

Магнитные сердца Вселенной

Рентгеновские пульсары глазами космических обсерваторий

С.С.Цыганков, А.А.Лутовинов

Из тысячелетней истории визуальных наблюдений человечество знает об активности космического пространства, одно из проявлений которой — сияние огромного количества звезд на ночном небе. Известно также, что светила живут не вечно и рано или поздно умирают, становясь невидимыми для человеческого глаза. Судьба потухших звезд до недавнего времени оставалась загадкой для земных наблюдателей.

До середины прошлого столетия ученые имели возможность исследовать излучение, приходящее из космоса, только в радио- и оптическом диапазонах частот, поскольку на остальных длинах волн электромагнитное излучение эффективно поглощается атмосферой Земли. Ситуация изменилась с началом освоения человеком космического пространства. В частности, в 60-е годы прошлого века, когда были запущены первые ракеты с детекторами, регистрирующими фотоны с короткой длиной волны, удалось открыть ярчайший рентгеновский источник в нашей Галактике — Скорпион X-1 [1]. Последовавшие за этим открытиями наблюдения и теоретические разработки показали, что наиболее вероятный источник энергии для таких объектов — аккреция (падение вещества в сильном гравитационном поле компактного объекта) [2]. Эффективность энерговыделения при данном процессе может



Сергей Сергеевич Цыганков, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отдела астрофизики высоких энергий Института космических исследований РАН. Награжден Медалью РАН для молодых ученых в области общей физики и астрономии (2007). Область научных интересов — рентгеновская и гамма-астрономия, физика аккреции на релятивистские объекты.



Александр Анатольевич Лутовинов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела астрофизики высоких энергий того же института. Лауреат Премии Фонда содействия отечественной науки лучшим кандидатам наук (2006). Занимается рентгеновской и гамма-астрономией, исследованиями релятивистских объектов, структуры Галактики.

составлять около 10% от массы покоя падающего вещества ($E \approx 0.1mc^2$), что в сотни раз превосходит эффективность энерговыделения в термоядерных реакциях. При этом аккрецирующее вещество разогревается до нескольких миллионов градусов, а максимум спектра его излучения приходится на рентгеновский диапазон энергий.

В настоящий момент на околоземной орбите работает сразу несколько космических обсерваторий, регистрирующих рентгеновские фотоны (с энергией от 0.2 до 100 кэВ) и обладающих высоким временным, энергетическим и угловым разрешением: рентгеновская обсерватория им.Бруно Росси RXTE (NASA, с 1995 г.), обсерватория гамма-лучей ИНТЕГРАЛ (ESA, Роскосмос, с 2002 г.), рентгеновская и гамма-миссия для изучения гамма-всплесков «Swift» (NASA, с 2004 г.), рентгеновская обсерватория «Suzaku» (NASA, JAXA, с 2005 г.). Такое количество научных спутников позволяет не только оперативно следить за отдельными компактными объектами, но и выполнять обзор всего неба за относительно небольшой промежуток времени.

© Цыганков С.С., Лутовинов А.А., 2011

Жизнь после смерти

Люди привыкли считать, что биение сердца как признак жизни присуще исключительно живым организмам. Наблюдаемые проявления жизни объектов, о которых ниже пойдет речь, очень напоминают биение человеческого сердца, и многие важнейшие их свойства можно исследовать с помощью «кардиограмм», получаемых космическими рентгеновскими обсерваториями. Это становится возможным, если источник излучения — рентгеновский пульсар, т.е. нейтронная звезда с очень сильным магнитным полем, входящая в состав двойной системы с обычной оптической звездой-компаньоном.

Для иллюстрации на рис.1,*а* показана зависимость интенсивности излучения от времени (так называемая кривая блеска) рентгеновского пульсара 4U 0115+63, расположенного в нашей Галактике. А на рис.1,*б* представлена кардиограмма здорового человека. Видно, насколько похожи эти две характеристики жизнедеятельности таких разных объектов, как человек и «умершая» звезда — рентгеновский пульсар.

Источник рентгеновского излучения Центавр Х-3 стал первым объектом на небе, от которого орбитальная обсерватория «Uhuru» в 1971 г. зарегистрировала периодический сигнал, подобный изображенному на рис.1,*а*. К настоящему моменту в нашей и соседней с ней галактиках известно более сотни таких «сердец» — рентгеновских пульсаров в двойных системах. Их исследования дают

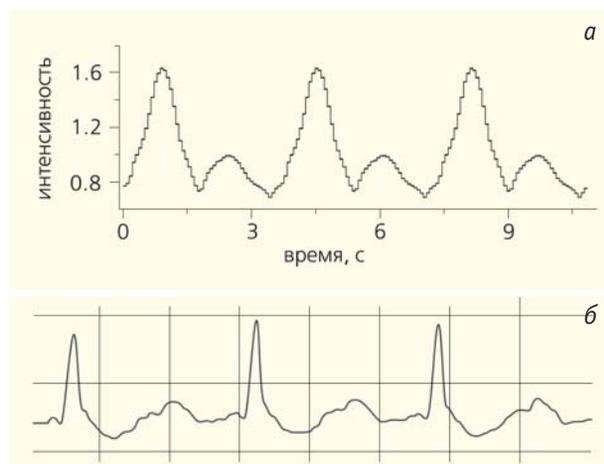


Рис.1. Две «кардиограммы». Кривая блеска рентгеновского пульсара 4U 0115+63 в диапазоне энергий 11—17 кэВ по данным орбитальной обсерватории RXTE. Период пульсаций (один оборот нейтронной звезды вокруг своей оси) составляет около 3.6 с. Повторяющиеся с таким периодом кривые называются профилем импульса (*а*). Настоящая кардиограмма — последовательность электрических импульсов, связанных с работой сердца здорового человека. Характерная частота пульса около одного сокращения в секунду (*б*).

неоценимую информацию о поведении вещества и излучения в условиях сверхсильных гравитационных и магнитных полей, которые никогда не будут достижимы в земных условиях.

Что же такое рентгеновские пульсары?

В 30-х годах XX в., сразу после открытия нейтрона, ученые предположили, что во Вселенной могут существовать очень плотные холодные объекты — нейтронные звезды. Своё название они получили из-за того, что значительную часть их объема составляют именно нейтроны. Образуются такие звезды в результате гравитационного сжатия (коллапса) ядер массивных звезд (масса которых больше 8—10 масс Солнца) на финальной стадии их эволюции и имеют колоссальную плотность ($\sim 10^{14}$ г/см³, что сравнимо или даже превышает плотность в атомных ядрах). Происходит подобный коллапс после выгорания термоядерного топлива (элементов периодической таблицы Менделеева легче железа) в их недрах, когда излучение больше не может противодействовать гравитационному сжатию звезды и в равновесии такой объект может поддерживаться только давлением вырожденного нейтронного газа.

Из простых соображений можно оценить важнейшую характеристику нейтронных звезд — напряженность магнитного поля. В процессе коллапса радиус оптической звезды-прародителя уменьшается примерно в 100 тыс. раз и в итоге составляет всего около 10 км. При этом в первом приближении магнитное поле сохраняет дипольную конфигурацию, характерную для обычных звезд. Звезды-прародители ранних спектральных классов O и B (очень горячие молодые звезды, в миллионы раз ярче нашего Солнца) могут обладать магнитными полями от нескольких десятков до нескольких тысяч гаусс; для сравнения, магнитное поле Солнца составляет ~ 1 Гс. Таким образом, предполагая магнитный поток сохраняющейся величиной ($\Phi \sim BR^2 = \text{const}$, где B — напряженность магнитного поля, R — радиус звезды) и используя приведенные выше величины, мы можем оценить напряженность магнитного поля компактного остатка после коллапса в 10^{11} — 10^{13} Гс.

В зависимости от того, имеется ли рядом обычная оптическая звезда или нет, нейтронные звезды делятся на два основных класса — одиночные и двойные системы. Одиночные нейтронные звезды, как правило, проявляют себя как источники периодического радиоизлучения — радиопульсары. Феномен же рентгеновского пульсара возможен только в том случае, когда в процессе коллапса двойная система не разрушается и вещество с обычной звезды-компаньона начинает перетекать на вращающуюся нейтронную звезду с сильным магнитным полем. Если аккрецирующее вещество обладает значительным моментом коли-

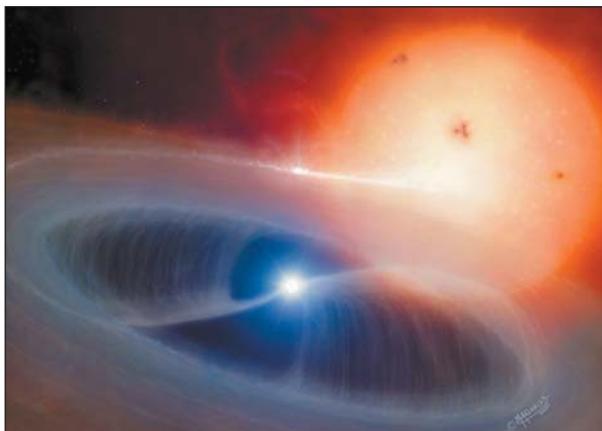


Рис.2. Вид рентгеновского пульсара с аккреционным диском. На заднем плане показана оптическая звезда-компаньон. Вещество перетекает на компактный объект через аккреционный диск и магнитосферные течения (показаны на рисунке).

Рисунок художника M.Garlick (www.space-art.co.uk)

чества движения (что реализуется при перетекании вещества через внутреннюю точку Лагранжа), то падать на компактный объект напрямую оно не может и образует так называемый аккреционный диск, в котором и теряет излишки момента в результате действия сил трения (см., например, [2] и рис.2, а также рис.6,а и 7).

Благодаря высокой напряженности магнитного поля вокруг нейтронной звезды вещество со

звезды-компаньона в процессе падения тормозится на так называемой альвеновской поверхности (поверхности, где давление магнитного поля уравновешивает давление падающего вещества — по ней проходит граница магнитосферы нейтронной звезды R_M) и «вмораживается» в магнитное поле. Дальше оно уже падает вдоль силовых линий на магнитные полюса нейтронной звезды, фактически формируя две горячие области вблизи ее поверхности (рис.2, 3, 6,а). Из-за малой скорости вмораживания вещество проникает в магнитное поле на небольшую глубину, много меньшую R_M . По этой причине канал аккреции вблизи поверхности нейтронной звезды имеет форму тонкостенной оболочки цилиндра — колонки (см. рис.3). Если же оптическая звезда обладает достаточно сильным звездным ветром, аккрецируемое вещество будет заполнять всю полость колонки.

Как уже упоминалось выше, в процессе падения вещество разогревается до миллионов градусов и излучает в рентгеновском диапазоне длин волн. В случае, если ось вращения нейтронной звезды не совпадает с ее магнитной осью, внешний наблюдатель будет регистрировать на кривой блеска импульсы, различающиеся по форме и наличию особенностей в зависимости от конкретных физических и геометрических условий как вблизи поверхности нейтронной звезды, так и на пути распространения сигнала. Периоды обращения нейтронных звезд вокруг своей оси для известных рентгеновских пульсаров составляют от долей секунды до нескольких сотен секунд.

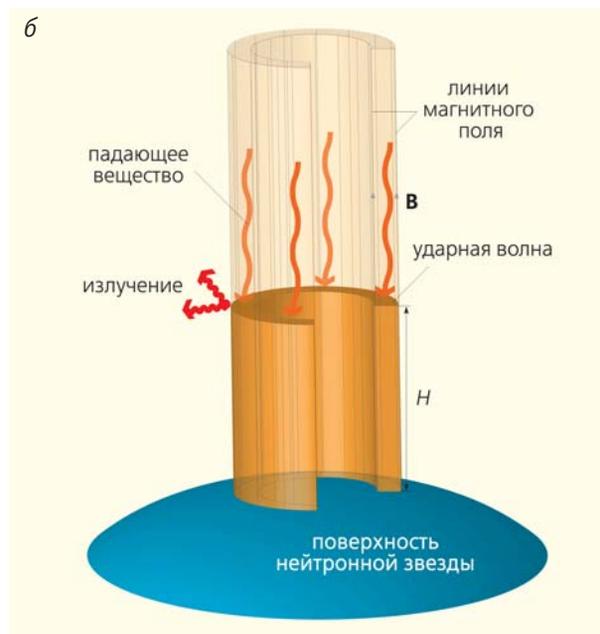
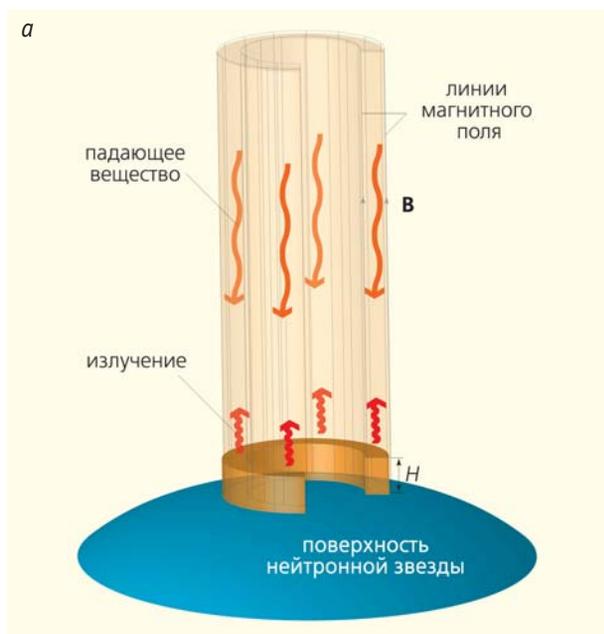


Рис.3. Схема строения аккреционной колонки рентгеновского пульсара, питающегося из аккреционного диска, для разных темпов аккреции: низкого (а) и высокого (б). Оранжевым цветом показана в разрезе заполненная горячим веществом аккреционная колонка ниже ударной волны на высоте H . Более светлым цветом выше ударной волны изображено падающее вещество.

Структура аккреционных областей на магнитных полюсах нейтронной звезды сильно зависит от темпа аккреции, т.е. количества вещества, падающего на звезду в единицу времени. Существует критическая светимость пульсара — так называемая эддингтоновская светимость, при которой давление выходящего излучения уравновешивает давление падающего вещества. Ниже этой светимости влиянием излучения на падающее вещество можно пренебречь; вещество падает практически до самой поверхности нейтронной звезды, и аккреционная область геометрически представляет собой тонкую «шайбу» (в случае аккреции из звездного ветра) или кольцо (при аккреции из диска) непосредственно у ее поверхности (рис.3,а).

Если темп аккреции оказывается достаточно большим и светимость превышает критический уровень, то, чтобы высветить избыток энергии, запасенный в падающем веществе, над поверхностью нейтронной звезды начинается подниматься ударная волна. Ее высота линейно растет с темпом аккреции, а сбоку она удерживается давлением магнитного поля [3]. Вытянутая вдоль магнитных силовых линий, заполненная горячим веществом под ударной волной структура называется аккреционной колонкой (рис.3,б).

Особый интерес представляют двойные системы, оптическими компаньонами в которых являются звезды класса Ве. Отличительная особенность последних — высокая скорость вращения вокруг своей оси и, как следствие, наличие переменного во времени газового диска вокруг экватора. Раз в несколько лет подобные звезды за короткий промежуток времени выбрасывают значительное количество вещества, часть которого перехватывается нейтронной звездой. При такой нестационарной аккреции, когда темп падения вещества может меняться на несколько порядков величины в течение нескольких десятков дней, структура аккреционных областей (колонок) тоже должна существенно меняться. Наблюдая во времени за соответствующими характеристиками особенностями излучения пульсара (параметрами энергетического спектра излучения, профилем импульса, периодом пульсаций), можно исследовать фундаментальные физические процессы в непосредственной близости от нейтронной звезды.

Большая часть известных на сегодняшний день рентгеновских пульсаров входит в состав двойных систем с массивными оптическими звездами ранних спектральных классов О-В, будучи относительно молодыми объектами с возрастом миллионы — десятки миллионов лет. Согласно общепринятой модели строения нашей Галактики, такие объекты должны концентрироваться в спиральных рукавах, где все еще идут процессы интенсивного звездообразования. Массивные звезды ранних спектральных классов обладают сильным и плотным звездным ветром, в котором происхо-

дит поглощение мягких (до ~10 кэВ) рентгеновских фотонов. Поэтому регистрация рентгеновских источников в таких системах была крайне трудной задачей для космических обсерваторий предыдущих поколений. Большой шаг в исследовании популяций двойных систем в Галактике, и в частности рентгеновских пульсаров, был сделан с помощью обсерватории ИНТЕГРАЛ, работающей в диапазоне энергий выше 20 кэВ, где влияние поглощения ничтожно мало [4]. С момента ее запуска в 2002 г. было открыто более 200 новых объектов как внегалактической, так и галактической природы. Среди последних важное место занимают рентгеновские пульсары, отождествить которые удалось в результате совместного анализа данных обсерватории ИНТЕГРАЛ с данными других космических (RXTE, XMM-Newton, «Chandra», «Swift») и наземных обсерваторий. Значительное увеличение числа известных рентгеновских пульсаров в сочетании с ростом чувствительности современных обсерваторий позволило не только построить карту распределения таких объектов в Галактике, но и впервые приступить к детальному анализу их уникальных свойств [5]. Рассказ о всех полученных в последнее время результатах выходит далеко за рамки настоящей статьи, поэтому здесь мы решили ограничиться только одним из них, где был достигнут, может быть, наиболее существенный прогресс — измерение магнитных полей рентгеновских пульсаров.

Супермагниты

В 1976 г. детектор, установленный на высотном аэростате, измерил спектр излучения рентгеновского пульсара Геркулес X-1 и впервые значимо зарегистрировал спектральную особенность, которая выглядела как существенный дефицит потока (локальное понижение интенсивности) на энергии ~40 кэВ [6]. Позднее эта особенность была интерпретирована как линия резонансного циклотронного поглощения. Ее наличие в спектре связано с тем, что электроны в сильном магнитном поле нейтронной звезды B могут двигаться только по определенным орбитам (фактически по спиралеподобной траектории определенного радиуса, «наматываемой» на силовую линию магнитного поля). При этом энергия таких электронов также может принимать вполне определенные значения, кратные фундаментальной циклотронной энергии E_0 :

$$E_0 = \frac{beB}{2\pi mc}. \quad (1)$$

Здесь b — постоянная Планка, B — напряженность магнитного поля, m и e — масса и заряд электрона, c — скорость света в вакууме. В результате фотоны с энергиями E_n ($n = 0, 1, 2, \dots$), где n — номер гармоники, попадают в резонанс с такими электронами и эффективно поглощаются ими, поэто-

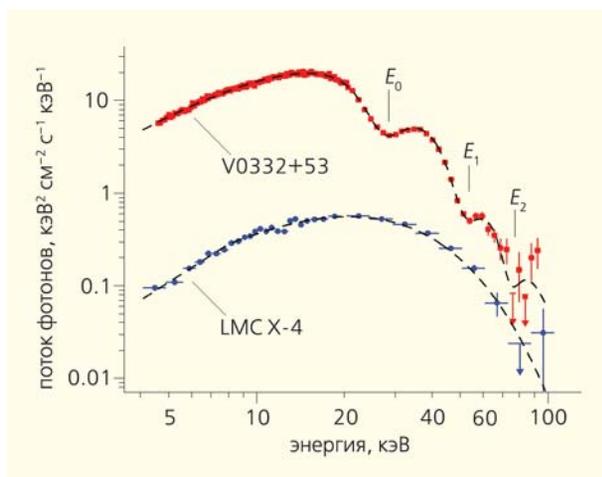


Рис.4. Энергетические спектры излучения рентгеновского пульсара V 0332+53 (красные квадраты), в спектре которого регистрируется три гармоники линии циклотронного поглощения, и пульсара LMC X-4 (синие кружки), в спектре которого такой особенности пока не обнаружено, по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ.

му внешний наблюдатель будет регистрировать дефицит потока фотонов на энергиях E_n .

Наблюдение линии поглощения на энергии ~40 кэВ в спектре пульсара Геркулес X-1 стало первым непосредственным экспериментальным подтверждением существования на поверхности нейтронных звезд сверхсильных магнитных полей. Из простой формулы (1) можно оценить величину магнитного поля нейтронной звезды в этой системе как $B \approx 4 \cdot 10^{12}$ Гс, что хорошо согласуется с приведенными в предыдущей главе предсказаниями (конечно, при вычислении магнитного поля нейтронной звезды необходимо учитывать поправки

к формуле (1), связанные с эффектами общей теории относительности в сильных гравитационных полях вблизи поверхности нейтронной звезды).

На настоящий момент в спектрах полтора десятков рентгеновских пульсаров достоверно регистрируются циклотронные линии поглощения, и в ~80% случаев из них, кроме фундаментальной гармоники ($n = 0$), регистрируются также от одной до четырех высших гармоник. Значения циклотронных энергий для разных пульсаров лежат в диапазоне от ≈ 11 до ≈ 50 кэВ (что соответствует разбросу магнитных полей от $\sim 1 \cdot 10^{12}$ до $\sim 5 \cdot 10^{12}$ Гс). На рис.4 приведены характерные энергетические спектры: рентгеновского пульсара V 0332+53 с подробно исследованной циклотронной линией и ее высшими гармониками [7, 8], и рентгеновского пульсара LMC X-4, для которого такая особенность пока не найдена — она либо очень слаба, либо находится в диапазоне энергий, где современные обсерватории имеют низкую эффективность [9].

Как было продемонстрировано в ряде работ [7, 10], энергия циклотронной линии поглощения может меняться в зависимости от собственной светимости источника. Связано это с изменением размера и геометрии аккреционных областей нейтронной звезды в зависимости от светимости пульсара. В частности, в работе [7] впервые было показано, что с уменьшением светимости источника V 0332+53 во время мощнейшей вспышки излучения (светимость в максимуме достигала $4 \cdot 10^{38}$ эрг·с⁻¹) значение циклотронной энергии в спектре пульсара увеличивается практически линейно (рис.5,а). Причем интересно и важно отметить, что закон, по которому происходило это изменение, оказался одинаковым как на стадии нарастания интенсивности вспышки, так и на стадии спада. Подобное поведение качественно можно объяснить в рамках описанной выше модели стро-

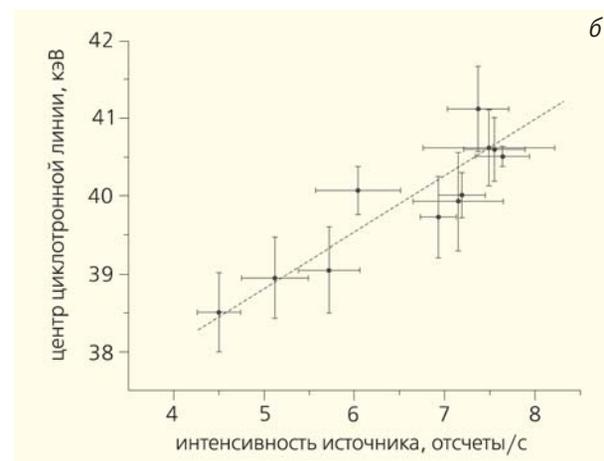
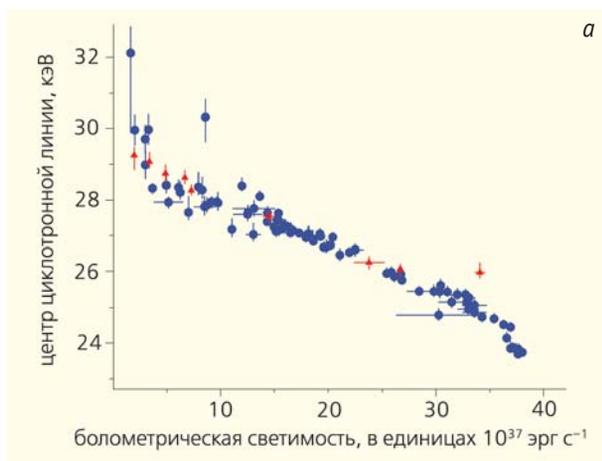


Рис.5. Зависимости положения линии циклотронного поглощения в спектре излучения от светимости пульсара во время всплеска излучения рентгеновского пульсара V 0332+53 в 2004—2005 гг. (а; для сравнения: светимость пульсара в максимуме превосходила светимость Солнца в 100 тыс. раз!) по данным обсерваторий RXTE (синие кружки) и ИНТЕГРАЛ (красные треугольники) и для пульсара Геркулес X-1 по данным девяти лет наблюдений обсерваторией RXTE (б) [11].

ения аккреционных колонок: при увеличении светимости (и, соответственно, темпа аккреции) высота аккреционной колонки увеличивается и все большая часть фотонов начинает поглощаться дальше от поверхности нейтронной звезды (см. рис.3), где напряженность магнитного поля заметно ниже (для дипольной конфигурации магнитного поля напряженность падает с расстоянием как $B \sim R^{-3}$). Следовательно, энергия циклотронной линии должна уменьшаться с ростом высоты аккреционной колонки. Таким образом, используя наблюдаемое изменение циклотронной энергии во время всплеска излучения от рентгеновского пульсара, мы можем оценить изменение высоты аккреционной колонки. В частности, для источника V 0332+53 это изменение в зависимости от светимости составило около $H \approx 1.2$ км (в предположении дипольной конфигурации магнитного поля), а максимальное значение циклотронной энергии оказалось равным около 32 кэВ (рис.5,а), что соответствует напряженности магнитного поля на поверхности нейтронной звезды $\sim 3 \cdot 10^{12}$ Гс [7, 8].

Буквально через год после этого открытия была обнаружена положительная корреляция циклотронной энергии со светимостью рентгеновского пульсара Геркулес X-1 [11]: в отличие от V 0332+53, с ростом темпа аккреции и светимости циклотронная частота у него растет (рис.5,б). Данный факт, казалось бы, полностью противоречит описанной выше картине. Однако в той же работе [11] было предложено изящное объяснение наблюдаемого эффекта, основанное на том, что светимость Геркулеса X-1 ($\sim 10^{37}$ эрг с^{-1}) недостаточна для возникновения аккреционной колонки. В таком случае атмосфера нейтронной звезды представляет собой тонкое кольцо (рис.3,а), высота которого будет уменьшаться при увеличении темпа аккреции за счет давления падающего вещества. Такая прямая корреляция между циклотронной энергией и светимостью будет наблюдаться до тех пор, пока не будет достигнута локальная эддингтоновская светимость. Затем начнет формироваться аккреционная колонка и циклотронная энергия станет уменьшаться с дальнейшим ростом светимости (как это наблюдается у V 0332+53). Эта критическая светимость, разделяющая два режима аккреции, — один из ключевых параметров для понимания физики нейтронных звезд; в настоящий момент ее стараются определить с помощью нескольких космических обсерваторий.

«Все течет, все изменяется»

Отличительная особенность рентгеновских пульсаров — высокая степень переменности их излучения на разных временных масштабах, от микросекунд до нескольких лет и более. Спектр мощности излучения компактных объектов (т.е. распределение мощности сигнала в зависимости от частоты)

служит важным источником информации о среде, генерирующей и распространяющей возмущения. Многое в наблюдаемом поведении излучения аккрецирующих компактных объектов может быть описано с помощью так называемой модели распространения возмущений [12]. В этой модели переменность наблюдаемого рентгеновского потока задается переменностью темпа аккреции в области основного энерговыделения компактного объекта. В свою очередь, переменность темпа аккреции оказывается следствием мультипликативной комбинации возмущений, возникающих на разных радиусах из-за случайных вариаций вязкости в аккреционном диске. В соответствии с этой моделью мощность излучения должна быть примерно обратно пропорциональна частоте вплоть до максимальной частоты возмущений, которые еще могут возникнуть в диске.

Рентгеновские пульсары в рассматриваемом контексте — уникальные объекты, так как из-за очень сильного магнитного поля имеют четкую внутреннюю границу аккреционного диска, которая как раз и ограничивает максимальную частоту возмущений. Исходя из этого и модели распространения возмущений, можно ожидать, что в спектре мощности существует излом на частоте, соответствующей характерной частоте переменности потока, которая генерируется на внутренней границе диска. Схематически описанная картина представлена на рис.6,а: до границы магнитосферы (соответствующей частоте f_b) спектр мощности следует обратно пропорциональной зависимости и объясняется моделью распространения возмущений; на радиусе магнитосферы аккреционный диск разрушается, и мощность сигнала уменьшается обратно пропорционально уже квадрату частоты [13].

Как оказалось, это свойство спектра мощности излучения рентгеновских пульсаров можно использовать для определения величины напряженности магнитного поля нейтронных звезд. Действительно, если размер магнитосферы меняется в зависимости от темпа аккреции во время упомянутых выше мощных всплесков транзиентных источников (т.е. источников, у которых интенсивность излучения может изменяться на несколько порядков величины), то частота излома в спектре мощности тоже должна меняться. При увеличении давления вещества в аккреционном диске размер магнитосферы (а соответственно, и внутреннего радиуса диска) уменьшается, а частота f_b растет. Поскольку эта частота пропорциональна кеплеровской частоте ν_k на внутреннем крае диска [13], мы можем связать ее значение с величиной напряженности магнитного поля нейтронной звезды и темпа аккреции на нее:

$$f_b \propto \nu_k \propto (GM)^{10/14} \mu^{-6/7} \dot{M}^{3/7}, \quad (2)$$

где G — гравитационная постоянная, M — масса нейтронной звезды, $\mu = BR^3/2$ — ее магнитный момент, \dot{M} — темп аккреции.

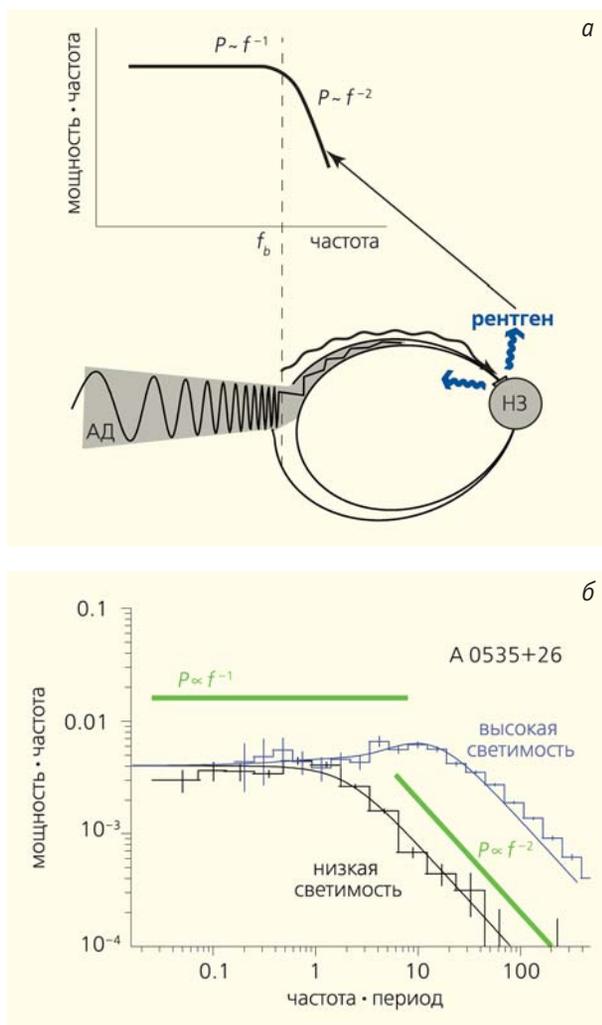


Рис.6. Спектр мощности излучения. Схематическое изображение переноса возмущений в аккреционном диске и переход в магнитосферное течение на частоте f_b , соответствующей внутренней границе диска (а). Спектр мощности пульсара А 0535+26 во время вспышки излучения (б): черной линией показаны измерения в состоянии с низкой светимостью, синей — в состоянии с высокой. Сокращения: АД — аккреционный диск, НЗ — нейтронная звезда.

В качестве примера использования данного метода на рис.6,б приведены спектры мощности излучения транзитного рентгеновского пульсара А 0535+26 в состоянии с низкой светимостью (порядка 10^{36} эрг/с; черная кривая) и с высокой (порядка 10^{37} эрг/с; синяя кривая). Видно, как частота излома смещается в соответствии с предсказанием, сделанным выше. Используя наблюдаемое смещение частоты и формулу (2), напряженность магнитного поля на поверхности нейтронной звезды можно оценить в $4\text{--}5 \cdot 10^{12}$ Гс, что совпадает со значением, которое получается из положения линии циклотронного поглощения, регистрируемой в спектре источника.

Неугомонные волчки

Из-за своей компактности нейтронные звезды обладают относительно небольшим моментом инерции (порядка 10^{45} г·см², что примерно соответствует моменту инерции Земли). В случае аккреции из диска, когда вещество, захватываемое магнитосферой нейтронной звезды, несет большой угловой момент, период собственного вращения нейтронной звезды очень чутко реагирует на изменение темпа аккреции. Ключевым вопросом при этом оказывается механизм передачи углового момента от падающего вещества нейтронной звезде и обратно (в случае замедления пульсара).

В качестве такого механизма было предложено взаимодействие аккрецируемой плазмы с магнитосферой нейтронной звезды [14]. Основная идея состоит в том, что если вещество в аккреционном диске на расстоянии R_m (радиус магнитосферы или альфеновской поверхности, см. выше) от нейтронной звезды имеет более высокую угловую скорость, чем сама звезда, то силовые линии магнитного поля, пересекающие аккреционный диск в этом месте, будут как бы цепляться за него и тем самым ускорять вращение самой звезды. В противном случае — когда скорость вращения звезды выше скорости вращения вещества в аккреционном диске — звезда будет отдавать избыток углового момента веществу. Схематически случай ускоряющегося вращения нейтронной звезды изображен на рис.7,а. Сплошной линией показан так называемый радиус коротации ($R_{кор}$), т.е. радиус, на котором скорость вращения магнитосферы (и самой звезды) совпадает с кеплеровской скоростью вещества на данном радиусе. Конфигурация «магнитосфера—аккреционный диск» в случае замедления пульсара (когда $R_m > R_{кор}$) показана на рис.7,б. Таким образом, будет ли ускоряться или замедляться собственное вращение нейтронной звезды, зависит от того, на каком расстоянии от нее ее магнитосфера взаимодействует с веществом. Это, в свою очередь, определяется радиусом магнитосферы, т.е. в конечном счете величиной магнитного поля нейтронной звезды.

Экспериментально уже давно показано, что период вращения рентгеновских пульсаров сильно меняется при изменении их светимости. Один из ярких примеров передачи углового момента нейтронной звезде показан на рис.8; он относится к системе ЕХО 2030+375 во время мощной вспышки излучения в июне—октябре 2006 г. Видно, как с увеличением светимости пульсара начинает резко уменьшаться период его пульсаций, т.е. собственное вращение ускоряется. Теоретические модели переноса углового момента способны предсказать скорость приращения периода исходя из магнитного поля, момента инерции и темпа аккреции на нейтронную звезду. В действительности же приращение периода легко измеряется в наблюдениях, тогда как напряженность магнит-

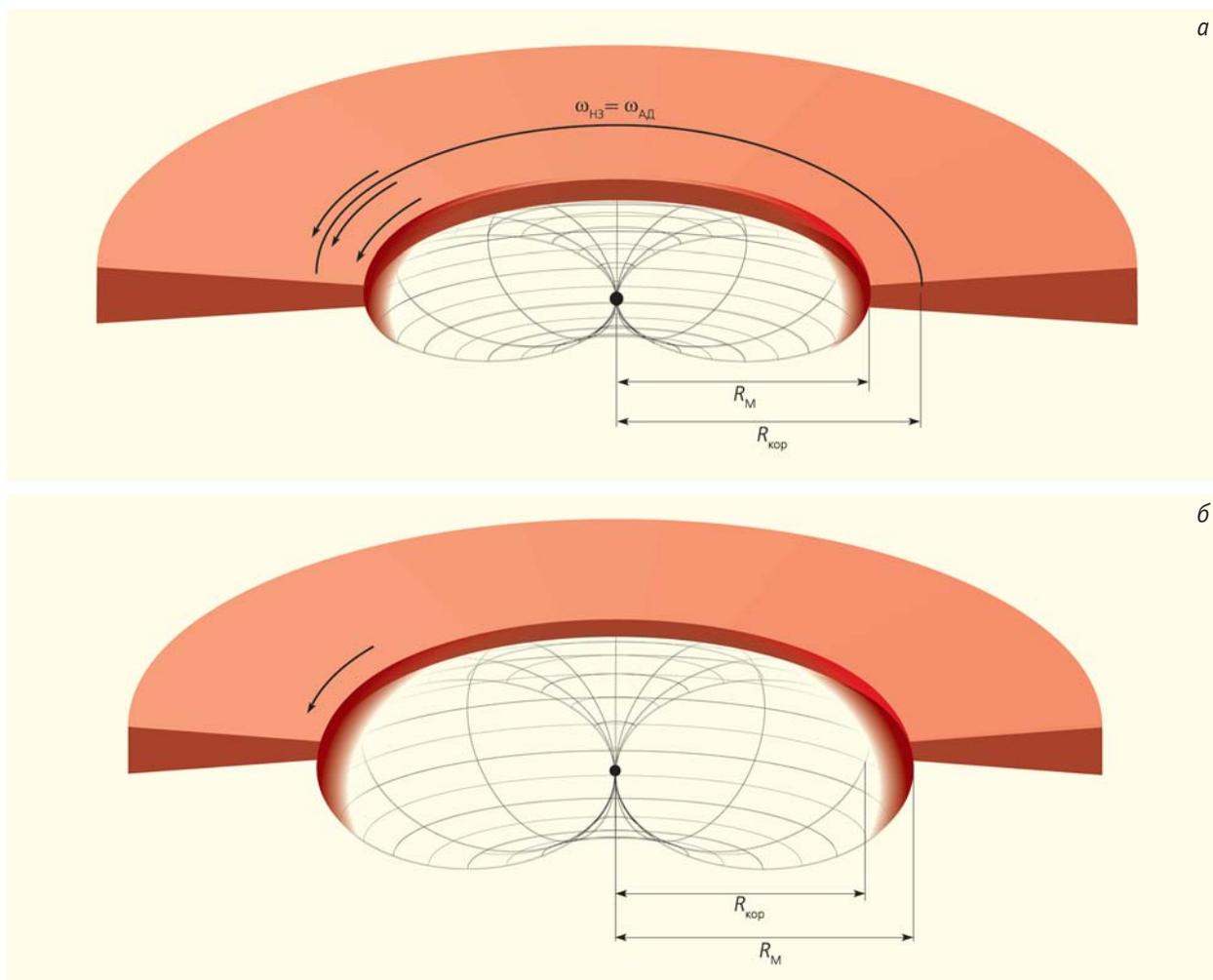


Рис.7. Схематическое изображение взаимодействия аккреционного диска с магнитосферой нейтронной звезды в случаях высокого ($R_m < R_{кор}$, а) и низкого ($R_m > R_{кор}$, б) темпа аккреции.

ного поля остается неизвестной величиной, если в спектре излучения пульсара не регистрируется линия циклотронного поглощения. Таким образом, имея достаточное количество измерений периода и интенсивности пульсара, мы можем оценить напряженность магнитного поля нейтронной звезды, а в некоторых случаях и расстояние d до системы (строго говоря, приборами регистрируется поток F , а не собственная светимость пульсара $L = 4\pi Fd^2$). Один из примеров удачного использования этого метода — определение для рентгеновского пульсара KS 1947+300 напряженности магнитного поля $2.5 \cdot 10^{13}$ Гс и расстояния до системы 9.5 кпс [15]. Полученное значение расстояния хорошо согласуется с результатами оптических наблюдений, а столь высокая напряженность магнитного поля объясняет отсутствие линии циклотронного поглощения в доступной для исследований области спектра (3–100 кэВ).

В действительности картина переноса углового момента гораздо сложнее. Например, до сих

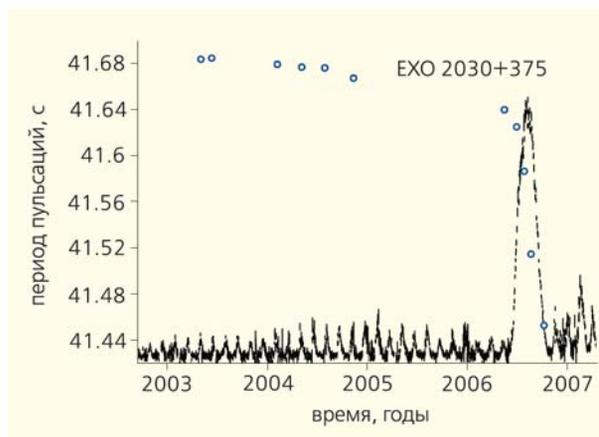


Рис.8. Зависимость периода пульсаций источника EXO 2030+375 от времени, измеренная по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ (синие кружки). Точками показан поток от пульсара. Видна яркая вспышка излучения в июне—октябре 2006 г.

пор не ясно, передается ли угловой момент вещества сразу всей звезде или только ее твердой коре, момент инерции которой может составлять ничтожную долю от полного углового момента звезды. Кроме того, остаются предметом для дебатов теоретиков и физические механизмы оттока углового момента от звезды.

Не точка, а многоточие

Несмотря на то что рентгеновские пульсары были открыты 40 лет назад, точным знанием их параметров, пониманием механизмов их формирования и излучения в зависимости от внешних факторов мы пока похвастаться не можем. Во многом это связано с тем, что единственная информация о космических источниках рентгеновского излучения, доступная наблюдателям, — энергия и время прихода фотонов от них. Здесь мы постарались показать на примере рентгеновских пульсаров, что, обладая даже такой ограниченной информацией, можно исследовать и получать конкретные физические параметры объектов, которые невозможно напрямую наблюдать в оптические телескопы

с Земли. В частности, для объектов, находящихся на расстояниях нескольких или даже десятков килопарсек, удается отслеживать изменения их геометрии с точностью до сотен метров и изучать эффекты взаимодействия излучения с веществом в таких экстремальных состояниях, которые никогда не будут доступны экспериментаторам в земных лабораториях.

Все это стало возможным благодаря бурному развитию космического приборостроения в последнее десятилетие, особому вниманию, уделяемому внеатмосферным исследованиям космоса во всем мире, и, как следствие, целой череде успешных запусков рентгеновских обсерваторий. Но ученые не собираются останавливаться на достигнутом: в ближайшие несколько лет запланированы запуски обсерваторий нового поколения — таких как NuSTAR (США), NEXT (Япония), «Спектр-Рентген-Гамма» (Россия), чувствительность которых в жестких рентгеновских лучах (в диапазоне энергий ~20–80 кэВ) будет почти на два порядка выше чувствительности обсерватории ИНТЕГРАЛ. Так что впереди нас ждет еще много разгадок тайн Вселенной, в том числе и ее магнитных сердец. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 07-02-01051, и государственным контрактом 14.740.11.0611.

Литература

1. *Giacconi R., Gursky H., Paolini F.R., Rossi B.B.* // *Physical Review Letters*. 1962. V.9. P.439—443.
2. *Shakura N., Sunyaev R.* // *Astron. and Astrophys.* 1973. V.24. P.337—355.
3. *Basko M.M., Sunyaev R.A.* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1976. V.175. P.395—417.
4. *Lutovinov A., Revnivtsev M., Gilfanov M. et al.* // *Astron. and Astrophys.* 2005. V.444. P.821—829.
5. *Лутовинов А.А., Цыганков С.С.* // Письма в «Астрономический журнал». 2009. Т.35. С.483—506.
6. *Truemper J., Pietsch W., Reppin C. et al.* // *Astrophysical Journal Letters*. 1978. V.219. P.105—110.
7. *Tsygankov S.S., Lutovinov A.A., Churazov E.M., Sunyaev R.A.* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2006. V.371. P.19—28.
8. *Tsygankov S.S., Lutovinov A.A., Serber A.V.* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2010. V.401. P.1628—1635.
9. *Цыганков С.С., Лутовинов А.А.* // Письма в «Астрономический журнал». 2005. Т.31. С.427—436.
10. *Цыганков С.С., Лутовинов А.А., Чуразов Е.М., Сюняев Р.А.* // Письма в «Астрономический журнал». 2007. Т.33. С.417—434.
11. *Staubert R., Shakura N.I., Postnov K. et al.* // *Astron. and Astrophys.* 2007. V.465. P.25—28.
12. *Lyubarskii Yu.E.* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1997. V.292. P.679—685.
13. *Revnivtsev M., Churazov E., Postnov K., Tsygankov S.* // *Astron. and Astrophys.* 2009. V.507. P.1211—1215.
14. *Lovelace R., Romanova M., Bisnovatyi-Kogan G.* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1995. V.275. P.244—254.
15. *Цыганков С.С., Лутовинов А.А.* // Письма в «Астрономический журнал». 2005. Т.31. С.99—109.