论文

耀变体 PKS 0537-441 的光学谱特性

李孝攀*, 罗玉辉, 周丽, 单崙琼, 陈玖福

昭通学院物理与电子信息工程学院, 昭通 657000

* 联系人, E-mail: lxpzrc@163.com

收稿日期: 2016-07-20; 接受日期: 2016-09-14; 网络出版日期: 2016-12-30

云南省应用基础研究计划青年项目 (编号: 2013FD056) 和云南省教育厅科学研究基金项目 (编号: 2016ZZX230) 资助

摘要 利用耶鲁大学 SMARTS 数据库提供观测数据, 得到了耀变体 PKS 0537-441 从 2011 年 1 月到 2015 年 5 月的光学 B 和 R 波段光变曲线, 并计算了两波段对应的谱指数. 使用离散相关函数法等方法对流量、谱指数及二者的相关性进行研究, 结果表明: (1) PKS 0537-441 光变剧烈, 在长时标, 中等时标爆发上升期和衰退期均表现出 BWB (Bluer-When-Brighter) 的光学谱特性, 该特性可由喷流内的激波模型作出解释; (2) B 和 R 波段流量变化有强相关性, 且 B 波段流量变化领先 R 波段 (35.62 ± 8.63) d; (3) R 波段可能具有 (53.06 ± 6.62) d 和 (273.88 ± 20.69) d 的准周期性光变.

关键词 耀变体, PKS 0537-441, 谱指数, 光变周期**PACS:** 98.54.Cm, 95.85.Kr, 95.30.Ky, 95.75.Wx

1 引言

耀变体是活动星系核的一个重要的子类, 具有高光度、快速光变、视超光速运动及强烈的射电和光学偏振等一系列独特性质^[1]. 通常认为它的光变和连续的非热辐射起源于视线方向的相对论喷流^[2]. 耀变体可分为蝎虎天体和平谱射电类星体两个子类. 其中, 平谱射电类星体有平坦的射电谱 (谱指数 $\alpha \leq 0.5$) 和强烈的宽发射线辐射, 而蝎虎天体没有或只有很弱的发射线. 耀变体的能谱分布表现为双峰结构, 其低能峰位于近红外至 X 射线波段, 高能峰则位于 MeV 至 TeV 的 γ 射线波段. 目前主要有轻

子模型和强子模型对其能谱分布作出解释^[3]. 强烈而快速的光变是耀变体最重要的观测特征, 其光变的时标可分为三种: 持续时间数月 to 数年的长时标、数天到数周的中等时标和数分钟到数小时的短时标. 耀变体的光变时标、光变幅度和谱型等性质对其辐射机制的研究有重要的意义.

耀变体 PKS 0537-441 ($z=0.896$) 是南半球被广泛研究的天体. 根据其发射线和能谱分布的特征, 一般将其划分为低峰频蝎虎天体. PKS 0537-441 因为大幅光变 (~ 5 mag^[4]), 射电和光学波段的短时标光变^[5], 高光学偏振 (18.7%^[6]) 以及引力微透镜候选者的讨论^[7,8] 而备受关注. 自从被 EGRET (Energetic Gamma

引用格式: 李孝攀, 罗玉辉, 周丽, 等. 耀变体 PKS 0537-441 的光学谱特性. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 039501

Li X P, Luo Y H, Zhou L, et al. Optical spectral behaviour of the blazar PKS 0537-441 (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 039501, doi: 10.1360/SSPMA2016-00341

Ray Experiment Telescope) 望远镜于 1991 年 7 月首次从 γ 射线波段探测后^[9], PKS 0537–441 就被众多望远镜/探测器进行全波段观测.

在 γ 射线波段, AGILE γ 射线探测器 (AGILE-GRID) 探测到耀变体 PKS 0537–441 在 100 MeV 能级具有 $(42 \pm 11) \times 10^{-8} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的流量^[10]; Fermi-LAT 探测器也于 2008 年 8 月开始对其进行观测^[11]. 伦琴 X 射线卫星、BeppoSAX 和 SWIFT 等卫星则从 0.1–150 keV 等能段对其进行观测^[10,12,13]. 在红外/光学波段, 欧洲南方天文台位于智利的 REM (Rapid Eye Mounting) 望远镜¹⁾ 自 2004 年起从近红外 (JHK) 和光学 (VRI) 波段对其进行观测. Impiombato 等人^[14] 和 Sandrinelli 等人^[15] 公布了 2004–2012 年间的近红外/光学波段观测数据, 发现了 PKS 0537–441 在近红外 J 波段存在约 24 min 的短时标光变^[14] 以及约 3 mag 的大幅光变^[15]. 基于这些数据, Zhang 等人^[16] 发现了该源在光学 V 波段存在约 24.5 min 的短时标光变并计算了其黑洞质量; Li 等人^[17] 计算了该源的色指数, 并讨论了其颜色变化性质. 耶鲁大学管理的 SMARTS (Small and Moderate Aperture Research Telescope System) 项目²⁾ 自 2011 年起从近红外 (JK) 和光学 (BVR) 波段对 PKS 0537–441 进行观测. Sandrinelli 等人^[18,19] 综合分析了 SMARTS, REM 和 Fermi-LAT 的观测数据后指出该源在光学波段可能具有约 140 d 的光变周期, 在 γ 射线波段可能具有约 280 d 的光变周期. 此外, PKS 0537–441 在紫外、射电等波段也被广泛观测和研究.

2 观测数据

耶鲁大学管理的 SMARTS 项目使用位于智利的托洛洛山美洲际天文台的四台一米级口径 (1.5, 1.3, 1.0, 0.9 m) 望远镜从近红外和光学波段对 γ 射线耀变体源进行观测. SMARTS 项目的观测数据的分析和处理见 Bonning 等人^[20] 的文献. 由于 SMARTS 项目没有在光学 V 波段对 PKS 0537–441 进行观测, 我们仅使用 2011 年 1 月–2015 年 5 月间的光学 B 和 R

波段的数据来进行研究. 其中, 光变 B 波段 91 个数据点, R 波段 194 个数据点. 考虑到两波段的平均观测间隔约为 6 min, 具有很好的准同时性, 经过整理, 筛选出 89 个准同时观测数据来研究 PKS 0537–441 的光学谱特性.

3 光学谱特性

3.1 光变曲线和谱指数变化曲线

光学 B 和 R 波段的准同时数据为我们研究耀变体 PKS 0537–441 在不同时标上的流量和谱变化提供了可能. 由于耀变体的红外/光学谱经常表现为幂律谱 ($F_{\nu} \propto \nu^{-\alpha}$), 那么 B 和 R 波段的光学谱指数可以通过

$$\alpha = -\frac{\log(F_B/F_R)}{\log(\nu_B/\nu_R)} \quad (1)$$

进行计算^[21]. F_B 和 F_R 分别为 B 和 R 波段的流量, ν_B 和 ν_R 分别为两波段的频率. 光学谱指数 α 的误差经误差传递公式计算. PKS 0537–441 的历史光变曲线和谱指数变化曲线如图 1 所示. 从图中可以看到, 在整个观测区间 (2011 年 1 月–2015 年 5 月), PKS 0537–441 在 B 和 R 波段均表现出剧烈的光变. 流量快速上升和下降的现象在光变曲线中数次出现. 例如: F_B 在约 73 d 的时间内从 3.74 mJy (2011 年 1 月 31 日) 下降到 2.03 mJy (2011 年 4 月 14 日). 又如: 在 2013 年 4 月的爆发中, F_R 从 2013 年 3 月 3 日的 0.84 mJy 开始迅速上升, 在 4 月 5 日达到流量的峰值 2.39 mJy, 之后又迅速下降, 最终在 5 月 11 日达到流量最低值 0.56 mJy. 整个爆发仅持续了约 69 d. 此外, 持续时间为数月的爆发在观测区间多次发生, 这与 Sandrinelli 等人^[19] 的分析是一致的. 事实上, 剧烈的光变正是耀变体的一个重要观测特征.

如图 1 所示, 虽然 B 波段的观测存在一段较长的空白, 但是它和 R 波段的观测具有明显的相关性. 我们对两个波段的准同时数据进行线性回归分析, 结果为

1) 详见 <http://www.rem.inaf.it/>

2) 详见 <http://www.astro.yale.edu/smarts/>

图1 PKS 0537-441 的长周期光变曲线和谱指数变化曲线

Figure 1 Long-term light curves and spectral curve of PKS 0537-441.

$$F_R = (-0.044 \pm 0.012) + (1.510 \pm 0.008)F_B, \quad (2)$$

Pearson 相关系数 $r = 0.999$. B 和 R 波段流量间的强相关性说明这两个波段的辐射产生于同一辐射区域.

图1中的谱指数变化曲线具有明显的波动,但其波动的趋势并不明确,并且它与B和R波段光变曲线的关联性也很难直接得到,这些都需要采取其他方法进行分析.本文对谱指数的分布进行统计,结果显示,谱指数在0.62和2.35间波动,平均值为1.14,标准偏差为0.27.

3.2 不同时标下的光学谱性质

对 PKS 0537-441 在红外/光学波段的流量变化与谱性质的早期研究^[16,17]表明它具有“Bluer-When-Brighter”(BWB)的性质,即其红外/光学谱随着流量的增加而变蓝.为分析流量变化与谱指数变化之间的相关性,基于 SMARTS 的观测数据,本文对整个观测区间的流量与谱指数进行线性回归分析,结果为

$$\alpha = (1.001 \pm 0.042) + (-0.971 \pm 0.182)\log F_R, \quad (3)$$

Pearson 相关系数 $r = -0.558$, 概率 $P = 1.37 \times 10^{-6}$, 结果如图2所示.由此可以看出:在长时标上,光学R波段的流量与谱指数具有一定的负相关性,即谱指数随着R波段流量的上升而增大,下降而减小.这样的结果支持 PKS 0537-441 在长时标具有 BWB 性质的结论,这与早期的研究结果是一致的.

为研究中等时标,特别是爆发前后该源的流量与谱指数间的关系,我们将整个观测区间划分为9个子区间.在拟合耀变体由于爆发而形成流量峰时,常假设流量的上升和衰退具有指数形式^[22]:

$$F(t) = F_c + F_0 \left(e^{\frac{t_0-t}{T_r}} + e^{\frac{t-t_0}{T_d}} \right)^{-1}, \quad (4)$$

其中, F_c 为爆发时的基本流量, F_0 为爆发幅度, t_0 为爆发峰值的时标, T_r 和 T_d 分别为流量上升和衰退的时间.通过对整个观测区间可能存在的爆发进行拟合,我们确定了每个子区间的流量变化状态(上升或衰退).在此基础上,对每个子区间的流量与谱指数进行线性回归分析,结果如表1所示.需要指出的是,由于观测数据的不完备性和采样的不均匀性,用于线性回归分析的数据偏少.此外,幅度较弱且难以识别的爆发以及爆发外的离散数据未列入子区间.

由表1可见,R波段的流量和谱指数在爆发的上升态和衰退态的相关性,除了在子区间2上的正相关

图2 光学谱指数与R波段流量的线性回归分析.图中实线为回归线

Figure 2 Long-term spectral index α versus R-band flux density. The solid line is the regression line.

表 1 R 波段流量和谱指数在爆发的上升期和衰退期的线性回归分析. 第 (1) 列为子区间序号, 第 (2), (3) 列为子区间起止时间, 第 4 列为爆发期流量变化状态, 第 (5) 列为 R 波段流量平均值, 第 (6)–(10) 列为线性回归参数

Table 1 The results of linear regression for light curves and spectral indices curves in different states during the flares. Column (1) gives the segment term, columns (2) and (3) the start and end time of segment term, column (4) the state described during the flares, column (5) the mean value of the R-band flux densities, and the columns (6)–(10) the parameters of the linear regression results, in which is correlation coefficient, intercept, slope, null hypothesis probability, and the number of the data points in order

(1) 子区间	(2) 开始时间 (JD)	(3) 结束时间 (JD)	(4) 流量状态	(5) 平均流量 (mJy)	(6) 相关系数	(7) 截距	(8) 斜率	(9) 概率	(10) 数据点
1	2456394	2456417	衰退	0.87 ± 0.01	-0.38	1.04 ± 0.03	-0.39 ± 0.28	0.19	14
2	2456527	2456611	上升	0.57 ± 0.01	0.78	1.42 ± 0.11	0.94 ± 0.38	0.07	6
3	2456611	2456682	衰退	0.55 ± 0.01	-0.34	0.84 ± 0.37	-1.36 ± 1.31	0.33	10
4	2456682	2456696	上升	0.62 ± 0.02	-0.81	0.83 ± 0.29	-2.07 ± 1.07	0.19	4
5	2456696	2456719	衰退	0.57 ± 0.01	-0.89	0.83 ± 0.15	-1.76 ± 0.53	0.04	5
6	2456733	2456767	衰退	0.51 ± 0.01	-0.76	0.42 ± 0.53	-3.18 ± 1.59	0.14	5
7	2456890	2456983	上升	0.61 ± 0.01	-0.51	1.08 ± 0.15	-0.91 ± 0.59	0.16	9
8	2457052	2457090	上升	0.60 ± 0.01	-0.70	0.80 ± 0.15	-0.96 ± 0.56	0.18	5
9	2457090	2457125	衰退	0.60 ± 0.01	-0.94	0.77 ± 0.11	-1.49 ± 0.39	0.06	4

性外, 在其他子区间均表现出一定的负相关性. 这样的结果说明 PKS 0537–441 除了在长时标具有 BWB 的性质, 在中等时标上, 特别是爆发的上升期和衰退期均可能表现出 BWB 的性质. 至于子区间 2 表现出的正相关性, 这可能是由于我们缺失了一部分重要的观测数据, 也可能是由 PKS 0537–441 固有的复杂的光学谱性质导致的. 毕竟, 从表 1 中可以看出: 我们进行线性回归分析而使用的数据点较少, 且拟合的统计结果并不十分理想. 此外, 由于 SMARTS 的数据库没有提供短时标范围的观测数据, 所以本文不能对此时标范围内的谱性质进行分析.

3.3 离散相关函数分析

3.3.1 离散相关函数法

离散相关函数法 (DCF) 常被用于研究活动星系核多波段流量变化的相关性和时间延迟. 离散相关函数法不需要对观测数据进行插值, 从而避免了插值对分析的影响. 离散相关函数法于 1988 年被 Edelson 和 Krolik^[23] 引入, Hufnagel 和 Bregman^[24] 于 1992 年提出了误差估计. 对于给定的两个时间序列 a 和 b 中的任意一个对数据 (a_i, b_j) , 可以求出与之对应的

$$\text{UDCF}_{ij} = \frac{(a_i - \bar{a})(b_j - \bar{b})}{\sqrt{\sigma_a^2 e_a^2 - \sigma_b^2 e_b^2}}, \quad (5)$$

其中, $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 分别为序列 a 和 b 的平均值, σ_a 和 σ_b 分别为 a 和 b 的标准偏差, e_a 和 e_b 分别为 a_i 和 b_i 的测量误差. 对应给定的延迟 τ , 离散相关函数为

$$\text{DCF}(\tau) = \frac{1}{M} \sum \text{UDCF}_{ij}(\tau), \quad (6)$$

其中, M 为满足 $\tau - \Delta\tau/2 \leq \Delta t_{ij} < \tau + \Delta\tau/2$ 的 UDCF 个数. DCF(τ) 对应的标准偏差为

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{M-1} \sqrt{\sum [\text{UDCF}_{ij}(\tau) - \text{DCF}(\tau)]^2}. \quad (7)$$

在 DCF(τ)- τ 的关系图中, DCF(τ) 的峰值 DCF_{peak} 的大小说明序列 a 和 b 的相关性, 其对应的时间即所求的时间延迟. 时间延迟 τ 小于 0 表示 a 超前于 b , 反之则表示滞后. 若分析的序列相同, 此时得到的离散相关函数可称为离散自相关函数 (DACF). 与自相关函数 (ACF) 类似, DACF 也可以用来寻找光变曲线中的周期成分, 计算时不考虑 $\tau = 0$ 的 DCF_{peak} , 而其他的 DCF_{peak} 对应的 τ 值就为可能存在的周期值.

为了提高对时间延迟估计的可靠性, 论文采用 Peterson 等人^[25] 提出的 FR/RSS (Flux Redistribution /Random Subset Selection) 进行蒙特卡罗模拟. 每次模拟均计算 DCF_{peak} 的质心 τ_c , 其计算式为

$$\tau_c = \frac{\sum_i \tau_i \text{DCF}_i}{\sum_i \text{DCF}_i}, \quad (8)$$

计算时, 本文取 $DCF_i > 0.8DCF_{\text{peak}}$. 在经过大量模拟后 (一般不少于 1000 次), 对得到质心的分布图 (Cross-Correlation Centroid Distribution, CCCD) 进行分析进而得到时间延迟的误差估计.

3.3.2 分析结果

基于 DCF 方法, Zhang 等人^[16]对 REM 望远镜的观测数据进行分析后指出光学和近红外各波段流量存在很强的相关性, 但是不存在明显的延迟. 我们使用 DCF 方法对 PKS 0537-441 的 B 波段和 R 波段流量、R 波段和 R 波段流量以及 R 波段流量和谱指数的相关性进行分析, 结果如图 3 的所示. 图 3 的各子图中的插图是进行 1000 次 FR/RSS 运算后得到的 CCCD 分布图. 考虑到观测区间的时间跨度和数据存在的观测空白, 计算 DCF 时采用的时间延迟 τ 的范围为 $(-500-500)$ d, 而 $\Delta\tau$ 则为 10 d.

图 3(a) 展示了 R 波段和 B 波段流量的 DCF 分析结果. 图中, DCF_{peak} 为 (1.76 ± 0.18) , 其对应的时间延迟为 20 d, 说明这两个波段流量变化具有很强的相关性, 并与 3.2 节的线性回归分析是一致的; 而 DCF_{peak} 对应的时间延迟则说明 R 波段的流量变化领先/滞后 B 波段约 20 d. 而 CCCD 给出在 1σ 水平上时间延迟为 (35.62 ± 8.63) d. 因此, 我们认为这两个波段的流量变化存在 (35.62 ± 8.63) d 的时间延迟, 而这个结果是之前没有被发现的.

因为 R 波段的观测数据较为完备, 我们对其进行 DACF 分析, 寻找光变曲线中可能存在的周期成分, 结果如图 3(b) 所示. 可以看到, DCF 在时间延迟 $\tau = 0$ 的左右两侧出现了峰值, 但信号较为嘈杂. 考虑到计算时采用的 $\Delta\tau$ 为 10 d, 小于或靠近 $\Delta\tau$ 的结果没有物理意义, 我们使用 (8) 式在 $(30-100)$ d 范围内寻找质心, CCCD 结果 (图 3(b) 的插图) 表明 PKS 0537-441 在 R 波段可能存在 (53.06 ± 6.62) d 的周期成分. 从图 3 中还可以看到 DCF 在约 250 d 附近形成一个明显的隆起, 这也可能是光变曲线中存在的周期成分. 在 $(100-500)$ d 范围使用 (8) 式得到的 CCCD 分布图表明光变曲线还可能存在 (273.88 ± 20.69) d 的周期成分, 这个周期成分与文献 [19] 中的图 7 中功率谱分析所显示的约 270 d 的周期成分是一致的.

图 3(c) 展示了 R 波段流量和谱指数的 DCF 分析

结果. 图中, 时间延迟 $\tau = 0$ 对应的 DCF 值为 -0.50 , 这说明 R 波段流量变化和谱指数间有明显的负相关性, 这证实了 3.2 中线性回归分析的结果. 与图 3(a) 和 (b) 不同的是, DCF 没有形成明显的峰, 但是在 -30 d 附近存在一个显著的低谷. 事实上, 这是由于 R 波段流量与谱指数之间存在的负相关性造成的. 计算时, 我们取 $DCF_i < 0.8DCF_{\text{peak}}$ 并进行 FR/RSS 运算, 得到的 CCCD 分布图 (图 3(c) 的插图) 给出在 1σ 置信水平上时间延迟为 (-35.02 ± 9.31) d 的结果. 这说明谱指数变化滞后 R 波段流量 (35.02 ± 9.31) d. 这与 Li 等人^[17]分析 REM 观测数据得到色指数 V-R 与 V 波段流量变化存在延迟的结果是一致的. 此外, 由于数据较少, 使用 DCF 方法对表 1 中子区间进行分析不能得到有意义的结果.

4 讨论

线性回归分析表明, 光学波段的流量与谱指数在长时标表现为负相关性, 在中等时标, 特别是爆发的上升期和衰退期也表现为负相关性. 离散相关函数分析既验证了长期范围上存在的负相关性, 还揭示出流量变化领先谱指数 (35.02 ± 9.31) d. 这些都支持 PKS 0537-441 是具有 BWB 性质的耀变体.

耀变体的光学波段流量变化与谱指数的相关性的早期研究揭示出它可能具有两种谱 (颜色) 变化性质: BWB 和 RWB (Redder-When-Brighter). 作为耀变体子类之一的蝎虎天体一般表现为 BWB 性质, 其光学谱随着流量的增加而变平 (蓝), 减弱而变陡 (红). 例如: 著名的蝎虎天体 BL Lacertae 在爆发期和平静期都表现出 BWB 的性质. 此外其他备受研究的蝎虎天体如 OJ 287, S5 0716+714 和 3C66A 等也均表现为此性质^[26]. RWB 性质与 BWB 不同, 它表现为光学谱随着流量的减弱而变平 (蓝), 增强而变陡 (红). RWB 常常表现于耀变体的另一子类平谱射电类星体中, 如: 3C 454.3, PKS 1510-089 和 PKS 0420-014 等. 但是, 也有研究者指出耀变体的光学谱特性是复杂的, 可能不是单一的 BWB 或 RWB 性质^[20,27].

PKS 0537-441 是低频段的蝎虎天体, 在长时标和中等时标都表现出 BWB 的特性, 这可以用喷流中的激波模型解释. 当喷流中的相对论激波传播至有

图3 (a) R波段和B波段流量的离散相关函数图; (b) R波段和R波段流量的离散相关函数图; (c) R波段流量和谱指数的离散相关函数图. 各子图中的插图是进行1000次FR/RSS运算后得到的CCCD分布图

Figure 3 Panel (a) shows the DCF between the R-band and B-band fluxes densities; panel (b) the DACF of the R-band fluxes densities; panel (c) the DCF between the R-band fluxes densities and the spectral indices. The inset in each panel displays the CCD relative to the central peak obtained by running 1000 FR/RSS Monte Carlo realizations.

大量电子、强烈的磁场或者存在湍流的辐射区域时, 电子被加速到相对论性, 该区域的辐射率增加, 观测到的流量开始迅速上升. 激波在传播过程中扫过越来越多的物质而衰减, 速度降低, 激波加速的电子能量也降低, 从而辐射峰频向低能段移动. 不同频率的辐射产生于离核心区不同距离的区域, 高频的辐射将先达到流量的峰值, 并且先于低频的辐射被观测到^[28]. 这能解释我们得到的光学B波段和R波段流量的强相关性, 且B波段流量领先R波段流量 (35.62 ± 8.63) d的结果. 同时, 这也是在流量上升的早期, 谱变蓝这个现象更容易被观测到的原因. 对于蝎虎天体, 喷流主导了观测到的流量, 高频辐射上升更快, 使得BWB的性质更容易被观测到. 如果高频辐射上升和下降都比低频辐射要快的话, 那么在中等时标上, 光变的上升和下降均表现为BWB的特性, 这也能解释表1的统计结果. 对于平谱射电类星体, 由于有着比喷流更长变化时标的吸积盘对其光学辐射产生的贡献, 喷流内的同步辐射将在红外波段达到峰值, 辐射在低频的红外波段有更大的变化幅度, 从而使该类天体产生RWB的谱变化性质. 至于观测到的光学谱变化不明显的情况, 则可能由于高频和低频辐射的流量处于相同水平造成的.

部分耀变体的长时标光变具有准周期性, 如: OJ 287 光学波段的 11.65 a^[29], Mrk 421 射电 22 GHz 波段的约 3.85 a^[30], PKS 1510-089 射电和 X 射线波段的约 1.80 a^[31,32], OQ 530 光学 B 波段的 $(0.97 - 1.15)$

a^[33] 的周期性光变等. Sandrinelli 等人^[18] 结合 REM 和 SMART 两个望远镜光学 R 波段的观测数据, 并使用功率谱方法分析得到 PKS 0537-441 的 R 波段光变曲线可能具有 (58 ± 1) d 和 (150 ± 5) d 的准光变周期. 考虑到样本数据具有差异, 我们认为使用 DACF 得到 (53.06 ± 6.62) d 的准周期与 (58 ± 1) d 的结果是一致的. 此外, DACF 的分析还表明 PKS 0537-441 在 R 波段还可能具有 (273.88 ± 20.69) d 的准周期成分. 由此可见, 耀变体的准周期性光变是十分复杂的, 周期成分可能并不唯一.

5 结论

SMARTS 项目在 2011-2005 年间对耀变体 PKS 0537-441 进行观测, 并在线公布了观测数据. 本文使用光学 B 和 R 波段的数据研究了耀变体 PKS 0537-441 的光学谱特性.

PKS 0537-441 在 B 和 R 波段均存在剧烈的光变, 谱指数变化曲线也存在波动性. 线性回归和离散相关函数的分析结果均表明光学 R 波段的流量与谱指数在长时标上具有负相关性, 表现为 BWB 的谱变化性质. 线性回归分析还表明在中等时标上, 特别是爆发时流量的上升期和衰退期, 该源也表现出 BWB 的性质. 这个特性可以用喷流中的激波模型解释. 离散相关函数分析表明 B 波段和 R 波段流量变化存在强相关, 这两个波段的辐射产生于同一辐射

区域, 且频率较高的 B 波段流量变化超前较低的 R 波段约 (35.62 ± 8.63) d. 此外, R 波段的光变曲线可能存在 (53.06 ± 6.62) d 和 (273.88 ± 20.69) d 的准周期成分.

致谢 感谢 SMARTS 项目提供的观测数据. 衷心编辑部老师高效的工作和审稿专家的良好建议.

参考文献

- 1 Urry C M, Padovani P. Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei. *Publ Astron Soc Pac*, 1995, 107: 803–845
- 2 Ulrich M H, Maraschi L, Urry C M. Variability of active galactic nuclei. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1997, 35: 445–502
- 3 Böttcher M, Reimer A, Sweeney K, et al. Leptonic and hadronic modeling of fermi-detected blazars. *Astrophys J*, 2013, 768: 54–68
- 4 Liller W. The photometric history of the object identified with PKS 0537–441. *Astrophys J Lett*, 1974, 189: L101–L102
- 5 Romero G E, Cellone S A, Combi J A, et al. I. Optical microvariability of EGRET blazars. *Astron Astrophys*, 2002, 390: 431–438
- 6 Impey C D, Tapia S. New blazars discovered by polarimetry. *Astrophys J*, 1988, 333: 662–672
- 7 Lewis G F, Ibata R A. An investigation of gravitational lensing in the southern BL Lac PKS 0537–441. *Astrophys J*, 2000, 528: 650–654
- 8 Heidt J, Jäger K, Nilsson K, et al. PKS 0537–441: Extended [O II] emission and a binary QSO? *Astron Astrophys*, 2003, 406: 565–577
- 9 Thompson D J, Bertsch D L, Fichtel C E, et al. Gamma radiation from blazar PKS 0537–441. *Astrophys J*, 1993, 410: 87–89
- 10 Pucella G, D’Ammando F, Romano P, et al. AGILE detection of intense γ -ray activity from the blazar PKS 0537–441 in October 2008. *Astron Astrophys*, 2010, 522: 109–114
- 11 D’Ammando F, Antolini E, Tosti G, et al. Long-term monitoring of PKS 0537–441 with Fermi-LAT and multiwavelength observations. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 431: 2481–2492
- 12 Dolcini A, Covino S, Treves A, et al. Multiband photometry of the blazar PKS 0537–441: A major active state in December 2004–March 2005. *Astron Astrophys*, 2005, 443: L33–L36
- 13 Pian E, Romano P, Treves A, et al. Simultaneous swift and REM monitoring of the blazar PKS 0537–441 in 2005. *Astrophys J*, 2007, 664: 106–116
- 14 Impiombato D, Covino S, Treves A, et al. Optical and infrared photometry of the blazar PKS 0537–441: Long and short timescale variability. *Astrophys J Suppl Ser*, 2011, 192: 12–17
- 15 Sandrinelli A, Covino S, Treves A. Long and short term variability of seven blazars in six near-infrared/optical bands. *Astron Astrophys*, 2014, 562: 79–98
- 16 Zhang B K, Wang S, Zhao X Y, et al. Long-term optical and infrared variability of the BL Lac object PKS 0537–441. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 428: 3630–3635
- 17 Li X P, Zhang L, Luo Y H, et al. Colour variation of the BL Lacertae object PKS 0537–441. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 449: 2750–2758
- 18 Sandrinelli A, Covino S, Treves A. Gamma-ray and optical oscillations in PKS 0537–441. *Astrophys J*, 2016, 820: 20–26
- 19 Sandrinelli A, Covino S, Dotti M, et al. Quasi-periodicities at year-like timescales in blazars. *Astron J*, 2016, 151: 54–68
- 20 Bonning E, Urry C M, Bailyn C, et al. Smarts optical and infrared monitoring of 12 gamma-ray bright blazars. *Astrophys J*, 2012, 756: 13–29
- 21 Mücke A, Pohl M, Reich P, et al. On the correlation between radio and gamma ray luminosities of active galactic nuclei. *Astron Astrophys*, 1997, 320: 33–40
- 22 Chatterjee R, Bailyn C D, Bonning E W, et al. Similarity of the optical-infrared and γ -ray time variability of Fermi blazars. *Astrophys J*, 2012, 749: 191–205
- 23 Edelson R A, Krolik J H. The discrete correlation function—A new method for analyzing unevenly sampled variability data. *Astrophys J*, 1988, 333: 646–659
- 24 Hufnagel B R, Bregman J N. Optical and radio variability in blazars. *Astrophys J*, 1992, 386: 473–484
- 25 Peterson B M, Wanders I, Horne K, et al. On uncertainties in cross-correlation lags and the reality of wavelength-dependent continuum lags in active galactic nuclei. *Publ Astron Soc Pac*, 1988, 110: 660–670
- 26 Zhang B K, Dai B Z, Zhang L, et al. The long-term optical behavior of BL Lac object S5 0716+714. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2010, 53: 1370–1374
- 27 Rani B, Gupta A C, Strigachev A, et al. Short-term flux and colour variations in low-energy peaked blazars. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 404: 1992–2017

- 28 Lei M C, Wang J C. TeV blazar (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2015, 45: 119506 [雷买昌, 王建成. TeV 耀变体. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2015, 45: 119506]
- 29 Sillanpaa A, Haara S, Valtonen M J, et al. OJ 287-Binary pair of supermassive black holes. *Astrophys J*, 1988, 325: 628–634
- 30 Li X P, Zhang X, Zhang H J, et al. The characteristic periodicity analysis of the radio flux variability of BL Lac object Mkn 421 (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2011, 41: 325–330 [李孝攀, 张雄, 张皓晶, 等. BL Lac 天体 Mkn 421 射电流量变化周期特性. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41: 325–330]
- 31 Zhang H J, Zhao G, Zhang X, et al. The characteristic periodicity analysis of the radio flux variability of quasar PKS 1510–089. *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2009, 52: 1442–1448
- 32 Li X P, Zhang H J, Zhang X. Characteristic periodicity analysis of the X-ray flux variability of quasar PKS 1510–089 (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2011, 60: 089801 [李孝攀, 张皓晶, 张雄. 类星体 PKS 1510–089 的 X 射线流量变化周期特性. *物理学报*, 2011, 60: 089801]
- 33 Wang H T, Su Y P. The analysis of radio and optical variability in blazar OQ 530 (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2015, 45: 029801 [王洪涛, 苏彦荃. OQ 530 射电和光学波段的光变分析. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2015, 45: 029801]

Optical spectral behaviour of the blazar PKS 0537–441

LI XiaoPan*, LUO YuHui, ZHOU Li, SHAN YuQiong & CHEN JiuFu

College of Physics and Electronic Information Engineering, Zhaotong University, Zhaotong 657000, China

We present the long-term light curves of the blazar PKS 0537–441 in the optical B and R bands during the period from January 2011 to May 2015 on the basis of the photometric data provided by the SMARTS Consortium, and calculate the corresponding colour indices. The linear regression and discrete correlation function methods have been performed on the light curves and the colour indices curve. The results can be summarized as follows: (1) the light curves in the B and R bands show large variabilities on various timescales, while the colour indices curve reveals significant fluctuations which indicates the variation of spectra. A general BWB (bluer-when-brighter) trend is confirmed in long-term timescales and in the ascent and descent states during flares; (2) the linear regression shows that the light curves in the B and R bands are well correlated. The results obtained by the discrete correlation function method which reveals that the flux variation in the B band led that in the R band by (35.62 ± 8.63) d; (3) the analysis of periodicity suggests that (53.06 ± 6.62) d and (273.88 ± 20.69) d are the possible periods in the R-band light curve.

blazar, PKS 0537–441, spectral index, periodicity

PACS: 98.54.Cm, 95.85.Kr, 95.30.Ky, 95.75.Wx

doi: 10.1360/SSPMA2016-00341