

蝎虎天体 OJ287 中等时标光变的周期特性研究

丁楠 张皓晶 张雄 欧建文 罗丹

A study of the middle time-scale periodic behavior of light curve of BL Lac object OJ287

Ding Nan Zhang Hao-Jing Zhang Xiong Ou Jian-Wen Luo Dan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 139801 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.139801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.139801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于时频差的正交容积卡尔曼滤波跟踪算法

[A tracking algorithm based on orthogonal cubature Kalman filter with TDOA and FDOA](#)

物理学报.2015, 64(15): 150502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.150502>

基于混沌理论和改进径向基函数神经网络的网络舆情预测方法

[Internet public opinion chaotic prediction based on chaos theory and the improved radial basis function in neural networks](#)

物理学报.2015, 64(11): 110503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.110503>

多元混沌时间序列的多核极端学习机建模预测

[Multivariate chaotic time series prediction using multiple kernel extreme learning machine](#)

物理学报.2015, 64(7): 070504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.070504>

振荡吸积盘的光变研究

[Research on the optical variability of oscillating disk](#)

物理学报.2014, 63(23): 239801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.239801>

耀变体 S5 0716+714 的混沌特性研究

[Chaotic characteristics of blazar object S5 0716+714](#)

物理学报.2014, 63(4): 049801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.049801>

蝎虎天体 OJ287 中等时标光变的周期特性研究*

丁楠 张皓晶† 张雄 欧建文 罗丹

(云南师范大学物理与电子信息学院, 昆明 650500)

(2014 年 12 月 29 日收到; 2015 年 1 月 26 日收到修改稿)

收集了蝎虎天体 OJ287 光学 B, V, R, I 波段 37 年的观测数据, 获得了从 1972 年至 2009 年的光变曲线. 运用 Lomb-Scargle 傅里叶变换方法分析中等时标光变的周期性特性, 发现存在 52.0 ± 1.1 d 与 255 ± 23 d 的主要周期成分, 并模拟了存在倍周期分岔的准周期信号, 与不同时段观测数据的相图和关联维数进行对比. 结果表明, OJ287 具有多周期尺度特征, 不同时段准周期光变中谐波成分不同, 谐波成分的变化与次黑洞对主黑洞吸积流的扰动有关, 光变中的谐波成分可能是主黑洞吸积流受强扰动时分岔形成的.

关键词: OJ287, 光变周期, 吸积流, 倍周期分岔

PACS: 98.54.Cm, 05.45.Tp, 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.64.139801

1 引言

蝎虎 (BL Lac) 天体是活动星系核 (AGNs) 中性质独特的一个子类, 具有大幅度短时标光变、中等时标光变、高偏振、没有或者只有弱发射线等特征^[1]. 对 BL Lac 天体光变周期的研究, 能限定辐射区域和吸积释能效率, 估计亮温度和黑洞质量上限等^[2-4]. 其中 BL Lac 天体 OJ287 的光变曲线引起许多学者的关注, 他们运用 Jurkevich 方法^[5]、经验模态分解方法^[6]、自回归模型谱估计方法^[7]、加权小波 Z 变换方法^[8], 分别对 OJ287 的光变曲线进行周期分析, 都发现 OJ287 具有约 12 a 的长光变周期, 长周期光变可以用双黑洞模型成功的解释^[9].

有研究指出 BL Lac 天体应存在中等时标周期性光变的特点^[10], 相比 OJ287 长光变周期的研究, 对于 OJ287 中等时标光变周期的研究却相对较少. Wu 等在 2006 年发现 OJ287R 波段具有 46 d 的光变周期^[11], Valtonen 等确认了 46 d 光变周期的存在^[12], 近期发现 OJ287 射电波段也存在中等时标的光变周期^[13]. 对周期光变的解释, Carrasco 等认为是由吸积盘内区的热流沿着螺旋轨道进入大

质量的 Kerr 黑洞导致^[14], Sundelius 和 Valtonen 等通过数值模拟 OJ287 主黑洞吸积盘, 发现当次黑洞经过主黑洞吸积盘时, 主黑洞吸积流变化, 导致周期光变, 且周期光变不是简单的正弦形式, 存在谐波成分^[15,16].

活动星系核的中等时标光变周期常存在简单的倍数关系^[13,17]. 倍周期现象可能是由非线性系统倍周期分岔产生谐波形成的, Libchaber 和 Maurer 1980 年在液氦的贝纳尔实验中发现了随着温差的变化, 出现谐波成分的分岔现象^[18]. Lauterborn 和 Cramer 的声学实验, Klinker 的非线性 RCL 振荡器实验也存在同样的分岔现象^[19,20]. 近期的研究指出, 活动星系核的光变不仅具有周期特性, 也具有明显的混沌特性^[17], 分岔是从周期走向混沌常见的方式, 变星的脉动中就存在由周期分岔到混沌^[21].

OJ287 吸积流变化引起含有谐波成分的周期光变, 谐波成分可能是由吸积流受强扰动下倍周期分岔产生的, 在不同时间段吸积流受扰动不同, 可能导致谐波成分存在变化. 对 OJ287 中等时标光变周期的确定和不同时段周期成分变化规律的研究, 有助于进一步理解双黑洞模型和光变中的倍

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: U1231203)、国家自然科学基金 (批准号: 11163007)、云南省自然科学基金 (批准号: 2012FB140)、云南省教育厅科学基金重点项目和云南省高校高能天体物理重点实验室项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: kmzhanghj@163.com

周期现象. 为此, 本文运用 Lomb-Scargle 傅里叶变换方法寻找 OJ287 中等时标光变的周期成分, 其中 Lomb-Scargle 傅里叶变换方法可以从时域不连续和不均匀的信号中提取弱周期信号, 弥补了传统功率谱方法的缺点. 进一步模拟了存在周期分岔的准周期信号, 用不同时段观测数据进行对比, 研究了吸积流受不同扰动下周期光变中谐波变化的特性, 以期提供光变中倍周期现象可能是由非线性系统倍周期分岔形成的证据, 为了能从低维观测量揭示高维系统的特征, 在分析时采用了混沌分析方法中的相空间重构和关联维数. 结果表明, OJ287 不同时段准周期光变中谐波成分不同, 谐波成分可能是次黑洞对主黑洞吸积流强扰动下倍周期分岔形成的.

2 Lomb-Scargle 傅里叶变换和混沌分析方法

2.1 Lomb-Scargle 傅里叶变换

对观测数据进行分析时, 由于受天气、观测设备等现实条件的影响, 实际观测的数据在时域上是不连续和不均匀的. 传统的周期分析方法要对观测数据进行插值或补零处理, 插值或补零的数量和方法对周期分析的结果有很大影响^[6-8].

Lomb-Scargle 傅里叶变换可以有效的从观测数据中寻找弱周期信号, 该方法可以不用对观测数据进行插值, 还可以在一定程度上减弱观测数据不均匀和噪声产生的虚假周期信号.

对观测数据 $X(t_j)$, $j = 1, 2, 3, \dots, N$, Lomb-Scargle 傅里叶变换为^[22]

$$P_z(f) = \frac{1}{2N} \left\{ \frac{\left[\sum_{j=1}^N X(t_j) \cos 2\pi f(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^N \cos^2 2\pi f(t_j - \tau)} + \frac{\left[\sum_{j=1}^N X(t_j) \sin 2\pi f(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^N \sin^2 2\pi f(t_j - \tau)} \right\}, \quad (1)$$

式中 $P_z(f)$ 是频率为 f 的功率; N 为观测数据数量; τ 为时间平移不变量.

功率谱中某个频率 f_0 的峰值为 z_0 , 如果 e^{-z_0} 远小于 1, 则功率不小于 z_0 的概率即虚警概率可

近似为

$$F \cong N e^{-z_0}. \quad (2)$$

虚警概率越低, 表明该频率成份显著性越高. f_0 处谱峰偏离误差可近似表示为^[23]

$$\Delta f = \frac{3\pi\sigma_N}{4(N)^{1/2}TA}, \quad (3)$$

式中 A 是频率为 f_0 的正弦拟合信号的幅度, σ_N 为观测数据的方差, T 为观测数据的总长度.

2.2 重构相空间和关联维

混沌理论的重构相空间技术可以把低维观测量重构在新的相空间中, 揭示内在的复杂动力学系统特征. 用 x 表示观测到的变量分量, $x(t)$, $t = 1, 2, 3, \dots, N$ 为观测序列. 重构相空间即选择嵌入维数 m , 由 $x(t)$ 得到一组新的向量序列^[24]

$$X(t) = \{x(t), x(t+\tau), \dots, x[t+(m-1)\tau]\}^T, \quad (4)$$

式中 $t = 1, \dots, M$, $M = N - (m-1)\tau$, τ 为延迟时间.

对重构相空间中 M 个点, 规定凡是距离小于给定整数 r 的向量, 皆称为有关联的向量. 计算有关联的向量对数, 它在一切可能的 M^2 种配对中所占的比例称为关联积分^[25]

$$C_n(r) = \frac{1}{M^2} \sum_{i,j=1}^M H[r - \|X(i) - X(j)\|], \quad (5)$$

其中, $H(\cdot)$ 是 Heaviside 单位函数

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0, \\ 1, & x > 0. \end{cases} \quad (6)$$

当 $r \rightarrow 0$ 时, 关联积分 $C_n(r)$ 与 r 存在关系 $\lim_{r \rightarrow 0} C_n(r) \propto R^D$, 在双对数坐标下^[26]:

$$D_c = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{d \lg C_n(r)}{d \lg r} \quad (7)$$

D_c 即是关联维数, 它可以定量描述系统的复杂程度.

3 R 波段的光变分析

3.1 数据

本文从 SIMBAD 天文数据库收集了 Jia, Zheng, Villiforth 等 1972—2009 年对 OJ287 B, V, R, I 四个波段的观测数据^[27-29], 见图 1. 其中 R 波段观测数据最为完整, 日平均处理后作为分析的样本.

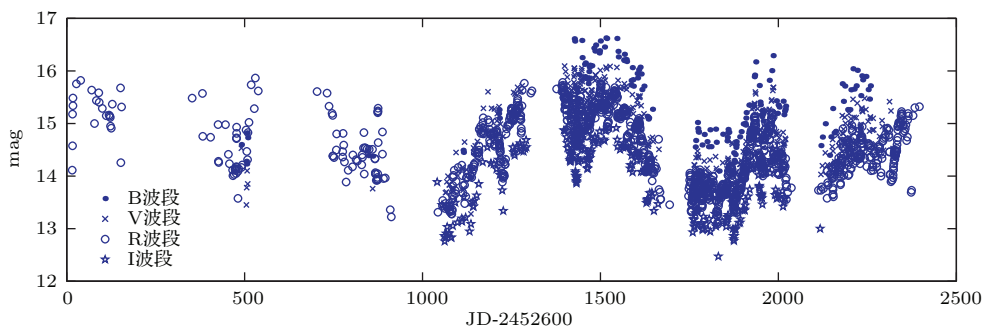


图1 OJ287的光变曲线

Fig. 1. light curve of OJ287.

3.2 中等时标光变的周期成分

对R波段观测数据进行Lomb-Scargle傅里叶变换, 取不同的时间平移不变量 τ , 分别得到欠抽样和适度抽样下的周期图(图2), 通过欠抽样与适度抽样的谱峰对比可以排除抽样产生的虚假谱峰[22]. 在虚警概率 $F < 0.015$ 下, 存在四个周期成分, 分别是 52.0 ± 1.1 d, 73.0 ± 2.0 d, 135.0 ± 6.7 d, 255 ± 23 d, 这与2013年Pihajoki等运用加权小波Z变换对2004—2006年R波段观测数据分析得到的周期基

本一致[16].

在Lehto, Sundelius等模拟的双黑洞模型中[30,31], 主黑洞在9倍史瓦西半径处吸积盘旋转的半周期约为255 d (0.7 a), 而次黑洞经过主黑洞吸积盘的位置刚好处于9倍史瓦西半径之外, 因此255 d的周期光变可能是由于受次黑洞引力作用下主黑洞吸积流变化产生, 73 d与135 d的周期成分则是255 d的谐波, 谐波成分的存在说明吸积流变化导致的周期光变不是简单的正弦形式. 52 d的周期光变则可能是吸积盘内区的螺旋波结构产生[16].

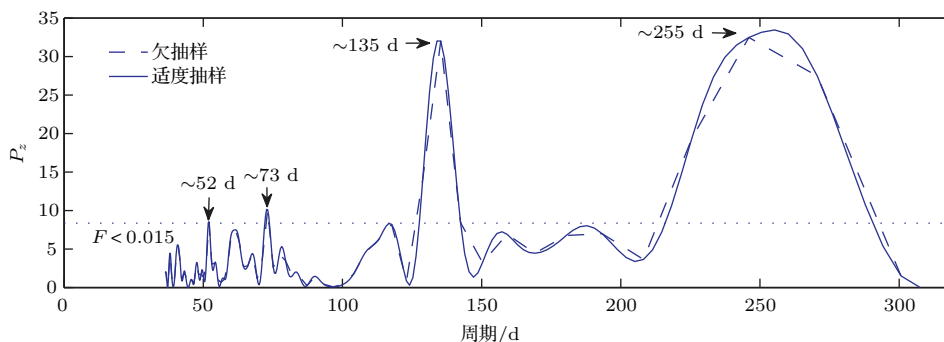


图2 R波段欠抽样和适度抽样下的周期图

Fig. 2. periodogram of R band under undersampling and under appropriate sampling.

3.3 不同阶段光变曲线的相空间和关联维

近期文献[13]运用小波功率谱方法对OJ287射电波段的研究发现振荡周期存在变化, 变化的周期具有简单的倍数关系. 振荡周期的调整可能是吸积盘振荡模式的变化导致, 而吸积流的变化对吸积盘的稳定性存在重要的影响[32]. Pihajoki等认为OJ287吸积流的变化可能导致含有谐波成分的周期光变, 次黑洞对主黑洞吸积流的引力作用是吸积流变化的主要原因[16]. 类似受迫摆, 次黑洞对主黑洞吸积流的扰动强度不同, 吸积流变化引起的周期光变可能分出不同的谐波成分, 从而导致光变的

周期成分存在变化.

为此, 我们以1/52 Hz, 1/255 Hz两个正弦信号叠加形成的准周期信号为基础信号, 模拟了基础信号中含有 $f_0 = 1/255$ Hz不同谐波分量下的准周期信号及其相图(图3), 模拟信号中谐波成分由主频遵循费根鲍姆原则分岔形成[20], 每一次分谐波的量级比前一次低一个因子 $\mu^{-1} = 0.1525$ ($10 \log(10\mu) = 8.17$ dB). 我们将模拟信号作为参考信号, 用来对比OJ287不同时段的光变特性. 为了从低维的观测量获得高维系统的特征, 我们采用混沌分析方法(重构相空间和关联维)对不同时段

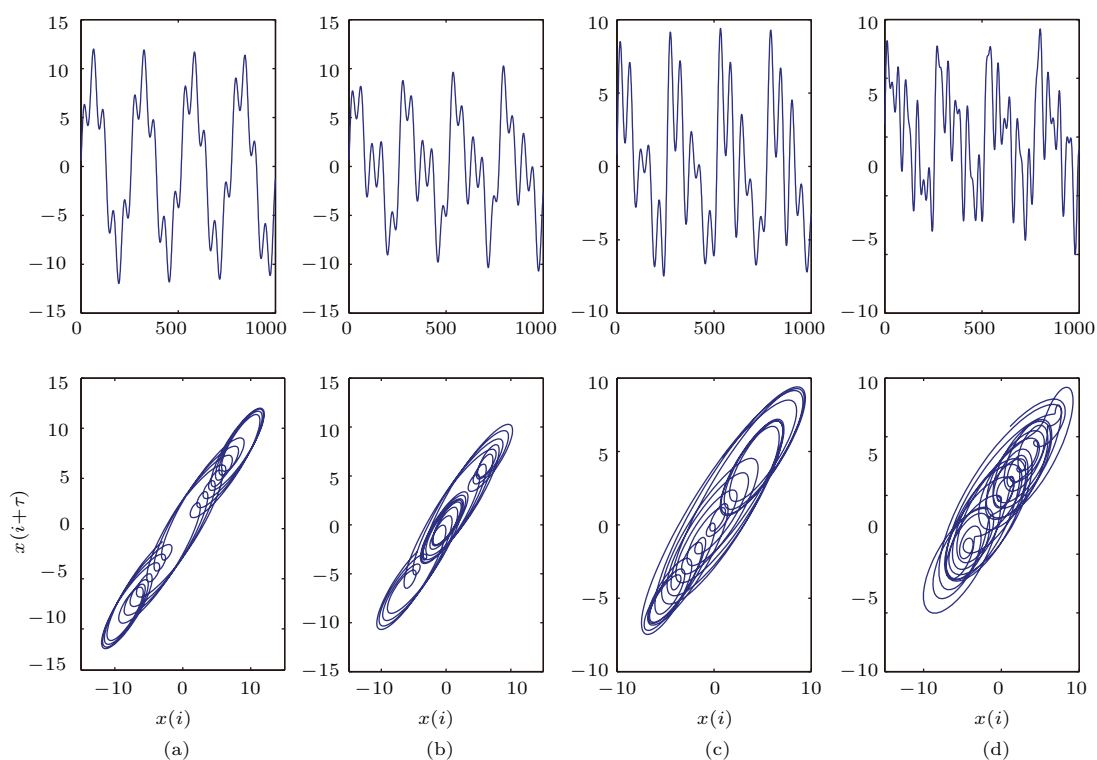


图3 模拟信号(上)及其相图(下) (a)基础信号; (b)含有 $f_0/2$ 谐波成分; (c)含有 $f_0/2, f_0/4$ 谐波成分; (d)含有 $f_0/2, f_0/4, f_0/8$ 谐波成分

Fig. 3. simulated signal (upper) and its phase diagram (below): (a) basic signal; (b) have harmonic component of $f_0/2$; (c) have harmonic component of $f_0/2, f_0/4$; (d) have harmonic component of $f_0/2, f_0/4, f_0/8$.

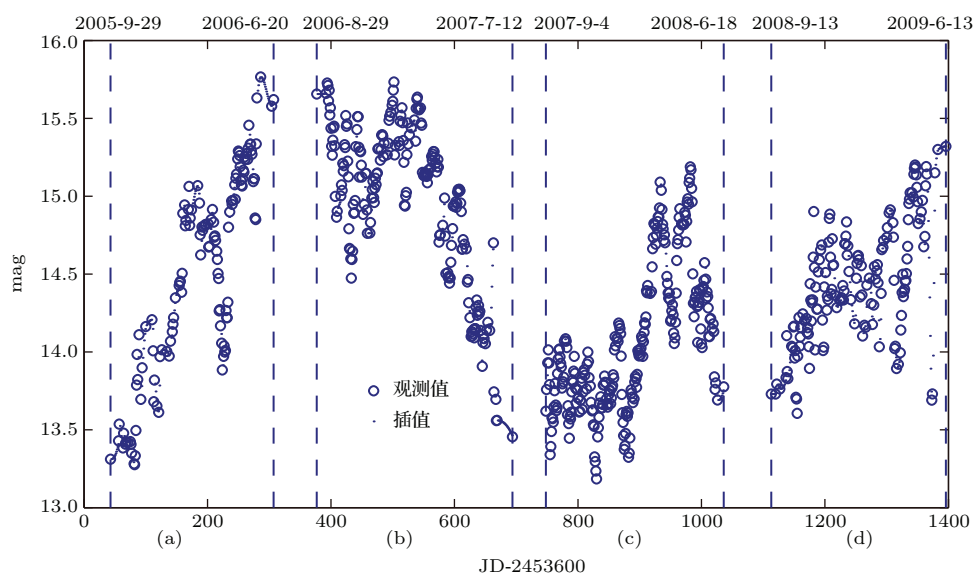


图4 R波段的分区图 (a)区间一(差值比52.45%); (b)区间二(差值比34.91%); (c)区间三(差值比12.11%); (d)区间四(差值比44.72%)

Fig. 4. partition map of R band (a) interval one (interpolation rate is 52.45%); (b) interval two (interpolation rate is 34.91%); (c) interval three (interpolation rate is 12.11%); (d) interval four (interpolation rate is 44.72%).

把2005—2009年R波段的观测数据分为四个区间, 见图4, 对空缺数据进行插值. 根据文献[33]对OJ287双黑洞轨道计算的结果可以看出, 区间一

与区间三处于次黑洞经过主黑洞吸积盘后导致R波段流量上升的阶段, 区间二处于R波段流量下降的阶段, 区间四处于次黑洞远离主黑洞吸积盘后R

波段流量相对平稳的阶段。

分别对四个区间的观测数据进行相空间重构(图5), 区间一与区间三观测数据的相图相似; 区间二观测数据的相图有周期环的痕迹; 区间四观测数据的相图受噪声影响最大; 四个区间观测数据的相图与模拟信号的相图相似。

为了定量比较模拟信号和四个区间观测数据的相似性, 使用G-P算法^[34]分别计算了关联维(图6)。随着嵌入维数增加, 模拟信号与观测数据

的关联维数逐渐饱和, 而对于随机噪声, 关联维数不会达到饱和。从图中可以看出, 区间二的观测数据和基础信号的饱和关联维相近, 光变表现为简单的准周期性; 区间一和区间三观测数据的饱和关联维基本一致, 处在基础信号含有一次谐波和基础信号含有二次谐波的饱和关联维之上, 准周期光变中应含有谐波周期; 区间四观测数据的饱和关联维最大, 远高于模拟信号的饱和关联维, 说明光变的随机性较强。

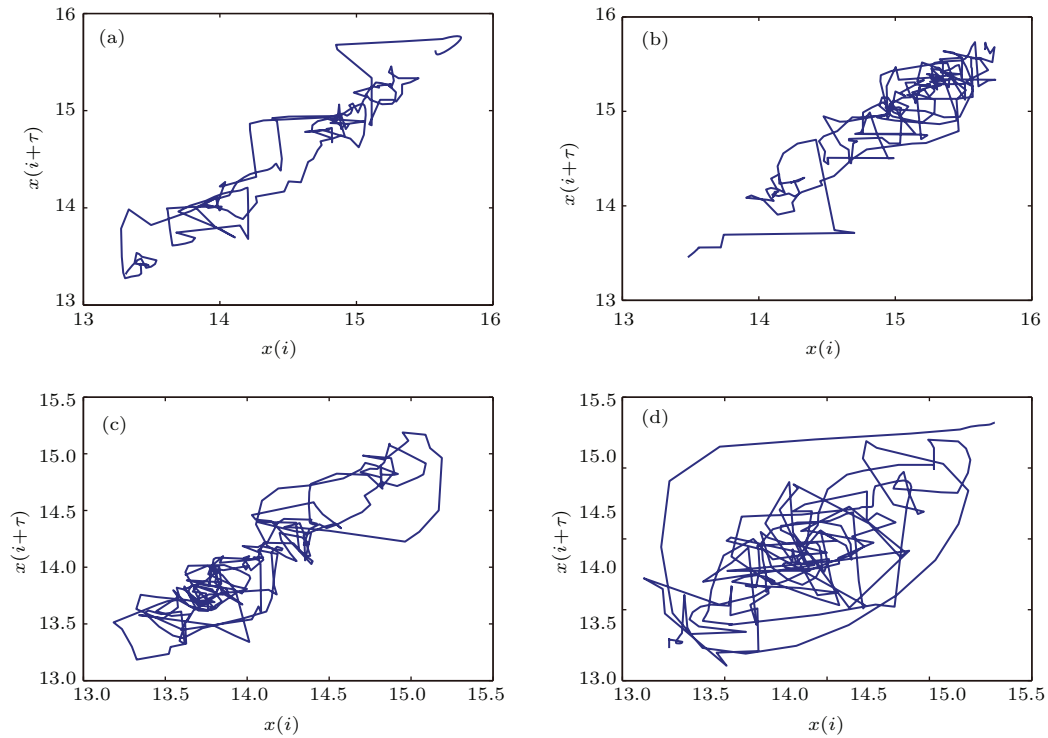


图5 观测数据的相图 (a) 区间一; (b) 区间二; (c) 区间三; (d) 区间四

Fig. 5. the phase diagram of observed data (a) interval one; (b) interval two; (c) interval three; (d) interval four.

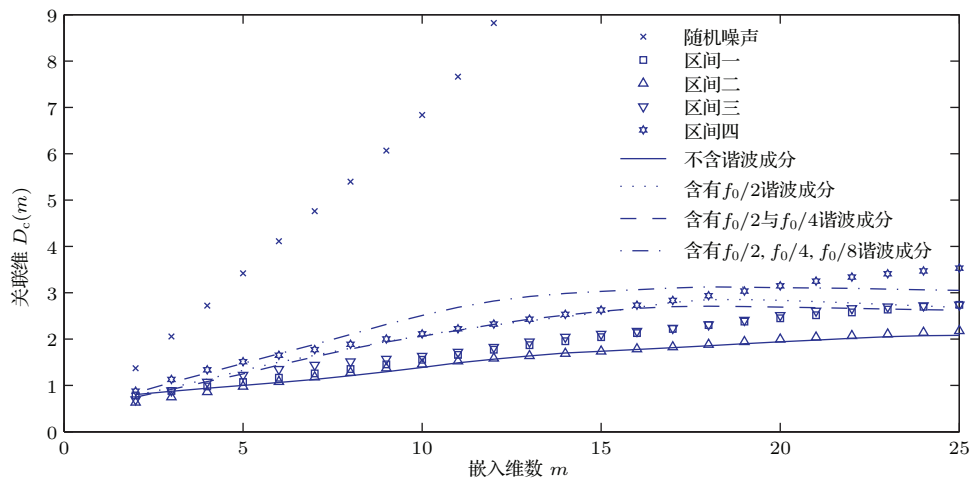


图6 R波段的关联维曲线

Fig. 6. correlation dimension curve of R band.

4 B, I, V 波段的光变分析

相比较于R波段的观测数据, 尽管B, I, V波段的观测数据较少, 但分析结果仍有一定价值. 对B波段观测数据进行 Lomb-Scargle 傅里叶变换, 获得B波段观测数据的周期图, 见图7. 在虚警概率 $F < 0.015$ 时存在 47.0 ± 2.6 d, 125.0 ± 6.8 d, 252 ± 27 d 的周期成分.

类似地, 对I波段观测数据分析, 获得I波段观

测数据的周期图, 见图8. 在虚警概率 $F < 0.015$ 时, 不考虑高频噪声, 存在 62.0 ± 3.4 d, 80.0 ± 5.3 d, 135.0 ± 9.1 d, 250 ± 29 d 的周期成分.

V波段数据相对B, I波段观测数据较多, 可类似R波段的处理方法分析不同时段光变中谐波变化的特性, 先对V波段观测数据日平均处理后插值, 再对V波段流量上升阶段、下降阶段、平稳阶段分别进行相空间重构, 见图9. 三个阶段的相图与R波段对应阶段的相图相似. 计算三个阶段的关联维, 图10, 与R波段结果相比, V波段观测数据的

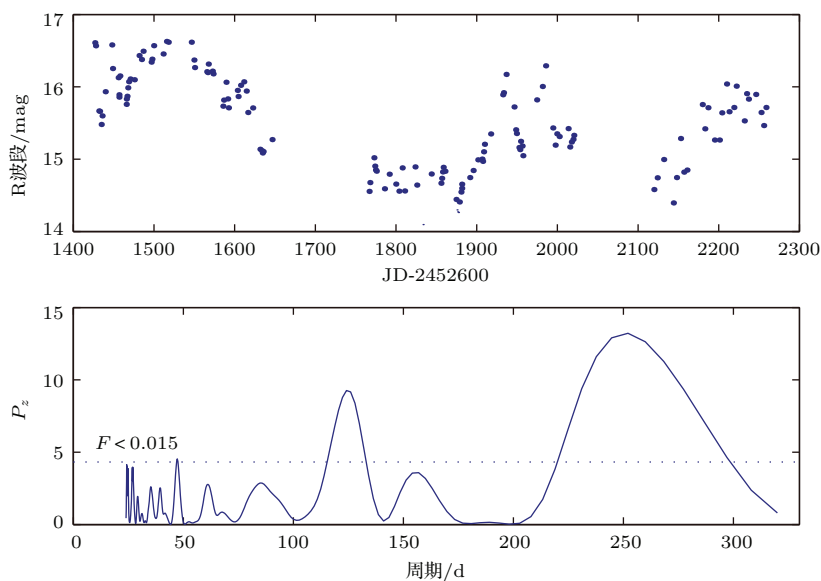


图7 B波段光变曲线(上)及其周期图(下)

Fig. 7. light curve of B band (upper) and its periodogram (below).

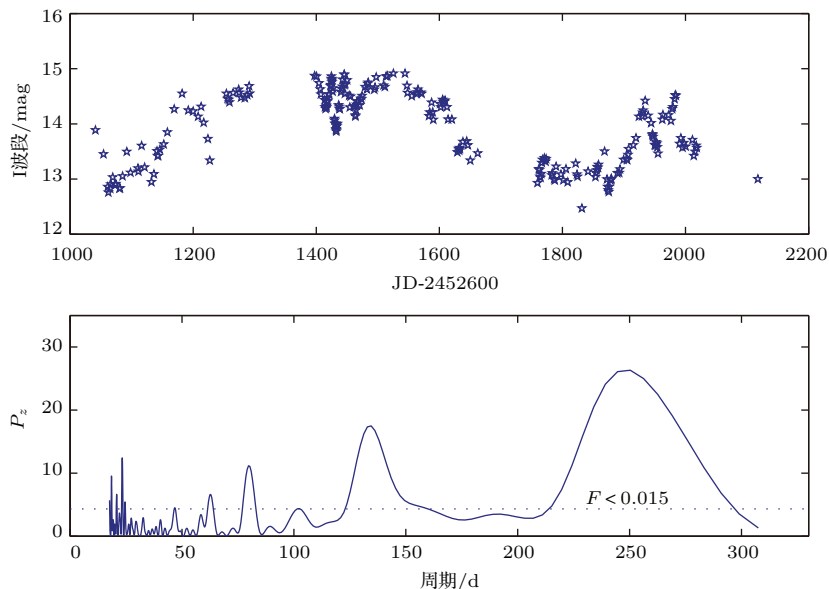


图8 I波段光变曲线(上)及其周期图(下)

Fig. 8. light curve of I band (upper) and its periodogram (below).

饱和关联维较低, 这可能是V波段插值数据较多引起. 与模拟信号相比, 同R波段一致, 在流量下降阶段, 光变行为呈现简单的准周期性; 在流量上升

阶段, 准周期光变应含有谐波周期成分, 光变行为变的复杂; 在平稳阶段, 光变随机性增强, 饱和关联维数最大.

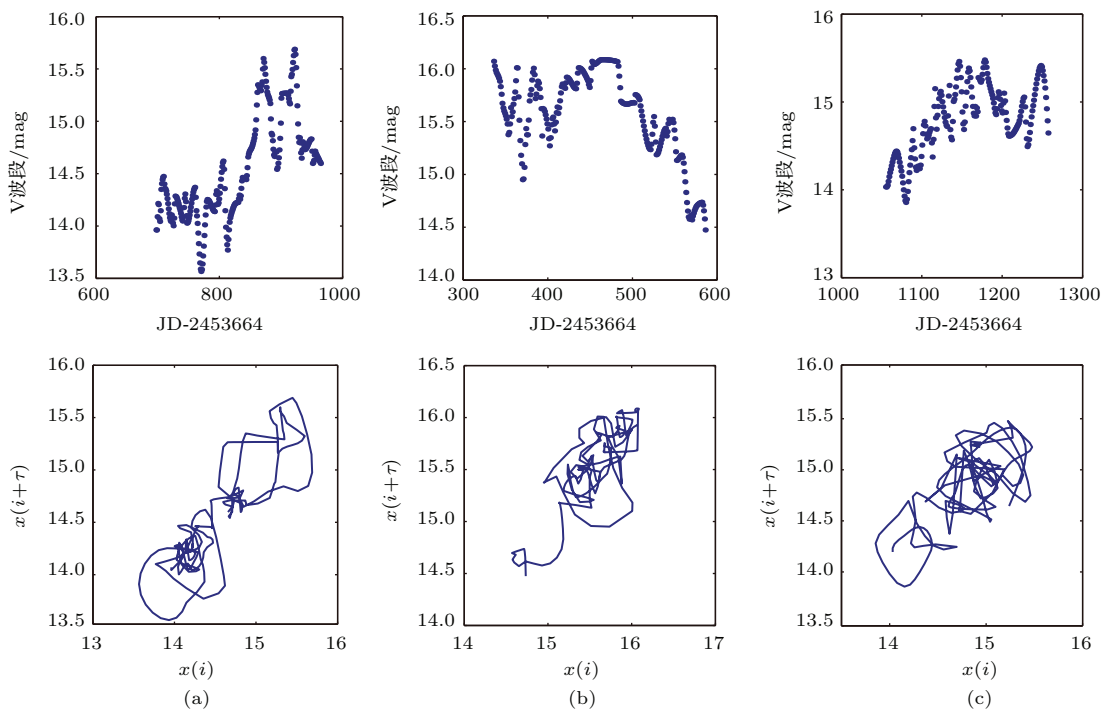


图9 V波段光变曲线(上)及其相图(下) (a) 流量上升阶段; (b) 流量下降阶段; (c) 平稳阶段

Fig. 9. light curve of V band (upper) and its phase diagram (below) (a) flow rising period; (b) flux decline period; (c) plateau.

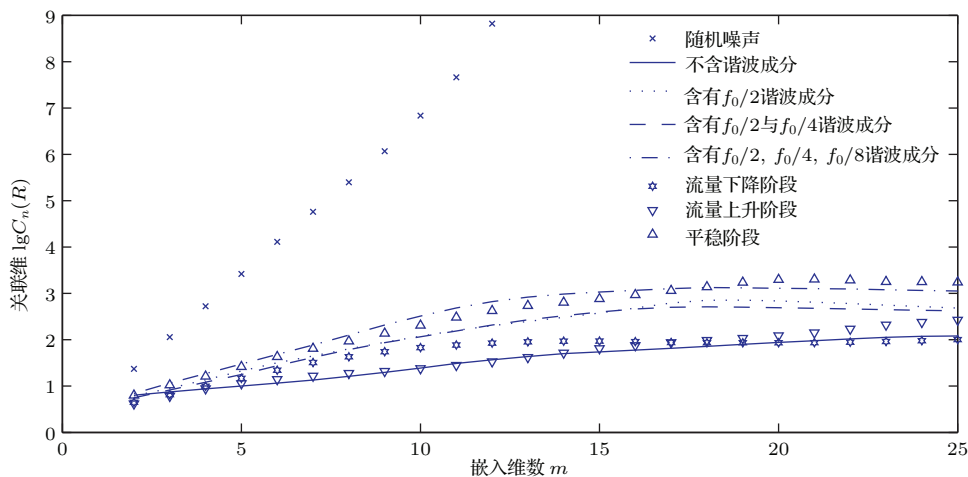


图10 V波段关联维曲线

Fig. 10. correlation dimension curve of V band.

5 讨论

根据上述分析, OJ287在R, B, I, V波段都存在中等时标的准周期光变, 但在不同阶段准周期光变中的谐波成分存在变化, 谐波成分的变化可能是

主黑洞吸积流受次黑洞扰动强弱不同导致. 在双黑洞模型中, 次黑洞经过主黑洞吸积盘时, 主黑洞吸积物质被次黑洞带出, 由光学厚变为光学薄, 产生光学爆发^[30]. 对不同时段光变分析的结果表明, 在流量上升阶段, 吸积流受到扰动较强, 准周期光变中出现谐波分量; 在流量下降阶段, 吸积流受到

扰动较小, 准周期光变中谐波成分消失; 在流量平稳阶段, 吸积流受迫变化减弱, 吸积盘的随机振荡成为主导, 光变表现出较强的随机性.

有研究指出, 吸积盘是自组织结构的耗散系统^[35], 分岔现象广泛存在于这种非线性系统中. 本文模拟信号中的分谐波由主频分岔产生, 不同时段光变曲线和模拟信号的对比可以看出, 周期光变中的谐波成分可能是由吸积流受强扰动分岔形成的, 光变中的倍周期现象可能是非线性系统倍周期分岔的表现. 对谐波成分变化规律的研究, 有助于进一步了解吸积盘的稳定性和振动. 由于分岔最终可能导致混沌的产生, 因此光变中的周期性和混沌性可能是在不同扰动下同一非线性系统的不同表现^[36].

6 结 论

本文运用 Lomb-Scargle 傅里叶变换方法得到了 OJ287 B, I, R 波段的中等时标光变周期, 3 个波段都存在约 52 d 和 255 d 的两个周期成分, 其中约 52 d 的周期成分与 Wu 等得到的周期基本一致, 255 d 左右的周期成分与 Sillanpää 等^[37] 获得的 1.2 a 光变周期有近似的倍数关系, 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^[38]. 对不同时段 R, V 波段光变中谐波周期成分变化规律的研究发现, OJ287 光变中谐波周期成分存在变化, 谐波成分的变化与主黑洞吸积流受次黑洞扰动的强弱有关, 周期光变中的谐波成分可能是非线性系统受强扰动分岔形成.

参考文献

- [1] Hartman R C, Bertsch D L, Bloom S D 1999 *Astrophys. J. Suppl.* **123** 79
- [2] Fan J H, Huang Y, Yuan Y H 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1526
- [3] Valtonen M J, Mikkola S, Merritt D, Gopakumar A, Lehto H J, Hyvönen T, Rampadarath H, Saunders R, Basta M 2010 *Astrophys. J.* **709** 725
- [4] Abramowicz M A, Nobili L 1982 *Nature* **300** 506
- [5] Zhang X 1998 *ChJAA* **18** 260 (in Chinese) [张雄 1998 天体物理学报 **18** 260]
- [6] Tang J, Fu M X, Zhang H J, Liu X Q 2013 *Acta. Astron. Sin.* **54** 421 (in Chinese) [唐洁, 傅明星, 张皓晶, 刘晓琴 2013 天文学报 **54** 421]
- [7] Tang J, Zhang X J, Pang Q, Zhang H J, Zhang Y G, Zhang X 2009 *Acta. Astron. Sin.* **50** 364 (in Chinese) [唐洁, 张晓娟, 庞桥, 张皓晶, 郑永刚, 张雄 2009 天文学报 **50** 364]
- [8] Xun Y B, Zhang H J, Zhang X 2013 *Journal of Yunnan Normal University*. **33** 9 (in Chinese) [徐云冰, 张皓晶, 张雄 2013 云南师范大学学报: 自然科学版 **33** 9]
- [9] Valtonen M J, Mikkola S, Lehto H J, Gopakumar A, Hudec R, Polednikova J 2011 *Astrophys. J.* **742** 22
- [10] Su C Y 2004 *Chin. Phys. B.* **13** 1375
- [11] Wu J, Zhou X, Wu X B, Liu F K, Peng B, Ma J, Wu Z Y, Jiang Z J, Chen J S 2006 *Astronomy. J.* **132** 1256
- [12] Valtonen M J, Wiik K 2012 *Mon. Not. R. Astron.* **421** 1861
- [13] Tang J 2014 *Sci. Sin. Phys. G.* **44** 865 (in Chinese) [唐洁 2014 中国科学 G 辑 **44** 865]
- [14] Carrasco L, Dultzin-hacyan D, Bruz-Gonzalez I 1985 *Nature* **314** 146
- [15] Valtonen M J, Nilsson K, Villforth C, Lehto H J, Takalo L O, Lindfors E, Sillanpää A, Hentunen V, Mikkola S, Zola S, Drozd M, Koziel D, Ogloza W, Kurpinska-Winiarska M, Siwak M, Winiarski M, Heidt J, Kidger M, Pursimo T, Wu J, Zhou X, Sadakane K, Marchev D, Nissinen M, Niarchos P, Liakos A, Gazeas K, Dogru S, Poyner G, Dietrich M, Assef R, Atlee D, Bird J, DePoy D, Eastman J, Peeples M, Prieto J, Watson L, Yee J, Mattingly A, Ohlert J 2009 *Astrophys. J.* **698** 781
- [16] Pihajoki P, Valtonen M J, Ciprini S 2013 *Mon. Not. R. Astron.* **434** 3122
- [17] Tang J 2014 *Acta. Phys. Sin.* **63** 049701 (in Chinese) [唐洁 2014 物理学报 **63** 049701]
- [18] Libchaber A, Mauer J 1980 *Journal de Physique.* **41** 51
- [19] Lauterborn W, Cramer E 1981 *Phys. Rev. Lett.* **47** 1445
- [20] Schuster H G (translated by Hong X Z) 2010 *An introduction of chaos* (SiChuan: Education Press of SiChuan) pp73-74 (in Chinese) [H. G 舒斯特著 (朱鉉雄译) 2010 混沌学引论 (四川: 四川教育出版社) 第 73—74 页]
- [21] Chen F S, Jiang S Y 1993 *Progress In Astronomy.* **11** 217 (in Chinese) [陈福生, 蒋世仰 1993 天文学进展 **11** 217]
- [22] Xu B, Yang T, Tan B H, Chen Y 2011 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **31** 702 (in Chinese) [徐斌, 杨涛, 谭保华, 陈益 2011 核电子学与探测技术 **31** 702]
- [23] Horne J H, Baliunas S L 1986 *Astrophys. J.* **302** 757
- [24] Packard N H, Crutchfield J P, Farmer J D, Shaw R S 1980 *Phys. Rev. Lett.* **45** 712
- [25] Harikrishnan K P, Misra R, Ambika G, Kembhavi A K 2006 *Physica. D* **215** 137
- [26] Ou J W, Zhang H J, Zheng Y G, Zhang X 2014 *Acta. Phys. Sin.* **63** 049801 (in Chinese) [欧健文, 张皓晶, 郑永刚, 张雄 2014 物理学报 **63** 049801]
- [27] Jia G B, Cen X F, Ma H Y, Wang J C 2008 *Astron. Astrophys. Suppl.* **129** 569
- [28] Zheng Y G, Zhang X, Bi X W, Hao J M, Zhang H J 2008 *Mon. Not. R. Astron.* **385** 823
- [29] Villforth C, Nilsson K, Heidt J, Takalo L O, Pursimo T, Berdyugin A, Lindfors E, Pasanen M, Winiarski M, Drozd M, Ogloza W, Kurpinska-Winiarska M, Siwak M, Koziel-Wierzbowska D, Porowski C, Kuzmich A, Krzesinski J, Kundera T, Wu J, Zhou X, Efimov Y,

- Sadakane K, Kamada M, Ohlert J, Hentunen V, Nissinen M, Dietrich M, Assef R J, Atlee D W, Bird J, Depoy D L, Eastman J, Peebles M S, Prieto J, Watson L, Yee J C, Liakos A, Niarchos P, Gazeas K, Dogru S, Donmez A, Marchev D, Coggins-Hill S A, Mattingly A, Keel W C, Haque S, Aungwerojwit A, Bergvall N 2010 *Mon. Not. R. Astron.* **402** 2087
- [30] Lehto H, Valtonen M J 1996 *Astrophys. J.* **460** 207
- [31] Sundelius B, Wahde M, Lehto H J, Valtonen M J 1997 *Astrophys. J.* **484** 180
- [32] Cao X W, Zhang J L 1993 *Acta. Astron. Sin.* **34** 366 (in Chinese) [曹新伍, 张家铝 1993 天文学报 **34** 366]
- [33] Wu S Q, Zhang Y, Fu Z W 2012 *Acta. Astron. Sin.* **53** 186 (in Chinese) [武曙光, 张杨, 付正文 2012 天文学报 **53** 186]
- [34] Grassberger P, Procaccia I 1983 *Physica. D* **9** 189
- [35] Yonehara A, Mineshige S 1997 *Astrophys. J.* **486** 388
- [36] Ou J W, Zheng Y G, Zhang X 2014 *Acta. Phys. Sin.* **63** 239801 (in Chinese) [欧健文, 郑永刚, 张雄 2014 物理学报 **63** 239801]
- [37] Sillanpää A, Takalo L O, Pursimo T, Nilsson K, Heinamäki P, Katajainen S, Pietila H, Hanski M, Rekola R, Kidger M, Boltwood P, Turner G W, Robertson J W, Honeycutt R K, Efimov Y S, Shakhovskoy N, Fiorucci M, Tosti G, Ghisellini G, Raiteri C M, Villata M, de Francesco G, Lanteri L, Chiaberge M, Peila A, Heidt J 1996 *Astron. Astrophys.* **305L** 13
- [38] Zhang X, Zheng Y G, Zhang H J, Hu S M, Xie Z H 2006 *Chin. Phys.* **15** 2185

A study of the middle time-scale periodic behavior of light curve of BL Lac object OJ287*

Ding Nan Zhang Hao-Jing[†] Zhang Xiong Ou Jian-Wen Luo Dan

(School of Physics and Electronic Information Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

(Received 29 December 2014; revised manuscript received 26 January 2015)

Abstract

In this paper, we collect the 37 years' data observed for BL Lac object OJ287 in the optical band, and construct its light curve from 1972 to 2009. Using the method of Lomb-Scargle Fourier transform, we analyze the middle time-scale periodic behavior and discover the primary periodic compositions of 52.0 ± 1.1 day and 255 ± 23 day. Then, we simulate the quasi-periodic signal of period doubling bifurcations and compare it with the observation data at different time-interval in their phase diagram and correlation dimension. Result indicates that OJ287 has multi-period scale features. At different time-intervals, there are different harmonic period components in the quasi-periodic light curve. Variation of harmonic period component is related with the disturbance of accretion flow which is from the secondary black hole to the primary black hole, and the periodicity variability may bifurcate the harmonic period component when the primary accretion flow is influenced by a strong disturbance.

Keywords: OJ287, period of light variation, accretion flows, period doubling bifurcation

PACS: 98.54.Cm, 05.45.Tp, 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.64.139801

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1231203), the National Natural Science Foundation of China (Grant No.11163007), the Natural Science Foundation of Yunnan Province, China (Grant No.2012FB140), the Key Program of Science Foundation of Education Department of Yunnan Province, and the Key Program of Key Laboratory of the High Energy Astrophysics of University of Yunnan Province of China.

[†] Corresponding author. E-mail: kmzhanghj@163.com