

## 新研究揭示彭罗斯过程与克尔黑洞的能量提取机制

意大利佩斯卡拉 – 2025年3月13日

一项最新研究发表于《物理评论快报》（Physical Review Letters），深入探讨了长期争议的彭罗斯过程（Penrose process），为从克尔黑洞（Kerr black hole）中提取旋转能量提供了新的理论视角。该研究由ICRANet联合中国科学与技术大学等多个国际科研机构合作完成，为天体物理黑洞的能量提取机制提供了新的物理洞见。

研究论文《克尔黑洞中的单次与重复彭罗斯过程》（Single versus the Repetitive Penrose Process in a Kerr Black Hole）重新审视了1969年罗杰·彭罗斯（Roger Penrose）提出的经典模型，研究了在黑洞的能层（ergosphere）内，大质量粒子单次衰变为两个粒子时如何实现能量提取。研究团队通过严格计算证明，与过去的一些质疑不同，单次彭罗斯过程确实能够有效提取黑洞的旋转能量。在最大旋转的克尔黑洞情况下，其最高理论能量提取效率可达14.5%。

此外，研究还探讨了重复彭罗斯过程（repetitive Penrose process）的可能性，这一设想最早由米斯纳、索恩和惠勒（Misner, Thorne, and Wheeler）在1973年的《引力论》（Gravitation）中提出。研究团队理论分析了一种理想化的重复衰变过程，如果直接实现，似乎可以提取黑洞全部的旋转能量。然而，研究发现，这种线性重复过程存在严重问题，即违反能量守恒定律。团队指出，这一矛盾可通过合理考虑黑洞在能量提取过程中不可约质量（irreducible mass）增长所引入的非线性效应来解决。这一修正方案将在即将发表于《物理评论研究》（Physical Review Research）的一篇伴随论文中详细阐述，为符合基本物理守恒定律的能量提取机制奠定基础。

论文第一作者雷莫·鲁菲尼（Remo Ruffini）教授表示：“我们的研究明确了彭罗斯过程在克尔黑洞能量提取中的作用。我们证明，单次彭罗斯过程能够高效运作，无需进行先前认为必要的修正。此外，我们发现了朴素重复方法的固有局限性，并揭示了质量亏损（mass defect）的重要约束。这一关键结果由鲁菲尼教授和他的学生张书睿（来自中国科学技术大学）共同提出，并将在未来发表。”

该研究对天体物理学具有重要意义，特别是在伽马射线暴（GRBs）和活动星系核（AGNs）等高能天文现象的研究中，黑洞的旋转能量可能发挥关键作用。未来研究将基于这些结果，进一步探索黑洞动力学及其在天体物理中的潜在应用。

相关论文链接：

- 《物理评论快报》论文：<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.081403>
- 《物理评论研究》论文：<https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.7.013203>