

活动星系核盘中恒星的形成和演化

王建民^{1,2,3*}, 袁业飞^{4*}, 吴庆文^{5*}

1. 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心, 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系, 中国科学院星系与宇宙学研究重点实验室, 合肥 230026

5. 华中科技大学物理学院天文系, 武汉 430074

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

Formation and evolution of stars in active galactic nucleus disks

Jianmin Wang^{1,2,3*}, Ye-Fei Yuan^{4*} & Qingwen Wu^{5*}

¹ Key Laboratory for 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 Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100020, China

⁴ Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, CAS Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Hefei 230026, China

⁵ Department of Astronomy, School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

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

doi: 10.1360/TB-2024-1382



王建民

中国科学院高能物理研究所研究员. 长期从事类星体观测与理论研究, 首次提出超大质量黑洞吸积盘上的致密天体并合过程、高能爆发与引力波辐射现象, 率先实现将反响映射观测与VLTI光干涉结合(SARM)测量超大质量黑洞/双黑洞与宇宙学几何距离. 2019年获得中国天文学会黄润乾天体物理奖.

作为20世纪60年代四大发现之一的类星体一直是天文与天体物理的热点研究前沿. 经过长达半个多世纪的观测与理论研究, 以超大质量黑洞吸积为能源机制的模型成为主导学界的“标准模型”. 但是, 如何建立这一主导过程? 即超大质量黑洞如何形成? 吸积盘如何形成? 核区结构(即尘埃环、宽线区以及吸积盘)如何形成? 这是始终未解决的重大问题. 有几条重要观测信息为解决这些问题提供了思路.

第一, 通过对类星体光谱分析, 人们发现类星体的金属丰度不随宇宙学红移演化. 这强烈暗示活动星系核(active galactic nucleus, AGN)盘存在大量的恒星形成. 恒星演化晚期频繁超新星爆发导致金属增丰, 也就是说AGN盘是一个炼金炉. 恒星死亡产生大量的致密星, 部分形成致密星双星. 双致密星的并合可能产生引力波暴和伽马暴^[1]. 理论预测最近可能得到观测证实.

第二, 引力波源GW190521与一个来自AGN的光学暂现源成协, 说明该黑洞-黑洞并合可能起源于AGN环境^[2]. 引力波源GW190521作为AGN吸积盘中双黑洞并合的热门候选体, 开启了该系列研究的高潮. 人们认为其起源于AGN吸积盘中双黑洞并合, 这既因为证据显示该事件的宿主是类星体SDSS J1249+3449, 又由于探测到两个并合黑洞的质量(分别为 $85M_{\odot}$ 和 $66M_{\odot}$)都处在质量间隙中^[3], 并

引用格式: 王建民, 袁业飞, 吴庆文. 活动星系核盘中恒星的形成和演化. 科学通报, 2025, 70: 310–312

Wang J, Yuan Y-F, Wu Q. Formation and evolution of stars in active galactic nucleus disks (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 310–312, doi: 10.1360/TB-2024-1382



袁业飞

中国科学技术大学讲席教授。目前担任中国天文学会副理事长，安徽省天文学会理事长。主要从事相对论天体物理的理论研究。



吴庆文

华中科技大学教授，现任华中科技大学物理学院副院长、天文系主任。从事黑洞相关天体物理研究。

且并合前的轨道偏率不为零^[4]。另外，截至2024年12月5日，地面引力波天文台LIGO-Virgo-KAGRA (LVK)已成功观测到257例黑洞-黑洞/中子星并合的引力波事件，其中只有两例双中子星并合事件：GW170817、GW190425和7例可能为中子星-黑洞的并合事件^[5]。LVK探测到较多的双致密星并合事件暗示它们可能起源于AGN盘。

第三，伽马暴GRB191019A与一个年老的星系成协，该伽马暴可能起源于AGN盘环境中双中子星的并合^[6]。AGN盘中的恒星迁移到中心超大质量黑洞附近会被潮汐瓦解，目前已经观测到150多个候选体，这也为探测宇宙中沉寂的黑洞和黑洞活动的动态演化提供了新途径。当恒星级致密天体迁移到中心大黑洞周围时，会形成极端质量比旋进系统，这是2030~2035年空间引力波(LISA、天琴、太极)的核心研究对象之一。当下及未来十年的多信使手段为研究超大质量黑洞吸积盘中恒星的形成和演化提供了重要的机遇。作为超大质量黑洞吸积以外的能源机制，恒星爆发、恒星级致密天体的超爱丁顿吸积等剧烈活动过程，对黏滞产生和气体输运、核区星团形成以及活动星系核结构形成等将起到关键作用；同时，星系核心环境作为星系核球和超大质量黑洞的桥梁，对理解超大质量黑洞和星系演化也将扮演关键作用。

国内在这一领域起步较早，具有非常好的研究基础。受到观测的驱动，AGN盘中的恒星形成和演化越来越受到天文学家的重视，其中国内学者和海外华人文学家在该领域非常活跃。我们分别于2023年6月和2024年5月，在中国科学院紫金山天文台和华中科技大学召开了第一届和第二届AGN吸积盘中“吸积致变恒星”(accretion-modified star, AMS)相关天体物理现象研讨会。本次专题的文章作者主要为第一届AMS会议的报告人。本专题涉及AGN盘中恒星或恒星级致密天体的形成、动力学演化、超爱丁顿吸积及其多信使的辐射特征等内容。王建民课题组^[7]讨论了AMS的超爱丁顿吸积以及相关的观测效应，并预言了银河系中心大质量黑洞周围存在一个质量约为 $40M_{\odot}$ 的卫星黑洞，这可能是距地球最近的EMRI (extreme mass ratio inspiral)系统。吴雪峰课题组^[8]介绍了AGN吸积盘中超新星前身星的动力学演化、超新星爆发能量来源及爆发时的辐射特征，并讨论了近邻(红移 $z<0.1$)AGN吸积盘中的超新星事件被如EP (Einstein Probe)这样的X射线卫星以及LSST (Large Synoptic Survey Telescope)、WFST (Wide Field Survey Telescope)这样的宽视场光学巡天望远镜所探测到的可能性。吴庆文课题组^[9]介绍了大质量黑洞周围恒星或恒星级天体及动力学演化，重点讨论了潮汐瓦解(tidal disruption event, TDE)事件和极端质量比旋进系统(extreme mass ratio inspiral, EMRI)的形成，并指出在多信使时代，特别是未来空间引力波时代(天琴/太极/LISA)，星系核区TDE、EMRI相关研究将为理解星系核心环境、黑洞与星系共同演化等提供全新信息。韩文标课题组^[10]简要综述了恒星级双黑洞在AGN盘上的形成渠道以及可能的电磁对应体，重点讨论了如何通过引力波和多波段的电磁观测对模型进行检验。陈弦课题组^[11]回顾了致密天体在活动星系核吸积盘中迁移的主要机制，其中包括与吸积盘撞击导致的星体角动量损失、潮汐力矩激发的密度波对星体的反作用、气体非开普勒运动导致的星体吸积和动力学摩擦效应，以及最近提出的一些新机制，如热力矩以及第三体的引力影响等。此外，他们还总结了与致密天体迁移过程相关的天文学观测现象，比如类星体金属增丰，以及恒星级双致密天体或者极端质量比旋进产生的引力波等。刘彬^[12]介绍了双星(致密星或普通恒星)如何在中心超大质量黑洞的长期影响下演化直至发生并合，总结了由超大质量黑洞诱导产生并合这一渠道的关键结论，并概述了潜在的可观测特征。李亚平^[13]介绍了如何利用多维度的流体数值模拟研究AGN吸积盘上双黑洞形成、单(双)黑洞吸积、双黑洞演化等方面的工作，并介绍了本领域仍然存在的重要问题和研究方向。王凯^[14]简要综述了AGN盘上不同天体物理暂现源爆发过程中的高能中微子辐射研究进

展,具体包括吸积盘中双恒星级黑洞并合遗迹黑洞吸积气体物质形成的喷流和外流星风、伽马射线暴和超新星在与盘物质作用过程中的高能中微子生成,并展望了下一代高能中微子探测器对理解超大质量黑洞吸积盘中天体物理过程的机遇。AGN盘中的白矮星很可能会迁移到内区,并形成由双白矮星与中心超大质量黑洞组成的限制性三体系统。朱锦平等人在^[15]介绍了AGN盘中灾变性爆发事件的激波效应。在AGN盘中相对致密的环境中,剧烈的激波突破和激波冷却辐射显著影响其多波段的电磁观测特征。同时,激波的存在也会导致非热辐射和高能中微子的产生。袁业飞课题组^[16]介绍了他们如何通过 N 体动力学数值模拟研究AGN盘中白矮星-白矮星的碰撞率,以及可能的多波段电磁辐射特征。

由于AGN盘中恒星和致密星的形成和演化领域发展非常快,本专题无法全面覆盖所有的研究方向和研究进展。我们希望通过本专题,以及持续组织AMS系列会议,推动该领域的发展。最后,感谢所有作者、审稿人和编辑人员的大力辛勤付出。

参考文献

- Cheng K S, Wang J. The formation and merger of compact objects in the central engine of active galactic nuclei and quasars: Gamma-ray burst and gravitational radiation. *Astrophys J*, 1999, 521: 502–508
- Graham M J, Ford K E S, McKernan B, et al. Candidate electromagnetic counterpart to the binary black hole merger gravitational-wave event S190521g. *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 251102
- Abbott R, Abbott T D, Abraham S, et al. GW190521: A binary black hole merger with a total mass of $150 M_{\odot}$. *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 101102
- Samsing J, Bartos I, D’Orazio D J, et al. AGN as potential factories for eccentric black hole mergers. *Nature*, 2022, 603: 237–240
- Abbott R, Abbott T D, Acernese F, et al. GWTC-3: Compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the second part of the third observing run. *Phys Rev X*, 2023, 13: 041039
- Levan A J, Malesani D B, Gompertz B P, et al. A long-duration gamma-ray burst of dynamical origin from the nucleus of an ancient galaxy. *Nat Astron*, 2023, 7: 976–985
- Zhai S, Liu J R, Wang J M. Active galactic nuclei: metallicity and gravitational wave radiation (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 313–325 [翟朔, 刘均荣, 王建民. 活动星系核: 炼金炉与引力波辐射. 科学通报, 2025, 70: 313–325]
- Li F L, Hu M K, Lei X L, et al. Core-collapse supernova explosions in active galactic nucleus accretion disks (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 326–337 [李傅临, 胡茂凯, 雷享礼, 等. 活动星系核吸积盘内的超新星爆发. 科学通报, 2025, 70: 326–337]
- Fan X, Wang M Y, Wu Q W. The stellar-mass objects and their dynamics around supermassive black hole (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 338–352 [范霄, 王梦叶, 吴庆文. 大质量黑洞周围的恒星级天体及动力学演化. 科学通报, 2025, 70: 338–352]
- Yang S C, Tagawa H, Han W B. Active galactic nucleus formation channel for stellar binary black holes (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 353–362 [杨舒程, 田川宽通, 韩文标. 恒星级双黑洞的活动星系核形成通道. 科学通报, 2025, 70: 353–362]
- Peng P, Chen X. Migration of compact objects in active galactic nucleus accretion disks (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 363–372 [彭朋, 陈弦. 致密天体在活动星系核吸积盘中的迁移. 科学通报, 2025, 70: 363–372]
- Liu B. Binary mergers near the supermassive black hole—Secular effect in the orbital evolution (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 373–386 [刘彬. 超大质量黑洞附近的双星并合——动力学演化的长期效应. 科学通报, 2025, 70: 373–386]
- Li Y P. Accretion and dynamical evolutions of stellar mass black holes in active galactic nucleus disks (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 387–397 [李亚平. 活动星系核吸积盘上恒星级黑洞吸积和动力学演化. 科学通报, 2025, 70: 387–397]
- Wang K. Research progress and prospects of high-energy neutrino radiation in supermassive black hole accretion disks (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 398–410 [王凯. 超大质量黑洞吸积盘中的高能中微子辐射研究进展及展望. 科学通报, 2025, 70: 398–410]
- Zhu J P, Yu Y W, Zhang B. Electromagnetic and high-energy neutrino signals from catastrophic explosion events in active galactic nucleus accretion disks (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 411–422 [朱锦平, 俞云伟, 张冰. 活动星系核吸积盘内灾变性爆发事件的电磁和高能中微子信号. 科学通报, 2025, 70: 411–422]
- Zhang S R, Luo Y, Yuan Y F. White dwarf collisions in AGN disks and the observational effects (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 423–431 [张书瑞, 罗沿, 袁业飞. 活动星系核吸积盘中白矮星碰撞及其观测效应. 科学通报, 2025, 70: 423–431]