

УДК: 524.45-823

О ВОЗМОЖНОМ ФРАКТАЛЬНОМ ХАРАКТЕРЕ КРИВЫХ БЛЕСКА БЛАЗАРОВ

С.Г.МАРЧЕНКО, А.В.ГАГЕН-ТОРН

Поступила 15 февраля 1997

Принята к печати 10 марта 1997

Проведен анализ оптических кривых блеска трех блазаров методом нормированного размаха. Показано, что для этих кривых выполняется эмпирическое соотношение Херста, в соответствии с которым найдены параметры Херста для каждой кривой. При предположении о самоаффинности кривых блеска блазаров они определяют фрактальную размерность кривых $D \sim 1.1$.

1. *Введение.* Анализ на периодичность оптических кривых блеска блазаров 3C 120, OJ 287 и BL Lac, выполненный, например, в [1,2], показал присутствие циклических вариаций с характерными временами 15, 8 и 11 лет, соответственно, и случайный характер более короткопериодических вариаций. Известно, что многие природные явления описываются наилучшим образом как случайные фракталы [3]. Попытки применения подобной концепции к анализу рентгеновских кривых блеска сейфертовских галактик NGC 4051 и NGC 5506 дали указания на их возможную фрактальную структуру [4]. Характер оптических кривых блеска блазаров (существование самоподобной переменности на временных масштабах от нескольких лет до нескольких часов) позволяет предположить, что переменность на временных масштабах порядка нескольких лет и менее также может иметь фрактальную структуру. Проверке этой возможности и посвящена данная работа.

2. *Наблюдательные данные.* В работе исследуются сводные кривые блеска блазаров 3C 120, OJ 287 и BL Lac за период с 1967г. по 1989г. в цвете B , построенные в Астрономической обсерватории Санкт-Петербургского университета на основании собственных наблюдательных рядов, дополненных данными других авторов, взятыми из литературных источников. Оценки звездных величин в полосе B были трансформированы в потоки (в мЯн) с помощью абсолютной калибровки О'Делла и др. [5]. Подробное описание полученных кривых блеска содержится в работах [1,2].

Для проведения анализа на фрактальность кривые блеска были

преобразованы в равномерные массивы несколькими способами, которые отличались типом интерполяции (линейная, сплайн 3-его порядка или использование одновременно линейной интерполяции для заполнения недостающих значений, когда имеющиеся наблюдения располагаются близко к требуемой дате, и аппроксимации сплайном в случае сезонных лакун) и шагом усреднения исходных данных (без усреднения, с шагом 10 дней и с шагом 30 дней). Оказалось, что окончательный результат в пределах точности определения не зависит от того, каким способом получен равномерный ряд. В данной статье приводятся результаты, полученные на основе равномерных рядов, построенных из исходных кривых блеска при совмещении линейного способа интерполяции и интерполяции сплайном при шаге усреднения 10 дней.

Полученные массивы были исследованы методом нормированного размаха с целью выяснения, подчиняется ли переменность блеска блазаров эмпирической закономерности, отмеченной Херстом для ряда природных процессов.

3. *Методика нормированного размаха Херста.* Временные последовательности наблюдений природных процессов могут быть исследованы с помощью метода нормированного размаха или метода Херста [3]. Такие последовательности измерений характеризуются показателем Херста H . При выполнении ряда условий (в частности, для самоаффинных кривых) запись наблюдений представляет кривую фрактальной размерности $D=2-H$.

Как было получено Херстом, для многих временных рядов наблюдаемый нормированный размах R/S очень хорошо описывается эмпирическим соотношением

$$R(\tau) / S(\tau) = (\tau / 2)^H, \quad (1)$$

где τ - длительность рассматриваемого промежутка времени, а $R(\tau)$ и $S(\tau)$ определяются следующими соотношениями:

$$R(\tau) = \max X(t, \tau) - \min X(t, \tau), \quad (2)$$

где $X(t, \tau)$ - функция накопления, т.е. размах $R(\tau)$ определяется как разность максимального и минимального значений функции накопления $X(t, \tau)$, где t - дискретное время, принимающее целочисленные значения в промежутке $[1, \tau]$. Функция $X(t, \tau)$ характеризует накопившиеся за время t отклонения наблюдаемых величин $\xi(u)$, где $u = 1, \dots, t$, от среднего значения $\langle \xi \rangle$, т.е.

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - \langle \xi \rangle), \quad (3)$$

где

$$\langle \xi \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{u=1}^{\tau} \xi(u). \quad (4)$$

Размах $R(\tau)$ нормируется на величину стандартного отклонения $S(\tau)$, определяемую соотношением:

$$S(\tau) = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{u=1}^{\tau} (\xi(u) - \langle \xi \rangle_\tau)^2 \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Этот метод был реализован авторами статьи в системе Linux на языке программирования Си.

Используя безразмерный нормированный размах R/S можно сравнивать размахи для разных явлений, причем для анализа активности ядер галактик этот метод применяется впервые.

4. *Применение метода Херста к оптическим кривым блеска блазаров.* Для каждого источника функция накопления $X(t, \tau)$ считалась многократно для различных значений τ , начиная с $\tau_0=1$ году и до

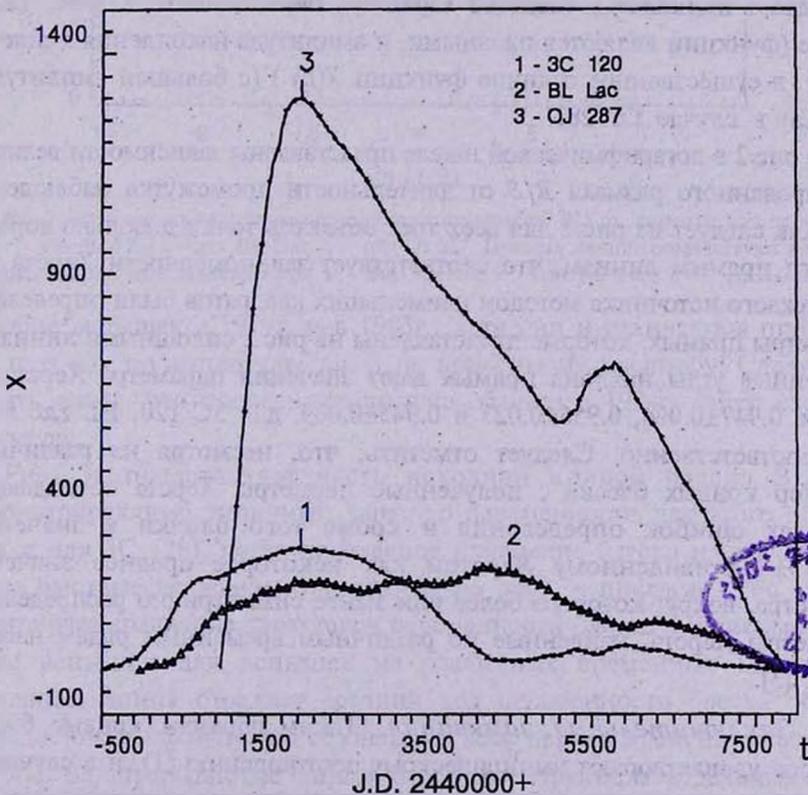


Рис.1. Функция накопления: 1 - для 3C 120; 2 - для BL Lac; 3 - для OJ287.

значения, соответствующего максимальному периоду наблюдений данного источника, с шагом $\Delta\tau=1$ году. На рис.1 представлены графики функций накопления для всех трех объектов при максимально возможном значении τ в случае наших рядов наблюдений. Поскольку ряды были приведены к равномерным рядам с шагом по времени 10 дней, т.е., например, $\xi(t)$ при $t=1$ есть среднее значение плотности потока объекта за период с первого имеющего наблюдения +9 дней, то τ_0 равное 1 году соответствует значению числа декад, укладывающихся в этом интервале. Именно это значение τ и использовалось при вычислениях по формулам (1), (4), (5). Однако на рис.1 для сохранения наглядности временной зависимости переменности функций накопления временная шкала приведена в юлианских датах соответствующих наблюдений.

Из анализа рис.1 следует, что функция накопления может являться довольно хорошим критерием характера кривой блеска объекта. Неоднократно отмечалось, что кривые блеска блазаров можно разделить на два типа: имеющие плавные синусоидальные вспышки и демонстрирующие резкое импульсное возрастание блеска. К первому типу можно отнести блазары 3C 120 и BL Lac, ко второму - OJ 287. Рис.1. ясно показывает имеющееся сходство характера переменности для 3C 120 и BL Lac (функции являются плавными, и амплитуда накопления меняется слабо), и существенное отличие функции $X(t, \tau)$ (с большой амплитудой размаха) в случае OJ 287.

На рис.2 в логарифмической шкале представлены зависимости величин нормированного размаха R/S от длительности промежутка наблюдения $\tau/2$. Как следует из рис.2 для всех трех объектов точки довольно хорошо следуют прямым линиям, что соответствует закономерности Херста (1). Для каждого источника методом наименьших квадратов были определены параметры прямых, которые представлены на рис.2 сплошными линиями. Найденные углы наклона прямых дают значения параметра Херста H , равные 0.947 ± 0.024 , 0.956 ± 0.023 и 0.945 ± 0.039 , для 3C 120, BL Lac и OJ 287, соответственно. Следует отметить, что, несмотря на различный характер кривых блеска, полученные параметры Херста совпадают в пределах ошибок определения и кроме того близки к значению $H=0.73 \pm 0.09$, найденному Херстом как некоторое среднее значение параметра, вокруг которого более или менее симметрично распределены параметры Херста, найденные по различным временным рядам наблюдений [3].

5. *Заключительные замечания.* Таким образом, кривые блеска блазаров удовлетворяют эмпирическому соотношению (1), и в случае их самоаффинного (самоподобного, см.[3]) характера это позволяет оценить их фрактальную размерность.

Указание на самоаффинный характер кривых блеска можно получить при качественном анализе переменности блазаров на различных временных масштабах. Так, например, для OJ 287 в [6] отмечается структурное

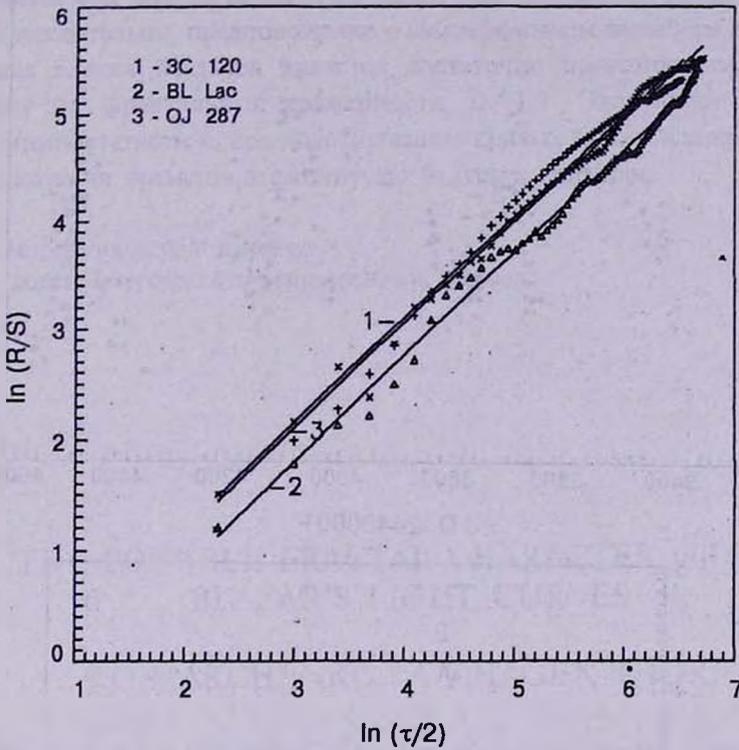


Рис.2. Зависимость величины нормированного размаха R/S от длительности промежутка $\tau/2$: + - для 3C 120, x - для BL Lac; Δ - для OJ 287. Прямые линии соответствуют линейной аппроксимации этих зависимостей: 1 - для 3C 120, 2 - для BL Lac; 3 - для OJ 287.

подобие вспышек в 1971г. и в 1983г., хотя они и отличаются примерно в 2 раза как по амплитуде, так и по временному масштабу. Следует заметить также, что последняя вспышка объекта в 1994г. имеет сходную структуру.

Рис. 3а представляет часть исходной кривой блеска BL Lac, демонстрирующую типичный характер переменности для этого объекта (как и для 3C 120), когда на плавное изменение блеска накладываются более быстрые вспышки, отмеченные на рис. 3а цифрами. Рис. 3б иллюстрирует сравнение характеров переменности блеска в зависимости от фазы вспышки для вспышек на различных временных масштабах. Сплошная линия отражает средний ход переменности блеска объекта (усреднение выполнено по сезонам) за весь период времени, указанный на рис. 3а, прерывистые линии отражают структуры отдельных более коротких вспышек этого периода, отмеченных цифрами на рис. 3а (в

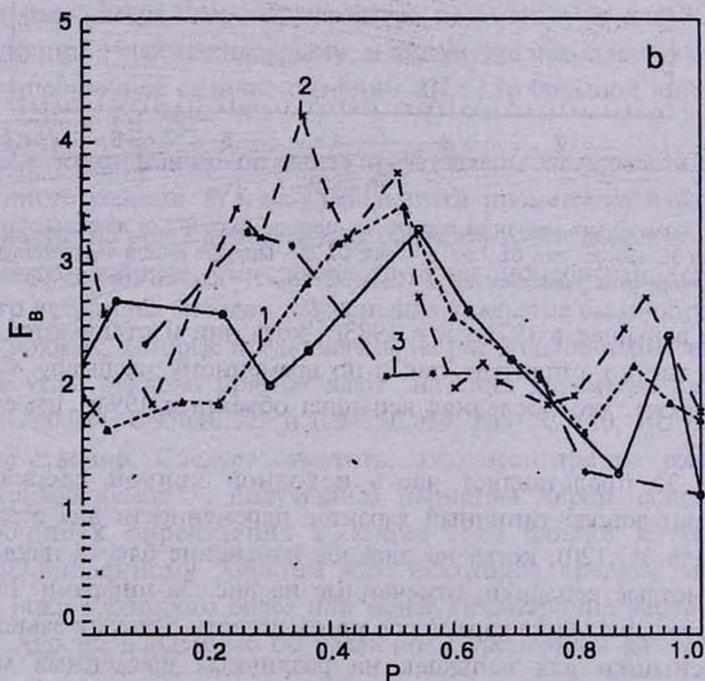
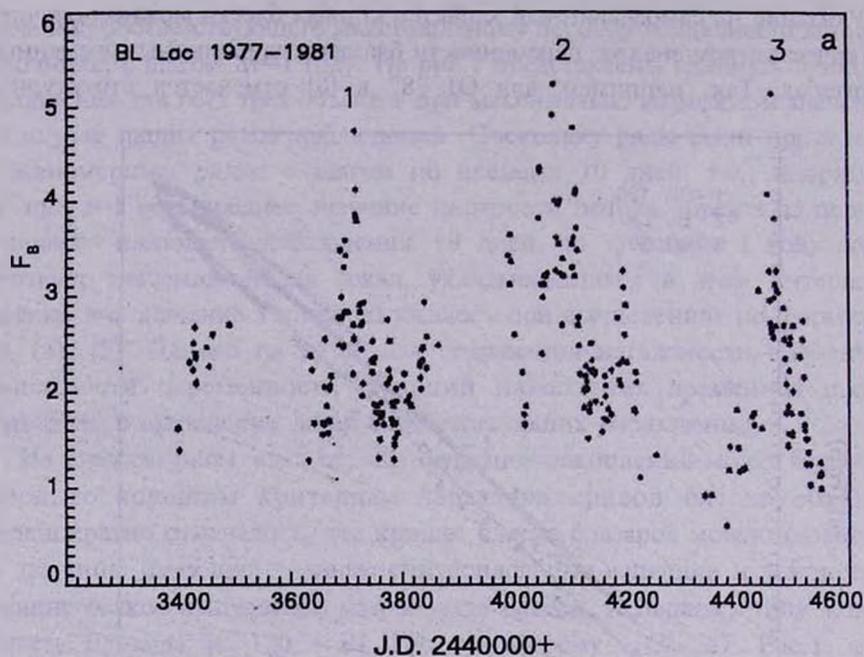


Рис.3. а - кривая блеска BL Lac за 1977-1981гг., вспышка 1 - J. D. 2443636-2443790; вспышка 2 - J. D. 2443992 - 2444219; вспышка 3 - J. D. 2444428-2444549;

б - плавный характер изменения блеска BL Lac в зависимости от фазы вспышки; сплошная линия описывает вариации блеска за весь период 1977-1981 гг., пунктирные линии соответствуют вспышкам, отмеченным на рис. За цифрами: Δ - 1, $*$ - 2, x - 3.

данном случае усреднение выполнено с шагом по времени, равным 10-и дням). Если учесть неравномерность наблюдательных данных, то рис. 3b достаточно убедительно демонстрирует подобие характера переменности блеска объекта на различных временных масштабах.

Следовательно, предположение о самоаффинном характере оптических кривых блеска блазаров является достаточно правомочным, что дает оценку их фрактальной размерности $D=1.1$. Это может позволить выполнить статистическое моделирование кривых блеска блазаров с целью предсказания времени и амплитуды будущих вспышек.

Астрономический институт
Санкт-Петербургского университета, Россия

THE POSSIBLE FRACTAL CHARACTER OF THE BLAZAR'S LIGHT CURVES

S.G.MARCHENKO, A.V.HAGEN-THORN

The analysis of the optical light curves of three blazars is carried out by the Hurst's method. It is shown that these light curves follow the empirical Hurst's dependence. This enables us to obtain Hurst's parameters for the light curves and estimate their fractal dimension as $D\sim 1.1$ in the case of selfaffinity of the light curves.

ЛИТЕРАТУРА

1. *В.А.Гаген-Торн, С.Г.Марченко, О.В.Миколайчук, В.А.Яковлева*, Астрон. ж., 1997 (в печати).
2. *В.А.Гаген-Торн, С.Г.Марченко, О.В.Миколайчук, В.А.Яковлева*, Астрон. ж., 1997 (в печати).
3. *Е.Федер*, Фракталы, Мир, М., 1991.

4. *I.Mc Hardy, B.Czerny, Nature, 325, 696, 1987.*
5. *S.L.O'Dell, J.J.Puschell, W.A.Stein, et al., Astrophys.J, 224, 22, 1978.*
6. *A.Sillanpaa, P.Teerikorpi, S.Haarala, et al., Astron. Astrophys., 147, 67, 1985.*