

OJ 287, 0716+714 与 BL Lacertae 的光变分析*

王洪涛^{1†} 潘艳平^{2,3}

(1 廊坊师范学院物理与电子信息学院 廊坊 065000)

(2 中国科学院云南天文台 昆明 650011)

(3 福建工程学院数理系 福州 350108)

摘要 OJ 287 是存在着剧烈活动的低峰频 BL Lac 天体, 其低频段的能谱与另两个 TeV BL Lac 天体 (0716+714 和 BL Lacertae) 在低频段的能谱很相似, 但是切仑科夫望远镜却没能探测到它的 TeV 射线. 利用这 3 个天体的观测数据, 比较它们在 22 GHz、37 GHz 和 B 波段的最小光变周期及延迟的异同, 进一步寻找没有观测到 OJ 287 的 TeV 伽马射线的可能原因. 分析结果显示: (1) 最小光变周期方面, OJ 287 在 37 GHz 和 B 波段的周期偏小, 在 22 GHz, OJ 287 与 0716+714 的结果相当, 但与 BL Lacertae 相比要小很多, OJ 287 的周期更短表明其活动性更强, 却没有探测到来自 OJ 287 的 TeV 伽马射线, 这表明 OJ 287 在 TeV 波段的辐射与这 3 个低能波段最小光变周期之间可能没有联系; (2) 延迟方面, OJ 287 在 B 波段相对于 37 GHz 的延迟要长于 0716+714, 短于 BL Lacertae; 在 37 GHz 相对于 22 GHz 的延迟要短于 0716+714, 而 BL Lacertae 在 37 GHz 相对于 22 GHz 的时延为负值, 表明 22 GHz 要超前于 37 GHz. 通过对延迟的比较分析, 并没有发现 OJ 287 与 0716+714 和 BL Lacertae 之间存在明显的差异; 从能谱来看, 很可能是由于 OJ 287 在 TeV 波段的能谱较陡造成切仑科夫望远镜没有探测到来自 OJ 287 的伽马辐射, 但 TeV 能段较陡的能谱对低能段光变的影响目前还不是很清楚.

关键词 类星体: 个别, 星系: 基本参数, 方法: 分析

中图分类号: P 158; **文献标识码:** A

1 引言

Blazar 是射电强活动星系核的一个子类, 它可分为平谱射电类星体和 BL Lac 天体两类^[1]. Blazar 通常具有高光度、大而快的光变以及能谱呈现非热辐射等特征. 这些极端特征通常可用相对论喷流模型得到较好的解释^[2-3]. Blazar 的辐射由产生于相对论喷流的非热辐射占主导, 从而为研究喷流提供了一个天然实验室. 通过对 blazar 及其它射电强活动星系核的研究, 将有助于最终解决喷流从黑洞吸积系统提取能量的物理机制^[4-7].

2011-11-17 收到原稿, 2012-01-06 收到修改稿

* 廊坊师范学院科学研究项目 (LSZQ201103) 及廊坊市科学技术研究与发展计划项目 (2012011002) 资助

† htwtwang@126.com

Blazar 的大幅快速光变为我们研究活动星系核内部的物理过程提供了一种重要手段. 通过对 blazar 光变的研究, 可以进一步揭示其内部结构、辐射机制和物理过程等重要信息. 20 世纪 90 年代, EGRET 探测到 blazar 在伽马射线波段的辐射. 结合以往在射电、光学和 X 射线等波段的观测, 发现 blazar 的能谱分布大致呈现“双峰”结构^[2], 目前低能峰通常认为是由相对论电子的同步辐射产生的, 而对高能峰的解释不一, 主要分为轻子模型和强子模型两大观点. 目前, 主流观点倾向于轻子模型, 相应轻子模型具体解释有同步自康普顿模型 (SSC 模型)^[8–10], 种子光子来源于吸积盘的热辐射光子的 ECD 模型^[11–12], 种子光子来源于喷流外部宽线云的 ECC 模型^[13–15], 种子光子来自喷流周围的微波背景辐射的模型^[16], 种子光子来源于喷流外部尘埃环的红外热辐射模型^[17] 等. 根据 BL Lac 天体低能峰位置的不同, 进一步可将 BL Lac 天体分为低峰频 BL Lac 天体、中间峰频 BL Lac 天体和高峰频 BL Lac 天体^[18].

在切仑科夫望远镜所探测到的 TeV blazar 中, 大部分都是高峰频的 BL Lac 天体. 然而, 0716+714 和 BL Lacertae 是低峰频的 BL Lac 天体, 切仑科夫望远镜却探测到了它们的 TeV 射线; OJ 287 是低峰频的 BL Lac 天体, 有着剧烈的活动, 在低能段的能谱形状和 0716+714 及 BL Lacertae 很相似, 但是却没能探测到它的 TeV 射线^[19]. 我们尝试比较 OJ 287、0716+714 和 BL Lacertae 在 22 GHz、37 GHz 及光学 B 波段的最小光变周期和 3 个波段之间延迟的异同, 揭示没有探测到 OJ 287 的 TeV 射线的可能原因.

2 数据和光变曲线

我们从历史文献中搜集了 OJ 287、0716+714 和 BL Lacertae 在 22 GHz、37 GHz 及 B 波段的近几十年的数据. 具体如表 1 所示, 光变曲线如图 1 所示.

表 1 OJ 287, 0716+714 和 BL Lacertae 的数据来源

Table 1 The data sources of OJ 287, 0716+714 and BL Lacertae

Band	OJ 287	0716+714	BL Lacertae
22 GHz	Salonen et al. ^[20] ; Teräsranta et al. ^[21–23]	Teräsranta et al. ^[21–23]	Teräsranta et al. ^[21–23]
37 GHz	Teräsranta et al. ^[21–23] ; Nieppola et al. ^[24]	Teräsranta et al. ^[21–23] ; Nieppola et al. ^[24] ; Zhang et al. ^[25–26]	Teräsranta et al. ^[21–23] ; Nieppola et al. ^[24]
	Villforth et al. ^[27] ; Fan et al. ^[28–29] ;	Hufnagel et al. ^[32] ; Ghisellini et al. ^[33] ; Villata et al. ^[34] ;	Pollock et al. ^[41] ; Webb et al. ^[42] ;
B band	Zheng et al. ^[30] ; Qian et al. ^[31]	Qian et al. ^[35] ; Raiteri et al. ^[36] ; Montagni et al. ^[37] ; Wu et al. ^[38] ; Zhang et al. ^[39] ; Zhang ^[40]	Bai et al. ^[43–44] ; Fan et al. ^[28] ; Hagen-Thorn et al. ^[45] ; Villata et al. ^[46–47]

3 数据分析方法

3.1 结构函数法

结构函数法^[48] 是研究光变时标和光变周期的一种比较常用的方法. 这种方法不需

要插值, 而且需要定义参数很少, 因此更便于寻找天文数据的时标和周期. 经常用到的是结构函数在一阶情况下的计算公式.

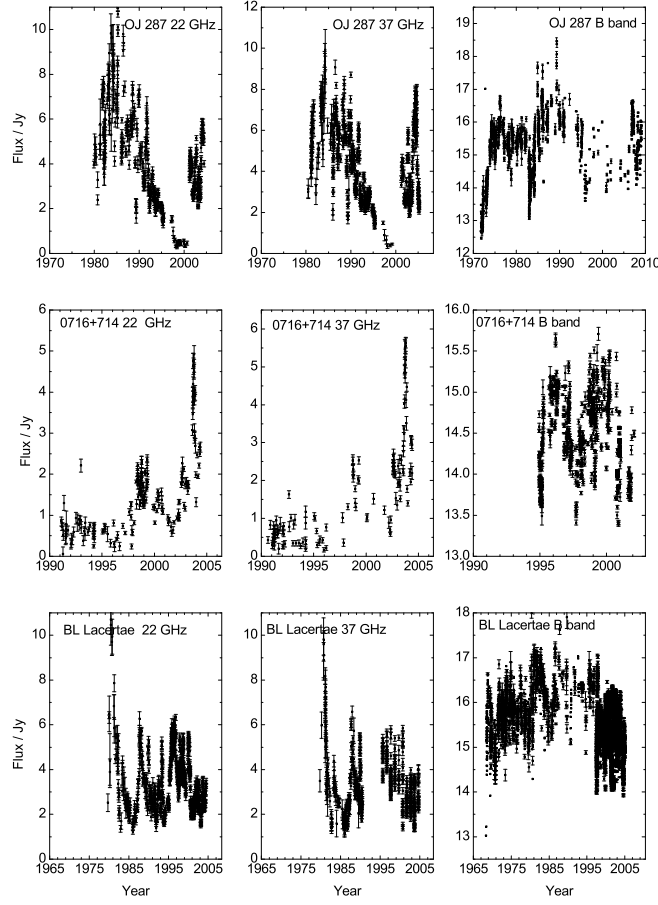


图 1 OJ 287, 0716+714 和 BL Lacertae 的光变曲线

Fig. 1 The light curves of OJ 287, 0716+714 and BL Lacertae

一阶结构函数的定义式为

$$D_f^{(1)}(k) = \frac{1}{N^{(1)}(k)} \sum_{i=1}^N w(i)w(i+k)[f(i+k) - f(i)]^2, \quad (1)$$

其中

$$N^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^N w(i)w(i+k), \quad (2)$$

$$\sigma_f^{(1)} = \frac{8\sigma_{f\delta}^{(2)}}{N^{(1)}(k)} D_f^{(1)}(k), \quad (3)$$

上式中 $f(i)$ 代表源在某一时刻的辐射流量, $w(i)$ 为权重因子, 如果第 i 个点有数据, 则权重因子记为 1; 如果没有, 则权重因子记为 0. $\sigma_f^{(1)}$ 为结构函数的误差, $\sigma_{f\delta}^{(2)}$ 代表所有数据点观测误差的变化.

结构函数的特征主要表现为: 如果 τ_s 和 τ_l 分别为光变曲线的最短和最长光变时标, 并且观测的时间跨度远大于 τ_l , 若 $\tau > \tau_l$, 则 $D(\tau)$ 为常数; 若 $\tau < \tau_s$, 则 $D(\tau)$ 正比于 τ^2 ; 若 $\tau_s < \tau < \tau_l$, 则 $D(\tau)$ 正比于 τ^x , 其中 $x \leq 2^{[49]}$. 在结构函数分析图中, 如果出现极小值, 则极小值所对应的横坐标取值与所选取 bin 值的乘积便为光变周期的大小.

3.2 离散相关函数法

离散相关函数法是分析两列数据之间相关性的经典方法^[50], 它不需要插值, 且对误差进行了估计. 具体计算方法分下面几步:

第 1 步, 计算两列数据点之间的离散相关函数值, 定义式如下:

$$UDCF_{ij} = \frac{(a_i - \bar{a})(b_j - \bar{b})}{\sqrt{\sigma_a^2 - e_a^2}(\sigma_b^2 - e_b^2)}, \quad (4)$$

其中 a_i 和 b_j 分别是两列数据 a 和 b 中的数据点, $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 分别是这两列数据的平均值, σ_a 和 σ_b 分别是这两列数据的标准偏差, e_a 和 e_b 分别是两列数据中每个数据点对应的测量误差. 每个 $UDCF$ 点与每对数据点之间的延迟 $\Delta t = t_j - t_i$ 相对应.

第 2 步, 计算处于 $\tau - \Delta\tau/2 \leq \Delta t_{ij} < \tau + \Delta\tau/2$ 时间段内 M 对数据点的平均值, 表达式如下:

$$DCF(\tau) = \frac{1}{M} \sum UDCF_{ij}(\tau), \quad (5)$$

其中 M 表示在 $\Delta\tau$ 间隔中的数据点对的个数. 公式中的标准偏差表示为

$$\sigma_{DCF} = \frac{1}{M-1} \{ \sum [UDCF_{ij} - DCF(\tau)]^2 \}. \quad (6)$$

第 3 步, 对重心值的估计. 由于天文观测光变数据一般不均匀, 通常做法是对处于 DCF_{peak} 峰值附近大于 $0.8DCF_{\text{peak}}$ 的数据点求重心^[51], 但对个别数据点分布很好的情况也可取大于 $0.5DCF_{\text{peak}}$, 甚至大于 $0.3DCF_{\text{peak}}$ 的数据点求重心. 计算表达式为

$$DCF_{\text{centroid}} = \frac{\sum \tau DCF(\tau)}{\sum DCF(\tau)}. \quad (7)$$

在离散相关函数的分析图上, 如果 DCF 的峰值越大, 则表明两列数据相关性越强, DCF 峰值偏离中心的距离与所选取 bin 值的乘积则表示对应的超前或滞后时间. 若 DCF 的峰值在大于零的一侧, 则表示数据 a 超前于数据 b ; 若 DCF 的峰值在小于零的一侧, 则表示数据 a 滞后于数据 b .

4 数据分析

4.1 最小光变周期的比较与分析

我们利用结构函数法对 OJ 287、0716+714 和 BL Lacertae 的最小光变周期进行了分析, 具体分析见图 2. 在图 2 中我们取第 1 个极小值对应的横坐标大小作为这个波段的光变周期, 用这个周期作为这个天体的最小周期, 具体分析结果整理在表 2 中. 比较发现, 在 37 GHz 和 B 波段, OJ 287 的光变周期要明显偏小; 在 22 GHz, OJ 287 和 0716+714 的结果相当, 而 BL Lacertae 要比 OJ 287 和 0716+714 的周期大很多. 总体看, 与 0716+714 和 BL Lacertae 相比较而言, OJ 287 在 22 GHz、37 GHz 和 B 波段的周期偏小, 这表明 OJ 287 在这 3 个波段的活动性要更频繁. 然而到目前为止, 却没有探测到来自 OJ 287 的 TeV 伽马射线, 这表明 OJ 287 在 TeV 波段的辐射与其在 22 GHz、37 GHz 及 B 波段之间的活动性强弱可能没有联系.

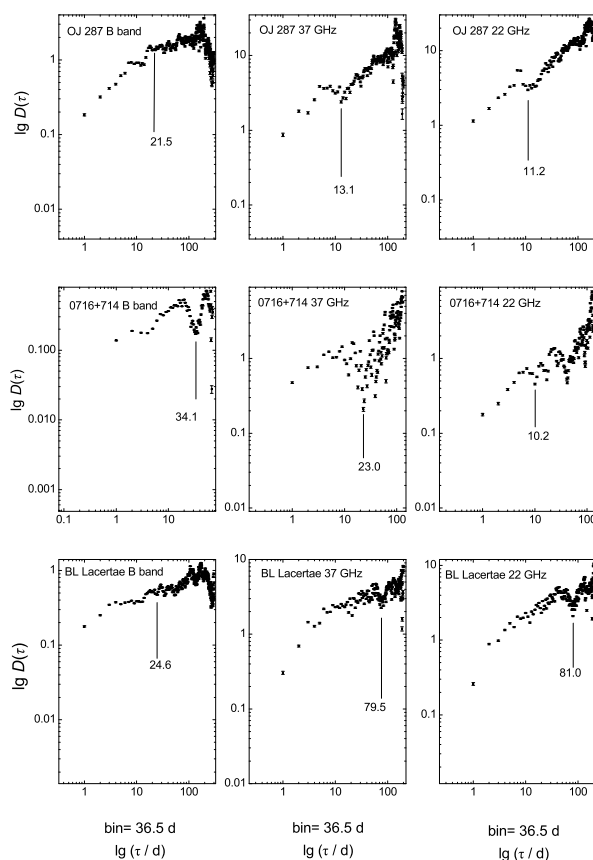


图 2 结构函数法最小光变周期分析图

Fig. 2 The analytical figure of minimum variability period with structure function method

表 2 结构函数法分析最小光变周期的结果

Table 2 The analytical results of minimum variability period with structure function method

Source	22 GHz	period	37 GHz	period	B band	period
	bin=36.5 d	(yr)	bin=36.5 d	(yr)	bin=36.5 d	(yr)
OJ 287	11.2	1.12	13.1	1.31	21.5	2.15
0716+714	10.2	1.02	23.0	2.30	34.1	3.41
BL Lacertae	81.0	8.10	79.5	7.95	24.6	2.46

4.2 时间延迟的分析

利用离散相关函数法对 OJ 287、0716+714 和 BL Lacertae 在 22 GHz、37 GHz 及 B 波段之间的时间延迟进行了分析, 具体分析见图 3. 在分析图中, 若延迟为正, 表示高能波段超前; 若延迟为负, 则表示低能波段超前. 我们用峰值附近大于 $0.8DCF_{\text{peak}}$ 的数据点的重心处对应的横坐标值作为时间延迟, 详细分析结果见表 3. 分析结果显示, OJ 287 在 B 波段相对于 37 GHz 的延迟要长于 0716+714, 短于 BL Lacertae; OJ 287 在 37 GHz 相对于 22 GHz 的延迟短于 0716+714, BL Lacertae 在 37 GHz 相对于 22 GHz 的时延为负值, 表明 22 GHz 超前于 37 GHz. 通过对延迟的比较分析, 我们并没有发现 OJ 287 与 0716+714 和 BL Lacertae 之间存在明显的差异, 表明在 B 波段相对于 37 GHz、37 GHz 相对于 22 GHz 之间的延迟和 TeV 射线的强弱之间可能没有直接联系.

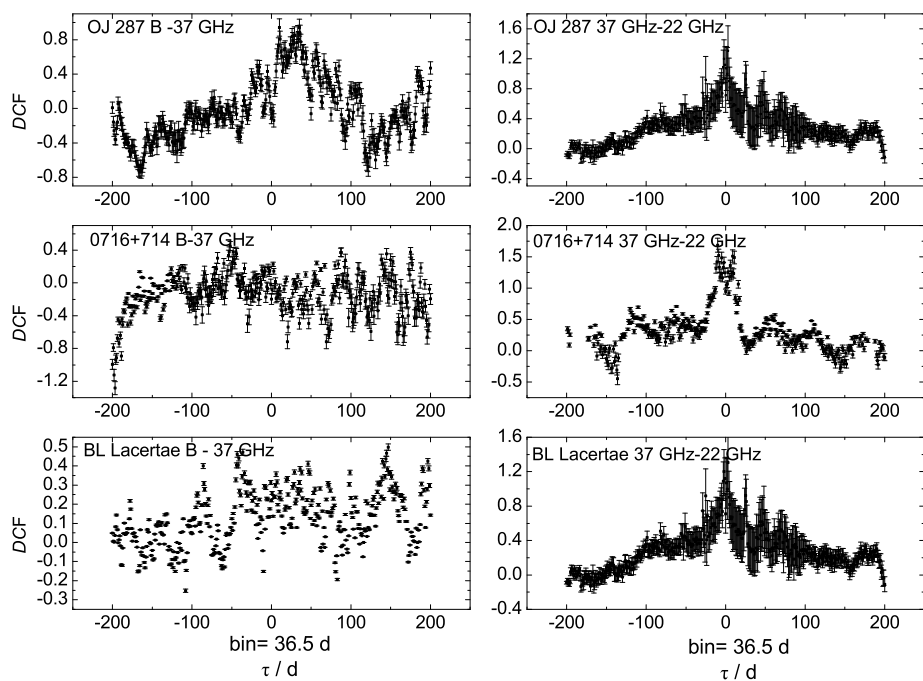


图 3 离散相关函数法分析图

Fig. 3 The analytical figure with discrete correlation function method

表 3 离散相关函数法分析光变延迟的结果

Table 3 The analytical results of time delay with discrete correlation function

Source	method			
	B-37 GHz the bin of abscissa	delay (d)	37 GHz-22 GHz the bin of abscissa	delay (d)
OJ 287	28.1	1025.7	0.45	16.4
0716+714	19.2	700.8	1.5	54.8
BL Lacertae	34.3	1252.0	-0.3	-11.0

5 讨论和结论

(1) 利用结构函数法对 OJ 287、0716+714 及 BL Lacertae 在 22 GHz、37 GHz 及 B 波段的最小光变周期进行了比较分析, 结果发现 OJ 287 的最小周期偏小, 即 OJ 287 在 22 GHz、37 GHz 及 B 波段的活动相对更频繁, 却没有探测到来自 OJ 287 的 TeV 辐射, 表明 OJ 287 在 TeV 波段的辐射与其在 22 GHz、37 GHz 及 B 波段的最小光变周期之间可能没有联系.

(2) 利用离散相关函数法对 OJ 287、0716+714 及 BL Lacertae 在 B 波段相对于 37 GHz 和 37 GHz 相对于 22 GHz 之间的延迟进行了分析, 结果并没有发现 OJ 287 和 0716+714 及 BL Lacertae 在 B 波段相对于 37 GHz 和 37 GHz 相对于 22 GHz 的延迟存在差异, 表明在 B 波段相对于 37 GHz 和 37 GHz 相对于 22 GHz 之间的延迟和 TeV 射线的强弱之间可能没有直接联系.

(3) Fermi 探测到了 OJ 287 在 GeV 能段的辐射^[52], 但地面切仑科夫望远镜却没有探测到 OJ 287 的 TeV 辐射. 据此推测, 很可能是由于 OJ 287 在 TeV 波段的辐射能谱较陡, 使得切仑科夫望远镜没有探测到其伽马辐射. OJ 287 在 TeV 能段的能谱较陡可能是由于星际介质的吸收造成的, 也可能是由于其能谱本身就较陡, 但 TeV 能段较陡的能谱对低能段光变的影响目前还不是很清楚.

致谢 衷心感谢 Claudia M Raiteri 和 Margo Aller 提供相关数据. 衷心感谢审稿人的建议.

参 考 文 献

- [1] Urry C, Padovani P. PASP, 1995, 107: 803
- [2] Ulrich M, Maraschi L, Urry C. ARA&A, 1997, 35: 445
- [3] Blandford R, Konigl A. ApJ, 1979, 232: 34
- [4] 王洪涛, 白金明, 邓文国, 等. 天文学报, 2008, 49: 1
- [5] Wang H T, Bai J M, Deng W G, et al. ChA&A, 2008, 32: 229
- [6] 王洪涛, 杨俊英. 天文学报, 2010, 51: 27
- [7] Wang H T, Yang J Y. ChA&A, 2010, 34: 343
- [8] Marscher A, Gear W. ApJ, 1985, 298: 114
- [9] Maraschi L, Ghisellini G, Celotti A. ApJ, 1992, 397: L5
- [10] Bloom S D, Marscher A P. ApJ, 1996, 461: 657

- [11] Dermer C D, Schlickeiser R M. *A&A*, 1992, 256: L27
- [12] Dermer C D, Schlickeiser R. *ApJ*, 1993, 416: 458
- [13] Sikora M, Begelman M C, Rees M J. *ApJ*, 1994, 421: 153
- [14] Blandford R D, Levinson A. *ApJ*, 1995, 441: 79
- [15] Dermer C D, Sturmer S J, Schlickeiser R. *ApJS*, 1997, 109: 103
- [16] Tavecchio F, Maraschi L, Sambruna R M. *ApJ*, 2000, 544: L23
- [17] Arbeiter C, Pohl M, Schlickeiser R. *A&A*, 2002, 386: 415
- [18] Padovani P, Giommi P. *ApJ*, 1995, 444: 567
- [19] Chen L, Bai J M. *ChPhL*, 2010, 27: 119501
- [20] Salonen E, Terasranta H, Urpo S. *A&AS*, 1987, 70: 409
- [21] Teräsranata H, Tornikoski M, Mujunen A, et al. *A&AS*, 1998, 132: 305
- [22] Teräsranata H, Achren J, Hanski M, et al. *A&A*, 2004, 427: 769
- [23] Teräsranata H, Wiren S, Koivisto P, et al. *A&A*, 2005, 440: 409
- [24] Nieppola E, Tornikoski M, Lähteenmäki A, et al. *AJ*, 2007, 133: 1947
- [25] 张皓晶, 张雄, 董富通, 等. *天文学报*, 2009, 50: 141
- [26] Zhang H J, Zhang X, Dong F T, et al. *ChA&A*, 2009, 33: 373
- [27] Villforth C, Nilsson K, Heidt J. *MNRAS*, 2010, 402: 2087
- [28] Fan J H, Lin R G. *ApJ*, 2000, 537: 101
- [29] Fan J H, Liu Y, Qian B C, et al. *RAA*, 2010, 10: 1100
- [30] Zheng Y G, Zhang X, Bi X W, et al. *MNRAS*, 2008, 385: 823
- [31] Qian B C, Tao J. *PASP*, 2003, 115: 490
- [32] Hufnagel B R, Bregman J N. *ApJ*, 1992, 386: 473
- [33] Ghisellini G, Villata M, Raiteri C M, et al. *A&A*, 1997, 327: 61
- [34] Villata M, Raiteri C M, Popescu M D. *A&AS*, 2000, 144: 481
- [35] Qian B C, Tao J, Fan J H. *AJ*, 2002, 123: 678
- [36] Raiteri C M, Villata M, Tosti G, et al. *A&A*, 2003, 402: 151
- [37] Montagni F, Maselli A, Massaro E. *A&A*, 2006, 451: 435
- [38] Wu J, Zhou X, Ma J, et al. *ASPC*, 2009, 408: 278
- [39] Zhang B K, Dai B Z, Zhang L, et al. *PASA*, 2010, 27: 296
- [40] Zhang Y H. *ApJ*, 2010, 713: 180
- [41] Pollock J T, Pica A J, Smith A G, et al. *AJ*, 1979, 84: 1658
- [42] Webb J R, Smith A G, Leacock R J, et al. *AJ*, 1988, 95: 374
- [43] Bai J M, Xie G Z, Li K H, et al. *A&AS*, 1998, 132: 83
- [44] Bai J M, Xie G Z, Li K H, et al. *A&AS*, 1999, 136: 455
- [45] Hagen-Thorn V A, Larionov V M, Jorstad S G, et al. *AJ*, 2002, 124: 3031
- [46] Villata M, Raiteri C M, Aller H D, et al. *A&A*, 2004, 424: 497
- [47] Villata M, Raiteri C M, Larionov V M. *A&A*, 2009, 501: 455
- [48] Simonetti J H, Cordes J M, Heeschen D S. *ApJ*, 1985, 296: 46
- [49] Simonetti J H, Cordes J M. *ApJ*, 1990, 349: 97
- [50] Edelson R A, Krolik J H. *ApJ*, 1988, 333: 646
- [51] Peterson B M. *Advanced Lectures on the Starburst-AGN Connection*. Singapore: World Scientific, 2001: 3
- [52] Neronov A, Vovk I. *MNRAS*, 2011, 412: 1389

Comparison and Analysis of Light Variations of OJ 287, 0716+714 and BL Lacertae

WANG Hong-tao¹ PAN Yan-ping^{2,3}

(1 *Physics and Electronics Information College, Langfang Teachers' College, Langfang 065000*)

(2 *Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011*)

(3 *Department of Mathematics and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108*)

ABSTRACT OJ 287 is a low peak frequency BL Lac object with violent actions. Its energy spectrum distribution (SED) in low frequency is similar to the other two TeV BL Lac objects (0716+714 and BL Lacertae). However, its TeV gamma rays are not detected by the Cherenkov telescopes. We compare the differences and similarities in the aspects of the minimum variation period and time delay among 22 GHz, 37 GHz and B band. The causes of OJ 287 without detected TeV gamma rays are studied and analyzed. The results are as follows: (1) In 37 GHz and B band, the minimum variability periods of OJ 287 are smaller than those of the other two objects, respectively. In 22 GHz, the minimum variability period of OJ 287 is comparable to 0716+714, but is much smaller than that of BL Lacertae. Though with smaller variation period, we can not detect the TeV gamma rays from OJ 287. It is shown that the radiation from OJ 287 in TeV band is possibly not related to the minimum variation period in 22 GHz, 37 GHz and B band. (2) The time delay of OJ 287 in B band relative to 37 GHz is longer than that of 0716+714, but shorter than that of BL Lacertae. The time delay of OJ 287 at 37 GHz relative to 22 GHz is shorter than that of 0716+714. The corresponding time delay of BL Lacertae is negative, which means that the radiation at 22 GHz leads the radiation at 37 GHz. By comparing and analyzing the results in time delay, we can not find some obvious differences among OJ 287, 0716+714 and BL Lacertae. It is probable that the SED of OJ 287 is steeper than others, which leads to the undetected TeV gamma ray radiation with the Cherenkov telescopes. It is still unknown how the SED in TeV band affects the light variation in the low energy band.

Key words quasars: individual, galaxies: fundamental parameters, methods: analytical