

新研究揭示不可约质量在克尔黑洞能量提取中的作用

意大利佩斯卡拉 – 2025年3月13日

一项最新研究发表于《物理评论研究》（Physical Review Research），推进了对彭罗斯过程（Penrose process）的理解，并完善了克尔黑洞（Kerr black hole）能量提取机制的理论框架。该研究是在此前发表于《物理评论快报》（Physical Review Letters）的工作基础上进行的，明确了重复彭罗斯过程的局限性，并确立了不可约质量在黑洞动力学中的核心作用。

研究论文《不可约质量在克尔黑洞重复彭罗斯能量提取过程中的作用》（Role of the irreducible mass in repetitive Penrose energy extraction processes in a Kerr black hole）揭示了黑洞能量提取的高度非线性特性。研究团队由 ICRANet 联合中国科学与技术大学等多个国际科研机构组成，研究结果表明，黑洞不可约质量的增加显著限制了重复彭罗斯过程的效率，从而推翻了关于能够完全提取黑洞旋转能量的早期假设。

“我们的研究表明，与先前的理论预期不同，彭罗斯过程并不是一个线性、尺度不变的机制。”研究主要作者之一雷莫·鲁菲尼教授（Remo Ruffini）指出，“相反，黑洞不可约质量的增加远快于所提取的能量，最终使得该过程在有限次数的迭代后停止。”

研究的主要结论包括：

非线性限制：研究表明，在克尔黑洞的能层内，每次粒子衰变都会导致黑洞不可约质量增加，这一增长很快超过所提取的能量，从而限制了过程的持续性。

有限的能量提取：重复彭罗斯过程在黑洞的旋转能量被完全提取之前就会停止。对于最大旋转的克尔黑洞，其旋转能量最多只能提取 29%（相对于黑洞总质量）。在特定能层半径处，假设衰变粒子的质量占黑洞质量的 1%，能量提取最多可持续 8 至 34 次迭代，最终仅能提取 0.4% 至 1% 的黑洞质量，同时使旋转能量减少 17% 至 50%。

推翻简单的重复模型：这一发现修正了早期关于“无限次迭代可提取 100% 黑洞旋转能量”的假设。研究表明，该过程具有内在的自限制性，提取的能量主要转化为黑洞的不可约质量，而非向无穷远释放。

一段动画演示了该研究中对最大旋转克尔黑洞进行重复彭罗斯过程的模拟，相关视频可在以下链接观看：

www.icranet.org/documents/video_dot1.mp4

www.icranet.org/documents/video_dot2.mp4

www.icranet.org/documents/video_dot3.mp4

这一研究结果对黑洞能量提取的天体物理模型具有重要意义，尤其是在伽马射线暴（Gamma-ray bursts）及其他高能宇宙事件的潜在驱动机制方面。

该研究是团队此前发表于《物理评论快报》的论文《克尔黑洞中的单次与重复彭罗斯过程》的延续与补充。两项研究共同修正了传统彭罗斯过程的理论框架，并提出在尽量减少不可约质量增加的前提下，寻找替代能量提取机制的必要性。在这方面，电磁相互作用提供了一个可能的方向，该领域的最新研究已由本团队进行深入探索。

彭罗斯过程的研究始于五十年前，并在过去几十年间不断发展。两位主要贡献者，罗杰·彭罗斯（Roger Penrose）和雷莫·鲁菲尼，至今仍保持学术交流，并探讨进一步的研究方向。相关信件可见附件一“罗杰·彭罗斯致雷莫·鲁菲尼，2025年2月23日”及附件二“雷莫·鲁菲尼致罗杰·彭罗斯，2025年2月26日”。

这一研究结果具有重要的科学意义。自 1972 年在纽约-得克萨斯会议上首次提出天鹅座 X-1 为 X 射线双星系统中的黑洞以来，全球多个地面及空间天文台已观测到遍布整个宇宙的黑洞，其红移范围从银河系内的黑洞一直延伸到宇宙最早期（红移约 10 及以上）。

其中，恒星级黑洞质量一般在 2 至 10 倍太阳质量，由重子物质塌缩形成。而超大质量黑洞质量在 4.6×10^6 至 10^{10} 倍太阳质量之间，其起源与暗物质有关，早在红移 10 时便已形成，并在红移 2 时表现为类星体。

在彭罗斯-鲁菲尼的学术交流中，这一问题被列为研究的优先方向。ICRANet 研究团队正在不断推进该领域的研究（鲁菲尼和维雷什恰金，2025年3月；德拉瓦莱、鲁菲尼和王

瑜，2025年3月）。他们的研究涉及同时包含暗物质与重子物质的黑洞，并推导其演化规律。

这一研究方向的重要性还与 NASA 通过詹姆斯·韦布空间望远镜观测到的小红点（Little Red Dots）密切相关。

研究论文（《物理评论研究》）：

<https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.7.013203>

伴随论文（《物理评论快报》）：

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.081403>

关于研究团队

本研究由 ICRA Net、ICRA、意大利国家天体物理研究所、中国科学技术大学、费拉拉大学、墨西哥国立自治大学及阿尔-法拉比哈萨克国立大学等机构的研究人员共同完成。研究结合广义相对论与高能天体物理，推进了黑洞能量学的理论发展。

联系方式

雷莫·鲁菲尼，ICRA Net 主任

E-mail: ruffini@icra.it

电话: (+39) 085 2305 4201

手机: (+39) 339 475 2566