

对银河系中心超大质量黑洞候选体 Sgr A* 的 VLBI 观测研究

沈志强

(中国科学院上海天文台, 研究员、博士生导师

上海 200030)

〔摘要〕 位于银河系中央的极其致密的非热射电源 Sagittarius A* (Sgr A*), 被公认为是最佳的超大质量黑洞候选体, 其质量约为 400 万个太阳质量。甚长基线干涉测量 (VLBI) 技术以其独有的高空间分辨率为我们提供了唯一可以探讨 Sgr A* 位于几个史瓦西 (Schwarzschild) 半径区域内天体物理性质的手段。介绍了对 Sgr A* 的 VLBI 研究现状和最新进展, 着重论述了毫米波和亚毫米波 VLBI 观测对研究 Sgr A* 的辐射区域的真实形状和大小, 以及探索其结构随时间变化的重要性。Sgr A* 无疑是检验广义相对论效应的亚毫米波 VLBI 实验的最佳目标。

〔关键词〕 甚长基线干涉测量 (VLBI) 银河系中心 超大质量黑洞 毫米波

〔中图分类号〕 P14 〔文献标识码〕 A 〔文章编号〕 1000-7857(2004)11-0008-04

VLBI OBSERVATIONS OF SGR A*: A SUPERMASSIVE BLACK HOLE CANDIDATE AT THE GALACTIC CENTRE

SHEN Zhi-qiang

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: There is compelling evidence that the extremely compact non-thermal radio source at the center of our Milky Way Galaxy, Sagittarius A* (Sgr A*), is a best known supermassive black hole candidate with a dark mass of 4 million solar masses. Very Long Baseline Interferometry (VLBI) technique, with its high-resolution imaging capability, is proved to be the most powerful tool for probing the region of a few Schwarzschild radii of Sgr A*. This paper updates the progress in the VLBI observations of Sgr A*, with the emphasis on the importance of the millimeter and sub-millimeter VLBI observations in the detection of the intrinsic structure of Sgr A* and in our ongoing effort to search for the structural variability. There is no doubt that Sgr A* would be the most important target for the future sub-millimeter VLBI experiment to test the General Relativity.

Key Words: Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Galactic Centre, supermassive black hole, millimeter wave

CLC Number: P14 **Document Code:** A **Article ID:** 1000-7857(2004)11-0008-04

1 银河系中心

Sagittarius A* (Sgr A*) 是位于我们银河系中央的一颗极其致密的非热射电源, 在其被观测发现之前就被理论天体物理学家推测为黑洞^[1]。介于银河系中心区域和地球上观测

者之间的尘埃和气体的消光作用, 使得 Sgr A* 的光学辐射根本无法被探测到, 而其致密的射电结构使得只有在高分辨率的射电干涉观测成为可能之后, 人们才在 1974 年将其发现, 并认为 Sgr A* 实际上定义了银河系的中心^[2]。最近的几年中, 借助于新的空间 X 射线望远镜和地面的大型观测

收稿日期: 2004-08-19。

作者简介: 沈志强, 男, 1965~, 研究员, 中国科学院上海天文台 (200030), 主要研究方向为射电天文学中的甚长基线干涉测量 (VLBI) 技术及其在天体物理学中的应用, E-mail: zshen@shao.ac.cn。

参考文献 (References)

- [1] 孔力, 电工高新技术丛书第 2 分册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.155~162
- [2] Mohammad Shahidehpour, Fred Schwartz. Don't Let the Sun Go Down on PV[J]. IEEE Power & Energy, 2004, 2(3): 40~48
- [3] Sandia National Laboratory. The U.S. Photovoltaic Industry Roadmap[C]. <http://www.sandia.gov/pv>, 2001
- [4] Kazuhiko Kato, et al. Energy from the Desert[M]. James & James (Science Publishers) Ltd., Camden High Street, London, NW1 0JH, UK, 2003, 8~12
- [5] 中国电力企业联合会统计信息部. 2003 年电力工业统计资料提要[R], 2004
- [6] 吴敬儒, 邱言文. 确保国内生产总值翻两番的 2001~2020 年电力工业发展研究[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 1~6
- [7] 中国能源战略研究课题组. 中国能源战略研究 (2000~2050 年) [M]. 北京: 中国电力出版社, 1997
- [8] 中国电力企业联合会统计信息部. 2002 年电力工业统计资料提要[R], 2003
- [9] <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- [10] Edward S. Cassedy. 可持续能源的前景[M]. 段雷等译. 北京: 清华大学出版社, 2002, 74~75

(责任编辑 肖庆山)

设备, Sgr A* 也已先后被探测到 X 射线^[3]和红外辐射^[4]。过去 30 年间的大量观测数据和理论研究都表明 Sgr A* 就是银河系中央的超大质量黑洞候选体^[5], 红外观测更进一步提出该黑洞应有自旋。对该黑洞质量的最可靠测量是来自对 Sgr A* 周围 1 个角秒内的年轻的大质量恒星的高分辨率近红外成图监测^[6-9]。数据分析表明, 这些恒星的运动轨道可以近乎完美地用开普勒轨道拟合, Sgr A* 位于椭圆轨道的一个焦点上, 由此得到的包含在轨道内的暗物质质量约为 400 万个太阳质量($4 \times 10^6 M_{\odot}$), 其中一颗早型星(S2)的轨道运转周期仅为 15.56 年, 距离 Sgr A* 最近时只有 124 个天文单位(1 个天文单位等于 1.5 亿公里)。对 Sgr A* 本身自行的观测研究^[10-11]显示, 其内在固有的自行是沿着与银道面垂直的方向, 大小不超过 8 km s^{-1} , 这给出 Sgr A* 的质量下限至少是 $4 \times 10^5 M_{\odot}$ 。该测量精度随着观测时间跨度增长而提高得很快, 预计 2007 年以后确定的 Sgr A* 质量下限可达 $10^6 M_{\odot}$, 从而与恒星轨道运动定出的暗物质质量相符, 即所有的暗物质都直接来自 Sgr A*。所以, Sgr A* 作为一个引力源, 我们对其质量已经了解得很好了, 该测量的主要误差取决于到银河系中心距离的不确定性。而 Sgr A* 作为一个辐射源, 其辐射区域的形状及其大小又是怎样, 则是本文将要探讨的。

2 VLBI 观测

VLBI (Very Long Baseline Interferometry), 即甚长基线干涉测量, 该技术 1967 年第一次被成功用于天文观测, 能提供当前天文观测中最高的分辨本领^[12](毫角秒量级, 在 Sgr A*, 1 毫角秒的角间距相当于 8 倍的地球到太阳的距离, 即 12 亿公里), 是探索致密天体细微结构的最有效工具。Sgr A* 作为一个强射电源(射电流量在 1 Jy 左右), 无疑是 VLBI 观测的首选目标之一。但是, 由于星际介质的衍射效应, 射电波在穿越等离子体介质到达我们观测者时, 会被散射开来, 其散射角大小(Θ_{scat})正比于观测波长(λ)的平方, 观测得到的源的角大小(Θ_{obs})与源的内在的真实大小(Θ_{int})和 Θ_{scat} 满足如下的关系:

$$(\Theta_{\text{obs}})^2 = (\Theta_{\text{scat}})^2 + (\Theta_{\text{int}})^2 \quad (1)$$

显见, 当散射角 Θ_{scat} 远远大于源真实大小 Θ_{int} , 测得的 Θ_{obs} 是被 Θ_{scat} 大小所主导, 因而也就很难从 Θ_{obs} 估计 Sgr A* 的真实大小 Θ_{int} 。而 VLBI 观测结果表明在厘米波段测量的 Θ_{obs} , 实际上反映了散射角 Θ_{scat} 随波长变化的关系, 即在厘米波 Θ_{scat} 远大于源的 Θ_{int} 。

1997 年, 我们对 Sgr A* 开展了首次多波段、准同时 VLBI 成图观测, 成功获得了 Sgr A* 在 5 个波长(6.0 厘米, 3.6 厘米, 2.0 厘米和 1.35 厘米以及 7 毫米)上的图像^[13]。发现该致密射电源的视结构呈扁平的、在东西方向延伸的椭圆形状, 进而第一次给出了南北方向上散射角大小随波长的变化关系, 由此我们可以外推得到散射角在任何别的观测波长上的值。散射角随波长的平方(λ^2)减小很快, 在 1 毫米的散射角大小是 1 厘米的 1%, 不到 15 微角秒(μas)或 1.5 倍的质量为 $4 \times 10^6 M_{\odot}$ 史瓦西(Schwarzschild)黑洞视界半径, 而由黑洞的视界定义, 任何观测到的最小辐射区域应与史瓦西半径相当, 即 Sgr A* 的大小与毫米波的散射角大小应是可比拟的, 这将造成 Θ_{obs} 与 Θ_{scat} 的明显偏离。这揭示了在毫米波段探索 Sgr A* 的真实形状和大小的可行性和重要性, 重要前提是我们能够在毫米波精确测得 Θ_{obs} 。

3 毫米波 VLBI 观测

地球大气对毫米波 VLBI 观测影响远大于对厘米波 VLBI 观测, 加之 Sgr A* 位于南天(南纬~30 度), 而大多数毫米波 VLBI 天线在北半球, 使得观测中的大部分时间里 Sgr A* 的地平高度只有 10~20 度左右, 这就引入很大的大气吸收(不透明度), 在使用传统的幅度自校准进行数据分析处理时不可避免地会使结果有较大不确定性, 这已反映在过去发表的 VLBI 测量结果中。如, 首次 7 毫米 VLBI 观测得到的结构^[14]就从未被新的更好的数据所证实^[13, 15-16]。我们已知 Sgr A* 的视大小 Θ_{obs} 与散射角大小 Θ_{scat} 在毫米波相差也不大, 由(1)式可知, 要得到真实可信的源的固有大小, 必须提高 Θ_{obs} 测量的精确度(即降低测量误差以凸现 Θ_{obs} 偏离 Θ_{scat} 的可信度)。

同一般射电源的 VLBI 观测所不同的是, 毫米波 VLBI 观测得到的 Sgr A* 的可见度相位可以近似为零(这是因为所有测得的闭合相位几乎都一直保持在零)^[17], 即 Sgr A* 辐射具有对称结构, 其大小将完全由可见度幅度决定。为此, 我们提出了从观测自身和数据分析方法两方面来改善毫米波 VLBI 观测并进而提高结果的可靠性。首先, Sgr A* 的毫米波 VLBI 观测必须是动态的, 具体的观测日期必须保证分散在数千公里以外的各个 VLBA 观测台站均有较理想的天气条件。观测中, 必须每隔约 10 分钟进行一次天线的指向校准。在每 10 分钟左右的时间间隔里都安排了对 Sgr A* 近旁的一颗非常致密的一氧化硅(SiO)脉泽源 VX Sgr 的谱线观测, 目的是用最小二乘法拟合 SiO 脉泽的总功率谱去准确地得到相对于某个参考天线的其它所有 VLBI 天线的幅度增益随时间(或地平高度)的变化关系, 最后将其应用到 Sgr A* 数据上。这种观测模式对可见度幅度的校准明显优于基于 Sgr A* 自身模型的幅度自校准, 但为了获得对 Sgr A* 结构最为可靠的定量描述, 我们建立了一种不需成图而对可见度幅度直接作模型拟合^[18]的方法, 基本想法就是利用闭合幅度这个不受观测误差影响的观测量去约束模型参数拟合, 以避免常规幅度校准的不确定性引起的成图自校准的误差, 最终给出较传统成图法更为可靠的源的结构参数。该处理方法中值得注意的是对低信噪比时的可见度幅度的正的偏差(bias)的改正, 详细参见文献^[18]。另外, 该方法无法给出 Sgr A* 的流量密度, 这类似于在利用闭合相位的自校准成图中将丢失源的绝对位置信息, 但不会对源结构的分析产生任何影响。

利用以闭合幅度作为约束条件的模型拟合法, 我们对过去已有的 VLBI 观测数据重新进行了分析。通过拟合 4 个厘米波段(6.0 厘米, 3.6 厘米, 2.0 厘米和 1.35 厘米)的二维 Θ_{obs} 随波长 λ 的关系, 我们得到最佳的散射角与 λ^2 的关系如下^[19]:

$$\Theta_{\text{scat}} = 1.39 \lambda^2 \quad (\text{沿东西方向}) \quad (2)$$

和

$$\Theta_{\text{scat}} = 0.76 \lambda^2 \quad (\text{沿南北方向}) \quad (3)$$

这里, 散射角的单位是毫角秒, 观测波长的单位是厘米。这一结果与直接拟合闭合幅度的结论^[20]一致, 均显示在东西向的长轴的散射角幅度比过去的小约 2%, 而南北向的散射角大小与以前拟合值^[13]相同。

目前对 Sgr A* 的毫米波 VLBI 成图观测的最短波长是

3.5 毫米。1999 年 4 月,由 6 面天线组成的 3.5 毫米 CMVA (Coordinated Millimeter VLBI Array)的观测数据尚不足以确定 Sgr A* 辐射在 3.5 毫米的形状,所以只能拟合其为简单的圆对称结构^[17]。2002 年 11 月,我们利用刚更新到 3.5 毫米的 VLBA 的试观测时间对 Sgr A* 进行了一次非常成功的观测。结果我们得到了第一张 Sgr A* 在 3.5 毫米的高分辨率 VLBI 图像^[21~22],首次揭示了在 3.5 毫米的椭圆状视结构,发现其仍沿东西向伸长,比较星际散射在 3.5 毫米上的视大小,我们推测 Sgr A* 沿东西向的固有大小在 1 个天文单位之内,这比光学和红外观测所能确定的 0.008 秒差距小了 1 600 倍以上,相当于约 13 个 400 万倍太阳质量黑洞的史瓦西半径,这样推算得出的暗物质密度至少是 7.6×10^{21} 太阳质量每立方秒差距,支持超大质量黑洞的假设。该结果现已为我们新一轮 3.5 毫米 VLBA 观测(2003 年 9 月)所证实^[19]。这是目前仅有的两个 3.5 毫米的 VLBI 图像,由此推算得到的亮温度下限大于 10^{10} K,确证了该毫米波辐射的非热起源。

在 7 毫米,为了提高 VLBA 阵观测 Sgr A* 的南北空间分辨率,我们在今年 3 月的两次 VLBA 观测中首次引入了世界上最大的射电望远镜 GBT,这也是 GBT 参加的第一个 7 毫米 VLBI 天体物理观测。观测结果与过去的测量相符,但提高了测量精度,即降低了误差。最终我们估算得到 Sgr A* 在 7 毫米沿东西向的固有大小约是 2.1 个天文单位,或 27 个 400 万倍太阳质量黑洞的史瓦西半径^[19]。

通过比较上面得到的在两个毫米波段上的 Sgr A* 辐射大小,我们可以估计其真实大小随观测波长变化的幂律谱指数为 $1.09^{[19]}$,这说明 Sgr A* 辐射是分层分布的,短波辐射来自更接近中央能源的地方。由在 0.8 毫米和 1.3 毫米处未能检测到闪烁现象而给出的 Sgr A* 大小的下限分别是 0.008 毫角秒和 0.02 毫角秒^[23],这也与从 7 毫米和 3.5 毫米外推到亚毫米处的辐射大小一致。这样的幂律谱指数可以用非均匀的喷流模型^[24],或者是耦合的喷流加吸积模型^[25]来解释。

4 前景展望

Sgr A* 的总流量随时间的变化最早是 1982 年在波长 11 厘米和 3.7 厘米上被观测到^[26]的。这以后,一系列的射电监测都测量到了从厘米波到亚毫米波的流量变化,其变化时标从 1 天之内到几年,而且这种变化似乎先在短波出现,在短波长处有较大的变化幅度。此外发现在厘米波的总流量随时间的变化有约 100 天的准周期^[27]。最近,Sgr A* 的 X 射线爆发和红外流量变化也已分别被检测到^[3-4,28-30],有证据表明 Sgr A* 的 X 射线流量爆发将引发电爆^[31]。支持这样的流量变化是 Sgr A* 所固有的,这也就将不可避免地伴随有结构大小的时间变化。检视已发表的在 1.35 厘米、7 毫米和 3.5 毫米的 VLBI 观测结果(表 1),我们已经可以看出观测得到的视结构大小可能有 6 倍均方差误差大小的变化。但是这些观测时间跨度较大且涉及到不同的 VLBI 阵,导致观测及数据处理中的误差较难比较,所以人们认为迄今为止还没有找到任何可靠的 Sgr A* 结构(形状和大小)随时间变化的证据。今后的研究应尽可能利用最宽的数据记录带宽以提高观测灵敏度,开展更为频繁的监测。考虑到可能的星际散射效应随时间的长期变化,我们在 2004 年 7 月开展了时间间隔为 1 周的 3.5 毫米的 VLBA 监测,其中两个观测历元是与 Chandra X 射线卫星和其它地面望远镜的同时观测,以考察可能的相关性,

表 1 已发表的 SgrA* 大小观测总结

$\lambda = 35.6 \text{ mm}$									
1997.10	0.73±0.10	18.0±1.53	9.88±1.68	0.55±0.14	78±6	Lo et al. (1998)			
1991.90		17.5±0.5	8.5±1.0	0.49±0.06	87±5	Lo et al. (1993)			
1983.36		16.1±0.3	16.1	1.0		Marcaide et al. (1992)			
1983.35		15.5±0.1		0.55±0.25	98±15	Lo et al. (1985)			
1982.30		17.4±0.5		0.53±0.10	82±6	Jauncey et al. (1989)			
1978.07	0.7	18±2	18	1.0		Lo et al. (1981)			
1976.18	0.9±0.06	14±2	14	1.0		Lo et al. (1977)			
1975.38	0.6±0.1	<20.0		1.0		Lo et al. (1975)			
1974.50		17.0	17.0	1.0					
$\lambda = 13.5 \text{ mm}$									
1997.10	0.74±0.04	2.70±0.15	1.50±0.59	0.56±0.25	81±11	Lo et al. (1998)			
1992.85	1.05±0.10	2.67±0.15	1.63±0.41	0.61±0.12	79±10	Marcaide et al. (1999)			
1991.49	0.98±0.05	2.6±0.2	1.3	0.5	87	Lo et al. (1993)			
1991.47	1.07±0.15	2.60±0.20	1.30±0.88	0.5±0.3	80±15	Alberdi et al. (1983)			
1985.11	1.2±0.4	1.8±0.09	1.8	1.0		Marcaide et al. (1992)			
1983.47	0.98±0.05	2.2±0.2	1.21±1.21	0.55±0.5	87±30	Lo et al. (1985)			
$\lambda = 6.9 \text{ mm}$									
1997.10	1.03±0.01	0.70±0.01	0.58±0.07	0.83±0.11	87±8	Lo et al. (1998)			
1994.75	1.28±0.10	0.76±0.04	0.55±0.11	0.73±0.10	77±7	Bower & Backer (1998)			
1992.62	2.10±0.10	0.74±0.03	0.40±0.20	0.54±0.29	90±10	Backer et al. (1993)			
1992.40	1.42±0.10	0.75±0.08	0.75	1.0		Krichbaum et al. (1993)			
$\lambda = 3.5 \text{ mm}$									
1999.27	1.4	0.34±0.14	0.17±0.02	0.50±0.26	22±20	Doeleman et al. (2001)			
	1.4	0.18±0.02	0.18	1.0		Doeleman et al. (2001)			
1995.18	1.80±0.30	0.19±0.03	0.19	1.0		Krichbaum et al. (1998)			
1994.25	1.40±0.20	0.15±0.05	0.15	1.0		Rogers et al. (1994)			
1993.27	1.25±0.35	0.22±0.19	0.22	1.0		Krichbaum et al. (1999)			

数据分析正在进行中。由于该类爆发目前尚无法被预见,为了提高 VLBI 观测的效率,可以利用其它观测设备(如日本野边山毫米波阵 NMA^[32]和美国亚毫米波阵 SMA^[33])的总流量监测到的爆发来触发高分辨率的 VLBA 观测,并可以用来讨论两者(流量变化和结构变化)之间可能的相关性。而正在更新的我国德令哈 13.7 米毫米波天线与日本、韩国的 VLBI 天线组成的东亚毫米波 VLBI 网以其灵活、易于协调的特点对监测 Sgr A* 结构变化将十分有效^[34]。

在考虑了黑洞附近广义相对论效应对辐射的影响后,人们提出在黑洞中心存在着 1 个直径约 10 倍引力半径(即 5 倍史瓦西半径)的阴影(shadow)^[35],相对 Sgr A* 约等于 50 微角秒。若是能获得此阴影图像,这将是迄今为止黑洞存在的最直接证据,其重大意义不言而喻。反之,若是没有看到预言的阴影,这又将对广义相对论理论模型提出的挑战。探索 Sgr A* 阴影结构的最佳观测波长将在亚毫米波,而目前尚未有一个工作在亚毫米波的 VLBI 阵。尽管如此,我们的预研究发现^[36],利用已有的(如 SMA 工作在 1.3 毫米到 0.4 毫米)和将建成的(如 ALMA)毫米波天线等,我们可以从可见度函数着手推断阴影大小从而得到黑洞质量,最终用来同传统方法得到的质量作比较。当然,我们也需要进行详细的数值模拟去给出更接近观测事实的阴影模型。

偏振观测对活动星系核的研究已经取得了不小的成功,但是对 Sgr A* 的观测却不同,在直到 3.5 毫米的射电波段上也没有检测到可信的线偏振。有趣的是,圆偏振这个通常在活动星系核里很难测得的却在 Sgr A* 中被观测发现并证实,所用的观测仪器是 VLA^[37]和南天的 ATCA^[38]。但是在 VLBI 尺度上,这还是个空白。事实上,我们 1997 年的五波段同时 VLBA 成图观测^[13]用的是双偏振观测模式,尽管没有检测到线偏振,却发现在 7 毫米上可能有不到 1%的圆偏振,新的更高灵敏度的 VLBA 偏振观测将对此进行检验。将来在亚毫米波对 Sgr A* 的成图观测^[39],对我们认识黑洞周围的吸积盘、喷流、磁场等有着十分重要的意义。

参考文献 (References)

- [1] Lynden-Bell D & M J Rees. On Quasars, Dust and the Galactic Center[J]. MNRAS, 1971, 152: 461~475
- [2] Balick B & Brown R L. Intense sub-arcsecond structure in the Galactic Center[J]. Astrophys. J., 1974, 194: 265~270
- [3] Baganoff F K, M W Bautz, W N Brandt et al. Rapid X-ray flaring from the direction of the supermassive black hole at the Galactic Centre[J]. Nature, 2001, 413: 45~48
- [4] Genzel R, R Schödel, T Ott et al. Near-IR Flares from Accreting Gas around the Supermassive Black Hole in the Galactic Centre [J]. Nature, 2003, 425: 934~937
- [5] Melia F & H Falcke. The supermassive black hole at the Galactic Center. Annu. Rev[J]. Astron. Astrophys. 2001, 39: 309~352
- [6] Schödel R, T Ott, R Genzel et al. A star in 115.2 year orbit around the supermassive black hole at the centre of the Milky Way[J]. Nature, 2002, 419: 694~696
- [7] Ghez A M, G Duchêne, K Matthews, et al. The first measurement of spectral lines in a short-period star bound to the Galaxy's central black hole: A paradox of youth [J]. Astrophys. J., 2003, 586: L127~L131
- [8] Schödel R, T Ott, R Genzel et al. Stellar dynamics in the central arcsecond of our Galaxy[J]. Astrophys. J., 2003, 596: 1 015 ~ 1 034
- [9] Eisenhauer F, R Schödel, R Genzel, et al. A Geometric Determination of the Distance to the Galactic Center [J]. Astrophys. J., 2003, 597: L121~L124
- [10] Reid M J, A C S Readhead, R C Vermeulen & R N Treuhaft, The Proper Motion of Sagittarius A*: I. First VLBA Results [J]. Astrophys. J., 1999, 524: 816~823
- [11] Reid M J, K M Menten, R Genzel et al. The Position, Motion, and Mass of Sgr A*[J]. Astron. Nachr., 2003, 324: 505~511
- [12] Kellermann K I & J M Moran, The Development of High-Resolution Imaging in Radio Astronomy [J]. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 2001, 39: 457~509
- [13] Lo K Y, Z.-Q. Shen, J.-H. Zhao & P T P Ho, Intrinsic Size of Sagittarius A*: 72 Schwarzschild Radii [J]. Astrophys. J., 1998, 508:L61~L64
- [14] Krichbaum T P, J A Zensus, A Witzel et al. First 43 GHz VLBI Detection of the Compact Source Sgr A* in the Galactic Center[J]. Astron. Astrophys., 1993, 274: L37~L40
- [15] Backer D C, J A Zensus, K I Kellermann et al. Upper Limit of 3.3 Astronomical Units to the Diameter of the Galactic Center Radio Source Sgr A*[J]. Science, 1993, 262: 1 414~1 416
- [16] Bower G C & D C Backer. 7 Millimeter VLBA Observations of Sagittarius A*[J]. Astrophys. J., 1998, 496: L97~L100
- [17] Doeleman S S, Z.-Q Shen, A E E Rogers et al. Structure of Sagittarius A* at 86 GHz Using VLBI Closure Quantities [J]. Astron. J., 2001, 121: 2 610~2 617
- [18] Shen Z-Q, M C Liang, K Y Lo & M Miyoshi, Searching for Structural Variability in Sgr A* [J]. Astron. Nachr., 2003, 324: 383~389
- [19] Shen Z-Q, K Y Lo, M C Liang et al., 2004, (in preparation)
- [20] Bower G C, H Falcke, R M Herrnstein et al. Detection of the Intrinsic Size of Sagittarius A* Through Closure Amplitude Imaging[J]. Science, 2004, 304: 704~708
- [21] Shen Z-Q, K Y Lo, P T P Ho & J-H Zhao. VLBA Imaging of Sgr A* at 86 GHz [A]. In "Future Directions in High Resolution Astronomy: A Celebration of the 10th Anniversary of the VLBA" ASP Conf Series [C]. J.D. Romney & M.J. Reid (eds.), 2004, (in press)
- [22] Shen Z-Q & K Y Lo, High-resolution 86 GHz VLBA Imaging of Sgr A* [J]. Progress of Theoretical Physics Supplement, 2004, (in press)
- [23] Gwinn C R, R M Danen, T Kh Tran et al. The Galactic center radio source shines below the Compton limit [J]. Astrophys. J., 1991, 381: L43~L46
- [24] Falcke H & S Markoff, The jet model for Sgr A*: Radio and X-ray Spectrum[J]. Astron. Astrophys., 2000, 362: 113~118
- [25] Yuan F, E Quataert & R Narayan, Nonthermal Electrons in Radiatively Inefficient Accretion Flow Models of Sagittarius A*[J]. Astrophys. J., 2003, 598: 301~312
- [26] Brown R L & K Y LO, Variability of the compact radio source at the galactic center[J]. Astrophys. J., 1982, 253: 108~114
- [27] Zhao J H, G C Bower & W M Goss, Radio Variability of Sagittarius A*-a 106 Day Cycle [J]. Astrophys. J., 2001, 547: L29~L32
- [28] Porquet D, P Predehl, B Aschenbach et al. XMM-Newton observation of the brightest X-ray flare detected so far from Sgr A*[J]. Astron. Astrophys., 2003, 407: L17~L20
- [29] Goldwurm, A, E Brion, P Goldoni et al. A New X-Ray Flare from the Galactic Nucleus Detected with the XMM-Newton Photon Imaging Cameras[J]. Astrophys. J., 2003, 584: 751~757
- [30] Ghez A M, S A Wright, K Matthews et al. Variable Infrared Emission from the Supermassive Black Hole at the Center of the Milky Way[J]. Astrophys. J., 2004, 601: L159~L162
- [31] Zhao J-H, R M Herrnstein, G C Bower et al. A Radio Outburst Nearly Coincident with the Large X-Ray Flare from Sagittarius A* on 2002 October 3[J]. Astrophys. J., 2004, 603: L85~L88
- [32] Miyazaki A, T Tsutsumi & M Tsuboi, Intra-day Variation of Sagittarius A* at Short Millimeter Wavelengths [J]. Astrophys. J., 2004, 611: L97~L100
- [33] Zhao J-H, K H Young, R M Herrnstein et al. Variability of Sagittarius A*: Flares at 1 Millimeter[J]. Astrophys. J., 2003, 586: L29~L32
- [34] Shen Z-Q & A B Fletcher. Future Joint VLBI Observations of KVN with Other Radio Telescopes [A]. In "2002 KVN Science Workshop Proceedings"[C]. 2002, 57~64
- [35] Falcke H, F Melia & E Agol. Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center [J]. Astrophys. J., 2000, 528: L13~L16
- [36] Miyoshi M, S Kamenoi, J K Ishitsuka et al. An Approaching Detecting the Event Horizon of Sgr A* [J]. ALMA Memo, 2004, 499
- [37] Bower G C, H Falcke & D C Backer. Detection of Circular Polarization in the Galactic Center [J]. Astrophys. J., 1999, 523: L29~L32
- [38] Sault R J & J-P Macquart. Confirmation and Analysis of Circular Polarization from Sagittarius A* [J]. Astrophys. J., 526: L85~L88
- [39] Bromley B C, F Melia & S Liu. Polarimetric Imaging of the Massive Black Hole at the Galactic Center [J]. Astrophys. J., 2001, 555: L83~L86