

超爱丁顿吸积活动星系核J1034+3938的VLBI观测

卢范深^{1,2,3}, 杨小龙^{2,3*}, 路如森^{2,3*}, 姚苏⁴, 沈志强^{1,2,3}, 彭思佳²

1. 上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210;

2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

3. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049;

4. 中国科学院国家天文台, 北京 100101

* 联系人, E-mail: yangxl@shao.ac.cn; rslu@shao.ac.cn

2024-06-14 收稿, 2024-10-16 修回, 2024-10-17 接受, 2024-10-18 网络版发表

国家自然科学基金重点项目(11933007)、国家杰出青年科学基金(12325302)和上海市基础研究特区计划(JCYJ-SHXY-2021-013)资助

摘要 活动星系核(active galactic nucleus, AGN)的反馈作用(包括喷流、外流以及风等形式)是理解星系与其中心超大质量黑洞(supermassive black hole, SMBH)共同演化的关键。然而, 对于快速吸积的SMBH(例如超爱丁顿吸积的SMBH), 其产生喷流的机制目前仍不清楚。大量观测样本研究表明AGN射电噪度随爱丁顿比的增加而降低, 这可能是喷流过程与吸积过程的耦合结果。最近陆续有研究发现超爱丁顿吸积的AGN也可能存在喷流。对超爱丁顿AGN的喷流开展高分辨率成像研究, 有助于理解快速吸积情形下喷流与吸积之间的联系。J1034+3938是一个射电宁静的窄线I型塞弗特星系(narrow-line Seyfert 1, NLS1), 其中心很可能存在一个超爱丁顿吸积的SMBH。我们利用甚长基线干涉阵(Very Long Baseline Array, VLBA)对J1034+3938在2022年10月21日进行L波段的观测, 发现其射电辐射形态展示出一个向西约20 mas(17 pc)的细长准直喷流结构, 其峰值流量密度为 3.16 ± 0.48 mJy/beam, 射电亮温度高达 5.7×10^7 K。我们的观测结果有力地证明了射电宁静且超爱丁顿吸积的AGN具备产生秒差距尺度的喷流的可能性。

关键词 超大质量黑洞, 活动星系核, 喷流, 窄线塞弗特星系, 甚长基线干涉测量

活动星系核(active galactic nucleus, AGN)的喷流被认为是AGN反馈的重要形式之一, 其影响着中心超大质量黑洞(supermassive black hole, SMBH)及其宿主星系的共同演化^[1]。根据射电噪度, 可将AGN分为两类。AGN的射电噪度参数 R 被定义为射电(一般为C波段, 即5 GHz)与可见光(B-band 4400 Å)光度之比, 其中 $R \leq 10$ 被认为是射电宁静(radio-quiet, RQ), 反之, 则认为是射电噪(radio-loud, RL)^[2]。目前研究表明AGN总数中仅15%~20%的AGN分类为RL^[3]。人们通常认为RL AGN普遍存在相对论性喷流^[4,5], 其喷流的非热辐射是RL AGN射电辐射的主要来源^[6,7]。相比之下, RQ AGN的射电辐射来源尚不清晰, 可能来自多种成分: AGN活

动的磁化冕、吸积盘风、喷流和宿主星系核区的恒星形成活动, 或是其中一些成分的组合^[8]。尽管RQ AGN的射电辐射较弱, 但观测发现它们仍然可能存在相对论性喷流, 这为研究喷流的形成提供了新的途径。研究喷流的形成及其辐射来源可以更好地理解AGN的物理过程以及它们如何与宿主星系的演化相互作用。过去AGN喷流主要是在巨星系中发现的, 例如耀变体或射电星系, 它们拥有较大质量的SMBH($M_{\text{BH}} \geq 10^8 M_{\odot}$)。另一方面, AGN的射电噪度参数与爱丁顿比之间存在很强的反相关, 这意味着吸积与喷流过程的耦合^[9,10], 当SMBH快速吸积时, AGN的喷流往往被压制^[11]。由此可见, 喷流的形成可能很大程度上取决于黑洞质量和吸

引用格式: 卢范深, 杨小龙, 路如森, 等. 超爱丁顿吸积活动星系核J1034+3938的VLBI观测. 科学通报, 2024, 69: 4999–5006

Lu F S, Yang X L, Lu R S, et al. VLBI observations of the super-Eddington accretion active galactic nucleus J1034+3938 (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 4999–5006, doi: 10.1360/TB-2024-0634

积过程. 与传统模型不同, 窄线I型塞弗特星系(narrow-line Seyfert 1, NLS1)相较于其他I型塞弗特星系和类星体, 具有更低的黑洞质量($M_{\text{BH}} \leq 10^8 M_{\odot}$)和更高的爱丁顿比($\lambda_{\text{Edd}} \geq 1$)^[12,13], 同样存在喷流. 同时, NLS1通常是RQ的^[14], 它微弱的射电辐射来源存在着长期的争议. 21世纪10年代中期, 研究开始集中于RQ NLS1的射电辐射机制, 发现RQ AGN的射电辐射可能与黑洞的吸积过程有关, 而不仅仅是只与喷流活动有关^[8]. 进入21世纪20年代, 更高分辨率的甚长基线干涉测量(very-long-baseline interferometry, VLBI)技术对NLS1的研究, 强调了高分辨率及多波段对于揭示NLS1核心区域细节的重要性^[15,16]. 最新的研究使用甚长基线干涉阵(Very Long Baseline Array, VLBA)在L波段对4个NLS1进行了观测, 其中2个目标源(Mrk 335、I ZW 1)探测到喷流^[17,18]. 因此, NLS1这一类特别的天体为探索高 λ_{Edd} /低 M_{BH} 空间中射电喷流的形成及其与SMBH吸积的耦合提供了新的研究样本.

KUG 1031+398(本文称之为J1034+3938, 红移 $z=0.043$, 赤经R.A.=10:34:38.5983, 赤纬Dec.=+39:38:28.1867)是一个NLS1星系. 其中心存在一个超爱丁顿吸积($\lambda_{\text{Edd}}=3.15$)^[19]的SMBH, 质量 $M_{\text{BH}}=2.38 \times 10^7 M_{\odot}$ ^[19]. 前人在光学和X射线波段已经对J1034+3938进行了研究^[19], 其中光学光度为 $\log L_{\text{B}}=43.24$ erg/s, X射线光度为 $\log L_{\text{X}}=42.53$ erg/s. 但是, 目前人们对J1034+3938的射电辐射了解十分有限. 甚大天线阵(Very Large Array, VLA)在观测频率为1.5 GHz和央斯基甚大天线阵(Jansky Very Large Array, JVLA)在观测频率为5 GHz的两次历史观测均得到致密的未分解源, 其射电噪度 $R=12.18$. VLBA在1.5 GHz历史观测中得到延展的射电源图像, 但由于动态范围较低(DR=23, 峰值流量密度与图像噪声水平之比), 无法从图像中确定其喷流结构. 为了进一步研究J1034+3938超爱丁顿吸积过程并探寻其射电辐射的来源, 我们使用了美国国家射电天文台(National Radio Astronomy Observatory, NRAO)的VLBA对J1034+3938的中心秒差距尺度核区域进行高

分辨率的射电成像观测.

本文首先介绍观测情况和数据处理方法, 其次描述观测结果, 随后对结果深入分析, 最后给出总结和展望. 本文采用标准 Λ_{CDM} 宇宙学模型, $H_0=71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_{\Lambda}=0.73$, $\Omega_{\text{m}}=0.27$. 对于本文讨论的目标源J1034+3938的观测, 1 mas对应的尺度约为0.836 pc.

1 观测与数据处理

1.1 射电观测

我们于2022年10月21日利用VLBA在L波段(中心频率1.548 GHz)对J1034+3938进行了射电观测(观测项目代码: BY175). 观测采用双圆偏振模式, 设置了4个中频(intermediate frequency, IF), 每个IF带宽为64 MHz, 其中包含256个频道(channel). 望远镜的数据记录速率为2048 Mb/s, 通过分布式软件相关器(distributed FX, DiFX)将数据进行相关处理^[20,21]. 由于目标源(J1034+3938)信号较弱, 该观测采用了相位参考模式^[22]. 相位参考源为J1033+3935(红移 $z=1.095$, 赤经R.A.=10:33:22.0610, 赤纬Dec.=+39:35:51.0830), 其与目标源J1034+3938的间隔为0.25°. 该观测进行了25轮目标源和相位参考源的交替扫描, 每轮交替扫描包含4 min的目标源和1 min的相位参考源时间, 最终目标源的总观测时长约100 min. 此外, 我们还使用了VLA的1.5 GHz历史数据、JVLA的5 GHz历史数据, 以及VLBA的1.5 GHz历史数据(具体观测信息见表1), 用于深入探究J1034+3938在不同时期及频率下的射电辐射性质的变化. VLA 1.5 GHz的历史数据来自Faint Images of the Radio Sky at Twenty centimeters(FIRST)项目, 带宽128 MHz, 目标源的观测时长为75 min^[23]. JVLA 5 GHz的历史数据源于2015年的JVLA/15A-283项目, 观测阵列为A阵列, 带宽为2048 MHz, 目标源观测时长为10 min^[21]. VLBA 1.5 GHz的历史数据源于2013年的mJIVE-20m(Jy Imaging VLBA Exploration at 20 cm)项目, 观测频率为1.5 GHz, 带宽为64 MHz, 目标

表1 目标源J1034+3938的观测信息

Table 1 Observations of target source J1034+3938

观测设备	频率(GHz)	带宽(MHz)	观测时长(min)	观测日期(年/月/日)	观测项目
VLA	1.5	128	75	1990/03/21	FIRST ^[20]
JVLA	5	2048	10	2015/08/29	15A-283 ^[21]
VLBA	1.5	64	15	2013/03/05	mJIVE-20 ^[22]
VLBA	1.5	256	100	2022/10/21	BY175

源观测时长为15 min^[24].

1.2 数据处理

我们采用NRAO提供的天文图像处理系统(Astronomical Image Processing System package, AIPS)^[25]按照标准流程对J1034+3938的可见度数据进行校准. 数据校准过程包括大气误差(TECOR)、参考系误差(CLCOR)和仪器误差(APCAL、FRING)的校准, 校准过程选用新墨西哥州的Los Alamos (LA)望远镜作为参考天线, 具体处理流程如下. (1) 大气误差是由电离层色散引起的相位延迟参考系误差, 我们使用全球定位系统(Global Position System, GPS)卫星观测提供的总电子含量(total electron content, TEC)分布进行校准(TECOR). (2) 参考系误差包括视差和地球定向参数(earth orientation parameter, EOP). 视差的校准是通过可见度数据的几何信息, 在天空平面对数据进行旋转以匹配观测方向(CLCOR). EOP从美国海军天文台数据库获取并用于校准(CLCOR). (3) 仪器误差包括幅度误差和相位延迟. 通过使用来自测量的天线增益曲线和系统温度信息进行幅度误差校准(APCAL). 通过校准源3C 286进行条纹拟合, 去除来自仪器的相位延迟(FRING). 最后, 对相位参考源J1033+3935进行全局条纹拟合(globe fringe fitting)以校准干涉测量中的条纹效

应. 校准完可见度数据后, 使用Difmap^[26]分别对参考源和目标源进行成像, 其中参考源进行了进一步自校准, 而目标源由于信号弱没有应用自校准. 参考源成像结果见图1(a), 显示了其明亮而紧凑的结构, 其波束长轴 $B_{\text{maj}}=13.1$ mas、短轴 $B_{\text{min}}=4.85$ mas, 图像噪声水平为0.18 mJy/beam, 峰值流量密度为266 mJy/beam, 总流量密度为420 mJy.

我们还收集了NRAO档案中FIRST项目和mJIVE-20项目中J1034+3938的1.5 GHz数据并进行对比, 参数结果如表2所示. 从FIRST项目中获取的为普适图像传输系统(Flexible Image Transport System, FITS)数据, 可直接进行数据可视化成图, 如图2(a)所示. 从mJIVE-20项目中获取的为已校准的可见度数据, 我们采用上述同样的流程进行了成像, 如图2(b)所示.

2 结果

我们得到了相位参考源J1033+3935和目标源J1034+3938的高空间分辨率图像和图像参数, 如图1, 2和表2所示. 根据每个源的峰值与总流量密度的比值 $S_{\text{peak}}/S_{\text{tot}}$ 将它们分为三类: $S_{\text{peak}}/S_{\text{tot}} > 0.95$ 为致密型; $0.95 \geq S_{\text{peak}}/S_{\text{tot}} \geq 0.75$ 为中等型, 表示射电辐射来自一个稍微扩展的区域; $S_{\text{peak}}/S_{\text{tot}} < 0.75$ 为延展型, 通常意味着射电辐射来自一个具有结构的延伸区域, 如喷流或瓣

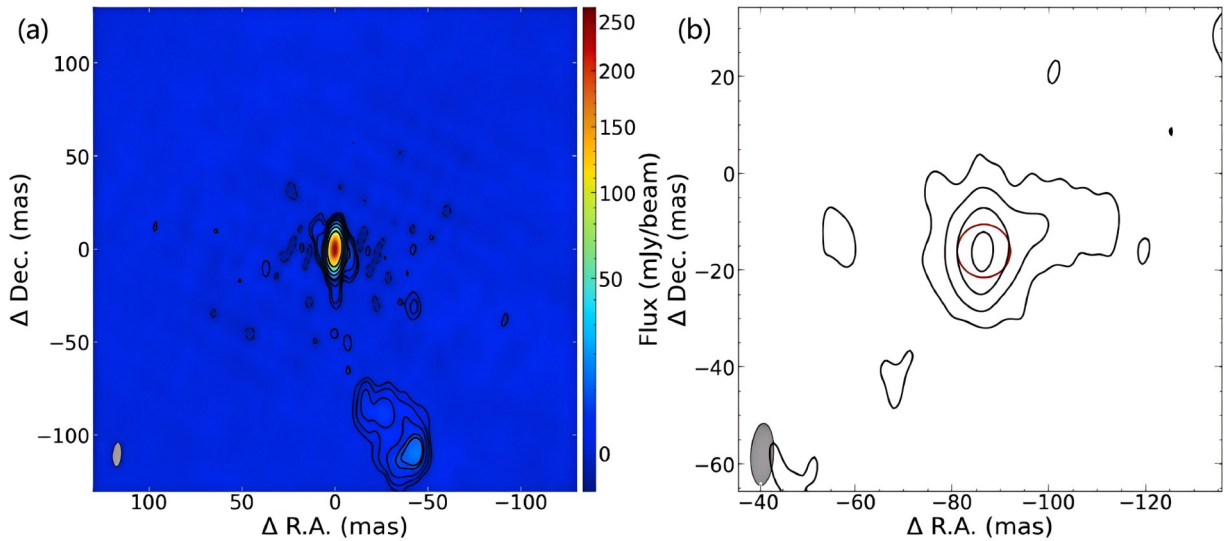


图1 2022年VLBA在1.5 GHz下的相位参考源1033+3935射电图像($\sigma_{\text{rms}}=0.18$)(a)及目标源J1034+3938圆高斯模型拟合图像($\sigma_{\text{rms}}=0.071$)(b). 图像中的等高线从最小到最大依次为 $4.5\sigma_{\text{rms}}$, $9\sigma_{\text{rms}}$, $18\sigma_{\text{rms}}$, $36\sigma_{\text{rms}}$, $72\sigma_{\text{rms}}$, $144\sigma_{\text{rms}}$, $288\sigma_{\text{rms}}$. σ_{rms} 为图像的噪声水平

Figure 1 VLBA phase reference source 1033+3935 radio image ($\sigma_{\text{rms}}=0.18$) (a) and target source J1034+3938 circular Gaussian model fitting image ($\sigma_{\text{rms}}=0.071$) (b) at 1.5 GHz in 2022. The contour lines in the image are $4.5\sigma_{\text{rms}}$, $9\sigma_{\text{rms}}$, $18\sigma_{\text{rms}}$, $36\sigma_{\text{rms}}$, $72\sigma_{\text{rms}}$, $144\sigma_{\text{rms}}$, $288\sigma_{\text{rms}}$ from smallest to largest. σ_{rms} is the noise level of the image

表 2 目标源J1034+3938的图像参数

Table 2 Image parameters of target source J1034+3938

观测设备	观测日期(年/月/日)	B_{maj} (mas)	B_{min} (mas)	$B_{\text{p.A.}}$ (deg)	σ_{rms} (mJy/beam)	S_{peak} (mJy/beam)	S_{tot} (mJy)	DR
VLA	1990/03/21	1650	1430	+145.5	0.15	24.0	25.9	160
JVLA	2015/08/29	560	450	+52.83	0.01	7.13 ± 0.01	8.15 ± 0.10	713
VLBA	2013/03/05	14.4	5.44	+4.411	0.17	3.90 ± 0.84	12.6 ± 0.58	23
VLBA	2022/10/21	12.9	4.70	-3.038	0.07	3.16 ± 0.48	6.55 ± 0.16	44

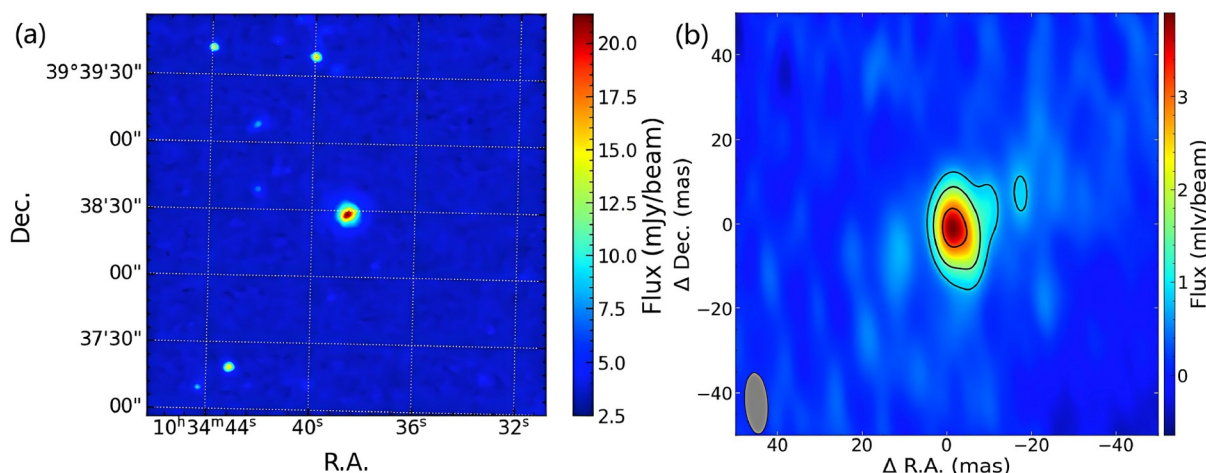


图 2 据1990年1.5 GHz JVLA观测数据重建的J1034+3938射电图像(a)及据2013年1.5 GHz VLBA观测数据重建的J1034+3938射电图像(b). 图像中的等高线从最小到最大依次为 $4.5\sigma_{\text{rms}}$, $9\sigma_{\text{rms}}$, $18\sigma_{\text{rms}}$

Figure 2 J1034+3938 radio image reconstructed from 1.5 GHz JVLA observations in 1990 (a) and J1034+3938 radio image reconstructed from 1.5 GHz VLBA observations in 2013 (b). The contour lines in the image are $4.5\sigma_{\text{rms}}$, $9\sigma_{\text{rms}}$, and $18\sigma_{\text{rms}}$ from smallest to largest

区^[27]. 一个射电源在较低分辨率的观测中看起来是致密的, 在更高分辨率的观测中可能会显示出更多的结构细节, 如喷流或瓣区. 这意味着在低分辨率观测中, S_{peak} 可能会更高, 因为它包含了来自这些结构的发射, 而在高分辨率观测中能够更精确地测量 S_{peak} , 因为它可以区分源的不同部分或者只包含了源的一个部分, S_{peak} 可能会降低. 同时, 这也可能导致高分辨率观测中 S_{tot} 的测量值降低. 相反, 低分辨率观测可能会将多个发射区域混合在一起, 导致 S_{tot} 的测量值较高. 2022年VLBA的L波段图像中, 目标源J1034+3938为延展型射电源($S_{\text{peak}}/S_{\text{tot}}=0.48$), 它的总流量密度较低为 6.55 ± 0.16 mJy, 峰值流量密度为 3.16 ± 0.48 mJy/beam, 图像动态范围为DR=44, 向西延伸约20 mas (17 pc)的细长准直喷流结构. 图2(a)显示了VLA在1.5 GHz观察到的J1034+3938的图像. 可以看出, 在VLA图像中, J1034+3938是紧凑未分解的致密型射电源($S_{\text{peak}}/S_{\text{tot}}=0.93$), 总流量密度为25.9 mJy, 峰值流量密度为24.0 mJy/beam. Järvelä 等人^[27]给出了2015年JVLA在5 GHz的观测结果, 目标

源流量密度为 8.15 ± 0.10 mJy, 峰值流量密度为 7.13 ± 0.01 mJy/beam; JVLA在5 GHz的观测图像中, J1034+3938被观测为中间型射电源($S_{\text{peak}}/S_{\text{tot}}=0.87$), 但仍然是较致密的. 我们进一步对比了2013年VLBA在1.5 GHz的观测, 其射电图像如图2(b)所示, 总流量密度为 12.6 ± 0.58 mJy, 峰值流量密度为 3.9 ± 0.84 mJy/beam. 由于15 min的短观测时长和64 MHz的窄带宽, 2013年VLBA射电图像动态范围较低(DR=23), 图中发现有略微向西北方向延伸的趋势, 但未出现明显的准直喷流结构.

为了进一步研究2022年VLBA在1.5 GHz图像中看到的结构, 我们使用DIFMAP包中的modelfit程序对可见度数据进行圆高斯模型拟合. 通过将拟合误差与初始校准误差相结合来估计成分的流量密度的不确定性^[28]. J1034+3938的模型拟合成分总流量密度为 8.25 ± 0.20 mJy. 最佳拟合成分位置和大小在图1(b)中显示为红色圆圈, 其圆高斯模型的半最大值全宽度(full width at half maximum, FWHM)为10.99 mas.

计算圆高斯模型成分的射电亮温度, 并考虑源的红移效应^[28]:

$$T_B = 1.8 \times 10^9 (1+z) \frac{S_{\text{int}}}{\text{mJy}} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \frac{d}{\text{mas}} \right)^{-2} \text{ K}, \quad (1)$$

其中, z 是红移, S_{int} (mJy) 是在观测频率 ν (GHz) 下的模型拟合成分总流量密度, d (mas) 表示高斯成分的半最大全宽度. 计算得出 J1034+3938 的圆高斯模型拟合成分的亮温度 $T_B = 5.65 \times 10^7$ K.

3 讨论

3.1 射电辐射

J1034+3938 的射电辐射相对较弱. 过去的几十年里, JVLA 在 5 角秒的分辨率下测得 J1034+3938 射电核大小约为 1.5 kpc. 所有这些观测中只发现了一个致密的未分解源, 没有探测到细长准直喷流结构: White 等人^[23] 用 JVLA 在 1.5 GHz 以亚角秒分辨率观测到 J1034+3938 流量密度 $S_{\text{tot}} = 25.9$ mJy; Berton 等人^[16] 用 JVLA 在 5 GHz 以亚角秒分辨率观测到 J1034+3938 流量密度 $S_{\text{tot}} = 8.15 \pm 0.10$ mJy. 而更高的分辨率下, J1034+3938 在 1.5 GHz 的图像显示为可分解的源, 且射电结构有向西北方向延伸的趋势: Deller 等人^[24] 用 VLBA 在 1.5 GHz 以 5 毫角秒分辨率观测到 J1034+3938 流量密度 $S_{\text{tot}} = 12.6 \pm 0.58$ mJy. 我们进一步用 VLBA 在 1.5 GHz 以亚毫角秒分辨率并延长观测时长进行观测, 得到 J1034+3938 流量密度 $S_{\text{tot}} = 6.55 \pm 0.16$ mJy, 其射电图像出现向西的细长准直喷流结构. 对比 2013~2022 年 VLBA 在 1.5 GHz 的观测, 在同样 1.5 GHz 频率以及亚毫角秒分辨率下, 其射电核流量密度随时间呈下降趋势.

考虑到基于 $\log R$ 的单一标准的 RL/RQ 二分法分离可能会导致错误分类, Xiao 等人^[29] 通过机器学习方法提出了双重标准分界线 $\log R = 1.37 \pm 0.02$ 以及 $\log L_R = -2.7 \log R + 44.3$. J1034+3938 射电噪声度为 $\log R = 1.09 < 1.37$. 假设光谱指数 $\alpha_{(1.4-5 \text{ GHz})} = -0.7$, 获得 C 波段下模型拟合总流量密度为 2.48 ± 0.06 mJy, 对应的 C 波段光度 $\log L_R = 38.00$ erg/s, 处于分界线以下. 因此, J1034+3938 在双重标准下都被分类为 RQ AGN.

3.2 喷流的形成

如第 1 节所述, 虽然喷流的物理机制仍然不太清晰, 但一般认为喷流与吸积过程相耦合. 秒差距尺度上, 我们已经分辨出 J1034+3938 在 1.5 GHz 图像中向西的细

长准直喷流结构. 用圆高斯模型拟合可见度数据, 得到成分的亮温度 $T_B = 5.65 \times 10^7$ K. 根据 Panessa 等人^[8] 研究发现, 当射电核显示出高的亮温度 ($T_B > 10^7$ K) 时, 表明射电辐射来源于秒差距尺度喷流中相对论性电子的非热过程.

在过去的几十年里, 人们对喷流的形成进行了大量的理论研究. 如 Blandford-Znajek 过程, 认为喷流是通过磁场提取黑洞的旋转能量来驱动的^[30]; 以及 Blandford-Payne 过程, 认为喷流是通过磁场提取吸积盘的旋转能量来驱动的^[31]. 最近也出现了一些对超爱丁顿吸积 SMBH 中的喷流形成进行的数值模拟, 发现喷流由辐射压力驱动^[32]. 我们将 J1034+3938 与恒星级的高吸积率黑洞进行比较. 恒星质量黑洞在 X 射线双星系统 (X-ray binary, XRB) 中也表现出吸积和喷流的现象, 这与 AGN 中吸积的 SMBHs 行为十分相似, 但尺度更小. 这些黑洞 XRBs 通过吸积盘从伴星获取物质, 偶尔会进入持续数月或者数年的爆发态, 并通过复杂的动力学过程产生高能辐射, 尤其是在 X 射线波段. 在黑洞 XRB 中, 稳定喷流总是与低光度硬 X 射线谱态 (低/硬态) 相关联, 而射电辐射在高光度软 X 射线谱态 (高/软态) 中被抑制, 在中间状态喷流变得偶发, 这与射电爆发有关^[33]. 而 AGN 中喷流常见于 RL 且低爱丁顿吸积状态, 在 RQ 且高爱丁顿状态下喷流被抑制的情况与 XRB 中的喷流状况比较类似. 因此, 考虑到 J1034+3938 高爱丁顿比, RQ 且高爱丁顿的 AGN 可能是黑洞 XRB 在高/软态的放大版本. 进一步正确分辨超大质量黑洞吸积盘的结构, 需要结合连续谱反响映射研究活动星系核光变的物理起源^[34].

4 结论

本文研究了 2022 年 VLBA 在 1.5 GHz 观测的 RQ NLS1 星系 J1034+3938. VLBA 观测图像显示了一个向西延伸 20 mas (17 pc) 的喷流结构, 亮度温度高达 $T_B = 5.65 \times 10^7$ K. 这项研究增添了高吸积率的 RQ NLS1 发现秒差距尺度喷流的案例. VLBA 观测到的流量密度与 JVLA 历史观测到的大尺度辐射流量密度关系的一致性表明, J1034+3938 的射电辐射主要由中央秒差距尺度辐射贡献, 并且其射电辐射随时间逐渐变弱. 2013~2022 年 VLBA 的 1.5 GHz 观测结果显示, 其射电核的流量密度都有明显变化, 随时间呈下降趋势; 并且在射电光度和射电响度结合起来的双重标准下, 都被很好地分类为 RQ AGN. 这符合 NLS1 射电辐射弱且具有

光变的物理特征,可能是由吸积盘的不稳定性、喷流的相互作用以及黑洞周围的物质动态变化等导致的.在高吸积率AGN中喷流特征的发现,将为高爱丁顿比区域的吸积-喷流耦合提供进一步的约束.

接下来可进行从厘米波段到毫米波段的多波段观测,以探究不同频率的辐射来源,进一步探究核区结构以及核的频谱,例如厘米波段(8.4 GHz)VLA观测和毫米波段(43、86 GHz)ALMA观测;并且进行从角秒到毫角秒分辨率的多尺度成像,解析从星系到中心区域的不同射电结构,例如结合VLA和增强型多元射电联

合干涉网(enhanced Multi Element Remotely Linked Interferometer Network, eMERLIN)探索中间尺度结构以及全球毫米波长基线阵列(The Global mm-VLBI Array, GMVA)达到高角分辨率($\sim 50 \mu\text{as}$)并获得更好的 $u-v$ 覆盖.随着VLBI技术的发展,未来观测设备空间分辨率、灵敏度会更高,有望得到这种源更为清晰的喷流图像,例如地面的高频VLBI,或相似频率但通过空间VLBI拉长基线得到更高的空间分辨率.同时,在接下来的研究中,我们将会进一步对其他具有高吸积率的RQ NLS1星系样本的核区进行详细观测.

致谢 感谢中国科学院上海天文台曾艾玲等人在VLBI数据校准成图过程中提供的帮助,感谢中国科学院上海天文台赵杉杉以及两位匿名审稿专家和编委对本研究给予的宝贵修改意见,文中涉及的VLA、VLBA数据来自美国国家科学基金会美国国家射电天文台.

参考文献

- 1 Fabian A C. Observational evidence of active galactic nuclei feedback. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2012, 50: 455–489
- 2 Kellermann K I, Sramek R, Schmidt M, et al. VLA observations of objects in the Palomar Bright Quasar Survey. *Astron J*, 1989, 98: 1195
- 3 Ivezić Ž, Menou K, Knapp G R, et al. Optical and radio properties of extragalactic sources observed by the FIRST survey and the Sloan Digital Sky Survey. *Astron J*, 2002, 124: 2364–2400
- 4 Padovani P. On the two main classes of active galactic nuclei. *Nat Astron*, 2017, 1: 194
- 5 Gürkan G, Hardcastle M J, Best P N, et al. LoTSS/HETDEX: Optical quasars. I. Low-frequency radio properties of optically selected quasars. *Astron Astrophys*, 2019, 622: A11
- 6 Gu M, Chen Y. The compact radio structure of radio-loud narrow line Seyfert 1 galaxies. *Astron J*, 2010, 139: 2612–2619
- 7 Padovani P, Miller N, Kellermann K I, et al. The VLA survey of Chandra Deep Field South. V. Evolution and luminosity functions of sub-millijansky radio sources and the issue of radio emission in radio-quiet active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2011, 740: 20
- 8 Panessa F, Baldi R D, Laor A, et al. The origin of radio emission from radio-quiet active galactic nuclei. *Nat Astron*, 2019, 3: 387–396
- 9 Laor A. On black hole masses and radio loudness in active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2000, 543: L111–L114
- 10 Ho L C. Nuclear activity in nearby galaxies. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2008, 46: 475–539
- 11 Greene J E, Ho L C, Ulvestad J S. The radio quiescence of active galaxies with high accretion rates. *Astrophys J*, 2006, 636: 56–62
- 12 Zhou H, Wang T, Yuan W, et al. A comprehensive study of 2000 narrow line Seyfert 1 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. I. The sample. *Astrophys J Suppl S*, 2006, 166: 128–153
- 13 Du P, Hu C, Lu K X, et al. Supermassive black holes with high accretion rates in active galactic nuclei. IV. $H\beta$ time lags and implications for super-Eddington accretion. *Astrophys J*, 2015, 806: 22
- 14 Ulvestad J S, Antonucci R R J, Goodrich R W. Radio properties of narrow-lined Seyfert 1 galaxies. *Astron J*, 1995, 109: 81
- 15 Yang X, Yao S, Yang J, et al. Radio activity of supermassive black holes with extremely high accretion rates. *Astrophys J*, 2020, 904: 200
- 16 Berton M, Congiu E, Järvelä E, et al. Radio-emitting narrow-line Seyfert 1 galaxies in the JVLPA perspective. *Astron Astrophys*, 2018, 614: A87
- 17 Yao S, Yang X, Gu M, et al. Detection of a parsec-scale jet in a radio-quiet narrow-line Seyfert 1 galaxy with highly accreting supermassive black hole. *Mon Not R Astron Soc*, 2021, 508: 1305–1313
- 18 Yang X, Yao S, Gallo L C, et al. Unveiling the small-scale jets in the rapidly growing supermassive black hole IZw1. *Astrophys J*, 2024, 966: 151
- 19 Wang J M, Du P, Valls-Gabaud D, et al. Super-Eddington accreting massive black holes as long-lived cosmological standards. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 081301
- 20 Deller A T, Tingay S J, Bailes M, et al. DiFX: A software correlator for Very Long Baseline Interferometry using multiprocessor computing environments. *Publ Astron Soc Pac*, 2007, 119: 318–336
- 21 Deller A T, Briske W F, Phillips C J, et al. DiFX-2: A more flexible, efficient, robust, and powerful software correlator. *Publ Astron Soc Pac*, 2011, 123: 275–287

- 22 Beasley A J, Conway J E. VLBI phase-referencing. In: Zensus J A, Diamond P J, Napier P J, eds. Very Long Baseline Interferometry and the VLBA. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1995, 82: 327
- 23 White R L, Becker R H, Helfand D J, et al. A catalog of 1.4 GHz radio sources from the FIRST Survey. *Astrophys J*, 1997, 475: 479–493
- 24 Deller A T, Middelberg E. mJIVE-20: A survey for compact mJy radio objects with the Very Long Baseline Array. *AJ*, 2014, 147: 14
- 25 Greisen E W. AIPS, the VLA, and the VLBA. In: Heck A, ed. Information Handling in Astronomy—Historical Vistas. Astrophysics and Space Science Library, 2003, 285: 109
- 26 Shepherd M C. Difmap: An interactive program for synthesis imaging. In: Hunt G, Payne H, eds. Astronomical Data Analysis Software and Systems VI. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1997, 125: 77
- 27 Järvelä E, Dahale R, Crepaldi L, et al. Unravelling the origin of extended radio emission in narrow-line Seyfert 1 galaxies with the JVLBA. *Astron Astrophys*, 2022, 658: A12
- 28 Hovatta T, Lister M L, Aller M F, et al. MOJAVE: Monitoring of jets in active galactic nuclei with VLBA experiments. VIII. Faraday rotation in parsec-scale AGN jets. *Astron J*, 2012, 144: 105
- 29 Xiao H, Zhu J, Fu L, et al. The radio dichotomy of active galactic nuclei. *Publ Astron Soc Jpn*, 2022, 74: 239–246
- 30 Blandford R D, Znajek R L. Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. *Mon Not R Astron Soc*, 1977, 179: 433–456
- 31 Blandford R D, Payne D G. Hydromagnetic flows from accretion discs and the production of radio jets. *Mon Not R Astron Soc*, 1982, 199: 883–903
- 32 Sądowski A, Narayan R. Powerful radiative jets in supercritical accretion discs around non-spinning black holes. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 453: 3214–3222
- 33 Fender R P, Belloni T M, Gallo E. Towards a unified model for black hole X-ray binary jets. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 355: 1105–1118
- 34 Sun M Y, Zhou S Y. Resolving the structure of supermassive black hole accretion disks (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 1686–1697 [孙谋远, 周淑英. 分辨超大质量黑洞吸积盘的结构. *科学通报*, 2024, 69: 1686–1697]

Summary for “超爱丁顿吸积活动星系核J1034+3938的VLBI观测”

VLBI observations of the super-Eddington accretion active galactic nucleus J1034+3938

Fanshen Lu^{1,2,3}, Xiaolong Yang^{2,3*}, Rusen Lu^{2,3*}, Su Yao⁴, Zhiqiang Shen^{1,2,3} & Sijia Peng²¹ School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;² Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;³ School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;⁴ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

* Corresponding authors, E-mail: yangxl@shao.ac.cn; rslu@shao.ac.cn

Active galactic nuclei (AGNs) are known to influence the co-evolution of central supermassive black holes (SMBHs) and their host galaxies, with AGN jets playing a pivotal role in this feedback process. This study presents new insights into the radio-quiet (RQ) narrow-line Seyfert 1 (NLS1) galaxy J1034+3938, which features a SMBH with a mass of $2.38 \times 10^7 M_{\odot}$ and an Eddington ratio of 3.15, indicative of super Eddington accretion. Despite previous observations with the Very Large Array (VLA) and the Jansky VLA (JVLA) revealing only compact, unresolved radio sources, our high-resolution radio imaging observations using the Very Long Baseline Array (VLBA) at 1.5 GHz have uncovered a parsec-scale jet extending approximately 20 mas (17 pc) to the west, with a significant brightness temperature of 5.65×10^7 K. The detection of this jet in J1034+3938, a galaxy historically classified as radio-quiet, challenges existing paradigms and provides a unique opportunity to study jet formation and its relation to SMBH accretion processes at high Eddington ratios. Our VLBA observations, conducted on October 21, 2022, as part of project BY175, utilized a dual circular polarization mode with four intermediate frequencies, each with a bandwidth of 64 MHz, to achieve a data recording rate of 2048 Mb/s. The observations were carried out using a phase-referencing technique with a nearby source J1033+3935, allowing for the mitigation of atmospheric and instrumental effects. The data processing involved several steps, including calibration for atmospheric errors using total electron content (TEC) from Global Positioning System (GPS) satellites, correction for reference frame errors such as parallax and earth orientation parameters (EOP), and instrumental errors through amplitude and phase calibration using antenna gain curves and system temperature information. The visibility data were then imaged using the DIFMAP software package, revealing a complex radio morphology that was further analyzed using a circular Gaussian model fitting approach. Our findings indicate that the radio emission from J1034+3938 not only is compact but also exhibits an extended structure, which is indicative of a jet. The extended nature of the radio emission, with a $S_{\text{peak}}/S_{\text{tot}}$ ratio of 0.48, classifies J1034+3938 as an extended source, contrasting with previous observations that suggested a compact morphology. The high brightness temperature of the jet component suggests that the radio emission is likely due to non-thermal processes associated with relativistic electrons within the jet, supporting the idea that the emission is jet-driven. The comparison of our VLBA observations with historical data from the VLA and JVLA shows a decline in the total flux density of J1034+3938 over time, from 25.9 mJy in 1990 to 6.55 mJy in 2022. J1034+3938 is well classified as a RQ AGN under the double standard of combining radio luminosity and radio loudness. The variability in radio emission and the presence of a jet in a RQ NLS1 galaxy like J1034+3938 provide valuable insights into the accretion-jet coupling mechanism, particularly in the context of high Eddington ratios. In conclusion, our study of the RQ NLS1 galaxy J1034+3938 has revealed the presence of a parsec-scale jet, a finding that expands our understanding of AGN feedback mechanisms and the role of jets in the evolution of galaxies. The detection of this jet in a high-accretion rate environment offers a new perspective on the conditions under which jets form and evolve. Future multi-frequency and multi-scale observations will be crucial for unraveling the complex interplay between accretion processes and jet formation in AGNs, particularly in the context of high Eddington ratios.

supermassive black hole, active galactic nuclei, jet, narrow-line Seyfert, Very Long Baseline Interferometry

doi: [10.1360/TB-2024-0634](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0634)