



超大质量黑洞与星系的生死

王涛

南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023

E-mail: taowang@nju.edu.cn

Supermassive black holes and the life and death of galaxies

Tao Wang

School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

E-mail: taowang@nju.edu.cn

doi: [10.1360/CSB-2025-5106](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5106)

天文学的基本任务就是研究从恒星(包括行星系统)、星系、星系团到整个宇宙的形成演化规律。与其他自然学科相比,天文学的特点在于其研究对象的空间和时间尺度要大得多,显著区别于日常生活中的宏观物体。我国著名科学家钱学森同志曾将天文学的基本研究对象归为宏观之上的一个新的物质世界的层次——宇观。寻找宇观世界独特的运行规律就是天文学家的根本任务。

在天文学研究的对象中,相对小尺度的恒星的演化可以很大程度上用赫罗图来描述,最大尺度的整个宇宙的演化可以用通过宇宙微波背景测量的基本宇宙学参数来描述。而恰恰是尺度位于中间的星系(以及星系团)的形成演化,目前为止我们还没有形成简洁统一的物理图像。这一方向也成为当前天文学的重点研究方向,美国天文界2020~2030十年规划也把星系生态系统的形成演化规律作为三大重点突破方向之一。

星系之于宇宙,就像城镇之于国家一样,是宇宙结构的基本组成单元。星系在宇宙中并不是简单和孤立的个体。以我们的银河系为例,星系是一个包含有数千亿颗恒星、气体和尘埃等星际介质及中心超大质量黑洞的自引力束缚系统。星系的内部组成成分与其周围的星系周介质,乃至更大尺度上的宇宙网结构在多个空间和时间尺度上进行着复杂的相互作用,这些相互作用共同影响着星系的形成和演化。从这个意义上讲,星系可以认为是宇宙中最大的复杂系统。研究这样复杂系统的形成演化规律的难点在于如何从多种成分、多种尺度、多种形式的相互作用中证认出哪些是决定性的,即“抓住主要矛盾”。

星系之所以发光,主要是因为其内部含有的数千亿颗恒星,尤其是那些年轻的恒星。按照星系恒星形成能力的强弱,天文学家一般把星系分为两类:一类是星族平均较为年轻、仍在活跃地产生新的恒星,称为恒星形成星系(比如我们的银河系);而另一类是较年老的星系,几乎没有新的恒星形成,称为宁静星系(比如大家熟知的M87星系)。恒星形成星系如何转变为宁静星系,即星系如何由“生”到“死”的问题,是星系形成和演化领域亟待解决的最基本问题之一。

理论和数值模拟认为星系中心的超大质量黑洞在吸积物质过程中释放的巨大能量是造成星系停止恒星形成的原因。然而这一理论的提出虽已有近半个世纪的历史^[1],观测上却一直缺乏明确的证据。超大质量黑洞究竟是否影响,以及如何影响星系的形成演化成为近几十年来星系宇宙学领域最热门和最富有争议的研究方向之一。

理论上讲,中心黑洞影响星系的恒星形成主要是靠影响恒星形成的原料——冷气体来实现的。黑洞影响星系冷气体主要有两种方式:一种是黑洞在快速吸积的过程中(表现为活动星系核)瞬时释放的巨大能量会驱动非常强的气体外流,直接把大部分冷气体排出星系之外,使星系“窒息而亡”;另外一种则是黑洞或快或慢地吸积物质过程中释放的能量都可以加热星系内部及周围的冷气体,使得它们很难冷却下来,慢慢“饿死”。过去二十年天文界对这一问题的研究很大程度上集中在第一种方式。然而越来越多的证据表明,即使是那些黑洞活动最剧烈的星系,比如类星体,也没有发现冷气体明显减少的迹象^[2]。这说明很可能第一种方式不是黑洞影响星系形成演化的主要方式,即黑洞并没有在其活跃期内直接

引用格式: 王涛. 超大质量黑洞与星系的生死. 科学通报

Wang T. Supermassive black holes and the life and death of galaxies (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/CSB-2025-5106](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5106)

把大量冷气体排出。这意味着或者黑洞压根儿没有能力排出冷气体,或者吹出冷气体的过程与黑洞活动的峰值有时间上的滞后。但无论哪种解释,继续沿着经典的研究路线探索活动星系核中黑洞活动性与冷气体的直接联系似乎平行不通。这些相关研究也使得很多研究人员对中心黑洞是否真得像理论预测那样对星系演化有重要影响产生了严重质疑,黑洞与宿主星系的联系变得愈加扑朔迷离。

学界对第一种黑洞反馈模式(即黑洞在其剧烈活动期间直接把星系冷气体排空)的观测证据搜寻的不成功促使很多人从其他的角度重新思考黑洞反馈的问题。过去十年得益于对大样本星系的统计研究,越来越多的证据显示黑洞的质量可能是判断一个星系是否能够持续进行恒星形成的最重要物理量^[3]。这让包括我们在内的很多人对黑洞在星系演化中的重要角色重拾信心。然而,黑洞并不能够直接影响恒星形成,因此这些观测证据链条中仍然缺失最重要的一环,即黑洞与恒星形成的原料——冷气体的关系。

在这样的背景下,从2021年开始,基于天文界积累的几十年的关于近邻星系黑洞质量和原子氢气体含量测量的数

据,我与合作者们创新性地开始探索近邻星系的黑洞质量与星系中原子氢气体的含量之间的关系。选择原子氢气体主要是因为:(1)前人的结果证明分子气体可能不是黑洞反馈的很好的示踪体(部分原因可能是因为分子气体密度较高,且聚集在恒星盘上,不容易直接被黑洞反馈影响);(2)原子氢气体是星系周气体冷却的最初产物,且是冷气体的主要组成部分(占比超过90%)。所以,如果黑洞反馈真的对冷气体有影响,那么应该可以期待黑洞质量与原子氢气体会有紧密的联系。

带着这样的思考,经过两年多的研究,最终我们在2024年发表于*Nature*的论文^[4]中首次揭示了星系中心黑洞的质量是调制星系中原子氢气体含量的最关键的物理量:中心黑洞质量越高的星系,其原子氢气体含量越低。这一结论是通过综合分析近邻宇宙不同星系样本得出的:既包括有直接黑洞质量测量的小样本(图1),也包括通过经验关系间接得到黑洞质量测量的大样本。考虑到多个星系的物理参数均与星系的原子氢气体(HI)含量相关,我们主要通过偏相关分析,发现不仅黑洞质量与HI含量相关性更为紧密,而且当控制黑洞质量

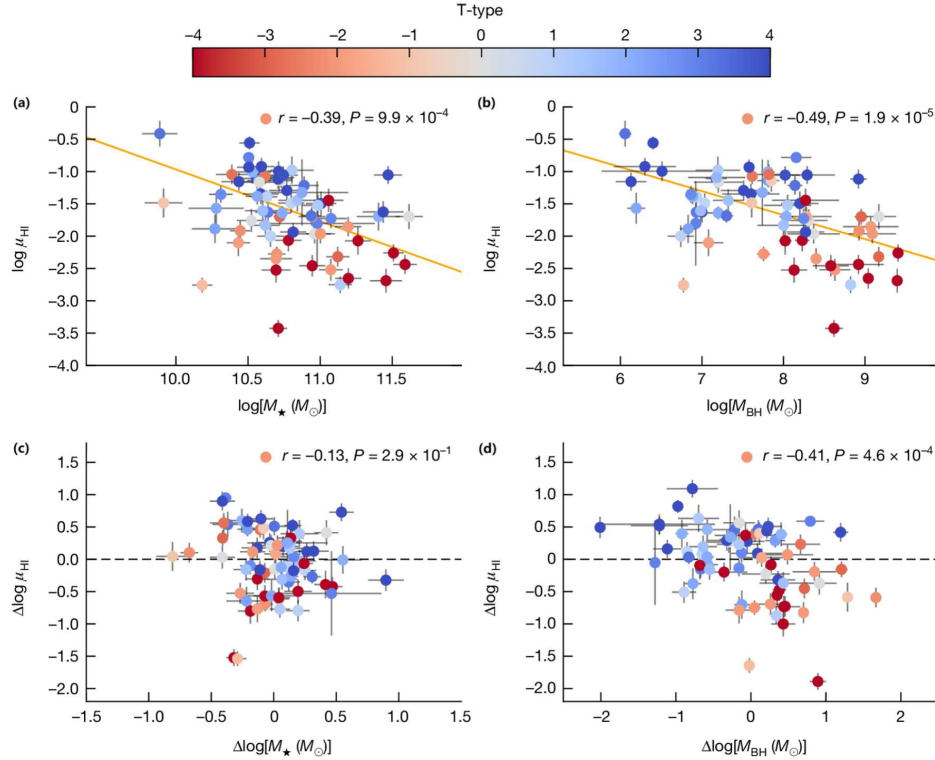


图 1 (网络版彩色)星系HI含量与中心黑洞质量及恒星质量关系的比较。数据点的不同颜色示踪星系形态的哈勃类型(T-type), T-type越小(用越红的颜色表示)形态越接近于早型星系,越大(用越蓝的颜色表示)越接近于晚型星系。相对于星系的恒星质量(a),中心黑洞的质量与HI含量的关系更紧密,且与星系形态无关(b)。进一步利用偏相关分析表明中心黑洞相对于恒星质量是更基本的影响星系HI含量的物理参数(c, d)^[4]

Figure 1 (Color online) Comparison of the atomic hydrogen content (HI) of galaxies with central black hole mass and stellar mass. Galaxies are color-coded by their morphological T types. The smaller the T-type (indicated by the redder colours), the closer the morphology is to early-type galaxies, and the larger (indicated by the bluer colours), the closer it is to late-type galaxies. The central black hole masses (b) are more closely related to the HI content of galaxies than stellar masses (a). Further partial correlation analysis shows that the central black hole is the more fundamental physical parameter affecting the cold gas content of galaxies (c, d)^[4]

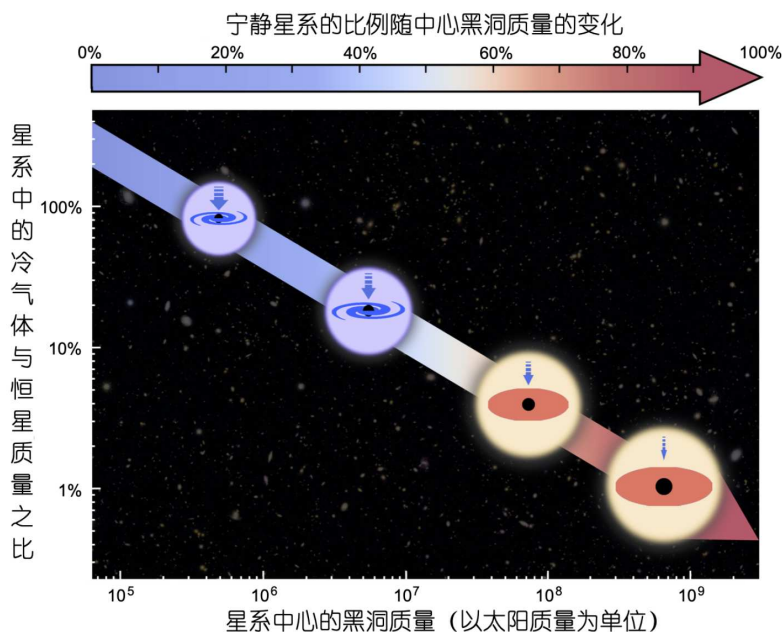


图 2 (网络版彩色)星系中冷气体含量以及宁静星系的比例与中心黑洞质量的关系示意图. 中心黑洞质量越大的星系, 其冷气体含量越低、成为宁静星系(基本没有恒星形成活动)的可能性也越高

Figure 2 (Color online) Schematic representation of the cold gas content of galaxies and the fraction of quiescent galaxies as a function of central black hole masses. Galaxies with larger central black hole masses have lower cold gas content and a higher probability of being quiescent galaxies (essentially devoid of star formation activity)

参数时, 其他物理参数与HI含量的相关性几乎消失(图1以恒星质量为例), 从而证明黑洞质量是更根本的决定星系HI含量的物理量. HI是星系冷气体的主要组成部分, 而冷气体又是恒星形成的原料, 因此这一发现为星系中心黑洞是否影响和如何影响星系中的冷气体含量及恒星形成提供了重要的观测证据. 它显示很大程度上中心黑洞影响宿主星系的恒星形成是通过从源头上限制恒星形成的原料——原子氢气体的含量来实现的(图2).

该结果阐明了为何宁静星系普遍具有一个较大质量中心黑洞的物理机制, 印证了中心黑洞在调控星系生命周期中的核心地位, 向最终解开星系生死之谜迈出了关键一步. 因其对星系形成演化基本规律的重要意义, 该成果获评2024年度“中国科学十大进展”.

这一成果的意义除了有力增进了我们对星系如何死亡

的理解之外, 对星系演化领域的很多其他方面的研究也具有很强的启发意义. 它提醒我们在处理像星系这样演化时标在十亿年到数十亿年的系统时, 不应只考虑典型时标仅有几百万到千万年的类星体这样的最亮的活动星系核的反馈效果. 此外, 这一成果揭示的黑洞质量与冷气体含量的关系与星系类型无关, 证明我们找到了描述一般星系形成演化的普适规律, 这样的发现再次证明像星系这样的复杂系统, 当从整体的角度去研究时往往涌现出简洁、统一的物理规律.

论其本质, 该成果基本回答了中心黑洞“是否”是大质量星系死亡原因的问题, 但究竟黑洞是“如何”影响冷气体, 进而影响星系恒星形成的? 这一问题目前还不清楚. 这也是我们下一步的工作重心. 随着我国自主建造的FAST望远镜、深度参与的SKA望远镜等对星系冷气体的观测数据的进一步积累, 相信我们将在不久的将来揭开这一谜题.

推荐阅读文献

- 1 Rees M J. Black hole models for active galactic nuclei. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1984, 22: 471–506
- 2 Shanguan J, Ho L C, Bauer F E, et al. AGN feedback and star formation of quasar host galaxies: insights from the molecular gas. *Astrophys J*, 2020, 899: 112–129
- 3 Terrazas B A, Bell E F, Henriques B M B, et al. Quiescence correlates strongly with directly measured black hole mass in central galaxies. *ApJL*, 2016, 830: L12–18
- 4 Wang T, Xu K, Wu Y, et al. Black holes regulate cool gas accretion in massive galaxies. *Nature*, 2024, 632: 1009–1013