

# J1855+0251 的高分辨率结构和射电谱

丁婉越, 蔡宏兵\*, 刘航  
江苏师范大学中俄学院, 江苏徐州, 中国  
\*通讯作者

**【摘要】** J1855+0251 是一颗遥远的类星体, 其结构和射电谱尚未被详细研究。利用 VLBA 对类星体 J1855+0251 在五个频段上进行了高分辨率观测和分析。通过确认核心结构、测量喷流运动、研究核位置偏移以及光谱曲线特性的分析, 获得了该类星体的精确结构和运动特性。研究表明, J1855+0251 核心区域存在明显的同步自吸收现象, 喷流结构明显沿东南方向延伸; 确认了该喷流的视本征速度为 0.61mas/年, 视速度为 0.49c, 喷流的视角约为 46°, 还发现了明显与频率相关的核心位置偏移以及多波段光曲线。

**【关键词】** 类星体; VLBA; 喷流; 射电谱; 活动星系核

**【基金项目】** 大学生创新创业训练计划 (编号: XSJXCX15128)

## 1. 介绍

类星体 J1855+0251 是一个河外高亮度射电源[1]。VLBI 观测表明, 该源的核心区域密度非常高, 具有多波段辐射特征, 并且可能具有显著的光变和喷流活动[2,3]。然而, 对于这一类星体的高分辨率成像和深入研究仍然相对缺乏。为此, 我们利用 VLBA 多波段、多历元观测数据对 J1855+0251 进行了详细的研究。

近十年来, 关于类星体的结构和光曲线的研究越来越多。Kellermann 等人[4]利用 VLBA 观测技术分析了射电核的流量密度分布及其时间变化特征。Mooley 等人[5]利用基于 VLA 射电巡天项目的 CNSS 研究工作, 借助光学光变曲线和多波段数据对射电源进行分类, 随后对比了光学暂现源与射电暂现源的出现率, 得出射电光变曲线的主要来源是 AGN 喷流撞击引起的耀斑。Homayouni 等人[6]利用 SDSS 项目的长期多色光变曲线序列数据, 通过光变曲线的时间延迟和多色光变曲线特征, 推导出了吸积盘的温度分布、结构和温度梯度。Baghel 等人[7]基于 VLA 的 6GHz 偏振观测数据, 分析了 9 个射电噪声类星体的偏振特征和射电结构。Lu 等人[8]利用全球毫米波甚长基线干涉测量阵列, 在 3.5mm 波段观测到黑洞周围宽约 64 微角秒的环状结构。Yan 等人[9]通过 VLBA 多波段观测, 分析了 M104 喷流在亚秒差距尺度下的运动学特征及核区性质, 发现该喷流具有亚相对论性, 并揭示了毫米波辐射可能以 ADAF 机制为主导。

本文利用 2.3GHz、4.5GHz、8GHz 和 22GHz 波段的 VLBA 数据, 研究类星体 J1855+0251 致

密核区的性质、喷流的运动学特征以及光变曲线特征。本文旨在通过高分辨率成像技术确认类星体 J1855+0251 的核区结构特征, 并进一步测定其喷流运动状态、核区位置变化及光变曲线特征, 从而填补现有该类星体图像数据库中相关数据和辐射谱的研究空白。

## 2. 观测和数据处理

本文利用 NRAO 网站和 ASTROGEO 网站提供的数据, 聚焦于类星体 J1855+0251 在 14 个观测历元、4 个波段下的结构特征与物理参数。表 1 列出了 J1855+0251 的基本观测参数, 其中第一列为观测波段, 第二列为观测频率, 第三列为观测历元, 第四列为观测时间, 第五列为带宽, 第六列为偏振特性。

表 1. J1855+0251 观测参数

Waveband (1)	$\nu$ (GHz) (2)	Epoch (yr) (3)	observation time (min) (4)	Bandwidth (Mhz) (5)	Polarization (6)
S	2.3 GHz	2002.05.15	4	8	1
		2017.09.26	10	32	1
C	4.3 GHz	2018.06.19	24	32	1
		2022.06.14	20	32	1
	7.6 GHz	2013.12.02	69	8	4
		2018.06.19	24	128	1
X	8.4 GHz	2018.12.01	24	32	1
		2002.05.15	4	8	1
		2010.02.13	1	32	1
K	22.2 GHz	2017.09.26	10	32	1
		2013.11.06	23	56	4
		2014.04.10	20	56	4
		2014.07.22	20	56	4
		2014.09.20	24	56	4
		2014.11.01	20	56	4
		2014.12.05	23	56	4
		2015.04.18	23	56	4

## 2.1 数据校准与制图

本研究采用 NRAO 开发的 AIPS 软件[10] 和 DIFMAP 软件[11]进行数据处理。首先在 AIPS 中进行初始校准, 包括幅度校准、相位校准、钟漂校准及大气延时校准, 然后将校准后的数据导出至 DIFMAP 软件进行精细成图, 获得高分辨率图像。

我们采用圆高斯模型对每个历元和波段的图像数据进行拟合, 得到了喷流结构与核区的精确参数。根据其辐射特性, 我们将尺寸最小、亮温最高的中间区域标记为 k 分量。其余喷流分量根据其分量 k 的距离分别标记为 d 分量和 e 分量, 最终得到的结构如图 1 所示。

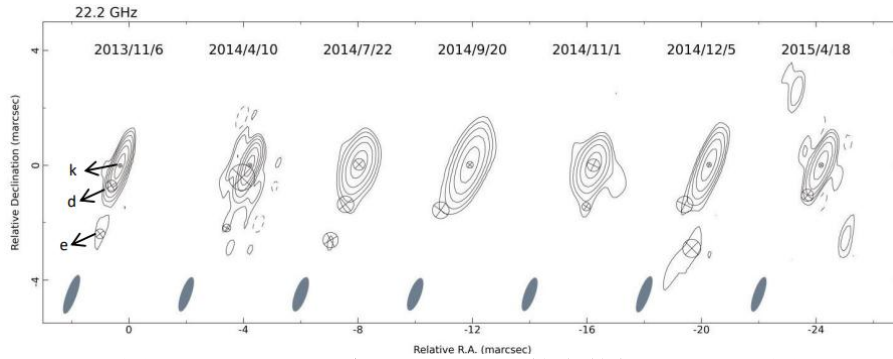


图 1. J1855+0251 在 22.2GHz 下的自然权重 VLBA 图

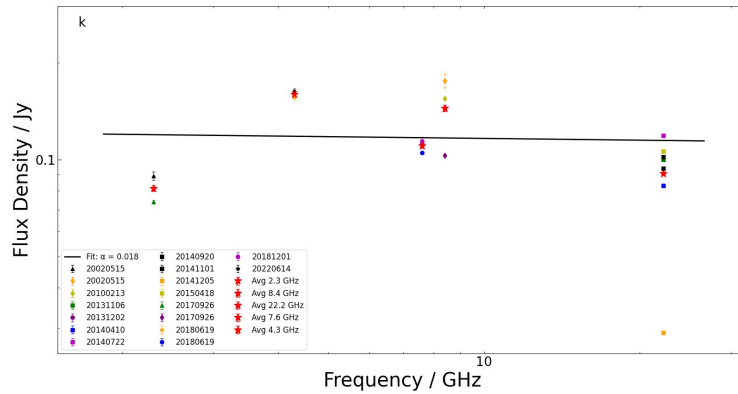
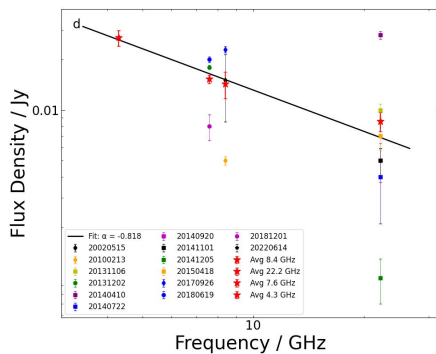


图 2. k 分量能谱

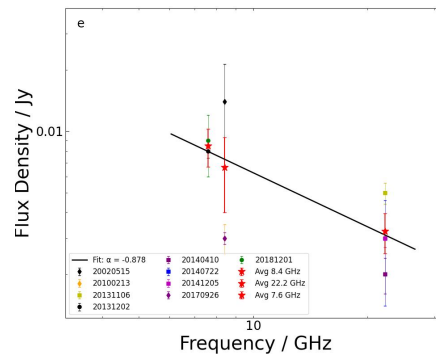
在 22.2GHz 频段下探测到的分量 d 和 e 分量在 2.3GHz 和 4.3GHz 频段未能被清晰识别。这是由于 2.3GHz 和 4.3GHz 频段的分辨率较低, 且 d 和 e 分量的流量密度较小, 导致这两个分量在这两个低频段的信号相对微弱, 甚至难以被探测。而在 8.4GHz 频段下, 可以清楚地检测到 d 和 e 分量。

## 2.2 光谱

我们在多个频段下检测到了 k, d, e 三个分量, 这使得我们能够对这些 VLBA 分量进行光谱分析。我们绘制了类星体 J1855+0251 中 k 分量及其他分量的能谱图, 其中图 2 展示了 k 分量在所有观测历元和所有波段的辐射能谱; 图 3 左侧为 d 分量在所有历元和所有波段的辐射能谱; 图 3 右侧为 e 分量在所有历元和所有波段的能谱。在这些能谱图中, 采用的拟合公式为  $S_\nu = \nu^\alpha$ 。



(1) d 分量能谱



(2) e 分量能谱

图 3. 能谱图

### 2.3 自行运动和核区位移

图4展示了在22.2GHz频段下测得的类星体J1855+0251喷流运动, 并进行了简单的线性拟合。由于第2个与第7个历元的数据误差较大, 为了保证数据的可靠性, 本文将这两个历

元排除在对比分析之外, 只采用其余误差较小的历元数据进行计算。最终得到喷流d分量和e分量的自行运动速度, 分别为0.99毫角秒/年和0.23毫角秒/年。

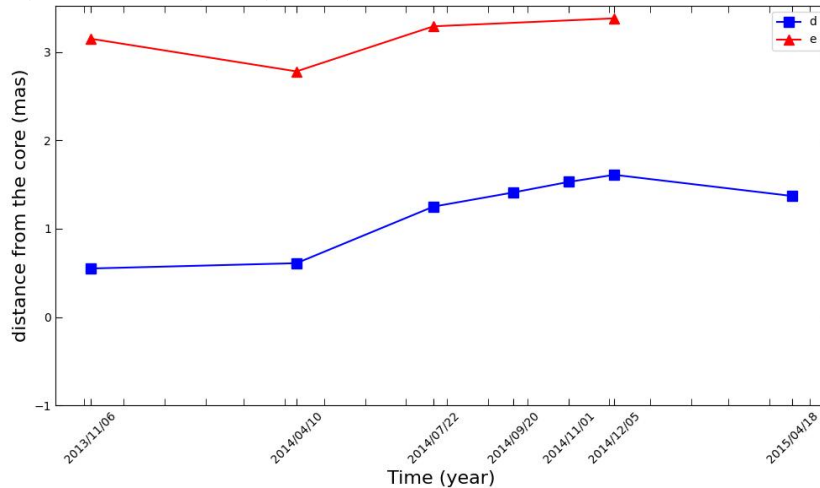


图 4. 22GHz J1855+0251 喷流中各分量径向距离的时间变化

从7.6GHz和22.2GHz的拟合数据中可以发现, 随着观测频率的增加, 各分量与核区k的距离呈增大的趋势。这表明在不同频率下, 分量d和分量e到核区k的距离存在显著变化。受同步自吸收效应的影响, 核区的位置可能会发生与频率相关的偏移。这种偏移效应会导致在VLBI图像中射电核的位置不再与喷流顶点完全重合, 而是随着频率的变化改变自身的相对位置。这一现象或许可以解释d、e分量在不同频段下距离核区k的位置变化规律。

### 2.4 光变曲线

结合 Astrogéo 网站的数据与本研究的观测图表数据, 我们在图 5 中给出了类星体 J1855+0251 的光变曲线, 其中 8.6GHz 频段的观测历元数量更多。通过比较同一历元不同频段的光变曲线趋势, 可以清楚地观察到它们呈现出高度相似的变化规律。图 5 不仅展示了总流量密度随时间的变化趋势, 还进一步给出了 VLBI 核区流量密度的长期演化特征。

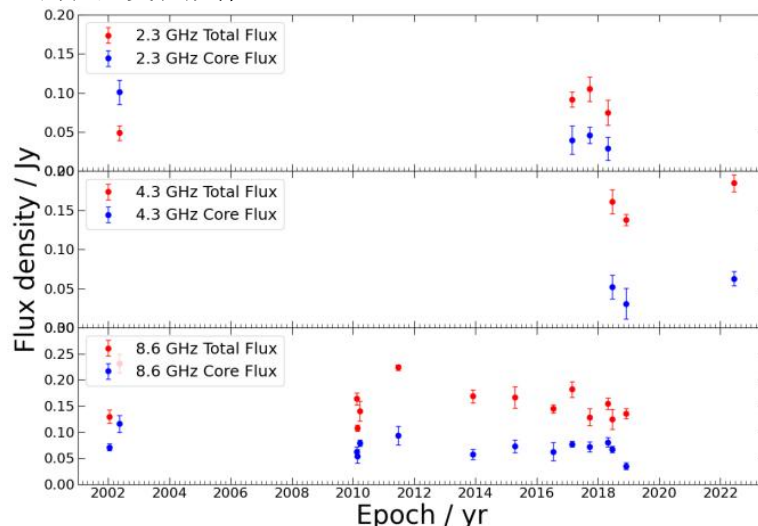


图 5. 类星体 J1855+0251 流量密度变化曲线。上、中、下是分别在 2.3、4.3 和 8.6 GHz 上流量密度变化。

在8.6GHz的观测中, 我们一共探测到三次显著的射电流量爆发事件。第一次爆发发生于2002年5月14日, 此次爆发的流量密度达到

此前的两倍以上, 特征十分显著。该观测历元同时存在2.3GHz低频段的观测数据, 数据显示核区流量密度实际上超过了总流量密度。另外

两次射电爆发分别发生在2011年6月12日和2017年2月24日，对应的核区流量密度均达到了峰值。

### 3.讨论

经归纳分析，我们发现k分量的能谱指数为正值，而d和e分量的能谱指数为负值。结合J1855+0251致密结构特征，且图6也证明了k分量在低频段存在谱反转现象，表明该区域可能存在自吸收效应。因此我们将k分量判定为J1855+0251的核区，记为核区k。

2.3GHz、4.3GHz、7.6GHz、8.4GHz和22.2GHz频段的平均峰值流量密度分别为0.096Jy、0.163Jy、0.10275Jy、0.14553Jy和0.092Jy。本研究采用自吸收模型 SSA： $S_\nu = S_0 \nu^{2.5} [1 - \exp(-\tau_s \nu^{\alpha-2.5})]$  [12] 进行拟合分析，式中 $S_\nu$ 为频率 $\nu$ 处的峰值流量密度， $S_0$ 是当1GHz处SSA的光学厚度 $\tau_s \gg 1$ 时 $S_\nu$ 在1GHz频段的流量密度。拟合结果 $S_0 \approx 0.0141\text{Jy}$ ，最佳拟合参数 $\alpha = -0.44$ ， $\tau_s = 23.78$ ，对应的拟合曲线如图6所示。我们估算出谱反转频率 $\nu_m \approx 4.62\text{GHz}$ ，峰值流量密度为0.15Jy。

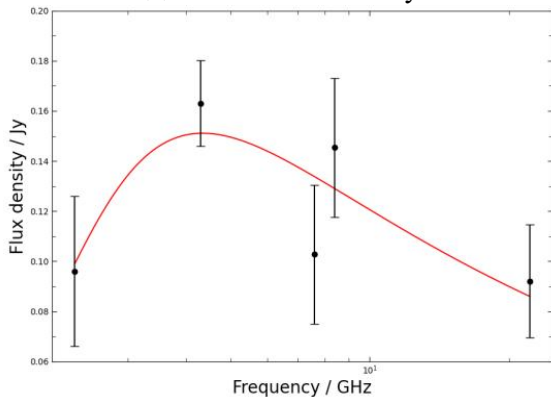


图 6. J1855+0251 SSA 拟合图

从图6中我们可以清楚地看到，这三个频段下的总流量密度与核区流量密度的光变曲线呈现出相似且一致的变化趋势。这种一致性表明，天体的总辐射可能主要由核区驱动，核区辐射占主导地位。这一现象进一步验证了喷流可能起源于核区，其辐射特征受核区物理过程的控制。我们还可以看到，光变曲线的辐射强度存在从高频到低频的时间延迟效应，这可能是由喷流内部激波或磁场扰动引发的同步辐射增强所致。激波在喷流内部的传播会加速电子并改变它们的能量分布，导致高频辐射迅速增强，而低频辐射则产生渐进式响应。在较低频率，总流量密度的最大变化幅度不超过0.05Jy，而在8.6GHz频段，总流量密度的最大变化幅度达到0.1Jy。不同频段的光变在时

间尺度和变化幅度上存在显著差异，这表明光学厚度效应可能在光变过程中发挥重要作用。在同步辐射主导的机制下，高频辐射通常来源于喷流的光学薄区，而低频辐射则可能受到光学厚度的影响，使其变化更为缓慢。

### 4.总结

通过对类星体J1855+0251的高分辨率成像观测，我们发现该类星体具有清晰的核-喷流结构，其核区存在强烈的同步自吸收现象，且能谱指数为正值，进一步证实了该区域作为辐射核的物理属性。喷流分量d和e的能谱指数均为负值，说明它们处于光学薄状态，这两个分量的视速度接近光速但未呈现超光速特征。喷流主要沿东南方向延伸，喷流视角约为 $46^\circ$ ，这与典型致密射电源的特征一致。在多频段观测中，我们发现核区位置存在显著的频率相关偏移，表明核区与喷流顶点之间存在和频率相关的几何结构差异。核区的平均偏移量为0.48毫角秒。J1855+0251的光变现象主要由喷流内部激波扰动、核区吸积活动的变化和光学厚度效应共同驱动。其中，喷流内部激波可能是光变现象的主要成因，其作用机制包括加速电子、扰动磁场以及增强同步辐射强度。

### 参考文献

- [1] Reich N C, Levine A J. Growth regulation of a cellular tumour antigen, p53, in nontransformed cells[J]. Nature, 1984, 308(5955): 199-20.
- [2] Reid M J, Menten K M, Brunthaler A, et al. Trigonometric parallaxes of massive star-forming regions. I. S 252 & G232. 6+ 1.0[J]. The Astrophysical Journal, 2009, 693(1): 397.
- [3] Mai X, Zhang B, Reid M J, et al. The parallax and 3D kinematics of water masers in the massive star-forming region G034. 43+ 0.24[J]. The Astrophysical Journal, 2023, 949(1): 10.
- [4] Kellermann K I, Condon J J, Kimball A E, et al. Radio-loud and Radio-quiet QSOs[J]. The Astrophysical Journal, 2016, 831(2): 168.
- [5] Mooley K P, Hallinan G, Bourke S, et al. The Caltech-NRAO Stripe 82 Survey (CNSS) paper. I. The pilot radio transient survey in 50 deg<sup>2</sup>[J]. The Astrophysical Journal, 2016, 818(2): 105.
- [6] Homayouni Y, Trump J R, Grier C J, et al. The sloan digital sky survey reverberation mapping project: accretion disk sizes from

- continuum lags[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 880(2): 126.
- [7] Baghel J, Kharb P, Ho L C, et al. A polarimetric study of nine PG quasars with the VLA[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023, 519(2): 2773-2795.
- [8] Lu R S, Asada K, Krichbaum T P, et al. A ring-like accretion structure in M87 connecting its black hole and jet[J]. *Nature*, 2023, 616(7958): 686-690.
- [9] Yan X, Lu R S, Jiang W, et al. Multifrequency Very Long Baseline Interferometry Imaging of the Subparsec-scale Jet in the Sombrero Galaxy (M104)[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, 965(2): 128.
- [10] Schwab F R, Cotton W D. Global fringe search techniques for VLBI[J]. *Astronomical Journal* (ISSN 0004-6256), vol. 88, May 1983, p. 688-694., 1983, 88: 688-694.
- [11] Hook R N, Fruchter A S. *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, ed. G. Hunt, & HE Payne[C]//ASP Conf. Ser. 1997, 125: 147.
- [12] Cai H B, Shen Z Q, Sudou H, et al. Multi-epoch VLBA observations of 3C 66A[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, 468(3): 963-971.