

类星体 PKS 1510-089 的 X 射线流量变化周期特性*

李孝攀¹⁾²⁾ 张皓晶^{1)†} 张 雄¹⁾

1) (云南师范大学物理与电子信息学院, 昆明 650092)

2) (昭通师范高等专科学校物理系, 昭通 657000)

(2010 年 6 月 28 日收到; 2011 年 1 月 11 日收到修改稿)

使用罗西 X 射线时变探测器的数据, 得到了类星体 PKS 1510-089 从 1996 年 1 月到 2009 年 12 月在 X 射线的 1.5—12 keV 能段上的光变曲线. 运用离散相关函数方法、小波分析方法和功率谱方法分析和认证类星体 PKS 1510-089 的光变周期值, 结果表明类星体 PKS 1510-089 在 X 射线的 1.5—12 keV 能段具有 (0.94 ± 0.08) a 的平均光变周期. 采用不同模型对观测到的周期性光变进行分析后的结果表明, 超大质量双黑洞模型是目前解释类星体 PKS 1510-089 周期性光变较为理想的模型, 应用该模型分析得到类星体 PKS 1510-089 的轨道周期为 (1.85 ± 0.10) a.

关键词: 类星体 PKS 1510-089, X 射线流量变化, 双黑洞模型

PACS: 98.54.Cm, 98.70.Dk, 98.70.Rz

1. 引言

类星体 PKS 1510-089 属于光学激变体, 具有强烈的发射线和剧烈的短时标光变, 它的红移为 0.361, 偏振幅度高达 $10.9\% \pm 3.8\%$. 它的多波段能谱和其他类星体 (如类星体 3C 273 等) 相类似^[1-3], 这说明它具有相对论“喷流”主导的辐射^[4]. 它的多波段能谱中存在“蓝包”, 说明它的辐射中具有热成分^[5], 存在着显著的紫外过剩^[6,7]. 它的能谱在 X 射线波段很平, 但是在 γ 射线波段却变得很陡^[8].

长期的监测表明, 类星体 PKS 1510-089 是活动十分剧烈的天体. 在射电波段, Zhang 等^[9] 发现其射电 37 GHz 流量变化达到 $6.0 \times 10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$. 同时, 其光学变化也非常剧烈. 在 1933 年—1951 年间, 其光学 B 波段最大星等变化为 5.4^[10]. 1997 年, Villata 等^[11] 发现它在光学 R 波段和 B 波段有 0.63 星等的短时标非正弦变化. Xie 等^[3] 1999 年的观测研究表明, 在光学 B 波段, 它在 40 min 时标内有 0.56 星等的变化. Dai 等^[12] 曾于 2001 年观测到光学波段的短时标光变.

除了剧烈的短时标光变, 类星体 PKS 1510-089 还被证实在多个波段存在长周期光变. 在光学波段, Xie 等^[3] 发现类星体 PKS 1510-089 的流量存在周期性最小的现象, 得到它的光学波段光变周期为 (0.92 ± 0.04) a, 同时指出在它的中心可能存在超大质量双黑洞系统; 在射电波段, Xie 等^[13] 发现它在 22 和 37 GHz 处分别有 (1.82 ± 0.12) a 和 (0.92 ± 0.04) a 的爆发周期, Zhang 等^[9] 使用小波分析方法进行分析也得到类似的结论.

2. 观测数据

本文采用罗西 X 射线时变探测器的全空监视器 (ASM) 的 1 d 时标 1.5—12 keV 能段的数据 (1996 年 1 月—2009 年 12 月), 并由此得到类星体 PKS 1510-089 在 X 射线的 1.5—12 keV 能段的 30 d 平均流量变化, 结果如图 1 所示. 尽管 ASM 的数据误差较大, 但是已有一些基于 ASM 数据进行周期性研究的成果报道^[14-16]. 从图 1 可以看到, 类星体 PKS 1510-089 在 X 射线的 1.5—12 keV 能段的光变剧烈且不规则, 在约 14 a 的时间内, 出现 10 余个峰值, 仅从流量变化很难直接得到其周期成分. 本文

* 国家自然科学基金 (批准号: 10763002) 和云南省自然科学基金重点项目 (批准号: 2008A011Z) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: ynzx@yeah.net

采用离散相关函数(DCF)方法、小波分析方法和功率谱方法对其周期进行对比研究,认证其周期光变特征.

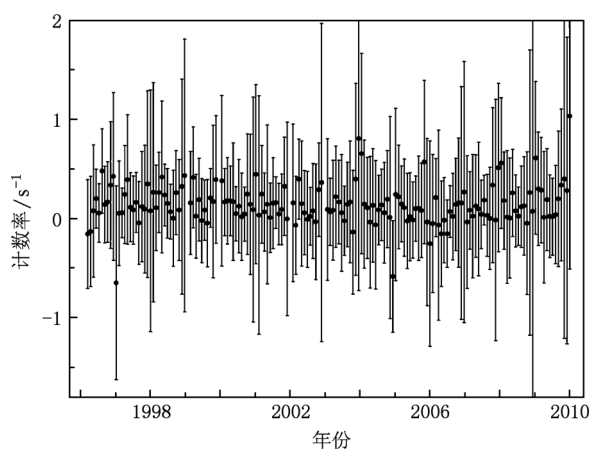


图1 类星体 PKS 1510-089 在 X 射线的 1.5—12 keV 能段 30 d 平均流量变化

3. 周期分析

DCF 方法可以用于分析两组数据的相关性,也能计算两个时间序列的延迟. 如果使用 DCF 方法对单一时间序列进行分析,并假设该序列中存在一个可能的周期 T ,那么通过 DCF 显示出的具有时延 $\tau = 0$ 和 $\tau = p$ 的序列自相关,则可以得到该序列的周期值^[17].

对任意两个离散数据序列 a_i 和 b_j 中的一个数据对 (a_i, b_j) ,有

$$U_{ij} = \frac{(a_i - \bar{a})(b_j - \bar{b})}{\sigma_a \sigma_b}, \quad (1)$$

式中 $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 分别为数据序列 a_i 和 b_j 的平均值, σ_a 和 σ_b 分别为相应的标准偏差. 为保持标准化,对有噪声的数据可以用 $\sqrt{(\sigma_a^2 - e_a^2)(\sigma_b^2 - e_b^2)}$ 来代替(1)式中的 $\sigma_a \sigma_b$. 对一给定的时延 τ 和区间 $\Delta\tau$,用 Δ_{ij} 表示任意数据对 (a_i, b_j) 的差,如果有 k 个数据对满足

$$\tau - \Delta\tau/2 \leq \Delta_{ij} < \tau + \Delta\tau/2, \quad (2)$$

那么将这 k 个数据对的 U_{ij} 值平均后就可以得到序列的 DCF 值

$$F(\tau) = \frac{1}{k} \sum U_{ij}. \quad (3)$$

对单一时间序列进行分析时,DCF 值显示出的具有时延 $\tau = 0$ 和 $\tau = p$ 的序列自相关,通过寻找

DCF 峰值对应的延迟就可以得到信号的周期值. 使用 DCF 方法对类星体 PKS 1510-089 在 X 射线波段的光变数据进行分析得到的结果如图 2 所示. 为了便于分析,计算时 $\Delta\tau$ 的取值为 0.1 a.

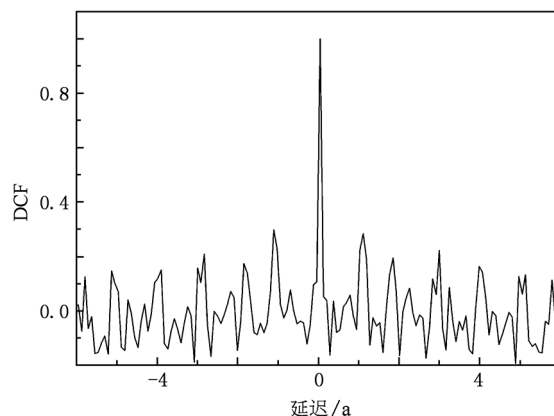


图2 利用 DCF 方法分析类星体 PKS 1510-089 在 X 射线的 1.5—12 keV 能段流量数据

从图 2 可以看到,DCF 最高峰值对应的延迟为 1.03 a,其他较高峰值对应的延迟为 1.85 和 2.83 a,这说明在 X 射线的 1.5—12 keV 能段,类星体 PKS 1510-089 可能存在 1.03,1.85 和 2.83 a 的周期成分. 比较分析后不难发现,1.85 和 2.83 a 的周期值应该是由 1.03 a 叠加而成的,图 2 中曲线的变化趋势也可以证实这个推论. 若对 DCF 值形成的峰用半高宽方法做误差估计,则 DCF 方法得到的周期成分为 (1.03 ± 0.11) a.

为了进一步确认 DCF 方法得到的结果,本文采用小波分析方法进行验证比较. 小波分析在时域和频域同时具有良好的局部化性质^[18],它的核心是多分辨率周期性分析,主要特点是通过变换突出问题在某方面的特征. 该方法已经被广泛应用于水文序列、气象学等方面的周期性研究. 近年来,小波分析在天文观测数据处理方面有着广泛的运用^[19–21]. Zhang 等^[9]曾用小波分析方法研究类星体 PKS 1510-089 的 22 和 37 GHz 射电流量的光变周期,得到的结果表明 $T_1 = (1.80 \pm 0.06)$ a 为主周期, $T_2 = (0.90 \pm 0.07)$ a 可能为 T_1 的半周期.

小波母函数 $\psi(t)$ 是一种长度有限、平均值为零的波形,它具有快速衰减的特性. 通过平移和伸缩, $\psi(t)$ 可以变成一族函数^[22]

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (4)$$

式中 a 为伸缩尺度, b 为平移参数, a 和 b 是与时间

变量对应的参数. 小波变换是由傅里叶变换发展而来的一种理论, 傅里叶变换所采用的基函数是一定的, 具有 $\exp(i\omega t)$ 的形式, 而小波变换的基函数不具有唯一性. 本文所用的小波母函数 Morlet 小波是高斯包络下的单频复正弦函数, 其表达式为

$$\psi(t) = (\pi f_b)^{-0.5} \exp(j2\pi f_c t) \exp(-t^2/f_b), \quad (5)$$

式中 f_b 为带宽, f_c 为中心频率. 为满足容许性条件, ω 的取值应满足 $\omega \geq 5$, 若令 $f_b = 2$, $\omega = 2\pi f_c$, 就有 Morlet 小波的伸缩尺度 a 与周期 T 的关系^[23]

$$T = \frac{4\pi}{\omega + \sqrt{2 + \omega^2}} a. \quad (6)$$

令 $\omega = 6.2$, 则 $T \approx a$, 从而可以达到简化计算的目的. 我们尝试改变 ω 的值, 发现这对利用(6)式计算得到的结果没有影响.

天体周期分析中所采用的数据多为离散形式, 对一个离散随机信号 $f(n\Delta t)$, 其离散小波变换表达式为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{n=1}^N f(n\Delta t) \psi^*\left(\frac{n\Delta t - b}{a}\right), \quad (7)$$

式中 $W_f(a, b)$ 为小波变换系数, Δt 为采样时间间隔, 星号表示复共轭. $W_f(a, b)$ 反映该小波和处在分析时段内的信号波形的相似程度, 它是 a 和 b 的二维函数, 它关于 a, b 的图形是一个曲面, 可以将其以等值线的形式投影到以 a 为纵坐标, b 为横坐标的平面内. 通过变换系数的实部等值线图可以分析数据在小波变换域中的波动情况.

本文得到的小波变换实部等值线分布如图 3 所示, 图中横轴所对应的为平移参数 b , 表示年份, 纵轴对应的为伸缩尺度 a , 表示周期. 从图 3 可以看出, 周期为 $0.9 a$ 附近的等值线比较密集, 说明类星体 PKS 1510-089 的光变存在约 $0.9 a$ 的周期波动.

为了更直观地辨认信号的周期, 可以作出小波变换系数的方差图. 对不同尺度 a 的小波系数进行平方求和就得到小波方差, 其表达式为^[24]

$$V(a) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |W_f(a, b_n)|^2. \quad (8)$$

根据(8)式作出 $V(a)$ 关于 a 的图形称为小波方差图. 通过方差图可以对一些复杂的非线性过程进行解释, 由图中极大值的位置可以确定信号的主要周期.

以方差为纵轴, 周期为横轴得到的小波方差图如图 4 所示. 由于小波方差的极大值分别对应着各周期值, 从图 4 可以看到, 小波方差在周期为 $0.80 a$ 处出现了最大值, 说明类星体 PKS 1510-089 的光变

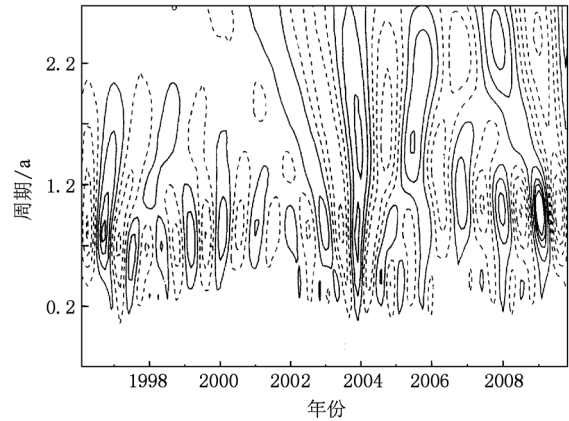


图 3 类星体 PKS 1510-089 在 X 射线的 1.5—12 keV 能段流量数据小波变换系数实部等值线分布

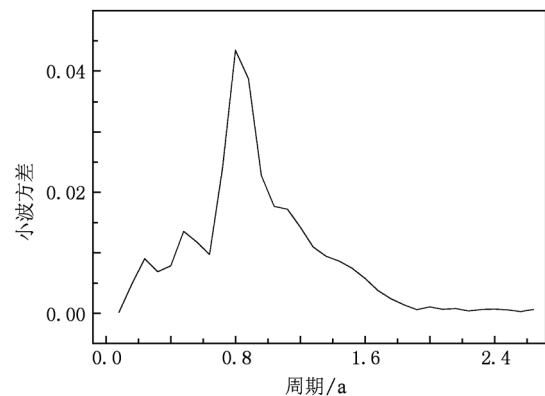


图 4 类星体 PKS 1510-089 在 X 射线的 1.5—12 keV 能段流量数据小波变换方差图

存在约 $0.80 a$ 的周期波动. 针对小波方差曲线形成的峰, 用半高宽方法确定误差的结果表明, 类星体 PKS 1510-089 在 X 射线的 1.5—12 keV 能段具有 $(0.80 \pm 0.11) a$ 的光变周期, 这与 DCF 方法分析得到的结果基本一致.

为了进一步证实 X 射线波段发现的约 $0.9 a$ 周期成分, 我们使用了在周期分析中较为传统的功率谱分析方法. 本文采用的是基于离散傅里叶变换理论的周期图谱分析方法^[25,26], 该方法利用相关函数与傅里叶变换的卷积性质, 把求功率谱估计直接用时间序列的快速傅里叶变换来实现, 是一种分析信号周期成分的传统方法^[27]. 为了便于比较 DCF 方法和小波分析得到的周期结果, 本文直接采用了 ASM 的数据. 使用功率谱方法分析得到的结果如图 5 所示. 从图 5 可以看到, 峰值对应的周期为 $0.98 a$, 这说明光变存在约 $0.98 a$ 的周期成分. 这个结果与

使用 DCF 方法和小波分析方法得到的结果基本一致.

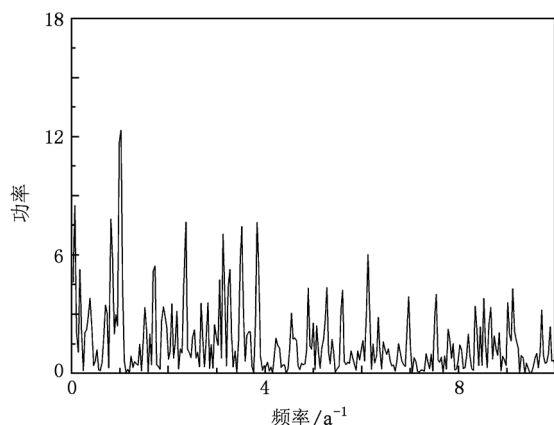


图5 利用功率谱方法分析类星体 PKS 1510-089 在 X 射线的 1.5—12 keV 能段流量数据

在采用 DCF 方法、小波分析方法和功率谱方法对光变周期进行分析的过程中,本文采用半高宽方法确定不确定度,取测量序列的最大不确定度估计,保证周期分析结果的可靠性.对三种分析方法得到的三个周期值进行平均后的结果表明,类星体 PKS 1510-089 在 X 射线的 1.5—12 keV 能段有 (0.94 ± 0.08) a 的平均光变周期.

4. 周期特性与超大质量双黑洞模型参数估计

Begelman 等^[28]在 1980 年首次提出了超大质量双黑洞的概念,认为双黑洞是星系合并产生的.此后,双黑洞模型多用来解释光变周期的起源,该模型认为黑洞的轨道运动引起了吸积盘和喷流的进动,喷流和视线方向的夹角变化引起了观测上的光变.周期性光变、扭曲的喷流和发射线的双峰结构成为超大质量双黑洞系统存在的间接观测证据^[29].

近年来,类星体 PKS 1510-089 喷流的观测研究为其中心存在超大质量双黑洞的假设提供了证据,如钱德拉 X 射线天文卫星观测到的弯曲的 X 射线喷流^[4]、射电观测中发现其喷流有摆动和进动的现象^[30]等.与此同时,类星体 PKS 1510-089 周期性光变的研究也有一些重要的成果. Xie 等^[3]发现类星体 PKS 1510-089 的光学波段的流量最低值存在 (0.92 ± 0.04) a 的周期性变化,并指出其中心有一个超大质量双黑洞,主黑洞和次黑洞的绕食效应导

致了流量最低值的周期性变化.在射电波段,文献^[9,13]对类星体 PKS 1510-089 射电流量变化周期的研究表明,它存在 $T_1 = (0.92 \pm 0.04)$ a 和 $T_2 = 2T_1 = (1.82 \pm 0.12)$ a 爆发周期,次黑洞在一个轨道周期中两次穿过主黑洞的吸积盘并导致了这种爆发现象.而在 X 射线波段,本文的结果表明类星体 PKS 1510-089 存在 (0.94 ± 0.08) a 的光变周期.若以双黑洞模型对此进行解释,次黑洞在一个轨道周期中将两次穿过主黑洞的吸积盘并导致这种 X 射线波段的周期性光变,那么可取 DCF 分析中的周期成分 (1.85 ± 0.10) a 为其轨道周期值.

以上的分析表明,类星体 PKS 1510-089 的 X 射线波段流量光变周期和光学波段的最小流量值变化周期、射电波段的爆发周期大致相等,这可能暗示了三个波段的周期现象有一个共同的物理起源.

根据文献^[3,12]在光学波段观测到的类星体 PKS 1510-089 约 40 min 的短时标光变及短时标光变的相关理论^[31],可以计算出类星体 PKS 1510-089 的中心黑洞质量和辐射区域半径.内禀最小光变时标不能小于光子穿过黑洞最小稳定轨道的时间,即

$$M \leq \frac{c^3}{2\pi G} \frac{\delta}{1+z} \Delta t, \quad (9)$$

其中 G 为万有引力常数, δ 为多普勒因子, z 为红移, Δt 为观测到的最小光变时标.如果辐射产生于相对论性喷流,则辐射区域半径 r_r 的上限为

$$r_r \leq \frac{c\delta}{1+z} \Delta t. \quad (10)$$

利用(9),(10)式可以计算出中心黑洞质量的上限约为 $0.85 \times 10^8 M_\odot$, 辐射区域半径 r_r 约为 1.54×10^{12} m, 其中 $M_\odot$ 表示太阳质量.中心黑洞的质量与 Hartman 得到的约为 $10^8 M_\odot$ 的主黑洞质量相近,次黑洞质量为 $10^{6.2} M_\odot$.^[32]若这两个质量数据是可信的,则可由开普勒定律对这个双黑洞系统的轨道参数进行估计.假设双黑洞系统的半轴分别为 l_1 和 l_2 , 则 $l_1 + l_2$ 的值可由下列开普勒定律得到:

$$T_{\text{obt}}^2 = \frac{4\pi^2(l_1 + l_2)^3}{G(M + m)}. \quad (11)$$

这里 T_{obt} 为轨道周期,取轨道周期 $T_{\text{obt}} = (1.85 \pm 0.10)$ a; 万有引力常数 G 取 $6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$; M 和 m 分别为主黑洞和次黑洞的质量,取主黑洞质量为 $10^8 M_\odot$, 次黑洞质量为 $10^{6.2} M_\odot$. 根据(11)式可以估算出 $l_1 + l_2$ 的值约为 1.03×10^{14} m. 若取主黑洞质量为 $10^8 M_\odot$, 可以估算

出主黑洞的 Schwarzschild 半径 $r_s = 2GM/c^2 = 2.95 \times 10^{11}$ m, 主黑洞的 Schwarzschild 半径小于以上计算得到的辐射区域半径 (1.54×10^{12} m,) 估算得到的超大质量双黑洞系统的轨道参数 $l_1 + l_2$ 是 Schwarzschild 半径 r_s 的 350 倍左右, 是主黑洞辐射区域半径的 67 倍左右.

如果使用薄吸积盘理论分析^[33–35], 爆发持续时间 $t_{\text{burst}} = 4.5\alpha_{0.1}^{-0.62} M_6^{1.37}$ a, 其中 $M_6 = M/(10^6 M_\odot)$, α 为黏性系数. 若以 (1.85 ± 0.10) a 为轨道周期, 进一步分析可以得到类星体 PKS 1510-089 的中心黑洞质量仅约为 $10^6 M_\odot$. 但是在秒差距尺度上, 类星体 PKS 1510-089 的喷流与视线方向的夹角只有 0.05 rad, 日常观测到的流量来自于其喷流, 而薄吸积盘理论得到的质量约为 $10^6 M_\odot$ 的黑洞吸积产生的喷流并不能很好解释观测到的流量, 对周期性光变的存在也无法提供合理的解释. 因此, 我们认为超大质量双黑洞模型是目前解释类星体 PKS 1510-

089 周期性光变较为理想的模型.

5. 结 论

本文使用罗西 X 射线时变探测器的数据, 运用 DCF 方法和小波分析方法分析了类星体 PKS 1510-089 在 X 射线的 1.5—12 keV 能段的光变周期特性, 并将所得结果与利用功率谱方法分析得到的结果进行了比较, 发现类星体 PKS 1510-089 在 X 射线的 1.5—12 keV 能段具有 (0.94 ± 0.08) a 的平均光变周期, 应用超大质量双黑洞模型分析得到其轨道周期为 (1.85 ± 0.10) a. X 射线波段流量光变周期和光学波段的最小流量变化周期、射电波段的爆发周期大致相等, 三个波段的周期现象也许有一个共同的物理起源. 本文还利用超大质量双黑洞模型对观测到的周期性光变进行讨论, 并分析了类星体 PKS 1510-089 双黑洞系统的相关参数.

- [1] Kataoka J, Madejski G, Sikora M, Roming P, Chester M M, Grupe D, Tsubuku Y, Sato R, Kawai N, Tosti G, Impiombato D, Kovalev Y Y, Kovalev Y A, Edwards P G, Wagner S J, Moderski R, Stawarz L, Takahashi T, Watanabe S 2008 *Astrophys. J.* **672** 787
- [2] Marscher A P, Jorstad S G, Larionov V M, Aller M F, Aller H D, Lähteenmäki A, Agudo Iván, Smith P S, Gurwell M, Hagen-Thorn V A, Konstantinova T S, Larionova E G, Larionova L V, Melnichuk D A, Blinov D A, Kopatskaya E N, Troitsky I S, Tornikoski M, Hovatta T, Schmidt G D, D'Arcangelo F D, Bhattarai D, Taylor B, Olmstead A R, Manne-Nicholas E, Roca-Sogorb M, Gómez José L, McHardy I M, Kurtanidze O, Nikolashvili M G, Kimeridze G N, Sigua L A 2010 *Astrophys. J.* **710** 126
- [3] Xie G Z, Zhou S B, Li H T, Dai H, Chen L E, Ma L 2004 *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **348** 831
- [4] Daniel C, John F, Chi C, David H, Joanne M 2002 *Astrophys. J.* **580** 742
- [5] Singh K P, Shrader C R, George I M 1997 *Astrophys. J.* **491** 515
- [6] Wu J, Zhou X, Peng H, Ma J, Jiang Z, Chen J 2005 *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **361** 155
- [7] Li J, Fan J H, Yuan Y H 2007 *Chin. Phys.* **16** 876
- [8] Pucella G, Vittorini V, D'Ammando F, Tavani M, Raiteri C M, Villata M, Argan A, Barbiellini G, Boffelli F, Bulgarelli A, Caraveo P, Cattaneo P W, Chen A W, Cocco V, Costa E, Del Monte E, de Paris G, Di C G, Donnarumma I, Evangelista Y, Feroci M, Fiorini M, Froyland T, Fuschino F, Galli M, Gianotti F, Giuliani A, Labanti C, Lapshov I, Lazzarotto F, Lipari P, Longo F, Marisaldi M, Mereghetti S, Morselli A, Pacciani L, Pellizzoni A, Perotti F, Picozza P, Prest M, Rapisarda M, Rappoldi A, Soffitta P, Trifoglio M, Trois A, Vallazza E, Vercellone S, Zambra A, Zanella D, Antonelli L A, Colafrancesco S, Cutini S, Gasparrini D, Giommi P, Pittori C, Verrecchia F, Salotti L, Aller M F, Aller H D, Carosati D, Larionov V M, Ligustri R 2008 *Astron. Astrophys.* **491** 21
- [9] Zhang H J, Zhao G, Zhang X, Dong F T, Xie Z H, Yi T F, Zheng Y G, Bao Y Y 2009 *Sci. China G* **52** 1442
- [10] Liller M H H, Liller W 1975 *Astrophys. J.* **199** 133
- [11] Villata M, Raiteri C M, Ghisellini G, De Francesco G, Bosio S 1997 *Astron. Astrophys. Suppl.* **121** 119
- [12] Dai B Z, Xie G Z, Li K H, Zhou S B, Liu W W, Jiang Z J 2001 *Astron. J.* **122** 290
- [13] Xie G Z, Yi T F, Li H T, Zhou S B, Chen L E 2008 *Astron. J.* **135** 2212
- [14] Marek G, Jo N 2006 *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **370** 837
- [15] Rani B, Wiita P J, Gupta A C 2009 *Astrophys. J.* **696** 2170
- [16] Levine A M, Morgan E H, Remillard R 2005 *Am. Astrophys. Soc.* **207** 7204
- [17] Cheng Y, Zhang X, Wu L, Mao W M, You L S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 988 (in Chinese) [程 勇、张 雄、伍 林、毛慰明、尤丽莎 2006 物理学报 **55** 988]
- [18] Zhang H J, Zhao G, Zhang X 2010 *Sci. China G* **53** 252
- [19] Yuan L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 170
- [20] Hovatta T, Lehto H J, Tornikoski M 2008 *Astron. Astrophys.* **488** 897
- [21] Dong F T, Zhang X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8116 (in Chinese) [董富通、张 雄 2009 物理学报 **58** 8116]

- [22] Mallat S G 1999 *A Wavelet Tour of Signal Processing* (New York: Academic Press) pp22—101
- [23] Meyers S D, Kelly B G, Brien J J O 1993 *Mon. Wen. Rev.* **121** 2858
- [24] Collineau S, Brunet Y 1993 *Bound-layer Meteor.* **65** 357
- [25] Ishibashi W, Courvoisier T J 2010 *Astron. Astrophys.* **512** 58
- [26] Zhang H J, Zhao G, Zhang X, Wang X H 2009 *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.* **408** 388
- [27] Zhang H J, Zhang X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4305 (in Chinese) [张皓晶、张 雄 2007 物理学报 **56** 4305]
- [28] Begelman M C, Blandford R D, Rees M J 1980 *Nature* **287** 307
- [29] Homan D C, Ojha R, Wardle J F C, Roberts D H, Aller M F, Aller H D, Hughes P A 2001 *Astron. J.* **549** 840
- [30] Jorstad S G, Marscher A P, Mattox J R, Wehrle A E, Bloom S D, Yurchenko A V 2001 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **134** 181
- [31] Ghisellini G, Maraschi L, Treves A, Tanzi E G 1986 *Astrophys. J.* **310** 317
- [32] Zhou S B 2004 *Ph. D. Dissertation* (Kunming: Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [周曙白 2004 博士学位论文(昆明: 中国科学院云南天文台)]
- [33] Wallinder F H, Kato S, Abramowicz M A 1992 *Astron. Astrophys. Rev.* **4** 79
- [34] Jiao C L, Xue L, Gu W M, Lu J F 2009 *Astrophys. J.* **693** 670
- [35] Zhang X, Zheng Y G, Zhang H J, Hu S M, Xie Z H 2006 *Chin. Phys.* **15** 2185

Characteristic periodicity analysis of the X-ray flux variability of quasar PKS 1510-089^{*}

Li Xiao-Pan¹⁾²⁾ Zhang Hao-Jing^{1)†} Zhang Xiong¹⁾

1) (College of Physics and Electronics, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China)

2) (Department of Physics, Zhaotong Teacher's School, Zhaotong 657000, China)

(Received 28 June 2010; revised manuscript received 11 January 2011)

Abstract

We present the X-ray light curve (1.5—12 keV) for quasar PKS 1510-089 with the observation of the all-sky monitor on the Rossi X-ray Timing Explorer from January 1996 to December 2009. Using the discrete correlation function method, the wavelet analysis method and the power spectrum method to analyze the data, we find that the light curve variability period of quasar PKS 1510-089 is (0.94 ± 0.08) a. The super massive binary black hole model is used to analyze this source, and the results show that the orbit period of the super massive binary black hole system is (1.85 ± 0.10) a and the super massive binary black hole model is the better model for describing the light curve periodic behaviour of quasar PKS 1510-089 at present.

Keywords: quasar PKS 1510-089, X-ray flux variability, binary black hole model

PACS: 98.54. Cm, 98.70. Dk, 98.70. Rz

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10763002) and the Key Program of the Natural Science Foundation of Yunnan Province, China (Grant No. 2008A011Z).

[†] Corresponding author. E-mail: ynzx@yeah.net