

# 研究D介子混合

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Soeren Prell. *Physics*, September 7, 2021)

新粒子可在高能粒子碰撞中直接产生，另一种寻找新粒子的途径则涉及量子力学过程。在这个过程中，一个粒子转变成自己的反粒子，然后再转回来。这种现象称为混合，可以在中性介子中发生，首先于1950年在 $K^0$ 介子中被观测到。混合会受到介子振荡过程中耦合到的其他粒子的影响，从而可能发现这些粒子。

介子的寿命很短。但是4个中性介子—— $K^0$ (由一个d夸克和一个 $\bar{s}$ 反夸克组成)， $D^0(c\bar{u})$ ， $B_s^0(d\bar{b})$ ，以及 $B_s^0(s\bar{b})$ 的寿命足够长，因此它们可在衰变前转变成自己的反粒子。每一个可观测的粒子P都是一个纯粒子态 $P^0(K^0, D^0, B_s^0, \text{或} B_d^0)$ 和一个纯反粒子态 $\bar{P}^0$ 的线性组合。对于两个态叠加的量子系统，薛定谔方程预测了P振荡随时间的演化，介子振荡是因为 $P^0$ 和 $\bar{P}^0$ 不是系统哈密顿量的质量本征态。本征态是 $P^0$ 和

$\bar{P}^0$ 的对称与反对称的组合，各本征态具有不同的质量和寿命。混合速率由两个参数控制： $x$ (正比于两个本征态的质量差)和 $y$ (正比于两者的寿命差)。

介子混合是通过 $P^0$ 和 $\bar{P}^0$ 衰变的中间态发生的。例如， $D^0$ 和 $\bar{D}^0$ 可以衰变成一对 $\pi$ 介子。其他中间态有虚粒子，如W玻色子，其质量比 $D^0$ 介子大得多。如此重的中间态会影响 $x$ 值，对 $x$ 测量可能揭示对撞机不能产生的重粒子的存在。1987年 $B_s^0$ 混合的发现测得了一个 $x$ 值，意味着中间态涉及一个重粒子——顶夸克。

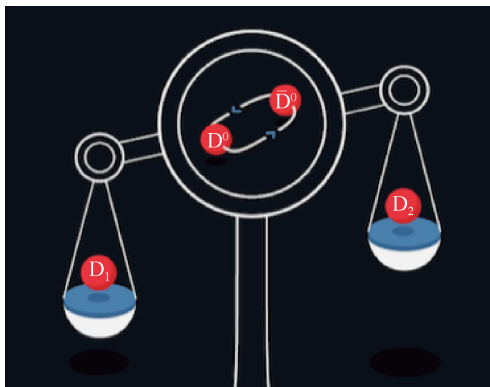
$D^0$ 是4个 $P^0$ 介子中唯一尚未测量 $x$ 值的，也是其中唯一包含上类夸克(u, c, t)的介子，而其他的则包含下类夸克(d, s, b)。D混合可能比另外3种介子与其他粒子的耦合更灵敏。

合作组LHCb在2013年发现了 $D^0-\bar{D}^0$ 混合，所使用的技术是在D介子生成后经13个不同延迟时间研究D介子( $D^0$ 或 $\bar{D}^0$ )。他们比较了两种衰变的速率，第一种是所谓的“正确符号”(RS)衰变 $D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ ，由于弱相互作用有利于这种衰变，从而以高速率进行。第二种是“错误符号”(WS)衰变 $D^0 \rightarrow K^+ \pi^+$ ，可直接通过不利的 $D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ 衰变或者间接地通过 $D^0$ 到 $\bar{D}^0$ 的振荡，再通过有利的衰变到同样的末态 $K^+ \pi^-$ 。与RS衰变相比，WS衰变是受到“抑制”的。

所观察到的WS—RS比值随时间线性地增加，这是由于介子混合而产生 $\bar{D}^0$ 的信号。从该实验只能确定 $y$ ，这是因为他们观测到的WS—RS信号与 $x$ 无关。

在新的测量 $D^0-\bar{D}^0$ 混合的实验中，LHCb使 $D^0$ 衰变到不同的末态——3粒子态 $K_s^0 \pi^+ \pi^-$ ，其中 $K_s^0$ 是中性短寿命的K介子。几个中间态中有一些涉及矢量介子 $K^*$ 。例如，WS衰变 $D^0 \rightarrow K^{*+} \pi^-$ ，继而发生 $K^{*+} \rightarrow K_s^0 \pi^+$ 衰变。相应的RS衰变为 $D^0 \rightarrow K^{*+} \pi^+$ ，继而发生 $K^{*+} \rightarrow K_s^0 \pi^+$ 衰变。实验中，RS衰变和WS衰变在3粒子像空间的不同区域累积，并在8个不同区域测量WS—RS比值。如理论指出的那样，每个区域中的比值对于不同 $x$ 和 $y$ 的组合很灵敏。通过分析这些区域中WS—RS比值与衰变时间的关系，可以确定 $x$ 和 $y$ 。

LHCb测量到 $x$ 与0相差7个标准偏差，并以同样的统计置信度确定了两个介子本征态之间的质量差为 $3 \times 10^{-39}$ g。 $x$ 值落在标准模型所预言的范围，因此没有提供关于新的重质量粒子的证据。然而，这一测量使理论家可以对可能存在的新粒子的性质提出约束。此外，对 $x$ 的测量将有助于寻找D系统中的电荷—宇称(CP)对称性破缺，或物质到反物质振荡( $D^0$ 到 $\bar{D}^0$ )与反物质到物质振荡( $\bar{D}^0$ 到 $D^0$ )之间的细微差别。 $D^0$ 与 $\bar{D}^0$ 行为之间的轻微不同是解决科学中的奥秘之一——为什么宇宙中物质远多于反物质的关键。



一个中性介子 $D^0$ 可以振荡到它的反粒子 $\bar{D}^0$ ，因为每个粒子是介子 $D_1$ 和 $D_2$ 的两个质量本征态的量子叠加。通过研究D介子振荡，LHCb合作组能够测量这两个本征态之间微小的质量差