

BL Lac 天体 S5 0716 + 714 的光变周期特性研究*

张皓晶¹⁾ 张 雄^{2)†}

1) 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

2) 云南师范大学物理系, 昆明 650092)

(2006 年 10 月 11 日收到, 2006 年 11 月 19 日收到修改稿)

从大量文献资料中, 收集了 BL Lac 天体 S5 0716 + 714 光学 B, V, R, I 波段的有效观测数据点共 16818 个, 获得了从 1994 年至 2006 年的长期光变曲线. 光变曲线表明 S5 0716 + 714 天体存在完整的非正弦变化并且它的活动非常剧烈. 用功率谱方法分析了 S5 0716 + 714 天体的光变周期, 结果表明 S5 0716 + 714 天体存在的长光变周期为 1.1 年, Raiteri 等人发现的 3.3 年周期可能是 1.1 年周期的叠合. 预期在 2007 年 2 月应该为 S5 0716 + 714 天体的再次爆发期.

关键词: BL Lac 天体 S5 0716 + 714, 光变周期, 功率谱方法

PACC: 9760L, 0420

1. 引 言

观测和研究 BL Lac 天体的长周期性光变是获得天体各种特性的一个重要方法. 长周期性光变现象的存在, 通常意味着天体存在着转动、振动和轨道运动, 而这些运动的存在又可以标度出天体的中心黑洞质量、辐射区域、内部结构等^[1]. 为了研究 BL Lac 天体的长周期性光变现象, 近几年人们提出了许多用于解释长周期性光变的理论模型^[2, 3], 如中心双黑洞模型、双黑洞双喷流模型、进动吸积盘模型. 因此, 研究 BL Lac 天体的长周期性光变特性显得非常必要, 这也是目前 BL Lac 天体观测和辐射机理研究的重点. 在现有的 BL Lac 天体样品中, S5 0716 + 714 天体的观测特征是特别引人注目的, 它是被人们经常选取的一个非常好的研究对象, 特别是对 BL Lac 天体 S5 0716 + 714 的光变周期分析研究, 现已获得了许多结果. Qian 等人^[4]根据 1994 年至 2000 年在上海 1.56 m 望远镜的观测数据, 在光学 I 波段获得了 10.110 天的准周期变化. Wagner 等人^[5]早在 1990 年 2 月发现了 1 天至 7 天的准周期变化, 并且光学 U, B, V, R, I 各波段和射电的各波段的光变曲线非常相似. Katajainen 等人^[6]发现了 60—70 天的周期变化. Raiteri 等人^[7]根据 1994 年至 2002 年的观测资料获得了在光学 R 波段的光变周期为 3.3 年, 在

射电波段的周期为 5.5—6 年. Ma 等人^[8]使用 1994 至 2000 年光学 I 波段的数据发现有 14 ± 0.1 天的光变周期. Wu 等人^[9]用结构函数的方法发现了有小时量级的光变. 上述所有结果, 由于受时间或条件的限制, 采用的数据点极为有限或比较少, 所获得的结果都有一定的局限性^[10, 11], 或所用数学分析方法对于 S5 0716 + 714 天体及相对应的一些 BL Lac 天体的极为复杂的光变曲线, 做周期分析的效果并不好^[12].

本文分析了现有的研究结果, 从大量的参考文献中, 收集采用了 S5 0716 + 714 天体光学 B, V, R, I 有效的数据点共 16818 个, 并分析比较了 1952 年至 1994 年的照相测光数据和 1992 年至 2006 年的 CCD 观测数据, 由于早期的照相测光数据误差较大, 被省略除外. 我们获得了到目前为止观测数据最完备的光学 B, V, R, I 波段从 1994 年至 2006 年的光变曲线. 光变曲线表明 S5 0716 + 714 天体的活动非常剧烈, 它的变化范围约为 2 至 3 个星等, 光变曲线表现出非正弦周期性变化. 光变曲线在 B, V, R, I 波段都出现许多由于观测条件限制而产生的间隔, 特别是 2002 年至 2005 年, 在 B, V 波段这种间隔更为明显. 我们应用功率谱方法, 分析计算出了光变周期为 1.1 年, 计算结果表明, 功率谱方法不仅对研究具有大量资料的 BL Lac 天体十分有效, 而且, 对具有大量重叠观测资料的 BL Lac 天体 S5 0716 + 714, 当排

* 国家自然科学基金项目(批准号: 10363002 和 10663002)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: kmzhangx@yahoo.com

除测量相对误差后^[13],能获得准确结果. Deeming 提出的对不等间隔的数据使用傅里叶变换的功率谱方法求周期^[13],对有长周期光变观测数据的 BL Lac 天体的周期分析也十分有效. 本文仅讨论应用功率谱方法分析计算 S5 0716 + 714 天体的光变周期,而对该方法的统计解释还有详细的讨论^[13],限于篇幅,计算程序省略.

2. 光变曲线特性

BL Lac 天体的光变曲线有两种类型^[11],其一是短时标光变,光变时标约有几小时到几天的数据级,光变曲线没有周期性显现,至今为止,确认有短时标光变周期的 BL Lac 天体非常的少. 最近几年,研究 S5 0716 + 714 天体的小组增多^[7],在 S5 0716 + 714 中已发现了大量的几小时到几天的短时标和中等时标的周期性规律的光变^[4,12]. 同时在短时标光变的曲线中还发现了在光学 V, I 波段之间有 0.0041 天的滞后相关现象^[14]. 其二是长周期光变现象,光变时标为几年至几十年量级. 通常对长周期光变的研究,必须具备两个基本的条件^[15,16],首先数据样本具有足够长的连续观测时间,曲线中要能直接看出有大幅度周期存在的可能,对于光变幅度变化小而

又少于 6 个长周期存在的光变曲线,应该对观测数据进行分析处理,才能获得结果^[11]. BL Lac 天体 OJ287, ON231, Mark421 和类星体 3C345, 3C120 等均满足这些条件^[1,17,18],它们有近百年的测光数据,运用 Jurkevich 方法等^[15],被确认的周期为几年到几十年. BL Lac 天体 S5 0716 + 714 有近 50 多年的测光数据(1953 年 2 月至 2006 年 5 月),明显的光变幅度大于 6 次,满足寻找长周期的条件. 尽管观测的数据受到天候,望远镜使用状态等多方面条件的影响,并且观测的数据也不是等时间间隔的. 但其光学 B, V, R, I 波段的长期光变观测数据,也有和 ON231 或 3C345 等天体相似的特征,可以满足长周期分析数据需要.

在表 1 中 (1)列出了获得这些数据的天文台;(2)使用的望远镜口径;(3)–(6). 光学 B, V, R, I 波段观测获得的数据点数;(7)总的的数据点;(8)参考文献. 根据表 1 的数据,我们获得了从 1994 年到 2006 年光学波段的 B, V, R, I 的历史光变曲线,由于这里仅定性地给出长期光变曲线. 为了让长期光变曲线较为直观清晰,在光变曲线中,测量误差棒与较大的光变振幅相比显得较小,我们在光变曲线中不加考虑测量的误差棒.

表 1 从 1994 年至 2006 年光学 B, V, R, I 波段有效的观测数据

(1)天文台	(2)望远镜口径/m	(3)B/mag	(4)V/mag	(5)R/mag	(6)I/mag	(7)N	(8)文献
Greve(意大利)	0.32	31	33	38	38	140	[7]
Perugia(意大利)	0.40	23	312	522	376	1233	[7]
Vallinfreda(意大利)	0.50	214	180	244	194	833	[7]
Monte Prozi(意大利)	0.70	29	28	37	39	133	[7]
Abastuman(格鲁吉亚)	0.70	166	143	490	135	934	[7]
Torino(意大利)	1.05	257	163	523	21	964	[7]
Skinakas(希腊)	1.30	53	0	54	0	107	[7]
Mt. Maidanak(乌兹别克)	1.50	273	14	196	14	511	[7]
Yunnan(中国)	1.05	84	83	92	61	320	[12]
Shanghai(中国)	1.56	21	289	194	465	969	[4]
Greve(意大利)	0.50	328	1557	8230	559	10674	[19]

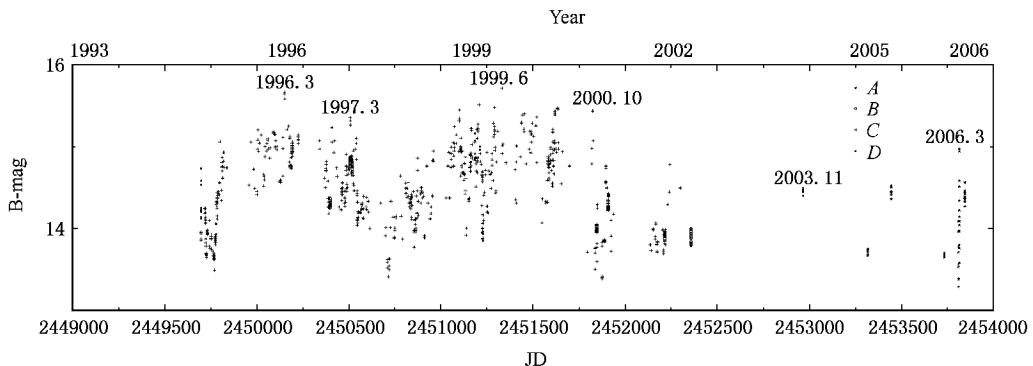


图 1 B 波段历史光变曲线

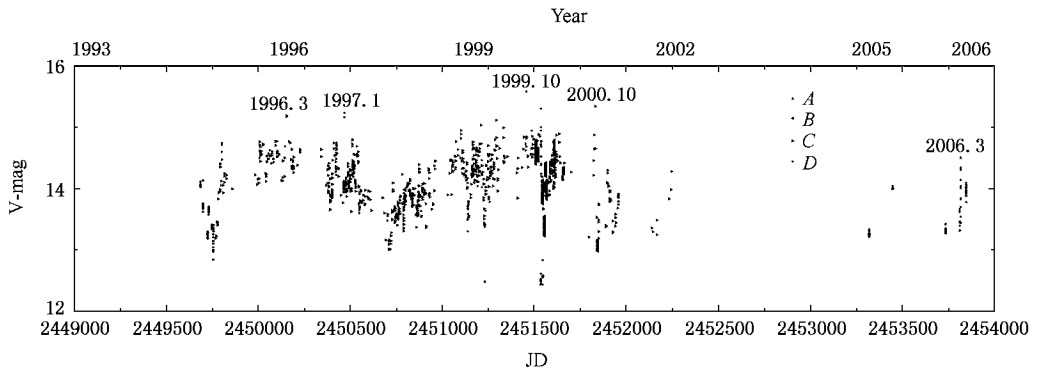


图 2 V 波段历史光变曲线

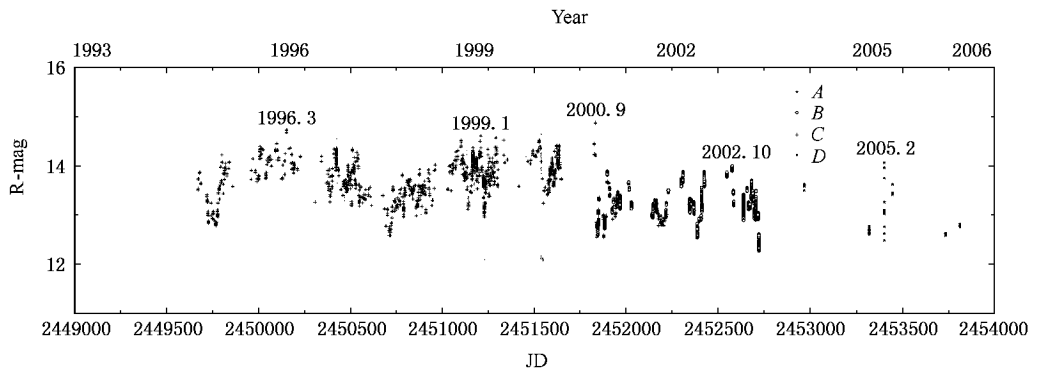


图 3 R 波段历史光变曲线

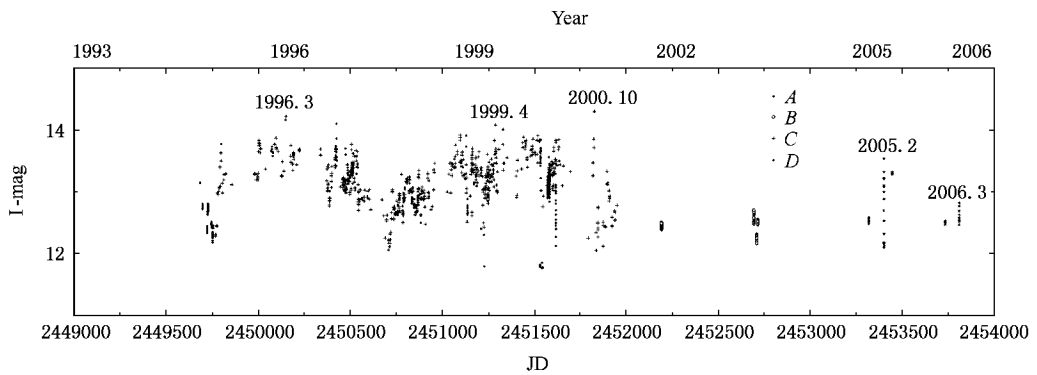


图 4 I 波段历史光变曲线

图 1—4 为表 1 观测数据所获得的历史光变曲线.其中,★ A 为 Zhang 等人从 2001 年至 2006 年的观测数据^[2],○ B 为 Qian 等人从 1994 至 2000 年的观测数据^[4],+ C 为 Raiteri 等人从 1996 至 2003 年的观测数据^[7],● D 为 Montagni 等人从 1996 年至 2003 年的观测数据^[19].

从光变曲线中可以看出, S5 0716 + 714 是活动非常激烈的 BL Lac 天体,以它在光学 V 波段的光变

曲线为例,从 1994 年 11 月到 2006 年 4 月,它的变化范围约为 $\Delta V = 2.15\text{mag}$ ($15.58\text{mag} - 12.43\text{mag}$).5 次大的爆发是 1996 年 3 月、1997 年 6 月、1999 年 10 月、2000 年 10 月和 2006 年 3 月,其最大的星等分别为 15.19 mag , 15.23 mag , 15.58 mag , 15.39 mag , 14.50 mag . S5 0716 + 714 天体在光学 I 波段也非常活跃,10 多年来的观测表明,在 I 波段有大约 $\Delta I = 2.8\text{ mag}$ 的光变,从 1995 年至 1998 年,它保持在一个相对的宁

静态.光度幅度约为 1 mag. 在 1994 年、1995 年、1999 年、2004 年、2005 年冬季和春季 S5 0716 + 714 却达到了比较亮的爆发态,在短短几天时间内光度 ΔI 约为 2 mag. 特别是 1992 年 2 月,它达到了一个最大亮度 11.76 mag. 此外,1993 年、1996 年、1997 年也分别达到了 12.22 mag、12.55 mag 和 11.96 mag 的较大亮度.

从图 1 到图 4 光变曲线和观测数据,我们可以看出光学 B, V, R, I 波段光变幅度是有些不同的. 主要原因是由于 S5 0716 + 714 在光学波段所积累的观测数据还较少,要获取一条完整的长时标光变曲线,需要较长的观测时间,而且观测常常受到天气、月相、观测季节、望远镜工作状态等因素的影响.

3. 用功率谱方法分析周期性

从 S5 0716 + 714 复杂光变曲线图 1 到图 4 中,我们不能确认其周期性. 对于具有等时间间隔的 S5 0716 + 714 天体的光学波段光度曲线. 我们采用了功率谱方法来寻找周期性^[20]. 并且应用以零来代替由于受实际观测条件的限制,在观测数据中不可避免地出现或长或短的时间间隔的谱分析方法^[16, 21].

在功率谱方法分析中,若一个平稳随机信号 $x(t)$ 的自协方差函数为 $\gamma_x(\tau)$ 并满足

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\gamma_x(\tau)| d\tau < \infty,$$

则定义 $x(t)$ 的功率谱密度函数为 $\chi(\tau)$ 的傅里叶变换,即

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \gamma_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau,$$

则有逆傅里叶变换

$$\gamma_x(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) e^{-i\omega\tau} d\omega.$$

由自协方差函数的定义

$$\gamma_x(\tau) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [x(t) - \mu_x][x(t - \tau) - \mu_x] dt,$$

由于 $S_x(\omega) d\omega$ 表示在 ω 与 $\omega + d\omega$ 之间信号所提供的功率. 故 $S_x(\omega)$ 代表功率相对与频率的分布,则称为功率谱函数密度.

对于平稳时间序列 $\{X_n\}$,如它的协方差序列 $\gamma_x(k)$, $k = 0, 1, 2, \dots$ 满足

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} |\gamma_x(k)| < \infty,$$

则定义 $\{X_n\}$ 的自功率谱密度为

$$S_x(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma_x(k) e^{-ik\Delta t\omega},$$

式中 Δt 为采样间隔,自协方差序列 $\gamma_x(k)$ 定义为

$$\gamma_x(k) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n X_{n-k}.$$

功率谱密度函数也可以直接从数字序列的离散傅里叶 $X(j)$ 出发利用

$$I_N(\omega_j) = \frac{2\Delta t}{N} |X(\omega_j)|^2,$$

获得. 由于数字序列的离散傅里叶变换具有周期性. 则 $I_N(\omega_j)$ 也具有周期性. 称 $I_N(\omega_j)$ 为数字序列的周期图估计.

从理论上可以证明^[21] 对于一个随机信号

$$Y_n = a e^{-in\omega_0} + a_n,$$

a_n 为平稳正态序列,其功率密度 $S_a(\omega)$ 在 ω_0 处连续,则 Y_n 的周期图 $I_N(\omega)$ 必在 $[-\pi, \pi]$ 上 ω_0 附近的某一频率处达到最大值. 并且当 N 很大时有

$$\lim_{N \rightarrow \infty} I_N(\omega) = \begin{cases} \infty, & \omega = \omega_0, \\ 0, & \omega \neq \omega_0, \end{cases}$$

ω_0 是信号 Y_n 的固有频率. 当 N 较大时, $I_N(\omega)$ 在 ω_0 附近形成一个突起的峰,而在其他的频率处功率谱的密度值较小. 根据这一特征,就可以寻找信号中的周期成分. 当信号中稳含多个周期分量时, $I_N(\omega)$ 中会出现多个极大值,为了判别真伪周期,则需要根据周期图极大对应的频率值,利用最小二乘法求出对应各频率的周期分量的振幅,比较大小.

为了便于应用功率谱方法,有效寻找 S5 0716 + 714 光变曲线中的周期性,我们对观测数据进行了分析研究. 1953 年到 1994 年的观测数据少而分散^[22],必然有大量的时间间隙无数据点,用零代替间隙段的数据,将在谱分析结果中产生谱峰混叠和谱线泄漏. 因此我们在光变曲线和功率谱分析周期性中,均未采用这些数据. 从 1994 年到 2006 年光学 B, V, R, I 波段我们收集了有效数据点 16818 个, Raiteri 和 Nesei 分析了 1994 年到 2002 年参考文献 [4] 的数据,认为这些观测数据的变化范围基本上和他们所获得的观测数据变化范围和时间是一致的. 参考文献 [4] 的数据很好的溶入了他们的数据,并且数据点在他们周期分析的曲线上. 参考文献 [12] 与 [15] 也有相似的特点. 因此在用功率谱方法寻找 1994 年到 2006 年的光变曲线周期性时,为了减少不同口径望远镜,不同滤色片(不同望远镜选用的滤色片中心波长密度不一样)等引入的系统误差^[20, 22],我

们仅选取了中国上海 1.56 m 望远镜和云南 1.05 m 望远镜的观测数据,而省略了 Raiteri 和 Montagni 的观测数据,取观测数据的月平均值做周期分析.这样选取数据的优点是减少了测量值引入的系统误差.分段平均减小了谱估计的方差,同时也起到了平滑曲线的作用.但是这样取数据也带来了不足之处,这样降低了谱的分辨率,并且时间序列中出现间隙段增多,用零代替间隙段的数据也增多,使结果中旁瓣所受抑制减小,噪声增大.

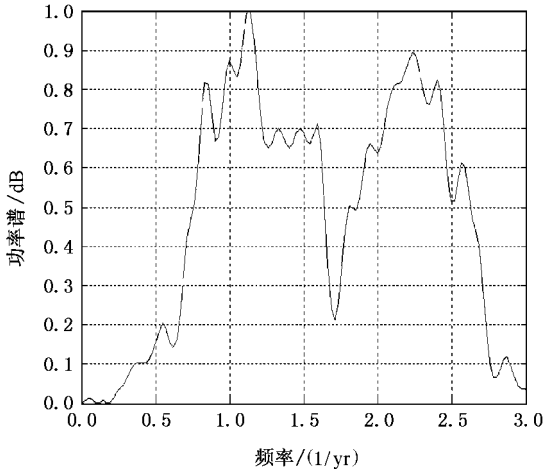


图 5 S5 0716 + 714 V 波段的周期图

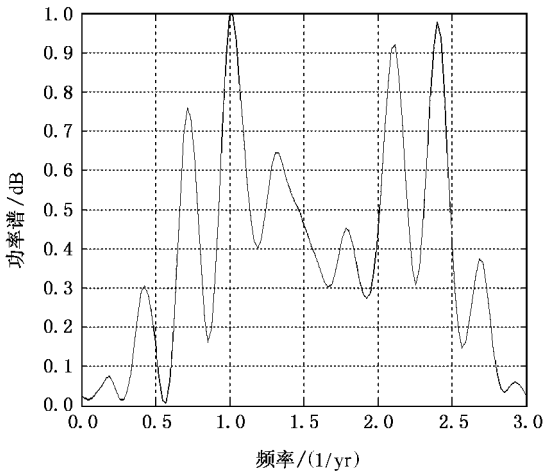


图 6 S5 0716 + 714 R 波段的周期图

图 5 为 V 波段的周期图,时间从 2449600 + 86.250 到 2449600 + 4247.106,取 30 天的数据平均值.频率依次为 0.82/yr, 1.00/yr, 1.12/yr, 2.25/yr.周期分别为 1.22 年, 1 年, 0.9 年, 0.44 年.图 6 为 R 波段的周期图,时间从 2449600 + 824.219 到 2449600

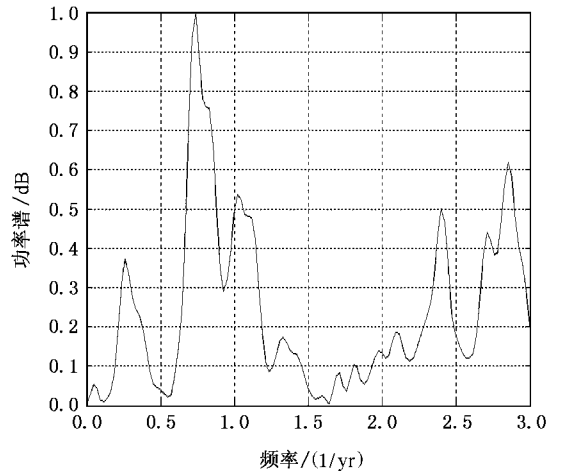


图 7 S5 0716 + 714 I 波段的周期图

+ 4212.133,取 30 天的数据平均值.频率依次为 0.70/yr, 1.00/yr, 2.12/yr, 2.40/yr.周期分别为 1.43 年, 1 年, 0.47 年, 0.42 年.图 7 为 I 波段的周期图,时间从 2449600 + 86.240 到 2449600 + 4212.130,取 30 天的数据平均值.频率依次为 0.25/yr, 0.70/yr, 1.00/yr, 2.40/yr, 2.82/yr.周期为 4 年, 1.43 年, 1 年, 0.42 年, 0.36 年.

上述三个图中的谱窗显示的三个最大的功率密度的峰值分别对应 V 波段为 0.9 年, R 波段为 1.0 年, I 波段为 1.43 年.利用各周期分量对应的振幅的显著性来做判断^[22],我们发现 S5 0716 + 714 的周期可能为 1.1 年.

4. 结 论

根据上述光变曲线和周期分析,我们认为 BL Lac 天体 S5 0716 + 714 在光学波段非常活跃,并且存在一个大约为 1.1 年的光变周期.这个结果支持了 Raiteri 在光学波段存在 3.3 年周期,在射电波段有 5.5—6 年周期变化的报道,我们的分析表明 S5 0716 + 714 实际可能存在的周期应该是 1.1 年, 3.3 年或 5.5—6 年可能是 1.1 年的叠合.我们认为再次爆发的时间应该在 2007 年的 2 月和 2008 年的 3 月.我们将使用云南天文台的 1.05 m 望远镜和上海天文台的 1.56 m 望远镜监测验证我们的计算结果.

如果观测证实 BL Lac 天体 S5 0716 + 714 存在 1.1 年的周期性光变时标,这将是一个很有意义的结果.这个结果支持了 BL Lac 天体可能有长周期和中等时标周期性光变的共性^[23, 24].现有结果表明,有

较长观测历史的 BL Lac 天体的长时标光变都具有周期性^[11, 14]. 同时 1.1 年的周期光度将有助于了解它与长周期大振幅之间变化的关系. 并对揭示活动星系核相应的尺度结构、中心黑洞质量、辐射区域、辐射机制等也非常有用^[25, 26]. 同时 3.3 年或 5.5—6 年可能是 1.1 年的叠合, 也可能从观测上有力的支持了中心双黑洞模型^[2, 3].

此外, 在 AGN 的观测资料中, 时间序列存在不可避免的长或短的间隙, 功率谱方法处理数据时, 要

求间隙很短. 本文在 S5 0716 + 714 观测数据中成功地应用了间隙以 0 替代. 然后进行谱估计, 并且尽可能避免频谱混叠和谱线泄漏现象. 获得了 S5 0716 + 714 天体的不等间隔观测数据的光变周期, 这种方法对观测数据点有限. 观测数据中存在一些间隙的 BL Lac 天体的周期分析是有效的. 同时也为观测上寻找 BL Lac 天体的周期特性提供了一种方法上的依据. 在观测采集数据中充分利用此方法, 以便更为有效的提高望远镜的使用效率.

- [1] Sillanpää A, Haaraala S, Valtonen M J, Sundelius B, Byrd G G 1988 *Astrophysical Journal* **325** 628
- [2] Lehto H J, Valtonen M J 1996 *Astrophysical Journal* **460** 207
- [3] Villata M, Raiteri C M, Ghisellini G, Francesco G, Bosio S, Latini G, Bucciarelli B, Chiaberge M 1997 *Astronomy and Astrophysics Supplement* **121** 119
- [4] Qian B C, Tao J, Fang J H 2002 *Astronomical Journal* **123** 678
- [5] Wagner S J, Witzed A 1995 *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **33** 163
- [6] Katajainen S, Takalo L O, Sillanpää A 2000 *Astronomy and Astrophysics Supplement* **143** 357
- [7] Raiteri C M, Villata M, Tosti G, Nesci R, Massaro E, Aller M F, Aller H D et al 2003 *Astronomy and Astrophysics* **402** 151
- [8] Ma L, Xie G Z, Zhou S B, Cheng L N, Ding S X 2004 *International Journal of Modern Physics* **13** 659
- [9] Wu J H, Peng B, Zhou X, Ma J, Jiang Z J, Cheng J S 2005 *Astronomical Journal* **129** 1818
- [10] Nesei R, Massaro E, Rossi C, Scelvi S 2005 *Astronomical Journal* **130** 1466
- [11] Liu F K, Xie G Z, Bai J M 1995 *Astronomy and Astrophysics* **295** 1
- [12] Zhang X, Zhao G, Zheng Y G et al 2007 *Astronomical Journal* **133** 1995
- [13] Deeming T T 1975 *Astrophysics and Space Science* **36** 137
- [14] Qian B C, Tao J, Fang J H 2000 *Publications of the Astronomical Society of Japan* **52** 1075
- [15] Jurkevich I N 1971 *Astrophysics and Space Science* **13** 154
- [16] Kiolger M, Takalo L, Sillanpää A 1992 *Astronomy and Astrophysics* **264** 32
- [17] Liu F K, Liu B F, Xie G Z 1997 *Astronomy and Astrophysics Supplement* **123** 569
- [18] Zhang X, Xie G Z, Bai J M 1998 *Astronomy and Astrophysics* **320** 469
- [19] Montagni F, Maselli A, Massaro E 2006 *Astronomy and Astrophysics* **451** 435
- [20] Ding Y R, Li Z Y 1999 *Chin Astronomical Journal* **40** 165 (in Chinese) [丁月蓉, 李宗云 1999 天文学报 **40** 165]
- [21] Ding Y R, Zheng D W 1980 *The Date Processing of Astronomical Measurement* (Nanjing : Nanjing University Press) 320-327 (in Chinese) [丁月蓉, 郑大伟 1980 天文测量数据的处理方法(南京: 南京大学出版社) 第 320-327 页]
- [22] Lomb N R 1976 *Astrophysics and Space Science* **39** 447
- [23] Zhang X, Yang W G, Hou D D, Hu S M, Zheng Y G, Mao W M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2961 (in Chinese) [张 雄, 杨卫国, 侯德东, 胡绍明, 郑永刚, 毛慰明 2005 物理学报 **54** 2961]
- [24] Zhang X, Zheng Y G, Zhang H J, Hu S M, Xie Z H 2006 *Chin. Phys.* **15** 2185
- [25] Liu L, Pen S Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **55** 4980 (in Chinese) [刘 辽, 裴寿镛 2005 物理学报 **55** 4980]
- [26] Zhang X, Zhao G, Xie G Z, Zheng G S, Zhang L 2001 *Chin. Phys.* **10** 568

A study of the light curve periodic behavior of BL Lac object S5 0716 + 714^{*}

Zhang Hao-Jing¹⁾ Zhang Xiong^{2)†}

¹⁾ *National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*

²⁾ *Department of Physics, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China*

(Received 11 October 2006 ; revised manuscript received 19 November 2006)

Abstract

From a large volume of literature we have collected a total of 16818 datapoints of effective observation of BL Lac object S5 0716 + 714 in the optical band, and constructed its long-term light curve from 1994 to 2006 AD. The light curve shows that S5 0716 + 714 is very active and exhibits very complicated non-sinusoidal variations. We used power spectrum method to analyze the period of light curve variation. Our results show that the long-term period of variation is 1.1 year. Time of coincidence is possible, Raiteri *et al.* have found the period of 3.3 year, which may be a multiple of 1.1-year periods. We expect next burst in 2006 July.

Keywords : BL Lac object S5 0716 + 714, light curve variation period, method of power spectrum

PACC : 9760L, 0420

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10363002 and 10663002).

[†] Corresponding author. E-mail : kmzhangx@yahoo.com