



超大质量黑洞的伽马射线辐射

刘均荣¹, 王建民^{1,2,3*}, 李剑^{4,5*}

1. 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理全国重点实验室, 北京 100049

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

3. 中国科学院国家天文台, 北京 100020

4. 中国科学技术大学天文学系, 合肥 230026

5. 中国科学技术大学天文与空间科学学院, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: wangjm@ihep.ac.cn; jianli@ustc.edu.cn

Gamma-ray emission from supermassive black holes

Jun-Rong Liu¹, Jian-Min Wang^{1,2,3*} & Jian Li^{4,5*}

¹ State Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

² School of Astronomy and Space Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100020, China

⁴ Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

⁵ School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

* Corresponding authors, E-mail: wangjm@ihep.ac.cn; jianli@ustc.edu.cn

doi: 10.1360/CSB-2026-0078

费米大面积望远镜(Fermi-Large Area Telescope, Fermi-LAT)自发射升空以来, 已持续在轨运行超过17年. 随着观测数据的不断积累, 人们对银河系外伽马射线辐射源的认知逐渐深化, 如射电强活动星系核(active galactic nucleus, AGN)、恒星形成星系等, 这些发现不断革新着人们对伽马射线辐射机制的理解. 然而, 来自射电宁静活动星系核冕区的伽马射线辐射却一直没有被探测到^[1,2]. 最近, 我们通过分析Fermi-LAT长达15年的累积数据, 首次在射电宁静活动星系核(图1(a))中探测到显著的来自冕区的伽马射线辐射信号, 其中发现的“延展冕区”数百GeV的伽马射线辐射也有可能来自核区星团(nuclear star cluster, NSC)^[3]. 本文将简要介绍这一研究进展.

星系核心通常隐藏着超大质量黑洞(supermassive black hole, SMBH), 它们通过吸积过程释放巨大能量, 表现为活动星系核. 其中射电强活动星系核的辐射覆盖从射电到伽马射线的整个电磁波谱. 在高频波段, 源自超大质量黑洞的相对论性喷流是公认的强伽马射线辐射源. 然而, 对于缺乏射电喷流的宁静活动星系核, 虽然理论预言其超大质量黑洞周围的冕区可产生伽马射线辐射, 但近三十年来大量的观测尝试

仍未获得确凿证据. 超大质量黑洞周围的冕区是位于黑洞附近几个引力半径范围内的磁约束体系^[4], 磁场强度约为10 G^[5]. X射线观测已证实其中存在热电子气体, 射电观测也揭示了非热电子的存在^[5]. 这些非热电子可能来源于激波加速或磁重联过程^[6], 随后通过逆康普顿散射与来自吸积盘上的光学/紫外光子作用, 可产生伽马射线辐射^[7]. 除上述轻子过程外, 理论研究表明, 激波或磁重联过程同样可以加速质子. 高能质子通过与光子或其他质子的碰撞(强子过程)也可产生伽马射线辐射^[6].

我们以基于Swift-爆发预警望远镜(Burst Alert Telescope, BAT)开展的活动星系核光谱巡天(BAT AGN Spectroscopic Survey, BASS)第二次数据释放样本中的射电宁静活动星系核为研究对象^[8], 对其冕区再次开展了系统的伽马射线辐射搜索. 选取这类天体的原因在于, 它们通常在超硬X射线波段(BAT能段: 14~195 keV)辐射较强, 暗示其冕区可能具备产生伽马射线辐射的条件. 我们从BASS样本中筛选出射电宁静的非耀变体活动星系核, 将其与Fermi-LAT发布的4FGL-DR4星表进行交叉匹配, 并对相应的伽马射线数据进行了系统分析. 由此获得一个包含624个射电宁静非耀变体活动星系核

引用格式: 刘均荣, 王建民, 李剑. 超大质量黑洞的伽马射线辐射. 科学通报, 2026, 71: 2777–2779

Liu J-R, Wang J-M, Li J. Gamma-ray emission from supermassive black holes (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 2777–2779, doi: 10.1360/CSB-2026-0078

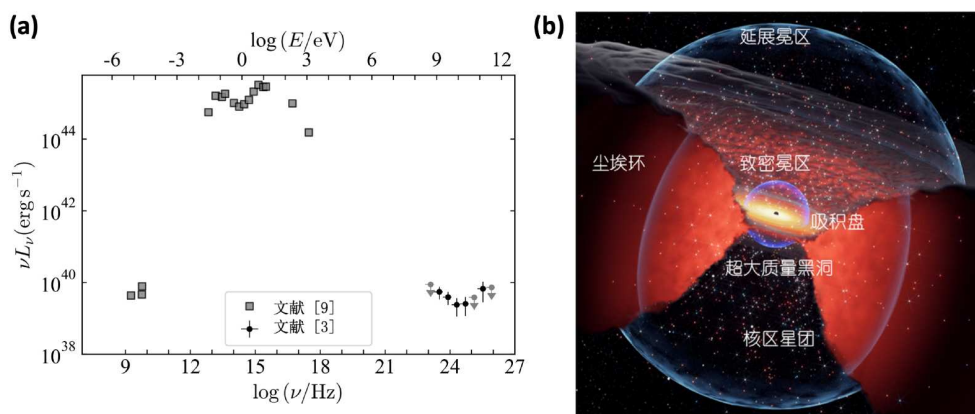


图1 (网络版彩色)(a) 射电宁静活动星系核的平均能谱分布^[3,9]. (b) 活动星系核模型示意图. 观测到的伽马射线辐射来自于致密冕区和延展冕区

Figure 1 (Color online) (a) The average spectral energy distribution of radio-quiet AGNs^[3,9]. (b) Schematic of the active galactic nucleus (AGN) model. The observed gamma-ray emission is produced by both the compact and extended coronas

的样本, 分析表明这些源均未达到Fermi-LAT对单个伽马射线源的探测灵敏度. 为在Fermi-LAT的探测灵敏度与样本容量之间取得平衡, 我们选取了距离在60 Mpc以内的邻近塞弗特星系. 同时, 考虑到活动星系核冕区的活动水平通常与X射线流量呈正相关, 我们进一步筛选出其中X射线辐射较强的源. 最终, 我们得到了一个由37个邻近、超硬X射线辐射强的射电宁静非耀变体活动星系核构成的样本.

为探测该子样本的伽马射线辐射并研究其平均性质, 我们将所有源在1~300 GeV能段的检验统计量(test statistic, TS)轮廓进行叠加分析, 首次在该样本中探测到显著的伽马射线信号. 样本的平均距离为36.4 Mpc, 对应的平均伽马射线光度为 $L_{1-300 \text{ GeV}} = 1.5 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$. 为排除所观测到的伽马射线辐射可能来自活动星系核冕区之外的其他起源, 我们进行了多项检验. 首先, 我们从BASS样本中选取了27个源构建对照组, 其选取标准与子样本相同, 但具有较低的X射线流量, 以对应相对较低的冕区活动水平. 在该对照组中未检测到显著的伽马射线辐射. 此外, 我们随机选取了37个空天区位置进行背景叠加分析, 同样未检测到显著信号, 表明子样本中探测到的信号并非来自背景涨落. 最后, 我们逐一评估并排除了其他可能的过程对观测伽马射线辐射的贡献. 基于BPT图的分析, 我们确保了样本中不含恒星形成星系, 8~1000 μm 红外积分光度估算出, 即使存在较弱的恒星形成活动, 其所贡献的伽马射线辐射光度仅为 $2.16 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$, 远低于实际探测值. 其次, 尽管子样本中的源均为射电宁静的活动星系核, 仍不能完全排除微弱的喷流活动. 然而, 我们发现其射电光度与X射线光度之比满足 $L_{1.4 \text{ GHz}}/L_{14-195 \text{ keV}} \sim 10^{-5}$ 的趋势, 表明射电辐射很可能源自冕区而非喷流. 此外, 对照样本具有与子样本相近的射电光度(分别为 $10^{37.5}$ 与 $10^{37.4} \text{ erg s}^{-1}$), 但并未探测到伽马射线辐射, 这说明即便存在

弱喷流, 其所能产生的伽马射线光度也不足以解释当前的探测结果. 最后, 虽有理论提出活动星系核的外流与星际介质相互作用可产生伽马射线辐射, 但该机制迄今缺乏观测证据, 且子样本中的源并未表现出很强的外流特征, 因此我们亦不倾向于以外流模型来解释所观测到的伽马射线辐射.

如图1(a)所示, 我们得到了该样本的平均多波段光谱能量分布(spectral energy distribution, SED)^[3,9]. 活动星系核冕区的几何结构对解释SED具有关键作用, 目前已有多种模型被提出, 包括灯塔模型、平面平行与半球形模型, 以及斑块冕模型. 我们采用最简单的球对称几何进行分析. 传统冕区具有约10倍引力半径的尺度(以下简称“致密冕区”), 其中热电子占主导地位, 会产生高密度的软X射线光子, 导致能量 $\geq 10 \text{ GeV}$ 的伽马射线光子极易通过电子对产生过程($\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$)被吸收, 从而无法逃逸. 因此, 我们引入一个尺度约为 2.7×10^6 倍引力半径的延展区域(以下简称“延展冕区”), 用以解释能量高于10 GeV的伽马射线(示意图见图1(b)). 在延展冕区内, 非热电子占主导地位, X射线光子密度随冕区尺度 R 呈平方反比下降, 从而显著抑制了电子对产生过程. 致密冕区的探测结果为长期存在的理论预期提供了有力的观测支持, 而延展冕区的存在则是一个意外发现. 一种颇具前景的解释是: 类似伽马射线暴中的火球爆炸机制, 致密X射线冕区中产生的电子-正电子对会发生膨胀, 从而形成延展冕区结构.

尽管观测结果可能暗示X/伽马射线冕区存在两个独立的空间结构, 其具体形成机制目前尚不明确. 实际上, 已有证据显示活动星系核冕区可发生膨胀, 表明其并非处于严格的静态平衡状态^[10]. 膨胀冕区在物理本质上区别于静态冕区, 其膨胀过程可能由电子对产生效应所驱动, 并以类似伽马射线暴中火球的方式向外扩展, 从而在延展冕区与致密冕区之

间建立物理关联^[11]。在此模型框架下,电子可在冕区膨胀过程中被周围介质产生的激波再次加速。未来有必要对冕区膨胀过程开展更深入研究,以便将电子对等离子体理论模型与观测到的 ≥ 10 GeV 能谱进行定量比较。一方面,对该样本在数百GeV至TeV能段进行观测,有望对可能的理论模型施加更强约束,并为理解超大质量黑洞的相关物理参数(如自旋等)提供新线索^[12]。另一方面,在TeV以上能段,借助高海拔宇宙线观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)以及未来的切伦科夫望远镜阵列(Cherenkov Tele-

scope Array, CTA)等设备开展进一步探测,将扩展射电宁静活动星系核的能谱测量范围,并对其中粒子加速所能达到的最高能量给出更强约束。此外,热冕中高能质子碰撞产生的伽马射线辐射及其可能伴随的中微子贡献亦不可忽视。这类高能辐射也可能源自活动星系核宿主星系中的核区星团(典型尺度 $\lesssim 10$ 秒差距)^[13]。未来对活动星系核冕区伽马射线与射电辐射光变特征的联合研究,也将有助于深入理解其动态演化过程,并揭示其中电子对产生机制在联系致密和延展冕区中的具体作用。

致谢 感谢国家自然科学基金(12333003, 12273038)资助。

推荐阅读文献

- 1 Cillis A N, Hartman R C, Bertsch D L. Stacking searches for gamma-ray emission above 100 MeV from radio and Seyfert galaxies. *Astrophys J*, 2004, 601: 142–150
- 2 Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. Search for gamma-ray emission from X-ray-selected seyfert galaxies with *Fermi*-LAT. *Astrophys J*, 2012, 747: 104
- 3 Liu J R, Wang J M, Abdollahi S, et al. Fermi detection of gamma-ray emission from the hot coronae of radio-quiet active galactic nuclei. *Nat Astron*, 2025, 9: 1086–1097
- 4 Fabian A C, Zoghbi A, Ross R R, et al. Broad line emission from iron K- and L-shell transitions in the active galaxy 1H 0707-495. *Nature*, 2009, 459: 540–542
- 5 Inoue Y, Doi A. Detection of coronal magnetic activity in nearby active supermassive black holes. *Astrophys J*, 2018, 869: 114
- 6 Inoue Y, Khangulyan D, Inoue S, et al. On high-energy particles in accretion disk coronae of supermassive black holes: implications for MeV gamma-rays and high-energy neutrinos from AGN cores. *Astrophys J*, 2019, 880: 40
- 7 Inoue Y, Khangulyan D, Doi A. Gamma-ray and neutrino signals from accretion disk coronae of active galactic nuclei. *Galaxies*, 2021, 9: 36
- 8 Koss M J, Ricci C, Trakhtenbrot B, et al. BASS. XXII. The BASS DR2 AGN catalog and data. *Astrophys J Suppl Ser*, 2022, 261: 2
- 9 Elvis M, Wilkes B J, McDowell J C, et al. Atlas of quasar energy distributions. *Astrophys J Suppl Ser*, 1994, 95: 1
- 10 Kara E, Barth A J, Cackett E M, et al. UV–optical disk reverberation lags despite a faint X-ray corona in the active galactic nucleus Mrk 335. *Astrophys J*, 2023, 947: 62
- 11 Svensson R. Physical processes in active galactic nuclei. In: Mihalas D, Winkler K H A, eds. IAU Colloq. 89: Radiation Hydrodynamics in Stars and Compact Objects. Vol. 255. Berlin: Springer-Verlag Publishers, 1986. 325
- 12 Wang J M, Li Y R, Wang J C, et al. Spins of the supermassive black hole in M87: new constraints from TeV observations. *Astrophys J*, 2008, 676: L109–L112
- 13 Neumayer N, Seth A, Böker T. Nuclear star clusters. *Astron Astrophys Rev*, 2020, 28: 4