

文章编号: 2095-6134(2023)01-0079-05

致密射电源 0400+258 的毫角秒尺度偏振研究*

李宇航¹, 张海燕^{2†}, 陈如荣², 陈天禄¹

(1 西藏大学 宇宙线教育部重点实验室, 拉萨 850000; 2 中国科学院国家天文台 中国科学院 FAST 重点实验室, 北京 100101)
(2021 年 11 月 17 日收稿; 2022 年 1 月 5 日收修改稿)

Li Y H, Zhang H Y, Chen R R, et al. VLBI polarization study of compact radio sources 0400+258 [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2023, 40(1): 79-83. DOI:10.7523/j.ucas.2022.001.

摘要 利用美国甚长基线干涉阵, 对致密射电源 0400+258 进行 5 GHz 和 8 GHz 双频段偏振观测, 获得毫角秒尺度的辐射强度分布图像, 并首次得到这个射电源在 5 GHz 和 8 GHz 频段的偏振矢量分布结果。源 0400+258 呈现单侧核—喷流结构, 偏振辐射集中在射电核附近。通过 4 个频率的偏振分布, 首次获得该源毫角秒尺度的旋转量分布。移除介质的影响后, 得到该源内禀磁场结构, 磁场方向大致沿着喷流方向。

关键词 偏振观测; 致密射电源; 磁场结构

中图分类号: P161.3 文献标志码: A DOI:10.7523/j.ucas.2022.001

VLBI polarization study of compact radio sources 0400+258

LI Yuhang¹, ZHANG Haiyan², CHEN Rurong², CHEN Tianlu¹

(1 Key Laboratory of Cosmic Rays of Ministry of Education, Tibet University, Lhasa 850000, China; 2 CAS Key Laboratory of FAST, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Using the very long baseline array, we perform the double-band polarization observations of the compact radio source 0400+258 at 5 GHz and 8 GHz. We present its mas-resolution total intensity maps and, for the first time, its polarization maps at 5 GHz and 8 GHz frequency bands. The source 0400+258 displays one-sided core-jet structure, and the polarization emission is firmly detected in a region near the core. Besides, by fitting the polarization maps at four frequencies, the mas-scale rotation measure of the source is obtained for the first time. After removing the rotation measure, the intrinsic magnetic field of the source is acquired, which demonstrates that the magnetic field direction is roughly parallel to the direction of the jet.

Keywords polarization observations; compact radio sources; magnetic field structure

吉赫兹峰谱 (gigahertz peaked spectrum, GPS) 源是光学薄区域谱指数 $\alpha \geq 0.5$ ($S \propto \nu^{-\alpha}$) 的致密射电源, 约占河外射电源数目的 10%, 线尺度一般小于 1 kpc。由于同步自吸收或自由—

自由吸收效应, 它们的射电频谱会出现低频反转, 并导致峰形结构, 峰值频率位于 500 MHz ~ 10 GHz^[1]。关于 GPS 源, 目前一般认为: 1) GPS 源是比较年轻的射电源, 处于演化的早期, 未来会

* 国家自然科学基金 (12041301, U1831128) 资助

† 通信作者, E-mail: hyzhang@bao.ac.cn

演化成致密陡谱 (compact steep spectrum, CSS) 源。2) GPS 源与周围稠密的介质有较强烈的相互作用,从而限制了它们的尺度。3) GPS 源可能是暂现源或间歇源。因此,对 GPS 源射电结构和辐射情况的研究,可以促进对它们的形态结构、演化和周围物理环境的认识^[2]。此外,由于它们与周围星系介质有较强的相互作用,偏振观测可以观测源的偏振情况和反推磁场结构,更加深入地了解源喷流和介质的相互作用^[2-7]。

我们从 Fomalont 等^[8]在 1996 年开展的美国甚长基线干涉阵 (very long baseline array, VLBA) 5 GHz 观测项目中选取射电源 0400+258 进行研究。该源属于类星体和 GPS 源^[9],红移为 2.109。5 GHz 频段 VLBA 观测显示该源呈单侧核-喷流结构,喷流向东北方向延伸,结构较扭曲,有明显的节点,核射电辐射占主导^[8]。43 GHz 频段 VLBA 观测显示射电核尺度约为 0.21 mas (milliarc seconds,毫角秒),喷流向东南方延伸约 2 mas,再转向东北方^[10]。源 0400+258 毫角秒尺度有明显的喷流,形态结构比较扭曲,推测它们与周围的介质有较为强烈的相互作用,便于研究源与周围环境的相互作用。美国国立射电天文台 1.4 GHz 频段的 VLA 巡天项目 (NVSS) 观测到该源有一定的偏振辐射^[11],而 Gardner 等^[12-13]利用澳大利亚 Parkes 射电望远镜于 5、2.7、1.4 GHz 频段的偏振观测得到该源的偏振度分别为 4.5%、3.0% 和 3.9%,并得到源的旋转量 (rotation measure, RM) 的值为 42.0 rad/m²。目前针对该源 0400+258 的 5 GHz 和 8 GHz 频段的毫角秒尺度的偏振观测不是很多,通过 VLBA 5 GHz 和 8 GHz 同时的偏振观测,可以得到它们毫角秒尺度的射电辐射强度图和偏振图,并获得旋转量分布,进而研究其射电结构、内禀的偏振情况和磁场结构,并分析喷流与介质的相互作用。本文采用的哈勃常数 $H_0 = 71 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$,物质密度参数 $\Omega_m = 0.27$,暗能量密度参数 $\Omega_\Lambda = 0.73$ 。

1 观测与数据处理

2004 年 2 月 25 日,我们利用 VLBA 的 10 面天线对一系列射电源进行观测,源 0400+258 便是其中之一,观测代码为 BZ031。采用双偏振模式,观测频段为 5 GHz 和 8 GHz,为获得目标源的旋转量 RM 分布,5 GHz 分为 4.6 GHz 和 5.0 GHz 两个频段,8 GHz 分为 7.9 GHz 和 8.8 GHz 两个频

段,每个频段分为 4 个中频,每个中频有 16 个通道,通道带宽为 8 MHz,1 bit 量化。源 0400+258 每个频段的累计观测时长约为 23 min,总共观测了约 1.5 h。观测数据由位于美国索科里 (Socorro) 的 FX 架构相关处理器进行相关,输出 UVFITS 数据用于后续处理^[14]。

参照 AIPS (astronomical image processing system) 软件包的使用说明^[15],利用 AIPS 对观测数据进行了处理,首先进行数据编辑、幅度预校准、视差角校准、带通校准、仪器相位校准和条纹拟合等步骤,然后将数据进行平均,再应用校准和编辑数据,然后自校准和成图。之后利用源 DA193 进行设备偏振 (D-term) 改正,并利用源 1308+326 进行绝对偏振位置角改正 (引用 VLBA/VLA 偏振角校准网站: <http://www.aoc.nrao.edu/~smysers/calibration/>),获得偏振分布图,并通过 AIPS 软件包中 RM 任务得到源旋转量 RM 分布图。

2 结果和分析

通过数据处理,得到了目标源 0400+258 在 4 个观测频率的总流量和偏振观测结果。使用 AIPS 的 JMFIT 命令对目标源进行高斯拟合,得到了模型拟合结果,见表 1。

2.1 流量结构与偏振

图 1(a) 和 1(b) 分别为 5.0 GHz 和 7.9 GHz 观测频率叠加在辐射强度图上的偏振矢量分布图 (1 mas = 8.43 pc)。

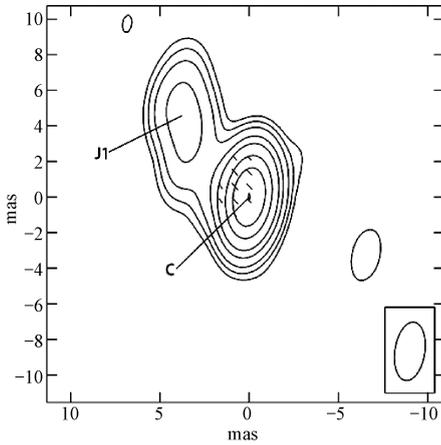
该源呈现单侧核-喷流结构。结合表 1,在 5.0 GHz 观测频率上,源流量结构主要由射电核心区域 C 和喷流上的节点 J1 组成,辐射流量分别占总流量的 85.13% 和 14.87%,喷流向东北方向延伸。本次得到的射电结构符合已有的观测结果^[5],比较稳定。7.9 GHz 观测频率的图像展示了更详细的结构,主要由射电核 C、喷流 J2 和节点 J1 组成,辐射流量分别占总流量的 93.23%、3.93% 和 2.84%。节点可能是喷流与周围介质相互作用的结果。

本研究首次得到了源 0400+258 在 5 GHz 和 8 GHz 频段的毫角秒尺度偏振结构,偏振矢量 1 mas = 3.125 mJy/beam。各个观测频率的偏振观测结果见表 1。结合表 1 和图 1,该源的偏振流量集中在射电核区域,射电核之外的区域偏振流量值小于 3σ ,有较大的不确定性。8 GHz 频段的

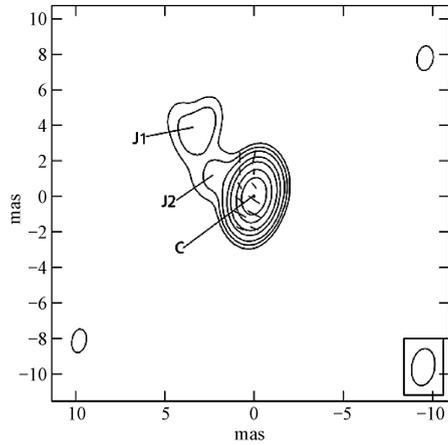
表 1 模型拟合结果

Table 1 Results of model fitting

观测频率/ GHz	子源	半长轴/ mas	半短轴/ mas	方向角/ (°)	角距离/ mas	方位角/ (°)	流量/ mJy	偏振流量/ mJy	偏振度/ %
4.6	C	3.64	2.05	173.72	0.00	0.00	625.49	6.69	1.07
	J1	5.48	2.46	9.63	5.54	37.78	114.46	0.69	0.61
5.0	C	3.32	1.81	172.50	0.00	0.00	649.77	6.32	0.97
	J1	5.57	2.36	9.03	5.47	37.89	113.49	0.44	0.39
7.9	C	2.14	1.36	168.99	0.00	0.00	856.10	8.21	0.96
	J1	2.48	2.06	144.85	4.95	36.88	26.05	0.10	0.38
	J2	3.88	2.23	42.30	2.57	58.23	36.11	0.15	0.42
8.8	C	1.90	1.22	178.57	0.00	0.00	751.00	9.86	1.31
	J1	2.93	1.19	166.34	4.34	37.23	27.29	0.12	0.44
	J2	1.59	0.82	104.49	2.31	57.94	8.49	0.04	0.47



(a) 5.0 GHz 波束为 $3.31 \times 1.68 \text{ mas}^2$, 位置角为 -8.45° ; 辐射强度图峰值流量为 0.605 Jy/beam . 辐射强度图的等强度线依次为峰值流量的 -0.5% , 0.5% , 1% , 2% , 5% , 10% , 25% , 50% 和 99%



(b) 7.9 GHz 波束为 $2.11 \times 1.22 \text{ mas}^2$, 位置角为 -9.25° ; 辐射强度图峰值流量为 0.807 Jy/beam . 辐射强度图的等强度线分布同图 (a)

图 1 叠加在源 0400+258 辐射强度图上的偏振矢量分布图

Fig. 1 Distribution of polarization flux density superposed on the contour images of the total intensity of the sources 0400+258

偏振流量值比 5 GHz 频段稍高,但各个频率处偏振度均为 1% 左右,比较低,而喷流区域未观测到明显的偏振辐射。推测它们周围有较浓密的介质,产生较强的消偏振效应,而有限的分辨率也可能造成低偏振度观测结果。

2.2 RM 和磁场

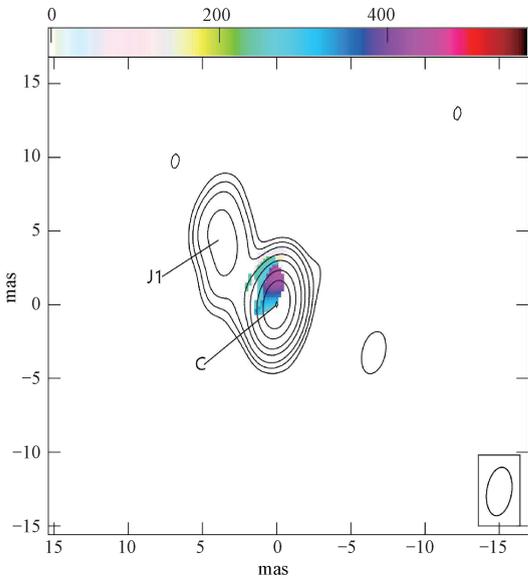
受介质影响,源偏振辐射的偏振角会发生改变,使观测得到的偏振角 χ_{obs} 不等于源辐射内禀的偏振角 χ_0 , 并与观测波长 λ 有关,它们之间的关系为

$$\chi_{\text{obs}} = \chi_0 + \text{RM}\lambda^2. \quad (1)$$

利用 AIPS 的 RM 任务和 4 个观测频率偏振矢量分布,首次得到该源毫角秒尺度旋转量 RM 值分布,见图 2。在本次观测频段上,银河系内介质产生的旋转量可以忽略^[16]。源 0400+258 的旋

转量 RM 集中在射电核靠近喷流处 $3 \text{ mas} \times 4 \text{ mas}$ 范围内。RM 的峰值位于距射电核约 2 mas 处,靠近喷流,峰值为 564.8 rad/m^2 ,并沿喷流方向减少至 -5.4 rad/m^2 ,存在分布梯度,推测偏振旋转量主要由源周围的介质产生。而 RM 值在垂直于喷流方向上存在明显的梯度, RM 值从东南侧的 238.8 rad/m^2 增长至西北侧的 564.8 rad/m^2 ,与 Asada 等^[17]得到的类星体 0836+710 垂直于喷流方向的 RM 值分布情况类似,可能存在螺旋状的磁场结构。

对于核-喷流结构的活跃星系核,射电核一般认为是光学厚的^[5]。根据 5 GHz 和 8 GHz 的辐射强度图,得到了偏振区域的射电频谱的谱指数分布,为 $0.13 \sim 0.77$,且偏振区域集中于核区,偏振度为 1% 左右,比较低,由此认为偏振区域是光

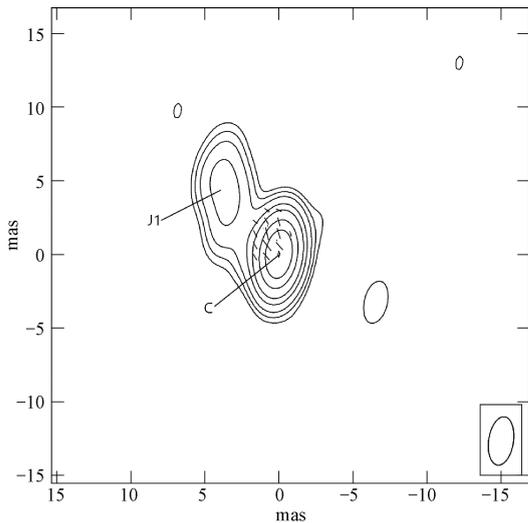


辐射强度图的参数同图 1

图 2 叠加在 5.0 GHz 的辐射强度图上的 RM 分布图

Fig. 2 Distribution of RM superposed on the contour images of the total intensity at 5.0 GHz with the same parameters as Fig. 1

学厚的^[5-6,16-19]。对于光学厚区域,磁场方向与辐射偏振方向平行^[5,16-18]。由此根据得到的 RM 分布,移除介质干扰,得到了该源毫角秒尺度的内禀磁场结构,见图 3。图 3 显示磁场主要集中在射电核靠近喷流的部分,方向大致与喷流方向平行,并在接近喷流处有明显的转向,倾向于沿着喷流



辐射强度图的参数同图 1

图 3 叠加在 5.0 GHz 的辐射强度图上的内禀磁场分布图

Fig. 3 Distribution of intrinsic magnetic field superposed on the contour images of the total intensity at 5.0 GHz with the same parameters as Fig. 1

方向。与 Hovatta 等^[5]和 Hutchison 等^[16]对射电源 0836+710 磁场结构的讨论类似,磁场方向与喷流方向平行可能表明周围介质对源有该方向的作用力,源周围的等离子体介质在喷流方向上被压缩,增强了该方向上的磁场。

3 结论

通过 5 GHz 和 8 GHz 的 VLBI 偏振观测,对目标源 0400+258 的射电结构、偏振性质以及磁场结构进行了研究。该源呈单侧核-喷流结构,有较大尺度的节点结构,射电核的辐射流量占主导。射电结构大体符合以往的观测结果,较稳定。

本研究首次得到源 0400+258 的 5 GHz 和 8 GHz 频段毫角秒尺度的偏振结构。偏振辐射集中在射电核区域,8 GHz 频段偏振流量比 5 GHz 频段大,但偏振度相近,均为 1% 左右,偏振度比较低。文献[1-2]在收集了一系列 CSS 源和 GPS 源的偏振观测结果后指出在 5 GHz 观测频段上这两类源的偏振度一般较低,并指出低观测频段上产生低偏振度结果的原因可能是有限的分辨率或周围浓密介质产生的消偏振效应。Dallacasa 等^[20]也得到了类似的低偏振度结果。本次研究的低偏振度观测结果符合他们的结论。

本次得到的该源毫角秒尺度旋转量 RM 分布,在与喷流平行和垂直的两个方向上都存在分布梯度,RM 可能主要由源周围介质产生,并可能存在螺旋状的磁场。通过偏振区域所处的位置,结合其射电频谱的谱指数分布以及低偏振度的观测结果,判断该区域为光学厚,磁场方向与偏振方向平行。通过得到的 RM 分布,移除介质的影响,得到了该源毫角秒尺度的磁场结构,其方向大致沿着喷流方向,反映了当地喷流的流动方向和能量输送情况。更高频段的偏振观测将有助于进一步研究目标源的内部结构和更详细的磁场结构。

此研究使用了美国甚长基线阵 VLBA 的观测数据,VLBA 属于美国射电天文台(NRAO),由美国联合大学管理,美国国家自然科学基金(NSF)资助。在数据处理过程中使用了软件包 AIPS,由美国国立射电天文台提供。

参考文献

[1] O'Dea C P. The compact steep-spectrum and gigahertz peaked-spectrum radio sources [J]. Publications of the

- Astronomical Society of the Pacific, 1998, 110(747): 493-532. DOI:10.1086/316162.
- [2] O' Dea C P, Saikia D J. Compact steep-spectrum and peaked-spectrum radio sources [J]. The Astronomy and Astrophysics Review, 2021, 29(1): 1-109. DOI:10.1007/s00159-021-00131-w.
- [3] 宋乔, 李庆康, 何香涛, 等. 活动星系核的偏振[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2006, 42(1): 61-65. DOI: 10.3321/j. issn:0476-0301. 2006. 01. 014.
- [4] 张海燕, 南仁东, 平劲松. BL Lac 天体 0735+178: 类星体 3C147 VLBA 偏振观测的偏振校准源[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2000, 36(4): 473. DOI:10.3321/j. issn:0476-0301. 2000. 04. 008.
- [5] Hovatta T, Aller M F, Aller H D, et al. Mojave: monitoring of jets in active galactic nuclei with vlba experiments. Xi. spectral distributions[J]. The Astronomical Journal, 2014, 147(6): 143. DOI:10.1088/0004-6256/147/6/143.
- [6] Kosogorov N A, Kovalev Y Y, Perucho M, et al. Parsec-scale properties of the peculiar gigahertz-peaked spectrum quasar 0858-279 [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021. DOI:10.1093/mnras/stab3579.
- [7] Pötzl F M, Lobanov A P, Ros E, et al. Probing the innermost regions of AGN jets and their magnetic fields with RadioAstron[J]. Astronomy & Astrophysics, 2021, 648: A82. DOI:10.1051/0004-6361/202039493.
- [8] Fomalont E B, Frey S, Paragi Z, et al. The VSOP 5 GHz continuum survey: the prelaunch VLBA observations[J]. The Astrophysical Journal Letters Supplement Series, 2000, 131(1): 95-183. DOI:10.1086/317368.
- [9] Jeyakumar S, Saikia D J, Rao A P, et al. Small-scale structures in compact steep-spectrum and GHz peaked spectrum radio sources[EB/OL]. arXiv: astro-ph/0008288. (2000-8-18) [2021-12-30]. <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0008288>.
- [10] Cheng X P, An T, Frey S, et al. Compact bright radio-loud AGNs. III. A large VLBA survey at 43 GHz [J]. The Astrophysical Journal Letters Supplement Series, 2020, 247(2): 57. DOI:10.3847/1538-4365/ab791f.
- [11] Condon J J, Cotton W D, Greisen E W, et al. The NRAO VLA sky survey [J]. The Astronomical Journal, 1998, 115(5): 1693-1716. DOI:10.1086/300337.
- [12] Gardner F F, Whiteoak J B, Morris D. The linear polarization of radio sources I: observations at wavelengths of 6, 11, 18 and 21 cm[EB/OL]. (1975) [2021-12-30]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1975AuJPA..35...1G/abstract>.
- [13] Tabara H, Inoue M. A catalogue of linear polarization of radio sources[J]. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1980, 39: 379-393.
- [14] Napier P J, Bagri D S, Clark B G, et al. The very long baseline array[J]. Proceedings of the IEEE, 1994, 82(5): 658-672. DOI:10.1109/5.284733.
- [15] National Radio Astronomy Observatory. The AIPS Cook[EB/OL]. (2021-08-31) [2021-12-23]. <http://www.aips.nrao.edu/cook.html>.
- [16] Hutchison J M, Cawthorne T V, Gabuzda D C. Parsec-scale polarization of the jet in quasar 4C 71.07 [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2001, 321(3): 525-536. DOI:10.1046/j.1365-8711.2001.04097.x.
- [17] Asada K, Nakamura M, Inoue M, et al. Multi-frequency polarimetry toward S5 0836 + 710: a possible spine-sheath structure for the jet[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2010, 720(1): 41-45. DOI: 10.1088/0004-637x/720/1/41.
- [18] Zavala R T, Taylor G B. A view through faraday's fog. II. Parsec-scale rotation measures in 40 active galactic nuclei [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2004, 612(2): 749-779. DOI:10.1086/422741.
- [19] Liu Y, Jiang D R, Gu M F, et al. Multifrequency VLBA polarimetry of the high-redshift GPS quasar OQ172 [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, 468(3): 2699-2712. DOI:10.1093/mnras/stx617.
- [20] Dallacasa D, Orienti M, Fanti C, et al. A sample of small-sized compact steep-spectrum radio sources: VLBI images and VLA polarization at 5 GHz[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 433(1): 147-161. DOI: 10.1093/mnras/stt710.