

毫米波甚长基线干涉测量的发展与展望

路如森^{1,2,3}, 沈志强¹, T. P. KRICHBAUM³

1. 中国科学院上海天文台;中国科学院星系宇宙学重点实验室,上海 200030
2. 中国科学院研究生院,北京 100049
3. 马克斯·普朗克射电天文研究所,德国波恩 53121

摘要 甚长基线干涉测量 (VLBI) 的出现为天文学研究提供了很高的角分辨率 (空间分辨率), 为人们认识和理解活动星系核 (AGN) 现象起到不可替代的作用。毫米波 VLBI 以其独有的优势正在成为天体物理学研究中最有效的研究工具之一。本文简要回顾了射电干涉测量的发展历程, 重点介绍了毫米波 VLBI 的发展历史与现状, 及其在活动星系核研究中的重要作用。展望了未来几年随着大口径毫米波段望远镜以及望远镜阵列的加入, 毫米波 VLBI 的发展和前景。

关键词 天体物理学; 毫米波 VLBI; 活动星系核

中图分类号 P14, P164

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.07.014

Development and Future Prospects of Millimeter-VLBI

LU Rusen^{1,2,3}, SHEN Zhiqiang¹, KRICHBAUM T. P.³

1. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Max Planck Institute for Radio Astronomy, Bonn 53121, Germany

Abstract Very Long Baseline Interferometry (VLBI) is a high-resolution imaging technique in radio astronomy. It has made substantial contribution to our understanding of Active Galactic Nuclei (AGN). The progress in VLBI is reviewed focusing on the development at millimeter wavelengths and its applications to AGN studies. Extending this technique to millimeter wavelengths, so-called mm-VLBI, leads to a unique opportunity to directly probe the central regions of AGN with the highest angular resolution in astronomy. Direct imaging of the jet innermost regions is indispensable for answering a number of unresolved fundamental questions regarding the jet formation, acceleration, and collimation. It is also a key to understand how the gravitational effects and magnetic fields (through full polarimetric VLBI observations) play the role in the vicinity of Super Massive Black Holes (SMBH). Such kind of studies are not possible at centimeter wavelengths due to the self-absorption, opacity, Faraday depolarization and scattering (in the case of Sgr A*) effects. In addition, millimeter-VLBI observations also open windows to study new species of spectral lines with unprecedented angular resolutions. The present challenges of millimeter VLBI are explained and a brief developing history is then described. Recent technical development allows imaging of hundreds of sources at 86GHz with high dynamic range. At even higher frequencies, studies are at present limited to pilot experiments, but have shown the detectability of brightest AGN and the existence of event-horizon-scale structures. These studies provide us with direct insights into black hole and relativistic jet physics. The future potential for improvement in mm-VLBI detection sensitivity is summarized. The characteristics for those radio telescopes and interferometer arrays, which are likely available in the next few years for global VLBI at short millimeter wavelengths ($\leq 1.3\text{mm}$) are presented. With the addition of these new instruments, a detailed imaging of nearby SMBHs (e.g. Sgr A*, M87) and answer to the open question of jet formation can be prospected.

Keywords astrophysics; millimeter-VLBI; active galactic nuclei

收稿日期: 2011-01-07; 修回日期: 2011-02-25

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(10625314); 国家自然科学基金重点项目(10633010); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2007CB815405)

作者简介: 路如森, 博士研究生, 研究方向为致密射电源的高频(毫米波)VLBI观测研究, 电子信箱: rslu@shao.ac.cn; 沈志强(通信作者), 研究员, 研究方向为 VLBI 天体物理、银河系中心超大质量黑洞(Sgr A*)的高分辨率毫米波 VLBI 观测, 电子信箱: zshen@shao.ac.cn

0 引言

1931年, Jansky用当时自己建造的无线电天线,首次记录到宇宙空间的射电辐射^[1-2],为天文学研究打开了一个全新的观测窗口,标志着射电天文学的诞生。射电天文学一直对发现意外天文现象做出着杰出的贡献,最值得一提的是20世纪60年代四大天文发现:类星体、星际有机分子、宇宙微波背景辐射和脉冲星。目前,人类拥有了从射电到 γ 射线涵盖整个电磁波谱的观测设备,已经进入全波段天文学时代。

射电天文学是天文学与无线电科学相结合的科学,射电望远镜发展的每一次长足进步总会促进射电天文研究的新进展。射电望远镜的分辨本领和它的接收天线的直径成正比,然而单靠增大天线口径有许多实际困难,于是射电天文学家转向干涉技术。干涉测量(interferometry)的原理是利用电磁波的干涉精确测定细微的角的大小及其变化,它在天文学中的应用可以追溯到A. A. Michelson等在光学领域的开创性工作^[3]。1962年,英国天文学家Ryle建成世界上第一台综合孔径射电望远镜^[4],以相对小的多的天线取得极大口径单天线所取得的效果,也因此与脉冲星发现者Hewish分享了1974年的诺贝尔物理学奖。射电干涉测量从20世纪50年代的二元干涉仪,发展到70年代的复杂多元综合孔径阵列,再到甚长基线干涉(Very Long Baseline Interferometry, VLBI),观测波长也从米波到厘米波,再向毫米、亚毫米波的短波不断发展,经历了一个追求高分辨率和高灵敏度的过程。

1 射电干涉测量发展回顾

干涉测量在射电天文学中的应用随着第二次世界大战的结束而迅速发展起来,至今已有70余年的历史。早期代表性的仪器有澳大利亚悉尼海岸干涉仪^[5-6]、英国剑桥双天线干涉仪^[7],以及其后的相位切换干涉仪^[8]、二维米波巡天干涉仪^[9-10]、厘米波成图干涉仪^[11-12]、地球自转孔径综合^[4]等。综合孔径射电望远镜的基本原理是将相隔很远的两个天线接收到的同一天体的两束射电波进行干涉,其结果等效于一架口径相当于两地之间距离的单孔径射电望远镜,极大地提高了射电望远镜的分辨本领。目前,世界各地广为使用的大型综合孔径望远镜主要有美国的甚大阵(VLA)^[13]、英国的多天线微波连接干涉阵(MERLINE)^[14]、荷兰的WSRT^[15]、南半球澳大利亚的致密天线阵(ATCA)^[16]等。中国密云米波综合孔径望远镜(MSRT)^[17]也属于这类综合孔径阵。工作在毫米波段的阵列主要有美国的Hat Creek、Owens Valley,位于夏威夷的亚毫米波阵SMA^[18]、日本的Nobeyama,法国的Plateau de Bure,以及正在建造的位于智利的大型毫米波天线阵ALMA。

天文望远镜的分辨率 θ (单位rad,其数值越小表明分清细节的能力越强)依赖于望远镜的口径 D 和观测波长 λ ,其关系可以简单地表示为 $\theta \sim \lambda/D$ 。为了提高干涉仪的分辨率,在基线两端使用高稳定度的独立本振和数据记录设备,最后把观测数据送到相关中心进行相关,从而达到信号相干的目的,即VLBI,它能提供目前天文观测中最高的空间分辨本领^[19]。VLBI

与综合孔径射电望远镜的最大不同在于它不需要把分散在数千公里之外的射电望远镜实时地连接在一起,而是让射电望远镜将观测信号独立地记录在观测台站的磁带或磁盘上,观测完成后再把观测数据送到相关中心进行相关,达到信号干涉的目的。这样就可以获得相当于(甚至超过)地球直径量级的射电望远镜分辨本领,从而将分辨率提高了几个量级。在厘米波段,可以获得的角分辨率约为毫角秒(milliarcsecond, mas)量级。

1967年, Broten等^[20]在活动星系核观测中第一次记录到VLBI连续谱干涉条纹。Moran等^[21]也于1967年在OH脉泽谱线观测中首次记录到条纹。对天体物理学研究而言,目的是研究射电源的致密结构,因而要求从VLBI测量到的可见度构造射电源的亮度分布,二者是一对傅里叶变换对。由于测量到的可见度是离散采样的,且存在误差,需要洁化图像和校正观测到的可见度。基于此,20世纪70年代发展了一批洁化图像算法(如CLEAN算法^[22])和校正方法。对VLBI来说,相位的校正是困难的,早期VLBI观测面临的问题是由于仪器和大气影响,测量到的相位受到严重“污染”而得不到校准,因此曾一度被认为不能真正用于成像。为解决此问题, Rogers等在前人研究基础上重新发现了闭合相位关系并用于数据分析^[23]。利用这项技术,很快便发展出混合成图(hybrid mapping)方法^[24-25],例如最常用的自校准方法^[26],从而得到射电源的射电亮度分布图。VLBI图像重建问题可参考文献^[27]。

目前,具有代表性的用于天文观测研究的VLBI阵列有美国的VLBA(由10个25m天线组成),以欧洲为主的EVN(位于中国上海佘山和乌鲁木齐南山的25m射电望远镜也是其正式会员),以澳大利亚为主的LBA,以及日本主导的空间VLBI计划(VSOP^[28],已于2003年停止观测,其第二代空间VLBI计划,VSOP-2^[29],预计将于2015年后发射)。自从1967年Broten等^[20]首次记录到干涉条纹以来,VLBI在活动星系核的研究领域取得了很多令人瞩目的成就。通过VLBI观测,人们逐步揭示了活动星系核中央能量通过喷流不断地输送到外部射电瓣的物理图像。

2 毫米波 VLBI

2.1 毫米波 VLBI 观测研究优势

由前述原理可以理解,目前基于地面的cm-VLBI的角分辨率可以从两个方面得到提高,一是增加基线的长度,二是提高观测的频率。前者催生了空间VLBI(利用空间射电望远镜和地面的射电望远镜联合干涉观测,例如VSOP^[28])的出现,而后者则是人们发展mm-VLBI(观测频率>80GHz)的动力。mm-VLBI观测研究的优势如下。

(1) 更高的分辨率

相比地面或空间的cm-VLBI(例如在6cm, VSOP的角分辨率为0.2~0.3mas), mm-VLBI提供了更高的角分辨。比如在3.5mm(86GHz),全球mm-VLBI阵的最高角分辨率可达50 μ as(microarcsecond),约相当于未来VSOP-2^[29]在7mm(计划中的

最短波长)的分辨率。

(2) 同步辐射自吸收作用弱

相比较 cm-VLBI, mm-VLBI 能够看得更“深入”。一般认为,活动星系核(Active Galactic Nuclei, AGN)中的射电辐射是由于相对论性电子和磁场相互作用产生的同步加速辐射,由于自吸收的作用,其内层区域在厘米波段是看不到的。随着观测波长的减小,光深也随之减小,这为 mm-VLBI 研究活动星系核的中央引擎提供了独特的优势。

(3) 受等离子体影响小

mm-VLBI 能够减少银河系中星际介质的散射作用。在银道面附近,一个点源经过散射后其散射角的大小正比于波长的平方。因此,对银河系中心射电源 Sgr A* 和低银纬的射电源(比如射电星系 Cygnus A)的观测会受到等离子体散射的影响。在短毫米波段,散射效应不再明显。对银河系中心超大质量黑洞候选体 Sgr A*, 毫米波甚至亚毫米波 VLBI 对于限定其大小和辐射模型的建立尤为关键。

观测表明,AGN 的射电辐射是偏振的,因此可以利用 VLBI 偏振观测对其磁场进行研究。偏振辐射穿过等离子体时偏振位置角方向会发生改变,即法拉第旋转。法拉第旋转也与波长的平方呈正比关系。因此,VLBI 偏振研究在低频波段受到银河系内以及 AGN 寄主星系内星际介质的法拉第消偏振的影响大得多。

(4) 新的谱线观测窗口

mm-VLBI 也同时打开了对一些新的分子谱线(脉泽)源进行高分辨率观测的窗口。比如,甲醇脉泽的 84.521、95.169GHz 谱线, HCO⁺ 的 89.189GHz 谱线, SiO ($J=2 \rightarrow 1$) 的 86.243GHz 谱线, HCN 的 88.632GHz 谱线, HNC 的 90.664GHz 谱线, CO 的 109.782GHz (C¹⁸O)、110.201GHz (C¹³CO)、112.359GHz (C¹⁷O) 谱线、以及在 129GHz 的 SiO ($v=1, J=3 \rightarrow 2$) 和 230GHz CO ($J=2 \rightarrow 1$) 谱线等。

2.2 毫米波 VLBI 观测研究的困难

对 mm-VLBI 观测研究而言,主要的困难之一是受到对流层中的水蒸气分子和氧分子的共振吸收线的影响(水蒸气:22 和 183GHz 附近,氧分子:60 和 118GHz 附近)。大气吸收既减弱了信号强度,又增加了系统的噪声温度。受到大气可降水变化的影响,吸收随时间而变化,因而不容易被全部改正掉。同时,可降水的变化会引起大气折射率的变化,造成残余延迟的起伏,增加相位噪声,使得大气的相干时间一般只有 10 余秒(3mm)^[31]。除了在上述吸收线附近,这些影响随频率而逐渐增强。另外,参与观测的天线在毫米波段较低的孔径效率或者本身较小的口径,使得 mm-VLBI 的探测灵敏度受到相应的限制。对射电源来说,一大部分源在毫米波段的辐射相对厘米波段变弱(陡谱或倒转谱)。上述这些因素导致在毫米波段可以探测并能够最终成图的射电源数目相对于在低频波段少得多^[32]。

2.3 毫米波 VLBI 的发展

自 20 世纪 80 年代初 Readhead 等^[30]证明了在 3mm VLBI

观测技术上的可行性以来,由于在天线建造(天线面精度)和低噪声前端方面的技术进步,以及相应的处于高海拔和干燥的气候环境条件下在高频上进行观测的天线数目的增加,并伴随着高速数据记录系统的迅速发展,mm-VLBI 取得了很大的进展。目前,在 3mm 波段,mm-VLBI 能够定期进行观测并得到高质量的图像,其典型的分辨率为 50~70 μ as^[32-33]。在更短的波段上,VLBI 观测目前还在实验观测阶段。早期的 2mm^[34-36]和 1mm^[37-40]的实验性观测试验了技术上的可行性,并且确认了活动星系核中存在足够致密的结构。2003 年,科学家们在横跨大西洋的基线上成功地探测到 1mm VLBI 的条纹,获得了创世界纪录的 34 μ as 的分辨率^[41-42]。在东亚,3mm VLBI 首次在韩国的 Taeduk 射电天文台(TRAO)和日本的 Nobeyama 射电天文台(NRO)之间的基线上进行了成功观测^[43]。

位于中国青海德令哈的毫米波天线具有在 3mm 观测的能力。目前,科学家们正对该站配置 VLBI 设备,mm-VLBI 观测的可行性,以及现有设备的升级、改造进行规划。

2.3.1 3mm VLBI

3mm VLBI 观测始于 1981 年。早期(1981—1987)的试验主要致力于发现适合毫米波观测的射电源,其间由于基线的限制(3~4 个),可以进行成图研究的非常有限^[44]。从 1988 年,毫米波 VLBI 在证明了其技术上可行性的约 10 年之后,常规的 3mm VLBI 观测才得以组织和开展。在 20 世纪 90 年代前期,曾组织了专门的全球 3mm VLBI 阵列进行观测,参加的望远镜为 3~7 个。

2.3.2 CMVA

CMVA (The Coordinated Millimeter VLBI Array, 1995—2002) 的正式建立在促成更大规模的全球 3mm VLBI 观测的同时,使得全世界的研究者能够通过提交观测申请得到观测机会。在 1997 年初,第一个 VLBA 台站加入 CMVA 组织的全球 mm-VLBI 联测。随着更多的 VLBA 天线的加入,CMVA 的观测精度得到不断提高。但令人遗憾的是,在 2002 年,CMVA 由于资金问题停止运作。这一时期的全球 mm-VLBI 观测,以其约 50mas 的角分辨率揭示了许多活动星系核中存在致密的核和单边喷流的结构,而且离核区越近,喷流表现得越弯曲^[34,45]。

2.3.3 GMVA

CMVA 停止组织观测的同时,位于法国的 Plateau de Bure 毫米波干涉仪可以作为一个相位阵加入 mm-VLBI 观测。作为 CMVA 的继任者,GMVA (The Global Millimeter VLBI Array, 2003—) 于 2003 年开始运转,目前参加观测的有美国 VLBA 的 8 个天线和欧洲的射电望远镜,包括德国的 Effelsberg、西班牙的 Pico Veleta、法国的 Plateau de Bure、瑞典的 Onsala 和芬兰的 Metsähovi。其最高分辨率为 50~70 μ as,最高基线灵敏度为 38mJy (7σ , 假设相干时间 20s, 数据积分时间 100s, 采样速率 512Mbps (2b/sample))。相应的成图灵敏度为 0.85mJy (7σ , 假定观测时间为 12h, 工作周期(duty cycle)为 0.5), 在这种条件下,可以获得高动态范围($\geq 500:1$)的射电源

的数目超过 100 个^[46]。目前,全球 mm-VLBI 观测申请每年有两次,建议书提交的截止日期为每年的 2 月 1 日和 10 月 1 日 (<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/vlbi/globalmm/index.html>)。

2.3.4 2mm 和 1mm VLBI

尽管目前 VLBI 在短毫米波(2mm 和 1mm)上还处于试验阶段,但试验已经证明其技术上的可行性。其中在 2mm,一个很大的成功是在长达 4.2Gλ 的跨大西洋的基线上(西班牙 Pico Veleta 和美国 Heinrich-Hertz Telescope)探测到 3 个类星体: NRAO 150、1633+382 和 3C 279^[55]。

在 1mm 波段,Padin 等经过尝试,于 1989 年首次在对 3C 273 的观测中在 845km 基线上探测到条纹^[37]。Greve 等^[38]于 1994 年在 IRAM 的 Pico Veleta 30m 望远镜和 Plateau de Bure 的一个 15m 天线间的 1150km 长的基线上,观测到 3C 273、3C 279 和 PKS 2145+067。Krichbaum 等^[39]的试验进一步验证了 VLBI 在 1mm 波段上的可行性,并探测到 6 个致密射电源。最近,Doeleman 等^[48]在 1mm 波段成功地对 Sgr A* 进行了观测,发现其内禀的角大小只有 37μas,相当于 3.7 个 Schwarzschild 半径。

这一系列初期的试验得出了一些重要的结论:(1)很大一部分已知的 cm-VLBI 射电源都极其致密,因而需要在短毫米波段进行 VLBI 观测研究。(2) VLBI 所观测到的喷流可以追踪到亚秒差距的尺度上,并且离核区越近,喷流弯曲越明显。(3) 近期通过对对银河系中心射电源 Sgr A* 的观测,发现在短毫米波段已经可以测量到其辐射区大小的内禀值,结合 VLBI 观测对其质量的限制^[49],mm-VLBI 观测为超大质量黑洞的存在提供了强有力的证据^[48,50-51]。

2.4 毫米波 VLBI 对活动星系核研究的意义

虽然活动星系核的发现已经有 40 余年的时间,但是至今它仍然是宇宙中最吸引人的天体。直到今天,与 AGN 相联系的一些本质问题仍然悬而未决。对超大质量黑洞的物质吸积以及相对论性喷流,包括喷流的形成、加速及准直等过程依然缺乏细致的理解。通过 mm-VLBI 的高分辨率来研究内部区域喷流随时间的演化为理解这些过程提供了很好的机会。

在毫米波段进行 VLBI 观测,由于具有很高的分辨率,能够对非常靠近 AGN 核的区域进行成像研究。这些区域被认为是射电喷流产生的区域。因此,在尽可能短的波段进行高分辨率的观测对于研究活动星系核的本质是非常重要的。而这些区域由于在厘米波段是光学厚的,因此 cm-VLBI 不管有多么高的分辨率和动态范围,都是无能为力的。另外,AGN 在毫米波段的强烈活动性(流量变化和喷流结构变化)也是促使人们探索在毫米波上进行 VLBI 观测的又一动力。例如,利用 mm-VLBI,可以在相对高的频率和相对早的时间探测喷流成分变化,从而可以探究流量(从射电波段到 γ 射线)的爆发与新成分产生的关系。利用 mm-VLBI 的图像,可以在距离核更近的区域追踪喷流的弯曲,在很多活动星系核中,人们发现喷流弯曲的程度会随着距离核的距离的减少而加剧^[33]。

为进一步增加适合未来 3mm VLBI 观测研究的样本数

目, Lee 等^[32]对一个大样本的致密射电源(127 个)进行了 3mm VLBI 的巡天观测,在成图灵敏度好于 10mJy/beam 的水平,最终得到 109 个射电源的图像,将可以在 3mm 成像的射电源数目增加近 5 倍。这些结果表明,在亚毫角秒尺度上,类星体和 BL Lac 类天体比射电星系致密。对核区亮温度分布研究表明,其峰值位于约 10^{11} K 附近,只有 1% 的核的亮温度超过 10^{12} K(逆康普顿极限^[52])。对于具有短时标光变(IDV)的源,其核的角大小比非 IDV 的源小,所以该类源核区的亮温度高。

对于距离人类最近的星系核,银河系中心致密的射电源 Sgr A*, VLBI 观测表明其散射角大小在厘米波段远大于源内禀尺寸的角大小,即观测到的角大小由散射主导,而在 1mm,由外推得到的散射角不到 15μas,这相当于质量为 4 百万太阳质量黑洞的史瓦西黑洞视界半径的 1.5 倍。由于可观测的最小辐射区域应与 Schwarzschild 半径相当,在毫米波段,Sgr A* 的真实角大小与散射角大小是可比拟的,这对于探测 Sgr A* 的大小和形状,从而使人们了解其吸积辐射过程的重要性是不言而喻的。1mm VLBI 观测^[48]表明,Sgr A* 在 1mm 辐射区的尺寸小于预期的 Schwarzschild 黑洞视界的大小。对此的一种解释是,Sgr A* 的射电辐射并不是以通常认为的黑洞为中心,而是起源于围绕黑洞周围的吸积盘。这对理论解释黑洞周围的辐射提出新的挑战^[48]。

3 展望

目前,制约 3mm VLBI 观测的主要因素是探测灵敏度太低。在更短波长,VLBI 观测的另一个制约因素是由于较少的望远镜能够参加观测,UV 覆盖差,成图的动态范围低。提高探测灵敏度的主要途径有:(1)在观测阵列中增加高灵敏度的天线;(2)提高数据记录速率从而增加观测带宽;(3)延长积分时间,比如通过改正大气相位扰动^[53],以及应用特殊的条纹探测方法^[31]。为了得到更可靠的图像,探测到更多的目标源,最直接的方法是增加干涉阵的接收面积。表 1 给出了目前使用中的以及即将建成的将能够在 1mm 及以下波段观测的一些天线参数^[54]。目前,1mm VLBI 的基线(IRAM-USA)灵敏度限制在 100~200mJy (7σ , 相干时间 10s, 采样率 4Gbps)。在未来若干年,VLBI 的发展将会提供至少 16Gbps 的采样率,这将使得灵敏度再增加 2 倍。除此之外,未来大气相位改正方法可以显著提高大气相干时间^[53]。除了改善探测灵敏度外,未来这些望远镜的加入还会改善 UV 覆盖,从而提高成图的可靠性。ALMA 的加入更会大大改善对低赤纬射电源的 UV 覆盖,推动对银河系中心致密射电源 Sgr A* (赤纬 -29°) 的毫米波/亚毫米波成像研究。随着更多的能够在短毫米观测的望远镜的加入,未来的短毫米波(1mm 和 0.85mm) VLBI 观测能够对临近的超大质量黑洞(例如 Sgr A*, M 87)的中心辐射区域进行成像研究^[55-57]。

随着技术进步,mm-VLBI 在灵敏度和图像质量上可以达到与目前 cm-VLBI 差不多的水平。可以预见,在不远的将来,sub mm-VLBI、空间 mm-VLBI 将会使得我们最终对黑洞视界

表 1 已有和正在规划建设的能够在 1mm(230GHz)及更短波长进行 VLBI 观测的望远镜特征和参数

Table 1 Properties of existed radio telescopes and of those under construction suitable for VLBI at 1mm and below

天线名称	位置(国家),海拔高度/m	直径/m	主面精度/ μm	效率	SEFD ¹ /Jy
PdB-1	Plateau de Bure(法国),2550	15	55	0.45	5182
PdB	Plateau de Bure(法国),2550	6×15	55	0.45	864
PV	Pico Veleta(西班牙),2900	30	67	0.39	1485
APEX	Chajnantor(智利),5100	12	18	0.58	6295
ASTE	Chajnantor(智利),4800	10	19	0.50 ²	10700
HHT	Mt. Graham(美国),3100	10	15	0.59	8979
KP	Kitt Peak(美国),2000	12	75	0.35	10322
JCMT	Mauna Kea(美国),4100	15	25	0.57	4141
CSO	Mauna Kea(美国),4100	10	25	0.57	8618
SMA	Mauna Kea(美国),4100	8.6	12	0.59	3093
Hawaii-6	Mauna Kea(美国),4100	— ³	25	0.57	1696
CARMA-1	Cedar Flat(美国),2200	10.4	60	0.43	11373
CARMA	Cedar Flat(美国),2200	— ⁴	60	0.43	1142
LMT	Sierra Negra(墨西哥),4600	50	70	0.38	556
ALMA-1	Chajnantor(智利),5000	12	25	0.57	6469
ALMA	Chajnantor(智利),5000	50×12	25	0.57	129

注: 1. 假定系统温度为 150K; 2. 假定效率为 0.5; 3. Hawaii 相位阵由 SMA、CSO 和 JCMT 组成; 4. 6×10.4m+9×6.1m。

Notes: 1. Assuming $T_{\text{sys}}=150\text{K}$; 2. Assuming antenna efficiency 0.5; 3. The phased Hawaii array consists of SMA, CSO and JCMT; 4. 6×10.4m+9×6.1m.

的细致成图研究成为可能, 如果再伴以偏振的成图研究, 将有助于进一步研究活动星系核、微类星体中相对论性喷流的激发机制, 探索喷流内部磁场形态及演化, 更好地认识整个吸积系统的性质。

参考文献 (References)

- [1] Jansky K G. Electrical disturbances apparently of extraterrestrial origin [J]. *Proceedings of the IRE*, 1933, 21: 1387–1398.
- [2] Reber G. Notes: Cosmic static[J]. *Astrophysical Journal*, 1940, 91: 621–624.
- [3] Michelson A A, Pease F G. Measurement of the diameter of alpha Orionis with the interferometer[J]. *Astrophysical Journal*, 1921, 53: 249–259.
- [4] Ryle M. The New Cambridge radio telescope[J]. *Nature*, 1962, 194(4828): 517–518.
- [5] Pawsey J L, Payne–Scott R, McCready L L. Radio–frequency energy from the Sun[J]. *Nature*, 1946, 157(3980): 158–159.
- [6] McCready L L, Pawsey J L, Payne–Scott R. Solar radiation at radio frequencies and its relation to sunspots [J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 1947, 190(1022): 357–375.
- [7] Ryle M, Smith F G, Elsmore B. A preliminary survey of the radio stars in the Northern Hemisphere [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1950, 110: 508–523.
- [8] Ryle M. A new radio interferometer and its application to the observation of weak radio stars[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 1952, 211(1106): 351–375.
- [9] Ryle M, Hewish A. The Cambridge radio telescope [J]. *Memoirs of the Royal Society of London*, 1955, 67(51): 97–105.
- [10] Mills B Y, Little A G, Sheridan K V, et al. A high resolution radio telescope for use at 3.5m [J]. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 1958, 46(1): 67–84.
- [11] Ryle M, Hewish A, Shakeshaft J. The synthesis of large radio telescopes by the use of radio interferometers [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1959, 7(5): 120–124.
- [12] Mills B Y, Aitchison R E, Little A G, et al. The Sydney University cross–type radio telescope[J]. *Proceedings of the IRE*, 1963, 24: 156–165.
- [13] Thompson A R, Clark B G, Wade C M, et al. The very large array[J]. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 1980, 44: 151–167.
- [14] Davies J G, Anderson B, Morison I. The Jodrell Bank radio–linked interferometer network[J]. *Nature*, 1980, 288: 64–66.
- [15] Baars J W M, van der Brugge J F, Casse J L, et al. The synthesis radio telescope at westerbork[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1973, 61(9): 1258–1266.
- [16] Frater R H, Brooks J W, Whiteoak J B. The Australia telescope: Overview[J]. *Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia*, 1992, 12(2): 103–112.
- [17] Beijing Observatory Metre–Wave Radio Astronomy Group. Miyun meter–wave aperture synthesis radio telescope [J]. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 1986, 10: 3–11.
- [18] Ho P T P, Moran J M, Lo K Y. The submillimeter array [J]. *Astrophysical Journal*, 2004, 616(1): L1–L6.
- [19] Kellermann K I, Moran J M. The development of high–resolution imaging in radio astronomy [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2001, 39: 457–509.
- [20] Broten N W, Legg T H, Locke J L. Observations of quasars using interferometer baselines up to 3,074 km[J]. *Nature*, 1967, 215(5096): 38.
- [21] Moran J M, Crowther P P, Burke B F. Spectral line interferometry with independent time standards at stations separated by 845 kilometers[J]. *Science*, 1967, 157(3789): 676–677.
- [22] Högbom J A. Aperture synthesis with a non–regular distribution of interferometer baselines [J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 1974, 15: 417–426.

- [23] Rogers A E E, Hinteregger H F, Whitney A R, *et al.* The structure of radio sources 3C 273B and 3C 84 deduced from the 'closure' phases and visibility amplitudes observed with three-element interferometers[J]. *Astrophysical Journal*, 1974, 193: 293-301.
- [24] Baldwin J E, Warner P J. Phaseless aperture synthesis[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1978, 182: 411-422.
- [25] Readhead A C S, Wilkinson P N. The mapping of compact radio sources from VLBI data[J]. *Astrophysical Journal*, 1978, 223: 25-36.
- [26] Schwab F R. Adaptive calibration of radio interferometer data[J]. *Proceedings of SPIE*, 1980, 231: 18-25.
- [27] Pearson T J, Readhead A C S. Image formation by self-calibration in radio astronomy [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1984, 22: 97-130.
- [28] Hirabayashi H, Hirotsawa H, Kobayashi H, *et al.* Overview and initial results of the very long baseline interferometry space observatory programme[J]. *Science*, 1998, 281(5384): 1825-1829.
- [29] Hirabayashi H, Murphy D W, Murata Y, *et al.* The VSOP-2 Mission[C]//Hirabayashi H, Edwards P G, Murphy D W. Proceedings of the VSOP Symposium: Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI. Sagamihara, Kanagawa: Institute of Space and Astronautical Science, 2000: 277-280.
- [30] Readhead A C S, Mason C R, Mofett A T, *et al.* Very long baseline interferometry at a wavelength of 3.4 mm[J]. *Nature*, 1983, 303: 504-506.
- [31] Rogers A E E, Doeleman S S, Moran J M. Fringe detection methods for very long baseline arrays[J]. *Astronomical Journal*, 1995, 109(3): 1391-1401.
- [32] Lee S-S, Lobanov A P, Krichbaum T P, *et al.* A global 86 GHz VLBI survey of compact radio sources [J]. *Astronomical Journal*, 2008, 136(1): 159-180.
- [33] Rantakyro F T, Bååth L B, Backer D C, *et al.* 50 μ s resolution VLBI images of AGNs at lambda 3 mm [J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 1998, 131: 451-467.
- [34] Greve A, Könönen P, Graham D A. 147 GHz VLBI observations: Detection of 3C 273 and 3C 279 on the 3100 km baseline Metsähovi - Pico Veleta[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2002, 390: L19-L22.
- [35] Krichbaum T P, Graham D A, Alef W, *et al.* VLBI observations at 147 GHz: First detection of transatlantic fringes in bright AGN [C]//Ros E, Porcas R W, Lobanov A P, *et al.* Proceedings of the 6th European VLBI Network Symposium on New Developments in VLBI Science and Technology. Bonn: Max-Planck-Institut für Radioastronomie, 2002: 125-128.
- [36] Doeleman S S, Phillips R B, Rogers A E E, *et al.* 2mm wavelength VLBI of SiO masers and AGN [C]//Ros E, Porcas R W, Lobanov A P, *et al.* Proceedings of the 6th European VLBI Network Symposium on New Developments in VLBI Science and Technology. Bonn: Max-Planck-Institut für Radioastronomie, 2002: 223-226.
- [37] Padin S, Woody D P, Hodges M W, *et al.* 223 GHz VLBI observations of 3C 273[J]. *Astrophysical Journal*, 1990, 360: L11-L13.
- [38] Greve A, Torres M, Wink J E, *et al.* 215 GHz VLBI observations: Detection of fringes on the 1147 km baseline Pico Veleta-Plateau de Bure[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1995, 299: L33-L36.
- [39] Krichbaum T P, Graham D A, Greve A, *et al.* 215 GHz VLBI observations of bright active galactic nuclei [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1997, 323: L17-L20.
- [40] Krichbaum T P, Graham D A, Witzel A, *et al.* VLBI observations of the galactic center source SGR A* at 86 GHz and 215 GHz [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1998, 335: L106-L110.
- [41] Krichbaum T P, Graham D A, Alef W, *et al.* Towards the Event Horizon-The vicinity of AGN at micro-arcsecond resolution [C]//Bachiller R, Colomer F, Desmurs J -F, *et al.* Proceedings of the 7th Symposium of the European VLBI Network on New Developments in VLBI Science and Technology. Toledo: Observatorio Astronomico Nacional of Spain, 2004: 15-18.
- [42] Doeleman S S, Phillips R B, Rogers A E E, *et al.* Extending VLBI to 2mm and 1mm wavelengths [C]//Romney J D, Reid M J. The 10th Anniversary of the VLBA. ASP Conference Series., San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2005, 340: 605-607.
- [43] Shibata K M, Chung H S, Kameno S, *et al.* First mm-VLBI observations between the TRAO 14-m and the NRO 45-m telescopes: Observations of 86 GHz SiO Masers in VY Canis Majoris[J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2004, 56(3): 475-480.
- [44] Wright M. VLBI structure of NGC 1275 AT 3 millimeters[C]//Reid M J, Moran J M. Proceedings of the 129th IAU Symposium: The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988, 129: 93-94.
- [45] Bååh L B, Rogers A E E, Inoue M, *et al.* VLBI observations of active galactic nuclei at 3 MM [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1992, 257(1): 31-46.
- [46] Agudo I, Krichbaum T P, Bach U, *et al.* The innermost regions of AGNs with future mm-VLBI [C]//Exploring the Cosmic Frontier, Heidelberg: Springer, 2007: 179-180.
- [47] Garrett M A. When you wish upon a star: Future developments in astronomical VLBI [C]// Minh Y C. Proceedings of a Symposium of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry: New Technologies in VLBI. ASP Conference Series, San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2003, 306: 3-19.
- [48] Doeleman S S, Weintroub J, Rogers A E E, *et al.* Event-horizon-scale structure in the supermassive black hole candidate at the Galactic Centre [J]. *Nature*, 2008, 455(7209): 78-80.
- [49] Reid M J, Brunthaler A. The proper motion of Sagittarius A*. II. The mass of Sagittarius A* [J]. *Astrophysical Journal*, 2004, 616(2): 872-884.
- [50] Bower G C, Falcke H, Herrnstein R, *et al.* Detection of the intrinsic size of Sagittarius A* through closure amplitude imaging [J]. *Science*, 2004, 304(5671): 704-708.
- [51] Shen Z-Q, Lo, K-Y, Liang M-C, *et al.* A size of ~1AU for the radio source Sgr A* at the centre of the Milky Way [J]. *Nature*, 2005, 438(7064): 62-64.
- [52] Kellermann K I, Pauliny-Toth I I K. The spectra of opaque radio sources[J]. *Astrophysical Journal*, 1969, 155: L71-L78.
- [53] Roy A, Rottmann H, Teuber U, *et al.* Phase correction of VLBI with water vapour radiometry[C]. The 8th European VLBI Network Symposium, Torun, Poland, September 26-29, 2006.
- [54] Krichbaum T P, Bach U, Graham D A, *et al.* Towards millimeter VLBI [C]. The 9th European VLBI Network Symposium on the Role of VLBI in the Golden Age for Radio Astronomy and EVN Users Meeting, Bologna, Italy, September 23-26, 2008.
- [55] Krichbaum T P, Agudo I, Bach U, *et al.* VLBI at the highest frequencies-AGN studies with micro-arcsecond resolution [C]. The 8th European VLBI Network Symposium, Torun, Poland, September 26-29, 2006.
- [56] Krichbaum T P, Lee S S, Lobanov A P, *et al.* How compact are the cores of AGN? Sub-parsec scale imaging with VLBI at millimeter wavelength [C]//Rector T A, de Young D S. Extragalactic Jets: Theory and Observation from Radio to Gamma Ray. ASP Conference Series, San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2008, 386: 186-194.
- [57] Huang L, Takahashi R, Shen, Z-Q. Testing the accretion flow with plasma wave heating mechanism for Sagittarius A* by the 1.3 mm VLBI measurements[J]. *Astrophysical Journal*, 2009, 706(2): 960-969.

(责任编辑 朱宇)