

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.02.06

# S4 0954+65 喷流的高分辨率观测研究

王 玘<sup>1,2,3</sup>, 路如森<sup>1,4</sup>, 沈志强<sup>1,4</sup>, 江 悟<sup>1,4</sup>,  
黄 磊<sup>1,5</sup>, 赵杉杉<sup>1</sup>, 闫 玺<sup>1,3</sup>, 程 远<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 上海科技大学, 上海 201210; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院 射电天文重点实验室, 南京 210008; 5. 中国科学院 星系宇宙学重点实验室, 上海 200030)

**摘要:** S4 0954+65 是一个典型的 BL Lac 天体, 观测表明, 其射电、光学和  $\gamma$  射线波段的辐射具有准同步耀变现象。利用美国甚长基线干涉阵列 VLBA 对该源分别在 2018 年 6 月和 2019 年 11 月进行多波段观测, 发现其射电核的流量密度谱有明显变化。通过同步自吸收机制, 得到射电核心磁场强度为  $(3.3 \pm 0.9) \times 10^{-4}$  T。通过分析 2017 年 5 月—2021 年 5 月期间 VLBA 43 GHz 观测的归档数据, 发现 2 个明显的喷流运动成分和靠近核心的一个静止成分。对两个运动成分分析得到喷流的视向夹角分别为  $5.5^\circ$  和  $6.9^\circ$ , 张角为  $1.8^\circ$  和  $2.4^\circ$ 。利用 VLBA 43 GHz 归档数据以及 Fermi 卫星 4 期源表 (4FGL) 中该源的  $\gamma$  射线流量, 发现射电核心和  $\gamma$  射线在 2018 年 10 月—2021 年 5 月间变得更加活跃, 且射电核心流量变化更强。

**关键词:** BL Lac 天体; 喷流结构; 核心磁场; 喷流成分

**中图分类号:** P157.7 **文献标识码:** A

## 1 引 言

S4 0954+65 是一个典型 BL Lac 天体, 具有相对论性单边喷流<sup>[1]</sup>。其与视线方向夹角为  $1.5^\circ \sim 9.3^\circ$ <sup>[2-4]</sup>。Becerra 等人<sup>[5]</sup>通过测量 Mg II  $\lambda 2800\text{\AA}$  发射线, 得到它的红移  $z = 0.3694 \pm 0.0011$ 。Fan 和 Cao<sup>[6]</sup>通过测定 H $\alpha$  的宽度, 得到其中心超大质量黑洞的质量  $M_{\text{BH}} \approx 3.3 \times 10^8 M_\odot$  ( $M_\odot$  为太阳质量)。

S4 0954+65 的光变十分剧烈。在射电和光学波段, 时标为几小时的光变被探测到很多次, 特别是处于耀变状态时<sup>[7-13]</sup>。Morozova 等人<sup>[12]</sup>发现, 在 2011 年 3 月至 4 月间, 该源在 43 GHz 射电、光学和  $\gamma$  射线波段表现出准同步耀变现象; 他们还发现三个射电成分的

收稿日期: 2022-04-27; 修回日期: 2022-05-16

资助项目: 国家自然科学基金 (11933007); 中科院基础前沿科学研究计划从 0 到 1 原始创新项目 (ZDBS-LY-SLH011); 上海市基础研究特区计划 (JCYJ-SHXY-2021-013)

通讯作者: 王玘, wanggan@shanghaitech.edu.cn

出现与 $\gamma$ 射线波段耀变相关。在这期间,光学R波段的流量也有显著变化,其中最明显的变化发生在2011年3月9日,此时,流量增加了0.7 mag。在2011年2月27日至2011年3月19日期间,光学R波段流量一直上升,偏振位置角平滑变化 $300^\circ$ 。2015年2月,该源在VHE( $\geq 100$  GeV) $\gamma$ 射线首次被探测到,被认为与新生成的射电成分有关联<sup>[14]</sup>。Marscher等人<sup>[15]</sup>认为耀变是由于一个新生成的射电成分在喷流的底部被加速,并沿着螺旋磁场运动,当成分穿过明亮的射电核心时,就会产生光学、 $\gamma$ 射线以及准同步射电耀变。

该源不同波段耀变会表现出延迟。Ahnen等人<sup>[14]</sup>发现,2015年2月,X射线耀变相对于 $\gamma$ 射线耀变存在约1周的延迟。Raiteri等人<sup>[16]</sup>发现,在2019年8月,射电耀变相对于光学耀变有约3周延迟,并认为射电辐射区比光学辐射区更靠近喷流底部。Wehrel等人<sup>[17]</sup>认为,高频观测是来自非热光子的逆康普顿散射,而射电辐射来自电子同步辐射,所以两者存在时间延迟。

本文第2章介绍我们的观测和数据处理。在3.1节,我们根据多频率VLBA观测结果计算喷流的物理性质;3.2节给出S4 0954+65在2017年5月—2021年5月喷流的运动学结果;在3.3节,我们讨论了射电核心流量变化与 $\gamma$ 射线光变的联系。第4章进行总结。在本文中,我们使用的宇宙学常数为: $H_0 = 71 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ,  $\Omega_m = 0.27$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.73$ <sup>[18]</sup>。

## 2 观测数据及处理分析

### 2.1 多频率VLBA观测

我们对S4 0954+65观测是在对近邻低光度活动星系核M81<sup>[19]</sup>的VLBA观测期间作为校准源而进行,观测共分为两个历元。在2018年6月10日,VLBA观测分别在8 GHz、22 GHz和43 GHz交替进行,在每个频率共观测21次扫描(scan),每次扫描为0.5 min,总的时间跨度为8 h。在2019年11月2日和11月4日,观测分别在22 GHz和5 GHz及8 GHz进行。在每个频率,S4 0954+65分别观测8次扫描,每次扫描时长为3 min,每个频率总的时间跨度为8 h。

我们采用美国国立射电天文台开发的AIPS软件对S4 0954+65 VLBA观测数据进行校准。校准过程采用标准化流程,包括手动相位校准(manual phase cal),全局条纹拟合(global fringe fitting)以及幅度校准。其中对于幅度校准,我们分别在5 GHz和8 GHz考虑了电离层改正,在22 GHz和43 GHz考虑了大气不透明度改正。

### 2.2 VLBA 43 GHz 档案数据

为进一步研究S4 0954+65的喷流运动学,我们使用波士顿大学研究团队<sup>[20]</sup>在43 GHz对该源的VLBA监测数据<sup>①</sup>。该项目利用美国VLBA阵在43 GHz对数十个明亮的 $\gamma$ 射线耀变体进行长期监测<sup>[3]</sup>。我们对2017年5月—2021年5月间的归档数据重新进行了成图,成图以及成分认证采用Jorstad等人<sup>[3, 21]</sup>的方法。

---

<sup>①</sup>感谢NASA通过费米客座研究员计划(Fermi Guest Investigator Program)资助的VLBA-BU Blazar监测计划<sup>[38]</sup>(BEAM-ME和VLBA-BU-BLAZAR),为本文研究提供了便利。

### 2.3 $\gamma$ 射线观测数据

Fermi 卫星上的大面积望远镜 (LAT) 每 3h 扫描一遍全天空。本文使用 Fermi 卫星 4 期源表 (4FGL) 数据<sup>[22]</sup>。我们选用 S4 0954+65 采样周期为 7 d 的  $\gamma$  射线光变曲线数据, 每个数据点的不确定度是  $2\sigma$ , 观测时间范围为 2017 年 05 月 13 日—2021 年 05 月 28 日 (MJD57887—59363)。

## 3 结果与讨论

### 3.1 射电喷流的物理性质

我们按时间顺序把 2018 年 6 月命名为第一个历元, 把 2019 年 11 月命名为第二个历元。第二个历元 43 GHz 数据取自 VLBA 归档数据。图 1 中展示了第二个历元 S4 0954+65 在 4 个频率的图像。在秒差距的尺度上, S4 0954+65 表现出单边的喷流, 喷流的初始方向由北偏向西北并逐渐向西, 与千秒差距尺度上的喷流形成近  $180^\circ$  的夹角<sup>[23]</sup>。图 2 a) 展示了射电核在两个历元的谱。由于 C3 成分 (参见 3.2 节) 只有在 43 GHz 能够分解开, 所以我们把 C3 和核成分合并来考虑。由图 2 a) 可知, 在第一个历元, 射电核成分在我们的频率覆盖范围内表现出平谱, 通过相应的射电核成分流量密度变化可知, 此时射电核心并不活跃。在第二个历元, 核心的谱在低频端表现出同步自吸收特征, 为了确定其峰值频率, 我们采用 Casadio 等人<sup>[24]</sup> 2016 年 5 月在 86 GHz 的观测数据, 并通过假设其与 43 GHz 之间谱指数不变的条件外推到我们观测的时间。

我们利用同步辐射自吸收 (SSA) 来解释核心在第二个历元的倒转谱 (见图 2 a))。利用 SSA 谱公式进行拟合<sup>[25]</sup>, 流量密度可表示为:

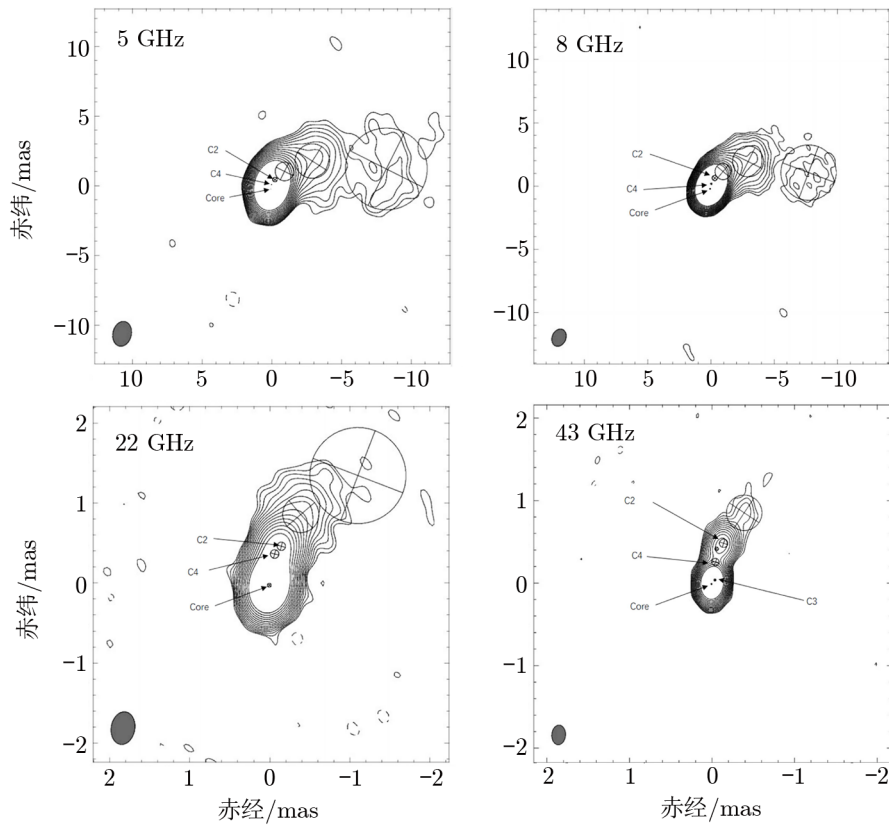
$$S_\nu = S_m \left( \frac{\nu}{\nu_m} \right)^{\alpha_t} \frac{1 - e^{-\tau_m (\nu/\nu_m)^{\alpha - \alpha_t}}}{1 - e^{-\tau_m}}, \quad (1)$$

其中,  $\nu_m$  是以 GHz 为单位的倒转频率;  $S_m$  是倒转频率处的流量密度, 以 Jy 为单位;  $\alpha_t$  是光学厚发射区的谱指数, 为 2.5;  $\alpha$  是光学薄处的谱指数;  $\tau_m = 1.5(\sqrt{1 - 8\alpha/3\alpha_t} - 1)$  是倒转频率的光深。通过拟合得到倒转频率  $\nu_m = (45 \pm 2)$  GHz,  $S_m = 1.3$  Jy, 光学薄处的谱指数  $\alpha = -0.1$ , 拟合结果如图 2 a) 所示。我们注意到同步自吸收未能很好地拟合核心成分的谱。一方面这可能是由于低频观测不能很好地分解开核心成分和 C3 成分; 另一方面, 通过 86 GHz 的总流量密度外推得出的核心成分在该频率的流量密度具有较大的不确定性。

利用这些物理参数, 带入 SSA 磁场强度公式, 公式由 Marscher<sup>[26]</sup> 给出:

$$B_{\text{SSA}} = 10^{-5} b(\alpha) b_\phi^4 \nu_m^5 S_m^{-2} \left( \frac{\delta}{1+z} \right) (10^{-4} \text{ T}), \quad (2)$$

其中,  $b(\alpha)$  是与谱指数有关的函数, 由 Marscher<sup>[26]</sup> 列表 1 可知,  $b(-0.1) = 1.1$ 。核心成分大小为  $b_\phi = 0.11$  mas。多普勒因子可由 3.2 节表 2 取 8.3, 红移  $z = 0.367$ 。将上述参数代入式 (2), 核心磁场  $B_{\text{SSA}} = (3.3 \pm 0.9) \times 10^{-4}$  T。



注：等强度轮廓线最小值分别为 0.24, 0.11, 0.41 和 0.76 mJy, 并以  $\sqrt{2}$  倍大小递增, 总强度的峰值流量密度分别为 0.73, 0.77, 0.80 和 1.24 Jy。每张图左下角的灰色椭圆表示光束大小。

图 1 S4 0954+658 在 5 GHz, 8 GHz, 22 GHz 和 43 GHz 的总强度图像

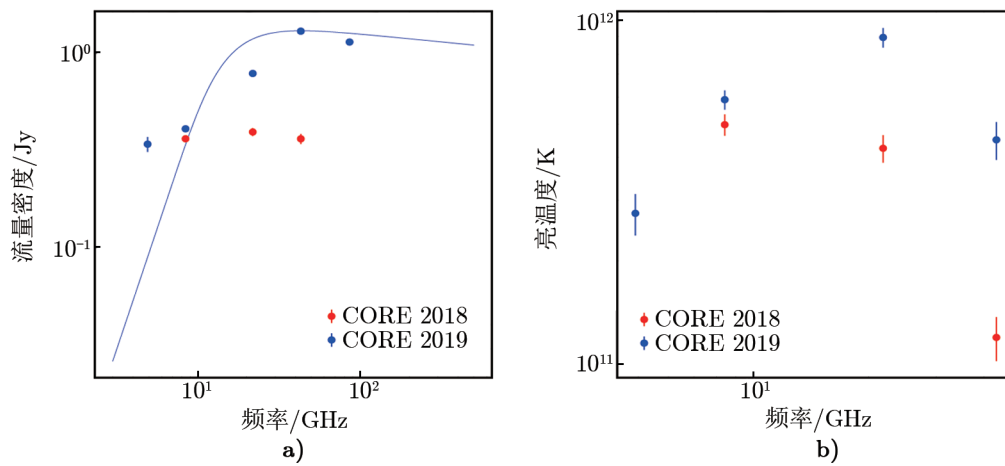


图 2 a) 中的红色和蓝色圆点分别代表第一个历元和第二个历元的射电核心流量密度, 蓝线是第二个历元核心的 SSA 谱拟合; b) 是两个历元射电核心的亮度度

另一种计算磁场的方法是假设磁场能量和粒子能量均分, Feng 等人<sup>[27]</sup>给出磁场与其他物理量的关系式:

$$B_{\text{eq}} = [4.5(1+k)f(\alpha, 10^7, 10^{11})LR^{-3}]^{2/7}, \quad (3)$$

其中,  $k$  是重粒子能量与电子能量比值, 通常取  $k=100$ , 这是由于电子和正电子是在质子流与射电源内的气体和尘埃发生碰撞后产生的次级粒子<sup>[28]</sup>。  $R$  是以 cm 为单位的成分大小。  $L$  是源的同步辐射光度, 近似可以写成  $4\pi d_L^2 S_m \nu_m$ ,  $d_L$  是以 Mpc 为单元的光度距离,  $d_L = 1966 \text{ Mpc}$ <sup>[1]</sup>。  $f(\alpha, 10^7, 10^{11})$  是谱指数函数,  $f(-0.1, 10^7, 10^{11}) = 0.6 \times 10^7$ 。式 (3) 可以表示为如下形式:

$$B_{\text{eq}} = 5.37 \times 10^{12} [S_m \nu_m d_L^2 R^{-3}]^{2/7} (10^{-4} \text{ T}). \quad (4)$$

将前面的参数代入可得核心磁场  $B_{\text{eq}} \approx 0.3 \text{ G}$ 。SSA 磁场与均分磁场结果相近。

VLBI 成分在源静止坐标系中的表观亮度温度由下式得出<sup>[29]</sup>:

$$T_b = 1.22 \times 10^{12} \frac{S_\nu}{\nu^2 b_\phi^2} (1+z) \text{ K}. \quad (5)$$

由图 2b) 可知, 第一个历元射电核心亮温度与第二个历元射电核心亮温度相近, 亮温度不随频率显著变化, 并保持在  $10^{11} \sim 10^{12} \text{ K}$  之间。

### 3.2 射电喷流的运动学

为了研究喷流的运动学, 我们分析了在 2017 年 5 月—2021 年 5 月观测期间的共 37 个历元 43 GHz VLBA 归档数据。我们将流量密度小于 20 mJy 极弱成分剔除, 得到 2 个明显的运动成分 C1 和 C2, 和一个靠近核心的静止成分 C3。成分 C1, C2 和 C3 如图 3a) 所示。C1 存在的时间为 2017 年 8 月—2018 年 7 月; C2 存在的时间为 2019 年 2 月—2021 年 5 月; C3 存在时间为 2018 年 4 月—2021 年 5 月(见图 3b))。成分 C1, C2 和 C3 在天空平面上运动轨迹如图 3a) 所示, 原点是射电核心, 我们假设射电核心静止<sup>[30]</sup>; 图 3b) 和 3c) 横坐标是修正儒略日, 纵坐标分别是赤经(图 3b)) 和赤纬(图 3c))。通过图 3a) 可知, C1 和 C2 这两个成分在运动过程中都在正北方向距离核心约 0.4 mas 处产生转折, 并通过图 3b) 和 3c) 在转折之前, 两个成分都是近似沿正北方向运动; 转折后, 在赤经方向近似做匀速运动(转折后近似是一条直线); 通过在赤纬方向运动轨迹与时间的关系可知, 这两个成分在转折前后赤纬方向速度不改变。由此可推断, 在转折处, 两个成分在赤经方向短暂加速, 并继续匀速运动。转折区可能是激波生成区, 成分加速可能由激波导致<sup>[31]</sup>。由图 4 可知, C1 通过转折区时, 流量和成分大小都没有显著变化; 而 C2 通过转折区之前流量突然升高, 成分在不断变大, 这可能是由于 C2 穿过 C3 时, 与 C3 发生碰撞。C3 成分类似于 Morozova 等人<sup>[12]</sup>观测得到的 A0, 在靠近核心处静止。C1 和 C2 成分的其他结果见表 1。

我们把 37 个历元所有成分的分布展示在图 5a) 中; 图 5b) 展示了 Morozova 等人<sup>[12]</sup>观测的 11 个运动成分(K1–K11)和一个离核心很近的静止成分 A0 的运动轨迹。在这两个时间范围内, 喷流的运动成分表现出两条明显路径, 两条路径夹角几乎没有变化, 约为  $30^\circ$ 。将

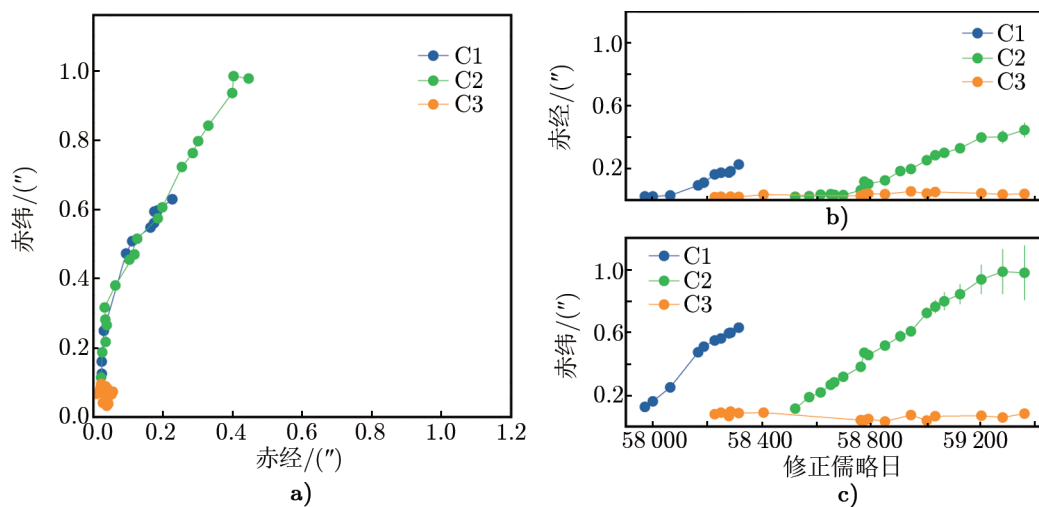


图 3 a) 3 个成分在天空平面上的运动轨迹; b) 和 c) 成分的相对赤经和相对赤纬随时间的变化

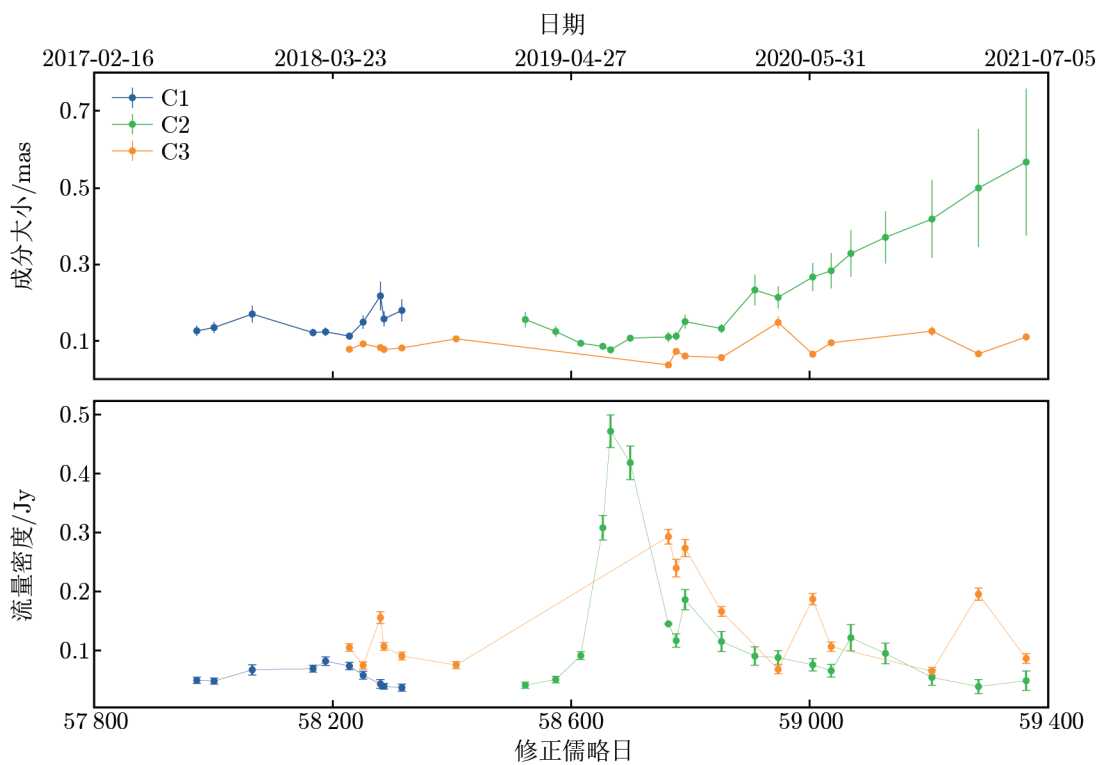


图 4 C1, C2 和 C3 的成分的流量密度和尺寸大小随时间的变化

表 1 S4 0954+65 的喷流中观测到的新的射电成分的特征

成分	历元数	平均位置角 (PA)	平均大小 (FWMH)	最大流量	视速度	生成时间
		/( $^{\circ}$ )	/mas	/mJy	$\beta_{\text{app}}/c$	
C1	10	$-13.7 \pm 4.1$	$0.14 \pm 0.03$	$81 \pm 7$	$10.4 \pm 0.3$	$2017.05.23 \pm 9$
C2	19	$-14.2 \pm 6.4$	$0.23 \pm 0.08$	$471 \pm 28$	$8.2 \pm 0.2$	$2018.12.02 \pm 8$

图 3 a) 与图 5 b) 对比可知, 除 K2 和 A0 成分, Morozova 等人<sup>[12]</sup> 观测结果的其余成分与本文的 C1 和 C2 成分很类似, 都是先沿着正北方向运动, 再向西转折。根据 Morozova 等人<sup>[12]</sup> 观测结果可知, K2 和 K3 的存在时间分别约为 500 d 和 700 d, 生成时间相差约 3 个月, 这表明两个成分在两条路径上同时运动。

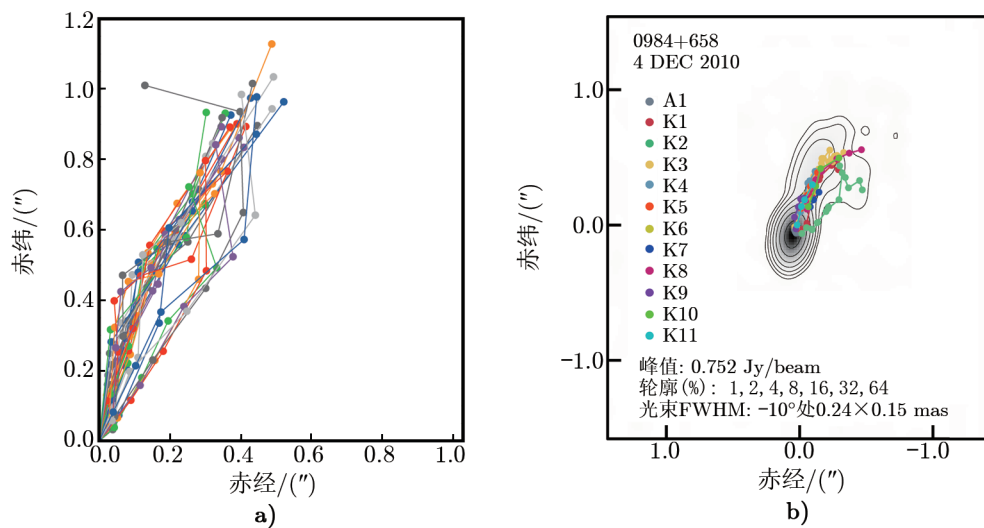


图 5 a) 本次工作所有历元的成分分布, 不同历元的成分用不同颜色表示; b) Morozova 等人观测得到的 12 个成分的运动轨迹<sup>[12]</sup>

S4 0954+65 中心超大质量黑洞的质量为  $M_{\text{BH}} = 3.3 \times 10^8 M_{\odot}$ <sup>[6]</sup>, 质量与史瓦西半径的关系  $r_s = 2GM/c^2$ 。图 3 是运动成分在天空平面的二维投影,  $1 \text{ mas} = 5.08 \text{ pc}$ , 利用视向夹角范围为  $1.5^{\circ} \sim 9.3^{\circ}$  (本节稍后给出), 可算出转折点到射电核心的距离为  $7.8 \times 10^4 \sim 40.3 \times 10^4 r_s$ , 转折区在邦迪半径附近。在 Xu 等人<sup>[32]</sup> 的工作中, BL Lac 天体 S5 0716+714 也存在类似于 S4 0954+65 的双路径结构。Kim 等人<sup>[33]</sup> 发现 S5 0716+714 的喷流的运动成分的分布在距离核心 0.53 mas 处发生转折, 转折点到射电核心的距离约为邦迪半径。双路径喷流结构和运动路径的转折区发生在邦迪半径附近, 这可能与黑洞影响的变化有关。未来对类似 BL Lac 天体进行更多的高分辨率观测将有助于理解该现象。

我们使用 Urry 和 Padovani<sup>[34]</sup> 的方法, 通过对 C1 和 C2 成分进行运动学分析, 限制喷流

的视向夹角和张角。最小洛伦兹因子  $\gamma_{\min}$  与视速度  $\beta_{\text{app}}$  关系为:

$$\gamma_{\min} = \sqrt{\beta_{\text{app}}^2 + 1} . \quad (6)$$

视速度与团块相对于射电核心速度  $\beta$  和视向夹角  $\theta$  关系如下:

$$\beta_{\text{app}} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - (\beta \cos \theta)} . \quad (7)$$

通过对上式  $\theta$  求偏导, 可得  $\beta_{\text{app}}$  最大时视线临界角  $\theta_c$ , 表示为:

$$\theta_c = \arcsin \left( \frac{1}{\gamma} \right) . \quad (8)$$

成分的多普勒因子可以用洛伦兹因子和视向夹角表示,  $\delta = [\gamma - \sqrt{\gamma^2 - 1} \cos \theta]^{-1}$ 。利用成分视向夹角, 可以得到喷流张角  $\phi_{\text{int}}$ 。其中成分的有效大小为  $d_{\text{eff}} = 1.8b_\phi$ , 假设成分完全在喷流的横截面上, 视向张角  $\phi_{\text{app}}$  为:

$$\phi_{\text{app}} = 2 \arctan \left( \frac{d_{\text{eff}}}{2r} \right) , \quad (9)$$

其中,  $r$  是成分到核心的径向距离, 在这里我们对  $r$  和  $d_{\text{eff}}$  取平均, 通过

$$\phi_{\text{int}} = \phi_{\text{app}} \sin \theta , \quad (10)$$

可以得到喷流的张角  $\phi_{\text{int}}$ 。这里, 我们选取洛伦兹因子为最小值, 相关结果见表 2。

表 2 S4 0954+65 射电喷流的参数

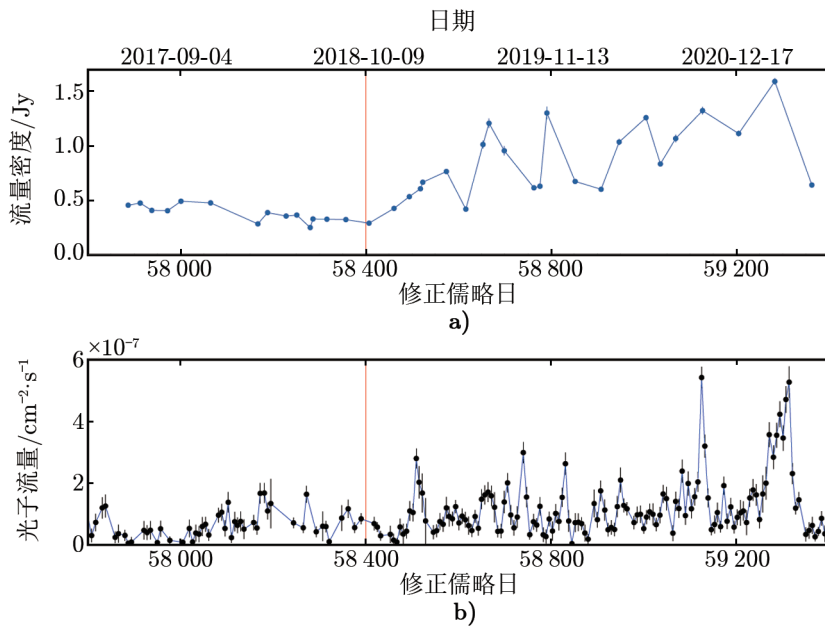
成分	$\gamma_{\min}$	$\theta_c / (^\circ)$	$\delta$	$d_{\text{eff}} / \text{mas}$	$\phi_{\text{app}} / (^\circ)$	$\phi_{\text{int}} / (^\circ)$
C1	10.4	5.5	10.4	0.27	16.7	1.6
C2	8.2	6.9	8.3	0.40	19.1	2.4

O'Sullivan 和 Gabuzda<sup>[4]</sup> 使用与本文相同的方法, 测得视向夹角为  $9.3^\circ$ , 与本文基本一致。由表 2 可知 C1 和 C2 视向夹角临界值  $\theta_c$  分别为  $5.5^\circ$  和  $6.9^\circ$ , 差异主要来自不同成分视速度不同。Volvach 等人<sup>[2]</sup> 在双黑洞模型框架下, 计算得视向夹角为  $1.8^\circ$ 。而 Jorstad 等人<sup>[3]</sup> 利用成分流量变化的多普勒因子得到视向夹角  $1.5^\circ$ , 均比我们的结果小很多。Jorstad 等人<sup>[3]</sup> 得到喷流张角为  $3.5^\circ$ , 与 O'Sullivan 和 Gabuzda<sup>[4]</sup> 得到的结果相近, 后者得到的喷流张角为  $4.4^\circ$ 。本文计算喷流张角为  $1.6^\circ$  和  $2.4^\circ$ 。实际上, 这两个成分所在位置的横截面要比成分的面积更大, 所以真实喷流张角应大于该值。

### 3.3 射电流量与 $\gamma$ 射线流量的关联

在本节, 我们通过使用相对涨落<sup>[35]</sup>方法, 研究射电核心和  $\gamma$  射线光变曲线的联系。由于该源的射电总流量是由其核心主导, 因此总流量的变化与射电核心流量变化基本一致。图 6 给出射电核心和  $\gamma$  射线在 2017 年 5 月—2021 年 5 月期间的光变曲线。我们发现在 2018 年 10





注: 图中红线标示两个时段的分界线。

图 6 a) 43 GHz 射电核心的流量密度随时间变化; b)  $\gamma$  射线的光变曲线

月—2021年5月期间(时段2), 射电核心和 $\gamma$ 射线流量变化相比2018年10月前(时段1)均有明显增强。

某一观测量的相对涨落为:

$$F_{\text{var}} = \sqrt{\frac{S^2 - \langle \sigma_{\text{err}}^2 \rangle}{\langle x \rangle^2}}, \quad (11)$$

其中,  $S^2$ ,  $\langle \sigma_{\text{err}} \rangle$ ,  $\langle x \rangle$  分别是观测量方差、平均误差和平均值。相对涨落的不确定性可由 Poutanen 等人<sup>[36]</sup>的工作给出:

$$\Delta F_{\text{var}} = \sqrt{F_{\text{var}}^2 + \text{err}(\sigma_{\text{NXS}}^2)} - F_{\text{var}}, \quad (12)$$

其中,  $\text{err}(\sigma_{\text{NXS}}^2)$  是归一化方差不确定度<sup>[37]</sup>, 具体形式如下:

$$\text{err}(\sigma_{\text{NXS}}^2) = \sqrt{\left( \sqrt{\frac{2}{N}} \frac{\langle \sigma_{\text{err}}^2 \rangle}{\langle x \rangle^2} \right) + \left( \sqrt{\frac{\langle \sigma_{\text{err}}^2 \rangle}{N}} \frac{2F_{\text{var}}}{\langle x \rangle} \right)^2}. \quad (13)$$

通过上述公式, 时段1和时段2的相对涨落  $F_{\text{var}1}$  和  $F_{\text{var}2}$  结果列于表3。

相对涨落可以用来衡量流量变化的剧烈程度。通过表3可以看出, 不论是射电核心流量还是 $\gamma$ 射线流量都是时段2内相对涨落更大。对射电核心流量, 时段2相对涨落是时段1的2倍; 而在 $\gamma$ 波段, 时段2相对涨落只是时段1期间的1.2倍左右。通过对时段2内的射电

核的流量变化与  $\gamma$  射线流量变化进行离散互相关分析<sup>[39]</sup>，我们发现核成分的光变领先  $\gamma$  射线光变约为 10 d，意味着  $\gamma$  射线辐射区的位置更靠近黑洞。

表 3 射电核心和  $\gamma$  射线不同时段的相对涨落

不同时段	射电核心相对涨落/(%)	$\gamma$ 流量相对涨落/(%)
$F_{\text{var1}}$	$19.2 \pm 3.4$	$63.4 \pm 0.8$
$F_{\text{var2}}$	$39.2 \pm 1.9$	$79.8 \pm 0.1$

## 4 总结与展望

本文利用 VLBA 在 5 GHz, 8 GHz, 22 GHz 和 43 GHz 的多频观测数据以及 43 GHz 归档数据, 并结合费米卫星 4 期源表 (4FGL) 中  $\gamma$  射线监测数据, 研究了 S4 0954+65 射电喷流的性质。我们发现在 2018 年 6 月其射电核心表现出平谱性质, 而在 2019 年 11 月, 射电核心谱出现倒转。通过 SSA 拟合, 发现倒转频率约为  $(45 \pm 2)$  GHz, 倒转频率处的流量密度约为 1.3 Jy, 光薄区谱指数为  $-0.1$ , 由此得出磁场强度  $B_{\text{SSA}}$  为  $(3.3 \pm 0.9) \times 10^{-4}$  T, 与均分磁场  $0.3 \times 10^{-4}$  T 一致。

喷流成分在 2017 年 5 月—2021 年 5 月间的分布与 Morozova 等人<sup>[12]</sup> 在 2008 年 8 月—2012 年 4 月期间观测到的结果一致, 都具有双路径结构。两条路径间夹角几乎不改变, 约为  $30^\circ$ 。在 2017 年 5 月—2021 年 5 月间, S4 0954+65 喷流中有两个明显的运动成分 C1, C2 和一个靠近核心的静止成分 C3。我们通过分析 C1 和 C2 成分的运动来对该喷流的性质做出进一步限制, 发现喷流最小洛伦兹因子为 10.4 和 8.2, 对应的视向夹角分别为  $5.5^\circ$  和  $6.9^\circ$ , 多普勒因子为 10.4 和 8.3, 喷流张角为  $1.6^\circ$  和  $2.4^\circ$ 。通过计算流量密度的相对涨落, 我们发现在 2018 年 10 月—2021 年 5 月期间射电核心与  $\gamma$  射线变得更活跃, 相比而言, 射电核心流量密度的涨落更大。核成分的光变领先  $\gamma$  射线光变约 10 d。

我们发现在一些 BL Lac 天体中 (如 S5 0716+714) 也存在类似 S4 0954+65 的双路径喷流结构, 同时发现它们运动路径转折都发生在邦迪半径附近, 这种转折可能与黑洞在此处的影响的变化有关。未来对类似 BL Lac 天体大样本研究将有助于理解这种现象。

### 致谢

感谢审稿老师的修改建议, 使本文质量得以提高。同时也感谢《天文学进展》期刊编辑老师在论文审稿和接收过程中的细致工作。

### 参考文献:

- [1] Lister M L, Homan D C, Hovatta T, et al. ApJ, 2019, 874: 43

- [2] Volvach A E, Bychkova V S, Larionov M G, et al. *ARep*, 2016, 60: 1035
- [3] Jorstad S G, Marscher A P, Morozova D A, et al. *ApJ*, 2017, 846: 98
- [4] O'Sullivan S P, Gabuzda D C. *MNRAS*, 2009, 400: 26
- [5] Becerra G J, Acosta-Pulido J A, et al. *MNRAS*, 2021, 504: 5258
- [6] Fan Z H, Cao X, *ApJ*, 2004, 602: 103
- [7] Wagner S, Sanchez-Pons F, Quirrenbach A, et al. *A&A*, 1990, 235: 1
- [8] Wagner S J, Witzel A, Krichbaum T P, et al. *A&A*, 1993, 271: 344
- [9] Heidt J, Wagner S J. *A&A*, 1996, 305: 42
- [10] Raiteri C M, Villata M, Tosti G, et al. *A&A*, 1999, 352: 19
- [11] Marchili N, Krichbaum T P, Liu X, et al. *A&A*, 2012, 542: 121
- [12] Morozova D A, Larionov V M, Troitsky I S, et al. *AJ*, 2014, 148: 42
- [13] Bachev R. *MNRAS*, 2015, 451: L21
- [14] MAGIC Collaboration. *A&A*, 2018, 617: A30
- [15] Marscher A P, Jorstad S G, D'Arcangelo F D, et al. *Nature*, 2008, 452: 966
- [16] Raiteri C M, Villata M, Larionov V M, et al. *MNRAS*, 2021, 504: 5629
- [17] Wehrle A E, Grupe D, Jorstad S G, et al. *ApJ*, 2016, 816: 53
- [18] Spergel D N, Bean R, Doré O, et al. *ApJS*, 2007, 170: 377
- [19] Jiang W, Shen Z, Jiang D, et al. *ApJL*, 2018, 853:6
- [20] <http://www.bu.edu/blazars/VLBAproject.html>, 2023
- [21] Jorstad S G, Marscher A P, Lister M L, et al. *AJ*, 2005, 130: 1418
- [22] <https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/LightCurveRepository/>, 2023
- [23] Cassaro P, Stanghellini C, Bondi M, et al. *A&AS*, 1999, 139 :601
- [24] Casadio C, Krichbaum T, Marscher A, et al. *Galaxies*, 2017, 5:67
- [25] Turler M, Courvoisier T J, Paltanis. *A&A*, 2000, 361: 850
- [26] Marscher A P. *ApJ*, 1983, 264: 296
- [27] Feng S W, Shen Z Q, Cai H B, et al. *A&A*, 2005, 433: 815
- [28] Pacholczyk A G. *Radio astrophysics*. San Francisco: Freeman, 1997: 97
- [29] Karamanavis V, Fuhrmann L, Krichbaum T P, et al. *A&A*, 2016, 586: 60
- [30] Lister M L, Cohen M H, Homan D C, et al. *AJ*, 2009, 138: 1874
- [31] Larionov V M, Jorstad S G, Marscher A P, et al. *ApJ*, 2013, 768: 40
- [32] Xu Q, Gong B, Liu M, et al. *ApJS*, 2021, 252: 25
- [33] Kim D M, Kravchenko E V, Kutkin A M, et al. *ApJ*, 2022, 925: 64
- [34] Urry C M, Padovani P. *PASP*, 1995, 107: 803
- [35] Schleicher B, Arbet-Engels A, Baack D, et al. *Galaxies*, 2019, 7: 62
- [36] Poutanen J, Zdziarski A, Ibragimovet A. *MNRAS*, 2008, 389: 1427
- [37] Vaughan S, Edelson R, Warwick R S, et al. *MNRAS*, 2003, 345: 1271
- [38] <http://www.bu.edu/blazars/BEAM-ME.html>, 2023
- [39] Edelson R A, Krolik J H. *ApJ*, 1988, 333: 646

## High Resolution Observation Study of S4 0954+65 Radio Jet

WANG Gan<sup>1,2,3</sup>, LU Ru-sen<sup>1,4</sup>, SHEN Zhi-qiang<sup>1,4</sup>, JIANG Wu<sup>1,4</sup>,  
HUANG Lei<sup>1,5</sup>, ZHAO Shan-shan<sup>1</sup>, YAN Xi<sup>1,3</sup>, CHENG Yuan<sup>1,2,3</sup>

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 5. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** S4 0954+65 is a typical BL Lac object. It shows quasi-simultaneous flares in radio, optical and gamma-ray bands. We performed multi-frequency VLBI observations of S4 0954+65 in June 2018 and November 2019 with the Very Long Baseline Array (VLBA) in the United States. We found significant changes in the radio core spectrum during these observations and estimated the magnetic field strength in the core region to be  $(3.3\pm 0.9)\times 10^{-4}$  T using a synchrotron self-absorption model.

By analyzing archival VLBA 43 GHz data taken from May 2017 to May 2021, we identified three prominent jet components with two components showing apparent superluminal motion and one being stationary near the core. For these two moving jet components, the viewing angles are  $5.5^\circ$  and  $6.9^\circ$ , and the opening angles are  $1.8^\circ$  and  $2.4^\circ$ , respectively. The distribution of all jet components indicates that they move primarily along two distinct paths, consistent with previous finding of Morozova et al. Our analysis shows that both the 43 GHz core flux and  $\gamma$ -ray flux become more variable between October 2018 and May 2021, indicating that the VLBI core flux variations correlates with the  $\gamma$ -ray flux variations.

**Key words:** BL Lac objects; jet structure; magnetic field of core; jet components