

# 一个重复“变脸”的活动星系核正回到亮的I型状态

吕兵<sup>1\*</sup>, 吴学兵<sup>1,2</sup>

1. 北京大学科维理天文与天体物理研究所, 北京 100871

2. 北京大学物理学院天文系, 北京 100871

\* 联系人, E-mail: lyubing@pku.edu.cn

## A repeating changing-look AGN is returning to a turn-on type I state

Bing Lyu<sup>1\*</sup> & Xue-Bing Wu<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China<sup>2</sup> Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

\* Corresponding author, E-mail: lyubing@pku.edu.cn

doi: 10.1360/TB-2025-0164

活动星系核(active galactic nuclei, AGN)位于活动星系的中心, 具有极高的辐射光度。活动星系核的中心存在一个超大质量黑洞, 它通过吸积周围的物质形成吸积盘, 把吸积物质的部分引力势能转化为电磁辐射。吸积盘外围存在宽发射线区和窄发射线区, 更外围处可能存在环状的尘埃结构<sup>[1]</sup>。根据统一模型, AGN多样的观测特征由少数参数决定, 如黑洞的自旋、吸积盘倾角及是否存在喷流。活动星系核的类型依赖于观测者的视角, 其中观测到有宽发射线的I型AGN的倾角(吸积盘法向和观测者视线之间的夹角)较小, 可以直接观测到宽发射线区。而没有观测到宽发射线的II型AGN倾角较大, 宽发射线区被尘埃环遮挡, 观测者只能看到窄发射线。根据宽的H $\beta$ 谱线相对于窄的[OIII]谱线的相对强度, 还定义了中间类型1.5、1.8和1.9型AGN, 通常认为活动星系核的光谱类型在短时标内不会发生显著的变化。然而, 近年来的光谱观测发现了一些光学波段“变脸”的活动星系核(changing-look active galactic nuclei, CLAGNs), 其光学光谱的宽发射线出乎意料地在几年的时间内就有显著变化。它们会从具有宽(谱线的半高全宽FWHM $\geq 1000$  km/s)和窄发射线的I型AGN转变为仅具有窄线(谱线的FWHM $\leq 500$  km/s)的II型AGN, 或经历相反的变化(从没有宽发射线到变为有)。这些罕见的“变脸”活动星系核自发现后很快就成为天文学研究的一个热点。

随着近几年来越来越多的光学波段CLAGNs被发现, 人们猜测其主要可能的“变脸”机制与内禀吸积率的变化、遮挡

效应以及潮汐瓦解恒星事件(tidal disruption events, TDE)这三种过程有关<sup>[2]</sup>。对于大多数具有低吸收柱密度、低偏振度和显著多波段光变的源来说, 遮挡效应是不被支持的, 而TDE只能应用于有限的情况, 且很难解释一些CLAGNs的罕见重复变脸现象。这些经历过宽发射线反复出现或消失的CLAGNs数量要少得多。目前还不确定是否每个CLAGN都会经历重复变脸事件, 导致这些重复变脸事件的物理机制也不清楚, 这些源几年或更短的变脸时标仍然难以用理论来解释。辐射压不稳定性在狭窄不稳定区域引起的标准Shakura-Sunyaev几何薄吸积盘(Shakura-Sunyaev disk, SSD)和径移主导吸积流(advection-dominated accretion flow, ADAF)之间的转换可能会解释重复变脸的现象。由盘风驱动的大尺度磁场可以有效地移除吸积盘的角动量和能量, 从而可能降低重复CLAGNs发生所需的时标。此外, 重复变脸现象也可能由反冲超大质量黑洞(recoiled supermassive black hole, rSMBH)或密近超大质量双黑洞(close supermassive black hole binaries, CB-SMBHs)来解释。发现更多具有长期光变和多次光谱观测的重复CLAGNs可能有助于解决重复CLAGNs的物理机制与时标问题。

SDSS J101152.98+544206.4(以下简称J1011+5442), 其红移为 $z=0.246$ , 最初在2003年被识别为具有宽巴尔默发射线的I型AGN, 其宽H $\beta$ 发射线在2015年前消失了, 变为1.9型的AGN, 被证认为是一个变脸活动星系核<sup>[3]</sup>。茨威基暂现源设施(Zwicky Transient Facility, ZTF)自2018年以来在g、r和i三

引用格式: 吕兵, 吴学兵. 一个重复“变脸”的活动星系核正回到亮的I型状态. 科学通报, 2025, 70: 2601–2603

Lyu B, Wu X-B. A repeating changing-look AGN is returning to a turn-on type I state (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 2601–2603, doi: 10.1360/TB-2025-0164

个光学波段对J1011+5442进行了长期监测. 我们从ZTF监测数据中发现J1011+5442的光学辐射自2018年逐渐变亮, 在2021年左右达到峰值, 并在随后的光变曲线中有强烈的短期光变. 紧接着, 我们检查了其在广域红外巡天探测器(Wide-field Infrared Survey Explorer, WISE)的中红外波段W1和W2的光变曲线, 其红外辐射强度在2014~2019年间保持较低的水平(暗态), 随后辐射强度逐渐增强. 受其光学和中红外波段光变曲线重新变亮的启发, 我们申请了后续的多次光谱观测: 在2024年1月11日使用国家天文台兴隆2.16米望远镜(XLT)、在2024年2月4日和7日使用云南天文台丽江2.4米望远镜(LJT)、在2024年4月5日使用美国MMT (Multiple Mirror Telescope) 6.5米望远镜分别进行了观测. 利用同时的ZTF测光星等对XLT、LJT和MMT的光谱进行了绝对流量定标, 并对定标后的光谱进行发射线、连续谱和寄主星系成分的分解和拟合, 得到宽巴尔默线的线宽, 并根据维里公式计算了黑洞质量. 根据新的光谱, 我们发现J1011+5442在2024年恢复为I型状态, 其宽H $\beta$ 发射线重新出现, 证实了J1011+5442是一个新的重复CLAGN. 它在处于暗态5年后, 其宽发射线和连续谱辐射逐渐增强, 见图1. MMT的光谱蓝端除了具有非常宽的H $\beta$ 发射线, 整体上与2015年SDSS的暗态光谱谱形相似, 而其红端与2003年SDSS的亮态光谱谱形相似, 这也间接反映了J1011+5442的吸积过程, 在逐渐变亮的过程中, 吸积是由外及内的<sup>[4]</sup>.

在处于暗态大约5年(2014~2019年)后, J1011+5442在2024年恢复为I型状态. 多次的光谱观测显示, J1011+5442在2003和2024年有显著的宽H $\beta$ 线, 在2015年宽H $\beta$ 线未能探测

到, 而宽H $\alpha$ 线始终较明显. 基于绝对流量定标后的光谱, J1011+5442的光学连续谱在2024年处于2015年暗态和2003年亮态之间的中间状态. 宽H $\beta$ 线的消失和重新出现与光学连续谱和中红外波段的变暗和重新变亮一致. 其颜色变化与光度变化在光学和中红外波段分别显示出“变亮时更蓝”和“变亮时更红”的特征, 与其他CLAGNs一致, 这说明并非由遮挡效应引起. 中红外颜色(W1-W2)从亮态时的1.2变为暗态时的0.5~0.75, 并随着其重新变亮而逐渐增加. 中红外波段相反的颜色变化趋势主要由AGN中心引擎的活动(例如吸积率变化)引起. 中红外波段辐射被认为主要来自AGN中心引擎加热的热尘埃, 在尘埃反响映射中, 它延迟于来自吸积盘的光学辐射. 我们使用插值交叉相关函数方法测量了中红外辐射变化相对于光学波段的时间延迟. WISE的W1波段流量变化相对于ZTF的g和r波段的时间延迟分别约为104和95天. 根据亮态和暗态的光度以及尘埃反响映射的光度-时间延迟关系预测的时间延迟分别为约165和62天, 这与实际的尘埃反响映射的延迟时标比较符合.

来自SDSS暗态(此时宿主星系在光谱中的成分贡献较大)的光谱可以帮助我们通过拟合得到J1011+5442宿主星系的信息, 其恒星速度弥散为 $123 \pm 5 \text{ km s}^{-1}$ . 根据黑洞质量-恒星速度弥散( $M_{\text{BH}}-\sigma_*$ )关系, 计算其黑洞质量为 $\log(M_{\text{BH}, \sigma^*}/M_{\odot}) = 7.28 \pm 0.15$ . 对于CLAGNs, 来自宽发射线区的宽发射线(尤其是H $\beta$ 线)存在着极端变化, 宽发射线区可能处于不平衡状态, 或者计算黑洞质量所需要的维里因子可能发生变化.  $M_{\text{BH}, \sigma^*}$ 更接近暗态时基于H $\alpha$ 线测量的 $M_{\text{BH}, \text{dimH}\alpha}$ , 但在误差范

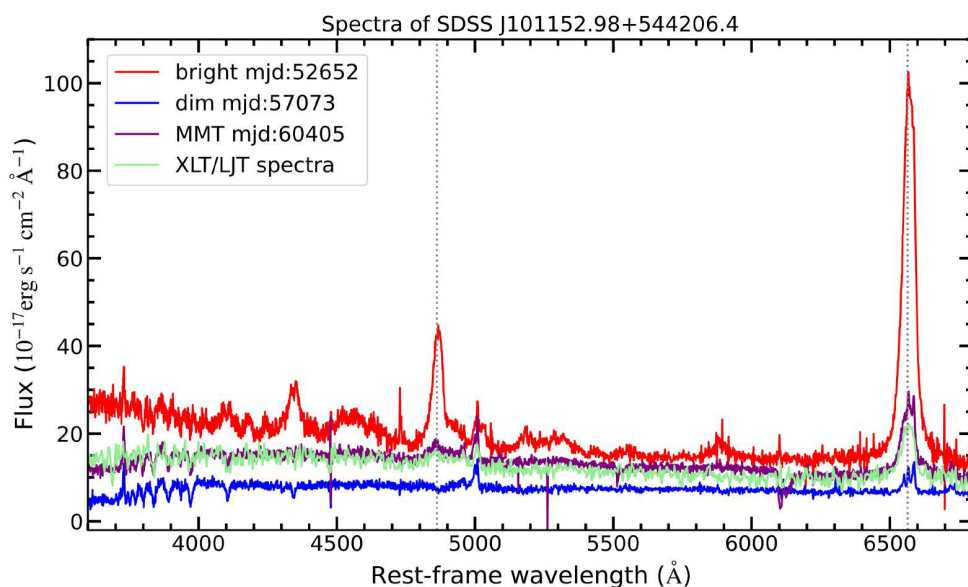


图1 (网络版彩色) J1011+5442在静止波长处不同时期的光学波段光谱. 红色为SDSS亮态光谱, 观测于2003年; 蓝色为SDSS暗态光谱, 观测于2015年; 紫色和绿色为2024年观测的MMT和XLT/LJT光谱. 两条虚线显示H $\beta$ 和H $\alpha$ 谱线的波长

Figure 1 (Color online) Optical spectra of J1011+5442 in the rest frame. The bright and dim state spectra (in red and blue) from SDSS were observed in 2003 and 2015. The MMT and XLT/LJT spectra (in purple and green) were taken in 2024. Two dashed lines mark the wavelengths of H $\beta$  and H $\alpha$  lines

围内也与亮态时的黑洞质量测量值一致。因此,我们采用上述 $M_{\text{BH},\sigma^*}$ 来估计不同状态下的热光度和爱丁顿比。

我们分析了Chandra X射线卫星在2020年9月18日观测的数据。其X射线辐射强度仍然较弱,光谱的净光子计数率为每秒 $2.6\times 10^{-3}\pm 3.3\times 10^{-4}$ 个光子。假设X射线光子谱指数为2,并将银河系氢的柱密度取为 $8.27\times 10^{19}\text{ cm}^{-2}$ ,估算在0.5~8 keV波段未吸收X射线流量的下限为 $3.71\times 10^{-14}\text{ erg cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ,对应的光度为 $L(0.5\sim 8\text{ keV})=6.87\times 10^{42}\text{ erg s}^{-1}$ 。假设热光度改正因子为10,从X射线光度估计的爱丁顿比为 $L_{\text{bol}}/L_{\text{EDD}}\geq 2.8\%$ ,这与暗态时的爱丁顿比3.5%相似但略低,其中暗态时热光度 $L_{\text{bol}}=8.4\times 10^{43}\text{ erg s}^{-1}$ 。这表明在2020年的X射线观测时,J1011+5442仍处于暗态。在2003年亮态时,估计的爱丁顿比 $L_{\text{bol}}/L_{\text{EDD}}=0.28$ ,其中热光度 $L_{\text{bol}}=6.8\times 10^{44}\text{ erg s}^{-1}$ 。从2024年MMT光谱中扣除了宿主星系贡献后估计的热光度为 $L_{\text{bol}}=5.2\times 10^{44}\text{ erg s}^{-1}$ 。相应的爱丁顿比 $L_{\text{bol}}/L_{\text{EDD}}$ 为0.21,表明J1011+5442在2024年处于暗态(2015~2020年)和亮态(2003~2010年)之间的中间状态。J1011+5442的爱丁顿比(2.8%~28%)接近于吸积流发生ADAF和SSD之间状态转换的临界值,吸积模式

的转换从理论上可以解释宽H $\beta$ 线的显著变化。吸积率降低时,转变为径移主导吸积流,电离光度较低,不足以产生强的宽H $\beta$ 发射线;随着吸积率逐渐增加,转变为标准薄盘,来自盘的电离光度增加,宽线重新出现。

总之,基于XLT、LJT和MMT望远镜在2024年对J1011+5442的光谱观测和数据分析,我们发现J1011+5442是一个重复变脸的活动星系核。J1011+5442中的宽H $\beta$ 线在大约20年内消失又重新出现。J1011+5442逐渐恢复为I型AGN的状态,其连续谱强度位于2003年的亮态和2015年的暗态之间。自2019年以来,其光学连续谱和中红外波段辐射的变化伴随着宽巴尔默谱线的快速变化。中红外波段辐射变化相对于光学波段的时间延迟与尘埃反响映射的预测基本一致,其光学和中红外波段重新变亮支持变脸现象是由吸积率的突然变化来驱动的。我们期待未来进行更多的光学光谱和X射线观测,以研究J1011+5442的重复变脸现象和吸积过程,并确定其宽H $\beta$ 谱线是否在接下来的几年内再次消失。未来对这些极为罕见的重复变脸活动星系核的观测研究将为我们揭示它们与众不同的诸多奥秘。

## 推荐阅读文献

- 1 Urry C M, Padovani P. Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei. *PASP*, 1995, 107: 803
- 2 Ricci C, Trakhtenbrot B. Changing-look active galactic nuclei. *Nat Astron*, 2023, 7: 1282–1294
- 3 Runnoe J C, Cales S, Ruan J J, et al. Now you see it, now you don't: the disappearing central engine of the quasar J1011+5442. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 455: 1691–1701
- 4 Lyu B, Wu X B, Pang Y, et al. The changing-look AGN SDSS J101152.98+544206.4 is returning to a type I state. *Astron Astrophys*, 2025, 693: A173