

УДК 524.354
© 1991 г.

**С. А. ГРЕБЕНЕВ, Р. А. СЮНЯЕВ, М. Н. ПАВЛИНСКИЙ и
И. А. ДЕХАНОВ**

ОБНАРУЖЕНИЕ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КАНДИДАТА В ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ GX339-4

Все три известные по наблюдениям в рентгеновском диапазоне состояния кандидата в черные дыры GX339-4 («низкое», «высокое» и «off») были исследованы приборами обсерватории «Гранат» в 1990—1991 гг. В «низком» (жестком) состоянии были обнаружены квазипериодические осцилляции (QPO) излучения источника с частотой 0.8 Гц.

DETECTION OF 0.8 HZ QUASI PERIODICAL OSCILLATIONS FROM THE BLACK HOLE CANDIDATE GX339-4, by S. A. Grebenev, R. A. Sunyaev, M. N. Pavlinsky and I. A. Dekhanov. All the three known X-ray states of the black hole candidate GX339-4 («low», «high» and «off») were investigated by the «Granat» observatory during 1990—1991. In the «low» (hard) state 0.8 Hz Quasi Periodical Oscillations of its X-ray flux were detected.

Введение. Подобно известным рентгеновским источникам, кандидатам в черные дыры, Лебедю X-1 и 1E1740.7-2942, объект GX339-4 (4U1658-48) демонстрирует три рентгеновских состояния: «высокое», когда поток от источника в стандартном диапазоне энергий 2—10 кэВ находится на уровне 300—500 миллиКраб и источник имеет мягкий тепловой спектр с эффективной температурой $\sim 10^7$ К, «низкое» с потоком на уровне 50—150 миллиКраб и жестким комтонизированным спектром и «off» («выключенное») состояние с потоком менее 30 миллиКраб (Маркерт и др., 1973; Мотч и др., 1983). Наблюдения GX339-4, выполненные обсерваторией «Гранат» в 1990—1991 гг., позволили изучить поведение источника во всех трех состояниях.

Наблюдения были проведены с помощью позиционно-чувствительного спектрометра АРТ-П с кодирующей маской, способного восстанавливать изображение избранного участка неба размером $3.6 \times 3.4^\circ$ с угловым разрешением ~ 5 угл.мин, в рентгеновских лучах. Прибор чувствителен к фотонам в диапазоне энергий 2—60 кэВ (Сюняев и др., 1990). Наблюдения проводились в режиме «поток фотонов», когда для каждого фотона запоминались и передавались на Землю его координаты на детекторе, энергия и время прихода. Такой режим давал возможность проводить как спектральный, так и временной анализ излучения рентгеновских источников, находящихся в поле зрения телескопа. Точность привязки времени при-

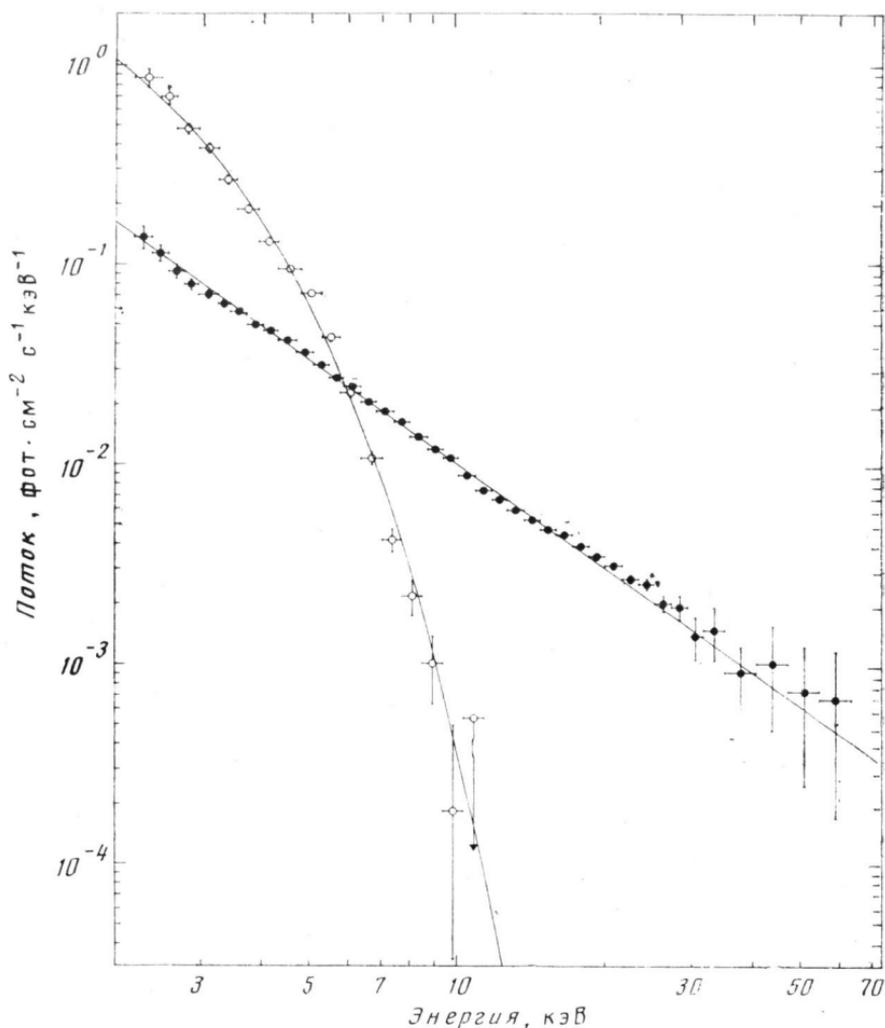


Рис. 1. Рентгеновские спектры источника GX339-4 в «низком» и «высоком» состояниях, полученные телескопом АРТ-II 2 апреля 1990 г. (темные кружки) и 18 августа 1990 г. (светлые кружки). В «низком» состоянии спектр источника степенной с фотонным индексом ~ 1.7 в «высоком» он согласуется со спектром излучения стандартного оптически толстого диска (Шакура и Сюняев, 1973), максимальная эффективная температура в котором равна ~ 0.84 кэВ (модельные спектры показаны сплошными линиями). Стрелкой изображен верхний предел на уровне трех стандартных отклонений

хода фотона была равна 3.9 мс (1/256 секунды бортовых часов), «мертвое» время прибора — 580 мкс.

В «низком» состоянии GX339-4 был обнаружен во время наблюдений 2—3 апреля 1990 г. Поток от источника в диапазоне 3—10 кэВ находился на уровне 0.1 потока от Крабовидной туманности, обычном для этого состояния (Мотч и др., 1983; Маижима и др., 1984). Спектр источника был жестким и хорошо описывался простым сте-

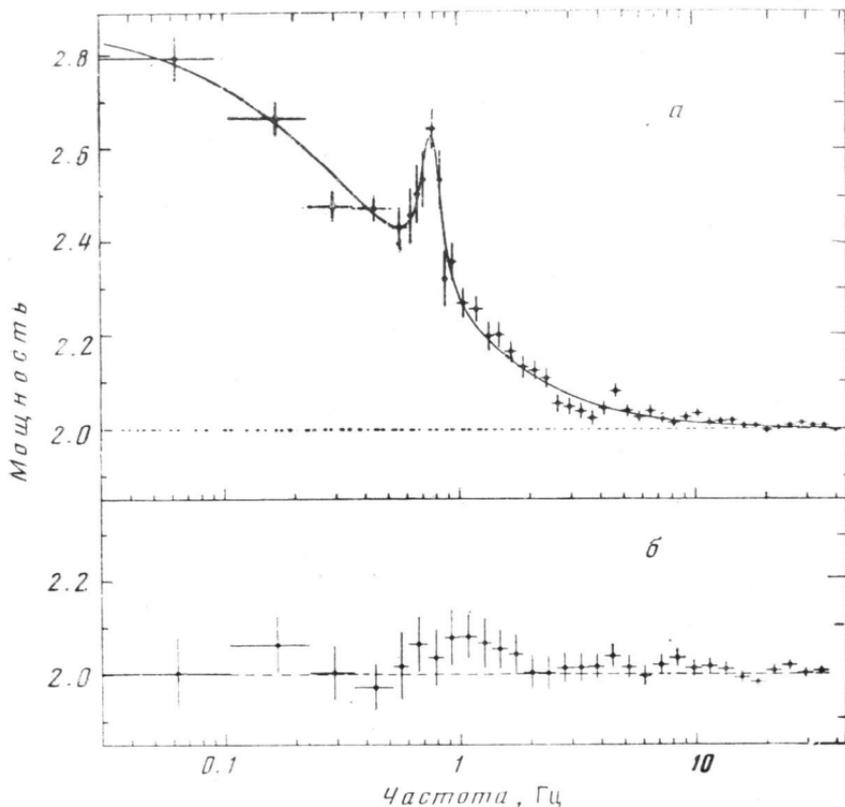


Рис. 2. Средние спектры мощности рентгеновского излучения источника GX339-4 в диапазоне энергий 3—25 кэВ, полученные 2 апреля 1990 г. (а) и 18 августа 1990 г. (б) во время наблюдений телескопом АРТ-П обсерватории «Гранат». Уровень «белого» шума показан пунктиром

пенным законом во всем диапазоне энергий 2—60 кэВ (рис. 1). Фотонный индекс излучения, наилучшим образом согласующийся с данными наблюдений, был равен 1.733 ± 0.004 , интенсивность на 10 кэВ была $(1.01 \pm 0.01) \cdot 10^{-2}$ фот·см⁻²с⁻¹·кэВ⁻¹.

За ~15 ч экспозиции мы не обнаружили существенной переменности излучения на временной шкале длиннее 10 мин. В то же время наблюдался сильный шум мерцаний («flicker noise») с характерным временем порядка нескольких секунд. На рис. 2 показан средний спектр мощности, полученный в области энергий 3—25 кэВ в диапазоне частот 0.03—50 Гц. Из рисунка видно, что низкочастотный шум заметно превышал уровень пуассоновского «белого» шума (пунктирная линия) на частотах ниже 5 Гц. Среднеквадратичная амплитуда шума в диапазоне 0.03—1 Гц находилась на уровне $18.1 \pm 0.2\%$. Но наиболее удивительной особенностью этого спектра был пик квазипериодических осцилляций вблизи 0.8 Гц, зарегистрированный на уровне достоверности 9.6 стандартных отклонений. Форма пика удовлетворительно описывалась профилем Лорентца (сплошная линия) с центральной (основной) частотой 0.77 ± 0.03 Гц и полной

шириной на полувысоте (FWHM) ≈ 0.15 Гц ($\sim 20\%$ от основной частоты). Среднеквадратичная амплитуда квазисцилляций составляла $7.0 \pm 0.8\%$.

«Высокое состояние». К 18 августа 1990 г. спектр GX339-4 изменился кардинальным образом (рис. 1). Хотя поток от источника в диапазоне энергий 3–10 кэВ оставался на прежнем уровне, ~ 100 миллиКраб, наблюдаемый ультрамягкий спектр свидетельствовал, что GX339-4 перешел в «высокое» состояние (Макишима и др., 1986; Миямота и др., 1990). Поток в диапазоне 3–6 кэВ возрос до уровня 230 миллиКраб. Подобные ультрамягкие спектры наблюдаются в «высоком состоянии» и у других кандидатов в черные дыры, таких, как Лебедь X-1 (Кое и др., 1976), LMC X-1 (Эбисава и др., 1989), LMC X-3 (Вайт и Маршалл, 1984).

При анализе спектра GX339-4, полученного телескопом АРТ-П, использовалась модель многоцветного аккреционного диска (Шакура и Сюняев, 1973). Были оценены максимальная эффективная (чернотельная) температура в диске, $kT_{\max} \approx 0.842 \pm 0.004$ кэВ, и радиус, вблизи которого она достигается, $R_{\max} \approx 16.4 \pm 0.3$ км, радиус R_{\max} равен 4 гравитационным радиусам. Расстояние до GX339-4 было принято равным 4 кпк и наклонение диска по отношению к наблюдателю $i \approx 60^\circ$ (Коули и др., 1987). Сделанные оценки подтверждают заключение Коули и др. (1987), что масса компактного объекта GX339-4, вероятно, лишь незначительно превышает предельную массу, при которой еще может существовать нейтронная звезда, $M \approx \approx 1.4 M_\odot$. Из-за значительного вклада томсоновского рассеяния в непрозрачность в центральных областях диска (Шакура и Сюняев, 1973) спектр излучения диска сильно отличается от спектра излучения черного тела (Зельдович и Шакура, 1969). Поэтому полученное значение R_{\max} может рассматриваться лишь как оценка снизу, и в действительности аккреция в GX339-4 идет на более массивную черную дыру.

Во время наблюдений 18 августа не было обнаружено каких-либо доказательств существования жесткой компоненты в энергетическом спектре источника. Верхний предел на уровне достоверности трех стандартных отклонений на поток излучения в диапазоне 10–20 кэВ был равен $1.6 \cdot 10^{-4}$ фот·см⁻²с⁻¹ кэВ⁻¹. Средний спектр мощности, полученный во время наблюдений (рис. 2), показал отсутствие заметных флуктуаций потока излучения на временной шкале как минут, так и секунд. Оценка среднеквадратичной амплитуды таких флуктуаций составила $6.1 \pm 2.7\%$ в области частот 0.03–1 Гц.

«Off»-состояние. Во время последней серии наблюдений этого источника обсерваторией «Гранат» (19–20 февраля 1991 г.) рентгеновское излучение GX339-4 не было зафиксировано на уровне чувствительности телескопа АРТ-П. Верхние пределы на поток от источника на уровне трех стандартных отклонений были равны $8 \cdot 10^{-3}$, $6 \cdot 10^{-4}$ и $2 \cdot 10^{-4}$ фот·см⁻²с⁻¹ кэВ⁻¹ в диапазонах 3–6, 6–15, и 15–30 кэВ соответственно. Они соответствуют пределу в диапазоне 3–10 кэВ, равному 6 миллиКраб в предположении спектра, подобного спектру излучения Крабовидной туманности. Согласно принятой

классификации (Мотч и др., 1983), столь низкий поток излучения позволяет констатировать, что в этот период времени GX339-4 находился в «выключенном» рентгеновском состоянии («off-state»).

Обсуждение. Два спектральных состояния GX339-4, во время которых он бывает ярким в рентгеновских лучах, соответствуют двум различным режимам дисковой аккреции на черную дыру. При этом наблюдается либо спектр стандартного оптически толстого диска (Шакура и Сюняев, 1973), либо спектр с жестким рентгеновским хвостом, связанным с комптонизацией низкочастотных фотонов в облаке высокотемпературной электронной плазмы (Сюняев и Титарчук, 1980). Тепловая неустойчивость аккреционного течения в диске (Шакура и Сюняев, 1976) в режиме, когда реализуется «жесткое» спектральное состояние, может быть причиной появления шума мерцаний («flicker noise»).

Открытие низкочастотных квазипериодических осцилляций рентгеновского излучения GX339-4 может рассматриваться как дальнейшее свидетельство того, что аккреция в этом источнике идет на черную дыру. Недавно подобные квазиосцилляции с частотой 0.08 Гц были зарегистрированы у другого кандидата в черные дыры — рентгеновского источника LMC X-1 (Эбисава и др., 1989). Частота осцилляций типичных QPO источников, большинство из которых входит в мало массивные двойные системы, на один—два порядка выше (Льюин и др., 1988). Осцилляции рентгеновского излучения диска с частотой, много меньшей кеплеровской, могут быть связаны с автоколебаниями, развивающимися в диске вследствие неустойчивости аккреционного течения.

Квазипериодические осцилляции рентгеновского излучения GX339-4 наблюдались ранее как в «низком» (на частоте 0.11 Гц) (Мотч и др., 1983), так и в «высоком» состоянии (на частоте ~ 6 Гц) (Миямото и др., 1990). Отметим, что в приведенном на рис. 2 спектре мощности помимо QPO пика с частотой 0.8 Гц присутствует еще одна особенность вблизи 4.5 Гц. Однако она была зафиксирована на низком уровне достоверности (~ 3.5 стандартных отклонения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вайт и Маршелл* (White N. E., Marshall F. E.) // *Astrophys. J.* 1984. V. 281. P. 354.
- Зельдович Я. Б. и Шакура Н. И.* // *Астрон. журн.* 1969. Т. 46. С. 225.
- Кое и др.* (Coe M. J., Engel A. R., Quenby J. J.) // *Nature.* 1976. V. 259. P. 544.
- Коули и др.* (Cowley A. P., Crampton D., Hutchings J. B.) // *Astron. J.* 1987. V. 92. P. 195.
- Льюин и др.* (Lewin W. H. J., van Paradijs J., van der Klis M.) // *Space Sci. Rev.* 1988. V. 46. P. 273.
- Маижима и др.* (Maejima Y., Makishima K., Matsuoka M. et al.) // *Astrophys. J.* 1984. V. 285. P. 712.
- Макишима и др.* (Makishima K., Maejima Y., Mitsuda K. et al.) // *Astrophys. J.* 1986. V. 308. P. 635.
- Маркерт и др.* (Markert T. H., Canizares C. R., Clark G. W. et al.) // *Astrophys. J. (Letters).* 1973. V. 184. L67.
- Миямото и др.* (Miyamoto S., Kitamoto S., Kimura K.) // *Proc. 23rd ESLAB Symp. on Two-Topics in X-Ray Astronomy.* ESA SP-296. 1990. V. 1. P. 531.

- Мотч и др.* (Motch C., Ricketts M. J., Page C. G. et al.) // *Astron. and Astrophys.* 1983. V. 119. P. 171.
- Сюняев Р. А. и Титарчук Л. Г.* // *Astron. and Astrophys.* 1980. V. 86. P. 121.
- Сюняев Р. А., Бабиченко С. И., Гоганов Д. А. и др.* // *Adv. Space. Res.* 1990. V. 10. P. (2) 233.
- Шакура Н. И. и Сюняев Р. А.* // *Astron. and Astrophys.* 1973. V. 24. P. 337.
- Шакура Н. И. и Сюняев Р. А.* // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 1976. V. 175. P. 613.
- Эбисава и др.* (Ebisawa K., Mitsuda K., Inoue H.) // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 1989. V. 41. P. 159.

Институт космических исследований
АН СССР, Москва

Поступила в редакцию
8 августа 1991 г.

Примечание при корректуре: В ходе очередной серии наблюдений, проведенной приборами обсерватории «Гранат» в сентябре — октябре 1991 г., GX339-4 был вновь обнаружен в ярком рентгеновском состоянии (Сюняев и др., *IAU Circ.*, 1991, № 5342). Одновременно жесткое излучение источника было зарегистрировано монитором гамма-всплесков орбитальной обсерватории ГРО (Fishman et al., *IAU Circ.*, 1991, № 5327).

Согласно данным телескопа АРТ-II поток излучения в диапазоне энергий 6—30 кэВ находился на уровне 210, 350, 150 и 100 миллиКраб, соответственно, 6, 23 сентября и 3, 5 октября 1991 г., демонстрируя переход через максимум в середине сентября и последующий спад интенсивности. Источник имел степенной спектр, типичный для «жесткого» состояния. В то же время спектр GX339-4 в этот период был мягче, чем спектр, наблюдавшийся телескопом АРТ-II 2—3 апреля 1990 г. Более того, в ходе наблюдений в сентябре — октябре было зарегистрировано непрерывное увеличение наклона спектра излучения в диапазоне 6—30 кэВ: -2.00 ± 0.01 (6 сентября), -2.18 ± 0.01 (23 сентября), -2.71 ± 0.01 (3 октября) и -2.82 ± 0.04 (5 октября 1991 г.), сопровождающееся двукратным увеличением потока излучения в мягком рентгеновском диапазоне 3—6 кэВ. Быстрое уменьшение жесткости спектра, по-видимому, свидетельствует о начале перехода GX339-4 в «высокое» состояние.