

## **LFN, QPO И ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ КРИВЫХ БЛЕСКА РЕНТГЕНОВСКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ**

А. В. Просветов, С. А. Гребенев

Институт космических исследований РАН, Москва

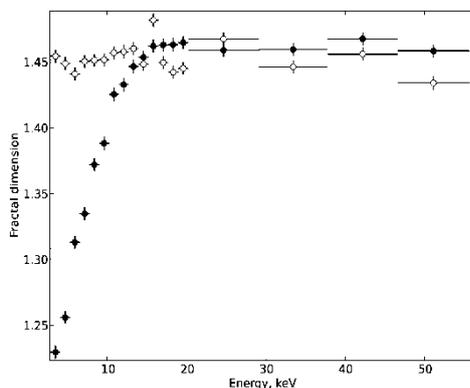
E-mail: prosvetov@gmail.com

**Аннотация.** Представлены результаты фрактального анализа рентгеновских кривых блеска от аккрецирующих черных дыр, входящих в маломассивную двойную систему, на примере объекта GX 339-4. Показано, что фрактальная размерность кривых блеска является сильно зависящей от присутствия квазипериодических осцилляций в наблюдениях, а также выявлена связь между величиной фрактальной размерности кривых блеска и частотой пика квазипериодических осцилляций. Резюмируется, что аккреционный диск сепарирован областью квазипериодических осцилляций на две зоны с различными параметрами излучения.

### **1. Введение**

Одно из характерных наблюдательных проявлений аккрецирующих черных дыр в двойных системах – быстрая нерегулярная переменность рентгеновского излучения (Гребенев и др., 1993; ван дер Клис, 2006; Ремиллард, Макклинток, 2006). Наблюдаемая переменность развивается в условиях действия высоких температур, магнитоактивных процессов, сильной турбулентности, растущей роли давления излучения и необходимости эффективного перераспределения энергии от ионов к электронам, что приводит к целому ряду неустойчивостей.

Традиционно исследования переменности базируется на построении по рентгеновским кривым блеска источника в разных диапазонах энергий спектров фурье-мощности и кросс-корреляционных функций (ван дер Клис, 1989). Получаемые спектры мощности обычно состоят из одной или нескольких компонент частотно-ограниченного («красного») шума (Нолан и др., 1981; Беллони, Хазингер, 1990; ван дер Клис, 2006) и иногда – пиков квазипериодических осцилляций (QPO) на низких (0.1- 1 Гц, Эбисава и др., 1988; Гребенев и др., 1991; Вихлинин и др., 1994б) и/или высоких (>10 Гц, Миямото и др., 1990; Беллони и др., 2012) частотах. Существует ряд моделей для объяснения таких спектров (например, Нолан и др., 1981; Бэк и др., 1987; Вихлинин и др.,



**Рис. 1.** Фрактальная размерность кривой блеска источника GX 339-4 в зависимости от энергии. Заштрихованными кружками обозначены данные наблюдения, во время которого в спектре мощности источника присутствовали QPO (сеанс 92035-01-03-02), незаштрихованными --- данные

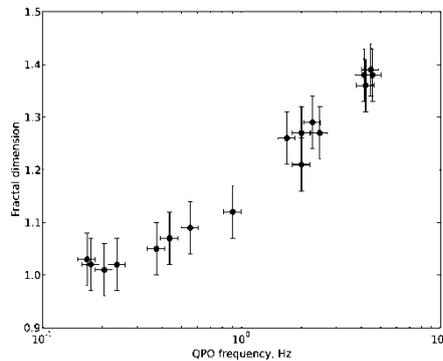
наблюдения без QPO (сеанс 95409-01-16-02). Видно резкое уменьшение фрактальной размерности в данных с QPO на энергиях <15 кэВ), на энергиях выше 15 кэВ фрактальная размерность обоих наблюдений совпадает (в пределах систематической погрешности  $D = \pm 0.05$ ).

1994а; Любарский, 1997; Титарчук и др., 2007), но ни одна из них не дает полной и исчерпывающей картины их формирования, а механизм возникновения QPO остается необъясненным.

Частотно-ограниченный шум в спектре мощности является одним из признаков хаотического поведения физической системы, а следовательно возможно наличие у нее фрактальных свойств (Заславский, Сагдеев, 1988; Шустер, 1988). В случае кривых блеска (КБ) это означает их масштабную инвариантность – самоподобие на разных масштабах времени. Для количественного определения степени масштабной инвариантности КБ можно вычислить ее фрактальную или хаусдорфову размерностью (ФР), и по этой величине судить о степени нелинейности уравнений, описывающих процесс аккреции.

## 2. Фрактальный анализ

Для определения ФР двумерной кривой покроем ее полностью плотно пригнанными квадратами со стороной  $\tau$ . В каждый квадрат должен попасть кусочек кривой. Предположим, что для этого потребовалось не менее, чем  $N(\tau)$  квадратов. При изменении размера  $\tau$  изменяется и количество квадратов  $N(\tau)$ . Если при достаточно малых  $\tau$  величина  $N(\tau)$  зависит от  $\tau$  по



**Рис. 2.** Зависимость фрактальной размерности  $D$  рентгеновских кривых блеска от частоты QPO для источника GX 339-4 в диапазоне энергий 2.9--36 кэВ.

степенному закону  $N(\tau) \sim \tau^{-D}$ , то величина  $D$  и называется размерностью Хаусдорфа кривой или ее ФР (Заславский, Сагдеев, 1988). В простейшем случае, когда кривая не обладает фрактальными свойствами, ее хаусдорфова размерность равна топологической  $D = 1$ .

В нашей работе ФР  $D$  была получена, используя алгоритм R/S анализа, используя разбиение КБ на интервалы различной величины, и т.о. она отражает масштабную инвариантность рассматриваемой КБ (Хёрст, 1951).

### 3. Результаты

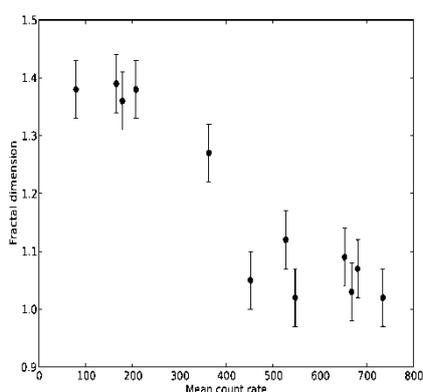
Анализ проводился по данным орбитальной обсерватории RXTE, полученным во время мощных вспышек рентгеновского источника GX 339-4 в 2007 и 2010 гг. Как правило, экспозиция наблюдения составляла  $\sim 2000$  с. Обработка данных была выполнена с помощью пакета программ NASA/HEASARC. Для анализа использовались данные в широком диапазоне энергий 2.9-36 кэВ. Размер временного бина  $\Delta t$  всегда брался равным 0.01 с.

Во всех наблюдения в спектрах мощности излучения присутствовал частотно-ограниченный шум на низких частотах, типичный для аккрецирующих черных дыр. В ряде спектров обнаружены квазипериодические осцилляции (QPO) на частотах от 0.16 до 7 Гц.

Анализируемые наблюдения отличались величиной потока излучения источника, его спектральными состоянием, наличием QPO в спектре мощности. Интересно, что для наблюдений, во время которых спектр мощности источника содержал QPO,

значения  $D$  попадают в достаточно широкий диапазон 1.01-1.39, а для остальных сеансов оказываются почти одинаковыми и в целом более высокими  $D \sim 1.40-1.46$ .

В нашем исследовании наибольший интерес представляло исследование КБ на малых временных масштабах, поэтому в дальнейшем под ФР КБ мы имеем ввиду результат на временных масштабах  $\tau < 8$  с.

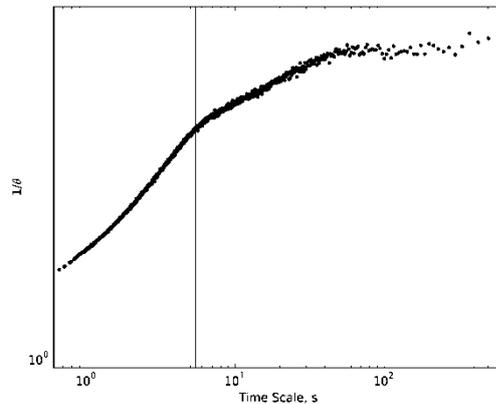


**Рис. 3.** Зависимость фрактальной размерности кривой блеска  $D$  от средней скорости счета, приходящейся на область в спектре мощности в диапазоне частот от пика QPO и выше (именно эта область относится к излучению внутренней части диска и обозначается  $A$ ). Чем меньше поток излучения

от области  $A$ , и тем меньше отклоняется фрактальная размерность кривой блеска от своего «нормального» значения.

Помимо источника GX 339-4, были проанализированы несколько КБ канонического кандидата в черные дыры источника Cyg X-1, находящегося в жестком состоянии. По результатам R/S-анализа для масштабов  $\tau < 8$  с ФР оказалась равной  $D = 1.37 \pm 0.04$ , что весьма близко к величине  $D$ , измеренной для источника GX 339-4.

Для понимания чувствительности проведенных измерений ФР от диапазона энергий, мы построили зависимость  $D$  от энергии для двух наблюдений (с QPO и без QPO, см. рис. 1). Видно, что при отсутствии QPO ФР КБ источника от энергии почти не зависит. В случае присутствия QPO ФР на энергиях ниже 15 кэВ быстро падает. Это может означать только одно: QPO в потоке излучения источника доминируют именно в мягком (<15 кэВ) диапазоне. Дальнейший анализ показал ярко выраженную зависимость величины ФР КБ от частоты пика QPO (рис. 2).



**Рис. 4.** Зависимости величины  $(1/\theta)$  от временного масштаба, близкая по смыслу к спектру мощности. Частота QPO отмечена линией и отражена в полученном спектре изломом степенного закона.

Для исследования причин связи ФР КБ с частотой QPO, обозначим в спектрах мощности с процентной нормировкой диапазон частот, начиная от пика QPO и выше, как область А. Площадь, занимаемая областью А в спектре мощности, имеет смысл фурье-мощности излучения, а квадратный корень из этой величины носит название амплитуды переменности на выбранных частотах. Далее получим среднюю скорость счета для области А, из средней скорости счета и амплитуды переменности на заданных частотах. Зависимость средней скорости счета для области А, приведена на рис. 3: чем выше частота QPO, тем меньше вклад в общий поток излучения от области А, и тем меньше отклоняется ФР КБ от своего «нормального» значения.

#### 4. Обсуждение

Изменение ФР КБ с присутствием QPO можно объяснить наличием автокорреляции в кривых блеска. Мы проделали операции с данными, по аналогии с масштабным подходом к анализу временного ряда под названием Max-Spectrum (Стоев, 2006), который позволяет получить параметр  $\theta$ , носящий название экстремального индекса и подробно исследованный Лидбеттером. Интерпретация экстремального индекса заключается в том, что величина  $\theta^{-1}$  равна среднему размеру кластера экстремальных событий на исследуемом временном интервале (Лидбеттер и др., 1983). Для нашего случая, зависимость экстремального индекса от временного масштаба, которая удивительным образом представляет собой аналог спектра мощности: наблюдаемая

частота QPO характеризуется на этой диаграмме сломом в степенном законе (рис. 4). По зависимости полученного индекса от временного масштаба возможно сделать вывод, что аккреционный диск разделен QPO на две части, внешнюю и внутреннюю, которые характеризуются различными параметрами излучения.

### **5. Выводы**

На основе проделанного нами анализа возможно сделать следующие заключения:

1. Значение ФР КБ для двух кандидатов в черные дыры весьма близки и почти совпадают, следовательно, эта величина характеризует фундаментальные процессы, происходящие в аккреционном течении.
2. Существуют исключительные наблюдения, в которых ФР КБ значительно отклоняется от своего характерного значения; в этих случаях, также наблюдаются квазипериодическое осцилляции. Существует ярко выраженная нелинейная зависимость величины ФР КБ от частоты QPO.
3. Существует ярко выраженная зависимость величины ФР КБ от вклада в излучение зоны аккреционного диска, относящейся к частотам выше частоты пика QPO.
4. Аккреционный диск делится зоной QPO на внешнюю и внутреннюю часть, так что излучение от этих частей характеризуется различными параметрами. У внешней части аккреционного диска характер излучения оказывается постоянным, у внутренней части аккреционного диска характер излучения меняется, что и отражается на ФР.

### **Литература**

1. Бэк и др.: P. Bak, C. Tang, and K. Wiesenfeld, Phys. Rev. Lett., 59, 381 (1987).
2. Беллони, Хазингер: T. Belloni and G. Hasinger, AAP , 227, L33 (1990).
3. Беллони и др.: T.M. Belloni, A. Sanna, and M.Mendez, MNRAS, 426, 1701 (2012).
4. ван дер Клис: M. van der Klis, Proc. NATO ASI «Timing Neutron Stars»: Cesme, Izmir, Turkey, 4-15 April 1988, Ed. H. Ogelman, E.P.J. van den Heuvel, NY USA: Kluwer Acad./Plenum Publ., (1989), p. 27.

5. ван дер Клис: M. van der Klis, Compact stellar X-ray sources: Ed. W. Lewin, M. van der Klis, Cambridge Astrophys. Ser., No. 39. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, (2006), p. 39.
6. Вихлинин и др.: A. Vikhlinin, E. Churazov, and M. Gilfanov, AAR , 287, 73 (1994a).
7. Вихлинин и др.: A. Vikhlinin, E. Churazov, M. Gilfanov, R. Sunyaev, A. Dyachkov, N. Khavenson, R. Kremnev, K. Sukhanov, et al., APJ , 424, 395 (1994b).
8. Гачков А.А.: Рандомизированный алгоритм R/S -анализа финансовых рядов Стохастическая оптимизация в информатике / Под ред. О.Н.Граничина, Вып. 5: СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, (2009), с. 40.
9. Гребенев С.А., Сюняев Р.А., Павлинский М.Н., Деханов И.А., ПАЖ, 17, 985 (1991) [S.A. Grebenev et al., Astron. Lett , 17, 413 (1991)].
10. Гребенев и др.: S. Grebenev, R. Sunyaev, M. Pavlinsky, E. Churazov, M. Gilfanov, A. D'yachkov, N. Khavenson, K. Sukhanov, et al., AAPS , 97, 281 (1993).
11. Гребенев и др.: S.A. Grebenev, O.V. Lyashenko, M.N. Pavlinsky, and R.A. Sunyaev), Astrophys. Lett. & Commun., 38, 89 (1999) Proc. the 3rd INTEGRAL Workshop «The Extreme Universe», Taormino, Italy,(1998).
12. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З.: Введение в нелинейную физику: от маятника до турбулентности и хаоса: М: Наука, (1988).
13. Короленко П.В., Маганова М.С., Меснянкин А.В.: Новационные методы анализа стохастических процессов и структур в оптике. Фрактальные и мультифрактальные методы, вейвлет-преобразования: М: НИИЯФ МГУ, (2004).
14. Лидбеттер и др.: M.R. Leadbetter, G. Lindgren, and H. Rootzen, Extremes and Related Properties of Random Sequence and Processes: NY: Springer, 1983.
15. Любарский: Yu.E. Lyubarskii, MNRAS , 292, 679 (1997).
16. Миямото и др.: S. Miyamoto, S. Kitamoto, K. Misuda, and T. Dotani, Proc. Inter. Symp. Physics of Neutron Stars and Black Holes: Tokyo, 1-3 February 1988, Ed. Y. Tanaka, Tokyo: Univ. Academy Press, Inc., (1988), p. 227 .
17. Миямото и др.: S. Miyamoto, S. Kitamoto, and K. Kimura, Proc. 23rd ESLAB Symp. Two Topics in X-ray Astron., ESA-Sp-296, , 1, 531 (1990).

18. Нолан и др.: P.L. Nolan, D.E. Gruber, J.L. Matteson, L.E. Patterson, R. Rothschild, J.P. Doty, A.M. Levine, W.H.G. Lewin, and F.A. Primini, *APJ* , 246, 494 (1981).
19. Стоев и др.: S.A. Stoev, G. Michailidis, M.S. Taqqu, University Michigan, Tech. Rep. 447 (2006).
20. Титарчук и др.: L. Titarchuk, N. Shaposhnikov, and V. Arefiev, *APJ* , 660, 556 (2007).
21. Хёрст: H.E. Hurst, *Trans. Am. Soc. Eng.* , 116, 770 (1951).
22. Шустер Г., Детерминированный хаос (М: Мир, 1988).
23. Эбисава и др.: K. Ebisawa, K. Mitsuda, H. Inoue, T. Dotani, *Proc. Inter. Symp. «Physics of Neutron Stars and Black Holes»*, Tokyo, 1-3 February (1988), Ed. Y. Tanaka, Tokyo: Univ. Acad. Press, Inc., (1988), p. 149.