



银河系中心超大质量黑洞 Sgr A* 的光变研究进展

李娟^{1,2}, 沈志强¹

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

摘要 越来越多的观测证据表明, 位于银河系中心的致密射电源 Sgr A* 是一个质量约为 400 万个太阳质量的超大质量黑洞。本文介绍在射电、毫米/亚毫米、近红外、X 射线波段对 Sgr A* 的光变观测和理论研究进展。自 1974 年被射电干涉测量发现伊始, Sgr A* 就被检测到时标从天到年不等的射电光变, 随着新的观测设备的出现和观测技术的发展, 天文学家先后在对银河系中心可观测波段上检测到了 Sgr A* 的光变, 包括在毫米/亚毫米波段的时标为小时的快速光变, 近红外波段上时标不到 1 h 的显著光变, 以及空间 X 射线卫星记录到的幅度变化几十倍以上的巨大耀变。这些光变观测数据可以用于估算产生 Sgr A* 耀变辐射的区域范围 (假设光变是由整个源产生的, 辐射区域的尺度 l 与光变时标 τ 之间存在线性关系 $l \leq c\tau$), 并对 Sgr A* 辐射机制研究提供了间接的限制。近年来开展的一些多波段联测显示, 近红外和 X 射线光变是同步发生的, 并且都比射电和毫米波光变先出现, 这类时间延迟支持 Sgr A* 光变的绝热膨胀理论模型。但目前成功的多波段耀变观测非常有限, 如何获得从射电厘米波到 X 射线的 Sgr A* 光变间的内在关联将是未来几年中 Sgr A* 光变的一个主要研究方向。

关键词 黑洞; 超大质量黑洞; 银河系中心 (Sgr A*)

中图分类号 TQ050.4*25

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)15-0025-10

Progress in Research on the Variability of Sgr A*

LI Juan^{1,2}, SHEN Zhiqiang¹

1. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology; Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract There is compelling evidence that Sgr A*, the extremely compact radio source at the dynamical center of the Galaxy, is associated with a four million solar masses massive black hole. This paper deals with the temporal variability observed in the emission from Sgr A*. The total flux density variation has been puzzling ever since the discovery of Sgr A* in 1974. At radio bands, Sgr A* appears to have significant fluctuations in flux density at shorter

centimeter wavelengths and the fractional variation appears to be higher toward the short wavelengths. This trend continues toward higher frequency bands including millimeter, sub-mm, near-infrared and X-ray wavelengths. The observed outbursts exhibit a typical time scale of hours at mm/sub-mm, less than an hour at near-infrared and X-rays. Both Chandra and XMM-Newton X-ray observatories have detected some very strong and highly variable flares from Sgr A*. These observations provide unique constraints on the emission geometry of Sgr A*, and can be use to study the origin of the variability of Sgr A*. Some multi-frequency observations of Sgr A* have detected flares simultaneously at both near-infrared and X-ray bands, and a time delay of the radio flare emission with respect to those at near-infrared and X-rays. These measurements of time delay seem to favor the adiabatically expanding plasmon model. However, more reliable simultaneous multi-frequency campaign is still needed to well establish the relationship between flaring emission at various wavelengths before we can distinguish different theoretical models.

Keywords black hole; supermassive black hole; Galactic center (Sgr A*)

收稿日期: 2009-07-15

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: 李娟, 博士研究生, 研究方向为银河系中心超大质量黑洞 (Sgr A*) 毫米波段光变, 电子信箱: lijuan@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

Sgr A* 是位于银河系中心的致密射电源,对其周围恒星的高精度轨道运动测量^[1]及高分辨率 VLBI 观测^[2-4]无不表明,这是一个超大质量黑洞。由于这是离我们最近的超大质量黑洞,被认为是研究黑洞物理的最佳目标^[5]。在太阳系到银心的星际空间有大量的气体和尘埃,这些气体和尘埃的消光使得银心的光学星等下降了 30 星等,导致地球上的观测者无法接收到银心发出的光学和红外辐射。相比之下,射电观测就很少受到气体和尘埃消光的影响,因此在过去 30 多年中射电观测一直是研究银河系中心的主要途径。

光变观测是研究 Sgr A* 辐射机制的重要手段,自从 1974 年 2 月发现这个源以来^[6],天文学家就在射电波段对它进行了很多观测并发现了很强的光变,时标从天到年不等^[7]。Hubble、VLT 和 Keck 的投入使用以及自适应光学技术的发展,打开了(近)红外波段的观测窗口。在(近)红外波段不仅观测到了频繁的光变,还发现可能存在准周期震荡(QPO)。随着 20 世纪 90 年代 X 射线空间望远镜的发射升空,天文学家也开始在 X 射线波段开展对银河系中心的观测研究并发现了很强的光变。近年来,多波段光变之间的相互关系成为关注的热点,也已经对 Sgr A* 进行了很多多波段同时联测。本文拟介绍近年来在射电、(近)红外、X 射线波段对 Sgr A* 光变观测的研究进展。

1 射电波段的光变观测

1.1 厘米波段

1975-1978 年,Brown 和 Lo^[7]用美国 Green Bank 射电干涉仪 (GBI) 在 2 695 和 8 085 MHz 对银河系中心射电源 Sgr A* 进行了 25 次观测,发现了时标从天到年不等的光变,光变幅度随频率增大而增大,谱指数为正, $0.08 < \alpha < 0.55$ 。他们把流量密度接近长期平均流量值时称为宁静态,流量密度明显偏离平均值时称为活跃态,发现活跃态时流量密度的弥散较大,在高频上尤为显著。

由于 Sgr A* 周围有很多气体和尘埃,这些星际介质的散射也会导致光变。观测表明^[8-9],Sgr A* 的半功率全宽视角大小 θ 正比于波长 λ 的平方。Rickett 等^[10]给出了星际介质散射引起的光变时标公式:

$$\tau = D\theta/1.7v \quad (1)$$

式中, D 为散射屏与观测者的距离, v 为散射屏垂直于视线方向的速度。由于 Sgr A* 的角半径正比于波长平方,星际散射引起的光变时标也应正比于波长平方。Zhao 等^[11]通过分析 VLA 和 GBI 在 1974-1987 年的 20,11,6,3.7 cm 波段的观测数据,发现 20 cm 波段的光变时标最长,大于 5 a,短波上的光变时标较短,光变时标与波长之间的关系可以表示为

$$\tau \approx 0.156(\lambda/1 \text{ cm})^2 \text{ mon} \quad (2)$$

与星际介质散射理论一致,由此认为这 4 个波段的光变可能不是内禀的,而是星际介质的散射造成的。为进一步研究,1990 年,Zhao 等^[12]用 VLA 在 1.5,5,8.4,15,22 GHz 对 Sgr A*

进行了 1 a 的流量监测,每隔 10 d 进行一次观测。在 3 个高频观测到了 3 次明显的同步耀变,持续时间约一个月,频率越高变化幅度越大,光变的调制指数远远高于星际介质散射理论的预言。他们认为,低频的光变是由星际介质散射引起的,但当频率高于 8.4 GHz 时,内禀的光变成为主导。他们还发现,耀变是光厚的(谱指数 α 为 0.2-1.5),变化幅度通常小于 50%,小幅度的射电爆发在银河系中心非常频繁。

Falcke^[13]报道了 GBI 在 2.3 和 8.3 GHz 约两年的观测数据,两个波段流量的平均调制指数分别为 2.5% 和 6%,光变时标 50-200 d,没有发现时标与波长的平方呈正比关系。结构函数分析发现,2.3 GHz 数据有明显的 57 d 的准周期,然而 8.3 GHz 的数据却并未显示周期性。Zhao 等^[14]对 20 年 VLA 在 20,6,3.6,2.0,1.3 cm 波段的观测进行时间平均,得到时间平均的功率谱,发现 2.0 和 1.3 cm 波段上的射电光变存在明显的周期性,周期约为 106 d;1.3 cm 波段的周期性尤为明显。如果周期性光变是由黑洞周围致密体的绕转产生的,此致密体与黑洞质心的距离约 8 mas,但 VLBA 并未在任何波段探测到这样的致密体,因此这种周期性光变更有可能与 Sgr A* 本身性质有关,如吸积盘的不稳定性或喷流的进动等。

为了进一步研究 Sgr A* 射电光变的周期性,2000-2003 年,Zhao 等^[15]用 VLA 天线阵在 2.0,1.3 和 0.7 cm 波段对 Sgr A* 进行了 3 年多的流量监测。他们在 3 个波段上都检测到明显的光变,发现光变幅度随观测频率升高而增强,0.7 cm 波段的流量最低 0.63 Jy,最高 1.86 Jy,在 2002 年 10 月 3 日和 2003 年 7 月 16 日两次达到 1.86 Jy 左右。谱指数与流量密度线性相关,耀变期间,谱指数较大,谱形较陡。由于在星际介质散射模型里,光变调制指数与频率呈反比,谱指数和流量呈反比,与观测结果相反,表明耀变很可能由电子的同步自吸收辐射产生的,然而由于银心散射屏的复杂性,不能完全排除星际介质散射的影响。数据没有表现出明显的周期性,流量的统计分布呈现双峰结构,表明 Sgr A* 可能有两种不同的吸积模式。由于大部分爆发是在最后一年观测到的,他们认为 2002 年中期开始,Sgr A* 的活动性有加强的趋势。

由于同步辐射是高度偏振的,因此偏振观测成为研究辐射机制的另一个重要手段。例如在 AGN 中,线偏振度约百分之几,圆偏振度则通常低于 0.1%,说明辐射来源于同步辐射,线偏振流量与总流量变化的相关性也为喷流中激波的存在提供了有力的证据^[16],如果能在 Sgr A* 中探测到类似的相关性,可以为喷流的存在提供可靠的证据。Bower 等^[17-18]用 VLA 在 4.8 和 8.4 GHz 进行了偏振观测,发现两个波段线偏振度都不高于 0.2%,4.8 GHz 的圆偏振度 $m_c = -0.36 \pm 0.05\%$,谱指数 $\alpha = -0.6 \pm 0.3$ ($m_c \propto \nu^\alpha$)。Sault 等^[19]用澳大利亚致密阵望远镜 (ATCA) 证实了这一结果。Bower 等^[20-21]也用 BIMA 进行了偏振观测,发现毫米波段线偏振还是很低,在 22,86 和 112 GHz,线偏振度的上限分别为 0.2%,1% 和 1.8%。他们对 1981-1998 年 VLA 观测数据的分析发现^[22],4.8 GHz,Sgr A* 的圆偏

振度约为 -0.31% ,弥散 0.13% ,虽然总流量有2倍的变化,但圆偏振度变化很小,说明磁场是比较稳定的。1999年,他们用VLA和ATCA在1.4,4.8,8.4,15 GHz进行了多次观测,都探测到很强的圆偏振,但没有探测到高于 0.1% 的线偏振。这些观测不但证实了Sgr A*在射电波段的强圆偏振,而且Sgr A*在射电波段的谱是反转的, $\alpha=-0.5\pm0.2$,以及光变幅度与频率呈正比。1999年7月,Sault等用VLA在15 GHz观测到明显的耀变,流量在2 h内变化了20%,8.4和5.0 GHz上有同样的变化趋势,幅度较小,这是第一次观测到Sgr A*小时时标的快速光变。圆偏振度也明显增大,达到 -1.1% ,谱指数也增大到1.5。他们认为圆偏振可能来源于回旋辐射或线偏振在磁场中的法拉第转换。

1.2 毫米和亚毫米波段

1985–1990年,Wright和Backer^[23]用BIMA在3 mm波段进行了多次观测,发现明显的光变,Sgr A*的流量在10 d内

由0.8 Jy增大到2.3 Jy,流量衰减阶段,谱的倒转发生在23~89 GHz,认为光变可能与黑洞的吸积不稳定性有关。1985–1986和1988–1990年间,Sgr A*在85–89 GHz的平均流量约为1.1 Jy。Tsutsumi等^[24]从1996年开始用野边山射电天文台的NMA监测Sgr A*在2 mm和3 mm波段上的流量变化。在3 mm波段,发现Sgr A*的流量在数周之内变化了30%,大于绝对流量定标的误差15%,表明毫米波段确实存在光变。1996–2001年56个历元的观测中,Sgr A*的峰值流量为2~3 Jy,宁静态的平均流量为 $(1.1\pm0.2)\text{Jy}$ ^[25]。

2000年3月7日,Miyazaki等^[26]用NMA探测到毫米波段的耀变(图1)。134和146 GHz的峰值流量分别达到4.2和4.7 Jy,流量在0.5 h内增长了30%,由于观测窗口太短未能观测到完整的光变曲线,推测146 GHz的变化时标约为1.5 h。耀变期间,146 GHz的流量高于134 GHz,谱型很陡。3月8日,146 GHz的流量降低到2.2 Jy。

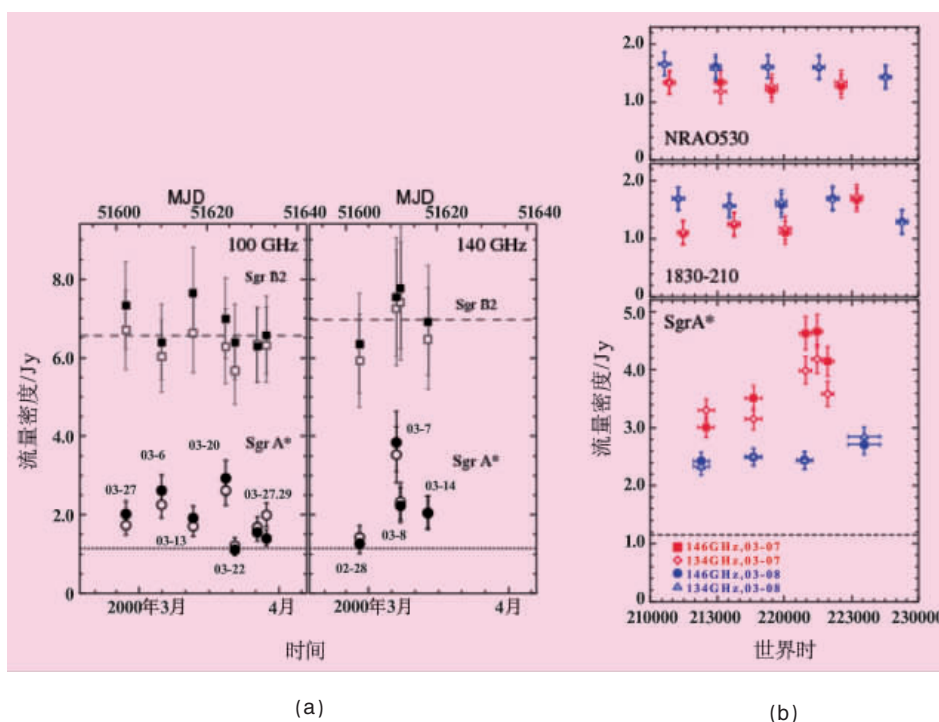


图1 2000年3–4月NMA观测结果(a)和2000年3月7日(红色)和8日(蓝色)(b)的Sgr A*光变曲线

Fig. 1 NMA observations of Sgr A* in March and April, 2000 (a), and the light curves of Sgr A* on 2000 March 7 (red) and 8 (blue) (b)

2001年3月–2002年5月,Zhao等^[27]利用美国夏威夷的亚毫米波阵SMA在1.3和0.8 mm波段对Sgr A*进行了24次流量观测,观测到了3次耀变。其中,2001年3月的耀变幅度最大,在3个月内由4.1 Jy降到1.1 Jy。2001年7月的耀变的流量在2~3周内增大到3.2 Jy,在其后的40~50 d内缓慢降低。耀变期间,1.3和0.8 mm的谱指数约为1.5,远大于3 mm以下的谱指数,说明拐点波长在3 mm左右。他们将此归因于不同辐射成分的影响,认为亚毫米波段的辐射来自于吸

积盘内区光厚的非热同步辐射源。1.3 mm与VLA 1.3 cm波段的相关分析表明,1.3 mm的光变领先1.3 cm,4 d左右。

2002年5月,Mauerhan等^[28]用欧文斯谷射电天文台的毫米波干涉望远镜(OVRO)在3 mm波段进行了8 d的观测,在其中的6 d里探测到了快速光变,最大变化幅度40%。功率谱密度分析发现其中的6 d里可能有小时时标光变,他们用蒙特卡罗模拟对结果进行了测试,发现有2 d的置信度较高,达到99%,这2 d中Sgr A*的光变时标为2.5~3 h。

Marrone 等^[29]用 SMA 在 230 和 345 GHz 探测到了耀变, 以及耀变期间线偏振度和偏振位置角的变化。在 2 h 内, 偏振位置角摆动 50°, 偏振度由 8% 下降到 2%。位置角和偏振度的变化似乎有一定周期性, 他们认为可能是吸积流内区的同步辐射等离子体团绕黑洞转动产生的。所得到的 230 和 345 GHz 平均法拉第旋转 RM 为 $(-5.6 \pm 0.7) \times 10^5 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-2}$, 10 d 的观测中 RM 在误差范围内保持稳定, 说明吸积率是比较稳定的。

由于 Sgr A* 位于南天, 而大部分射电望远镜位于北半球, 快速光变的观测受到观测窗口的限制。在 ATCA 所在的 Narrabri, Sgr A* 几乎是从天顶穿过, 天线俯仰角大于 40° 的时间约 8 h。ATCA 是 6 个 22 m 天线组成的干涉阵, 2005 年开始在 3 mm 进行观测。2005–2008 年, 沈志强等^[30–32]用 ATCA 对 Sgr A* 进行了 6 次约 120 h 的观测。2005 年 10 月 18 日第一

次观测期间, Sgr A* 的流量达到 3.5 Jy, 远高于宁静态流量。由于当时只用了一个距离 Sgr A* 约 16.2° 的次级校准源 PKS 1730–130, 不能很好地进行幅度校准, 所以无法排除观测到的光变可能是由俯仰角的变化对天线增益的影响引起的。在之后的观测中, 对观测进行了更科学的设计, 得到了较为可靠的结果。2006 年 6 月 9 日, Sgr A* 的流量相对较高且稳定, 约 3 Jy, 没有观测到明显的光变。在 2006 年 8 月 12 和 13 日观测到了明显的快速光变。8 月 12 日, Sgr A* 的流量先由 1.65 Jy 降到 1.50 Jy, 然后在 2.5 h 内上升到 2.11 Jy, 增大了 33%, 继而下降到 1.90 Jy (图 2(a))。8 月 13 日, Sgr A* 的流量先是由 1.95 Jy 增大到 2.14 Jy, 到达第 1 个峰值, 之后在 1.7 h 内降到 1.80 Jy, 并在 1.9 h 后达到第 2 个峰值, 2.22 Jy, 然后在 1.2 h 内降到 1.98 Jy (图 2(b))。2007 年和 2008 年的观测结果也显示出不同程度的光变。图 2 取自文献^[32]。

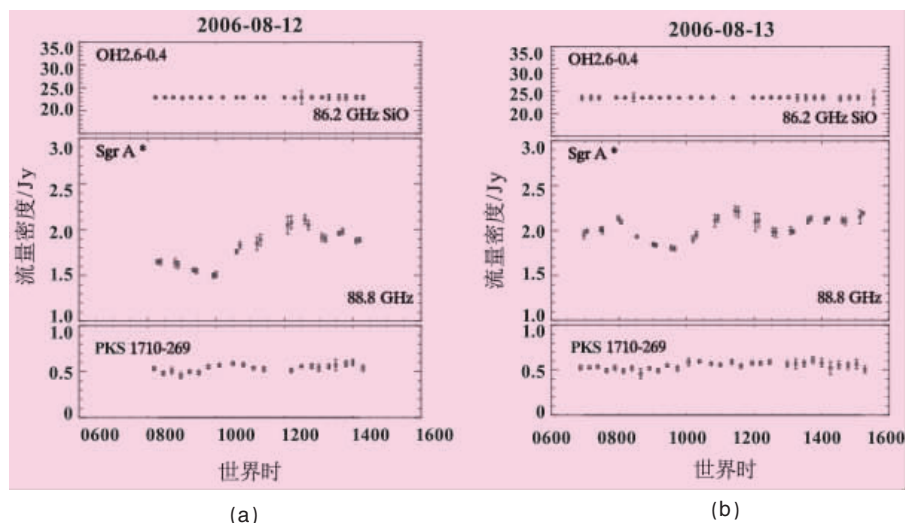


图 2 2006 年 8 月 12 日 (a) 和 13 日 (b) ATCA 观测得到的 Sgr A*、校准源 OH2.6–0.4 和 PKS 1710–269 光变曲线

Fig. 2 ATCA observations of Sgr A*, OH2.6–0.4 (upper panel) and PKS 1710–269 (lower panel) on 2006 August 12 (a) and 13 (b)

2 (近) 红外波段的光变观测

Sgr A* 周围的恒星和气体云构成了明亮的 (近) 红外背景, 给 (近) 红外波段的观测造成了很大困难。1997 年, 德国 Genzel 等^[33]报道了在 Sgr A* 的位置上发现的光变 (近) 红外源, 认为可能是 Sgr A* (近) 红外波段的对应体。由于流量太低, 没有得到 NTT 和 Keck 望远镜的证实。自适应光学的应用终于改善了这一状况, 2003 年 5 月 9 日, VLT 观测发现 H (1.65 μm) 波段的流量增大到 15 mJy, 约为宁静态流量的 5 倍, 持续 30 min 左右, 流量的上升和下降时标约 5 min。6 月, 在 Ks (2.16 μm) 波段发现了 2 次耀变, 流量分别达到 10 和 15 mJy, 持续时间 85 min, 上升/下降的特征时标为 2~5 min。2 次耀变曲线都表现出明显的亚结构, 其中 6 月 16 日的耀变出现了 5 个主峰, 间隔 13~17 min, 类似幅度 15%~40% 的 QPO (图 3)^[34]。6 月 15 日的耀变有 3 个比较强的峰, 间隔 14~17

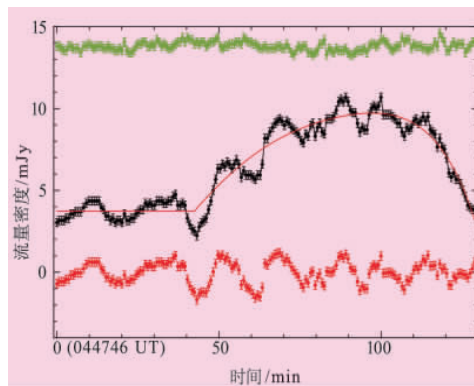


图 3 2003 年 6 月 16 日 VLT 观测得到的 Sgr A* (黑色) 和邻近星 S1 (绿色) 在近红外波段的光变曲线
Fig. 3 VLT observation of Sgr A* (black) and S1 (green) on 2003 June 16 at near-infrared wavelength

min, 28 min 后出现了一个较弱的峰^[34]。美国 Ghez 等^[35]也用 Keck II 在 3.8 μm 探测到 Sgr A* (近) 红外对应体的光变, 发现流量在 40 min 内下降了一半。此后, VLT 和 Keck II 探测到越来越多的耀变^[36-37], 表明 Sgr A* 在 (近) 红外波段十分活跃。

谱指数是建立物理图像所需的重要信息, 如若 X 射线与 (近) 红外波段的辐射都是由同步辐射产生的, 则 (近) 红外和 X 射线的谱指数应该相差不大, 而 (近) 红外到 X 射线也具有相似的谱指数。若 X 射线来源于同步自康普顿辐射, X 射线波段应该与 (近) 红外的谱指数一致, (近) 红外到 X 射线的谱指数可以是变化的。第一个 (近) 红外耀变谱指数观测来自 Eisenhauer 等^[38], 2004 年 7 月 15 日和 17 日, 他们用 VLT 观测到 2 个小幅耀变 (<2 mJy), 两天的结果都可以用一个谱指数 $\alpha = -4 \pm 1$ 的谱拟合, 这一陡谱支持高能非热电子的同步辐射模型。然而 Sgr A* 的流量非常低, 给去除背景噪声带来了困难, 结果的不确定性较大。2005 年 4 月 29 日, Krabbe 等^[39]观测了 Sgr A* 在 (近) 红外耀变期间的谱。稳态谱提取出后, 耀变流量的谱指数 $\alpha = -2.6 \pm 0.9$, 若不提取稳态谱, 谱指数 $\alpha = -0.6 \pm 0.4$ 。2005 年 6 月 18 日, VLT 探测到一个峰值为 8 mJy 的明亮耀变^[40], 他们用了 3 种不同的方法去除背景噪声, 得到的谱指数都与流量的变化成正比。周期分析表明峰值在 18 min 左右, 显著性为 2σ , 与文献^[34]的结果一致。2004-2006 年, Keck II 对 Sgr A* 进行了 4 次观测, 发现谱指数非常稳定, $\alpha = -0.6 \pm 0.2$ ^[41]。其中的一次观测是在 Chandra X 射线卫星在 X 射线波段观测到耀变后的 36 min 后才开始的, 也观测到了耀变, 且谱指数与红外波段一致。两个波段的耀变很可能是相关的, 然而许多 (近) 红外耀变并没有在 X 射线波段观测到流量增加的迹象。

QPO 是 (近) 红外耀变研究中广受关注和争议的问题, 由于与黑洞最后稳定轨道附近开普勒运动的周期相仿, 它的发现为热斑模型提供了直接证据。继 2003 年 Genzel 等的工作发表后, 这个研究小组又多次观测到这一现象^[40,42-44], 他们还发现这种亚结构的线偏振度很高。2006 年 5 月 31 日, VLT 观测到 (近) 红外波段的一次强耀变^[45], 2.08 μm (Ks) 波段的流量增大到 16 mJy, 偏振度高达 40%, 有明显的亚结构, 时标约 15 min。在开始的 0.5 h 里, 总流量的变化曲线有一个双峰结构, 偏振流量变化很快, 趋势与总流量变化趋势相同, 偏振度和偏振角的变化较小。此后总流量缓慢减小, 而偏振流量变化不大, 导致偏振度的增加, 偏振角在 10 min 内摆动了 70° 。值得注意的是, 所有 QPO 都是使用 VLT 观测到的, 从未得到其他观测设备如 Keck 的证实。Do 等^[46]在 2005-2007 年用 Keck II 进行了 7 次观测, 他们用蒙特卡罗模拟对数据的周期性进行了测试, 发现 Sgr A* 的光变曲线与红噪声模型一致, 没有明显的周期信号。2005 年 7 月 30-31 日, VLT 和 Keck II 都观测到了 Sgr A* (近) 红外对应体的一次耀变^[47], VLT 的观测时间是 2305-0653 UT, Keck II 的观测时间是 0700-0900 UT, 共计 600 min。用 Lomb-Scargle 周期图分析全部观测数据时, 没有发现周期光变的迹象。VLT 数据的分析则显示有 25 min 的

周期, 然而蒙特卡罗模拟表明这个周期信号并不显著。

3 X 射线波段的光变观测

2000 年 10 月 26-27 日夜, Baganoff 等^[48-50]用 Chandra ACIS-I 在 2~8 keV 观测到了剧烈光变 (图 4)^[48]。开始的 14 ks 内, 流量较小。第 20 ks 发生了一个大幅耀变, 持续 10 ks, 峰值流量是宁静态流量的 45 倍。其后, 4.5~8 keV 的光度在 10 min 内下降到原来的 1/5, 然后又发生了一个持续 1.2 ks 小幅耀变。2~4.5 keV 的光度变化趋势相同, 变化幅度略小, 似乎有几分钟的时间延迟。耀变态谱的最佳拟合光子指数 $\Gamma = 1.3 + 0.5/-0.6 (N(E) \propto E^\Gamma)$ 。2002 年 5 月 22 日至 6 月 4 日, Baganoff 等^[49]对 Sgr A* 进行了 0.5 Ms 的观测, 探测到 3 次幅度大于 10 倍的耀变及若干小幅度耀变。耀变的持续时间在半小时到几个小时不等, 上升和下降时标为数百秒, 与 2000 年的观测是一致的。这些观测表明, Sgr A* 在 X 波段耀变时标很短, 且较为频繁, 幅值大于 10 倍的耀变发生概率是 $(0.6 \pm 0.3) \text{次/d}$ 。

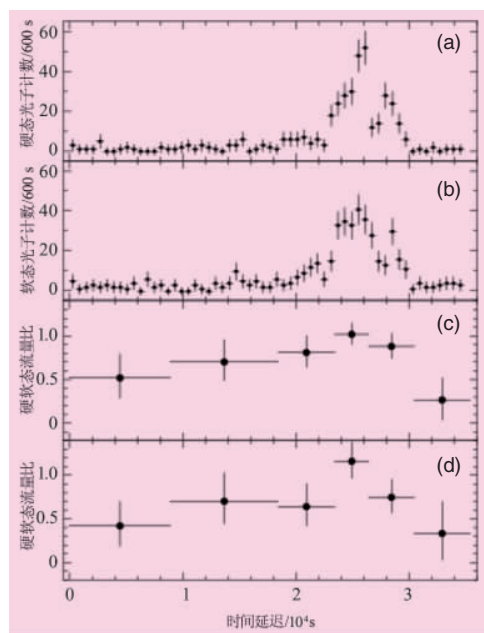


图 4 2000 年 10 月 26-27 日夜, Chandra ACIS-I 观测得到的 Sgr A* 的流量变化。(a) 硬态 (4.5~8 keV) 光子计数, (b) 软态 (2~4.5 keV) 光子计数, (c) 半径 1.5'' 范围内的硬态与软态流量比, (d) 0.5'' 与 2.5'' 之间环带上的硬态与软态流量比

Fig. 4 Chandra ACIS-I observation of Sgr A* on 2000 October 26 and 27. (a) hard-band counts, (b) soft-band counts, (c) hard/soft band ratio within a circle of inner radius 1.5'', and (d) hard/soft band ratio within an annulus of inner and outer radii 0.5'' and 2.5'', respectively

2001 年 9 月 4 日, Goldwurm 等^[51]用欧洲空间局的 XMM-Newton X 射线卫星也探测到了耀变。2~10 keV, Sgr A* 的光度在 900 s 内增长了 20 倍, 达到 $4 \times 10^{34} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 与宁静态相比, 耀变期间的谱较硬。2002 年 10 月 3 日, XMM-Newton X

射线卫星探测到一个持续时间不到 1 h (约 2.7 ks) 的耀变^[52]。软态和硬态上的流量变化趋势相同, 耀变期间光谱变化不大, 光子指数 $\Gamma=2.5\pm0.3$ 。2~10 keV, Sgr A* 的峰值流量为 $(3.6+0.3/-0.4)\times10^{35} \text{ erg}\cdot\text{s}^{-1}$, 约为宁静态流量的 160 倍。此次耀变的幅度和光谱都与以往观测显著不同。

Aschenbach 等^[53]对 2002 年 10 月 3 日和 2000 年 10 月 26 日的 X 射线耀变曲线进行了功率谱分析, 发现两组数据都有 5 个明显且相似的周期, 分别是 100, 219, 700, 1 150, 2 250 s, 第 3、4 个周期信号与红外波段观测到的 QPO 一致^[34]。他们认为第 1 个信号还需要更多观测的证实, 后 4 个信号可能是由吸积盘的 4 种特征引力模式造成的: Lense-Thirring 进动、Kepler 运动、以及垂向和径向的 epicyclic 震荡。基于模型, 解出了黑洞质量和角动量, 结果分别为 $(2.72\pm0.12/-0.19)\times10^6 M_{\text{sun}}$ 和 $0.9939\pm0.0026/-0.0074$ 。

法国的 Bélanger 等^[54]于 2004 年用 XMM-Newton 对 Sgr A* 进行了观测, 总观测时间约 500 ks。在 2~10 keV 探测到了 2 次高于 40 倍的耀变, 时间分别为 3 月 31 日和 8 月 31 日, 持续时间 4 ks 和 10 ks, 光子指数分别是 1.5 和 1.9。第 2 次耀变还探测到了 (近) 红外的同步耀变, 持续时间 10 ks^[55]。蒙特卡罗模拟表明^[56], 8 月 31 日的耀变具有显著的准周期性, 周期约为 22.2 min, 3 月 31 日数据并没有显著的周期性。

2007 年, Porquet 等^[57]用 XMM-Newton 进行了 230 ks 的观测, 4 月 4 日, 他们首先观测到一个幅度仅次于 2002 年 10 月 3 日观测的耀变, 光变曲线形状、持续时间、谱形都与之十分相似。这个耀变结束的 5、8、10 h 后观测到 3 个较小幅度的耀变。耀变上升和下降阶段的光子指数分别为 2.3 ± 0.3 和 $1.7\pm0.7/-0.6$, 在误差范围内一致。他们认为迄今为止观测到的两次大幅度 X 射线耀变具有相同的软谱。

为了研究 Sgr A* γ 波段的辐射, Aharonian 等用 HESS 和 Chandra 进行了同步观测^[58]。2005 年 7 月, X 射线波段的流量增长了 9 倍, 而 TeV 的流量并没有增长迹象, 说明 keV 和 TeV 的辐射可能不是由相同的粒子产生的。

4 多波段同时联测

前面曾提及 2002 年 10 月 3 日 Porquet 等^[52]在 X 射线波段观测到了大幅度耀变, 峰值流量约为宁静态的 160 倍。13.6 h 后, Zhao 等^[59]用 VLA 进行了观测, 发现 7 mm 波段流量增大了几乎一倍, 表明射电和 X 射线波段的辐射是相关的, 两者之间的时间延迟应小于观测间隔。另外在观测的 1 h 内并没有探测到流量的变化。

2003 年 6 月 20 日, Eckart 等通过 VLT 和 Chandra 首次探测到 Sgr A* (近) 红外和 X 射线波段的同步耀变 (图 5)^[60]。(近) 红外观测开始的较晚, 观测到正处于衰减阶段的耀变, 最大流量为宁静态的 2 倍, 与 X 射线耀变的衰减部分重合。BIMA 在毫米波段的观测显示, (近) 红外/X 耀变 7~9 h 后的毫米波流量明显高于耀变前 7~9 h 的流量。

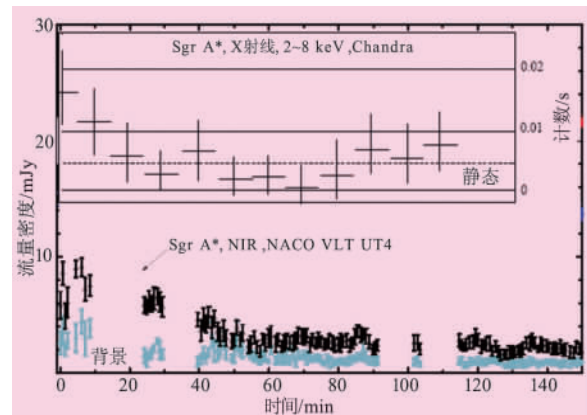


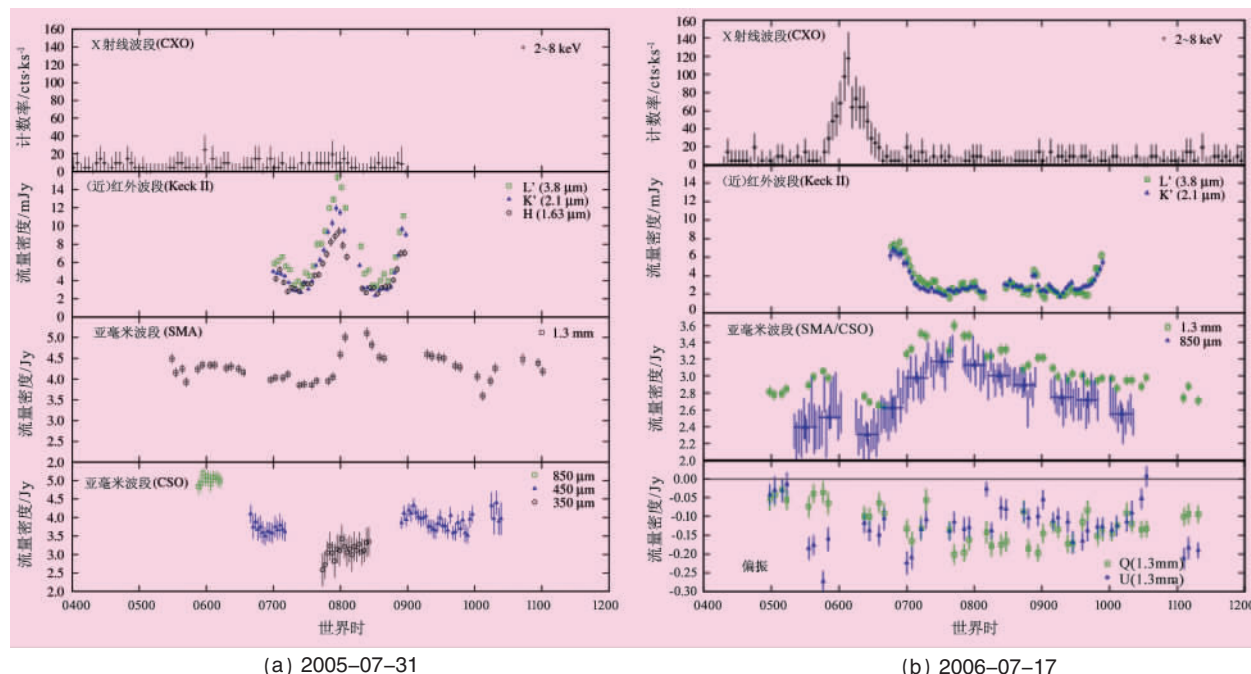
图 5 2003 年 6 月 20 日, Chandra 和 VLA 观测的 Sgr A* (近) 红外和 X 射线波段的流量变化
Fig. 5 Chandra and VLA observations of Sgr A* on 2003 June 20

2004 年 3 月和 9 月, Yusef-Zadeh 等^[55]用 XMM-Newton、Hubble、加州理工学院亚毫米波天文台 (CSO)、BIMA、VLA、ATCA 进行了数次联测, 在 (近) 红外探测到了多次耀变, 其中的两个发现了 X 射线和亚毫米波段的同步耀变, 这是第一次在亚毫米和 (近) 红外波段探测到同步耀变。X 射线和 (近) 红外波段的光变曲线都有明显的亚结构, 耀变的发生几乎是同步的。另外, (近) 红外数据的周期分析显示出 33 min 的微弱周期。

2004 年 7 月, Eckart 等^[61]用 VLT、Chandra、SMA 以及 VLA 对 Sgr A* 进行了同步观测并成功探测到 4 次同步 (近) 红外和 X 波段耀变, 两个波段的延迟小于 10 min。这些观测表明 (近) 红外和 X 射线波段耀变之间的时间延迟很小, 基本上是同步的。在射电和亚毫米波段没有探测到同步的耀变, 但是流量密度也有一定程度的增大。

2005 年 7 月 31 日, Marrone 等^[62]用 Chandra、Keck II、CSO、SMA 进行了同步观测, 在 (近) 红外和亚毫米波段都观测到了耀变, 在 X 射线波段没有发现耀变 (图 6(a))。2006 年 7 月 17 日, 亚毫米、(近) 红外、X 射线波段都观测到了耀变^[62-63], X 射线波段和亚毫米波段的时间延迟约 100 min (图 6(b))^[62]。耀变期间, 亚毫米波段的偏振度由 9% 增大到 17%, 与同步辐射从光厚到光薄的转变一致。红外波段, 2.12~3.80 μm 谱指数为 -0.51 ± 0.14 , 与以往观测一致^[38,40-41]。

在射电波段, Yusef-Zadeh 等^[63-64]用 VLA 进行了多次 7 mm 和 13 mm 的同时联观测, 发现这两个波段的光变存在时间延迟, 观测结果分别为 20~40 min, $(20.4\pm6.8)\text{min}$, $(30\pm12)\text{min}$, $(20\pm6)\text{min}$, 他们用绝热膨胀的等离子体模型^[65]解释了这一时间延迟。2006 年 7 月 17 日, 两个波段上的线偏振的平均值分别为 $(1\pm0.2)\%$ 和 $(0.7\pm0.1)\%$ 。他们注意到耀变期间的偏振度较宁静态分别增长 2.5% (7 mm) 和 1.5% (13 mm), 两个波段的偏振位置角都有约 100° 的变化。



(a) 2005-07-31 (b) 2006-07-17
图 6 Chandra、Keck II、CSO 和 SMA 对 Sgr A* 的同时联测
Fig. 6 Simultaneous Chandra, Keck II, CSO and SMA observations of Sgr A*

2005 年 7 月, Eckart 领导的研究小组用 Chandra 和 VLT 同时观测到了 X 射线和偏振的(近)红外耀变^[66]。X 射线波段的流量是宁静态时的 3 倍, 没有显示出 QPO。相关分析显示两波段之间的时间延迟小于 10 min。2007 年 5 月 15 日, 他们用 VLT 在(近)红外观测到两个明亮的子耀变, 间隔为 20 min, 与以往 QPO 观测一致。另外, 耀变期间偏振度非常低, 很难测定偏振位置角, 在中间位置偏振位置角似乎跳转了 180°。2008 年 6 月 3 日, 这个组在(近)红外和亚毫米波段探测到了很强的光变^[67], (近)红外波段的峰值流量高于 30 mJy, 亚毫米波段的耀变落后(近)红外波段(1.5±0.5)h。

Dodds-Eden 等在 2007 年 4 月 4 日用 VLT 和 XMM-Newton 观测到的一次同步(近)红外-X 射线波段耀变^[68], 观测波段分别为(近)红外 N (11.88 μm), L' (3.80 μm), Ks (2.16 μm) 和 H (1.66 μm), X 射线 2~10 keV。在除 N 波段外的其他波段都观测到了耀变, (近)红外谱指数约 0.6, 与以往观测一致^[38,40-41]。(近)红外和 X 射线的耀变几乎是同步的, 延迟小于 3 min, 然而(近)红外耀变开始得早, 结束得晚, 持续时间明显长于 X 射线耀变, 其光变曲线的半功率全宽 FWHM 几乎是 X 射线波段的两倍。L' 波段显著的亚结构在 X 射线波段并不明显, 根据 L' 波段的最小标 47 s 可知辐射区域 $R_f < c\Delta t = 1.2R_{\text{sun}}$ 。在 X 射线波段, 耀变很强, 谱型较软。研究者通常认为 X 射线波段的辐射来源于逆康普顿散射, 然而这次耀变的能谱很难用逆康普顿散射和同步自康普顿拟合, 而同步辐射却较为符合。

5 耀变的产生机制

Sgr A* 的宁静态谱, 可以用辐射无效的吸积流模型

(RIAF)^[69]和喷流模型^[70]解释, 耀变态辐射的辐射机制还存在争议。射电-亚毫米-(近)红外耀变态的线偏振观测表明辐射来源于同步辐射, X 射线波段辐射机制尚无定论, 通常认为是逆康普顿散射或同步辐射。由于 X 射线波段同步辐射的冷却时标远远短于耀变持续时间, 需要有持续注入的高能电子才能产生耀变。而在射电和亚毫米波段, 光变时标小于同步辐射冷却时标, 也不能用单纯的同步辐射冷却来解释。于是研究者引入一些模型来解释 Sgr A* 的耀变, 如绝热膨胀的等离子体模型^[65]和热斑模型^[71]等。

5.1 绝热膨胀模型

在毫米波段, 同步辐射的相对论电子冷却的时间约十几个小时, 观测到的变化时标只有 1~2 h, 因此需要用其他物理机制来解释。Yusef-Zadeh^[63,64]观测到了 7 mm 和 13 mm 波段之间约 0.5 h 的时间延迟, 因此引入了绝热膨胀的等离子体模型解释 Sgr A* 的光变。这一模型是 van der Laan^[65]为了解释活动星系核射电波段的快速光变提出来的。由于某种机制产生了一团相对论等离子体, 相对论电子在磁场中加速产生同步辐射, 最初这团等离子体很致密, 在较高频率如 X 和(近)红外波段是光薄的, 在射电波段是光厚的, 随着等离子体的膨胀逐渐由光厚变成光薄。在射电波段观测这样一团等离子体会发现, 起初流量增长很快, 达到最大值后平缓下降。同步较低频率的观测会表现出相同的变化趋势, 但是达到最大值所需的时间较长, 增长的幅度较小。

这一模型也很好解释了(近)红外和亚毫米波段观测到的约 1.5 h 的时间延迟^[67]。本研究组用这一模型对 ATCA 在 3 mm 波段的光变曲线进行了拟合, 拟合过程中发现, 磁场较高时电子的同步辐射损耗对结果有一定影响, 不能完全忽

略,因此拟合过程中加入了电子的同步辐射损耗^[32]

5.2 热斑模型

热斑模型是为了解释(近)红外波段的准周期震荡而提出来的。在这一模型中,由于磁重连、激波或类似电子加热机制,产生一团非热电子,在黑洞最后稳定轨道外附近作开普勒运动,由于多普勒效应和广义相对论效应对流量的调制而产生了准周期震荡。在(近)红外已经观测到多次流量和偏振度的准周期震荡,时标 20 min 左右。由于这一时标与最后稳定轨道上开普勒运动的周期相仿,研究者便用热斑模型来解释这一现象^[44-66,71]。该模型认为,Sgr A* 是一个高速旋转的黑洞,被吸积盘环绕,吸积盘内区接近黑洞的最后稳定轨道。盘上磁场是环向的,吸积盘外区磁场是径向的,因此很容易发生磁重联。一部分电子被加热到很高的温度,产生同步辐射。辐射区也就是“热斑”绕着黑洞旋转,产生了准周期震荡。

吸积盘理论中,由于黏滞作用,吸积物质逐渐损失角动量而落入引力势的中心,以亚开普勒角速度绕转^[72-73]。热斑也应该同样受到黏滞的作用,因此假设热斑的角速度是亚开普勒的,并用这一修正的热斑模型拟合了 ATCA 的观测数据^[32]。

这两个模型都能够拟合本课题组观测到的快速光变,两个模型显著不同之处在于,绝热膨胀等离子体模型中,高频的流量会领先低频达到最大值,而热斑模型中,不同波段的流量变化是同步的。由于缺乏其他波段的观测,很难做出进一步的判断,多波段同时观测将有望对此做出判断。

6 总结与展望

本文介绍了射电、(近) 红外、X 射线波段对 Sgr A* 光变的观测与理论研究, 表 1 总结了各个波段观测设备、光变幅度、变化时标、与其他波段关系和偏振观测。

表 1 Sgr A* 各个波段光变性质

Table 1 Characteristics of variability of Sgr A* at different wavelengths

波段	观测设备	最大幅度	最短时标	与其他波段关系	偏振测量
分米/厘米	ATCA/GBI/VLA	20% ^[22]	2 h ^[22]	—	圆偏振
毫米/亚毫米	ATCA/BIMA CSO/NMA OVRO/SMA VLA	40% ^[28]	1 h ^[64]	7 mm 领先 12 mm 30 min 左右 亚毫米落后红外 100 min 左右	线偏振
(近)红外	Keck/VLT	>16 倍 ^[67]	47 s ^[68]	与 X 射线同步 与亚毫米波段有时延	线偏振
X 射线	Chandra/XMM–Newton	160 倍 ^[52]	100 s ^[53]	与红外同步	—
γ 射线	HESS	—	—	未检测到与 X 射线同步的耀变	—

从目前的观测中可以总结出如下基本性质。

1) Sgr A* 在各个波段都有耀变现象, 时标长则若干小时, 短则几十秒。频率越高, 变化幅度越大, 时标越短。射电波段的耀变幅度小于 50%, 而 X 射线波段可以增大到宁静态流量的 160 倍。(近) 红外耀变发生频率约每天 4 次, X 射线波段的发生频率约每天 1 次^[45,50,68]。

2) 耀变期间,在毫米、亚毫米和(近)红外都观测到很强的线偏振,偏振度与频率成正比,(近)红外偏振度可高达40%,偏振位置角的摆动可达 180° [45,61-62,64,66]。在1.4~15 GHz 测到明显的圆偏振,圆偏振度有短时光标变,但在长时间内保持稳定。线偏振很弱^[22]。

3) (近)红外和 X 射线的耀变有时表现出亚结构,或者称为准周期震荡 QPO。典型特征是,持续 1~2 h 的耀变,受到 15~25 min 的周期调制。这种亚结构通常很弱,只能在部分(近)红外耀变中观测到,有人认为这只是一红噪声^[46]。X 射线波段的准周期亚结构与此类似,时标 5~22 min^[53,56]。

4) 耀变期间, (近) 红外谱指数基本保持稳定, 约等于

 $-0.6^{[38,40-41,68]}$

5) (近)红外、X射线的耀变通常是同步发生的,领先亚毫米波段 100 min 左右^[62-63]。在毫米波段,7 mm 领先 12 mm 约 30 min^[63-64]。每一次 X 射线耀变都伴随有(近)红外耀变,但并不是每一次(近)红外耀变都伴随有 X 射线耀变^[45]。

由于大部分观测设备位于北半球,受到观测窗口的限制,成功的多波段同时耀变观测还很少,X射线、(近)红外、亚毫米等较高频率与射电波段耀变之间的关系还不清楚,因此多波段联测仍然是目前光变研究的主要方向。

参考文献 (References)

- [1] Schödel R, Ott T, Genzel R, *et al.* A star in a 15.2-year orbit around the supermassive black hole at the centre of the Milky Way[J]. *Nature*, 2002, 419(6908): 694–696.
- [2] Bower G C, Falcke H, Herrnstein R M, *et al.* Detection of the intrinsic size of Sagittarius A* through closure amplitude imaging [J]. *Science*, 2004, 304(5671): 704–708.
- [3] Shen Z Q, Lo K Y, Liang M C, *et al.* A size of ~ 1 AU for the radio



- source Sgr A* at the centre of the Milky Way [J]. *Nature*, 2005, 438 (7064): 62–64.
- [4] Doeleman S S, Weintraub 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.
- [5] Melia, F, Falcke H. The supermassive black hole at the Galactic Center [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2001, 39: 309–352.
- [6] Balick B, Brown R L. Intense sub-arcsecond structure in the galactic center[J]. *Astrophysical Journal*, 1974, 194(12): 265–270.
- [7] Brown R L, Lo K Y. Variability of the compact radio source at the galactic center[J]. *Astrophysical Journal*, 1982, 253(2): 108–114.
- [8] Davies R D, Walsh D, Booth R S. The radio source at the galactic nucleus [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1976, 177 (2): 319–333.
- [9] Lo K Y, Backer D C, Ekers R D, *et al.* On the size of the galactic centre compact radio source Diameter less than 20 AU[J]. *Nature*, 1985, 315(5): 124–126.
- [10] Rickett B J, Coles W A, Bourgois G. Slow scintillation in the interstellar medium[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1984, 134(2): 390–395.
- [11] Zhao J H, Ekers R D, Goss W M, *et al.* Narayan R Long-term variations of the compact radio source Sgr A* at the Galactic center[C]//Proceedings of the International Astronomical Union. IAU Symposium, 1989, 136: 535–541.
- [12] Zhao J H, Goss W M, Lo K Y, *et al.* Evidence for intrinsic activity of Sgr A* at the Galactic center [C]//ASP Conf Series, Relationships between Active Galactic Nuclei and Starburst Galaxies. 1992, 31: 295–299.
- [13] Falcke H. Radio variability of Sgr A* at centimeter wavelengths[C]//ASP Conference Series, The Central Parsecs of the Galaxy. 1999, 186: 113–117.
- [14] Zhao J H, Bower G C, Goss W M. Radio variability of Sagittarius A*–A 106 day cycle[J]. *Astrophysical Journal*, 2001, 547(1): L29–L32.
- [15] Herrnstein R M, Zhao J H, Bower G C, *et al.* The variability of Sagittarius A* at centimeter wavelengths[J]. *Astronomical Journal*, 2004, 127(6): 3399–3410.
- [16] Hughes P A, Aller H D, Aller M F. Polarized radio outbursts in BL-Lacertae, Part Two: The flux and polarization of a piston-driven shock [J]. *Astrophysical Journal*, 1985, 298(1): 301–315.
- [17] Bower G C, Backer D C, Zhao J H, *et al.* The linear polarization of Sagittarius A*, I. VLA spectropolarimetry at 4.8 and 8.4 GHz [J]. *Astrophysical Journal*, 1999, 521(2): 582–586.
- [18] Bower G C, Falcke H, Backer D C. Detection of circular polarization in the Galactic Center black hole candidate Sagittarius A* [J]. *Astrophysical Journal*, 1999, 523(1): L29–L32.
- [19] Sault R J, MacQuart J P. Confirmation and analysis of circular polarization from Sagittarius A*[J]. *Astrophysical Journal*, 1999, 526(2): L85–L88.
- [20] Bower G C, Wright M C H, Backer D C, *et al.* The linear polarization of Sagittarius A*, II. VLA and BIMA polarimetry at 22, 43, and 86 GHz [J]. *Astrophysical Journal*, 1999, 527(2): 851–855.
- [21] Bower G C, Wright M C H, Falcke H, *et al.* BIMA observations of linear polarization in Sagittarius A* at 112 GHz [J]. *Astrophysical Journal*, 2001, 555(2): L103–L106.
- [22] Bower G C, Falcke H, Sault R J, *et al.* The spectrum and variability of circular polarization in Sagittarius A* from 1.4 to 15 GHz[J]. *Astrophysical Journal*, 2002, 571(2): 843–855.
- [23] Wright M C H, Backer D C. Flux density of Sagittarius A* at lambda = 3 millimeters[J]. *Astrophysical Journal*, 1993, 417: 560.
- [24] Tsutsumi T, Kwarata T, Miyazaki A, *et al.* Short-term variability of Sagittarius A* at millimeter wavelengths[C]//Proceedings of the International Astronomical Union. 1998, 184: 439–440.
- [25] Tsutsumi T, Miyazaki A, Tsuboi M. Flares from Sagittarius A* at millimeter wavelengths [J]. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2002, 34: 950.
- [26] Miyazaki A, Tsutsumi T, Tsuboi M. Intraday variation of Sagittarius A* at short millimeter wavelengths [J]. *Astrophysical Journal*, 2004, 611(2): L97–L100.
- [27] Zhao J H, Young K H, Herrnstein R M, *et al.* Variability of Sagittarius A*: Flares at 1 millimeter[J]. *Astrophysical Journal*, 2003, 586(1): L29–L32.
- [28] Mauerhan J C, Morris M, Walter F, *et al.* Intraday variability of Sagittarius A* at 3 millimeters [J]. *Astrophysical Journal*, 2005, 623(1): L25–L28.
- [29] Marrone D P, Moran J M, Zhao J H, *et al.* The submillimeter polarization of Sgr A*[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, Proceedings of "The Universe Under the Microscope – Astrophysics at High Angular Resolution", 2006, 54: 354–362.
- [30] Miyazaki A, Shen Z Q, Miyoshi M, *et al.* Flux monitoring of Sagittarius A* at mm-wavelengths[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, Proceedings of "The Universe Under the Microscope – Astrophysics at High Angular Resolution", 2006, 54: 363–369.
- [31] Li J, Shen Z Q, Miyazaki A, *et al.* The 3-mm flux density monitoring of Sagittarius A* with the ATCA [C]//Proceedings of the International Astronomical Union. IAU Symposium, 2008, 248: 204–205.
- [32] Li J, Shen Z Q, Miyazaki A, *et al.* The variability of Sagittarius A* at 3 millimeter[J]. *Astrophysical Journal*, 2009, 700(1): 417–425.
- [33] Genzel R, Eckart A, Ott T, *et al.* On the nature of the dark mass in the centre of the Milky Way [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1997, 291(1): 219–234.
- [34] Genzel R, Schödel R, Ott T, *et al.* Near-infrared flares from accreting gas around the supermassive black hole at the Galactic centre [J]. *Nature*, 2003, 425(6961): 934–937.
- [35] Ghez A M, Wright S A, Matthews K, *et al.* Variable Infrared Emission from the supermassive black hole at the center of the Milky Way[J]. *Astrophysical Journal*, 2004, 601(2): L159–L162.
- [36] Clénet Y, Rouan D, Gratadour D, *et al.* A dual emission mechanism in Sgr A*/L? [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2005, 439(2): L9–L13.
- [37] Ghez A M, Hornstein S D, Lu J R, *et al.* The first laser guide star adaptive optics observations of the Galactic center: Sgr A*'s infrared color and the extended red emission in its vicinity[J]. *Astrophysical Journal*, 2005, 635(2): 1087–1094.
- [38] Eisenhauer F, Genzel R, Alexander T, *et al.* SINFONI in the Galactic center: Young stars and infrared flares in the central light-month[J]. *Astrophysical Journal*, 2005, 628(1): 246–259.
- [39] Krabbe A, Iserlohe C, Larkin J E, *et al.* Diffraction-limited imaging



- spectroscopy of the Sagittarius A* region using OSIRIS, a New Keck Instrument[J]. *Astrophysical Journal*, 2006, 642(2): L145–L148.
- [40] Gillessen S, Eisenhauer F, Quataert E, *et al.* Variations in the spectral slope of Sagittarius A* during a near-infrared flare [J]. *Astrophysical Journal*, 2006, 640(2): L163–L166.
- [41] Hornstein S D, Matthews K, Ghez A M. A constant spectral index for Sagittarius A* during infrared/X-ray intensity variations [J]. *Astrophysical Journal*, 2007, 667(2): 900–910.
- [42] Meyer L, Eckart A, Schödel R, *et al.* Near-infrared polarimetry setting constraints on the orbiting spot model for Sgr A* flares [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2006, 460(1): 15–21.
- [43] Meyer L, Schödel R, Eckart A, *et al.* K-band polarimetry of an Sgr A* flare with a clear sub-flare structure [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2006, 458(2): L25–L28.
- [44] Eckart A, Schödel R, Meyer L, *et al.* Polarimetry of near-infrared flares from Sagittarius A*[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2006, 455(1): 1–10.
- [45] Trippe S, Paumard T, Gillessen S, *et al.* A polarized infrared flare from Sagittarius A* and the signatures of orbiting plasma hotspots[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2007, 375(3): 764–772.
- [46] Do T, Ghez A, Morris M R, *et al.* A near-infrared variability study of the Galactic black hole: A red noise source with NO detected periodicity [J]. *Astrophysical Journal*, 2009, 691(2): 1021–1034.
- [47] Meyer L, Do T, Ghez A, *et al.* A 600 minute near-infrared light curve of Sagittarius A*[J]. *Astrophysical Journal*, 2008, 688(1): L17–L20.
- [48] Baganoff F K, Bautz M W, Brandt W N, *et al.* Rapid X-ray flaring from the direction of the supermassive black hole at the Galactic centre[J]. *Nature*, 2001, 433(6851): 45–48.
- [49] Baganoff F K, Bautz M W, Ricker G R, *et al.* Multiwavelength monitoring of Sgr A* during Chandra observations of multiple X-ray flares[J]. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2002, 34: 1153.
- [50] Baganoff F K, Maeda Y, Morris M, *et al.* Chandra X-ray spectroscopic imaging of Sagittarius A* and the central parsec of the Galaxy [J]. *Astrophysical Journal*, 2003, 591(2): 891–915.
- [51] Goldwurm A, Brion E, Goldoni P, *et al.* A New X-ray flare from the Galactic nucleus detected with the XMM-Newton photon imaging cameras[J]. *Astrophysical Journal*, 2003, 584(2): 751–757.
- [52] Porquet D, Predehl P, Aschenbach B, *et al.* XMM-Newton observation of the brightest X-ray flare detected so far from Sgr A* [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2003, 407: L17–L20.
- [53] Aschenbach B, Grosso N, Porquet D, *et al.* X-ray flares reveal mass and angular momentum of the Galactic center black hole [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2004, 417: 71–78.
- [54] Bélanger G, Goldwurm A, Melia F, *et al.* Repeated X-ray flaring activity in Sagittarius A*[J]. *Astrophysical Journal*, 2005, 635(2): 1095–1102.
- [55] Yusef-Zadeh F, Bushouse H, Dowell C D, *et al.* A multiwavelength study of Sgr A*: The role of near-IR flares in production of X-ray, soft γ -ray, and submillimeter emission [J]. *Astrophysical Journal*, 2006, 644 (1): 198–213.
- [56] Bélanger G, Terier R, de Jager O C, *et al.* Periodic modulations in an X-ray flare from Sagittarius A* [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, Proceedings of "The Universe Under the Microscope –Astrophysics at High Angular Resolution", 2006, 54: 420–426.
- [57] Porquet D, Grosso N, Predeho P, *et al.* X-ray hiccups from Sagittarius A* observed by XMM-Newton: The second brightest flare and three moderate flares caught in half a day [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2008, 488(2): 549–557.
- [58] Aharonian F, Akhperjanian A G, Barres de Almeida U, *et al.* Simultaneous HESS and Chandra observations of Sagittarius A* during an X-ray flare[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2008, 492(1): L25–L28.
- [59] Zhao J H, Hornstein R M, Bower G C, *et al.* A radio outburst nearly coincident with the large X-ray flare from Sagittarius A* on 2002 October 3[J]. *Astrophysical Journal*, 2004, 603(2): L85–L88.
- [60] Eckart A, Baganoff F K, Morris M R, *et al.* First simultaneous NIR/X-ray detection of a flare from Sgr A* [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2004, 427: 1–11.
- [61] Eckart A, Baganoff F K, Schödel R, *et al.* The flare activity of Sagittarius A*: New coordinated mm to X-ray observations[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2006, 450(2): 535–555.
- [62] Marrone D P, Baganoff F K, Morris M R, *et al.* An X-ray, infrared, and submillimeter flare of Sagittarius A* [J]. *Astrophysical Journal*, 2008, 682(1): 373–383.
- [63] Yusef-Zadeh F, Wardle M, Heinke C, *et al.* Simultaneous Chandra, CSO, and VLA observations of Sgr A*: The nature of flaring activity[J]. *Astrophysical Journal*, 2008, 682(1): 361–372.
- [64] Yusef-Zadeh F, Roberts D, Wardle M, *et al.* Flaring activity of Sagittarius A* at 43 and 22 GHz: Evidence for expanding hot plasma[J]. *Astrophysical Journal*, 2006, 650(1): 189–194.
- [65] van der Laan A. Model for variable extragalactic radio sources[J]. *Nature*, 1966, 211: 1131–1133.
- [66] Eckart A, Baganoff F K, Zamaninasab M, *et al.* Polarized NIR and X-ray flares from Sagittarius A* [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2008, 479(3): 625–639.
- [67] Eckart A, Schödel M, García-Marín M, *et al.* Simultaneous NIR/sub-mm observation of flare emission from Sagittarius A* [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2008, 492(2): 337–344.
- [68] Dodds-Eden K, Porquet D, Trap G, *et al.* Evidence for X-ray synchrotron emission from simultaneous mid-infrared to X-ray observations of a strong Sgr A* flare [J]. *Astrophysical Journal*, 2009, 698 (1): 676–692.
- [69] Yuan F, Quataert E, Narayan R. Nonthermal electrons in radiatively inefficient accretion flow models of Sagittarius A* [J]. *Astrophysical Journal*, 2003, 598(1): 301–312.
- [70] Falcke H, Markoff S. The jet model for Sgr A*: Radio and X-ray spectrum [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2000, 362: 113–118.
- [71] Broderick A E, Loeb A. Imaging bright-spots in the accretion flow near the black hole horizon of Sgr A* [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2005, 363(2): 353–362.
- [72] Merloni A. Modes of disc accretion onto black holes [C]//Proceedings of the 5th Italian AGN Meeting. <http://www.unico.it/ilaria/AGNS/proceedings.html>, 2002: 90.
- [73] Narayan R, Kato S, Honma F. Global structure and dynamics of advection-dominated accretion flows around black holes[J]. *Astrophysical Journal*, 1997, 476(1): 49–60.

(责任编辑 朱宇)