

13.4. ГЕРКУЛЕС X-1: ОБРАЗЕЦ РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЛЬСАРА В СОСТАВЕ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ

После открытия рентгеновского источника Her X-1 по данным спутника «Ухуру» в 1972 г. [557], он стал наиболее хорошо изученным рентгеновским пульсаром в двойной системе. По свойствам в рентгеновском диапазоне он во многом подобен импульсному рентгеновскому источнику Cen X-3, который был открыт первым [224, 542]. В обоих случаях результаты наблюдений интерпретируются на основе модели двойной системы с переносом массы, в которой вращающаяся нейтронная звезда аккрецирует вещество от другого компонента.

Особенность источника Her X-1 состоит в том, что данные его рентгеновских наблюдений свидетельствуют о наличии *трех* периодичностей: период повторения импульсов 1,24 с, орбитальный период 1,7 сут и приблизительно 35-дневный цикл «включено — выключено». Оценки массы нейтронной звезды составляют $0,4 \leq M/M_{\odot} \leq 2,2$, а масса другого компонента системы — звезды HZ Her равна $1,4 \leq M/M_{\odot} \leq 2,8$ [37]. У этой звезды проявляются оптические импульсы с периодом 1,24 с; их интерпретируют как результат поглощения, термализации и переизлучения в атмосфере HZ Her импульсного рентгеновского излучения Her X-1. Небольшая масса HZ Her совместима с ее спектральным типом — поздний A или ранний F.

Уникальная особенность Her X-1 — 35-дневный цикл, состоит из 12 сут состояния с высоким уровнем интенсивности излучения, за которыми следуют 23 сут состояния с низкой интенсивностью (рис. 13.5). В ряде теоретических моделей [305, 456, 483] эта 35-дневная модуляция интенсивности объясняется *прецессией* аккреционного диска относительно рентгеновского источника. Прецессия вызывает «затенение» рентгеновского источника для земного наблюдателя на продолжительное время «спокойного» состояния.

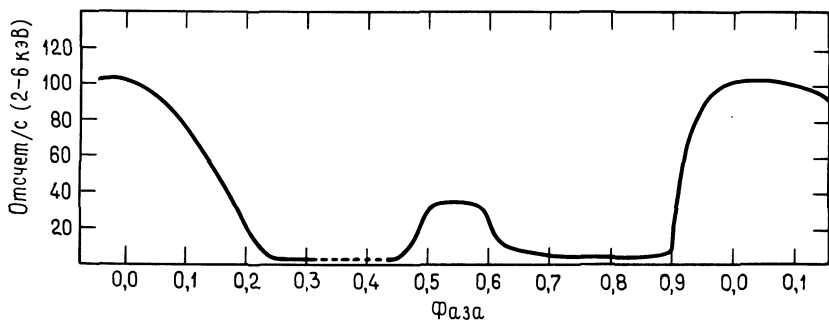


Рис. 13.5. Результаты наблюдений 35-дневного цикла источника Her X-1 со спутника «Ухуру». Показана огибающая рентгеновской «кривой блеска» Her X-1, охватывающая полный 35-дневный цикл. В той части кривой блеска, которая представлена прерывистой линией, наблюдения были невозможны. Скорость счета (отсчет «Ухуру» в секунду) соответствует потоку энергии $1,7 \cdot 10^{-11}$ эрг/(см² · с) [300].

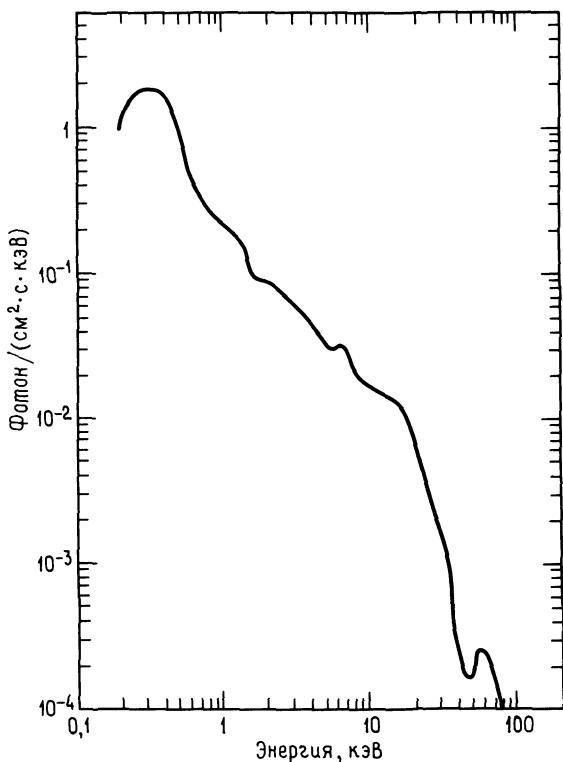


Рис. 13.6. Усредненный во времени рентгеновский спектр источника Her X-1. Спектр отличается избытком мягкого ($E \leq 1$ кэВ) рентгеновского излучения, непрерывным спектром, изменяющимся почти по степенному закону в диапазоне энергий $2 \leq E \leq 20$ кэВ, эмиссионной линией железа при $E \approx 7$ кэВ, резким падением при $E \geq 20$ кэВ и деталью при $E \approx 50$ кэВ, которая может быть связанной с циклотронной линией [277].

Эта модель заслуживает внимания, потому что *оптическая* модуляция с периодом 1,7 сут, которая явно определяется рентгеновским нагревом, продолжает существовать в течение всего 35-дневного цикла.

Средний рентгеновский спектр Her X-1 в диапазоне 1—40 кэВ показан на рис. 13.6. Непрерывный спектр относительно плоский ниже ~ 24 кэВ [$dL(E)/dE \sim \text{const}$, где L — светимость, а E — энергия], но выше этого значения энергии спектр резко падает. Если принять приближенное, но вполне разумное значение расстояния до источника порядка 4 кпс [154], полная светимость Her X-1 в интервале энергий 2—24 кэВ составит около 10^{37} эрг/с.

Упражнение 13.1. Покажите, что указанная выше светимость слишком высока, чтобы ее можно было обеспечить потерями кинетической энергии вращения нейтронной звезды.

Недавно были получены данные о наличии спектральной линии в импульсном жестком рентгеновском спектре Нег X-1 вблизи 58 кэВ [574]. Наиболее правдоподобное объяснение ее происхождения состоит в том, что эта деталь спектра связана с электронным циклотронным поглощением или эмиссией и говорит о наличии поверхностного магнитного поля $B \sim (4-6) \cdot 10^{12}$ Гс. Если это наблюдение окажется верным, оно подкрепит отождествление Нег X-1 с нейтронной звездой. Похожая деталь наблюдалась [669] в импульсном высокоэнергетическом спектре источника 4U 0115—63 (период 3,6 с) вблизи 20 кэВ, что свидетельствует о существовании поля $B \sim 2 \cdot 10^{12}$ Гс у этого источника.

Упражнение 13.2. а) Оцените магнитное поле B в предположении, что наблюдавшаяся при 58 кэВ линия в спектре Нег X-1 порождается излучением электрона, который переходит с первого возбужденного уровня Ландау в основное состояние.

Указание: $E_{n,q} = \mu_B(2n+1) + q^2/2m_e$, где μ_B — магнетон Бора, $n = 0, 1, 2, \dots$, а q — импульс, направленный вдоль B .

б) Предположив, что наблюдаемая ширина линии ~ 12 кэВ возникает вследствие теплового уширения, оцените температуру газа T в области излучения линии. Предположите «типичный» угол наблюдения источника относительно магнитного поля.

13.5. ЛЕБЕДЬ X-1: КАНДИДАТ В ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Источник Лебедь X-1 (Суг X-1) занимает центральное место среди изучаемых компактных рентгеновских объектов. Этот источник с широчайшим диапазоном временной переменности, первый из обнаруженных в оптических двойных системах, вероятнее всего, представляет собой черную дыру. Именно быстрая рентгеновская переменность этого источника положила начало поиску по данным «Ухуру» других переменных источников, что привело к открытию рентгеновских пульсаров в двойных системах¹⁾.

Лебедь X-1 обладает переменностью во всех временных масштабах — от месяцев и лет до миллисекунд. Наиболее ярко его переменность проявляется во всплесках длительностью ~ 1 мс [488], которые свидетельствуют о максимальном размере рентгеновского источника $R \leq ct \sim \sim 300$ км и доказывают, что объект является весьма компактным (рис. 13.7).

¹⁾ Всестороннее обсуждение источника Суг X-1 и соответствующие ссылки см. в [423].