

# 高红移耀变体4C 38.41光学多波段光变性质\*

张 妍 方 越 吴江华<sup>†</sup> 戴 岩 孟南昆

(北京师范大学天文系 北京 100875)

**摘要** 4C 38.41是一颗红移为1.813、可分类为平谱射电类星体的耀变体,使用一台85 cm望远镜在2018年2月22日至26日期间对其进行了光学V和R波段测光观测,得到两个波段的准同时数据.基于这些数据分析了该源在不同光变时标下的光变特性.结果表明:这颗源在观测期间处于较弱的活动状态,V和R波段星等( $V$ ,  $R$ )总变化均约为0.20等.在天内时标下,其中3晚探测到了该源的天内光变,另有一晚可能存在天内光变.此外,通过色指数和时延分析发现4C 38.41在不同时标下都展现越亮越红行为,与大多数平谱射电类星体类似,但在最后一晚4C 38.41在颜色-星等图上呈现出v字形,即首先展现越亮越红行为,然后转变为越亮越蓝行为,这可能是由该源的辐射在吸积盘主导和喷流主导之间的转换造成的.此外在第2晚探测到了V、R波段之间的时延,这是首次在高红移耀变体中探测到不同光学波段光变之间的时延,可以用随机同步辐射小结构模型来解释.

**关键词** 星系: 活动, 星系: 测光, 星系: 喷流, 类星体: 个别: 4C 38.41, 辐射: 非热  
**中图分类号**: P158; **文献标识码**: A

## 1 引言

耀变体(Blazar)是射电噪活动星系核(Active Galactic Nucleus, AGN)中特殊的一类,它的喷流方向与视线方向相接近<sup>[1]</sup>,由于相对论的增亮效应,使得耀变体在高红移处也能被观测到. BL Lacertae天体(BL Lac)和平谱射电类星体(Flat Spectrum Radio Quasar, FSRQ)是耀变体的两个子类,主要通过发射线的等值宽度予以区分.耀变体的辐射主要为覆盖全电磁波段的非热辐射,并且可以延展到超高能波段(其光子能量 $E > 100$  GeV)<sup>[2]</sup>.耀变体最突出的特征是在不同波段以及时标上都展现出极其剧烈的光变行为.研究耀变体光变特性的方法很多,主要包含分析其光变时标、光变轮廓、谱变化、宽波段能谱分布(Spectral Energy Distribution, SED)变化及拟合、不同波段光变间的相关性以及这些分析所蕴含的中心物理结构和过程.其中光变时标包含3种,分别是:天内光变或微光变(小于1 d);短时标光变(几天到几个月)和长时标光变(几个月到几年)<sup>[3-5]</sup>.其中天内光变对研究耀变体最内部结构以及物理过程具有重要作用.此外,流量

2020-12-22收到原稿, 2021-02-07收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(11973017)资助

<sup>†</sup>jhwu@bnu.edu.cn

变化往往伴随着能谱变化,越来越多的证据表明耀变体的不同子类展现出不同的颜色行为<sup>[6-8]</sup>. BL Lac通常展现越亮越蓝行为,而部分FSRQ展现越亮越红行为.对于相同的源在不同光变时标以及不同时期(处于爆发态或宁静态),其颜色行为也可能不相同.由此可见,虽然耀变体在过去被广泛研究,但是它依然有很多问题并不清楚.并且由于先前望远镜性能的限制,对于高红移耀变体的研究很少,尤其在光学波段.

如今,越来越多的高红移耀变体在各个波段被高性能望远镜探测到.近期许多研究表明高红移耀变体中心存在着超大质量黑洞以及亮度很高的吸积盘<sup>[9]</sup>,这也使得高红移耀变体成为研究超大质量黑洞演化以及吸积盘-喷流相互作用的重要天体之一<sup>[10]</sup>.而通过比较高红移与低红移耀变体的光变特性可以了解这两者之间是否存在差别和演化关系,并且研究高红移耀变体的光变行为可以更好地理解耀变体的本质.但实际上,关于高红移耀变体的研究工作并不多,光学波段的系统监测很少.因此我们挑选了一批星等低于18.00等的高红移耀变体进行多光学波段的监测,这里报告的是对4C 38.41这颗源光变的观测和分析结果.4C 38.41是一颗FSRQ,也是最强 $\gamma$ 射线源之一<sup>[11]</sup>,它的红移为1.813<sup>[12]</sup>.它因剧烈的光学流量变化而被分类为快速大幅度光变类星体(Optically Violent Variable, OVV)<sup>[13]</sup>, Volonteri等<sup>[14]</sup>在2004—2010年对其R波段进行观测,他们发现4C 38.41在天内时标下的星等变化小于0.10–0.20等,但在几十天的光变时标下它的变化幅度会更明显. Hagen-Thorn等<sup>[15]</sup>也发现2006—2017年期间,其在光学波段存在多次强烈的爆发,并且流量变化达到5–10倍,他们在天内时标下探测到R波段存在一个快速增亮的过程,R波段的星等在1 h之内变化了0.30等.上述研究表明4C 38.41在光学波段活动性很强,因此很适合研究其在不同光变时标下的光学多波段光变特性以及颜色变化,并且分析不同波段之间是否存在时延.

## 2 观测与数据分析

我们利用国家天文台兴隆观测基地的85 cm反射望远镜对高红移耀变体4C 38.41进行了光学V和R波段观测,观测从2018年2月22日持续到2018年2月26日,共5晚.在观测期间,交替使用标准Johnson-Cousins V、R滤光片以保证两个波段的准同时性.根据每晚目标源在两个波段的视星等,2018年2月23日和2018年2月24日这两晚V和R波段的曝光时间均为180 s,由于天气原因其余几晚V和R波段的曝光时间均为300 s.我们利用较差测光和孔径测光方法,并使用IRAF软件<sup>1</sup>处理数据得到光变曲线,每个数据点的测光误差由IRAF给出.我们选择证认图<sup>2</sup>中的A和B作为比较星来计算目标源的较差星等,C作为校验星,如图1所示,它们的星等由Villata等<sup>[16]</sup>给出.我们选取1.5到2.5倍半峰全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)作为孔径大小进行测光,并计算每晚校验星星等的标准差,标准差的最小值所对应的孔径即为最佳孔径.为了防止测光数据中出现坏点,我们删除了校验星星等偏离当晚平均值 $3\sigma$ 以上的数据点, $\sigma$ 为校验星星等的标准差.图2和图3分别给出了4C 38.41的V和R波段的天内光变曲线( $R$ 、 $V$ 分别为R和V波段星等)和其在整个观测期间的光变曲线,其中横坐标为儒略日(Julian Date, JD),时间起

<sup>1</sup>IRAF is distributed by the National Optical Astronomy Observatories, which are operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under cooperative agreement with the National Science Foundation.

<sup>2</sup><https://www.lsw.uni-heidelberg.de/projects/extragalactic/charts/1633+382.html>

点JD 2458170为2018年2月20日12点00分, 纵坐标为V和R波段的星等值. 为了更好地显示光变细节, 图2中R波段的光变曲线向下平移了0.35星等, 图3中R波段的光变曲线向下平移了0.20星等. 我们利用归一化 $F$ 检验方法<sup>[17]</sup>来检验4C 38.41在每个观测夜是否存在天内光变, 归一化 $F$ 参数定义为:

$$F = \frac{\sigma_{q-s}^2}{\kappa\sigma_{s-c}^2}, \quad (1)$$

其中归一化因子 $\kappa$ 定义为耀变体光变曲线测光误差的均方差以及比较星光变曲线测光误差的均方差之比,  $\sigma_{q-s}^2$ 和 $\sigma_{s-c}^2$ 分别是耀变体与比较星和比较星与校验星光变曲线的方差. 根据临界值 $F_c(0.99)$ 、 $F_c(0.95)$ 与计算得到的 $F$ 值大小比较, 检验结果可分为3类: 光变(V,  $F \geq F_c(0.99)$ ), 没有光变(NV,  $F \leq F_c(0.95)$ ), 可能光变(PV,  $F_c(0.95) < F < F_c(0.99)$ ). 对于存在天内光变的情况我们还计算其光变幅度( $A_{mp}$ )<sup>[18]</sup>, 结果列在表1中.

$$A_{mp} = 100\sqrt{(A_{max} - A_{min})^2 - 2\sigma^2}\%, \quad (2)$$

其中 $A_{max}$ 和 $A_{min}$ 分别为每晚目标源星等的最大值和最小值.

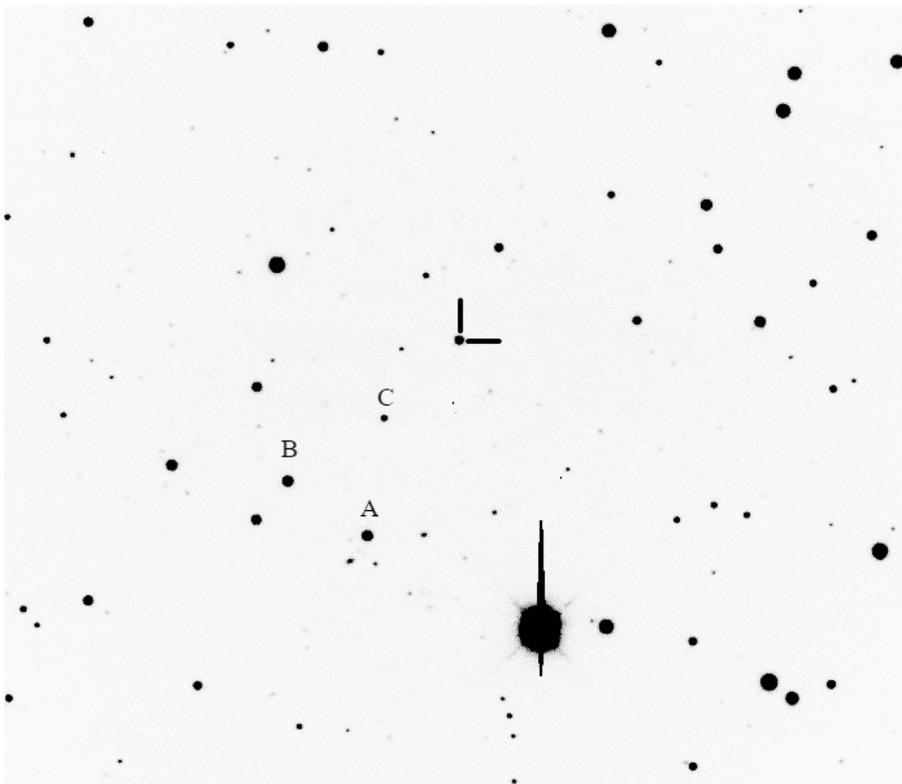


图1 4C 38.41 R波段的证认图

Fig. 1 Finding chart of 4C 38.41 in the R band

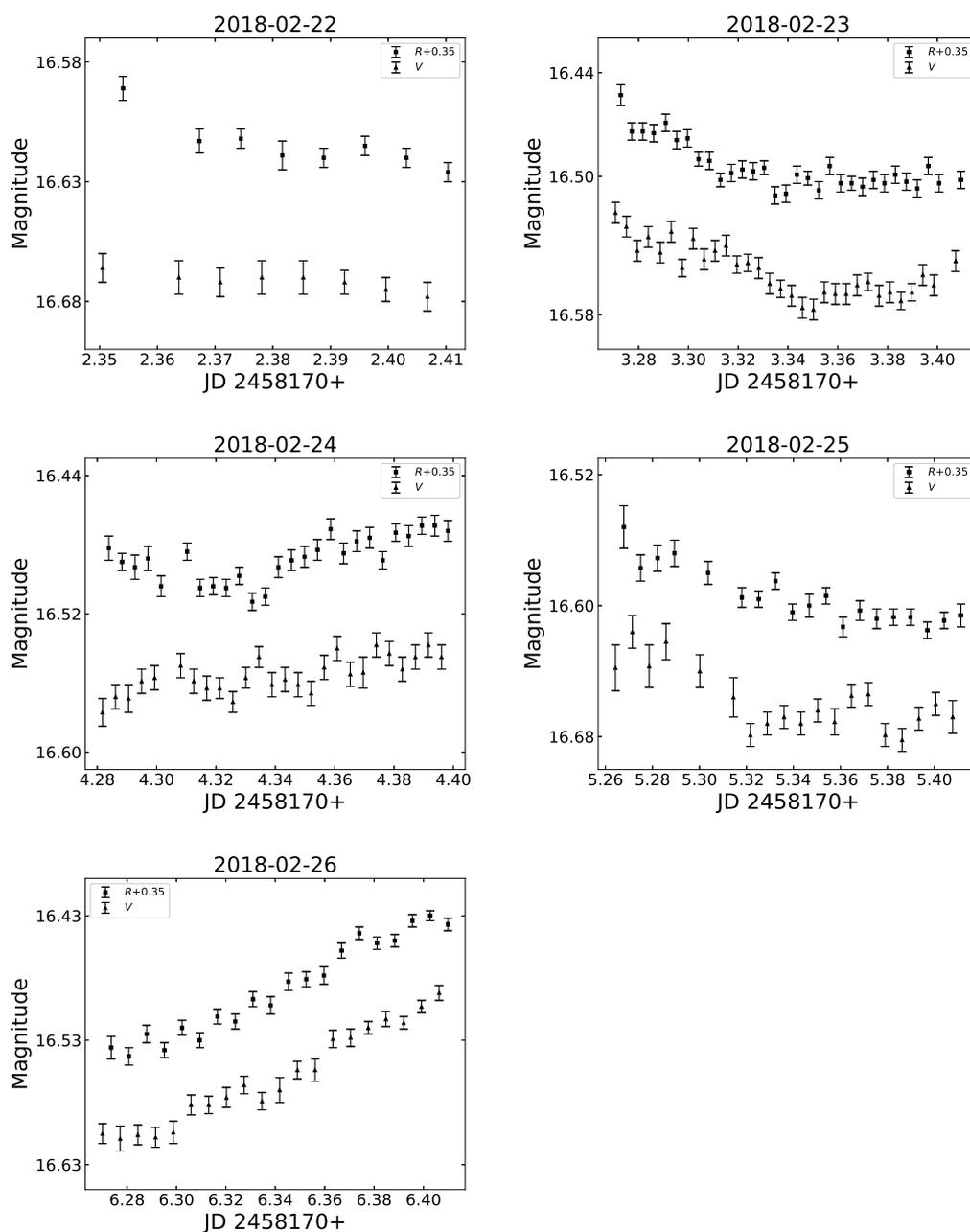


图 2 4C 38.41天内时标下V、R波段的光变曲线

Fig. 2 Intra-day light curves of 4C 38.41 monitored in the V and R bands

对于存在天内光变的数据,我们还研究了4C 38.41色指数( $V-R$ )与R波段星等( $R$ )间的关系,拟合结果见表2和图4.此外我们还计算了4C 38.41的V和R波段光变之间的相关性和时延.我们采用基于插值互相关函数原理(Interpolated Cross Correlation Function, ICCF)的python代码pyCCF<sup>[19]</sup>,ICCF通过对光变曲线进行线性插值并平移,利用马尔科夫链蒙特卡罗方法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)计算平移后两条光变曲线

的相关性来确定时延, 我们设定若相关性系数 $r < 0.5$ , 则判定MCMC运行失败. 由于数据点较少, 我们还采用Just Another Vehicle for Estimating Lags In Nuclei程序(简称JAVELIN)<sup>[20]</sup>测时延, 该方法假设耀变体光变满足阻尼随机游走模型<sup>[21-22]</sup>, 通过顶帽变换方程对两条光变曲线进行拟合, 利用MCMC确定时延分布以及不确定性. 上述两种方法我们都运行了10000次MCMC. 为了检验两种方法计算得到的时延结果的准确性, 我们将R波段光变曲线平移, 其平移量为测得的时延, 并与V波段的光变曲线进行相关性分析, 时延分析结果见表3.

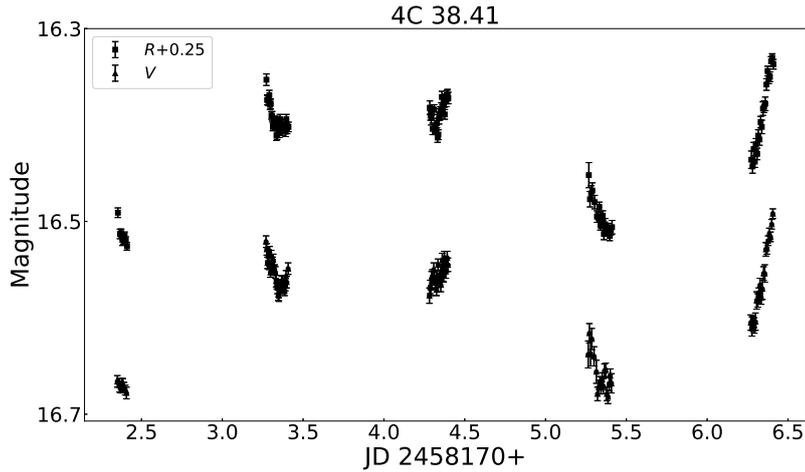


图3 4C 38.41 V、R波段整体光变曲线

Fig. 3 The overall light curves of 4C 38.41 monitored in the V and R bands

表1 天内光变的结果  
Table 1 Results of IDV (Intra-day Variability) test

Observation date	Band	Number	Duration /h	$F$	$F_c(0.99)$	$F_c(0.95)$	Status	Amplitude /%
2018-02-22	R	8	1.35	2.39	4.28	2.76	NV	
	V	8	1.35	2.18	4.28	2.76		
2018-02-23	R	31	3.28	5.58	2.03	1.65	V	5.8
	V	31	3.28	2.73	2.03	1.65		5.5
2018-02-24	R	26	2.74	2.06	2.17	1.73	PV	4.3
	V	26	2.74	1.47	2.17	1.73		
2018-02-25	R	19	3.34	8.47	2.48	1.90	V	6.5
	V	19	3.44	1.92	2.48	1.90		
2018-02-26	R	20	3.27	20.15	2.42	1.87	V	11.7
	V	20	3.27	28.84	2.42	1.87		

表 2 色指数-星等相关性结果  
Table 2 Colour-magnitude correlation

Observation date	$m^a$	$c^b$	$r^c$	$P^c$
2018-02-23	-0.25	0.17	-0.245	0.114
2018-02-25	-0.47	0.38	-0.242	0.145
2018-02-26	-0.01	0.02	-0.121	0.433
2018-02-23—2018-02-26	-0.03	0.02	-0.125	0.003

<sup>a</sup> Slope;

<sup>b</sup> Intercept;

<sup>c</sup> Null Hypothesis Probability.

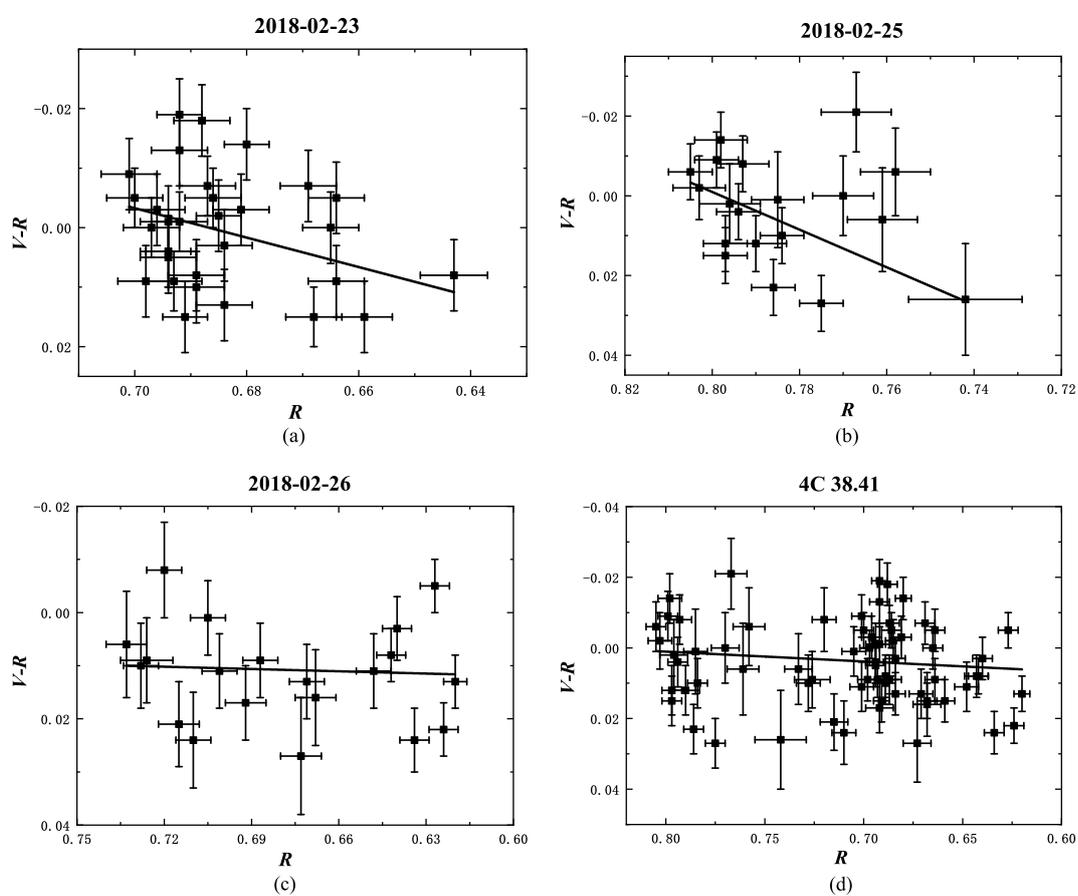


图 4 4C 38.41 的颜色-星等图, 其中(a)、(b)、(c)为天内时标下的颜色-星等图; (d)为整个观测期间的颜色-星等图.

Fig. 4 Colour-magnitude diagram of 4C 38.41, (a), (b), (c) are the colour-magnitude diagrams in the intra-day time scale; and (d) is the colour-magnitude diagram during the whole observation period.

表 3 利用ICCF和JAVELIN方法得到的V、R波段时延

Table 3 Time lags between the V and R bands from ICCF and JAVELIN analysis

Observation date	Lag		Correlation coefficient		Probability	
	$\tau_{\text{ICCF}}^{\text{a}}/\text{min}$	$\tau_{\text{JAV}}^{\text{b}}/\text{min}$	$r_{\text{ICCF}}^{\text{c}}$	$r_{\text{JAV}}^{\text{d}}$	$P_{\text{ICCF}}^{\text{e}}$	$P_{\text{JAV}}^{\text{f}}$
2018-02-23	$16.6_{-17.4}^{+15.7}$	$19.3_{-5.9}^{+10.4}$	0.794	0.770	$5.434 \times 10^{-21}$	$4.308 \times 10^{-19}$
2018-02-25	$-10.9_{-16.7}^{+21.2}$	$-25.1_{-4.9}^{+7.9}$	0.704	0.661	$1.882 \times 10^{-3}$	$3.877 \times 10^{-3}$
2018-02-26	$0.6_{-10.6}^{+12.2}$	$6.0_{-9.0}^{+9.5}$	0.981	0.980	$6.392 \times 10^{-42}$	$4.950 \times 10^{-42}$

<sup>a</sup> Time Lags from ICCF;

<sup>b</sup> Time Lags from JAVELIN;

<sup>c</sup> Correlation Coefficient for ICCF;

<sup>d</sup> Correlation Coefficient for JAVELIN;

<sup>e</sup> Null Hypothesis Probability for ICCF;

<sup>f</sup> Null Hypothesis Probability for JAVELIN.

### 3 结果

结合图2与表1可以看出, 对于R波段的数据, 有4晚探测到了天内光变, 其中2018年2月24日这天为可能光变. 而V波段的流量变化相对较弱, 有3晚探测到天内光变, 其中2018年2月25日这天为可能光变. V和R波段在2018年2月22日这天均未探测到天内光变, 这可能是由于观测时长相对较短. 2018年2月23日到2018年2月25日这三个晚上V和R波段的光变曲线都展现出较小的波动, 总体为下降趋势, 而在2018年2月26日这天V和R波段光变曲线为单调上升趋势, 这两个波段的星等在3 h内变化了大约0.10等, 变化幅度分别是11.3%和11.7%. 从图3可以看出, 在整个观测期间4C 38.41在V和R波段光变曲线整体呈现波动的状态, V波段星等峰值约为16.43等, R波段星等峰值为16.08等, 这一星等值比Raiteri等<sup>[23]</sup>在2012年的观测结果要暗, 说明4C 38.41处于较弱的活动期. 4C 38.41在观测期间V和R波段星等值变化约为0.20等, 整体的光变幅度分别是19.0%和19.6%.

对于存在天内光变的晚上, 我们还研究了色指数与星等的相关性, 在天内光变时标下, 其色指数与星等为负相关, 然而 $P$ 值都大于0.05, 说明显著性较弱. 在整个观测期间这两者也展现出负相关,  $P$ 值小于0.05, 而相关系数 $r$ 为-0.125, 相关性较弱. 在2018年2月26日这天V和R波段均探测到了光变, 但4C 38.41展现出复杂的颜色行为, 从图4中可以看到, 色指数与星等之间的关系展现出v字形, 4C 38.41首先展现越亮越红行为, 然后又转变为越亮越蓝行为.

此外, 我们还研究4C 38.41的V和R波段光变之间的相关性和时延, 从表3可以看出, ICCF和JAVELIN方法得到的4C 38.41的时延结果基本一致. 其中2018年2月23日这天两种方法测出的时延相差较小, 对于ICCF我们做了10000次MCMC, 失败率仅为17/10000, 说明该方法得到的结果可靠. 从相关性分析结果来看, 这两种方法的 $P$ 值都远远小于0.01, 说明相关性显著, 这两种方法得到的时延结果可靠. 这天时延数值为正值, 说明4C 38.41的V波段变化领先于R波段的变化. 对于2018年2月25日这天V和R之间的时延分析, ICCF和JAVELIN方法得到的时延数值分别为 $-10.9_{-16.7}^{+21.2}$  min和 $-25.1_{-4.9}^{+7.9}$

min, 对于ICCF, 10000次MCMC的失败率为1557/10000, 说明该方法得到的时延结果较为可靠. 从表3中可以看到, 其相关性分析中的 $P$ 值较大, 说明相关关系较弱, 这两种方法得到的时延结果置信度较低, 可能是由于这天V波段的光变曲线误差较大,  $F$ 检验结果为可能光变, 影响了时延分析的结果. 2018年2月26日这天ICCF计算得到的数值近似为0, JAVELIN得到的数值为 $6.0^{+9.5}_{-9.0}$  min, 对于ICCF, 10000次MCMC的失败率为6657/10000, 说明该方法得到的时延结果并不可靠, 但从相关性分析可知,  $P$ 值远远小于0.01, 说明这两种方法得到的时延置信度很高. 产生这种分歧是由于2018年2月26日这天V和R波段的光变曲线都呈现出单调上升的趋势, 没有其他特征, 而我们用到的两种相关性分析方法主要依靠光变曲线特征来判断时延, 因此不管其中一条光变曲线横向平移多少, 总能计算得到两个波段光变之间的一个时延值且相关性会非常好, 但如前所述, MCMC失败率较高决定了结果并不可信.

## 4 讨论

我们从2018年2月22日至2018年2月26日对4C 38.41进行光学V和R波段准同时观测, 共计5晚, 研究它在不同时标下的光变特性. 从图2可以看出, 4C 38.41在天内光变时标下V和R波段的光变曲线都展现出较小的波动, 只有最后一晚展现出明显的单调上升行为. 不同时标下耀变体的光变行为往往用喷流模型解释, 这是由于耀变体的辐射主要为多普勒增亮喷流发出的非热辐射. 关于天内光变的解释模型主要与喷流中粒子加速与能量损失相关, 例如喷流中的激波模型<sup>[24]</sup>和磁重联<sup>[25]</sup>. 在2018年2月26日这天, V和R波段的光变曲线都呈现出单调上升的趋势, 这可能是由于激波内小尺度稳态等离子体对粒子的加速作用, 且加速时间大于粒子穿过该区域的时间<sup>[26]</sup>. 而当激波通过喷流内的非均匀介质, 它就会产生前3 d观测到的4C 38.41光变曲线中的微小波动. 除此之外, 天内光变也可能是由于团块沿着一个弯曲的喷流或沿螺旋形的磁力线运动从而产生一个变化的多普勒因子所导致的, 当喷流与视线方向一致时, 流量就会显著增加, 这种模型有时用来解释一些准周期性的光变现象. 研究表明FSRQ部分辐射可能来源于一个薄的并且未对齐的吸积盘, 这会使得喷流中的粒子分布不均匀, 因此会产生一个进动的喷流<sup>[27]</sup>. Algaba等<sup>[28]</sup>发现4C 38.41中最内部的喷流运动是正弦曲线, 这可能是由于喷流螺旋进动或Kelvin-Helmholtz不稳定性产生的. 然而上述这些假说都不能解释我们此次探测到的4C 38.41的V、R波段之间的时延. 由于B、V、R、I波段十分靠近, 因此大多数耀变体的光学光变研究并未探测出时延, 这种情况下可以将它们视为来源于同一个辐射区域. 而对于探测到的光学波段间的时延可以用多辐射区域模型解释, Xu等<sup>[29]</sup>基于Marscher等<sup>[30]</sup>提出的随机同步辐射小结构模型解释S5 0716+714的微光变行为, 他们认为耀变体光学波段的爆发是由喷流中的大量湍流共同作用产生的, 这些湍流具有不同的大小、密度和磁场强度. 他们发现时延与粒子加速时标和冷却时标的比值相关, 并且计算出V和R波段微光变之间的时延为 $12.89^{+9.23}_{-12.98}$  min, 这一结果与我们在2018年2月23日观测到的V和R波段间的时延结果相近.

我们还研究4C 38.41在不同光变时标下色指数与R波段星等之间的相关性, 结果表明在不同时标下, 4C 38.41均展现出弱的越亮越红行为. 越来越多的观测证据表明FSRQ通常展现出越亮越红行为, 而BL Lac展现越亮越蓝行为<sup>[7, 31]</sup>. 近期很多研究表

明, 当耀变体处于较低活动性时会展现出越亮越红行为<sup>[8, 32]</sup>. 一般而言, 耀变体光学波段的辐射主要包含多普勒增亮喷流和吸积盘辐射两部分, 当有着较红光谱的喷流辐射超过有着较蓝光谱的吸积盘辐射时, 耀变体会呈现越亮越红行为, 反之, 则出现越亮越蓝行为<sup>[33]</sup>. 先前有关高红移耀变体的喷流功率与吸积盘光度的相关性研究表明喷流功率要大于吸积盘光度, 并且这些耀变体往往位于喷流功率与吸积盘光度的相关性图的高能端<sup>[34-36]</sup>, 这也是导致高红移耀变体产生越亮越红行为的原因之一. 值得注意的是在2018年2月26日这天V和R波段的光变曲线都呈现出单调上升的趋势, 但4C 38.41展现出复杂的颜色行为, 色指数与星等之间的关系展现出v字形, 即4C 38.41首先展现越亮越红行为, 然后转变为越亮越蓝行为. Isler等<sup>[37]</sup>在研究3C 279光学-红外长周期光变时发现3C 279爆发期间, 其短周期颜色行为从越亮越红转变为无色行为到越亮越蓝, 时标为几十到几百天, 他们认为耀变体颜色行为的差异主要与光学波段辐射为多普勒增亮喷流成分和吸积盘成分的混合相关. 因此这种v字形的颜色行为可能说明此时4C 38.41的辐射由吸积盘主导转变为喷流主导. 此外Ikejiri等<sup>[38]</sup>分析了42颗耀变体光学-近红外波段的光变特性, 发现耀变体在发生短周期的爆发时, 往往表现出谱迟滞现象, 光谱颜色在增亮阶段要比变暗阶段更蓝. 他们认为这是由于存在两种具有不同时标和颜色的光变成分, 一种为红色的长时标爆发成分, 另一种为蓝色的短时标爆发成分. 从图3可以看出4C 38.41先在2018年2月25日这天慢慢变暗, 这天4C 38.41展现出越亮越红行为, 而2018年2月26日这天迅速增亮, 此时蓝色的短时标爆发成分慢慢增多, 最终覆盖了红色的长时标爆发成分, 成为辐射的主导成分, 因此4C 38.41由原先的越亮越红行为转变为越亮越蓝行为.

## 5 结论

我们从2018年2月22日至2018年2月26日对4C 38.41进行光学V和R波段观测, 共计5晚, 研究它在不同时标下的光变特性, 结论如下:

(1)在观测期间4C 38.41处于较弱的活动期, V和R波段星等值变化约为0.20等, 对于R波段的数据, 有4晚探测到了天内光变, 其中2018年2月24日这天为可能光变. 而V波段的流量变化相对较弱, 有3晚探测到天内光变, 其中2018年2月25日这天为可能光变;

(2)在不同时标下, 4C 38.41均展现出越亮越红行为, 在2018年2月26日这天, 4C 38.41的颜色-星等图呈现出v字形, 这可能是由该源的辐射在吸积盘主导和喷流主导之间的转换造成的;

(3)在2018年2月23日这天探测到了V、R波段之间的时延, 4C 38.41的V波段变化领先于R波段的变化, 这是首次在高红移耀变体中探测到不同光学波段光变之间的时延, 可以用随机同步辐射小结构模型来解释.

## 参 考 文 献

- [1] Urry C M, Padovani P. *PASP*, 1995, 107: 803
- [2] Dermer C D, Giebels B. *CRPhy*, 2016, 17: 594
- [3] Wagner S J, Witzel A, Heidt J, et al. *AJ*, 1996, 111: 2187
- [4] Shukla A, Mannheim K, Patel S R, et al. *ApJL*, 2018, 854: L26
- [5] Gaur H, Gupta A C, Bachev R, et al. *MNRAS*, 2019, 484: 5633
- [6] Gu M F, Lee C U, Pak S, et al. *A&A*, 2006, 450: 39
- [7] Meng N K, Zhang X Y, Wu J H, et al. *ApJS*, 2018, 237: 30
- [8] Gupta A C, Gaur H, Wiita P J, et al. *AJ*, 2019, 157: 95
- [9] Ghisellini G, Ceca R D, Volonteri M, et al. *MNRAS*, 2010, 405: 387
- [10] Valiante R, Agarwal B, Habouzit M, et al. *PASA*, 2017, 34: e031
- [11] Abdo A A, Ackermann M, Agudo I, et al. *ApJ*, 2010, 716: 30
- [12] Hewett P C, Wild V. *MNRAS*, 2010, 405: 2302
- [13] Mattox J R, Bertsch D L, Chiang J, et al. *ApJ*, 1993, 410: 609
- [14] Volonteri M, Haardt F, Ghisellini G, et al. *MNRAS*, 2011, 416: 216
- [15] Hagen-Thorn V A, Troitskaya Y V, Hagen-Thorn E I, et al. *ARep*, 2019, 63: 378
- [16] Villata M, Raiteri C M, Ghisellini G, et al. *A&AS*, 1997, 121: 119
- [17] Joshi R, Chand H, Gupta A C, et al. *MNRAS*, 2011, 412: 2717
- [18] Heidt J, Wagner S J. *A&A*, 1996, 305: 42
- [19] Peterson B M, Wanders I, Horne K, et al. *PASP*, 1998, 110: 660
- [20] Sun M, Grier C J, Peterson B M. *ascl soft*, 2018: ascl: 1805. 032
- [21] Kelly B C, Bechtold J, Siemiginowska A. *ApJ*, 2009, 698: 895
- [22] MacLeod C L, Ivezić Ž, Kochanek C S, et al. *ApJ*, 2010, 721: 1014
- [23] Raiteri C M, Villata M, Smith P S, et al. *A&A*, 2012, 545: A48
- [24] Marscher A P, Gear W K. *ApJ*, 1985, 298: 114
- [25] Giannios D, Uzdensky D A, Begelman M C. *MNRAS*, 2009, 395: L29
- [26] Kaur N, Baliyan K S, Ganesh S. *MNRAS*, 2017, 469: 2305
- [27] Gopal-Krishna, Wiita P J. *A&A*, 1992, 259: 109
- [28] Algaba J C, Rani B, Lee S S, et al. *ApJ*, 2019, 886: 85
- [29] Xu J R, Hu S M, Webb J R, et al. *ApJ*, 2019, 884: 92
- [30] Marscher A P, Gear W K, Travis J P. //Valtaoja E, Valtonen M. *Variability of Blazars*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 85
- [31] Raiteri C M, Villata M, Larionov V M, et al. *A&A*, 2008, 491: 755
- [32] Xiong D R, Bai J M, Fan J H, et al. *ApJS*, 2020, 247: 49
- [33] Liu H, Li S L, Gu M F, et al. *MNRAS*, 2016, 462: L56
- [34] Ghisellini G, Tavecchio F, Maraschi L, et al. *Nature*, 2014, 515: 376
- [35] Ghisellini G, Perri M, Costamante L, et al. *A&A*, 2019, 627: A72
- [36] Marcotulli L, Paliya V, Ajello M, et al. *ApJ*, 2020, 889: 164
- [37] Isler J C, Urry C M, Coppi P, et al. *ApJ*, 2017, 844: 107
- [38] Ikejiri Y, Uemura M, Sasada M, et al. *PASJ*, 2011, 63: 639

## Multi-Wavelength Optical Variability of High Redshift Blazar 4C 38.41

ZHANG Yan FANG Yue WU Jiang-hua DAI Yan MENG Nan-kun

*(Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875)*

**ABSTRACT** 4C 38.41 is a blazar with a redshift of 1.813 and is classified as a flat spectrum radio quasar. The photometric observations on this object were carried out quasi-simultaneously in the optical V and R bands by using a 85 cm telescope from February 22, 2018 to February 26, 2018. The variability properties of the source on diverse timescales are analyzed. The results show that this source is in a weak active state during the whole observation period, and the variation amplitudes in the V and R bands are both about 0.2 mag. Intra-day variability is detected in three nights and probably in one more night. In addition, the colour-magnitude relationship and inter-band cross-correlation analysis are performed. The results show that 4C 38.41 exhibited a redder-when-brighter behaviour on both intra- and inter-day timescales, which is consistent with those of most flat-spectrum radio quasars. In the last night, 4C 38.41 exhibited a v-shape in the colour-magnitude diagram, i.e., it showed redder-when-brighter behaviour at first and then become bluer-when-brighter trend. This phenomenon can be interpreted by the change of the dominance between the accretion disk emission and the jet emission in this source. In addition, a time delay between the V- and R-variations is detected on the second night. This is the first reported time delay between the variations in different optical bands in a high redshift blazar, which can be interpreted by the model of random small synchrotron cells.

**Key words** galaxies: active, galaxies: photometry, galaxies: jets, quasars: individual: 4C 38.41, radiation mechanisms: non-thermal