Исследование механизмов генерации рентгеновского излучения в двойных рентгеновских системах на примере Лебедя X-1 в рамках формализма функций статистической памяти

© С.А. Демин, А.В. Минкин, Н.Ю. Демина

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008 Казань, Россия
e-mail: serge_demin@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 апреля 2024 г.
В окончательной редакции 29 июля 2024 г.
Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Проведено исследование механизмов генерации излучения в двойных рентгеновских системах на основе формализма функций памяти. Метод применен для оценки временных параметров излучения рентгеновского источника Лебедя X-1 путем построения частотных составляющих автокорреляторов и их производных. Анализ функций и мер статистической памяти демонстрирует внутреннюю структурную неоднородность генерирующего рентгеновское излучение аккреционного диска и невысокую скорость трансформации вещества. Временные периоды, соответствующие наиболее существенным изменениям полного потока рентгеновского излучения и характеризующие основную эволюцию двойной системы, равны нескольким сотням суток. Указаны возможные пути исследования эффектов синхронизации и перекрестных корреляций в сигналах аккрецирующих двойных систем, фиксируемых на разных частотных диапазонах.

Ключевые слова: физика сложных систем, двойные рентгеновские системы, Лебедь X-1, формализм функций памяти, эффекты статистической памяти, аккреция.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59237.332-24

Рентгеновские двойные системы представляют собой тесные системы, содержащие черную дыру или нейтронную звезду, а также звезду-компаньон, которая может быть как маломассивным, так и крупным объектом. В таких системах компактный объект аккрецирует вещество со звезды-компаньона. Первым рентгеновским источником-кандидатом в черные дыры стал Лебедь X-1 (Cygnus X-1, Cyg X-1), открытый в 1964 г. во время суборбитального полета [1]. Лебедь X-1 входит в состав двойной системы и имеет массу порядка 14.8 солнечных. В двойную систему, расположенную на расстоянии примерно 6 070 световых лет от Солнца, входит также голубой сверхгигант с переменным блеском с массой около 19 масс Солнца [2]. Последние исследования при помощи радиоинтерферометра со сверхдлинной базой демонстрируют, что черная дыра в данной системе может располагаться на расстоянии семи тысяч световых лет от Земли, при этом Лебедь X-1 примерно в 20 раз превышает массу Солнца, что делает этот объект одной из наиболее крупных черных дыр [3].

Полученные ранее результаты изучения эволюции двойной системы дополняются исследованиями рентгеновского излучения с использованием данных космических миссий. Современные исследования рентгеновских объектов показывают их сложную структуру и динамику процессов излучения. Для дальнейшего описания требуются методы, способные проводить анализ основных параметров подобных систем в зависимости от взаимодействия и влияния компонентов в составе целого. Для этого в настоящей работе развивается многопараметрический метод статистического анализа — формализм функций памяти (ФФП), на основе которого показано, что обработка сигналов полного потока рентгеновского излучения Cyg X-1 позволяет установить некоторые долговременные особенности процессов аккреции на фоне быстрой переменности рентгеновской активности. Цель настоящей работы состоит в исследовании корреляций и эффектов статистической памяти в активности рентгеновского источника Лебедя X-1 для установления динамических и спектральных закономерностей дисковой аккреции и генерации рентгеновского излучения указанного объекта.

Регистрация экспериментальных данных осуществлялась обзорной камерой All-Sky Monitor (ASM) орбитальной рентгеновской станции Rossi X-Ray Timing Explorer (RXTE) [4]. Экспериментальные данные представляют собой экспонированные значения 90-секундных наблюдений полного потока рентгеновского излучения S (1.5–12 keV) в собственных единицах обзорной камеры. Полный поток Крабовидной туманности в диапазоне 2–10 keV соответствует порядка 75 ASM counts/s [4].

ФФП — конечно-разностное обобщение проекционного формализма Цванцига–Мори [5,6], адаптированного для анализа дискретной динамики сложных систем [7,8]. Здесь мы не останавливается на математических соотношениях, вводимых в рамках ФФП, а даем только его краткую характеристику. Метод основан на представлении временной динамики исследуемого процесса в виде многомерного вектора состояния, подчиняющегося

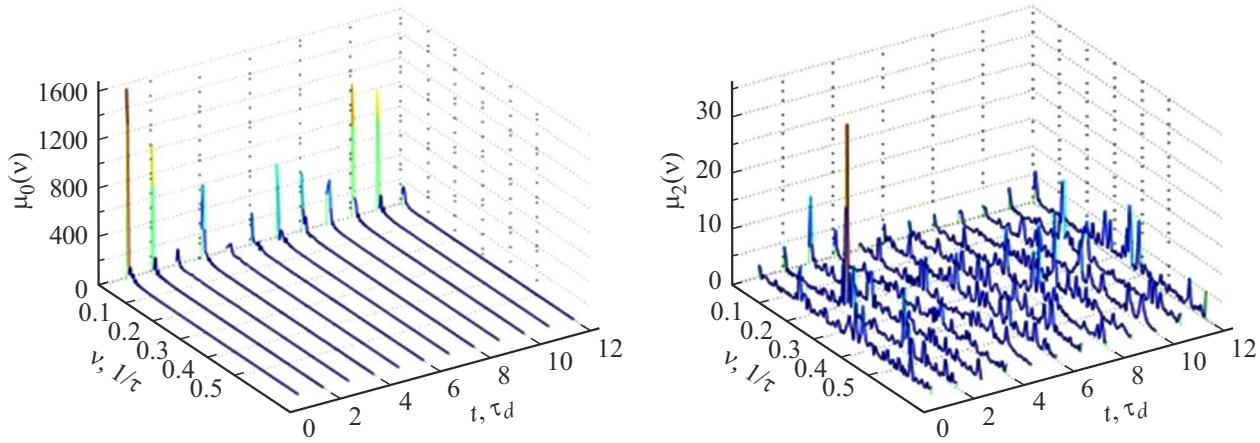


Рис. 1. Оконно-временное представление спектров мощности временной корреляционной функции $\mu_0(\nu)$, функции памяти второго порядка $\mu_2(\nu)$ путем разбиения суточно усредненных данных рентгеновской активности системы Cyg X-1 на отдельные интервалы. Спектры строятся отдельно в линейной шкале для каждого окна.

уравнению движения, записанному в дискретном виде. Использование проекционной техники Цванцига–Мори и процедуры ортогонализации Грамма–Шмидта позволяет провести сокращение в описании. В рамках метода для исследуемых временных серий строится цепочка конечно-разностных зацепляющихся кинетических уравнений типа Цванцига–Мори для временной корреляционной функции (ВКФ) и функций статистической памяти для взаимосвязанных переменных. Метод предоставляет большой набор характеристик: временные зависимости ортогональных динамических переменных, фазовые портреты комбинаций динамических переменных, релаксационные и кинетические параметры, функции статистической памяти и их спектры мощности, частотные зависимости мер статистической памяти, вычисляемых непосредственно из последовательностей динамических переменных [9,10].

Анализ спектров мощности ВКФ $\mu_0(\nu)$ и трех первых функций памяти $\mu_i(\nu)$, где $i = 1, 2, 3$, для усредненных значений рентгеновского излучения Cyg X-1 позволяет установить полосу низких частот $\sim 10^{-3}$ f.un. (частотных единиц, $1\,\text{f.un.} = 1/\tau$, $\tau = 1$ сутки, τ — шаг дискретизации), в которой наблюдается серия спектральных всплесков. Период ~ 1000 суток соответствует временным масштабам реализации самоподобных особенностей рентгеновского излучения Cyg X-1 [11]. На спектрах мощности функций памяти на частотах ~ 0.18 f.un. различимы значимые всплески, определяющие орбитальный период $P = 5.6$ суток двойной системы. В полосе средних и высоких частот на спектрах функций памяти проявляются периодические процессы разной амплитуды и длительности. Сочетание указанных процессов приводит к достаточно сложной конфигурации мелкомасштабных флуктуаций во временной последовательности рентгеновской активности Cyg X-1 — сильной переменности на коротких временных интервалах (вплоть до миллисекунд).

Для уточнения периодических закономерностей, обнаруженных на спектрах мощности ВКФ и функций памяти рентгеновской активности Cyg X-1, применяется процедура локализации. Суть ее состоит в разбиении временного сигнала на окна равной длины и построение для них исследуемых частотных характеристик. Описание выбора оптимальной длины локального окна представлено в работах [12,13]. Оптимизация выполнялась путем пошагового увеличения длины локального окна (на один шаг дискретизации) до тех пор, пока значения рассчитываемых параметров не становились относительно постоянными.

Оконно-временное представление спектров мощности ВКФ $\mu_0(\nu)$ и функции памяти второго порядка $\mu_2(\nu)$ позволяет продемонстрировать заключения о существовании длительных интервалов (~ 3 лет) реализации самоподобия и выявлении орбитального периода в рентгеновского активности источника Cyg X-1 (рис. 1). В оконно-временном поведении частотной зависимости $\mu_0(\nu)$ интенсивность всплесков в низкочастотной области значительно превосходит все остальные. Наиболее значимый на спектре мощности $\mu_2(\nu)$ всплеск соответствует орбитальному периоду двойной системы Cyg X-1 (второе временное окно). В спектре мощности функции памяти $\mu_2(\nu)$ различимы периодические процессы разной длительности и интенсивности.

В работах [7,9] мы предлагаем частотную зависимость параметра немарковости $\varepsilon_i(\nu)$, рассчитываемую из спектральных плотностей мощности ВКФ и функций памяти. Для проведения количественной оценки степени проявления эффектов памяти используется значение параметра немарковости на нулевой частоте $\varepsilon = \varepsilon_1(0)$. В зависимости от значений указанного параметра выделяются процессы с сильной статистической памятью $\varepsilon \sim 1$ (немарковские процессы), с умеренной памятью $\varepsilon > 1$, с короткой памятью $\varepsilon \gg 1$ (марковские процессы). На рис. 2 представлена частотная зависимость

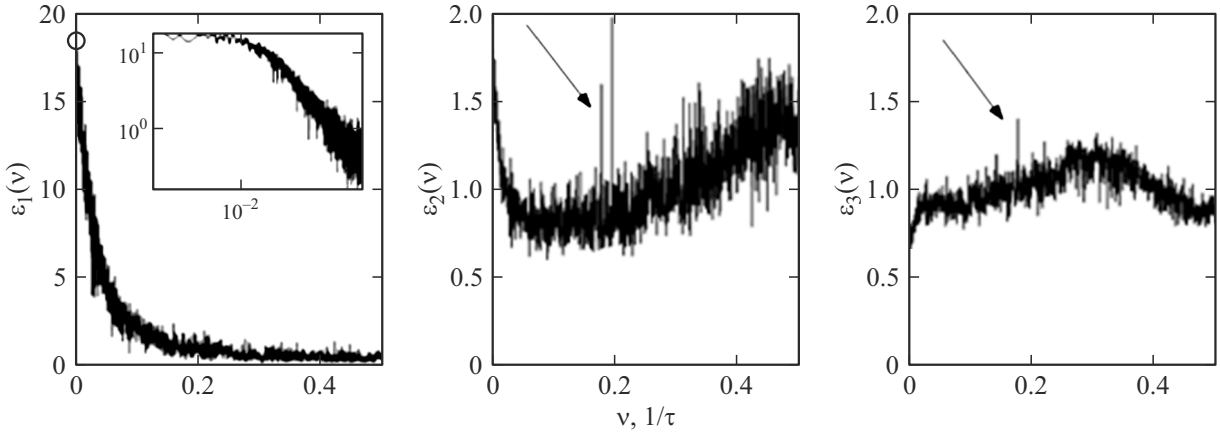


Рис. 2. Частотная зависимость первых трех точек параметра немарковости — меры статистической памяти $\varepsilon_i(\nu)$, где $i = 1, 2, 3$, для суточно усредненных данных рентгеновской активности двойной системы Cyg X-1. Вкладка — низкочастотная область зависимости $\varepsilon_1(\nu)$, представленная в двойной логарифмической шкале.

первых трех точек параметра немарковости — меры статистической памяти $\varepsilon_i(\nu)$, $i = 1, 2, 3$. Численное значение параметра $\varepsilon_1(0) = 18.23$ характеризует умеренное по степени интенсивности проявление статистической памяти. Скорость потери корреляционных связей и значительные времена релаксации свидетельствуют о неоднородности структуры внутренних слоев аккреционного диска, преимущественно генерирующих рентгеновское излучение и достаточно медленной скорости переноса вещества в них. На частотных зависимостях $\varepsilon_2(\nu)$ и $\varepsilon_3(\nu)$ обнаруживаются спектральные всплески, соответствующие периоду изменения лучевой скорости оптической звезды в двойной системе Cyg X-1 — орбитальному периоду.

Наши результаты свидетельствуют о довольно сложном стохастическом характере и взаимосвязи физических процессов, определяющих механизмы генерации рентгеновского излучения бинарной системы Cyg X-1. В частности, анализ спектров мощности функций статистической памяти, построенных для суточно усредненных данных рентгеновской активности Cyg X-1, позволил сделать выводы о неоднородности структуры внутренних слоев аккреционного диска. В то же время временные интервалы, характеризующие скачкообразные — наиболее существенные изменения в эволюции объекта, составляют несколько сотен суток (до 3 лет). Полученные результаты были дополнены изучением спектральных особенностей полного потока рентгеновского излучения на отдельных временных интервалах (на основе оконно-временного представлении спектров мощности функций памяти). Существенные времена релаксации, вычисленные из частотных зависимостей мер статистической памяти, указывают на определенные механизмы дисковой аккреции указанного объекта — изменение плотности диска и темпа аккреции, преимущественно определяемых медленной скоростью переноса вещества.

В заключение следует отметить, что сложный характер аккреции вещества в двойных звездных системах и механизмов генерации рентгеновского излучения определяет направления дальнейшего анализа: анализ перекрестных корреляций и установление эффектов частотно-фазовой синхронизации для одновременно фиксируемых сигналов излучения астрофизических объектов в разных частотных диапазонах [14–16]; выделение в рентгеновской активности двойных рентгеновских систем низкочастотной (резонансных частот, собственных и вызванных) и высокочастотной (шумовой) составляющих [17]. В частности, в работе [17] для рентгеновского источника GRS $1915 + 105$ авторам удалось не только установить содержающуюся в хаотических сигналах информацию о корреляционных зависимостях, но и указать пути для извлечения необходимой ее части в зависимости от типа нерегулярностей: всплесков, скачков, разрывов производных, а также специфических частот.

Финансирование работы

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета („Приоритет-2030“).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S. Bowyer, E.T. Byram, T.A. Chubb, H. Friedman. Science, **147**, 394 (1965). DOI: 10.1126/science.147.3656.394

[2] J.A. Orosz, J.E. McClintock, J.P. Aufdenberg, R.A. Remillard, M.J. Reid, R. Narayan, L. Gou. Ap. J., **742** (2), 84 (2011). DOI: 10.1088/0004-637X/742/2/84

[3] J.C.A. Miller-Jones, A. Bahramian, J.A. Orosz, I. Mandel, L. Gou, T.J. Maccarone, C.J. Neijssel, X. Zhao, J. Ziółkowski, M.J. Reid, P. Uttley, X. Zheng, D.-Y. Byun, R. Dodson, V. Grinberg, Y. Jung, J.-S. Kim, B. Marcote, S. Markoff, M.J. Rioja, A.P. Rushton, D.M. Russell, G.R. Sivakoff, A.J. Tetarenko, V. Tudose, J. Wilms. Science, **371**, 1046 (2021). DOI: 10.1126/science.abb3363
[4] A.M. Levine, H. Bradt, W. Cui, J.G. Jernigan, E.H. Morgan, R. Remillard, R.E. Shirey, D.A. Smith. Ap. J., **469** (1), L33 (1996). DOI: 10.1086/310260
[5] R. Zwanzig. Annu. Rev. Phys. Chem., **16**, 67 (1965). DOI: 10.1146/annurev.pc.16.100165.000435
[6] H. Mori. Prog. Theor. Phys., **34** (3), 399 (1965). DOI: 10.1143/PTP.34.399
[7] R.M. Yulmetyev, P. Hänggi, F.M. Gafarov. Phys. Rev. E, **62** (5), 6178 (2000). DOI: 10.1103/PhysRevE.62.6178
[8] R.M. Yulmetyev, P. Hänggi, F. Gafarov. Phys. Rev. E, **65**, 046107 (2002). DOI: 10.1103/PhysRevE.65.046107
[9] S.A. Demin, R.M. Yulmetyev, O.Yu. Panischev, P. Hanggi. Physica A, **387**, 2100 (2008). DOI: 10.1016/j.physa.2007.12.003
[10] S.A. Demin, O.Y. Panischev, Y.A. Nefedyev. Kinemat. Phys. Celest. Bodies, **30** (2), 63 (2014). DOI: 10.3103/S0884591314020032
[11] J. Greenhough, S.C. Chapman, S. Chaty, R.O. Dendy, G. Rowlands. A & A, **385**, 693 (2002). DOI: 10.1051/0004-6361:20020013
[12] R.M. Yulmetyev, N.A. Emelyanova, S.A. Demin, F.M. Gafarov, P. Hänggi, D.G. Yulmetyeva. Physica A, **331**, 300 (2004). DOI: 10.1016/j.physa.2003.09.023
[13] A.V. Mokshin, R.M. Yulmetyev, P. Hänggi. Physica A, **345**, 303 (2005). DOI: 10.1016/j.physa.2004.07.001
[14] S. Demin, O. Panischev, V. Yunusov, S. Timashev. in *Studies in systems, decision and control* (Springer, Cham, 2021), v. 350, p. 27. DOI: 10.1007/978-3-030-67892-0_3
[15] A.C. Brinkman, D.R. Parsignault, E. Schreier, H. Gursky, E.M. Kellogg, H. Tananbaum, R. Giacconi. Ap. J., **188**, 603 (1974). DOI: 10.1086/152753
[16] S.A. Demin, Y.A. Nefedyev, A.O. Andreev, N.Y. Demina, S.F. Timashev. Adv. Space Res., **61**, 639 (2018). DOI: 10.1016/j.asr.2017.06.055
[17] Y.S. Polyakov, J. Neilsen, S.F. Timashev. A.J., **143**, 148 (2012). DOI: 10.1088/0004-6256/143/6/148