

# 银河系中心超大质量黑洞\*

沈志强<sup>†</sup>

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

**摘要** 通过对位于银河系中心的非热、致密射电源人马座 A\* (Sagittarius A\*) 的高分辨率甚长基线干涉 (VLBI) 观测,文章作者及其合作者成功地得到人马座 A\* 的固有辐射区域的直径仅为 1 个天文单位,支持其是超大质量黑洞的物理解释. 文章在较详细地介绍此研究的同时,也简要提及了从黑洞概念的最早提出至今的 200 多年里人们在黑洞物理认知上的一些重大进展. 可以预期,未来亚毫米波 VLBI 观测将有望揭示银河系中心超大质量黑洞的阴影结构.

**关键词** 黑洞, 超大质量黑洞, 银河系中心 (Sgr A\*), 甚长基线干涉 (VLBI) (亚)毫米波

## A supermassive black hole at the center of the Milky Way

SHEN Zhi-Qiang<sup>†</sup>

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

**Abstract** With the high-resolution millimeter-VLBI observations, we have determined an intrinsic size of the radio-emitting region of the galactic center compact nonthermal radio source Sagittarius A\* (Sgr A\*) of only 1 AU in diameter at 3.5mm, strongly supporting its supermassive black hole nature. A full description of this work is given, along with a brief historical overview of our understanding of black hole physics over the past two centuries since the concept of black holes was first pursued in 1783. Future sub-millimeter VLBI observation is promising for revealing the fine structure of the shadow of the galactic center black hole.

**Keyword** Black hole; supermassive black hole; galactic center (Sgr A\*); very long baseline interferometry; (sub-)millimeter wave

### 1 黑洞概念的出现和发展

黑洞这一天文学名词对我们大家都已经是“耳熟能详”且也多少“能详”了. 简言之,黑洞是代表这样一个特定的时空区域,在其中的引力场是如此之强,以致于连光线也无法逃逸出来. 关于黑洞概念的最早讨论可以追溯到 1783 年英国的地质学家米歇尔 (Michell J) 向英国皇家学会提交的一篇论文(该记录是在 20 世纪 70 年代被发现的),当时人们已可以从牛顿力学计算出一个质量为  $M$ 、半径为  $R$  的球形引力源表面的逃逸速度是:

$$V_{\text{逃逸}} = (2GM/R)^{1/2}, \quad (1)$$

这里  $G$  是牛顿万有引力常数. 这个逃逸速度就好比我国的嫦娥探月飞船要飞往月球必须先摆脱地球引力束缚的最小速度,通常被称作第二宇宙速度,约为

11.2km/s. 米歇尔估算了一个假想的星球,其质量密度与太阳一样,但半径是太阳的 500 倍,由此得到的逃逸速度将超过光速,意味着光线也不能挣脱该星球的引力跑出来,即该星是不可见的 (invisible). 约 13 年之后,法国科学家拉普拉斯 (Laplace P-S) 在其著名的《宇宙体系论》一书的最初两版中提出了类似的想法,认为最亮的天体可能反而是看不见的. 但这些观点都是建立在当时占主导地位的牛顿提出的光的微粒学说基础上,即认为光是由有一定质量的粒子组成的. 因此也就不难理解,当一系列实验 (如 1801 年的杨氏双缝干涉实验) 表明光是一种没

\* 中国科学院“百人计划”、国家杰出青年科学基金(批准号: 10625314)、上海市优秀学科带头人计划(批准号: 06XD14024)资助项目

2007-09-10 收到

<sup>†</sup> Email: zshen@shao.ac.cn

有质量的波动时,由逃逸速度超过光速推断得到的看不见的星这一概念在整个 19 世纪就再也没有引起更多的关注。

这样,关于黑洞概念的进一步探讨就等待了一个世纪多的时间,直到 1915 年爱因斯坦发表广义相对论后不久,当时正在俄罗斯前线服役的德国天文学家史瓦西(Schwarzschild K)给出了对应于一个没有自旋的球对称天体的引力场方程的解<sup>[1,2]</sup>,认为对于一个给定质量的星球,存在一个临界半径,从这半径处发出的光将具有无穷大的引力红移,以致于在其外部任何地方的观测者都无法接收到。这就是我们现在常提到的史瓦西黑洞的稳定静态解,证明广义相对论在理论上是预言了黑洞的存在。而这个临界半径被称为史瓦西半径,表示为

$$R_{\text{史瓦西}} = 2GM/c^2, \quad (2)$$

这里  $c$  代表光速常数,史瓦西半径是对应于没有自旋的黑洞的事件视界(event horizon)大小;“视界”这词是在 1956 年由 Rindler 引入的<sup>[3]</sup>。按照广义相对论,物质决定时空如何弯曲,而光和物质的运动将由弯曲时空的曲率决定,当曲率大到一定程度时,光线就无法跑出来了。但这一主张在当时遭到了绝大多数人的怀疑,史瓦西本人也认为这并不具有任何实际物理意义。

在这之后,对恒星的结构和演化的研究无意中深化了关于黑洞存在的认识。在恒星演化的晚期,赖以发光的核聚变燃料(即核心内部的氢、氦等元素)被消耗殆尽,恒星物质就会在重力的作用下向中心挤压,而它的最终命运仅取决于恒星自身的质量。对于一个类似我们太阳质量的恒星(包括太阳),泡利不相容原理(两个电子不能占据相同的能级)在恒星中产生的电子简并压力足以抗衡恒星自身的引力所导致的进一步收缩而达到平衡,其结局就是白矮星,但它有个质量上限,约 1.4 倍太阳质量,被称为钱得拉塞卡限,是由钱得拉塞卡(Chandrasekhar S)在 1931 年和 1935 年首次推导并详细研究的<sup>[4,5]</sup>,但当时学术权威爱丁顿(Eddington A)等对此极力反对和封杀,在某种程度上使得关于黑洞的诸多性质的研究推迟了 20 多年。

当恒星质量超过钱得拉塞卡限时,相对论性电子简并压力已无法与重力抗衡,恒星会继续收缩并通过超新星爆发向外喷出大部分的质量,仅在其中央残留一个密度极高的核,该核的密度是如此之高,以致于其中的电子会进一步塌缩到质子内部,形成一个完全由中子组成的星(类似于白矮星中的电

子,这时是由中子简并压来平衡引力收缩),即中子星。事实上,在英国物理学家查得威克(Chadwick J)1931 年发现中子后,苏联物理学家朗道(Landau L)于 1932 年就得出宇宙中存在中子星的结论<sup>[6]</sup>,而 1934 年巴德(Baade W)和兹维基(Zwicky F)即预言超新星爆发会产生中子星<sup>[7]</sup>。不过,中子星的最终发现证实要等到 1967 年英国剑桥大学的博士生贝尔(Bell J)和她的导师休伊什(Hewish A)发现射电脉冲星<sup>[8]</sup>,现在公认脉冲星就是快速自转的中子星,其半径通常只有 10km,但中子星也存在一个质量上限,即奥本海默限,约是太阳质量的 3 倍,这是由奥本海默(Oppenheimer R)和 Volkoff 在 1938 年首次给出的<sup>[9]</sup>。如果超新星爆发后残余的质量超过 3 个太阳质量,向内收缩的引力会超过中子简并压力,在已知的物理学范围内,已找不到其他的力可以和引力对抗,收缩将不可阻挡,一个黑洞也就这样诞生了。1939 年,奥本海默和他的研究生施奈德(Snyder H)用广义相对论分析了气体球塌缩的情形后得出结论,在宇宙中可以有黑洞形成<sup>[10]</sup>,这是一个奠基性工作,标志着黑洞这一物理概念的正式诞生。但当时仍有许多人持怀疑态度,认为恒星自转引起的扰动将会阻止黑洞的形成,这朵疑云在 1963 年新西兰数学家克尔(Kerr R)得到了有自旋的黑洞的解而彻底散去<sup>[11]</sup>。而大质量恒星在塌缩前都是有自转的,超新星爆发时会带走一部分的角动量,剩余的角动量仍将保留下来,根据角动量守恒原理,最后形成的黑洞必定有自旋,因此克尔黑洞是非常普遍的。

在此后的十年(1964—1974 年)中,黑洞物理研究有了长足进展,黑洞(black hole)一词就是在 1967 年由美国天体物理学家惠勒(Wheeler J)提出的。在这之前,人们用冻结星(frozen star)、暗星(dark star)或塌缩星(collapsed star)等来称呼这类天体。特别值得一提的是,1974 年霍金(Hawking S)将量子场论应用到黑洞时空中,证明黑洞也会发出黑体辐射,从而慢慢地蒸发<sup>[12,13]</sup>,其蒸发时标与黑洞质量的 3 次方成正比,一个与太阳质量相当的黑洞要耗时  $10^{66}$  年才能被蒸发掉,而我们现在宇宙的年龄也不过 137 亿年,霍金“蒸发”只对质量非常小的黑洞才是显著的。

理论上,黑洞的尺寸可以是各种各样的,小到微观,大到我们可观测的宇宙,具体的特征大小(即事件视界半径)由它的质量决定,见(2)式。对于一个原子(质量约为  $10^{-26}$  kg),其史瓦西半径是  $1.5 \times 10^{-53}$  m,对于具有地球质量( $6 \times 10^{24}$  kg)的黑洞,其

史瓦西半径约是  $1\text{cm}$  ;对于具有太阳质量( $2 \times 10^{30}\text{kg}$ )的黑洞的史瓦西半径是  $3\text{km}$ . 但小于 3 倍太阳质量(即奥本海默限)的黑洞只可能形成于宇宙演化的极早期或在大爆炸之后不久,这包括霍金预言的正在蒸发的会发出  $\gamma$  辐射的原初黑洞,质量为  $10^{12}\text{kg}$ ,至今人们还没有发现任何表明这类微黑洞存在的观测证据. 目前我们知道的黑洞依其质量可以分为两类:一类是前面提及的大质量恒星演化晚期的产物,其质量是 3—50 倍左右的太阳质量,通常被称为恒星级黑洞(stellar-mass black hole);另一类是普遍存在于星系中心的超大质量黑洞(super-massive black hole),其质量从几百万到几十亿太阳质量都有,目前已知的最轻的超大质量黑洞是一个叫做 POX 52 的塞弗特星系,质量是太阳质量的数十万倍<sup>[14]</sup>. 相对于恒星级黑洞,超大质量黑洞的形成和演化还很不清楚,它可能形成于大量恒星聚集的一个非常致密的区域,或是通过物质不断吸积到一个“种子”黑洞,或通过一些小黑洞的融合而形成. 这中间还有一类近些年发现的尚在争议中的中间质量黑洞(intermediate-mass black hole)<sup>[15]</sup>,质量大约是太阳质量的几百到几千倍,它们可能与超大质量黑洞的形成密切相关. 需要指出的是,尽管恒星级黑洞和超大质量黑洞的形成历史不同,但都只需要 3 个物理量(即质量、自旋和电荷)就可以完全描述它们的物理性质,这被称作“黑洞无毛定理”.

要最终证明黑洞的存在,就需要证明视界的存在. 黑洞视界不同于任何致密天体的表面,它将视界之内和之外分割成了完全无法交流的两个世界. 任何物质和光线一旦进入黑洞的视界内,就再也无法逃脱出来,也就不能被视界之外的观测者所直接探测到. 换言之,在视界内发生的事将永远无法为视界外的观测者所了解. 但我们仍然可以借助于观测黑洞引力在其周围所产生的一些效应(如引力透镜效应、恒星的开普勒轨道运动等)来研究黑洞,特别是围绕着中央黑洞旋转的吸积盘上的气体物质在不断靠近黑洞时,温度会变得极高,从而发出能被太空望远镜接收到的 X 射线辐射.

通常的吸积盘、喷流和绕转的恒星轨道运动不仅在黑洞周围有,而且在其他致密天体(如中子星等)中也存在. 因此,这些(吸积盘和轨道运动)只能表明存在着致密天体,并不能明说该致密天体就是黑洞. 恒星级黑洞证认的最佳候选者存在于一些双星系统中,如首个被证认的也是最著名的恒星级黑洞天鹅座 X-1(Cygnus X-1)就与一个大质量恒星

组成了 X 射线双星系统,它一边吞噬其伴星物质,一边发出极强的 X 射线. 通过精确测定双星的轨道运动,可以推算出致密星的质量下限,若大于 3 倍太阳质量,就基本可以断定其是个黑洞.

当前的理论倾向于在所有的星系中都可能存在一个超大质量黑洞,该超大质量黑洞在吞噬周围的气体和尘埃时也向外发出辐射,整个过程会持续很长时间,直到没有任何物质可供其吞噬为止. 超大质量黑洞的研究是与 20 世纪 60 年代类星体的发现密切相关的,这些类星体有极高的能量输出,使得天文学家推断其中有着很高效率的能源机制,当物质被中央引力源吸积时会释放引力势能,它是已知的最有效的能量产生过程,比任何其他的产能过程都要高百倍以上.

## 2 银河系中心超大质量黑洞候选者的射电观测研究

在我们太阳系所在的银河系中心也存在着这样一颗超大质量黑洞. 1971 年,两位理论天体物理学家林登-贝尔(Lynden-Bell D)和瑞斯(Rees M)首次提出在银河系中心应该有一个作为能源供给的黑洞<sup>[16]</sup>,并建议通过射电干涉测量来找寻它. 这是因为在我们太阳系到银心的银道面上的大量尘埃和气体,对来自银心方向的可见光辐射有强烈的消光作用,其等效于从银心发出的 1 万亿个光子只有一个可以到达地球上的观测者,所以对我们人类来说,银心在光学波段永远是漆黑一片. 而射电辐射则可以穿透遮挡着可见光的尘埃(图 1)<sup>[17]</sup>,但由于黑洞是非常致密的,因而只有在高分辨率射电干涉观测成为可能之后,人们才终于在 1974 年 2 月发现了对应的极其致密的非热射电源——人马座 A\*(Sgr A\*)<sup>[18]</sup>,并认定它就是银河系的中心所在. 20 世纪 90 年代以来,地面的大型天文观测设备和空间 X 射线望远镜也先后探测到了来自 Sgr A\* 的红外<sup>[19,20]</sup>和 X 射线<sup>[21]</sup>辐射.

Sgr A\* 是距离我们最近的超大质量黑洞候选者,到我们太阳系的距离仅有  $8000\text{pc}$ (秒差距)或  $26000$  光年(1 光年等于光在一年时间内穿越的空间距离,相当于 10 万亿千米),被公认为是研究黑洞物理的最佳目标. 在 Sgr A\* 被发现以来的 30 多年中,大量的观测数据和理论模型越来越强烈地表明 Sgr A\* 就是我们银河系中心的超大质量黑洞<sup>[22]</sup>.

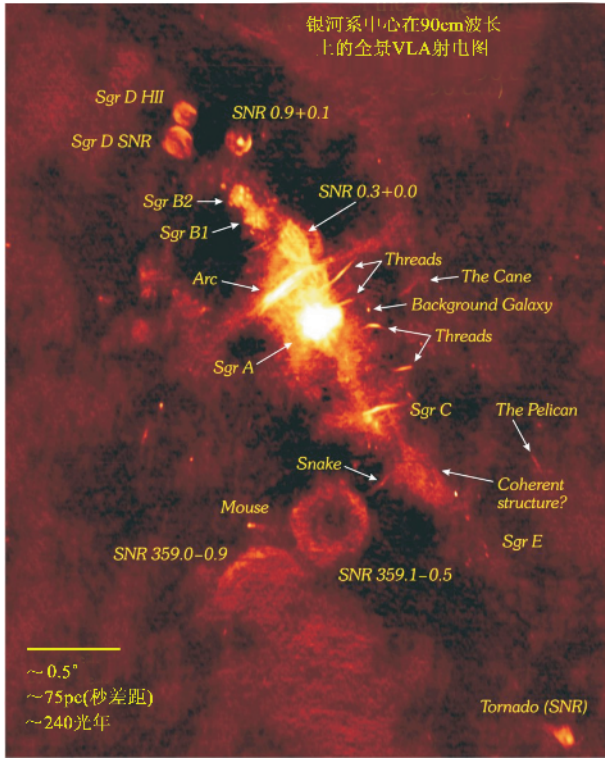


图 1 因受尘埃和气体的消光影响而在光学波段不可见的银河系中心的 90cm 射电图像,这是视场最大、最清晰的银河系中心的全景射电图像,覆盖了 4 度×2.5 度的银心区域.沿着中央对角线分布的大量亮源,显示了从侧面看的银河系盘状结构,最亮的辐射就是中心处的 Sgr A,该名字的得来是因为银河系中心正好在人马座(Sagittarius)方向,而超大质量黑洞候选者 Sgr A\* 就在其中.其他一些显著区域包括恒星形成区(Sgr B1, Sgr B2 和 Sgr D)和超新星爆发后残留的超新星遗迹(SNR).(详见文献[17])

1992 年,德国马普地外物理研究所的研究小组,利用在智利的欧洲南方天文台的 3.6m 望远镜在近红外波长第一次观测到了一颗围绕着 Sgr A\* 作轨道运动的恒星.这颗星被记作 S2(又叫 S0-2),是一颗质量大约为 15 倍太阳质量的年轻恒星,绕转周期大约为 15 年,到今年(2007 年)S2 刚好被观测到一个完整的轨道运动周期.几乎与此同时,美国加州大学洛杉矶分校的研究小组用夏威夷山上的 10m 凯克望远镜做着同样的观测研究.德国小组后来又启用了 8.2m 的甚大望远镜来提高观测灵敏度.特别是通过引进自适应光学系统,减小了大气湍动的影响,极大地提高了近红外成像清晰度,再通过与高精度射电观测数据比对,使得更多的恒星位置被精确定出.数据分析发现,在距 Sgr A\* 不到 1 个角秒(arcsec)(约 0.04pc(秒差距))范围内的大质量年轻恒星的运动轨迹是开普勒椭圆,Sgr A\* 则位于一个焦点上(图 2),由此推断在以 Sgr A\* 为中心、直径为 90 个

天文单位(用 AU 表示,1 天文单位等于地球到太阳之间的平均距离,1AU = 1.5 亿 km)的圆周内,聚集着约 400 万倍太阳质量的暗物质<sup>[23-24]</sup>.其中 S2 距 Sgr A\* 最近时只有 124AU.有些恒星的轨道非常狭长,只有超大质量黑洞才可能使其沿如此狭长的轨道运动,因为对于由一些小黑洞或其他致密天体聚集在一起的情形,其间的相互引力交会和散射作用会使得系统无法存活 10 万年以上.另外,通过高精度测量 Sgr A\* 相对于遥远类星体的相对运动<sup>[25]</sup>,发现 Sgr A\* 的固有自行方向是垂直于银道面,自行速度不到 2km/s,如此慢的自行速度表明,Sgr A\* 自身的质量至少是太阳质量的 40 万倍,这比由恒星轨道运动确定的暗物质质量小了 10 倍.

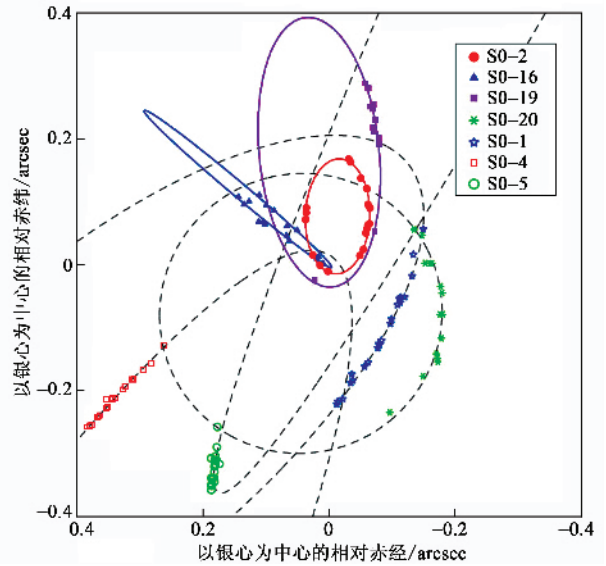


图 2 在银河系中心 0.8arcsec(角秒)×0.8arcsec(角秒)区域内的恒星运动轨道,其中不同颜色和符号代表不同的星,每一点代表一次位置测量,通过拟合得到了共 7 颗星的轨道参数,Sgr A\* 位于图中原点.这些轨道运动表明,在它们的共同中心处聚集着约 4 百万倍太阳质量的暗物质(详见文献[23])

至此 Sgr A\* 作为一个引力源,我们对其质量已经了解得足够好,质量估算的主要误差来自于银河系中心距离测量的不确定性.但仅从质量本身来看,我们尚无法完全排除 Sgr A\* 是除了黑洞以外的其他致密天体的可能性,我们还需对 Sgr A\* 作为一个辐射源,其辐射区域的形状和大小做出观测上的约束,这就需要用到 1967 年出现的能提供天文观测中最高空间分辨率的射电天文学中的甚长基线干涉(VLBI)技术<sup>[26]</sup>.该技术要求分散在全球各地的射电望远镜,通过与各自配备的高精度原子钟对时,精确记录天体射电信号的到达时间,然后通过相关处理将各个台站的信号组合起来,使得最终构建的图

像的分辨率等同于一个口径如望远镜间最大间隔的单一巨型望远镜所能达到的. 对于地球上的 VLBI 阵, 最大距离可达 8000km, 空间角分辨率可达毫角秒量级, 1 毫角秒的角分辨率相当于在地球上的观测者能分辨出月球上间隔不到 2m 的两个目标. 可以设想, 如果将射电望远镜放到太空, 与地面的望远镜作 VLBI 观测, 就将取得更高的分辨率, 这就是空间 VLBI 的概念, 业已在 1997 年实现了<sup>[27]</sup>.

事实上, 自 Sgr A\* 在 1974 年被发现以来, 世界各地的天文学家就对其进行了大量的射电干涉测量. 1976 年, 在比较了 3 个厘米波段观测数据后, Davies 等发现, 观测到的角大小与观测波长的平方成正比<sup>[28]</sup>, 并提出这可能是星际散射造成的. 但受限于当时的观测条件, 人们无法得到 Sgr A\* 的形状, 对大小的估算只是基于圆高斯分布的假设得出的. 直到 1985 年, 鲁国鏞等仔细分析了 3.6cm 的 VLBI 观测数据, 才首次揭示 Sgr A\* 的辐射结构是个长轴近似于沿着东西方向的椭圆<sup>[29]</sup>, 以后的高分辨率 VLBI 图证实了这点<sup>[30]</sup>.

来自银心的射电辐射, 在穿越星际等离子体介质到达我们观测者时, 会受到散射效应的影响. 观测到的源大小 ( $\theta_{\text{观测}}$ ) 以及其真实大小 ( $\theta_{\text{真实}}$ ) 通过以下的关系与散射角 ( $\theta_{\text{散射}}$ ) 相联系:

$$(\theta_{\text{观测}})^2 = (\theta_{\text{散射}})^2 + (\theta_{\text{真实}})^2, \quad (3)$$

这里散射角  $\theta_{\text{散射}}$  代表一个点源被银心到我们观测者之间的星际介质散射放大后的角直径, 它正比于观测波长 ( $\lambda$ ) 的平方, 即

$$\theta_{\text{散射}} = A \lambda^2, \quad (4)$$

其中  $A$  是常数. 由此可知, 在任何时候实际测量到的 Sgr A\* 角大小都要比真实的大. 这与雨夜的街灯看上去比平时大而模糊的原理很类似. 但是, 当散射角远远大于源真实的角大小时, 测得的源大小实际上是等同于散射角大小, 所以, 这时就很难得到源的真实大小. 这实际上就是 Sgr A\* 的厘米波 VLBI 观测的情形, 即在厘米波段的散射角远大于 Sgr A\* 的真实大小. 于是, 我们就可以借助于在多个厘米波段上测得的 Sgr A\* 角大小, 去拟合获得 (4) 式中的  $A$ , 以定出银心方向的散射角与波长的关系.

1997 年 1 月, 我们申请获得了美国国家射电天文台的 10 个 25m 射电望远镜组成的等效口径达 8000km 的甚长基线阵 (VLBA) 的时间, 并在 1997 年 2 月成功开展了首次 5 波段 (6.3, 6.2 和 1.35cm 加上 7mm), 准同时的 VLBI 观测<sup>[31]</sup>. 获得的 5 个波段上的 Sgr A\* 图像均呈扁平的、在东西向延伸的椭圆

状结构 (图 3<sup>[32]</sup>), 藉此我们第一次给出了二维 (分别沿东西和南北方向) 的散射角与波长的关系, 此前由于缺乏这样的多波段图像, 只能获得一个平均的 (沿东西向) 的散射角关系.

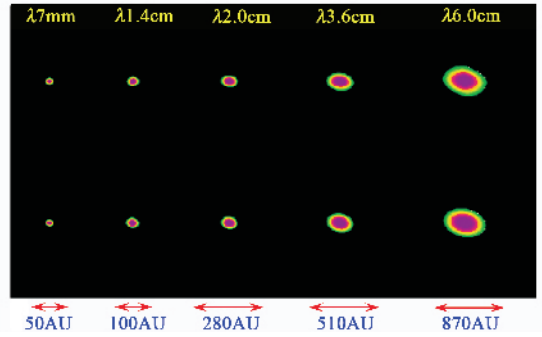


图 3 上半部 Sgr A\* 在 5 个波长 (从左至右 0.7, 1.35, 2.0, 3.6 和 6.0cm) 上的高分辨率 VLBI 观测图像; 下半部: 假设 Sgr A\* 是个点源 ( $\theta_{\text{真实}} = 0$ ) 受星际介质散射放大后在相应波段上的图像. 两者 ( $\theta_{\text{观测}}$  和  $\theta_{\text{散射}}$ ) 的差别非常细微, 表明 Sgr A\* 确实非常致密. [取自文献 [32], 详见文献 [31, 33]]

由 (4) 式, 散射角与波长平方成正比, 在 1mm 的散射角大小仅是 1cm 的百分之一, 不到 0.015 个毫角秒 (mas) 或 1.5 倍的 400 万个太阳质量黑洞的史瓦西半径. 而黑洞视界的定义要求任何可观测的辐射区域大小与其史瓦西半径相当, 即 Sgr A\* 的真实辐射区域尺寸应该与 1mm 时的散射角大小可比拟. 这时 (3) 式中的  $\theta_{\text{真实}}$  不再是可以被忽略,  $\theta_{\text{观测}}$  就应该明显大于  $\theta_{\text{散射}}$ , 因此我们只要从测量值  $\theta_{\text{观测}}$  中扣除掉从厘米波观测定出的散射角关系外推得到的在某个特定毫米波的散射角  $\theta_{\text{散射}}$  的大小, 便可以获得真实的 Sgr A\* 角大小  $\theta_{\text{真实}}$  信息.

1999 年 4 月, 我们利用由 6 个性能各异的毫米波射电望远镜组成的 VLBI 阵, 在 3.5mm 观测了 Sgr A\*<sup>[34]</sup>. Sgr A\* 位于南纬 30 度, 毫米波 VLBI 天线都在北半球, 各个望远镜台站观测 Sgr A\* 的地平仰角只有 10—20 度, 射电信号在被接收到之前已受到严重的地球大气吸收 (不透明度) 影响, 这使得从传统的 VLBI 自校准方法得到的结果有较大误差. 这已反映在以往的 VLBI 测量结果中, 如首个 7mm VLBI 观测结果未能被新的更好的观测数据所证实. 但是, 不同于一般射电源的 VLBI 观测, 已有的 VLBI 数据表明 Sgr A\* 的 VLBI 可见度闭合相位近似是零, 亦即 Sgr A\* 的辐射呈现中心对称结构, 这样, 我们就可以利用可见度幅度来确定源的大小. 由于 1999 年观测的数据校准的问题, 我们未能获得 Sgr A\* 的高分辨率图像, 但我们还是利用闭合幅度信息, 得到了

一个合理的 Sgr A\* 的圆对称结构大小<sup>[34]</sup>.

2001 年 1 月,我们申请并通过竞争获得了刚刚更新到 3.5mm 的 VLBA 时间,鉴于之前的经验,我

们在观测设计和数据分析两方面作了大量准备工作,来改进对银心的毫米波 VLBI 观测.首先,我们认为 Sgr A\* 的观测必须是动态的,即观测日期不事

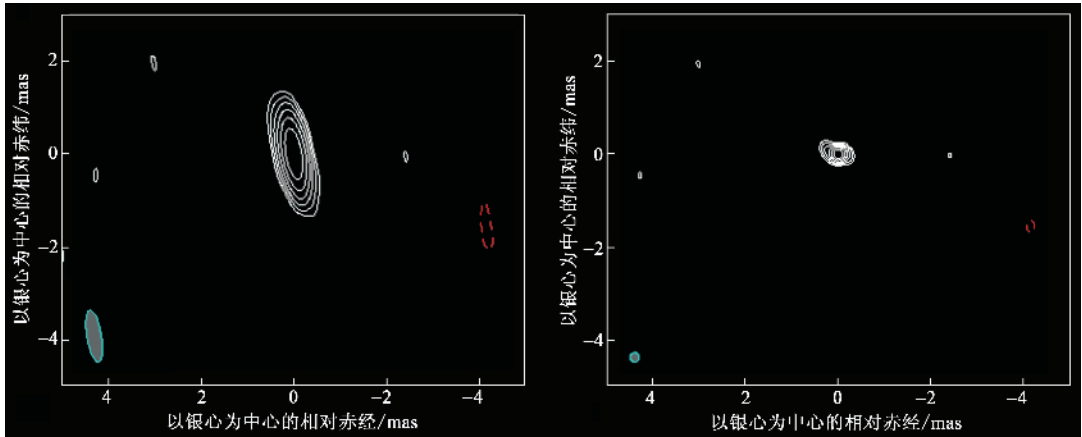


图 4 2002 年 11 月 3 日 VLBA 观测获得的世界第一张 Sgr A\* 在 3.5mm 的高分辨率图,右半部的超分辨率图像显示其长轴在东西方向(图上的水平方向)(详见文献[35])

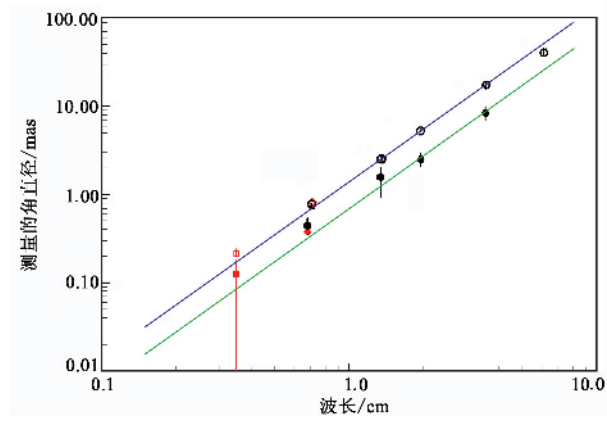


图 5 VLBI 测量的 Sgr A\* 角直径(纵轴,单位为 mas)与观测波长(横轴,单位为 cm)的关系,蓝色和绿色直线分别表示拟合得到的(5)式和(6)式表示的二维散射关系.图中黑色数据(圆点表示)是 1997 年 2 月的观测结果,红色点是来自最新的 3.5mm (正方形表示)和 7mm(方块表示).这里,空心和实心符号分别代表长轴和短轴方向的角大小(详见文献[35])

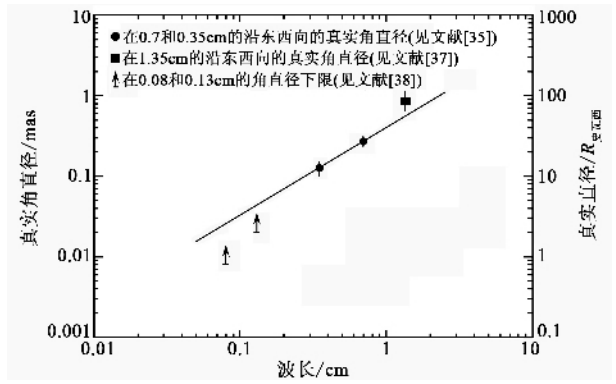


图 6 沿长轴(东西方向)的 Sgr A\* 真实角直径与波长的关系.直线代表两点(在 7mm 和 3.5mm 的真实大小)拟合的结果(即(7)式)纵轴示意的真实大小的单位分别是 mas(左侧)和 400 万倍太阳质量的史瓦西半径(右侧)(详见文献[35])

先确定,只有当分散在数千千米之外的 VLBA 台站均有较理想的天气条件时才启动观测.为此,我们等待了 20 个月之久,直到 2002 年 11 月 3 日才对 Sgr A\* 顺利观测了 5 个小时,结果我们得到了世界上第一张 Sgr A\* 在 3.5mm 的高分辨率 VLBI 图<sup>[35]</sup>,它呈现同别的波段一致的长轴在东西方向的椭圆状结构(图 4).

其次,由(3)式可知, $\theta_{\text{观测}}$ 与 $\theta_{\text{散射}}$ 的差异越显著, $\theta_{\text{真实}}$ 越容易被检测到.但实际情况是, $\theta_{\text{观测}}$ 与 $\theta_{\text{散射}}$ 非常接近,这就要求为了凸现 $\theta_{\text{观测}}$ 与 $\theta_{\text{散射}}$ 的差异,必须尽可能提高测量精度,即减少测量误差,也

就要求获得 Sgr A\* 多波段结构最为可靠的定量描述.为此,我们花了近 1 年的时间,独立地发展了一种不需经过自校准成图而直接拟合可见度幅度以获得源大小的方法<sup>[36]</sup>,基本想法就是利用闭合幅度这个不受观测校准误差影响的量约束模型拟合,以避免常规 VLBI 幅度自校准误差对 Sgr A\* 测量精度的影响.我们首先将此方法应用到以往的已公开的 VLBI 数据,确认在不同波段和不同观测历元的 Sgr A\* 结构均可以用一个长轴在东西方向的椭圆模型来描述.我们发现,已有的共 7 个 7mm 观测得到的长轴大小都超过了在此波长上的可能的最大散射角大小,即 $\theta_{\text{观测}} > \theta_{\text{散射}}$ ,是否由此我们就可以断定在 7mm 已经测得 Sgr A\* 的真实辐射区域大小呢?要

下这一结论,我们必须排除一种可能性,即当时采用的散射角可能是估算小了.为此,我们重新分析了1997年2月的几乎同时观测的多波段数据,对散射关系进行了检验.结果是沿东西向长轴的散射角幅度(4)式中的 $A$ 比这之前的还要小2%,而南北向短轴的散射角关系不变.新的修正的二维散射角关系如下(见图5)<sup>[35]</sup>:

$$\theta_{\text{散射,长轴}} = (1.39 \pm 0.02)\lambda^2, \quad (5)$$

$$\theta_{\text{散射,短轴}} = (0.69 \pm 0.06)\lambda^2, \quad (6)$$

这里散射角的单位是mas(毫角秒),波长单位是cm,其中由于Sgr A\*的VLBA观测在南北方向(短轴)上的分辨率不足,沿短轴的散射角幅度拟合误差较大.至此,我们可以肯定在7mm测定的长轴大小与散射角的偏离是可靠的,这已被随后我们在2003年3月的2次更高质量的7mm VLBA观测所证实,从中我们估算出了Sgr A\*在7mm沿东西向的固有直径是2.1AU<sup>[35]</sup>,该结论与另一国际研究小组的结果一致<sup>[37]</sup>.

进一步,在3.5mm,我们测定的沿长轴的角大小是0.21mas,而(5)式外推的散射角大小是0.168mas,将两者代入(3)式,就不难得到Sgr A\*在3.5mm的真实角大小为0.126mas,这对应于在银心处的线距离为1AU,或者相当于400万倍太阳质量黑洞的史瓦西半径的13倍<sup>[35]</sup>.采用绝对自行测量给出的Sgr A\*质量下限(40万倍太阳质量),并假定Sgr A\*固有结构是球对称分布,我们可以估算其质量密度至少是 $6.5 \times 10^{21}$ 太阳质量每立方秒差距(约 $0.5\text{g}/\text{cm}^3$ )如此高的质量密度使得其他非黑洞模型的解释很难成立,例如,对于一个有大量恒星组成的致密暗星团的假设,将导致其不到100年的寿命.该质量密度比迄今为止天文学家已知的任何可能的超大质量黑洞的密度都至少大1万亿倍,从而强烈支持Sgr A\*是超大质量黑洞的物理解释<sup>[35]</sup>.结合Sgr A\*在毫米波的流量密度约1个央斯基(Jansky,是射电天文学的流量单位),我们测得的Sgr A\*辐射区域的大小要求该毫米波段的等效亮温度高达百亿度以上,表明该毫米波辐射是非热机制所致.

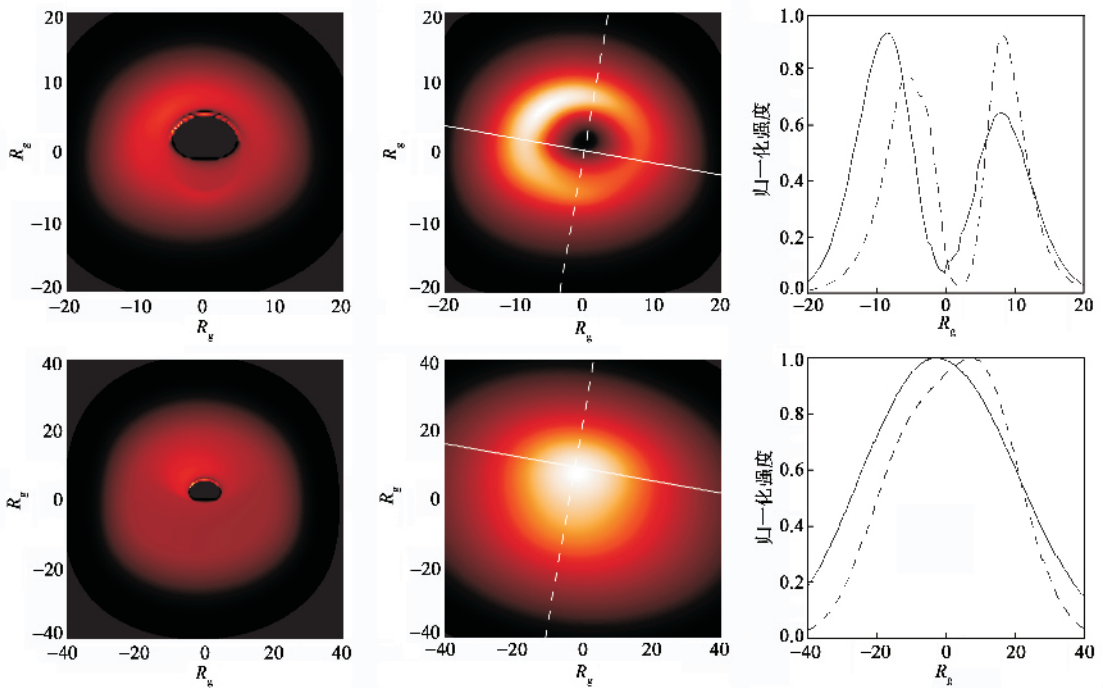


图7 Sgr A\*在1.3mm(上半部)和3.5mm(下半部)的模拟图像,左列代表仅考虑了黑洞附近的相对论效应后得到的结果,中间列是加入了星际散射效应后的模拟观测结果,右列给出了沿着星际散射长轴(实线)与短轴(虚线)方向的归一化强度分布.分析表明,在3.5mm的观测与模拟是相符的,但在更短波长(如1.3mm),银河系中心超大质量黑洞的阴影会凸现出来,强度分布也不再符合高斯分布,并呈现明显的中心不对称.图中 $R_g$ 代表引力半径,定义为史瓦西半径的一半(详细讨论见文献[40])

至此我们得到了Sgr A\*在7mm和3.5mm的辐射区域的固有大小并不相同,分别是2.1AU和1AU,这

说明Sgr A\*辐射是分层的,短波辐射来自更接近中央黑洞的地方,直接拟合这两波段的测量,可以得到

如下的真实大小随观测波长的关系(图 6<sup>[35]</sup>):

$$\theta_{\text{真实,长轴}} = (0.40 \pm 0.05) \lambda^{1.09 \pm 0.33}. \quad (7)$$

由此可以估算在更短波长上的 Sgr A\* 的固有大小,例如外推至 1.3 和 0.8mm 的真实大小与这之前从闪烁现象观测研究得到的下限是相符的<sup>[38]</sup>. 波长短于 1mm 的辐射区域直径将小于没有自旋的史瓦西黑洞的最后稳定轨道半径(等于 3 倍史瓦西半径). 已有迹象表明, Sgr A\* 是有自旋的<sup>[19]</sup>, 对于有自旋的科尔黑洞, 最后稳定轨道半径可以是史瓦西半径的一半. 而最后稳定轨道是定义了辐射区域大小的一个下限, 任何来自最后稳定轨道内的辐射都将是无法长期存在的, 所以(7)式给出的固有大小是有一个最小值的. 未来亚毫米波 VLBI 观测将有助于确定 Sgr A\* 的自旋, 这无疑会加深人们对黑洞物理的认识.

### 3 结束语

简言之, 我们从 1997 年开始对银河系中心致密射电源 Sgr A\* 开展了 20 余次的 VLBI 观测, 成功地获得了 Sgr A\* 在 3.5mm 的固有辐射区域大小, 提供了 Sgr A\* 即是超大质量黑洞的最新证据, 这是人类第一次看到距离黑洞中心如此近的区域. 但要确凿证明 Sgr A\* 即是黑洞还需要提供 Sgr A\* 拥有一个视界而不是类似于其他致密天体的表面. 如果 Sgr A\* 有个发射热辐射的表面, 理论计算显示, 从 Sgr A\* 辐射区域大小(1AU)与近红外测量结果可以估计其物质吸积率不到  $10^{-12}$  太阳质量/每年, 这与亚毫米波光度测量给出的每年至少  $10^{-10}$  太阳质量的吸积率相比, 小了 100 倍以上. 由此, 人们认为, 除非有我们尚不了解的异乎寻常的物理机制, 目前的观测数据不支持 Sgr A\* 有表面的假设, 亦即 Sgr A\* 就是一个有视界的黑洞<sup>[39]</sup>.

根据爱因斯坦的广义相对论, 非常靠近黑洞(10 个史瓦西半径以内)区域发出的辐射会受到黑洞强引力场影响而发生明显弯曲, 在中央出现一个相对于周围亮环状辐射显著变暗的、直径约为 5 倍史瓦西半径的阴影. 若是能捕捉到该阴影, 这将是黑洞存在的最直接观测证据, 其意义不言而喻. 我们的数值模拟显示(图 7)<sup>[40]</sup>, 探索 Sgr A\* 超大质量黑洞投射出的黑洞阴影的最佳观测波长是在亚毫米波, 尽管目前尚未有一个工作在亚毫米波的 VLBI 阵, 但利用现有的和将建成的毫米波天线, 我们有望在不久的将来对 Sgr

A\* 的阴影结构开展详细的观测研究.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Schwarzschild K. Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik, und Technik, 1916, 189
- [ 2 ] Schwarzschild K. Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik, und Technik, 1916, 424
- [ 3 ] Rindler W. MNRAS, 1956, 116 662
- [ 4 ] Chandrasekhar S. Astrophys. J., 1931, 74 81
- [ 5 ] Chandrasekhar S. MNRAS, 1935, 95 226
- [ 6 ] Landau L D. Phys. Z. Sowjetunion, 1932, 1 285
- [ 7 ] Baade W, Zwicky F. Phys. Rev., 1934, 46 76
- [ 8 ] Hewish A, Bell S J, Pilkington J H D *et al.* Nature, 1968, 217 709
- [ 9 ] Oppenheimer J R, Volkoff G M. Phys. Rev., 1938, 55 374
- [ 10 ] Oppenheimer J R, Snyder H. Phys. Rev., 1939, 56 455
- [ 11 ] Kerr R P. Phys. Rev. Lett., 1963, 11 237
- [ 12 ] Hawking S W. Nature, 1974, 248 30
- [ 13 ] Hawking S W. Commun. Math. Phys., 1975, 43 199
- [ 14 ] Barth A J, Ho L C, Rutledge R E *et al.* Astrophys. J., 2004, 607 90
- [ 15 ] Miller M C, Colbert E J M. Int. J. Mod. Phys. 2004, 13 1
- [ 16 ] Lynden-Bell D, Rees M J. MNRAS, 1971, 152 461
- [ 17 ] LaRosa T N, Kassim N E, Lazio T J *et al.* Astron. J., 2000, 119 207
- [ 18 ] Balick B, Brown R L. Astrophys. J., 1974, 194 265
- [ 19 ] Genzel R, Schödel R, Ott T *et al.* Nature, 2003, 425 934
- [ 20 ] Ghez A M, Duchêne G, Matthews K *et al.* Astrophys. J., 2003, 586 : L127
- [ 21 ] Baganoff F K, Bautz M W, Brandt W N *et al.* Nature, 2001, 413 45
- [ 22 ] Melia F, Falcke H. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 2001, 39 309
- [ 23 ] Ghez A M, Salim S, Hornstein S D *et al.* Astrophys. J., 2005, 620 744
- [ 24 ] Schödel R, Ott T, Genzel R *et al.* Nature, 2002, 419 : 694
- [ 25 ] Reid M J, Brunthaler A. Astrophys. J., 2004, 616 872
- [ 26 ] Kellermann K I, Moran J M. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 2001, 39 : 457
- [ 27 ] Hirabayashi H, Hirose H, Kobayashi H. Science, 1998, 281 1825
- [ 28 ] Davies R D, Walsh D, Booth R S. MNRAS, 1976, 177 319
- [ 29 ] Lo K Y, Backer D C, Ekers R D *et al.* Nature, 1985, 315 124
- [ 30 ] Lo K Y, Backer D C, Kellermann K I *et al.* Nature, 1993, 362 38
- [ 31 ] Lo K Y, Shen Z Q, Zhao J-H *et al.* Astrophys. J., 1998, 508 161
- [ 32 ] Schilling G. Science, 1998, 282 21
- [ 33 ] Lo K Y, Shen Z Q, Zhao J H *et al.* ASP Conf. Ser., 1999, 186 : 72
- [ 34 ] Doeleman S S, Shen Z-Q, Rogers A E E *et al.* Astron. J., 2001, 121 : 2610
- [ 35 ] Shen Z Q, Lo K Y, Liang M C *et al.* Nature, 2005, 438 62
- [ 36 ] Shen Z Q, Liang M C, Lo K Y *et al.* Astron. Nachr., 2003, 324( Suppl. Iss. 1 ): 383
- [ 37 ] Bower G C, Falcke H, Herrnstein R M *et al.* Science, 2004, 304 704
- [ 38 ] Gwinn C R, Danen R M, Tran T Kh *et al.* Astrophys. J., 1991, 381 : L43
- [ 39 ] Broderick A E, Narayan R. Astrophys. J., 2006, 638 L21
- [ 40 ] Huang L, Cai M, Shen Z Q *et al.* MNRAS, 2007, 379 833