

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2020.02.03

中等质量黑洞活动星系核的射电 连续谱研究：总结与展望

董小波¹, 毛羽丰², 钱 磊³

(1. 中国科学院 云南天文台, 昆明 650216; 2. 中国科学院 前沿科学与教育局, 北京 100864; 3. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

摘要: 中等质量黑洞活动星系核 (intermediate mass black hole active galactic nuclei, IMBH AGN) 是指中心黑洞大约在 $10^2 M_{\odot} \sim 10^6 M_{\odot}$ 质量范围的活动星系核。关于近邻宇宙中 IMBH AGN 的研究, 对于理解高红移类星体中的超大质量黑洞起源 (即“种子黑洞问题”)、低频引力波源等基本问题有着重要意义。得益于近 20 年来大规模光学光谱巡天的发展, 已发现近邻宇宙中的宽线 IMBH AGN 的数目超过 500 个。对于这些光学选 IMBH AGN, 基于 VLA FIRST 巡天数据, 针对小样本或个源的专门射电连续谱观测, 已取得不少结果。从射电形态、连续谱谱型、射电功率和射电噪声度、黑洞吸积基本面这四个方面, 详细地介绍了目前 IMBH AGN 射电连续谱研究的进展。并且, 分别面向当前正在开展的几个 SKA 探路者大规模连续谱巡天项目, 以及大约 10 年后运行的 SKA (至少是 SKA 一期), 展望了 IMBH AGN 领域将来可以进行研究的科学目标。

关键词: 中等质量黑洞; 种子黑洞; 低光度活动星系核; 黑洞吸积; 相对论喷流

中图分类号: P157.6 **文献标识码:** A

1 引 言

1.1 中等质量黑洞活动星系核及其意义

最近 20 年来, 星系与活动星系核 (AGN) 领域有一个重要进展: 发现中等质量黑洞^① 活动星系核 (IMBH AGN, 又称小质量活动星系核) 大量存在于近邻宇宙中^[1-6] (更多的最新进

收稿日期: 2019-06-17; 修回日期: 2019-07-17

资助项目: 国家自然科学基金 (11873083, 11603036); 中国科学院青年促新促进会 (2018075)

通讯作者: 董小波, xbdong@ynao.ac.cn

^①顾名思义, 中等质量黑洞是指介于恒星级黑洞与超大质量黑洞之间的 (有可能存在的) 黑洞。质量大约在 $(10^2 \sim 10^6) M_{\odot}$ 范围的黑洞, 被宽泛地称作 IMBH; 有些文献中, 星系中心的 IMBH 又被称作小质量黑洞 (low-mass BHs), 但由于“小质量”的意义不明确, 而且容易与“小质量 X 射线双星” (恒星级黑洞吸积系统) 中的“小质量”相混淆, 本文不使用术语“小质量黑洞”。相应地, IMBH AGN 专指中心黑洞质量不超过 $10^{6.5} M_{\odot}$ 的 AGN。

展见综述 [7-9])。目前已知的 IMBH AGN, 中心黑洞质量 M_{BH} 主要在 $10^5 M_{\odot} \sim 10^{6.5} M_{\odot}$ 范围内。主要得益于最近几年自适应光学 (AO) 技术的提高 (在 10 m 级的光学近红外望远镜上的应用), 研究者对于很近邻的若干较小质量宁静星系以及若干 AGN 中心的中等质量黑洞, 已经有了基于恒星动力学或气体动力学的质量测量 (见文献 [8] 中的表 2); 但目前绝大多数 IMBH 都只能通过 AGN 连续谱与发射线特征来证认并估算黑洞质量。中国研究者通过在 SDSS 光谱巡天的海量光谱库中开展数据挖掘, 选取了目前国际上最大的 IMBH AGN 样本 (共 513 个宽线 AGN^[5, 6])。

近邻宇宙中的 IMBH AGN 的研究, 对于研究者理解高红移 ($z \approx 7$) 类星体中心超大质量黑洞的起源 (即所谓“种子黑洞问题”)、低频引力波源等基本问题, 有着重要意义, 因此是当前国际上竞争激烈的热门课题之一, 亦是当前或规划中的国际最大型的望远镜项目 (例如 James Webb 空间望远镜、30 m 级光学红外地面望远镜, 以及 SKA 和 ngVLA 射电望远镜阵列) 的主要科学目标之一^[7-9]。

1.2 IMBH AGN 的射电连续谱观测及其意义

对于 IMBH AGN 射电连续谱的观测, 目标在于两个方面: 其一是理解, 即理解 IMBH AGN 射电性质, 包括基于射电性质获知 IMBH AGN 其他参数 (如利用吸积基本面关系估计黑洞质量^[10]); 其二则是发现, 即尽可能地利用更好的射电观测设备来发现更多、更暗弱的、中心黑洞质量更小的 IMBH AGN。以上两方面, 对于任何一个具体天文学领域的发展, 其意义都是不言自明的。具体的 IMBH AGN 科学内容和意义, 详见第 2 章和第 3 章。

天文学的发展, 观测仪器的发展是主要驱动力之一。如 IMBH AGN 射电连续谱领域, 直到今天, 主要是由 VLA (Very Large Array) 射电阵列的 FIRST 巡天 (Faint Images of the Radio Sky at Twenty-Centimeters) 所驱动。大概的研究脉络是, 研究者从 FIRST 巡天数据得到 IMBH AGN 样本射电性质的大体情况, 然后 (或者同时作为辅助) 对于若干射电源开展更深或角分辨率更高的观测。不久的将来, 升级之后的 VLA (即 Jansky Very Large Array, 简称为 JVLA^[11]) 将完成类似于 FIRST 的射电连续谱巡天 (VLA Sky Survey, VLASS), 若干 SKA 探路者阵列 (pathfinders) 以及它们的连续谱巡天项目也正在执行 (详见 3.1 节); 10 年之后 (详见 3.2 节), SKA (至少是 SKA 一期, SKA1) 将开始产生科学数据。因此我们可以肯定地说, IMBH AGN 射电连续谱研究的黄金时期很快将来临。

2 IMBH AGN 射电连续谱研究总结

AGN 的射电辐射主要来源于电子同步辐射, 这种辐射在频谱上表现为连续谱。关于 IMBH AGN 射电连续谱性质的研究, 目前很有限。主要原因在于: 目前发现的 IMBH AGN 数目并不多, 并且黑洞质量小而吸积率较高 (参见 2.4 节), 因而被 VLA FIRST 这样的射电巡天 (探测极限为 1 mJy ^[12]) 所探测到的源极少; 在我们发展新方法挖掘 FIRST 巡天图像、增加射电数据 (流量极限深至 0.5 mJy)^[13] 之前, 有射电流量数据的 IMBH AGN, 包括射电巡天和专门观测得到的, 总共只有 20 多个。因而这是一个亟需拓荒的研究方向。

具体而言, 较大样本的研究有两个工作, 都是基于 SDSS 光学光谱选的宽线 IMBH AGN 样本 (有较可靠的黑洞质量估算结果) 以及 VLA FIRST 射电巡天。Greene 和 Ho^[3] 基于她们从 SDSS 选的 IMBH AGN 样本 (229 个源), 匹配 FIRST 巡天源表^①得到 11 个射电源。Liu 等人^[6] 基于 SDSS 选的 IMBH AGN 样本 (513 个源), 匹配 FIRST 源表得到 26 个射电源。对于 IMBH AGN 的更高角分辨率、更深的射电观测, 只有 2 个很小的样本^[10, 14], 以及 3 个较极端的个源 (NGC 4395, GH10, NGC 404)。另外, Qian 等人^[13] 发展了一套新方法, 通过挖掘 FIRST 巡天图像的潜力把射电点源的流量极限推进到 0.5 mJy; 他们基于 Dong 等人^[5] 的 IMBH AGN 样本 (309 个源), 通过拟合 FIRST 图像, 探测到 52 个射电源。文献中有若干例如 Henize 2-10 这样的星系中心 IMBH 候选者的报道^[15, 16], 但由于它们没有较可靠的黑洞质量的计算结果, 甚至对于 AGN (亦即大质量黑洞) 都没有可靠的证认, 在此不予讨论。

下面我们分别从射电图像形态、射电连续谱谱型、射电功率和射电噪度, 以及黑洞吸积基本面关系这四个方面进行介绍。

2.1 射电图像形态

无论从 VLA FIRST 巡天的图像^[3, 6], 还是 VLA 或 JVLA, 或 VLBA 等设备专门观测得到的射电图像 (如文献[10, 14], 以及 NGC 4395^[17], GH10^[18], NGC 404^[19]) 来看, 所有的 IMBH AGN 的射电连续谱辐射区域都是致密的, 即没有一个大尺度的发展得很好的喷流。即使是可以分辨出延展结构的源, 射电辐射区也只是在 0.3 pc (NGC 4395) 和 17 pc (NGC 404) 这样小的物理尺度上。

Wrobel 和 Ho^[17] 使用 VLBI 高灵敏度阵列 (High Sensitivity Array, HSA) 来分辨 NGC 4395 的射电结构。HSA 由美国的 VLBA 阵列、VLA 阵列、GBT 射电望远镜组成, 共同进行 VLBI 观测。她们的观测是在 1.4 GHz 处 (带宽 32 MHz), 波束椭圆短轴方向的半高全宽 (FWHM) 即最高角分辨率为 5.4 mas, 在 NGC 4395 红移处, 对应 0.1 pc。HSA 勉强观测到延展的结构, 大约 15 mas, 即投影的物理尺寸为 0.3 pc。

Wrobel 等人^[18] 使用 VLA 阵列在 3 个频段 (8.5 GHz, 4.9 GHz, 1.4 GHz) 对 GH10 进行了观测, 结果都未能分辨出延展结构。8.5 GHz 和 4.9 GHz 的角分辨率较高, 高斯波束的 FWHM 为 0.42"; 退卷积之后, 源的直径小于 0.21" (320 pc), 结果说明 GH10 射电源的投影尺寸不超过 320 pc。

Nyland 等人^[19] 使用 JVLA 在 Ku 频段 (12 ~ 18 GHz) 观测 NGC 404, 分辨出了延展结构。观测的分辨率即波束椭圆为 0.15" × 0.11"。射电源延伸的尺寸为 1.13", 即 17 pc。IMBH AGN 射电辐射的这个特点, 类似于帕洛玛巡天中的赛弗特星系 (简称帕洛玛赛弗特) 中的射电核的形态^[20], 特别是很像其中的陡谱源 ($\alpha < -0.5$, $f_\nu \propto \nu^\alpha$)。我们将在 2.2 节中讨论。

2.2 射电连续谱谱型

目前, 在两个或以上射电频率处有同时测量的 IMBH AGN 只有 3 个, 即 NGC 4395,

^①<http://sundog.stsci.edu/cgi-bin/searchfirst>

GH10 和 NGC 404。有意思的是，它们都是射电陡谱源。

NGC 4395 是帕洛玛赛弗特星系之一，很早以前 Ho 和 Ulvestad^[20] 就使用 VLA 观测，得到 1.4 GHz 和 4.9 GHz 之间的谱指数为 -0.60 ± 0.08 。如 2.1 节所述，Wrobel 等人^[18] 利用 3 个频段对 GH10 的观测数据进行计算，得到谱指数为 -0.76 ± 0.05 ；NGC 404 的谱指数则为 -1.08 ± 0.03 ^[19]。

作为对照，基于帕洛玛巡天样本，近邻赛弗特星系的射电连续谱谱指数在较大的范围内 ($-1 < \alpha < +0.5$) 分布，但是其中约超过 60% 的源为陡谱，整个样本的谱指数 α 中值^①为 -0.4 ^[21, 22]。那些帕洛玛赛弗特射电源的寄主星系与一般的近邻赛弗特星系一样，属于(晚型) 盘星系，核球占比不显著。跟射电噪类星体相比，它们的射电功率并不强，1.4 GHz 处的单色功率在 $10^{18} \sim 10^{25} \text{ W}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 范围；但由于它们的光学核连续谱功率也不高，因此大部分帕洛玛赛弗特星系可以认为是射电噪的，射电噪度 ($R \equiv L_\nu(5 \text{ GHz})/L_\nu(\text{B})$ ^[23]) $R > 10$ ^[24]。从射电形态上看，帕洛玛赛弗特星系没有充分发展的相对论性喷流，主要构成为：一个较致密的(几十秒差距或以下的尺度) 射电核，有时附带有类似喷流状或外流状的延伸结构。对于射电陡谱的帕洛玛赛弗特星系，研究者认为它们的射电连续谱辐射起源于光学薄的同步辐射，未受各种内部和外部的不透明度因素的影响，因此谱是陡的。从理论诠释的角度看，类比于恒星级黑洞吸积系统的几种“吸积-喷流”态，射电陡谱赛弗特星系可认为是处于甚高态(或称中间态)，刚从高软态转换过来，并伴随有光学薄的射电抛射事件。这种态转换过程中的抛射事件(或称“外流”)是低功率的，不同于低硬态中显著稳定的相对论性喷流；这与该源刚离开的高软态中的射电性质一致，在高软态中喷流活动是普遍受抑制的^[25]。IMBH AGN 的射电性质，与上述射电陡谱赛弗特星系的各个方面似乎都很一致。但由于目前观测数据有限(只有上述 3 个源有较为详细的研究)，我们在这里不做过多的分析和理论推理。

2.3 射电功率、射电噪度

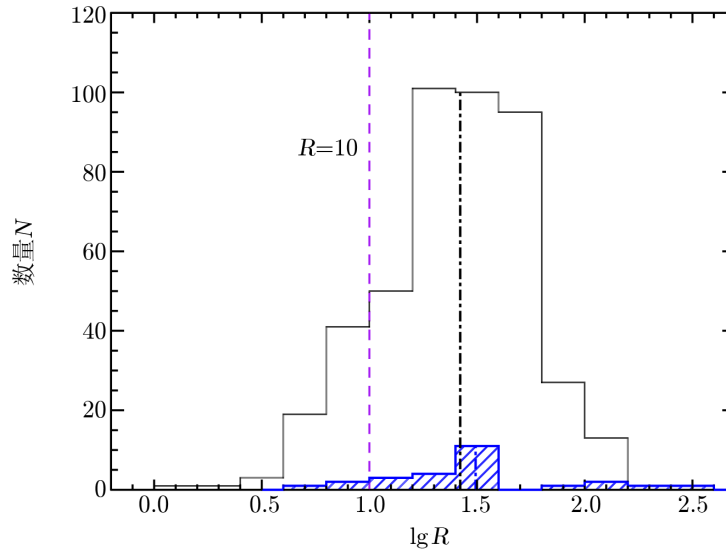
关于射电功率、射电噪度的样本统计，只有两篇文献。Greene 和 Ho^[3] 把她们的 IMBH AGN 样本(229 个源)和 FIRST 巡天作匹配，发现 211 个源被 FIRST 巡天所覆盖，其中 11 个源探测到射电流量(即被 FIRST 源表所收录，流量极限为每波束 1 mJy)。但由于她们的 IMBH AGN 样本中 25% 的源(55 个)是肉眼判断挑选出的，并不符合她们的 IMBH AGN 判据，因此不是一个一致性选取的适合做统计分析的样本。

Liu 等人^[6] 采用了 Dong 等人^[5] 的光谱拟合方法、同样的 IMBH AGN 判据和自动选源流程。Dong 等人从 SDSS DR4 中选出 309 个 IMBH AGN，Liu 等人推广到 SDSS DR7，从 DR4 之后的增量光谱库中又选出 204 个源；因此在 SDSS DR7 中，基于光学发射线性质的-一致性判据，总计有 513 个 IMBH AGN。这 513 个源中，491 个源被 FIRST 巡天所覆盖，其中 26 个源被 FIRST 官方源表所收录。这 26 个源的射电功率在 $2 \times 10^{21} \sim 4 \times 10^{23} \text{ W}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 范围，中值为 $4 \times 10^{22} \text{ W}\cdot\text{Hz}^{-1}$ (见 Liu 等人^[6] 的表 5)。Greene 和 Ho^[3] 的 11 个射电源射电

^①一般地，研究者把幂律谱指数 $\alpha = -0.5$ 作为平谱源、陡谱源的分界；本节所介绍的原始文献 [20, 21] 以及后来的综述文章 [22] 中(即关于帕洛玛赛弗特星系的射电观测)，作者把 $\alpha = -0.2$ 作为两者的分界。

功率在 $2 \times 10^{21} \sim 9 \times 10^{22} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 范围。

有趣的是, 虽然 FIRST 巡天不深, 灵敏度为每波束 $1\sigma = 0.15 \text{ mJy}$, 每个源的有效观测时间只有 3 min, 点源的探测极限 (即 FIRST 官方源表的流量下限) 为 1 mJy, 但是这 26 个源中有 23 个源可算作是射电噪的 ($R > 10$)。这是因为, IMBH AGN 的光学发射线和核连续谱同样很弱, 光谱中的连续谱往往被寄主星系星光成分所主导, 因此按照射电噪度的定义公式, FIRST 探测到的大部分源反而应该归类为射电噪的。其实, 在对帕洛玛赛弗特星系的 VLA 深度观测中 (灵敏度为每波束 $1\sigma = 0.04 \text{ mJy}$), 也有过同样的现象^[24]; 帕洛玛赛弗特星系虽然黑洞质量普遍比本文提到的 IMBH AGN 大, 但它们的吸积率更低。



注: 全部 491 个源的分布, 见黑色直方图; 对于未收录入 FIRST 官方源表的源 (即 20 cm 频段处的流量小于 FIRST 源表的 1 mJy 流量限), 则取 1 mJy 作为它们的流量来计算射电噪度 R ; 收录入 FIRST 官方源表 (即流量大于 1 mJy) 的 26 个源的分布, 另外单独画为蓝色的直方图。垂直的虚线代表射电噪 AGN 的分界线 $R = 10$ 。黑色、蓝色的点划线, 分别是所有源、那 26 个源的射电噪度中值。

图 1 491 个被 FIRST 巡天所覆盖的 IMBH AGN 的射电噪度的分布^[6]

在 Liu 等人^[6]采用的 491 个被 FIRST 巡天所覆盖源中, 23 个有 FIRST 流量的源为射电噪, 若按这两个数字简单计算, 则射电噪比例为 4.7%。但如上所述, 在 FIRST 的 1 mJy 流量限之下的源, 很可能也是射电噪的。Liu 等人做了个简单估算: 对于未被 FIRST 源表收录的源, 他们按照流量上限 1 mJy 来计算射电噪度上限 R_{limit} , 则绝大部分源 $R_{\text{limit}} > 10$, 如图 1 所示。因此, Liu 等人^[6]报告的射电噪比例只能看作是下限; 具体的射电噪比例数值, 有待于更深的射电观测。

另外, 由于 FIRST 的角分辨率不高 (波束的 FWHM 约 $5.4''$), 即使是 FIRST 点源也可能包含有可观的寄主星系恒星形成过程所辐射的射电流量, 因此这小节里所引用的射电功率和射电噪度仍需检查。不过, 从射电功率与 AGN 发射线功率的相关性来看 (见 Liu 等人^[6]的图 10), 恒星形成过程的射电贡献不至于颠覆对于 IMBH AGN 射电性质的大体上的认识。

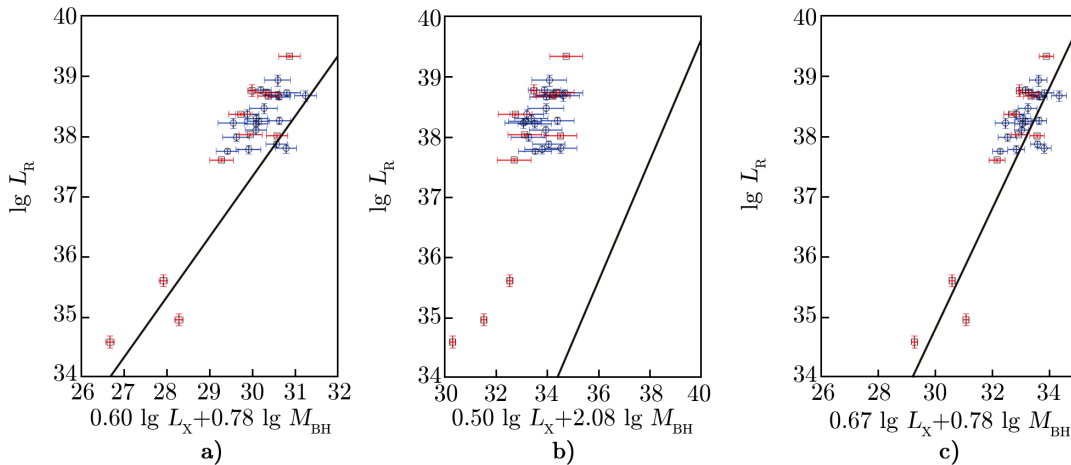
我们从 2.2 和 2.3 节的论述知道, 射电噪的赛弗特星系并没有充分发展的相对论性喷流, 这与射电噪类星体、射电星系、BL Lac 等射电源有本质的不同。因此, 从喷流物理的角度来看, 射电噪度这样的指标似乎并不是一个很好的物理量。另一方面, 活动星系核的射电噪度 (即喷流功率相对于吸积盘辐射功率的强弱) 除了依赖于吸积率之外, 似乎还与黑洞质量有关系: 在大黑洞质量端, 高吸积率且射电噪的源 (即射电噪类星体) 在类星体中所占比例并不低 (约大于 20%^[26]); 在低质量端, 高吸积率且射电噪的源 (即 RL NLS1) 比例就很低, 不高于 6%^[14, 27]。关于这方面的知识和理解, 我们将在 2.4 节中作进一步讨论。

2.4 黑洞吸积基本面关系

十几年以来, 研究者综合低硬态 X 射线双星和低吸积率 AGN 的观测数据, 得到一个很有趣的发现: 射电光度 L_R 、X 射线光度 L_X 、黑洞质量 M_{BH} 三者之间有一种很好的相关性, 即所谓的黑洞吸积基本面关系 (BH-FP^[28]):

$$\lg L_R = \xi_X \lg L_X + \xi_M \lg M_{BH} + C \quad (1)$$

对于高吸积率且辐射高效的吸积系统 (如射电宁静 AGN), 研究者发现它们也存在类似的但系数不同的基本面关系^[29]。关于高吸积率且射电噪的 AGN, 有一些研究者尝试性地提出它们类似于中间态的 X 射线双星^[30], 而且可能符合低态的吸积基本面关系, 只是弥散大^[31, 32]。对于 IMBH AGN, 初步的研究表明: 它们 (看起来) 也与某一个比较紧的基本面关系符合得较好^[10, 13] (见图 2 和下文)。



注: 红色圆圈代表文献中已有的 10 个源, 蓝色符号是 Qian 等人^[13]新增的 19 个源。a) 中的斜线为 Merloni 等人^[28]得到的关系式; b) 中的斜线为 Gültekin 等人^[36]得到的关系式; c) 中的斜线为 Gültekin 等人^[36]统一拟合超大质量 AGN 及 X 射线双星数据得到的关系式 $\lg L_R = (0.67 \pm 0.12) \lg L_X + (0.78 \pm 0.27) \lg M_{BH} + (4.80 \pm 0.24)$, 低质量 AGN 看上去符合此关系。

图 2 IMBH AGN 与 3 个常用的吸积基本面关系^[13]

以上是从观测 (或称经验) 角度进行的评述。从理论角度来看, BH FP 是喷流的标度不变性模型^[33]所激发出的灵感。这种模型假设喷流的物理属性 (例如磁场强度) 具有标度不变

性(即自相似性), 因此喷流的同步辐射强度(例如 L_R) 对于黑洞质量和吸积率的变化也具有标度不变性。喷流起源于吸积盘内区, 研究者可以合理地假定喷流基部具有吸积盘内区同样的性质。而辐射低效的吸积盘模型(例如 ADAF) 具有标度不变性的特征, 正好与这种喷流模型的要求一致, 特别是符合相对于吸积率的标度不变性^[33]; 正是基于这个原因, 研究者起初研究BH-FP经验关系时着眼于低吸积率系统(亦即喷流主导的吸积系统)^[28, 34]。另一方面, 若射电辐射和X射线辐射各自有种种不同的起源时(如X射线辐射也有可能直接来自于喷流, 而不是吸积过程), 理论上BH FP参数也会有所不同^[28]。由于上述这些理论模型以及相应的假设尚不是定论, 本文不作过多介绍, 下面我们主要介绍和评论基于观测数据的研究工作。

对于BH-FP研究而言, IMBH数据的重要性是不言而喻的。目前FP经验关系的建立, 主要是基于恒星级黑洞吸积系统(即X射线双星)和超大质量黑洞吸积系统(即 $M_{BH} \gtrsim 10^{6.5} M_{\odot}$) 的联合数据拟合而得到, 因此中等质量段的数据点对于检验FP关系极为重要。

Gültekin等人^[10]首先开展了这种验证。他们对于Greene和Ho^[3]样本中有FIRST探测的12个IMBH AGN做进一步的JVLA射电观测^①, 以及X射线观测。他们的JVLA观测在8.5 GHz频段(2 GHz带宽), 角分辨率为0.30"左右(FWHM), 每波束流量下限(3σ)可达到0.1 mJy。结合X射线数据, 最终有10个源的数据可用于FP研究(其中3个源只有射电或X射线的流量上限)。

Qian等人^[13]提出了一种新方法, 直接从FIRST最终合成的科学图像上拟合并证认射电点源。这里我们要特别介绍FIRST巡天官方星表对于射电源的证认方法和标准, 更详细的介绍请见FIRST巡天的两篇官方文献[12, 35]。首先, FIRST源表中的流量(即峰值流量和积分流量两栏), 是测量的流量加上0.25 mJy之后的; 这个0.25 mJy是所谓的洁化偏差^[12, 35]。其二, FIRST源表证认源的标准是: 流量大于5倍的rms噪声(即 $f > 5\sigma$)。这里流量(即 f)是指改正洁化偏差之前的测量值。这里的 σ 即官方源表中的RMS栏, 是将对图像有贡献的每套格点图的rms加权合并得到的噪声值, 如FIRST天区覆盖的rms灵敏度成图。正如White等人^[35]文中所指出: “这(天区覆盖图的rms值, 即上述 σ)不应该用于给出天空中某个给定位置处的射电流量的确定上界, 而应该是从最终的叠加图像的相应位置处直接测量。”因此, Qian等人^[13]参考光学源的坐标位置, 直接拟合该位置的射电图像, 得到潜在的射电点源的流量; 相应地, 在该位置附近的射电图像空场, 直接测量得到rms噪声值。根据这种方法, 他们把射电点源的流量极限推深至0.5 mJy, 在Dong等人^[5]样本的288个被FIRST覆盖的IMBH AGN中, 探测到52个射电源(其中只有17个被FIRST官方源表所收录)。

Qian等人^[13]总结了Gültekin等人^[10]以及其他零星的观测数据, 在他们之前已观测可用于FP研究的IMBH AGN共10个(见Qian等人^[13]的表2); Qian等人新增加可供FP研究的

^①Gültekin等人^[10]当年文中声称有部分源不在FIRST源表中, 但据Qian等人^[13]检查, 他们全部12个源都有FIRST流量数据(即都在FIRST源表中); 见Qian等人^[13]的脚注10。

IMBH AGN 有 19 个 (见该表 1)。如前所述, 这 29 个源基本上符合“X 射线双星 + AGN”联合样本拟合得到的 FP 关系^[36]: $\xi_X = 0.67 \pm 0.12$, $\xi_M = 0.78 \pm 0.27$, $C = 4.80 \pm 0.24$ (见图 2)。

对于 IMBH AGN 本身的研究而言, 关于 FP 关系的研究有一个重要用途: 用来区分 (超常吸积的) 恒星级黑洞 [如超亮 X 射线源 (ultra luminous X-ray sources, ULX)^[37]] 和 IMBH AGN。因为, 根据 FP 关系, 由 L_X 和 L_R 估计出的黑洞质量虽然弥散较大, 但不确定程度基本上在一个量级之内, 不至于混淆恒星级黑洞与 IMBH。

另外, FP 关系可用来解释活动星系核喷流功率相对于吸积盘辐射功率的强弱 (即射电噪声度 R) 依赖于哪些因素。根据 Qian 等人^[13]的分析, 可把 FP 关系改写为 ℓ (射电光度与爱丁顿光度比) 与黑洞质量的关系, 如下式所示:

$$\lg R = (\xi_X - 1) \lg \ell + (\xi_M + \xi_X - 1) \lg M_{\text{BH}} + \mathbf{C} . \quad (2)$$

Merloni 等人^[28]和 Gültekin 等人^[36, 38]的最佳拟合 FP 关系表明: R 与 ℓ 的反相关及 R 与 M_{BH} 的正相关这两个相关关系的强度 (即幂律关系指数的绝对数值) 相似, 如 Gültekin 等人最新拟合的 FP 关系式^[38], $R \propto \ell^{-0.46}$, $R \propto M^{+0.46}$; 但是当考虑到最佳拟合参数的误差时, 这两个相关关系的统计显著性都较弱 (在 $1.5\sigma \sim 3.6\sigma$ 范围)。具体地说, 把 Merloni 等人^[28]最佳拟合的 FP 关系参数及其误差代入时, R 与 ℓ 的反相关的统计显著性为 3.6σ , R 与 M_{BH} 的正相关的统计显著性为 2.4σ ; 根据 Gültekin 等人^[36]统一拟合得到的 FP 参数及其误差, 分别为 3σ , 1.5σ ; 根据 Gültekin 等人^[38]的最新拟合结果则为 3.1σ , 2.7σ 。在这个问题上, 有待于将来更多更好的数据 (特别是在 IMBH 段的数据) 来限制 FP 参数的置信区间。

3 IMBH AGN 射电连续谱研究的展望

3.1 SKA 探路者时代 (未来 10 年)

保守估计, SKA 甚至 SKA 一期 (SKA1, 详见 3.2 节介绍), 可能需要等到 21 世纪 20 年代末之后才能建成。幸运的是, 一些 SKA 的探路者阵列已经建成, 启动了 (或者正在计划开展) 连续谱巡天项目^[39, 40]。工作频率在 1 GHz 以上的 SKA 探路者阵列有荷兰的 Westerbork (装配相位阵馈源 Apertif)、澳大利亚的 ASKAP 和南非的 MeerKAT。美国的 JVLA 也工作在 1 GHz 以上, 也正在开展连续谱巡天项目。这个波段是研究活动星系核射电喷流性质的主要观测波段。还有一些 SKA 低频探路者阵列工作在几十到几百兆赫频段, 如荷兰的 LOFAR 和澳大利亚的 MWA, 其观测也能提供额外的信息。上述可视作 SKA 连续谱巡天探路者阵列或先导项目的详细介绍, 可见参考文献 [39, 40], 以及各自的网站和文献。下面我们只对主要巡天计划的参数作简单介绍, 然后展望可以开展的 IMBH AGN 科学研究内容。

荷兰的 Westerbork 综合孔径望远镜 (WSRT) 装配了相位阵馈源 Apertif^①, 在 2018—2021 年期间将完成一个大约 3500 平方度的浅度连续谱巡天 (灵敏度达到每波束 $15 \mu\text{Jy}$) 和

^①<https://www.astron.nl/science-apertif/apertif-surveys>

大约 450 平方度的深度连续谱巡天 (每波束灵敏度达到 $6 \mu\text{Jy}$)。

MeerKAT 计划^①进行的 MIGHTEE 巡天计划在 20 平方度天区进行巡天, 灵敏度达到每波束 $0.1 \sim 1 \mu\text{Jy}$, 覆盖 $0.95 \sim 1.7 \text{ GHz}$ 频段。

使用 ASKAP 正在执行中的 EMU (Evolutionary Map of the Universe) 巡天^②, 工作在 1.3 GHz (带宽 300 MHz), 角分辨率为 $10''$, 灵敏度达到每波束 $10 \mu\text{Jy}$ 。这个巡天覆盖北纬 30° 以南所有天区, 预计将把已知射电源数量 (大约 250 万个) 增加到原来的 30 倍 (达到 7000 万个)。EMU 计划于 2020 年完成全部观测, 数据政策是 (几乎) 实时地公开释放数据。

VLASS (VLA Sky Survey, 这里只关注它的全天巡天项目)^③是使用升级后的 VLA (即 JVLA) 进行的新一代巡天, 工作在 $2 \sim 4 \text{ GHz}$ 频段, 可看作是原 VLA 的 NVSS 和 FIRST 巡天的升级。它将是 40 年来最大规模的射电巡天之一, 覆盖 80% 的天空 (南纬 40° 以北所有天区)。VLASS 已经从 2017 年 9 月开始观测, 分 3 次进行全天扫描 (预计 2020 年完成第一次全天扫描), 将在 2024 年完成全部观测; 数据政策是 (几乎) 实时地公开释放数据。VLASS 灵敏度达到每波束 $69 \mu\text{Jy}$, 是 FIRST 的 $2 \sim 3$ 倍; 同时它也具有相当好的角分辨率 (为 $2.5''$), 比 FIRST 提高一倍。VLASS 预计探测到大约 5×10^6 个射电源。

这些巡天结合起来覆盖了整个天空, 探测到的射电源将增加 1 到 2 个量级; 尤其是 ASKAP 的 EMU 和 JVLA 的 VLASS, 巡天规模非常大。这些巡天数据, 将使得 IMBH AGN 射电连续谱的大规模普查性研究成为可能。我们可以研究 IMBH AGN 的基本问题, 例如射电光度函数及其演化、黑洞吸积的基本面关系、活动星系核对寄主星系的反馈。多个频段的观测可以确定中等质量射电频谱的形状, 帮助我们了解其喷流的性质。对于这些大规模巡天所发现的新射电 IMBH AGN, 还可以开展更高角分辨率的后续射电观测, 从而研究第 2 章所介绍的各种具体射电性质。而且, 根据历史经验, 样本数量的巨大提高, 将引发一些本质的变化。

灵敏度更高的巡天, 将帮助人们发现更多低光度、小质量的 IMBH AGN, 甚至有可能发现新类型的射电低光度星系核。不同红移处 IMBH AGN 的射电光度函数, 可以帮助人们了解这些天体喷流或射电耀发的性质, 以及它们的演化。这些新知识可以帮助人们理解星系中心大质量黑洞的种子黑洞的起源和宇宙学演化。

此外, 我们还将介绍射电研究的另外一个具体的重要用途: 基于观测数据, 得到 IMBH AGN 的吸积率分布函数 $DF(\ell)$ ^④。从观测角度来看, AGN 吸积模式有三种^[30, 41]: 低吸积率的 (辐射低效, 一般有喷流, 有时又称作射电模式)、高吸积率且射电宁静的、高吸积率且射电噪的系统^[26] (主要指射电噪类星体和 FR II 星系, 数目比例相对较小)。这三种吸积模式, 令研究者联想起 X 射线双星 (即恒星级黑洞的吸积系统) 的吸积状态 (低硬态、高软态、中间

^①<https://ca.cyberska.org/groups/profile/36457/mightee>

^②<http://emu-survey.org>

^③<https://science.nrao.edu/science/surveys/vlass/>

^④严格地说, 这里应该记为 $DF(\dot{m})$; \dot{m} 为用爱丁顿吸积率 (\dot{M}_{Edd}) 归一化的质量吸积率 (\dot{M}), 它不是个观测量, 因此文献中常用爱丁顿比 (ℓ) 来代替; 至于两者的区别, 这里不作详细讨论。

态和甚高态,文献中后两者一般被合并,统一称为中间态)。如果不同吸积率(或者说不同吸积模式)的小质量 AGN 都存在着某种基本面关系,无论是遵循同一组基本面系数,还是分别遵循不同的系数,研究者都可以把观测得到的射电波段和X射线波段的数据(如射电光度函数和X射线光度函数)链结起来。对于每个 AGN,观测上可以根据吸积率和喷流把它分为三种吸积类型(或称三种种族),得到不同吸积模式的比例数据。然后,研究者就能够像做星系光谱的星族合成一样(或宇宙X射线背景谱基于不同遮蔽程度 AGN 的合成建模),基于上述不同吸积模式的三种 AGN 种族来合成建模,得到关于 (L_R, L_X, M_{BH}) 3 变量的联合概率分布函数;进而,还可以由这 3 变量联合分布函数得到 $DF(\ell)$ 。这种方法的具体实现流程详见参考文献 [41]。

3.2 SKA 和 ngVLA 时代 (10 年之后)

大约 10 年之后,我们将迎来 SKA (平方千米阵列)^① 和 ngVLA (下一代 VLA)^② 的时代(至少 SKA 一期 (SKA1) 届时已经建成)。我国是 SKA 主要成员国之一,已在组织、工程、科学目标等方面为 SKA 做了大量的准备工作,形成了不少文档,因此本文对 SKA 不作过多介绍,详见文献[42, 43]。美国不在 SKA 联盟之内,它提出类似的 ngVLA 计划,目标是建设一个由 256 个 18 m 口径射电望远镜组成的阵列;工作频率从 1.2 GHz 到 116 GHz,无缝连接 SKA 低频与 ALMA 高频的间隙^[44]。

在 SKA 科学目标方面,我国目前尚未提出利用 SKA1 或 SKA2 (即完全建成的 SKA) 来研究 IMBH AGN。文献中,有我国同行提出研究 IMBH,但对象是超亮X射线源 (ULX);ULX 是 X 射线光度超过 $10^{32} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$ 且不处于星系中心的致密天体,它的物理本质是一个未解之谜,可能包括超爱丁顿吸积或具有很强束流效应的恒星质量黑洞和一般吸积的 IMBH 等^[37]。因此在本节,我们将主要展望 IMBH AGN 领域在 SKA (以及 ngVLA) 时代可以开展的科学目标。

在 IMBH AGN 的射电性质研究方面,与 3.1 节介绍的 SKA 探路者项目相比,SKA 除了有更高的灵敏度之外,还有一个优势是角分辨率也很高:SKA 一期中频阵列(即 SKA1-mid)的最高角分辨率为 $25''$,SKA2 以及 ngVLA 对于连续谱观测目标可达 $5''$ 量级的角分辨率。这样高的角分辨率已经足够用来研究第 2 章中所列的具体射电性质。

我们更感兴趣的是,SKA 可用来发现更多的 IMBH,如高红移处吸积的种子黑洞和低红移处甚至是射电宁静的 IMBH AGN。研究高红移种子黑洞吸积过程的射电辐射与高红移 AGN 的射电性质的研究路径是类似的,文献 [42] 中已有关于利用 SKA 研究高红移 AGN 的介绍。本节着重介绍如何利用 SKA 在近邻宇宙中寻找黑洞质量更小的或者吸积率更低的 IMBH。

首先要说明的是,SKA 探路者和 SKA1 的深度巡天所发现的射电源(当探测极限小于 0.2 mJy 时),将主要是恒星形成星系^[39, 40]。因而,想通过后续多波段观测证认出 IMBH AGN 甚至一般 AGN 就好比是大海捞针,这方面的讨论可参见国内外关于 SKA 相关科学的

^①<https://china.skatelescope.org>

^②<http://ngvla.nrao.edu>

文献(如文献 [42])。但所幸的是, 本文主要关注近邻宇宙中质量更小的或者吸积率更低的 IMBH, 这种天体的证认比较容易。最重要的一个原因是, SKA1-mid 的角分辨率已足够高(为 $25''$), 使得我们可以通过对照光学图像或 X 射线观测数据来选出位于星系中心的射电源, 这将极大地减小后续其他波段证认观测的工作量。而对于近邻宇宙中的星系, 位置精度高、角分辨率较高的光学图像大量存在, X 射线波段也将有大量同样好的数据(如 Chandra, eROSITA, Athena, Lynx, AXIS 等卫星的观测^[45])。在筛选出星系核区的射电源之后, 后续的主要任务就是证认红移, 基本上是光学光谱观测。对于近邻 IMBH AGN 这个目标而言, 我们相信, 相当多的此类射电源所在的星系, 已经被各种光学光谱巡天所覆盖, 如 SDSS 和正在进行的 4 m 级 DESI 巡天(虽然这些光谱巡天目标不在此), 因此剩下的红移证认所需的望远镜资源, 并不难获得。更何况, 对于这种核区有射电辐射的星系(往往是矮星系), 本来就值得后续观测, 及详加研究。在获得这类核区射电源的红移之后, 接下来可作进一步证认和研究: 通过黑洞吸积基本面的计算来推算黑洞质量, 或者申请更好的观测设备进一步观测(如尝试探测微弱的光学宽发射线, 获得 X 射线波段的光谱甚至谱线等)。下面, 我们根据 SKA 设计指标来推算它在近邻 IMBH AGN 方面的潜在能力。

在千兆赫频段, 按 1 h 曝光时间来考虑, 当前 JVLA 的探测极限 (5σ) 大约是每波束 $20 \mu\text{Jy}$; 按计划, SKA1-mid 的灵敏度是 JVLA 的 8 倍, 即 1 h 曝光的探测极限为每波束 $2.5 \mu\text{Jy}$; SKA 完全建成后, 探测极限(在 1 GHz 波段 1 h 曝光)预计可达每波束 $0.1 \mu\text{Jy}$, 长时间深度曝光甚至可探测出 $0.01 \mu\text{Jy}$ 的暗源。 $0.01 \mu\text{Jy}$ 的流量极限, 意味着像银心黑洞这样的微弱的射电源 (Sgr A*) 可以探测到的距离可远至 40 Mpc。

我们取 SKA (或 ngVLA^[45]) 巡天的 5σ 探测极限为每波束 $1 \mu\text{Jy}$, 来作保守的估计。并且, 我们有理由做如下推理: 根据黑洞质量和吸积率来推知 L_X , 然后根据黑洞吸积基本面的关系来计算 L_R ^[13, 45]。那么, 对于一个位于 100 Mpc (即 $z = 0.025$) 处的 $10^6 M_\odot$ 的大质量黑洞, 可探测到的最低吸积率约为 $10^{-4} \dot{M}_{\text{Edd}}$; 这比目前光学巡天选的具有同样黑洞质量、同样红移处的 IMBH AGN 的最低吸积率低 2 个量级。

更有意思的是, 对于 Virgo 星系团这样的距离 (16.4 Mpc), 同样按照上述分析(即基于黑洞吸积基本面的^[45]), 每波束 $1 \mu\text{Jy}$ 的探测极限可以探测到吸积率大于 $10^{-3} \dot{M}_{\text{Edd}}$ 的质量为 $10^4 M_\odot$ 的 IMBH, 或者吸积率大于 $10^{-2} \dot{M}_{\text{Edd}}$ 的 $10^3 M_\odot$ 的 IMBH。这意味着, 我们在 SKA 时代将能够揭示 $10^3 M_\odot \sim 10^4 M_\odot$ 的 IMBH 是否存在! 而且, 如果这个质量段的 IMBH 存在, 我们将能够获得足够多的数目, 做出 IMBH 质量函数, 从而揭示 IMBH 的形成机制, 亦是揭示超大质量黑洞的种子黑洞形成机制^[46]。我们将迎来一个激动人心的时代!

致谢

我们感谢两位审稿人的认真审稿, 特别是在黑洞吸积基本面、射电选候选者的后续证认等方面的建议; 感谢上海天文台谢富国同志的讨论和校读。

参考文献:

- [1] Filippenko A V, Ho L C. *ApJ*, 2003, 588: L13
- [2] Greene J E, Ho L C. *ApJ*, 2004, 610: 722
- [3] Greene J E, Ho L C. *ApJ*, 2007b, 670: 92
- [4] Dong X, et al. *ApJ*, 2007, 657: 700
- [5] Dong X B, Ho L C, Yuan W, et al. *ApJ*, 2012, 755: 167
- [6] Liu H Y, Yuan W, Dong X B, et al. *ApJS*, 2018, 235: 40
- [7] Greene J E. *Nature Communications*, 2012, 3: 1304
- [8] Reines A E, Comastri A. *PASA*, 2016, 33: e054
- [9] Mezcua M. *International Journal of Modern Physics D*, 2017, 26: 1730021
- [10] Gültekin K, Cackett E M, King A L, et al. *ApJ*, 2014, 788: L22
- [11] Chandler C J, Butler B J. *SPIE*, 2014, 9149: 17
- [12] Becker R H, White R L, Helfand D J. *ApJ*, 1995, 450: 559
- [13] Qian L, Dong X B, Xie F G, et al. *ApJ*, 2018, 860: 134
- [14] Greene J E, Ho L C, Ulvestad J S. *ApJ*, 2006, 636: 56
- [15] Reines A E, Deller A T. *ApJ*, 2012, 750: L24
- [16] Hebbbar P R, Heinke C O, Sivakoff G R, et al. *MNRAS*, 2019, 485: 5604
- [17] Wrobel J M, Ho L C. *ApJ*, 2006, 646: L95
- [18] Wrobel J M, Greene J E, Ho L C, et al. *ApJ*, 2008, 686: 838
- [19] Nyland K, Davis T A, Nguyen D D, et al. *ApJ*, 2017, 845: 50
- [20] Ho L C, Ulvestad J S. *ApJS*, 2001, 133: 77
- [21] Ulvestad J S, Ho L C. *ApJ*, 2001, 558: 561
- [22] Ho L C. *ARA&A*, 2008, 46: 475
- [23] Kellermann K I, Sramek R, Schmidt M, Shaffer D B, Green R. *AJ*, 1989, 98: 1195
- [24] Ho L C, Peng C Y. *ApJ*, 2001, 555: 650
- [25] Maccarone T J, Gallo E, Fender R. *MNRAS*, 2003, 345: L19
- [26] Jiang L, Fan X, Ivezić Ž, et al. *ApJ*, 2007, 656: 680
- [27] Yuan W, Zhou H Y, Komossa S, Dong X B, Wang T G, Lu H L, Bai J M. *ApJ*, 2008, 685: 801
- [28] Merloni A, Heinz S, di Matteo T. *MNRAS*, 2003, 345: 1057
- [29] Dong A J, Wu Q W, Cao X F. *ApJ*, 2014, 787: L20
- [30] Heckman T M, Best P N. *ARA&A*, 2014, 52: 589
- [31] Fender R P, Belloni T M, Gallo E. *MNRAS*, 2004, 355: 1105
- [32] Merloni A, Heinz S, Di Matteo T. *Ap&SS*, 2005, 300: 45
- [33] Heinz S, & Sunyaev R. A. *MNRAS*, 2003, 343: L59
- [34] Falcke H, Körding E, & Markoff S. *A&A*, 2004, 414: 895
- [35] White R L, Becker R H, Helfand D J, Gregg M D. *ApJ*, 1997, 475: 479
- [36] Gültekin K, Cackett E M, Miller J M, et al. *ApJ*, 2009, 706: 404
- [37] Liu J F, Bregman J N, Bai Y, et al. *Nature*, 2013, 503: 500
- [38] Gültekin K, King A L, Cackett E M, et al. *ApJ*, 2019, 871: 80
- [39] Norris R P, Afonso J, Bacon D, et al. *PASA*, 2013, 30: 20
- [40] Norris R P. *Nature Astronomy*, 2017, 1: 671
- [41] Merloni A., Heinz S. *MNRAS*, 2008, 388: 1011
- [42] 武向平. 中国 SKA 科学白皮书. 北京: 科学出版社, 2018
- [43] 洪晓瑜, 武向平, 安涛, 等. 天文学进展, 2018, 36: 348
- [44] Selina R J, Murphy E J, McKinnon M, et al. *Science with a Next Generation Very Large Array*, ASP Conference Series, 2018, 517: 15
- [45] Plotkin R M, Reines A E. *Science with a Next Generation Very Large Array*, ASP Conference Series, 2018, 517: 719

[46] Latif M A, Ferrara A. PASA, 2016, 33: 51

Studies on the Radio Continua of Active Galactic Nuclei with Intermediate-mass Black Holes: Summary and Prospect

DONG Xiao-bo¹, MAO Yu-feng², QIAN Lei³

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China; 2. Bureau of Frontier Sciences and Education, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China; 3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Active galactic nuclei with intermediate-mass black holes (IMBH AGN) harbor central black holes (BHs) with their masses in the range $10^2 M_{\odot} \sim 10^6 M_{\odot}$. They have significant values in studying the origin of the supermassive BHs in high-redshift quasars (namely the seed BHs problem) and the astronomical sources of low-frequency gravitational waves. The number of broad-line IMBH AGN in the local universe, owing to the great development of large-scale optical spectroscopic surveys, has been more than 500. For those optically selected IMBH AGN, the radio studies based on the VLA FIRST survey data and follow-up radio continuum observations of individuals and small samples, have obtained meaningful results already. This article reviews the progresses in the field of radio continua of IMBH AGN, detailed in the following 4 aspects: the radio morphology, continuum slope, radio power and loudness, and fundamental plane of BH activity. Moreover, preparing for the ongoing large-scale continuum surveys as SKA pathfinder projects (eg, VLASS and EMU) and for the SKA era 10 years later (SKA1 at least), we prospect the achievable goals for IMBH AGNs in the pathfinder and SKA eras respectively. Besides, aiming to find low-redshift IMBH AGN out of such a huge number of sources that would be detected by SKA, we analyze and present an optimal strategy of the followup identification (eg, optical spectroscopy for redshifts) for those purely radio-selected sources.

Key words: low-luminosity active galactic nuclei; intermediate-mass black holes; seed black holes; black hole accretion; relativistic jets