
一项沉寂三十多年的测量，科学家利用量子纠缠找到突破口

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41858.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

一项沉寂三十多年的测量，科学家利用量子纠缠找到突破口。精准测量 Λ 超子的 β 衰变是精确检验标准模型的一条重要独立途径。三十多年前，美国费米实验室曾完成该领域最精确的测量，此后长期缺乏新的高精度实验进展。

如今，北京谱仪III（BESIII）实验国际合作组（以下简称BESIII合作组）首次在对撞机实验中利用量子纠缠与极化信息提取了卡比博—小林—益川（CKM）矩阵元 V_{us} ，为精确检验标准模型开辟了一条新路径。

这项工作首次证明，量子纠缠和极化信息能够显著提高重子 β 衰变的单事例测量灵敏度，更展示了极化测量在精确检验方面的巨大潜力。9月2日，相关研究成果发表于《自然》。

就像借助人工智能，从斑驳泛黄的老照片中复原出清晰的细节，既是中国科学家在基础物理前沿的一次精彩亮相，也为下一代大科学装置的物理目标埋下了深远伏笔。中国科学院院士马余刚评价，团队通过更精妙的思路，让已有数据焕发新生，最终成就了一项开创性工作。

粒子物理标准模型是描述基本粒子及粒子间强、弱和电磁相互作用的理论框架，寻找超出标准模型预期的实验现象是当前物理学最前沿课题之一。

在标准模型中，组成物质的基本粒子主要分为夸克和轻子。夸克有六种味，在弱相互作用下，一种味的夸克可以转变为另一种味，而不同夸克之间的转变强度不同。

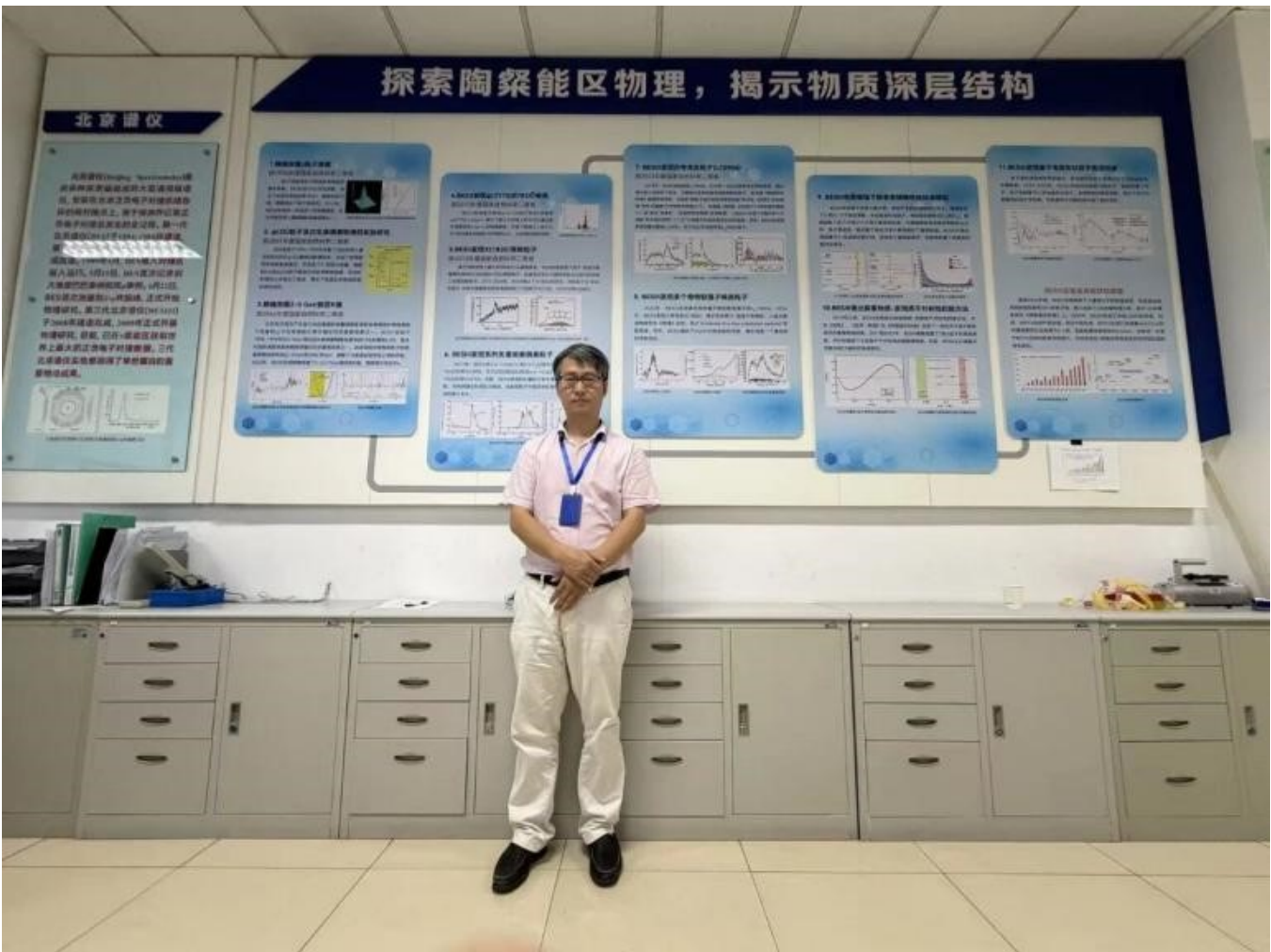
物理学家用一张 3×3 的数表来描述这些强度，即CKM矩阵。其中，每一个矩阵元描述一种夸克转变的强弱，如 V_{us} 对应的是奇异夸克向上夸克的转变。

按照标准模型的理论，CKM矩阵中的参数需要满足严格的幺正性关系，即每一行的三个矩阵元，它们的模的平方加起来必须等于1。

当前，不同衰变过程所测得的 V_{us} 之间存在差异，CKM矩阵的第一行幺正性检验也显示出一定的张力。学界迫切要求更多彼此独立的测量途径，来排除实验方法和理论计算中可能存在的影响。

Λ 超子的 β 衰变提供了一种理想途径。

论文实际通讯作者、复旦大学教授罗涛解释： Λ 超子由一个上夸克、一个下夸克和一个奇异夸克组成，在极短时间内就会衰变成其他粒子。衰变过程表现为奇异夸克转变为上夸克，同时产生一个电子和一个反中微子。该过程的发生概率既取决于 V_{us} ，也与描述 Λ 内部结构的形状因子密切相关。



罗涛。

然而，在实验中测量这一衰变过程并不容易。反中微子能够像幽灵一样穿透探测器，带走关键能量与动量。倘若仅观察 Λ 超子单侧衰变，又像只看了地图的一角，不同物理效应混在一起，难以分辨。

捕捉看不见的信息

罗涛团队历时六年半攻关，首次将量子纠缠和极化信息引入研究，开发了一套独特的联合角分布多变量拟合方法。

BESIII为这项突破提供了关键实验条件。BESIII是运行在中国科学院高能物理研究所北京正负电子对撞机II上的大型通用粒子探测器。在BESIII实验中，正负电子对撞湮灭产生 J/ψ 粒子，进而衰变为—对自旋严格关联的量子纠缠 Λ 超子与反 Λ 超子。 Λ 和反 Λ 的自旋状态相互关联、保持量子纠缠，可作为一个整体加以描述。

这意味着，反 Λ 一侧的衰变方向不仅可用于事例确认，更能为 Λ 一侧的初始自旋状态提供约束。罗涛表示，我们通过探测反 Λ 衰变成两个可以看见的粒子，反推出反 Λ 的信息，再通过量子纠缠关系，间接拿到 Λ 的产生信息，那些‘看不见的’信息就被我们算出来了。

在此基础上，团队将 Λ 与反 Λ 的产生、极化、量子纠缠和两侧衰变作为一个完整过程进行分析，对于看不见的反中微子，团队则利用能量动量守恒反推它的行踪。

把浪费掉的纠缠信息捡回来

在初步攻克衰变过程的测量方法难题后，团队又遇到了新的挑战——统计量严重不足。

由于 Λ 超子 β 衰变的发生概率极低，团队在100亿个 J/ψ 衰变事例中，最终仅筛选出1854个信号事例，信号样本仅为美国费米国家实验室早期实验的二十分之一。

罗涛回忆：我们于是开始思考，能否将反 Λ 一侧‘浪费掉’的纠缠信息‘捡回来’，并引入更多的拟合变量，用于辅助 Λ 超子 β 衰变的测量。



罗涛团队合影。

基于这个思路，团队将正反两侧的衰变方向联合起来。值得一提的是，原本在单侧容易混淆的衰变结构，在联合角分布中会呈现截然不同的特征，从而更易于区分。

最终，团队对关键物理量的测量精度与费米实验室相当。团队还首次测得了 Λ 超子 β 衰变的绝对分支比、弱电耦合参数以及反 Λ 的多个衰变参数，并证明了量子纠缠和极化分析能够转化为重子 β 衰变中的实际测量信息。

目前，研究中用到的方法已推广至BESIII其他重子的衰变测量，并有望为下一代大科学装置发展提供重要方法论支撑。

这项工作是在重要方法论突破的基础上取得的重大物理进展。BESIII合作组发言人、中国科学院高能物理研究所研究员李海波指出，罗涛团队创造性地引入量子纠缠和极化分析，极大提升了单事例的物理信息提取效率，首次实现了对正反 Λ 超子 β 衰变关键参数的同步测量，为人们在BESIII能区精确检验CKM幺正性开辟了一条新路径。（来源：中国科学报 江庆龄 邓晗 郑艺）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41586-026-10818-8>

作者：罗涛等 来源：《自然》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发