

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.01.03

近邻活动星系核的燃料供给机制——空间可分辨观测的研究进展

罗荣欣^{1,2}, 郝 蕾¹

(1. 中国科学院 上海天文台 星系与宇宙学重点实验室, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 活动星系核是星系中央的剧烈能量释放现象, 伴随有光度高、尺度小、多光变和发射线强等观测特征。研究活动星系核的燃料供给机制不仅可以帮助人们认识黑洞的吸积和质量增长过程, 而且对于人们了解黑洞与其寄主星系的共同演化过程也十分有意义。首先简要讨论了燃料供给中的四个关键问题。然后着重从哈勃空间望远镜的观测、光学和近红外积分视场光谱的观测, 以及冷气体的观测三个方面介绍了近邻星系核区的观测结果并进行了讨论。上述观测研究表明, 星系中的各类非轴对称性结构 (如大尺度的棒, 核棒套在棒内, 核旋臂套在棒内, 核区卵形扭曲套在棒内等) 能够有效转移气体的角动量并使其向星系中央内流, 因而对于活动星系核的燃料供给具有一定的作用。最后, 对全文进行了总结并且对未来的研究做出展望。

关键词: 活动星系核; 燃料供给机制; 内流

中图分类号: P145.2 **文献标识码:** A

1 引 言

在近 20 年来的天文学研究中, 最重要的发现之一就是近邻的大质量星系中央都存在着超大质量黑洞, 并且这些黑洞的质量与其寄主星系的性质之间有着紧密的联系^[1-3] (如 $M_{\text{BH}} - \sigma$, $M_{\text{BH}} - M_{\text{bulge}}$, $M_{\text{BH}} - L_{\text{bulge}}$)。人们将黑洞的研究与星系形成与演化的研究结合起来, 开始在统一的理论框架下研究黑洞与星系的共同演化过程。如今, 该领域已经成为天文学研究中最前沿的研究领域之一。

研究活动星系核的燃料供给机制是上述领域中的重要分支。活动星系核是星系核心, 具有剧烈能量释放的现象, 伴随有光度高、尺度小、多光变和发射线强等观测特征^[4-9]。普遍认为, 活动星系核是由于星系中央的超大质量黑洞吸积其周围寄主星系的物质而产生的, 而这

收稿日期: 2016-03-30; 修回日期: 2016-09-01

资助项目: 国家自然科学基金 (11473305); 中国科学院战略性先导专项 B 类 (XDB09030200)

通讯作者: 郝蕾, haol@shao.ac.cn

也是超大质量黑洞质量增长的主要模式之一^[10-14]。因此,研究活动星系核的燃料供给机制既可以帮助人们认识黑洞的吸积和质量增长过程,也有利于人们了解黑洞与其寄主星系的共同演化过程。

理论研究表明,有多种机制能够有效地耗散掉星际介质的角动量,并使其从寄主星系的外部区域转移到黑洞附近的区域^[15-18]。在大尺度上(大于 10 kpc),富气体星系间的剧烈相互作用过程(如星系间的主并合、次并合和相互作用)以及星系际气体的吸积过程,会导致气体向星系内 kpc 的尺度上聚集^[19-27]。在星系尺度上(kpc 尺度),各种非轴对称结构(如大尺度的星系棒、星系中的旋臂、卵形(oval)扭曲、核旋臂和核棒等)所导致的长期演化过程,能够促使气体进一步向黑洞周围流动^[28-32]。黑洞周围的小尺度(小于 10 pc)扰动过程(如动力学摩擦、恒星质量损失和粘滞力矩等^[15, 33-35]),则可以耗散掉气体的角动量,使其到达黑洞附近并为核活动提供燃料。

观测上,对于不同的燃料供给机制和核活动的关系,人们也开展了大量的研究工作,包括从大样本的统计到单个源的细致研究。通过从图像上认证星系的并合行为(如星系对和扰动的星系形态特征),人们研究了星系相互作用与核活动的关系。这些研究表明,星系主并合对于触发核活动的作用有限^[36-45],其主要作用可能只存在于最亮的活动星系核中^[46-49]。对于星系长期演化过程与核活动的关系,人们则主要通过统计上探索星系棒与核活动的联系来进行研究。这类工作比较了性质匹配的棒旋星系和非棒旋星系中活动星系核的存在比例,发现两者中的活动星系核比例类似,表明星系棒与核活动之间的直接联系并不明确^[50-58]。由此,人们认为星系棒只能将星际介质转移到星系中央百 pc 的尺度,进一步的燃料供给需要有更小尺度的机制起作用^[33, 59, 60]。此外,人们在研究中还发现,不同光度的活动星系核,其燃料供给机制可能不同,而且这些机制起作用的物理尺度也不尽相同^[18, 61]。

近年来,随着天文学领域各种新兴观测设备的建成,人们已经能够对近邻星系核区的恒星和星际介质进行空间可分辨的观测,这使得细致而直接地研究活动星系核的燃料供给机制成为了可能。利用高分辨率的哈勃空间望远镜(Hubble Space Telescope, HST)图像,人们可以观测到近邻星系核区 kpc 尺度内的尘埃(和气体共存)和恒星结构,并研究这些结构与核活动的关系。通过 8~10 米级地面光学和近红外望远镜上的积分视场光谱仪,人们可以直接观测这一区域中电离和分子气体的激发特性及运动学行为,从而研究气体内流与核活动的联系。此外,高空间分辨率的毫米/亚毫米波干涉阵列还能够提供冷气体的观测性质,从而使人们能更为全面地认识核区星际介质与核活动的关系。

本文将着重介绍近 20 年来对于近邻活动星系核核区的空间可分辨的观测结果,其主要目的在于了解活动星系核燃料供给机制研究中的前沿进展。本文的结构如下:在第 2 章中,我们主要讨论活动星系核燃料供给中的关键问题。在第 3, 4, 5 章中,我们将分别综述利用高空间分辨率的哈勃空间望远镜、光学和近红外积分视场光谱仪,以及毫米/亚毫米波干涉阵列研究活动星系核燃料供给机制的最新结果。在第 6 章中,我们将对观测结果进行讨论。第 7 章,将会对全文进行总结和对未来工作进行展望。

2 活动星系核燃料供给中的关键问题

在这一部分, 我们将简要讨论活动星系核燃料供给中的关键问题, 这样可以帮助我们更好地理解其过程。我们将主要讨论四个方面的问题: (1) 维持核活动需要多少燃料? (2) 燃料的来源是什么? (3) 燃料如何有效地损失角动量? (4) (环) 核区恒星形成活动对于核活动的燃料供给有何影响?

2.1 维持核活动需要多少燃料?

在讨论核活动燃料的问题之前, 我们有必要先估算不同活动星系核中黑洞的质量吸积率。对于活动星系核来说, 黑洞的质量吸积率是一个十分重要的物理参量。在不同的吸积率下, 黑洞的吸积模式 (如吸积盘和吸积流的性质) 可以是不同的, 从而导致活动星系核的其他物理参量发生变化 (如光度、光变、爱丁顿比和辐射性质等)。由于黑洞在吸积物质时会产生大量的辐射, 人们一般通过活动星系核的光度来计算黑洞的质量吸积率。Jogee 在 2006 年的分析中^[18]采用的计算公式如下:

$$\dot{M}_{\text{BH}} = 0.15 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1} \left(\frac{0.1}{\epsilon} \right) \left(\frac{L_{\text{bol}}}{10^{38} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}} \right), \quad (1)$$

其中, \dot{M}_{BH} 是黑洞在最内稳定轨道处的质量吸积率, L_{bol} 是活动星系核的热光度。 ϵ 是辐射效率, 这一参量描述黑洞辐射的能量与吸积的能量之间的比值, 依赖于吸积盘与吸积流的性质。Jogee 收集了不同类型活动星系核的热光度数据, 并计算了相应的黑洞质量吸积率。表 1 展示了这些结果。可以看到, 对于热光度和黑洞质量吸积率, 都存在着序列 QSOs > Seyferts > LINERs。另外, 值得注意的是, Seyferts 和 LINERs 中的黑洞质量吸积率显著地小于 QSOs 中的值, 最暗的 LINERs 和最亮的 QSOs 之间的差距可以高达 7 个量级。表 1 给出的黑洞质量吸积率都是假定 ϵ 为标准值 0.1 进行计算的。在实际情况下, Seyferts 和 LINERs 中的吸积过程可能是辐射无效的模式^[35, 62, 63], 因而 $\epsilon \ll 0.1$ 。

表 1 类星体和近邻活动星系核的典型热光度及黑洞质量吸积率^[18]

活动星系核类型	热光度 /J · s ⁻¹	热光度的典型值 /J · s ⁻¹	典型黑洞质量吸积率 /M _⊙ · a ⁻¹
QSOs	10 ³⁹ ~10 ⁴¹	10 ⁴⁰ ~10 ⁴¹	10~100
Seyferts	10 ³³ ~10 ³⁸	10 ³⁶ ~10 ³⁷	10 ⁻³ ~10 ⁻²
LINERs	10 ³² ~10 ^{36.5}	10 ³⁴ ~10 ³⁵	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁴

注: (1) Seyferts 和 LINERs 的热光度区间取自参考文献[64], 而 QSOs 的热光度区间则是由多篇文献中的结果综合得到。(2) 第四列中的典型黑洞质量吸积率是根据第三列中的典型热光度, 在假定 ϵ 为标准值 0.1 的情况下得到的。

根据所得到的黑洞质量吸积率, 再结合活动星系核的活动时标, 可以估计一个活动周期内黑洞吸积物质的质量。这同时也是维持核活动一个周期所需燃料的质量。由于限制活动星系核的活动时标具有很大的不确定性, 其范围为 10⁶ ~ 10⁸ a^[17], 我们采用活动时标 10⁸ a 进

行估计, 这样所得到的就是燃料质量的上限。对于 QSOs, Seyferts 和 LINERs 三类不同的活动星系核, 由表 1 中的黑洞质量吸积率, 我们分别得到维持核活动一个周期所需的燃料质量为: $10^9 \sim 10^{10} M_{\odot}$ (QSOs), $10^5 \sim 10^6 M_{\odot}$ (Seyferts), 以及 $10^3 \sim 10^4 M_{\odot}$ (LINERs)。

2.2 燃料的来源是什么?

总的来说, 活动星系核的燃料来源可以分为两类: 星系外部和星系内部。星系间的主并合、次并合以及星系际气体的吸积都可以从星系外部为核活动提供燃料。主并合是指质量比约为 1:1 的两个漩涡星系间的并合过程; 而次并合则主要指漩涡星系与卫星星系间的并合过程, 其中两个星系的质量比一般为 1:10 左右。一系列理论研究工作已经表明, 在这两类相互作用发生的过程中, 大量气体会向星系中央内流和聚集, 从而触发剧烈的恒星形成和核活动^[19, 21-23, 25-27, 65, 66]。在观测方面, 对于主并合过程能够为核活动提供燃料已经积累了一定的证据^[46-49]。但是对于次并合过程, 由于其导致内流的效应较弱, 因而不容易与星系自身长期演化的效应相区分, 难以获得直接的观测证据^[66, 67]。除了上述并合过程所导致的内流气体之外, 寄主星系从星系群和星系团中吸积而来的冷气体, 也是活动星系核燃料的一种重要来源。这些冷气体既可能由星系群和星系团中的热气体冷却而来^[9, 68-70], 也可能直接来源于星系际的 HI 气体^[71]。近年来得益于观测仪器灵敏度的提升, 这类燃料来源受到了人们的广泛关注, 已经有越来越多的观测证据开始陆续出现^[71-74]。在星系内部, 核活动的燃料则可能来自盘面上的气体内流以及核区恒星演化过程中的星风。星系中的一系列非轴对称恒星结构(如大尺度的星系棒, 星系中的旋臂, 卵形(oval)扭曲, 核旋臂和核棒等), 能够有效地耗散掉盘面上气体的角动量, 使其从外盘区域流动到星系中央。这一物理过程不仅被数值模拟所预期^[15, 75-78], 同时也在多个星系中被观测到^[28-30, 32]。在核区几十 pc 的物理尺度上, 非轴对称结构对于气体的影响有限, 气体在黑洞引力势阱的作用下塌缩并触发恒星形成活动。在伴随而来的恒星演化过程中, 恒星将抛射出一定量的星风, 这些星风在引力的影响下内落到黑洞的周围, 也成为核活动燃料的重要来源之一^[79-88]。

2.3 燃料如何有效地损失角动量?

在活动星系核燃料供给的研究中, 另一个重要的问题是: 燃料是如何有效地损失角动量, 从而进入到黑洞附近的区域, 参与到吸积过程中去的? 对于一个质量为 $10^8 M_{\odot}$ 的超大质量黑洞, 其最内稳定轨道处的特征角动量(即单位质量的角动量 $L = r \times v$) 约为 $10^{24} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1[18]}$ 。星系盘上距离中心 10 kpc 处的星际介质, 其旋转运动的特征角动量约为 $10^{29} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1[18]}$, 两者相差 5 个量级。如果星系盘上的这些星际介质要成为核活动的燃料, 它们需要消耗掉约 99.999% 的角动量。即使是星系盘上距离中心 200 pc 处的星际介质, 其旋转运动的特征角动量也有 $10^{27} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1[18]}$, 大约是黑洞最内稳定轨道处特征角动量的 1000 倍。

基于理论研究和数值模拟, 人们已经提出了多种活动星系核的燃料供给机制。这些机制可以在不同的物理尺度上有效地耗散燃料的角动量。我们将这些机制总结在表 2 中, 并且列举出它们起作用的物理尺度和主导的活动星系核类型。星系并合及相互作用等大尺度的物理过程主要在 10 kpc 到 1 kpc 的物理尺度上起作用, 并且可能在核球主导的亮活动星系核

中起作用^[46-49]。棒和旋臂等星系尺度上的非轴对称结构可以将燃料从 kpc 尺度转移到百 pc 尺度^[29-31, 50-52]。而在百 pc 之内, 嵌套的核棒和核旋臂可能起到一定的作用, 将燃料转移到 10 pc 尺度^[15, 77, 89-92]。这类星系长期演化所导致的黑洞质量增长模式可能主要发生在盘主导的低光度活动星系核中^[18, 61]。在更小的物理尺度上 (小于 10 pc), 恒星质量损失以及动力学摩擦和粘滞力矩等流体动力学过程将进一步把燃料转移到黑洞附近的区域^[15, 33-35]。

表 2 活动星系核燃料角动量转移机制及它们起作用的物理尺度和活动星系核类型^[9, 16-18, 61, 88]

物理尺度	活动星系核燃料供给机制	活动星系核类型
10 kpc~1 kpc	星系间相互作用, 主次并合, 以及大尺度的恒星棒	核球主导的亮活动星系核
1 kpc~100 pc	星系中的恒星棒, 旋臂, 以及卵形 (oval) 扭曲	盘主导的低光度活动星系核
100 pc~10 pc	核棒和核旋臂	
10 pc~1 pc	动力学摩擦, 粘滞力矩, 以及恒星质量损失	

2.4 星系中 (环) 核区恒星形成活动对于核活动的燃料供给有何影响?

在气体向星系中央内流的过程中, 会产生相应的恒星形成活动, 以下我们将简要讨论两类不同尺度上的恒星形成活动对于核活动燃料供给的影响。

第一类尺度为环核区 (circumnuclear) 的物理尺度, 其典型范围约为 0.1~2 kpc。在这一尺度上, 内流的气体受到星系中动力学共振 (如林德布拉德共振) 的影响, 会在环状结构中逐渐堆积并坍缩形成恒星。利用高分辨率的图像观测 (包括 $H\alpha$, $Pa\alpha$ 和 UV), Knapen 和 Comerón 等人发现活动星系核中出现环核区恒星形成活动的比例要比正常星系中高, 由此他们认为环核区的恒星形成活动与核活动存在着相互关联^[93-95]。然而, Comerón 等人在 2010 年利用更为完备的样本检验了上述关系^[96], 却得到了不同的结果。他们发现活动星系核中出现环核区恒星形成活动的比例与正常星系中相当。除了图像观测以外, 人们还利用红外光谱 (如 polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) 发射线) 来研究活动星系核中的环核区恒星形成活动。一系列的观测研究发现, 星系中环核区的恒星形成率与中央黑洞的质量吸积率存在着正相关^[97-100], 并且这一关系在越接近星系中心 (恒星形成率在更接近星系中心处测量) 时越紧密^[101, 102]。考虑到恒星形成活动与致密分子气体存在着紧密联系, 人们还检验了环核区致密分子气体质量与核活动的关系。利用高空间分辨率的 HCN(1-0) 观测, Izumi 等人于 2016 年在近邻活动星系核中发现, 环核区的致密分子气体质量与黑洞的质量吸积率存在着正相关, 并且其相关性比较大尺度上的更紧密^[103]。这些研究结果表明, 环核区的恒星形成活动可能为核活动提供燃料, 从而促使黑洞变得活跃。

另一类尺度为核区 (nuclear) 的物理尺度, 其典型范围约为 10~100 pc。在这一尺度上, 星系中非轴对称结构对于内流气体的影响减弱, 黑洞的引力势阱开始起主导作用, 使得气体的密度逐渐增大, 并在一定的不稳定性下坍缩形成恒星。利用主动光学辅助的高空间分辨光谱观测, Davies 等人于 2007 年在近邻活动星系核中 (几十 pc 尺度上) 发现了核区恒星形成活动和核活动之间的相互关联^[81]。他们的研究结果显示, 最为活跃的核活动发生在核区恒星形成活动约 $5 \times 10^7 \sim 2 \times 10^8$ a 之后^[104, 105]。这一时标延迟表明, 核区的恒星形成活动可能通过恒星外流的形式为核活动提供燃料。通过进一步讨论不同的恒星外流模型 (如超新星爆发

所导致的外流, 大质量年轻恒星 (如 O, B 型星) 的星风以及 Asymptotic branch giant (AGB) 星的星风) 并与观测结果进行比较, Davies 等人认为: 超新星和大质量年轻恒星的外流速度较大, 这些恒星光外流物质中的大部分将被抛射到距离星系中心较远区域而无法被黑洞有效地吸积。AGB 星所产生的外流速度相对较小, 其外流物质很难逃离黑洞的引力势阱, 因而最终会掉落到黑洞周围并成为核活动燃料的重要成分。

在后文中, 我们将主要介绍三个方面的研究工作: 哈勃空间望远镜高空间分辨率的图像观测、光学和近红外积分视场光谱的观测, 以及冷气体的空间分辨谱线观测。这些工作主要通过空间分辨的图像和光谱来研究近邻的低光度活动星系核, 其空间分辨水平所对应的最小物理尺度从 kpc 尺度到几十 pc 尺度。

3 哈勃空间望远镜的观测研究

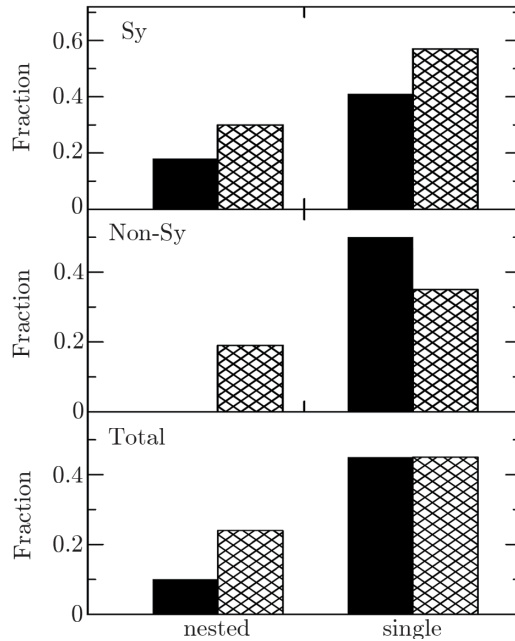
哈勃空间望远镜的高空间分辨能力是观测星系核区的重要利器。由于没有大气抖动的影响, HST 所拍摄的光学和近红外图像都能够达到几十个毫角秒的空间分辨水平。Malkan 等人^[106]于 1998 年利用 HST 对 256 个近邻活动星系核进行了光学图像巡天, 发现在这些星系的核区存在着丰富的恒星和尘埃结构 (如核棒、核旋臂等)。利用此类高质量的图像数据, 人们能够很好地分辨近邻星系核区的各种结构特征, 进而研究它们与核活动之间的联系, 检验相应的活动星系核燃料供给机制。

3.1 核活动与核棒的关系

核棒 (nuclear bars) 是存在于星系核区 (小于 1 kpc) 的棒状恒星结构。它们往往与星系的大尺度恒星棒共存, 并且嵌套在其内林得布拉德共振之内。尽管大尺度的恒星棒可以将气体从星系外盘 (几个 kpc 尺度) 转移到星系的核区 (小于 1 kpc), 但是这些气体往往在大尺度棒的内林得布拉德共振处旋转, 无法再进一步内落^[15, 75, 76, 107, 108]。理论研究和数值模拟表明, 核棒所提供的引力力矩可以改变主棒内林得布拉德共振处气体的运动学状态, 使其向星系中心流动^[15, 89, 90, 109]。因而, 核棒被认为是一种可能的活动星系核燃料供给机制, 特别是在星系中央 kpc 的物理尺度内。

为了验证上述的理论预期, 人们开展了一系列的观测研究工作。在较早期的工作中, 依据大尺度棒导致的气体流动会产生激波和尘埃结构之一性质, 人们认为核棒导致的气体流动也能产生类似的观测效应, 并利用星系核区的尘埃特征来证认核棒。Regan 和 Mulchaey^[110]于 1999 年首次采用这一方法在 12 个近邻 Seyferts 中搜寻核棒。通过分析这些星系的 HST 光学-近红外颜色图, 他们只在三个星系中找到了与核棒中气体流动相吻合的核区尘埃特征。Martini 等人^[111]于同年采用相似的方法研究了 24 个 II 型 Seyferts 中核棒的出现频率, 发现仅有 5 个星系可能存在核棒。后来的理论工作表明, 核棒中的气体流动性质与大尺度棒中的不同, 它们不能够产生激波现象和相应的尘埃结构^[77, 112]。因而, 利用星系核区尘埃特征来证认的核棒都需要再进行检验。Martini 和 Pogge^[113]于 2001 年使用表面测光的方法重新研究了他们 1999 年所研究星系的 HST 近红外图像, 发现仅有 4 个星系存在核

棒。其中, 只有 2 个星系出现了与核棒中气体流动对应的尘埃结构。Erwin 和 Sparke^[114] 于 2002 年将表面测光的方法与尘埃结构的分析结合起来, 研究了 38 个早型漩涡星系中核活动与核棒的关系, 发现两者并没有显著的相关性。为了更好地研究核活动与核棒的关系, Laine 等人^[53] 于同年选择了性质相匹配的活动星系核和正常星系样本 (包含 56 个 Seyferts 和 56 个正常星系), 并且在其中比较核棒出现的频率。他们采用表面测光的方法证认核棒, 发现两种星系中核棒存在的比例相似, 都在 20% 左右 (见图 1)。



注: 图中上中下三部分分别为 Seyferts 中、正常星系中和所有星系中具有核棒或大尺度棒的比例。黑色填充的柱状图代表较早型的星系形态 (S0-Sa), 网格填充的柱状图代表较晚型的星系形态 (Sb-Sc)。

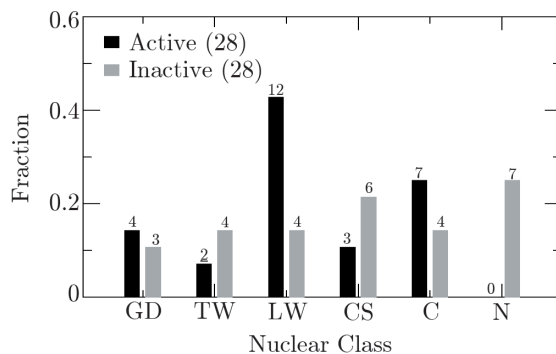
图 1 活动星系核和正常星系中核棒比例的对比结果^[53]

3.2 核活动与核旋臂的关系

核旋臂 (nuclear spiral arms) 是星系核区 (小于 1 kpc) 最为常见的尘埃结构之一。与星系中大尺度的旋臂结构不同的是, 这些漩涡状结构中的密度对比仅仅比其周围的星际介质高几倍左右, 并且没有恒星形成活动伴随其中。1999 年, Regan 和 Mulchaey^[110] 通过研究 12 个近邻 Seyferts 的 HST 颜色图, 发现核旋臂普遍存在于这些星系中并且向中心延伸。同年, Martini 和 Pogge^[111] 使用相似的方法研究了更大的样本 (24 个 II 型 Seyferts), 也发现核旋臂广泛地存在于活动星系核中, 其存在比例为 20/24。以上工作中的研究对象都主要是 II 型 Seyferts, Pogge 和 Martini^[115] 于 2002 年将研究扩展到包括 I 型 Seyferts 的样本中。他们通过 HST 图像构造的结构图来证认星系中的核旋臂。这一方法能够有效地提高图像中小尺度结构的对比度, 从而帮助人们更好地认证核旋臂。在他们研究的 43 个 Seyferts 中, 有 36 个被发现有核旋臂存在。基于这些观测结果, 人们提出核旋臂可能是活动星系核燃料供给的一

种有效渠道。这一观点也得到了一系列理论研究和数值模拟工作^[77, 91, 92, 116, 117]的支持。这些工作认为,核旋臂示踪了核区发生激波和湍流的地方。因而,气体会沿着核旋臂损失角动量,进而向星系中心流动。

然而,核旋臂并不仅仅存在于活动星系核中,它们还出现在多个正常星系中^[119-122],因此人们通过比较活动星系核和正常星系中核旋臂的性质,进一步了解核活动与这一结构间的关系。Martini 等人^[118]于 2003 年系统地比较了性质相匹配的活动星系核和正常星系样本(包含 28 个 Seyferts 和 28 个正常星系)中核旋臂出现的频率。他们将核旋臂分成四种类型:螺旋状的,紧密缠绕的,松弛缠绕的,以及无规则的。其中,螺旋状的、紧密缠绕的和无规则的核旋臂在两类星系中的存在比例相当,仅有松弛缠绕的核旋臂在活动星系核中有两倍的超出。但是这一超出的置信度小于 2σ ,不是一个统计显著的结果。综合四种核旋臂类型的比较结果, Martini 等人发现活动星系核和正常星系中核旋臂的存在比例相似(约为 75% vs 61%, 见图 2),因而他们认为核活动与核旋臂有直接的观测关系。Simões 等人^[123]在 2007 年发现了不同的结果。通过研究 65 对性质相匹配的 Seyferts 和正常星系(34 对早型星系和 31 对晚型星系)中核区的尘埃结构特征,他们发现核旋臂在早型活动星系核中的出现频率比在早型正常星系中高,而在晚型的星系对中核旋臂则具有相似的出现频率。由此他们认为早型星系中核活动与核旋臂存在着一定的联系。



注:图中的柱状图代表不同类型的核区尘埃结构出现在活动星系核(黑色填充)和正常星系(灰色填充)中的比例。其中, GD 表示螺旋状的核旋臂; TW 表示紧密缠绕的核旋臂; LW 表示松弛缠绕的核旋臂; CS 表示无规则的核旋臂; C 表示无规则的尘埃结构; N 表示没有尘埃结构。

图 2 活动星系核和正常星系中核区尘埃结构的对比^[118]

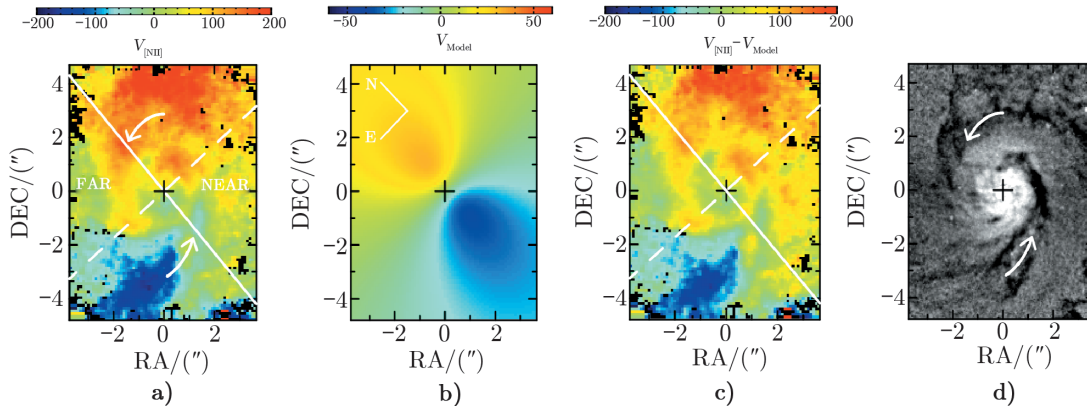
总结 3.1 和 3.2 节的观测结果可以看到,核旋臂和核棒在活动星系核中并没有出现更多,而是具有与正常星系中相似的存在比例。不过,在早型活动星系核中存在例外,核旋臂在其中的存在比例要比在早型正常星系中高。

4 光学和近红外积分视场光谱的观测研究

在图像研究之外,人们还通过光谱观测手段来研究活动星系核的燃料供给机制。积分视

场光谱 (Integral Field Spectroscopy, 简称 IFS) 就是其中十分重要的一种。这是一种兼顾成像和光谱优势的观测手段, 其最大的特点在于能够获取星系中不同空间位置处的光谱信息。利用积分视场光谱观测星系的核区, 能够同时研究其中气体的分布、电离及运动学特性, 从而帮助人们了解核活动与星系核区气体之间的关系。

Storchi-Bergmann 等人利用双子星望远镜上的积分视场光谱仪开展了一系列对于近邻活动星系核核区星际介质的研究。使用光学积分视场光谱仪 (Gemini Multi-Object Spectrograph, GMOS), 他们在多个活动星系核的核区观测到了电离气体的内流现象, 其中既包括沿着核旋臂的内流 (如 NGC 1097^[125], NGC 6951^[126], M81^[127] 和 NGC 7213^[124]), 也包括核棒驱动的内流 (如 NGC 3081^[128])。他们观测到的内流速度从 $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 到 $130 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 估算的质量内流率从 $8 \times 10^{-4} M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$ 到 $0.4 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$ 。这些质量内流率都大于或者相当于对应星系中黑洞的质量吸积率, 表明内流的电离气体能够为核活动提供足够的燃料。NGC 7213 是其中的一个典型示例。Schnorr-Müller 等人^[124] 利用 GMOS 观测了该星系中央 500 pc 尺度的区域。他们发现该区域内恒星遵循着常规的圆周运动, 而电离气体则出现明显的运动学扰动, 偏离了圆周运动 (如图 3 所示)。通过比较电离气体速度场与恒星速度场的模型, 他们发现电离气体非圆周运动的分布呈现出旋臂模式, 并且这一模式能与结构图中的核旋臂形态很好地吻合。在该星系的近端, 非圆周运动呈现出红移特征; 而在远端则显示为蓝移。由此, 他们将观测结果解释为电离气体沿着核旋臂的内流现象。假定气体都分布在星系平面上, 他们估计了电离气体沿着核旋臂的质量内流率, 为 $0.4 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$ (在距离星系中央 400 pc 处) 和 $0.1 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$ (在距离星系中央 100 pc 处)。



注: 从 a) 到 d) 分别为电离气体的速度场、恒星速度场模型、残差速度场 (电离气体的速度场减去恒星速度场模型) 以及结构图 (通过 HST F606W 波段的图像构建)。

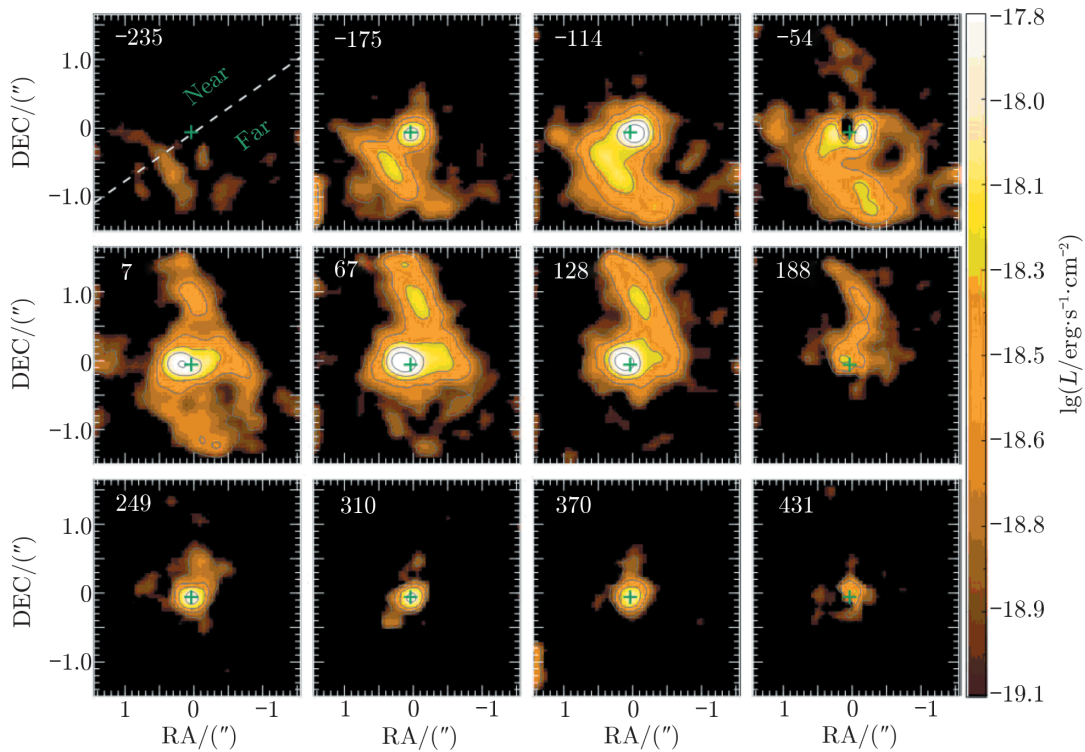
图 3 NGC 7213 的双子星望远镜 GMOS 观测结果^[124]

此外, Storchi-Bergmann 等人还通过近红外积分视场光谱仪 (Near-Infrared Integral Field Spectrograph, NIFS) 来观测近邻活动星系核核区的温热分子气体 (H_2) 分布与运动学特性, 并研究这些性质与核活动的关系。他们已经研究的活动星系核包括: NGC 4051^[129], Mrk 1066^[130], Mrk 79^[131] 以及 NGC 2110^[132]。星系 Mrk 79 是其中的一个典型示例。Riffel

等人^[131]利用 NIFS 观测了该星系中央 $1.35 \text{ kpc} \times 1.35 \text{ kpc}$ 的区域。通过速度场的分析, 他们发现温热分子气体呈现出旋转盘的特征, 并且具有较低的速度弥散, 因而认为这些气体主要分布在星系盘面上。利用近红外光谱的高谱分辨特点, 他们用 Channel 图来进一步研究这些温热分子气体的运动学行为。这类图能够展示不同速度上气体发射线流量在空间的二维分布情况。他们发现, 蓝移和红移的分子气体分别分布在星系远端和近端的旋臂结构上。这一结构延展至距离星系中心 500 pc 的区域, 并且随着气体视向速度的减小而逐渐向星系中心延伸 (如图 4 所示)。结合上述观测结果, 他们认为温热分子气体正沿着核旋臂从距离星系中心 500 pc 处向内流动, 并且估算了分子气体的质量内流率, 为 $4 \times 10^{-3} M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$ 。除了 Mrk 79, 他们在其余的星系中也观测到了类似的结果, 发现温热分子气体沿着核旋臂向星系中心流动。总体来说, 温热分子气体的内流速度从 $100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 到 $240 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 质量内流率从 $4 \times 10^{-5} M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$ 到 $4 \times 10^{-3} M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$ 。这些质量内流率不仅比上面提到的电离气体质量内流率低, 而且还比对应星系中黑洞的质量吸积率低。基于这些结果, Storchi-Bergmann 等人推测, 上述观测到的温热分子气体内流可能是大量冷分子气体在内流过程中外层被加热的结果。考虑到其较低的质量内流率, 他们认为这些气体不是供给核活动燃料的主导成分。其他的研究团队也开展了类似的研究工作, 在别的近邻活动星系核中观测到了温热分子气体沿着核旋臂的内流现象, 如 NGC 1097^[133]和 NGC 1068^[134]。

除了上述针对个源的细致研究, 人们还通过比较活动星系与正常星系核区的气体运动学性质来研究核活动的燃料供给机制。在光学观测方面, Dumas 等人^[135]利用威廉·赫谢尔望远镜上的 Spectrographic Areal Unit for Research on Optical Nebulae (SAURON) 积分视场光谱仪观测了 7 对性质匹配的 Seyfers 和正常星系。他们发现, 相比于正常星系, 在活动星系核中央 1 kpc 尺度内的电离气体存在着更为显著的运动学扰动, 因而更容易偏离圆周运动。由此, 他们认为核活动与星系核区的气体运动学扰动存在着联系, 而这些运动学扰动可能是由于气体向星系中心的内流产生的。在近红外观测方面, Davies 等人利用 Very Large Telescope (VLT) 上的 Spectrograph for INtegral Field Observations in the Near Infrared (SINFONI) 观测了 5 对性质匹配的 Seyfers 和正常星系。他们发现, 相比于正常星系, 在活动星系核的核区更为普遍地存在着温热分子气体聚集的盘结构^[136]。运动学分析的结果显示, 这些分子气体呈现出旋转主导的特征, 但同时也伴随着气体的内流和外流现象^[71]。结合 HST 图像得到的结构图和星系的环境信息, 他们进一步发现, 上述内流现象可能有两类产生机制: (1) 核旋臂所导致的结果; (2) 外部气体吸积的结果。

总结本节的观测结果可以看到, 相比较图像研究, 观测星系核区的气体运动学特性能够更为直接地研究核旋臂与核棒在活动星系核燃料供给中的作用。人们在多个近邻的活动星系核中发现了沿着核旋臂的电离气体和温热分子气体内流 (核棒导致内流的观测相对少一些), 并且人们还发现活动星系核核区的气体运动学特性与正常星系中的存在差异。活动星系核中的气体往往存在内流或外流现象, 因此存在较强的运动学扰动, 常常偏离圆周运动。



注: 图中每个子图对应的物理尺度为 $1.35 \text{ kpc} \times 1.35 \text{ kpc}$, 空间分辨率为 $0.12''$ (约 50 pc)。每个子图的左上角显示了该子图对应的速度, 子图之间的速度区间为 $60 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图中的虚线标识了星系的主轴, 绿色十字标识了星系中心。

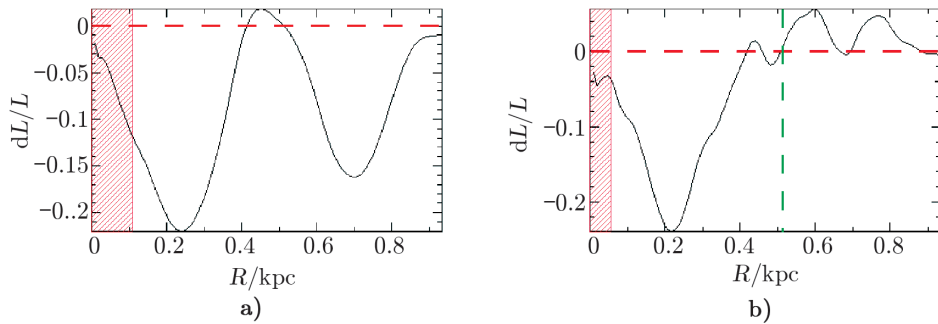
图 4 Mrk 79 核区 $\text{H}_2 \lambda 2.122 \mu \text{m}$ 发射线的 Channel 图^[131]

5 冷气体的观测研究

除了观测电离气体和温热分子气体, 人们还通过冷分子气体的观测来更为全面地研究星系核区的星际介质性质及其与核活动的关系。这类研究中一个重要的工作是 García-Burillo 和 Combes^[137]开展的星系核巡天 (The NUClei of GALaxies (NUGA) Survey)。这一巡天利用西班牙射电毫米波研究所的干涉阵列 (Plateau de Bure Interferometer, PdBI) 和 30 m 单天线, 观测了 25 个近邻低光度活动星系核中冷分子气体的分布和运动学特性。结合这些星系的高分辨率近红外图像, García-Burillo 和 Combes 分析了其中恒星引力势阱作用在冷分子气体上的力矩, 并且得到了相应的气体角动量转移率和质量内流率。他们发现, 在该巡天三分之二的星系中, 冷分子气体经常会停留在环状结构中, 而无法继续向星系中央运动。这些星系要么是缺少非轴对称结构 (如棒、卵形 (oval) 扭曲、旋臂等), 要么是其中的非轴对称性结构不能有效地将气体向星系中心转移。而在余下的三分之一星系中, 则普遍存在着力矩为负的现象, 表征着冷分子气体向星系中央内流的行为。这些内流行为能够延伸至距离星系中心 $25 \sim 100 \text{ pc}$ 的区域, 从而为核活动提供燃料。出现内流的星系大致可以分为两类: (1) 星系

中存在着嵌套的非对称性结构(如核棒套在棒内,核旋臂套在棒内等),并且这些结构在动力学上互相不耦合;(2)星系中的大尺度棒不存在内林得布拉德共振。

NGC 3627 是上述巡天中出现气体内流的一个典型示例。2011 年, Casasola 等人^[138]通过分析由近红外图像得到的恒星引力势阱,发现该星系中有一个主轴长为 6 kpc 的恒星棒,并且它没有内林得布拉德共振。PdBI 和 30 m 单天线所提供的 CO(1-0) 和 CO(2-1) 波段的观测显示,该星系中的冷分子气体主要分布在这一大尺度棒的引导面中。Casasola 等人计算了恒星引力势阱作用在分子气体上的力矩,发现它从距离信息中心约 400 pc 的尺度到空间分辨极限的尺度(约 25 pc)上一直为负值。相应地,由力矩推导得到的气体角动量转移率也在上述尺度内一直为负值(表征着角动量在损失)(如图 5)。这些观测结果表明,NGC 3627 中的大尺度恒星棒正导致冷分子气体向星系中央的内流。Casasola 等人认为,该恒星棒可能是一个刚形成不久的年轻结构,因而它还没有形成内林得布拉德共振,不会使冷分子气体聚集在环状结构中。在这种情况下,冷分子气体则可以经由棒的引导面内流并为核活动提供燃料。

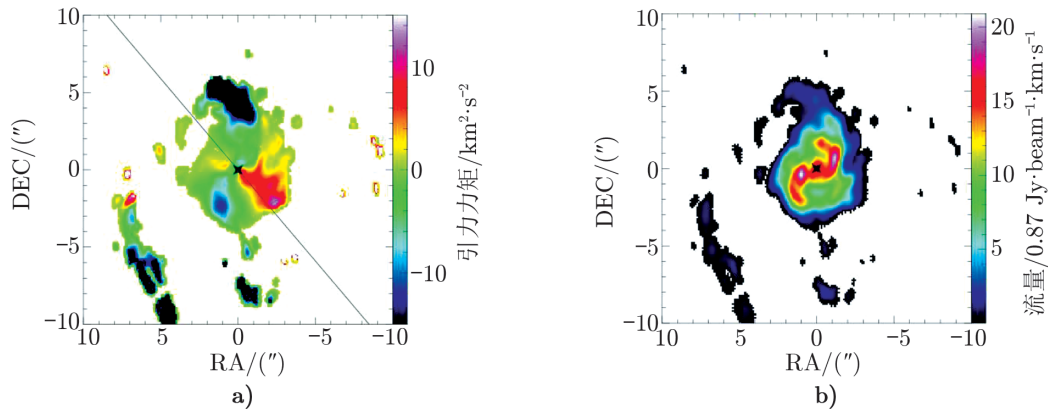


注: a) 对应于 CO(1-0) 波段的观测; b) 对应于 CO(2-1) 波段的观测。红色虚线部分对应空间分辨的极限区域。

图 5 NGC 3627 中分子气体角动量转移率随半径的变化^[138]

NUGA 巡天所能观测的最小尺度在约 25 pc 左右。为了能够研究活动星系核核区更小尺度(1~10 pc)的分子气体性质,Combes 等人利用阿塔卡马大型毫米波阵列(Atacama Large Millimeter Array, ALMA),开展了以 20 个近邻活动星系核为目标的冷分子气体巡天项目。目前该项目尚在进行中,他们在 ALMA Cycle 0, Cycle 1 及 Cycle 3 中申请了多次观测时间。在已发表的工作中,涉及到活动星系核燃料供给的主要包括 NGC 1433 和 NGC 1566 中 Cycle 0 的观测结果。NGC 1566 是其中直接观测到分子气体内流的一个典型示例^[139]。该星系中有一个主轴长为 1.7 kpc 的核棒。ALMA(cycle 0)提供的 CO(3-2) 波段观测显示在该核棒内部存在着分子气体的核旋臂结构。这一旋臂结构呈现开放的(具有很大的螺旋角)双旋臂特征,并且从核棒的内林得布拉德共振处(距离星系中心 300 pc)延伸至距离星系中心 50 pc 处。结合 HST 观测得到的近红外图像,Combes 等人计算了恒星引力势阱作用在分子气体上的力矩。在与核旋臂相对应的径向尺度上(50~300 pc),力矩一直为负值,表明核旋臂导致了分子气体向星系中心的流动并为核活动提供燃料。图 6 展示了 NGC 1566 中的力矩分布图和 CO(3-2) 流量分布图。除上述项目外,Fathi 等人^[140]也利用 ALMA (cycle 0) 观测到了活

动星系核 NGC 1097 中核旋臂导致的致密冷分子气体内流现象。



注: a) 为力矩分布图; b) 为 CO(3-2) 的流量分布图。黑色的十字标示了星系的中心, 黑色的斜线标示了星系中恒星棒的主轴方向。

图 6 NGC 1566 中冷分子气体和力矩的分布^[139]

冷气体的研究工作表明, 活动星系核核区的气体内流现象不仅存在于电离气体和温热分子气体中。在一些近邻活动星系核中, 人们还发现了冷分子气体的内流现象。这些星系具有丰富的非对称性结构 (如大尺度的棒、核棒套在棒内、核旋臂套在棒内、核区卵形 (oval) 扭曲套在棒内等), 从而导致了冷分子气体的内流。这表明, 星系中的非对称性结构对于活动星系核的燃料供给具有一定的贡献。

6 相关讨论

在本文第 3 章中, 基于 HST 图像的一系列研究工作表明, 核旋臂和核棒在活动星系核中并没有出现更多, 而是具有与正常星系中相似的存在比例。这是否说明核活动与这两类结构没有直接的关联呢? 我们认为不是, 因为上述的图像研究是一种间接研究。由于无法直接探测由核棒和核旋臂所导致的气体内流过程, 这类研究容易受到多种因素的影响。其中包括:

(1) 由于活动星系核存在多种燃料供给机制, 在多种机制共同起作用的情况下, 将很难观测到单一机制与核活动之间的直接关系。举例来说, 虽然核旋臂可以将气体从百 pc 的尺度转移到十 pc 的尺度, 但是如果在十 pc 的尺度上没有有效的机制耗散气体的角动量, 人们就依然观测不到核活动和核旋臂共同出现的情况。

(2) 图像研究对于燃料供给机制的分类可能过于宽泛, 因而无法直接探测这些机制与核活动的关系。例如, 理论预期表明, 只有在核棒的圆周转动角速度大于主棒的同一参量时, 核棒才能最为有效地促使气体损失角动量并向星系中心流动^[15, 109]。然而在实际的观测中, 人们往往缺乏核棒的运动学信息, 因而无法区分核棒的子类。在这种情况下, 如果直接检验核活动与核棒的关系, 就看不到两者的相关性。

(3) 核活动的持续时标与燃料供给机制的存在时标会出现不匹配的情况。核活动的持续时间是有限的,其典型的活动时标为 $10^6 \sim 10^8 \text{ a}$ ^[17],而核旋臂的存在时间一般为 10^8 a 的量级^[41]。如果两者存在的时间没有完全重叠,就可能出现活动星系核中看不到核旋臂或者星系中有核旋臂而没有核活动的情况,从而造成图像研究中核旋臂在活动星系核和正常星系中存在比例相近的结果。对于核棒来说,其自身和大尺度棒所导致的中央质量聚集,可能会引发自身的消亡^[32],因此在其有限的存在时间内也可能出现与核活动时标不匹配的现象。

此外,在本文第 4、5 章中,通过研究星系核区的气体运动学特性,人们在多个近邻活动星系核中发现了沿着核旋臂的气体内流现象(核棒导致内流的观测相对少一些)。这些研究工作表明,核旋臂和核棒所导致的气体内流能够为核活动提供足够的燃料,这两类结构对于活动星系核的燃料供给具有一定的作用。当然,现今观测到气体内流的活动星系核不到 20 个,因此还需要更大样本的观测来全面检验核旋臂和核棒在活动星系核燃料供给中的贡献。

7 总结与展望

本文中,我们从空间可分辨观测的角度介绍了近 20 年来活动星系核燃料供给机制研究中的最新进展。首先,我们简要讨论了核活动燃料供给中的关键问题。然后,我们将关注点集中在近邻活动星系核上,着重介绍了这些星系核区 kpc 尺度内空间可分辨观测的结果并进行了讨论。全文的内容总结如下。

(1) 活动星系核燃料供给中的关键问题包括:维持核活动需要多少燃料?燃料的来源是什么?燃料如何有效地损失角动量?(环)核区恒星形成活动对于核活动的燃料供给有何影响?对于光度不同的活动星系核,其燃料供给机制可以不同,并且不同机制所主导的物理尺度也不尽相同。

(2) HST 的高分辨率图像观测展示了活动星系核的核区 kpc 尺度存在着丰富的恒星和尘埃结构,其中主要包括核棒和核旋臂。理论研究和数值模拟工作认为,这两类结构能有效地将燃料从百 pc 尺度转移到十 pc 尺度,是重要的活动星系核燃料供给机制。为了验证这一理论预期,人们对性质相匹配的活动星系核和正常星系样本进行了比较,却发现在活动星系核中核旋臂和核棒都没有出现更多,而是具有与正常星系中相似的存在比例(在早型活动星系核中存在例外,核旋臂在其中的存在比例要比在早型正常星系中高)。我们就上述观测结果进行了讨论,认为这些结果可能受到多种因素的影响(如活动星系核存在多种燃料供给机制,燃料供给机制的分类过于宽泛,以及核活动的持续时标与燃料供给机制的存在时标不匹配),因而不能说明核活动与核旋臂和核棒没有直接的关联。

(3) 利用光学和近红外积分视场光谱的观测,人们在多个近邻活动星系核中发现了电离气体和温热分子气体沿着核旋臂的内流现象(核棒导致内流的观测相对少一些),表明核旋臂和核棒对于活动星系核的燃料供给具有一定的作用。通过估算气体的质量内流率并且与黑洞的质量吸积率进行比较,人们发现:电离气体的质量内流率都大于或者相当于对应星系中黑洞的质量吸积率;而温热分子气体的质量内流率则往往比对应星系中黑洞的质量吸积率小。由此人们认为,内流的电离气体能够为核活动提供足够的燃料;而内流的温热分子气体可能

只是大量冷分子气体在内流过程中外层被加热的结果, 不是供给核活动燃料的主导成分。此外, 人们还比较了性质相匹配的活动星系核和正常星系样本中核区的气体分布和运动学特性, 发现两者之间存在差异。

(4) 利用毫米/亚毫米波干涉阵列和单天线的观测, 人们在一些近邻的活动星系核中发现了冷分子气体的内流行为。结合图像分析的结果, 人们发现其中具有丰富的非对称性结构(如大尺度的棒、核棒套在棒内、核旋臂套在棒内、核区卵形(oval)扭曲套在棒内等), 并且正是这些结构的力矩能够导致冷分子气体的内流。基于这些结果, 人们认为星系中的非对称性结构对于活动星系核的燃料供给具有一定的作用。

对于未来的研究, 我们期望在以下几个方面取得进展。

(1) 当前的光学和红外 IFU 观测所能达到的最好空间分辨率为几十个毫角秒, 可以很好地观测星系中央 kpc 到几十 pc 尺度的区域。未来一系列新兴的天文设备, 如 Thirty Meter Telescope (TMT), European Extremely Large Telescope (E-ELT), Giant Magellan Telescope (GMT), James Webb Space Telescope (JWST), 将会显著提高光学和红外观测的空间分辨率(1~2 个量级)。此外, ALAM 也正在逐渐开始完整地运行, 这将大大提高人们通过分子谱线观测星系核区冷气体的能力。上述天文设备的发展将使人们能够在更小的尺度上(十 pc 尺度甚至是 pc 尺度)研究活动星系核的燃料供给机制。这样的空间分辨能力对于研究黑洞周围的小尺度燃料供给过程非常重要。

(2) 我们在 2.4 节中提到了星系中恒星形成活动对于核活动燃料供给的影响。现有的观测能够对星系中央 kpc 的物理尺度进行空间分辨的研究, 但是却难以分辨小于 50 pc 内的物理过程。以上提到的一些未来的高空间分辨率仪器, 将能够对小于 50 pc 内的物理过程进行直接研究, 为人们了解星系核区恒星形成活动与核活动的关系提供有价值的观测信息。

(3) 现阶段活动星系核燃料供给机制的研究中, 具有空间可分辨光谱观测的研究样本大小一般在几个星系到几十个星系。这一规模的样本还不足以提供统计显著的结论, 因此更大样本的空间可分辨光谱观测(几百到几千个星系)是未来研究所需要的。现在国际上正在开展的一系列积分场光谱巡天, 如 Atlas 3D 巡天, Calar Alto Legacy Integral Field Area (CALIFA) 巡天, Sydney-AAO (Australian Astronomical Observatory) Multi-object Integral-field spectrograph (SAMI) 巡天, Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory (MANGA) 巡天以及各种新一代的积分场光谱仪, 如 Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE), K-band Multi-Object Spectrograph (KMOS) 将能够提供丰富的空间可分辨光谱观测, 更为完整地采样活动星系核的各种物理参数(如黑洞质量、光度、质量吸积率和黑洞自旋等), 使人们有机会从更为物理的角度去选择样本, 从而研究这些参数与质量内流率之间关系, 深化人们对不同燃料供给机制的理解。此外, 我国在丽江 2.4 m 望远镜上安装的首台积分场光谱仪 CHIna Lijiang Integral-field unit (CHILI) 也将于年内开始观测。CHILI 将为国内研究人员提供第一手的观测数据, 从而促进我国在活动星系核燃料供给这一领域的快速发展。

(4) 星系核区的气体运动学行为十分复杂, 既有绕着星系盘的圆周运动, 也有与核活动相联系的内流外流过程。现在人们在分解这几种成分时所采用的方法还存在较大的不确定性。

未来随着空间可分辨观测数据的增加,将会需要更加完善的运动学分析方法,从而更为精确地测量质量内流率这一重要的物理量。

参考文献:

- [1] Ferrarese L, Ford H C, Huchra J, et al. *ApJS*, 2000, 128: 431
- [2] Gebhardt K, Bender R, Bower G, et al. *ApJ*, 2000, 539: L13
- [3] Tremaine S, Gebhardt K, Bender R, et al. *ApJ*, 2002, 574: 740
- [4] Peterson B M. *An Introduction to Active Galactic Nuclei*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1997
- [5] Krolik J H. *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment*. Princeton: Princeton University Press, 1998
- [6] Osterbrock D E, Ferland G J. *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*. CA: University Science Books, 2006
- [7] Ho L C. *ARA&A*, 2008, 46: 475
- [8] Netzer H. *The Physics and Evolution of Active Galactic Nuclei*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013
- [9] Heckman T M, Best P N. *ARA&A*, 2014, 52: 589
- [10] Salpeter E E. *ApJ*, 1964, 140: 796
- [11] Lynden-Bell D. *Nature*, 1969, 223: 690
- [12] Shakura N I, Sunyaev R A. *A&A*, 1973, 24: 337
- [13] Soltan A. *MNRAS*, 1982, 200: 115
- [14] Rees M J. *ARA&A*, 1984, 22: 471
- [15] Shlosman I, Frank J, Begelman M C. *Nature*, 1989, 338: 45
- [16] Shlosman I, Begelman M C, Frank J. *Nature*, 1990, 345: 679
- [17] Martini P. *The Interplay Among Black Holes, Stars and ISM in Galactic Nuclei*. Storchi-Bergmann T, Ho L C, Schmitt H R, eds. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004
- [18] Joglee S. *Physics of Active Galactic Nuclei at all Scales*. Alloin D, ed. Berlin and Heidelberg: Springer, 2006
- [19] Negroponte J, White S D M. *MNRAS*, 1983, 205: 1009
- [20] Sanders D B, Soifer B T, Elias J H, et al. *ApJ*, 1988, 325: 74
- [21] Barnes J E, Hernquist L E. *ApJ*, 1991, 370: L65
- [22] Quinn P J, Hernquist L, Fullagar D P. *ApJ*, 1993, 403: 74
- [23] Mihos J C, Hernquist L. *ApJ*, 1996, 464: 641
- [24] Kauffmann G, Haehnelt M. *MNRAS*, 2000, 311: 576
- [25] Di Matteo T, Springel V, Hernquist L. *Nature*, 2005, 433: 604
- [26] Hopkins P F, Hernquist L, Cox T J, et al. *ApJS*, 2006, 163: 1
- [27] Hopkins P F, Hernquist L, Cox T J, et al. *ApJS*, 2008, 175: 356
- [28] Joglee S, Knäpen J H, Laine S, et al. *ApJ*, 2002, 570: L55
- [29] Joglee S, Scoville N, Kenney J D P. *ApJ*, 2005, 630: 837
- [30] Kormendy J, Kennicutt R C, JR. *ARA&A*, 2004, 42: 603
- [31] Athanassoula E. *MNRAS*, 2008, 390: L69
- [32] Sellwood J A. *Reviews of Modern Physics*, 2014, 86: 1
- [33] Ho L C, Filippenko A V, Sargent W L W. *ApJ*, 1997, 487: 591
- [34] Wada K. *Carnegie Observatories Astrophysics Series, Vol. 1: Coevolution of Black Holes and Galaxies*. Ho L C, ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004
- [35] Ho L C. *ApJ*, 2009, 699: 626
- [36] Cisternas M, Jahnke K, Inskip K J, et al. *ApJ*, 2011, 726: 57
- [37] Schawinski K, Urry C M, Virani S, et al. *ApJ*, 2010, 711: 284

- [38] Schawinski K, Treister E, Urry C M, et al. *ApJ*, 2011, 727: L31
- [39] Schawinski K, Simmons B D, Urry C M, et al. *MNRAS*, 2012, 425: L61
- [40] Weinzirl T, Joglee S, Conselice C J, et al. *ApJ*, 2011, 743: 87
- [41] Kocevski D D, Faber S M, Mozena M, et al. *ApJ*, 2012, 744: 148
- [42] Simmons B D, Urry C M, Schawinski K, et al. *ApJ*, 2012, 761: 75
- [43] Simmons B D, Lintott C, Schawinski K, et al. *MNRAS*, 2013, 429: 2199
- [44] Karouzos M, Jarvis M J, Bonfield D. *MNRAS*, 2014, 439: 861
- [45] Villforth C, Hamann F, Rosario D J, et al. *MNRAS*, 2014, 439: 3342
- [46] Kartaltepe J S, Sanders D B, Le Floch E, et al. *ApJ*, 2010, 721: 98
- [47] Koss M, Mushotzky R, Veilleux S, et al. *ApJ*, 2011, 739: 57
- [48] Treister E, Schawinski K, Urry C M, et al. *ApJ*, 2012, 758: L39
- [49] Rosario D J, Santini P, Lutz D, et al. *A&A*, 2012, 545: A45
- [50] Mulchaey J S, Regan M W. *ApJ*, 1997, 482: L135
- [51] Hunt L K, Malkan M A. *ApJ*, 1999, 516: 660
- [52] Shlosman I, Peletier R F, Knapen J H. *ApJ*, 2000, 535: L83
- [53] Laine S, Shlosman I, Knapen J H, et al. *ApJ*, 2002, 567: 97
- [54] Laurikainen E, Salo H, Buta R. *ApJ*, 2004, 607: 103
- [55] Oh S, Oh K, Yi S K. *ApJS*, 2012, 198: 4
- [56] Lee G H, Woo J H, Lee M G, et al. *ApJ*, 2012, 750: 141
- [57] Cisternas M, Gadotti D A, Knapen J H, et al. *ApJ*, 2013, 776: 50
- [58] Cheung E, Trump J R, Athanassoula E, et al. *MNRAS*, 2015, 447: 506
- [59] Cisternas M, Sheth K, Salvato M, et al. *ApJ*, 2015, 802: 137
- [60] Galloway M A, Willett K W, Fortson L F, et al. *MNRAS*, 2015, 448: 3442
- [61] Kormendy J, Ho L C. *ARA&A*, 2013, 51: 511
- [62] Nemmen R S, Storchi-Bergmann T, Yuan F, et al. *ApJ*, 2006, 643: 652
- [63] Yuan F. *The Central Engine of Active Galactic Nuclei*. Ho L C, Wang J W, eds. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2007
- [64] Ho L C, Filippenko A V, Sargent W L W. *ApJS*, 1997, 112: 315
- [65] Hernquist L, Mihos J C. *ApJ*, 1995, 448: 41
- [66] Neistein E, Netzer H. *MNRAS*, 2014, 437: 3373
- [67] Fischer T C, Crenshaw D M, Kraemer S B, et al. *ApJ*, 2015, 799: 234
- [68] Gaspari M, Ruzsowski M, Oh S P. *MNRAS*, 2013, 432: 3401
- [69] Li Y, Bryan G L. *ApJ*, 2014, 789: 153
- [70] Voit G M, Donahue M, Bryan G L, et al. *Nature*, 2015, 519: 203
- [71] Davies R I, Maciejewski W, Hicks E K S, et al. *ApJ*, 2014, 792: 101
- [72] Mezcuca M, Prieto M A, Fernández-Ontiveros J A, et al. *MNRAS*, 2015, 452: 4128
- [73] Maccagni F M, Santoro F, Morganti R, et al. *A&A*, 2016, 588: A46
- [74] Tremblay G R, Oonk J B R, Combes F, et al. *Nature*, 2016, 534: 218
- [75] Combes F, Gerin M. *A&A*, 1985, 150: 327
- [76] Athanassoula E. *MNRAS*, 1992, 259: 328
- [77] Maciejewski W, Teuben P J, Sparke L S, et al. *MNRAS*, 2002, 329: 502
- [78] Hopkins P F, Quataert E. *MNRAS*, 2010, 407: 1529
- [79] Norman C, Scoville N. *ApJ*, 1988, 332: 124
- [80] Wada K, Norman C A. *ApJ*, 2002, 566: L21
- [81] Davies R I, Müller Sánchez F, Genzel R, et al. *ApJ*, 2007, 671: 1388
- [82] Kawakatu N, Wada K. *ApJ*, 2008, 681: 73
- [83] Schartmann M, Meisenheimer K, Klahr H, et al. *MNRAS*, 2009, 393: 759
- [84] Schartmann M, Burkert A, Krause M, et al. *MNRAS*, 2010, 403: 1801
- [85] Wada K, Papadopoulos P P, Spaans M. *ApJ*, 2009, 702: 63

- [86] Hobbs A, Nayakshin S, Power C, et al. *MNRAS*, 2011, 413: 2633
- [87] Davies R, Burtscher L, Dodds-Eden K, et al. *Journal of Physics Conference Series*, 2012, 372(1): 012046
- [88] Alexander D M, Hickox R C. *Nucleic Acids Research*, 2012, 56: 93
- [89] Friedli D, Martinet L. *A&A*, 1993, 277: 27
- [90] Heller C H, Shlosman I. *ApJ*, 1994, 424: 84
- [91] Montenegro L E, Yuan C, Elmegreen B G. *ApJ*, 1999, 520: 592
- [92] Wada K, Norman C A. *ApJ*, 2001, 547: 172
- [93] Knapen J H. *A&A*, 2005, 429: 141
- [94] Knapen J H, Mazzuca L M, Böker T, et al. *A&A*, 2006, 448: 489
- [95] Comerón S, Knapen J H, Beckman J E. *A&A*, 2008, 485: 695
- [96] Comerón S, Knapen J H, Beckman J E, et al. *MNRAS*, 2010, 402: 2462
- [97] Imanishi M. *ApJ*, 2003, 599: 918
- [98] Imanishi M, Wada K. *ApJ*, 2004, 617: 214
- [99] Shi Y, Ogle P, Rieke G H, et al. *ApJ*, 2007, 669: 841
- [100] Watabe Y, Kawakatu N, Imanishi M. *ApJ*, 2008, 677: 895
- [101] Diamond-Stanic A M, Rieke G H. *ApJ*, 2012, 746: 168
- [102] Esquej P, Alonso-Herrero A, González-Martín O, et al. *ApJ*, 2014, 780: 86
- [103] Izumi T, Kawakatu N, Kohno K. *ArXiv e-prints*, 2016
- [104] Schawinski K, Virani S, Simmons B, et al. *ApJ*, 2009, 692: L19
- [105] Wild V, Heckman T, Charlot S. *MNRAS*, 2010, 405: 933
- [106] Malkan M A, Gorjian V, Tam R. *ApJS*, 1998, 117: 25
- [107] Knapen J H, Beckman J E, Heller C H, et al. *ApJ*, 1995, 454: 623
- [108] Jogee S, Kenney J D P, Smith B J. *ApJ*, 1999, 526: 665
- [109] Maciejewski W, Sparke L S. *MNRAS*, 2000, 313: 745
- [110] Regan M W, Mulchaey J S. *AJ*, 1999, 117: 2676
- [111] Martini P, Pogge R W. *AJ*, 1999, 118: 2646
- [112] Shlosman I, Heller C H. *ApJ*, 2002, 565: 921
- [113] Martini P, Pogge R W, Ravindranath S, et al. *ApJ*, 2001, 562: 139
- [114] Erwin P, Sparke L S. *AJ*, 2002, 124: 65
- [115] Pogge R W, Martini P. *ApJ*, 2002, 569: 624
- [116] Fukuda H, Wada K, Habe A. *MNRAS*, 1998, 295: 463
- [117] Wada K, Meurer G, Norman C A. *ApJ*, 2002, 577: 197
- [118] Martini P, Regan M W, Mulchaey J S, et al. *ApJ*, 2003, 589: 774
- [119] Phillips A C, Illingworth G D, MacKenty J W, et al. *AJ*, 1996, 111: 1566
- [120] Carollo C M, Stiavelli M, Mack J. *AJ*, 1998, 116: 68
- [121] Elmegreen B G, Elmegreen D M, Brinks E, et al. *ApJ*, 1998, 503: L119
- [122] Laine S, Knapen J H, Perez-Ramirez D, et al. *MNRAS*, 1999, 302: L33
- [123] Simões Lopes R D, Storchi-Bergmann T, de Fátima Saraiva M, et al. *ApJ*, 2007, 655: 718
- [124] Schnorr-Müller A, Storchi-Bergmann T, Nagar N M, et al. *MNRAS*, 2014, 438: 3322
- [125] Fathi K, Storchi-Bergmann T, Riffel R A, et al. *ApJ*, 2006, 641: L25
- [126] Storchi-Bergmann T, Dors O L, JR., Riffel R A, et al. *ApJ*, 2007, 670: 959
- [127] Schnorr Müller A, Storchi-Bergmann T, Riffel R A, et al. *MNRAS*, 2011, 413: 149
- [128] Schnorr-Müller A, Storchi-Bergmann T, Robinson A, et al. *MNRAS*, 2016, 457: 972
- [129] Riffel R A, Storchi-Bergmann T, Winge C, et al. *MNRAS*, 2008, 385: 1129
- [130] Riffel R A, Storchi-Bergmann T. *MNRAS*, 2011, 411: 469
- [131] Riffel R A, Storchi-Bergmann T, Winge C. *MNRAS*, 2013, 430: 2249
- [132] Diniz M R, Riffel R A, Storchi-Bergmann T, et al. *MNRAS*, 2015, 453: 1727
- [133] Davies R I, Maciejewski W, Hicks E K S, et al. *ApJ*, 2009, 702: 114
- [134] Müller Sánchez F, Davies R I, Genzel R, et al. *ApJ*, 2009, 691: 749

- [135] Dumas G, Mundell C G, Emsellem E, et al. MNRAS, 2007, 379: 1249
[136] Hicks E K S, Davies R I, Maciejewski W, et al. ApJ, 2013, 768: 107
[137] García-Burillo S, Combes F. Journal of Physics Conference Series, 2012, 372(1): 012050
[138] Casasola V, Hunt L K, Combes F, et al. A&A, 2011, 527: A92
[139] Combes F, García-Burillo S, Casasola V, et al. A&A, 2014, 565: A97
[140] Fathi K, Lundgren A A, Kohno K, et al. ApJ, 2013, 770: L27
[141] Maciejewski W. MNRAS, 2004, 354: 89

The Feeding Mechanisms of Nearby Active Galactic Nuclei: An Overview of the Spatially Resolved Observations

LUO Rong-xin^{1,2}, HAO Lei¹

(1. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Active galactic nuclei (AGN) are galaxies that have very energetic central regions, which can present several observational signatures such as high luminosity, compact size, variability and strong emission lines. Studying the feeding processes of AGN can help us to understand the accretion and mass growth of the super massive blackholes (SMBHs), and the co-evolution between the SMBHs and their host galaxies. In this paper, we review the spatially-resolved observational studies of the AGN feeding processes in recent twenty years. First, we briefly discuss the key problems in the feeding processes of AGN, including: (1) How much fuel does the nuclear activity need? (2) What is the origin of the fuel? (3) How does the fuel efficiently lose its angular momentum? (4) How can the star formation processes in the nuclear or circumnuclear region affect the nuclear activity? Secondly, we introduce and discuss the recent observational results of the nearby AGN, including: the observations of HST imaging, the observations of optical and near-infrared integral field spectroscopy, and the observations of cold gas in the central regions of these galaxies. These observational studies suggest that the non-asymmetric structures (such as large-scale bars, nuclear bars within bars, nuclear spirals within bars, nuclear ovals within bars, etc.) in galaxies can dissipate the angular momentum of gas and drive it into the central regions, which may play an important role in the feeding AGN. Finally, we summarize the results and prospect for the future studies.

Key words: active galactic nuclei; feeding mechanisms; inflows