，并非所有的测量是可进行的或是足够精确的，许多参数只是推断出来或外推出来的。现在欧洲粒子物理中心CERN的Peter Plattner与他的合作者展示了如何用一种单独的测量就可改变我们对这一基本问题的认识。

在标准模型的量子力学框架内，夸克可以在它们的不同味之间振荡。最有名的例子是放射性核的 β 衰变：当核的一个上夸克振荡到下夸克(或从下夸克振荡到上夸克)时，一个质子转变成一个中子(或一个中子转变成一个质子)。 β 衰变的速率与核物理及原子物理的许多因素有关，但夸克振荡的速率可以用上夸克转变成下夸克的矩阵元 V_{ud} 描写。当把所有可能的夸克组合的矩阵元排在一起时，得到一个 3×3 矩阵，即所谓的Cabibbo—Kobayashi

—Maskawa(CKM)矩阵。如果标准模型是完备的，CKM矩阵必定是幺正的，也就是任一行或列的矩阵元的平方和必定为1——表示对所有可能的夸克振荡的完整描述。如果对CKM矩阵幺正性的检验结果小于1，那么需要另一代夸克来填补。寻找超出标准模型的物理需仔细考察所有矩阵元，探索可能背离CKM矩阵幺正性的情况。

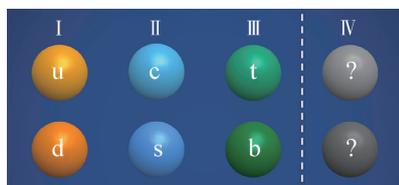
在所有夸克中，上夸克是最容易在实验上得到的，并可提供对CKM矩阵幺正性最严格的检验。在涉及上夸克的3个矩阵元中，最大的和最精确的是 V_{ud} 。在对幺正性的检验中，需要矩阵元的平方之和，而 V_{ud} 的不确定性是求和中最终不确定性的主要来源。 V_{ud} 不能直接测量，必须对核与原子的因子(如自旋和核的电荷分布)进行修正之后，从 β 衰变速率的测量中提取。目前已观测到超过3000种不同的放射性核，其中有少数几种的 β 衰变比较简单，修正量很小。长寿命铝的同质异能激发态 ^{26m}Al 是其中之一， ^{26m}Al 与 Al 的基态能量差很小，但角动量差很大，因而通过 γ 跃迁衰变的概率很低，有较长的寿命。最近，已非常精确地测量了 ^{26m}Al 的 β 衰变速率，可以对 V_{ud} 给出限制。

Plattner等研究了 ^{26m}Al 核的电荷半径如何直接影响 V_{ud} 的确定，从而检验CKM矩阵的幺正性。虽然 ^{26}Al 基态的电荷半径已经有报道，但是 ^{26m}Al 的半径还不清楚，用于计算 V_{ud} 所需的数值只能靠外推法。这

其中的挑战来自于铝的同质异能态 ^{26m}Al 的半衰期只有6.35 s而基态的半衰期为717000年，以及 ^{26m}Al 的产额很低。Plattner等使用两个不同的实验来研究 ^{26m}Al ：CERN的放射性离子束装置ISOLDE上的COLLAPS实验和芬兰Jyväskylä大学加速器实验室的离子导向在线同位素分离器上的IGISOL CLS实验。这些实验使用不同的核反应产生并提取出 ^{26}Al 和 ^{26m}Al ，得到这两种核态的不同产额比。

通过这两个实验，Plattner等提取出 ^{26m}Al 的电荷半径为 3.130 ± 0.015 fm，明显高于以前报道的 3.040 ± 0.020 fm。研究人员研究了这一新数值如何影响CKM矩阵的幺正性。他们发现，CKM矩阵的最上行从 0.99848 ± 0.00070 变动到 0.99856 ± 0.00070 ，更接近幺正性。

初看起来，这个数值与1相差至少2个标准偏差。但是，考虑到数百个输入量中一个量(^{26m}Al 电荷半径的测量值)的变动对CKM矩阵的幺正性所产生的影响，人们不禁要再思量某些系统误差是否被低估了。因此，应该进一步探究与确定 V_{ud} 有关的不同观测量。对于 ^{26m}Al ，所评估的电荷半径可以通过使用所谓的 μ 子X射线谱学，直接测量基态 ^{26}Al 的电荷半径来改进。此外，需要精确测定更多同位素的电荷分布。Plattner等的发现使我们向着是否有第4代夸克前进了一步，但是在得到最终答案之前还需要更多的实验结果。



标准模型包括3代夸克：上夸克(u)与下夸克(d)；粲夸克(c)与奇异夸克(s)以及顶夸克(t)与底夸克(b)。我们当前的认知不完全排除可能存在第4代夸克