РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Цыганков Сергей Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ АККРЕЦИРУЮЩИХ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД С СИЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ ОБСЕРВАТОРИЙ

01.03.02 Астрофизика и радиоастрономия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель кандидат физ.-мат. наук Лутовинов А.А.

Москва 2007 Огромное спасибо моему научному руководителю Александру Анатольевичу Лутовинову.

Диссертация является результатом работы в Отделе Астрофизики Высоких Энергий Института Космических Исследований РАН. Автор благодарен коллективу отдела и его руководителю, академику РАН Рашиду Алиевичу Сюняеву, за внимание к работе и неоценимую помощь.

Особую благодарность автор выражает своей семье за поддержку и терпение.

Оглавление

Вв	веден	ие	5
06	бсерв	атория ГРАНАТ. Телескоп АРТ-П	11
06	бсерв	атория ИНТЕГРАЛ	13
06	бсерв	атория RXTE	19
1	Дол	говременная переменность и магнитное поле пульсара SMC X-1	23
	1.1	Введение	23
	1.2	Наблюдения	24
	1.3	Долговременные изменения интенсивности. Всплески	26
	1.4	Спектральный анализ	30
	1.5	Обсуждение	33
		1.5.1 Высокое и низкое состояние	33
		1.5.2 Магнитное поле	34
	1.6	Заключение	35
_	_		
2	Пер	еменность звездного ветра в системе GX 301-2/Wray 977 по данным теле-	07
	скоп	а АРТ-П обсерватории ГРАНАТ	37
	2.1	Введение	37
	2.2	Временной анализ	38
	2.3	Спектроскопия	43
	2.4	Оценка параметров звездного ветра	44
	2.5	Заключение	50
ર	Лол	горременные наблюдения рентгеновского пульсара IMC Х-4 обсерратори-	
U	ями	ИНТЕГРАЛ и RXTE	51
	3.1	Ввеление	51
	3.2	Наблюдения	52
	3.3	Временной анализ	53
	0.0	331 Период прецессии	53
		332 Орбитальный периол	56
		333 Всплески излучения	58
	34	Спектральный анализ	59
	3.5	Заключение	61
	0.0	outsito tenne	01

4	Магнитное поле и расстояние до рентгеновского пульсара KS 1947+300	63
	4.1 Введение	63
	4.2 Наблюдения	64
	4.3 Временной анализ	65
	4.4 Спектральный анализ	
	4.5 Обсуждение	75
	4.5.1 Эволюция профиля импульса	75
	4.5.2 Циклотронные линии и магнитное поле	76
	4.5.3 Эволюция периода пульсаций	76
	4.6 Заключение	78
5	V 0332+53 во время вспышки 2004-2005 гг.: зависимость шиклотронной часто	оты
Ū	и профиля импульса от светимости пульсара	79
	5.1 Введение	
	5.2 Наблюдения	80
	5.3 Кривая блеска	80
	5.4 Спектральный анализ	83
	5.5 Профиль импульса	87
	5.6 Обсуждение	
	5.6.1 Циклотронная линия	
	5.6.2 Профиль импульса	
	5.7 Заключение	
c		
0	40 0115+65 по данным оосерватории КАТЕ и ИПТЕГРАЛ: вариации цик тронной частоты и формы профиля импульса	ло- 97
	6.1 Ввеление	
	6.2 Результаты и обсуждение	101
	6.2.1 Профиль импульса	101
	6.2.2 Спектральный анализ	111
	6.3 Заключение	120
_		
7	Жесткие спектры рентгеновских пульсаров по данным обсерватории ИН	ΓE- 191
		121
	7.1 DBedenue	121
	<i>1.2</i> паолюдения	122
	7.5 Анализ данных	122
	7.4 Результаты	124
	1.Э Эаключение	139
За	ключение	145
Ли	птература	147

4

Введение

Гипотеза о существовании нейтронных звезд – объектов с очень высокими плотностями и малыми радиусами, – была высказана астрономами Вальтером Бааде и Фрицом Цвикки в начале 30-х годов прошлого века (Бааде, Цвикки, 1933), вскоре после открытия нейтрона. Однако из-за малой площади поверхности их остаточное тепловое излучение оказывалось слишком слабым для наблюдений с помощью оптических телескопов. Все изменилось в 1967 г., когда английские ученые обнаружили на небе радиосигнал, возникающий с очень высокой периодичностью (Хьюиш и др., 1968). Источник данного сигнала был интерпретирован как быстро вращающаяся нейтронная звезда – пульсар. Запущенный в 1970 г. спутник UHURU обнаружил пульсирующее излучение компактных рентгеновских источников – рентгеновских пульсаров, представляющих собой нейтронные звезды, находящиеся в тесных двойных системах и аккрецирующие вещество от своего нормального звездного компаньона (Шрейер и др., 1972).

В настоящее время известно около 100 рентгеновских пульсаров, находящихся в двойных системах. Основным механизмом, способным обеспечить наблюдаемую у них высокую светимость ($L \sim 10^{35} - 10^{38}$ эрг/с) является аккреция вещества. Считается, что пульсации рентгеновского излучения связаны с тем, что в состав таких систем входят нейтронные звезды с сильным магнитным полем ($B \sim 10^{12}$ Гс). При таких значениях магнитного поля (которое в первом приближении имеет форму диполя) существует некоторый радиус R_A (называемый альвеновским), на котором давление падающего вещества уравновешивается давлением магнитного поля нейтронной звезды. Вещество не может проникнуть внутрь магнитосферы, вмораживается и стекает по силовым линиям в область полюсов, образуя на поверхности нейтронной звезды два горячих пятна, в которых захваченное вещество освобождает свою гравитационную энергию, которая высвечивается в рентгеновском и гамма-диапазонах (см. рис. 1). При соответствующей ориентации оси магнитного диполя относительно оси вращения, эти пятна будут периодически появляться на луче зрения, демонстрируя пульсации излучения. Звездами-компаньонами в таких источниках являются звезды ранних спектральных классов (О-В и Ве), поэтому в этих системах, как правило, присутствует сильный звездный ветер, из которого и происходит аккреция, хотя в ряде случаев может образовываться аккреционный диск, наблюдаться двухпотоковая аккреция и т.д., причем на разных стадиях эволюции пульсара тип ак-



Рис. 1. X-Z сечение аккреционного канала для угла наклона магнитной оси $\Theta = 15^{\circ}$. Контурами показано распределение плотности в потоке. (Рисунок взят из работы Романовой и др. (2004))

креции может меняться. В соответствии с этим различаются и наблюдательные проявления источников.

Кривые блеска пульсара, его период и профиль импульса, энергетический спектр и их переменность на различных временных масштабах – это единственная информация которая доступна наблюдателю и которая может дать представление о параметрах нейтронной звезды, о механизмах формирования излучения, о его взаимодействии с окружающей материей, о конкретном состоянии вещества на разных расстояниях от нейтронной звезды, а также может быть использована иля сравнения с существующими и разработки новых теоретических моделей.

Конечно, описанная выше картипа аккреции является очень упроценной и схематичной; в действительности она оказывается гораздо сложнее и интереснее, о чем товорит, например, огромное разнообразие фазовых кривых блеска (профилей импульса) рентгеновских пульсаров. За время исследования этих объектов разными авторами было сделано множество попыток систематизировать и объяснить наблюдаемые формы профилей импульса, однако, каждый раз находились источники, не описывающиеся существующими моделями. Так, например, согласно классификации Булика и др. (2003) каждый пульсар может быть отнесен либо к одно, либо к двух пиковому подклассу профилей. Такая классификация основана на том факте, что в процессе вращения нейтронной звезды наблюдатель видит либо один, либо два магнитных полюса, соответственно. Причем на малых энергиях это различие может быть не столь явным, однако выше ~ 10 кэВ, или в случае пульсаров с циклотронной особенностью – выше циклотронной энергии, можно четко разделить одно и двух пиковые профили.

Однако, как было показано в ряде, в том числе и более ранних, работ (см., например, Ванг и Велтер, 1981, Вайт и др., 1983), профили импульса не просто обладают большим разнообразием форм в зависимости от светимости, но и могут в некоторых случаях смещаться вплоть до 180° по фазе с изменением энергетического диапазона (даже в жестких каналах). Кроме зависимости формы профилей импульса от энергетического диапазона и собственной светимости источника, они также обладают переменностью на масштабе одного импульса (см., например, Фронтера и др., 1985, Цыганков и др., 2007).

В работах Баско и Сюняева (1976а,6) было показано, что направленность излучения вещества вблизи полярных шапок коренным образом зависит от наличия ударной волны в аккреционной колонке нейтронной звезды. Для ситуации высокой светимости ($\gtrsim 10^{37}$ эрг/с) влиянием излучения на падающее вещество пренебрегать нельзя и над поверхностью нейтронной звезды возникает ударная волна, в которой происходит торможение падающего вещества. Излучающая плазма медленно оседает в зоне под ударной волной; излучение, в основном, выходит через боковые стенки аккреционной колонки и имеет пропеллерную диаграмму направленности. В случае более низких светимостей ($<10^{37}$ эрг/с) вещество тормозится непосредственно вблизи поверхности нейтронной звезды и карандашная диаграмма направленности излучения будет более вероятна. При некоторых промежуточных светимостях диаграмма направленности будет представлять из себя комбинацию пропеллерной и карандашной, также она может меняться в зависимости от энергетического диапазона (Вайт и др., 1983).

Из всего вышесказанного становится понятно, что исследование свойств профиля импульса и его эволюции может дать представление не только о геометрии системы, но и о конкретных физических процессах и условиях вблизи поверхности нейтронных звезд. Вопрос переменности профиля импульса в зависимости от времени, светимости и энергетического диапазона рассмотрен в главах 2, 4, 5 и 6 настоящей диссертации на примере некоторых пульсаров. В частности, для пульсара V0332+53 был обнаружен резкий переход от двухпиковой формы профиля к однопиковой в районе циклотронной частоты, а также смещение пиков по фазе вплоть до 180°. Значительные изменения формы профиля импульса обнаружены в пульсарах KS1947+300 и 4U0115+63. В последнем найдена значительная переменность профиля на масштабе периода вращения нейтронной звезды.

Важным инструментом в исследовании свойств магнитосферы нейтронных звезд является наблюдение зависимости частоты собственного вращения от светимости пульсара. Во время вспышек у рентгеновских пульсаров происходит значительное увеличение темпа аккреции вещества на нейтронную звезду. В таком случае можно наблюдать ускорение вращения пульсара, что связано с увеличением количества вращательного момента, переданного аккрецируемым веществом нейтронной звезде; при этом решающую роль играет величина магнитного поля нейтронной звезды (Гош, Лэмб, 1979).

Корреляция между темпом изменения периода импульса и рентгеновской светимостью во время вспышек установлена к настоящему моменту у целого ряда транзиентных источников (см., например, Галловей и др. 2004, Байкал и др., 2002 и ссылки там). Используя такую зависимость при исследовании пульсара KS1947+300, были определены расстояние до двойной системы и величина магнитного поля на поверхности нейтронной звезды (см. главу 4).

Для определения собственного периода пульсаций время прихода каждого фотона корректировалось на движение космического аппарата вокруг Земли, Земли вокруг Солнца и нейтронной звезды в двойной системе. Последний шаг выполнялся, используя формулу (1), и позволял кроме определения собственного периода также уточнить орбитальные параметры двойной системы.

$$t_n = T_0 + \sum_n P_n + \frac{a_x \sin i}{c} (1 - e^2) \frac{\sin(\nu + \omega)}{1 + e \cos \nu},\tag{1}$$

где t_n – время прихода n-ого импульса, T_0 – временная эпоха, $\sum_n P_n$ – сумма n периодов пульсаций, $a_x sini$ – проекция большой полуоси орбиты, e – эксцентриситет, ω – долгота прохождения периастра, ν – истинная аномалия.

Единственным непосредственным методом измерения величины магнитного поля нейтронной звезды является регистрация циклотронных линий (Гнедин, Сюняев 1974) в спектре рентгеновских пульсаров.

Электроны, находящиеся в магнитном поле *B*, будут двигаться по спирали вдоль магнитных силовых линий с Ларморовской частотой:

$$\omega_c = \frac{eB}{\gamma mc},\tag{2}$$

где γ – Лоренц-фактор.

При этом движение электронов в направлении, перпендикулярном магнитному полю, квантовано на эквидистантные уровни (уровни Ландау):

$$\hbar\omega_n = n\hbar\omega_c \tag{3}$$

Некоторое отклонение ($\leq 10\%$) от гармонического распеределения уровней Ландау появляется при учете релятивистских поправок (Хардинг, Доэрти, 1991):

$$\hbar\omega_n = mc^2 \frac{\sqrt{mc^2 + 2n\hbar\omega_c \sin^2\theta} - 1}{\sin^2\theta},\tag{4}$$

где θ – угол между лучем зрения и магнитным полем *B*.

Из формулы (2) вытекает простое соотношение между наблюдаемой циклотронной особенностью в спектре источника и величиной магнитного поля: $E = 11.6 \times B_{12} \times (1+z)^{-1}$ кэВ, где B_{12} - напряженность магнитного поля в единицах 10^{12} Гс, z - гравитационное красное смещение. Впервые этим методом было измерено магнитное поле у пульсара Her X-1 (Трюмпер и др. 1978).

Подробные исследования поведения циклотронной линии в зависимости от светимости проведено в главах 5 и 6 для пульсаров V0332+53 и 4U0115+63, соответственно. Впервые показано, что основная частота этой линии не является постоянной, а увеличивается с уменьшением светимости источника V0332+53 по такому же закону, как и высота ударной волны в аккреционной колонке. В случае пульсара 4U0115+63 зависимость циклотронной энергии от светимости также присутствует, однако является существенно более сложной. На основании полученных результатов и теории Баско и Сюняева (1976а) сделано заключение относительно свойств аккреционных колонок на полюсах нейтронной звезды.

Несмотря на длительное время изучения, до сих пор не существует убедительной и легко параметризуемой теоретической модели, описывающей спектр аккрецирующих рентгеновских пульсаров. Наиболее распространенная модель, используемая при аппроксимации, дает форму спектра в виде степенного закона с экспоненциальным завалом (Вайт и др., 1983, см. ниже). Для создания физически обоснованной модели необходим анализ излучения большого числа рентгеновских пульсаров, находящихся в различных состояниях по интенсивности и входящих в состав двойных систем разных классов.

В главе 7 представлен каталог жестких спектров рентгеновских пульсаров, наблюдавшихся обсерваторией ИНТЕГРАЛ с декабря 2002 г. по январь 2005 г. Представлены спектры 35 аккрецирующих рентгеновских и одного миллисекундного пульсаров. Среди исследованных пульсаров присутствуют 7 недавно открытых объектов этого класса: 2RXP J130159.6-635806, IGR/AX J16320-4751, IGR J16358-4726, AX J163904-4642, IGR J16465-4507, SAX/IGR J18027-2017, AX J1841.0-0535. Также впервые получены спектры аккрецирующих пульсаров A 0114+650, RX J0146.9+6121, AX J1820.5-1434 и AX J1841.0-0535 в жестком рентгеновском диапазоне энергий (> 20 кэВ). Одной из целей создания данного каталога был поиск циклотронных особенностей в спектрах тех пульсаров, где такая особенность до сих пор не наблюдалась (см., например, главы 1 и 3).

Одной из основных моделей, используемых в диссертации при аппроксимации наблюдаемых спектров излучения рентгеновских пульсаров, являлась стандартная для объектов этого класса эмпирическая модель, включающая в себя степенной закон с завалом на высоких энергиях (Вайт и др. 1983):

$$PLCUT(E) = AE^{-\alpha} \times \begin{cases} 1 & (E \le E_{cut}) \\ exp^{-(E-E_{cut})/E_{fold}} & (E > E_{cut}), \end{cases}$$
(5)

где α – фотонный индекс, E_{cut} и E_{fold} – энергия слома и характерная энергия завала спектра, соответственно. Для некоторых пульсаров, при аппроксимации спектров которых моделью (5) не удавалось получить разумно ограниченное значение параметра E_{cut} , использовалась модель, которая имеет следующий вид:

$$CUTOFF(E) = AE^{-\alpha} \times exp^{-E/E_{fold}}.$$
(6)

В некоторых случаях стандартная модель не совсем корректно описывает форму спектра пульсара из-за наличия в нем особенностей поглощения или излучения, поэтому при аппроксимации в модель вводились дополнительные компоненты:

фото-электронное поглощение на низких энергиях, которое описывается формулой:

$$WABS(E) = exp(-N_H \times \sigma(E)), \tag{7}$$

где $\sigma(E)$ - сечение процесса (Моррисон, МакКамон 1983);

эмиссионная линия железа, описываемая профилем Гаусса:

$$GAUS(E) = \frac{A}{\sqrt{(2\pi)\sigma_{Fe}}} \times exp(-0.5[(E - E_{Fe})/\sigma_{Fe}]^2),$$
(8)

где *Е_{Fe}*- центр линии, σ_{Fe} – ширина линии;

резонансная линия циклотронного поглощения в форме профиля Лоренца, модель которой имеет следующий вид:

$$CYCL(E) = exp\left(\frac{-\tau_{cycl}(\sigma_{cycl}E/E_{cycl})^2}{(E-E_{cycl})^2 + \sigma_{cycl}^2}\right),\tag{9}$$

где E_{cycl} - центр линии, τ_{cycl} - глубина линии, σ_{cycl} - ширина линии.

В зависимости от конкретного источника и его состояния для аппроксимации спектра его излучения использовались приведенные выше спектральные компоненты в различных комбинациях.

Обсерватория ГРАНАТ. Телескоп АРТ-П

1 декабря 1989 г. ракетой-носителем ПРОТОН была выведена на высокоапогейную орбиту, – период 96 ч, апогей 200000 км, перигей 2000 км, наклонение 51.6°, – международная астрофизическая обсерватория ГРАНАТ. В ее состав входило несколько научных приборов, основными из которых были два – рентгеновский телескоп АРТ-П (Сюняев и др.,1990), разработанный в СССР и эффективно регистрирующий фотоны с энергией 2 – 60 кэВ, и французский телескоп СИГМА, предназначенный для работы в жестком диапазоне энергий 30 – 1500 кэВ (Поль и др., 1991). Именно эти два прибора предназначались для выполнения основной задачи миссии – длительному (24 часа и более) наблюдению источников рентгеновского и гамма-излучения в широком диапазоне энергий с угловым разрешением несколько угловых минут и временным разрешением порядка миллисекунды. На рис. 2 показан общий вид обсерватории ГРАНАТ, а стрелкой указан телескоп АРТ-П.

Телескоп АРТ-П состоит из четырех сонаправленных, полностью идентичных модулей, каждый из которых имеет геометрическую площадь 625 см² и включает в себя многопроволочную пропорциональную камеру, коллиматор, блок электроники и маску, поддерживаемую легкой фермой из углепластика. Маска сделана из меди толщиной 1.5 мм и состоит из 16 одинаковых мотивов размером 43×41 элемент, построенных на основе URA-последовательностей. Телескоп АРТ-П имеет канал для обмена информацией с телескопом СИГМА. По этому каналу осуществляется передача научной информации из АРТ-П в долговременную память на цилиндрических магнитных доменах телескопа СИГ-МА. Кроме того, по этому же каналу принимаются данные от звездного датчика, определяющего мгновенную ориентацию космического аппарата с точностью ≤ 1′.

Наблюдения проводились в режиме "поток фотонов", при котором для каждого фотона в буферную память прибора записывались его координаты на детекторе (с точностью ~0.5 мм), энергия (1024 канала) и время прихода (с точностью 1/256 с). Такой режим позволяет проводить как временной, так и спектральный анализ излучения каждого рентгеновского источника, находящегося в поле зрения телескопа.

Передача данных в основную память проводилась после заполнения буфера



Рис. 2. Орбитальная астрофизическая обсерватория ГРАНАТ. Стрелочкой показан телескоп АРТ-П.

(один раз за 100-200 сек) в течении \sim 30 сек, в результате чего записанная информация имеет вид отдельных экспозиций с разрывами между ними. Космический аппарат стабилизирован с точностью порядка \pm 30 мин. дуги. В результате его качания в этих пределах поток от источника модулируется с характерным временем 900–1100 с функцией пропускания коллиматора. При анализе данных телескопа АРТ-П вводились поправки на этот эффект.

Основные технические характеристики телескопа АРТ-П приведены ниже.

Параметр	Величина
Диапазон для спектрометрии и временного анализа	2.5-100 кэВ
Диапазон для построения изображения	2.5-60 кэВ
Поле зрения	$3^{\circ}4 \times 3^{\circ}6$
Угловое разрешение	5.2'
Точность локализации	$\sim 1'$
Эффективная площадь каждого детектора	$625/2=312.5$ см 2
Расстояние между маской и детектором	1320 мм
Давление	1.2–1.5 атм
Газовая смесь	85%Xe+10%Ar+5%CO ₂
Энергетическое разрешение	25% на 5.9 кэВ
Временное разрешение	$\sim 3.9~{ m mc}$
Мертвое время	$580~\mu c$

Обсерватория ИНТЕГРАЛ

17 октября 2002 года с космодрома Байконур был успешно осуществлен старт тяжелой ракеты-носителя ПРОТОН с международной астрофизической обсерваторией гамма-лучей ИНТЕГРАЛ (Винклер и др., 2003).

После ряда маневров, осуществлявшихся с помощью собственных двигателей аппарата, ИНТЕГРАЛ занял высокоапогейную орбиту с перигеем 9300 км и апогеем 153000 км. Столь вытянутая орбита позволяет проводить со спутника практически непрерывные наблюдения (85% времени) в условиях постоянного фона вне радиационных поясов Земли.

Проект ИНТЕГРАЛ (Международная Астрофизическая Лаборатория Гамма-Лучей) направлен на проведение сверхтонкой (E/ δ E=500) гаммаспектроскопии космического излучения и построение детальных изображений неба в диапазоне энергий от 15 кэВ до 10 МэВ с одновременным мониторингом космических источников в рентгеновском (3-35 кэВ) и оптическом (V-полоса, 550 нм) диапазонах. Для решения основных научных задач обсерватория оснащена четырьмя телескопами (см. рис. 3).

Телескоп IBIS (Imager on Board the INTEGRAL Satellite). Телескоп IBIS (Убертини и др., 2003) обеспечивает получение гамма-изображений с более высоким разрешением, нежели любые предшествующие приборы работавшие в жестком диапазоне энергий, и обеспечивает локализацию источников излучения с точностью до 30 угловых секунд.

Угловое разрешение телескопа определяется, в основном, пространственным разрешением массива детекторов, т.к. дифракцией в рассматриваемом диапазоне длин волн можно пренебречь. Угловое разрешение телескопа с кодирующей апертурой определяется соотношением между размером элемента маски кодирующей апертуры (11.2 мм) и расстоянием между апертурой и массивом детекторов (3133 мм). Телескоп чувствителен к фотонам с энергиями от 15 кэВ до 10 МэВ и состоит из детектора и вольфрамовой кодирующей маски, которая поднята над детектором на 3.2 метра. В детекторе используется два слоя чувствительных элементов, один слой расположен поверх другого. Верхний слой, включающий в себя 16384 кадмий-теллуровых (Cd-Te) элемента, позволяет обнаруживать низкоэнергичные гамма-лучи (15-200 кэВ). Второй слой состоит из 4096 цезий-йодных (Csl) элементов и обеспечивает регистрацию высокоэнергичных гамма-квантов.



Рис. 3. Бортовая аппаратура обсерватории ИНТЕГРАЛ.

В жестком рентгеновском диапазоне апертура детектора ограничена пассивной защитой, закрывающей весь объем от детекторных пластин до кодирующей маски. Активная система защиты, собранная на основе BGO сцинтилляторов, закрывает детекторы снизу и пространство между детекторами с четырех сторон.

В диссертации много внимания уделялось спектральному и временному исследованию излучения, регистрируемого от рентгеновских пульсаров. В зависимости от конкретной задачи, использовались те методы и программное обеспечение, которые наиболее хорошо отвечают поставленным задачам.

Для спектрального анализа излучения, регистрируемого телескопом IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ использовалось математическое обеспечение и методы, разработанные в Институте космических исследований РАН (Москва, Россия) и описанные в работе Ревнивцева и др. (2004). Для каждого отдельного сеанса наблюдений энергии зарегистрированных событий вычислялись аналогично процедуре, используемой в стандартном программном обеспе-



Рис. 4. Энергетический спектр Крабовидной туманности. Сплошная линия - результаты наилучшей аппроксимации спектра степенным законом со следующими параметрами $\alpha = 2.130 \pm 0.008$, *Norm* = 11.27 ± 0.35 . Ошибки даны на уровне одного стандартного отклонения.

чении миссии OSA, предоставляемого Центром данных обсерватории ИНТЕ-ГРАЛ (http://isdc.unige.ch). Далее, события, аккумулированные в детекторных координатах, были отфильтрованы на наличие "горячих" или "мертвых" пикселов, что привело к отсеиванию нескольких процентов пикселов детектора.

Для того чтобы учесть пространственно неоднородный фон детектора, была вычислена соответствующая матрица весов. Фон, использованный для вычисления такой матрицы, был получен в результате анализа большого массива наблюдений пустых полей на небе.

Анализ большого набора наблюдений Крабовидной туманности с различными положениями этого источника в поле зрения телескопа показал, что при использовании описываемого программного обеспечения остаются систематические неопределенности абсолютного значения измеренного потока источников на уровне $\sim 10\%$. Неопределенности в получаемых энергетических спектрах источников, связанные с эволюцией фона детектора и его характеристик, не превышают $\sim 3\%$. Последняя величина была добавлена в качестве систематической неопределенности при спектральном анализе в пакете программ XSPEC.

На рис. 4 в качестве примера показан энергетический спектр Крабовидной туманности, восстановленный этим методом по данным 170 орбиты. Матрица отклика строилась по данным 102 орбиты. При аппроксимации этого спектра степенным законом была добавлена систематическая ошибка 3%, получены сле-

дующие значения параметров: фотонный индекс $\alpha = 2.13 \pm 0.02$, нормировка *Norm* = 11.27 ± 0.35. Все ошибки, приведенные в данной диссертации, являются статистическими и даны на уровне одного стандартного отклонения.

Для временного анализа излучения выполнялись первые три шага стандартного пакета OSA (COR, GTI, DEAD), затем с помощью программы из пакета OSA *events_extract* с пикселов детектора, засвеченных источником, отбирались фотоны с заданной энергией, попутно осуществляя коррекцию времен их прихода на барицентр Солнечной системы. Такой простой, но эффективный способ аккумулирования фотонов от источника выбирался, когда не требовалось коррекции потока от источника на фоновое излучение. Когда же требовалось исследование количественных характеристик пульсирующего излучения, то использовалась программное обеспечение, разработанное и поддерживаемое специалистами из Национального Астрофизического Института в г. Палермо, Италия (http://www.pa.iasf.cnr.it/~ferrigno/INTEGRALsoftware.html); описание методики обработки научных данных также может быть найдено в работе Минео и др. (2006). Дальнейший анализ (определение периода пульсаций, построение собственно профиля импульса, определение доли пульсирующего излучения) проводился с помощью пакета FTOOLS.

Параметр	Величина
Рабочий диапазон энергии	15 кэВ – 10 МэВ
Энергетическое разрешение (FWHM)	7% на 100 кэВ
	9% на 1 МэВ
Эффективная площадь	ISGRI: 960 см ² на 50 кэВ
	PICsIT: 870 см ² на 300 кэВ
Поле зрения	9°× 9°(полное кодирование)
-	19°× 19°(част. кодиров., 50%)
Угловое разрешение (FWHM)	12'
Точность локализации точечного ист-ка	30″ на 100 кэВ
(90% радиус ошибок)	60″ на 1 МэВ
Чувствительность в континууме	$3.8 imes 10^{-7}$ на 100 кэВ
фотонов см $^{-2}$ сек $^{-1}$ кэ B^{-1}	$1-2{ imes}10^{-7}$ на 1 МэВ
(значимость детектирования 3σ , $\Delta E = E/2$,	
период накопления сигнала 10 ⁶ сек)	
Чувствительность в линии	$1.3 imes 10^{-5}$ на 100 кэ ${ m B}$
фотонов см $^{-2}$ сек $^{-1}$	$4 imes 10^{-5}$ на 1 МэВ
$(3\sigma$, период накопления сигнала 10^6 сек)	
Абсолютная временная точность (3 σ)	ISGRI: 61 μ c
	PICsIT: 0.976 - 500 мс

Технические характеристики телескопа IBIS:

Спектрометр SPI (SPectrometer on INTEGRAL). Спектрометр SPI (Ведренне и др., 2003) обеспечивает высокоточное измерение энергии гаммаизлучения. По своей чувствительности этот прибор намного превосходит все существовавшие до сих пор измерительные устройства. SPI используется для анализа гамма-источников в диапазоне энергий от 20 кэВ до 8 МэВ. Он состоит из 19 шестиугольных регистрирующих элементов, изготовленных из германия высокой чистоты и охлаждаемых до температуры минус 183 градуса Цельсия (90 градусов по шкале Кельвина).

Оптический монитор ОМС. С помощью оптического монитора ОМС аппарат ИНТЕГРАЛ автоматически производит синхронный мониторинг оптического излучения, исходящего от источников гамма- и рентгеновского излучения.

Монитор рентгеновских лучей JEM-X (Joint European X-Ray Monitor). JEM-X (Лунд и др. 2003) играет главную роль в обнаружении и отождествлении гамма-источников. Монитор осуществляет наблюдения синхронно с другими приборами и способен работать в диапазоне энергий от 3 до 35 кэВ. Как и телескоп IBIS и спектрометр SPI монитор JEM-X представляет из себя телескоп с кодирующей апертурой, однако обладает более высоким угловым разрешением, что помогает при идентификации источников, находящихся в густонаселенных областях неба.

Каждый из детекторов JEM-X представляет собой заполненную газом микрополосковую камеру, площадь которой составляет 500 см². Газ, заполняющий каждую из камер, представляет из себя смесь ксенона (90%) и метана (10%), находящуюся под давлением в 1.5 бар. Входящие фотоны претерпевают фотонноэлектронное поглощение в ксеноне, вызывая появление облака йонов. Это облако ускоряется и растет в йонной лавине, возникающей в сильном электрическом поле, создаваемом в области микрополосковых анодов, и вызывает появление на аноде электронного импульса. Положение возникновения лавины йонов по направлению, перпендикулярному микрополосковым анодам, определяется по центроиду зарегистрированного заряда. Другая координата события вычисляется по показаниям датчиков-электродов, вмонтированных в нижнюю поверхность микрополосковой пластины (MSP).

Входное окно детектора сделано из тонкой (250 μм) бериллиевой фольги, непроницаемой для газа, заполняющего детектор, однако, хорошо пропускающего мягкое рентгеновское излучение.

Наблюдения при помощи приборов JEM-X, IBIS и SPI проводятся одновременно, что позволяет исследовать излучение рентгеновских источников в очень широком диапазоне энергий.

Временной и спектральный анализ данных монитора JEM-X осуществлялся с помощью стандартного программного обеспечение миссии OSA. Следует иметь в виду, что абсолютные потоки от источников по данным монитора JEM-X восстанавливаются не совсем корректно, поэтому при совместной аппроксимации в пакете XSPEC спектров источников, полученных монитором JEM-X и детектором ISGRI, нормировка данных монитора JEM-X оставлялась свободной. Также стоит отметить, что в восстановленных по данным прибора JEM-X спектрах существует ряд особенностей в районе энергий 5 – 7 кэВ, которые объясняются недоработкой текущей матрицы отклика прибора. Эти особенности затрудняют детальное изучение спектра источника, в частности, идентификацию эмиссионной линии железа и определение ее параметров.¹

Технические характеристики монитора JEM-X:

Параметр	Велинина
	Б Сличина
Рабочий диапазон энергии	3 – 35 кэВ
Энергетическое разрешение	$\Delta E/E = 0.40 \times (E/1keV)^{-1/2}$
Поле зрения (диаметр)	4.8 (полное кодирование)
	7.5°(част. кодиров., 50%)
Угловое разрешение	3'
Относительная ошибка локализации	
точечного источника	30″
Чувствительность в континууме	$1.3 imes 10^{-5}$ на 6 кэ ${ m B}$
фотонов см $^{-2}$ сек $^{-1}$ кэ B^{-1}	$8.0 imes10^{-6}$ на 30 кэ B
(значимость детектирования 3σ ,	
период накопления сигнала 10 ⁶ сек)	
Чувствительность в линии	$1.7 imes 10^{-5}$ на 6 кэ ${ m B}$
ϕ отонов см ^{-2} сек ^{-1}	$5.0 imes 10^{-5}$ на 30 кэ B
$(3\sigma,$ период накопления сигнала 10^6 сек)	
Временное разрешение	$122 \ \mu c$

 $^{^1}$ частная переписка с Карол Эн Оксборроу (Carol Anne Oxborrow) и Питером Крейчмаром (Peter Kretschmar).

Обсерватория RXTE

Обсерватория RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer) была выведена на околоземную орбиту 30 декабря 1995 года с мыса Канаверал. Основными приборами обсерватории RXTE (Брадт и др., 1993) являются спектрометры PCA и HEXTE (рис. 5), имеющие одинаковое поле зрения ~ 1°. В сумме два эти инструмента позволяют проводить одновременную спектроскопию и временной анализ излучения рентгеновских источников в диапазоне энергий 2-200 кэВ. Третьим научным прибором на борту обсерватории является монитор всего неба ASM, сканирующий всю небесную сферу за несколько часов.

Рентгеновский спектрометр РСА

Спектрометр PCA состоит из пяти идентичных детекторов, каждый из которых имеет свой собственный набор электроники с аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Эффективная суммарная площадь всех детекторов на энергиях 6-7 кэВ составляет ~6400 кв.см. и энергетическое разрешение ~18% на этих энергиях.

Регистрирующая часть детектора состоит из пропанового слоя, который служит в основном для отсеивания фоновых электронов, антисовпадательной защиты для отсеивания фронтально падающих заряженных частиц, и, собственно, главного ксенонового слоя, через который проходит 4 уровня детектирующих анодов. Самый нижний анодный слой также служит в качестве антисовпадательной защиты, а остальные три дают основную научную информацию. При этом каждый из ксеноновых анодных слоев условно подразделяется на правую и левую стороны. В самом низу располагается слабый калибровочный источник рентгеновского излучения Am^{241} (им оснащен каждый из пяти детекторов).

Научная информация может быть записана в различных режимах с разным спектральным и временным группированием. В каждом наведении группирование данных происходит в нескольких различных режимах. Кроме набора режимов записи данных, выбранных в соответствие с наблюдательной программой, в результатах всегда присутствуют два стандартных режима: усреднение по времени происходит по 16 с и 0.125 с. Последнее значение хорошо подходит для подробного временного анализа быстро вращающихся рентгеновских пульсаров.



Рис. 5. Схематическое изображение обсерватории RXTE.

Технические характеристики спектрометра РСА:

Параметр	Величина
Энергетический диапазон:	2 - 60 кэВ
Энергетическое разрешение:	< 18% на 6 кэВ
Временное разрешение:	1 микросекунда
Пространственное разрешение:	коллиматор 1 градус (FWHM)
Детекторы:	5 пропорциональных счетчиков
Эффективная площадь:	${\sim}6400$ кв.см.
Чувствительность:	0.1 мКраб
Фон:	2 мКраб

Спектрометр жесткого рентгеновского излучения НЕХТЕ

Спектрометр HEXTE представляет собой систему из двух независимых пакетов из четырех NaI(Tl)/CsI(Na) детекторов "фосвич", качающихся с интервалом 16 сек для наблюдения фоновых площадок на расстоянии 1.5° от источника (рис. 6). Полная собирающая поверхность детекторов составляет ~1600 см², однако, в каждый конкретный момент времени источник может наблюдаться только одним из двух пакетов детекторов; таким образом эффективная площадь де-



Рис. 6. Поле зрения двух пакетов детекторов спектрометра НЕХТЕ при наблюдении источника и фоновых площадок.

текторов HEXTE составляет \sim 700 см².

Для постоянного контроля энергетической привязки и калибровки детекторов над каждым из них установлен индивидуальный источник рентгеновского излучения Am^{241} . До отправки полученных научных данных в поток телеметрии они проходят первичную обработку на борту спутника.

Краткие технические характеристики спектрометра НЕХТЕ:

Параметр	Величина
Детекторы	2×4 NaI(Tl)/CsI(Na) сцинтиллятор
Поле зрения	1 градус (FWHM)
Энергетический диапазон	12-250 кэВ в 256 каналах
Энергетическое разрешение	$\Delta E/E{\propto}E^{-0.5},15\%$ на 60 кэ B
Временное разрешение	7.6 мкс (макс.), 0.98 мс (яркий источник)
Эффективная площадь	$700~{ m cm}^2$ на пакет детекторов
Эффективная экспозиция	60% полного времени
Скорость счета от Крабовидной	
Туманности (12-250 кэВ)	250 отсч. в сек. на пакет детекторов
Детекторный фон (12-250 кэВ)	90 count/s per cluster
Калибровочный источник	<i>Ат</i> ²⁴¹ (линии на 17 и 60 кэВ)
Вариации привязки энергии	<1%
Поток телеметрии	5 кбит/с (среднее по орбите)

Монитор всего неба ASM

Монитор всего неба ASM обсерватории RXTE состоит из трех сканирующих камер, установленных на вращающемся основании (рис. 7). Каждая из таких камер представляет из себя позиционно чувствительный пропорциональный счет-



Рис. 7. Схематическое изображение монитора всего неба ASM.

чик с кодирующей маской, обладающий полем зрения 6°×90°. Камеры заполнены смесью Xe-CO₂ при давление 1.2 атм., чувствительны к фотонам в диапазоне энергий 2-10 кэВ. Угловое разрешение в направлении 6° составляет 10 угловых минут. Две из трех камер просматривают небо перпендикулярно оси вращения монитора, один – параллельно. Область ошибок локализации составляет ~0.2° на ~1° для слабых источников и ~ 3′ на ~ 15′ для ярких источников, соответственно.

Монитор покрывает ~ 80% неба каждые ~ 90 минут и является незаменимым источником информации об активизации транзиентных источников и других переменных во времени событиях; а также может использоваться для исследования ярких рентгеновских источников на больших масштабах времени. Наведение спектрометров PCA и HEXTE на обнаруженный объект занимает несколько часов.

Параметр	Величина
Энергетический диапазон:	2 - 10 кэВ
Временное разрешение:	80% неба каждые 90 мин
Пространственное разрешение:	3' x 15'
Эффективная площадь:	90 кв. см.
Чувствительность:	30 мКраб

Основные параметры прибора монитора ASM:

Для временного и спектрального анализ данных обсерватории RXTE использовался стандартный набор программ пакета FTOOLS/LHEASOFT (http://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools/).

Глава 1

Долговременная переменность и магнитное поле пульсара SMC X-1

1.1 Введение

Рентгеновский пульсар SMC X-1, расположенный в одной из ближайших к нам галактик Малое Магелланово Облако, является одним из наиболее ярких и быстро вращающихся аккрецирующих рентгеновских пульсаров. Источник, впервые обнаруженный в рентгеновских лучах в 1971 г. (Прайс и др. 1971), входит в состав массивной двойной системы вместе со звездой-компаньоном Sk160, сверхгигантом класса *B*0 массой $17.2M_{\odot}$ и радиусом $18R_{\odot}$ (Рейнолдс и др. 1983). На малых масштабах времени пульсации его потока происходят с периодом около 0.71 с, сама же нейтронная звезда затмевается своим компаньоном на ~ 15 часов (длительность рентгеновского затмения) с периодом историю наблюдений источника, Левин и др.(1993) определили орбитальные параметры системы и установили, что ее орбитальный период уменьшается с темпом $\dot{P}_{orb}/P_{orb} = -3.35 \times 10^{-6}$ год⁻¹.

Помимо собственного периода вращения нейтронной звезды и орбитального периода наблюдения свидетельствуют о присутствии в системе 50 - 60-дневного цикла (Войдовски и др. 1998), во время которого рентгеновская светимость источника меняется от 10^{37} эрг с⁻¹ до несколько× 10^{38} эрг с⁻¹. Последнее значение оказывается близким или даже превышает Эддингтоновский предел для сферически аккрецирующей нейтронной звезды массой $1.4M_{\odot}$. Данное обстоятельство, а также наблюдаемое на протяжении более 30 лет со времени открытия пульсара постоянное ускорение вращения нейтронной звезды (см. Войдовски и др. 1998, Бильдстен и др ,1997, Лутовинов и др. 1994 и ссылки там), являются свидетельством того, что в системе Sk160/SMCX-1 реализуется дисковая модель аккреции, при которой вещество с нормальной звезды перетекает на ре-

лятивистский компонент либо через внутреннюю точку Лагранжа либо посредством звездного ветра и образует аккреционный диск.

Анализируя кривые блеска пульсара SMC X-1, полученные обсерваторией *EXOSAT*, Ангелини и др.(1991) обнаружили резкое (в \sim 3 раза), кратковременное повышение интенсивности излучения данного источника длительностью \sim 80 сек, которое было ими интерпретировано как рентгеновский всплеск II типа. Недавние наблюдения пульсара обсерваторией *RXTE* позволили обнаружить более сотни подобных событий с характерными временами десятков секунд (Мун и др. 2003), что дает основания предполагать схожесть механизмов излучения и аккреции у исследуемого источника SMC X-1 и "пульсара-барстера" GROJ1744-28.

В настоящей главе проанализированы архивные данные, полученные телескопом АРТ-П обсерватории ГРАНАТ на предмет изучения долговременных изменений интенсивности источника, его временных и спектральных характеристик.

1.2 Наблюдения

Область Малого Магелланового Облака, содержащая пульсар SMC X-1, наблюдалась обсерваторией ГРАНАТ сериями один раз в год (Таблица 1.1). Всего было проведено три серии наблюдений источника с общей экспозицией ~ 271000 с, что позволило детально исследовать излучение пульсара, его спектр и переменность на разных масштабах времени. Типичный профиль импульса источника в диапазонах энергий 3-6, 6-10, 10-20 и 20-30 кэВ (рис. 1.1) представляет собой два симметричных пика, расположенных в интервале фаз 0.1-0.4 и 0.5-1.0, при этом с увеличением энергии фотонов ширина второго пика уменьшается.

Необходимо отметить, что во время первой серии наблюдений (весной 1990 г.) использовался первый модуль телескопа, последующие наблюдения были выполнены третьим модулем, который имел пониженную чувствительность в области мягких энергий, поэтому все результаты, представленные в данной главе, относятся к диапазону энергий 6-20 кэВ. Кроме того, высоковольтное напряжение детектора данного модуля значительно варьировалось со временем и не всегда была возможность проведения калибровочных наблюдений Крабовидной туманности, что привело к значительным трудностям при построении матрицы отклика для некоторых сеансов наблюдений и затруднило, а в ряде случаев не позволило провести спектральный анализ рентгеновского излучения, зарегистрированного этим модулем.

S1
.2
Наблюдения

Дата Длительность, Орби		Орбитальная	Период пульсаций,	Доля пульсирующего	Поток, ^в	Светимость,б		
	сек	фаза	c ^a	излучения,% ^б	мКраб	10^{38} эрг с $^{-1}$		
05.04.90	30750	0.33-0.46	_	5.1 ^{<i>^д</i>}	5.36 ± 0.47	0.24 ± 0.02		
22.04.90	34490	0.65 - 0.77	$0.70957531 \pm 0.00000006$	40.5 ± 1.9	64.0 ± 1.0	2.90 ± 0.04		
24.04.90	12750	0.19-0.23	$0.70957326 \pm 0.00000012$	41.1 ± 2.3	63.0 ± 1.2	2.86 ± 0.06		
25.04.90	8300	0.42-0.45	$0.70957451 \pm 0.00000054$	37.1 ± 2.9	63.3 ± 1.4	2.87 ± 0.06		
11.05.90	17040	0.52-0.59	$0.70955929 \pm 0.00000027$	36.1 ± 3.3	58.9 ± 1.3	2.67 ± 0.06		
12.05.90	44230	0.75-0.91	$0.70955668 \pm 0.00000015$	38.4 ± 5.8	27.2 ± 0.7	1.23 ± 0.03		
25.01.91	8240	0.08-0.11	$0.70932134 \pm 0.00000057$	27.8 ± 5.5	18.8 ± 3.5	0.85 ± 0.16		
13.04.91 ^г	12060	0.09-0.14	$0.70925884 \pm 0.00000223$	16.0 ± 7.2	12.8 ± 2.4	0.58 ± 0.11		
14.04.91 ^г	28340	0.38-0.46	$0.70926034 \pm 0.00000087$	11.7 ± 2.1	33.9 ± 2.0	1.53 ± 0.09		
$21.04.91^{\circ}$	6250	0.13-0.16	$0.70925315 \pm 0.00000140$	18.7 ± 3.5	47.1 ± 4.7	2.13 ± 0.21		
$22.04.91^{\circ}$	34320	0.43 - 0.56	$0.70925311 \pm 0.00000014$	18.1 ± 2.0	62.2 ± 2.2	2.82 ± 0.10		
17.05.92	15110	0.86-0.92	—	$1.9^{ extsf{d}}$	12.9 ^д	$0.58^{ m d}$		
18.05.92	19200	0.17-0.26	$0.70899141 \pm 0.00000623$	4.2^{II}	11.6 ^д	0.52^{24}		

Табл. 1.1. Наблюдение пульсара SMC X-1 телескопом АРТ-П в 1990-1992 гг.

^а после коррекции на барицентр Солнечной системы и орбитальное движение в двойной системе

⁶ в диапазоне энергий 6-20 кэВ.

^в в диапазоне энергий 6-20 кэВ в предположении расстояния до источника d = 50 кпк.

^г По техническим причинам невозможно восстановить спектр источника.

^д 3σ верхний предел; для доли пульсирующего излучения указан в мКраб



Рис. 1.1. Зависимость профиля импульса SMC X-1 от энергии по данным, полученным телескопом АРТ-П 24 апреля 1990 г.

1.3 Долговременные изменения интенсивности и всплески излучения

Как было отмечено выше, долговременные наблюдения пульсара SMC X-1 показали, что наряду с собственным вращением нейтронной звезды и ее орбитальным движением, в системе присутствует еще одна, близкая к периодической, составляющая – изменение интенсивности источника на масштабе времен в несколько десятков дней, при котором регистрируемый от него поток рентгеновского излучения уменьшается более чем на порядок величины. Подобная картина наблюдается также в двух других известных рентгеновских пульсарах Her X-1 и LMC X-4, где она обусловлена периодическим затмением излучающих

27



Рис. 1.2. Кривая блеска источника SMC X-1 в диапазоне энергий 6-20 кэВ, построенная за два года наблюдений телескопом АРТ-П Точками показаны приборно измеренные потоки в течении отдельного наблюдения, сплошной линией – результат наилучшей аппроксимации синусоидальным сигналом с периодом 61 день.

областей нейтронной звезды прецессирующим аккреционным диском (Лутовинов и др. 2000, ла Барбера и др. 2001 и ссылки там). Предположительно тот же механизм может быть ответственен и за наблюдаемые вариации интенсивности пульсара SMC X-1.

Для определения периода прецессии аккреционного диска P_{prec} полученные телескопом APT-II данные были аппроксимированы синусоидальным сигналом с пробным периодом, изменяющимся в диапазоне 40 – 80 дней. Отклонения величин измеренных потоков от предсказываемых определялись при помощи метода наименьших квадратов. Наилучшее значение было получено для периода $P_{prec} \simeq 61$ день. Определенное таким образом значение периода согласуется с результатами Войдовски и др. (1998), обнаружившими долговременные изменения рентгеновского потока от пульсара SMC X-1 с периодом 50 – 60 дней при совместном анализе данных ASM/RXTE и BATSE/CGRO. Ограниченный набор данных (сеансов наблюдений) не позволяет полностью покрыть весь предполагаемый период, поэтому полученное нами значение не является точным и статистически значимым измерением возможного периода прецессии P_{prec} (значимость пика на периодограмме ~ 1.5 σ), скорее оно дает косвенное подтверждение присутствию в системе третьего вида периодичности и возможному меха-



Рис. 1.3. Профиль типичного всплеска рентгеновского излучения, зарегистрированного телескопом АРТ-П от пульсара SMC X-1 во время сеанса наблюдений 22 апреля 1990 г. По оси абсцисс отложено время в секундах от начала сеанса. Временной бин – 8 сек.

низму его возникновения (см. ниже).

Исследования кривой блеска источника, проведенные Кларксоном и др. (2003), показали что предполагаемый период прецессии сам по себе не является постоянным, а плавно меняется в диапазоне 40 – 60 дней с характерным временем ~ 1600 дней.

На рис. 1.2 представлена кривая блеска пульсара SMC X-1, полученная за два года его наблюдений телескопом APT-П в диапазоне энергий 6-20 кэВ. Точками с погрешностями (1 σ) показаны измеренные от источника потоки в мКраб в отдельных сеансах, а сплошной линией – результат наилучшей их аппроксимации синусоидальным сигналом с периодом ~ 61 день. Безусловно, интерес представляет сравнение фаз кривых блеска, полученных одновременно телескопом APT-П и обсерваторией BATSE, однако качество последних в этот период времени (см. рис.1 в статье Войдовски и др. 1998) не позволили нам это сделать. Сравнение с более поздними наблюдениями источника обсерваторией RXTE не выявили корреляции с нашими результатами, что, скорее всего, является следствием переменности периода прецессии (см. выше).

При анализе кривых блеска на предмет поиска всплесков рентгеновского из-

29



Рис. 1.4. Фотонные спектры излучения источника SMC X-1, измеренные телескопом АРТ-П во время первой серии наблюдений (весной 1990г.) Разными символами (кружки, квадраты, треугольники) показаны фотонные спектры источника в состояниях с разным уровнем интенсивности, линиями – результаты их наилучшей аппроксимации моделями степенного закона спадания плотности потока фотонов (формула (5)).

лучения нами были обнаружены несколько событий, подобных тем, что были зарегистрированы обсерваторией *RXTE* (Мун и др. 2003), и которые могут быть интерпретированы как слабые всплески II типа. Отметим, что значимость зарегистрированных событий невелика, $3 - 5\sigma$, однако их приблизительно треугольная форма и полуширина на полувысоте *HWHM* $\simeq 13$ сек, полученная при аппроксимации гауссианой, оказываются близкими к наблюдавшимся ранее. Профиль одного из таких всплесков приведен на рис. 1.3.

1.4 Спектральный анализ

Спектр рентгеновского пульсара SMC X-1 является типичным для объектов этого класса и может быть описан простым степенным законом. Как правило, в зависимости от конкретного источника, эта модель модифицируется экспоненциальным завалом на высоких энергиях, поглощением в мягкой области, эмиссионными линиями или линиями поглощения. В случае SMC X-1 мы не зарегистрировали от источника значимых особенностей в излучении или поглощении. Кроме того, как показало исследование, величина межзвездного поглощения, оцениваемая разными авторами в довольно широком диапазоне значений $5.9 \times 10^{20} - 3.2 \times 10^{22}$ атомов см⁻² (Войдовски и др.1998, Мун и др. 2003), не играет существенной роли в нашем анализе излучения источника в диапазоне энергий 6-20 кэВ. Таким образом, окончательная модель, применявшаяся при спектральном анализе излучения пульсара SMC X-1, описывается формулой (5).

На рис. 1.4 приведены фотонные спектры излучения пульсара (в фот см⁻² с⁻¹ кэВ⁻¹), измеренные в некоторых сеансах наблюдений с разными уровнями интенсивности. Линиями показаны модельные спектры излучения, полученные на основе простого степенного закона или формулы (5) и наилучшим образом описывающие наблюдаемое излучение источника; их параметры представлены в Таблице 1.2. При выборе между простым степенным законом и его модификацией завалом на высоких энергиях применялся $\Delta \chi^2$ -критерий, с помощью которого определялась вероятность того, что при переходе к более сложной модели улучшение величины χ^2 произошло не случайно. В большинстве случаев значимость такого перехода оказывается больше 95%.

Если предположить, что низкое состояние наблюдается в моменты когда источник оказывается скрытым за внешним краем искривленного или наклоненного к плоскости орбиты аккреционного диска и до нас доходит излучение, ослабленное, либо рассеянное в горячей короне над ним (как это реализуется в системе Her X-1, Лутовинов и др. 2000), то в первом приближении можно считать что спектры высокого и низкого состояний должны отличаться только нормировкой и дополнительным поглощением. Аппроксимация спектра пульсара в низком состоянии (5 апреля 1990 г) формулой (5) с параметрами, зафиксированными на значениях высокого состояния, не дает положительного ответа на высказанное предположение (заметное увеличение χ^2), однако ввиду статистической ограниченности данных, оно также не может быть окончательно отвергнуто. Важным критерием при этом может оказаться увеличение поглощения на низких энергиях, но ввиду ограниченности энергетического диапазона, мы не можем это однозначно утверждать, так как измерение величины поглощения в низком состоянии дает $(31.5 \pm 12.0) \times 10^{22}$ атомов см⁻², в то время как верхний предел на величину поглощения, полученный в высоком состоянии, равен 20×10^{22} атомов см⁻² (1 σ).

Дата	PL				PL+HEC			
	I ₁₀ 6,	α	$\chi^2_N(N)$ B	$I_{10},$	α	E_c ,	E_f ,	$\chi^2_N(N)$
	10^{-4}			10^{-4}		кэВ	кэВ	
05.04.90	3.6 ± 0.5	1.07 ± 0.23	1.28(11)	4.4 ± 0.9	0.39 ± 0.54	12.9 ± 3.5	6.3 ± 4.4	1.16(9)
22.04.90	47.7 ± 0.4	1.75 ± 0.03	1.43(32)	49.2 ± 0.6	1.67 ± 0.04	17.0 ± 2.8	24.9 ± 14.0	1.09(30)
24.04.90	45.9 ± 0.6	1.63 ± 0.04	1.35(34)	47.9 ± 0.8	1.52 ± 0.05	18.1 ± 3.0	15.4 ± 10.7	1.09(32)
25.04.90	48.8 ± 0.8	1.68 ± 0.05	1.14(26)	50.7 ± 1.1	1.59 ± 0.06	19.7 ± 3.9	13.3 ± 13.3	1.02(24)
11.05.90	44.0 ± 0.7	1.74 ± 0.05	1.37(32)	47.8 ± 1.3	1.49 ± 0.09	13.7 ± 1.8	13.2 ± 4.7	0.73(30)
12.05.90	20.8 ± 0.4	1.76 ± 0.06	1.27(32)	22.6 ± 1.2	1.53 ± 0.16	10.9 ± 3.2	24.8 ± 10.9	1.15(30)
25.01.91	10.5 ± 3.2	0.29 ± 0.50	0.45(7)	—	—	—	—	-

Табл. 1.2. Параметры наилучшей аппроксимации спектров разными моделями^а

^a PL – степенной спектр, HEC – завал на высоких энергиях ^б поток в фот·см⁻²с⁻¹кэВ⁻¹, измеренный на 10 кэВ. ^в Значение χ^2 , нормированное на число степеней свободы N



Рис. 1.5. Зависимость фотонного индекса спектра источника от фазы импульса. Ошибки соответствуют одному стандартному отклонению.

Чтобы исследовать эволюцию спектра источника на масштабе одного периода импульса мы провели фазированную спектроскопию излучения пульсара в ярком состоянии для двух сеансов наблюдений – 24 апреля и 11 мая 1990 г. Для этого полученные в каждом сеансе данные были свернуты с периодом пульсаций и разделены на 12 временных бинов (время прихода каждого фотона предварительно было скорректировано на барицентр Солнечной системы и движение нейтронной звезды в двойной системе). Интегральное время накопления сигнала для каждого из 12 спектров составило 1137 сек в сеансе 24 апреля и 1568 сек в сеансе 11 мая. Последующий анализ показал, что полученные таким образом спектры хорошо описываются в диапазоне энергий 6-20 кэВ простым степенным законом, при этом наклон спектра практически не зависит от фазы импульса. Этот вывод иллюстрируется рис. 1.5, на котором приведена зависимость фотонного индекса спектра от фазы импульса, полученная для сеанса 24 апреля.

1.5 Обсуждение

1.5.1 Высокое и низкое состояние

Из результатов наблюдений пульсара SMC X-1 разными обсерваториями следует, что регистрируемый от него поток рентгеновского излучения не является постоянным, а подвержен сильным, близким к периодическим, вариациям на масштабе 50-60 дней. По аналогии с известными двойными системами SS433, Her X-1, LMC X-4, у которых наблюдается похожая картина, в качестве одной из основных причин наблюдаемой переменности рассматривается прецессия наклоненного аккреционного диска. Нормальный компаньон Sk160 в рассматриваемой системе является сверхгигантом с мощным звездным ветром, из которого поступает большая часть аккрецирующего вещества, образующего аккреционный диск. Вопрос о механизме его формирования окончательно не решен, так как сверхгиганты, как правило, очень близки к заполнению своей полости Роша и вещество может перетекать на компактный объект через внутреннюю точку Лагранжа. Возможно, в системе одновременно присутствуют оба механизма, однако при этом необходимо отметить, что согласно Кларксону и др. 2003, даже если основную роль в формировании диска играет звездный ветер, то он является "коллимированным" (collimated wind), и таким образом картины поступления вещества в аккреционный диск в обоих случаях оказываются схожими.

Как было показано Ларвудом (1998), для прецессирующего аккреционного диска существует связь между периодом его прецессии и параметрами двойной системы

$$\frac{P_{orb}}{P_{prec}} = (3/7)q(1+q)^{-1/2}(R_o/a)^{3/2}cos\delta,$$
(1.1)

где q – отношение массы нормального компонента системы к массе компактного объекта, R_o – внешний радиус аккреционного диска, который может быть выражен в долях размера полости Роша β , a – расстояние между компонентами системы, δ – угол между плоскостью орбиты и диска. Из анализа оптических кривых блеска системы Sk160/SMCX-1 (Ховарт и др. 1982, Хружина и Черепащук 1987) следует, что размер аккреционного диска составляет $\beta \simeq 0.7 - 1.0$. Для отношения масс q = 10.8 и периодов $P_{orb}/P_{prec} \simeq 0.064$ мы можем оценить диапазон возможных углов наклона $\delta \sim 25 - 58^{\circ}$. Минимальный угол между плоскостью орбиты и диска $cos\delta \simeq 1$ соответствует размеру аккреционного диска $\beta \sim 0.61$, полученный Пачинским (1977) для случая аккреции только через внутреннюю точку Лагранжа. Принимая во внимание диапазон возможных значений периода прецессии это несоответствие оказывается еще большим. Таким образом, перетекание вещества с нормального компаньона только через внутреннюю точку Лагранжа в системе Sk160/SMCX-1 оказывается маловероятным.

Как было отмечено выше, во время низкого состояния источника пульсации рентгеновского излучения не были обнаружены и были получены только верхние пределы на долю пульсирующего излучения (Табл. 1.1). Однако, ввиду того что эти пределы оказываются довольно большими, мы не можем полностью исключить присутствие пульсаций в низком состоянии. В работе Войдовски и др.(1998) приводятся результаты измерения периода пульсаций источника в низком состоянии обсерваторией ROSAT, однако при этом оговаривается, что эти измерения были сделаны в самом начале низкого состояния, когда источник, возможно, еще не был до конца скрыт диском. По-видимому, аналогичная ситуация наблюдалась телескопом АРТ-П 18 мая 1992 г. когда интенсивность источника была низкой, но пульсации рентгеновского излучения были зарегистрированы на небольшом уровне значимости (~ 4 σ).

1.5.2 Магнитное поле

Исходя из наблюдаемых характеристик пульсара SMC X-1, полученных за длительный период наблюдений, мы можем, основываясь на модели замагниченного аккреционного диска предложенной Ли, Вонгом (1996), попытаться оценить магнитное поле нейтронной звезды в системе.

История измерений периода пульсаций SMC X-1 свидетельствует о практически равномерном ускорении вращения нейтронной звезды, продолжающемся с момента ее открытия. Средний темп изменения периода импульса за время наших наблюдений в 1990-1992 гг. составил $\dot{P} = -(32.6 \pm 0.8) \times 10^{-5}$ с/год. Последующие наблюдения источника обсерваториями *ROSAT*, *ASCA* и *RXTE* дают близкое к нашему значение $\dot{P} = -(32.0 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ с/год (Войдовски и др. 1998). Предполагая из вышесказанного, что наблюдаемая переменность источника не связана с изменениями собственного излучения пульсара, а определяется сторонними эффектами, мы оценили его болометрическую светимость как $L_x = 47 \times 10^{37}$ эрг с⁻¹.

В ситуации, когда вращение нейтронной звезды практически равномерно ускоряется на протяжении довольно долгого времени, изменение ее периода вращения связано с параметрами двойной системы и нейтронной звезды уравнением:

$$\dot{P} = -\frac{\dot{M}(GMr_0)^{1/2}n(\omega_s)p^2}{2\pi I},$$
(1.2)

где M – темп аккреции, I – момент инерции звезды, r_0 – внутренний край аккреционного диска, принимаемый в данной модели равным альвеновскому радиусу r_A , $n(\omega_s) = 1 + \frac{20(1-1.94\omega_s)}{31(1-\omega_s)}$ – безразмерный угловой момент, $\omega_s = \Omega_s / \Omega_k(r_0)$ – параметр быстроты. Последний зависит от угловой скорости нейтронной звезды Ω_s и угловой скорости материи внутреннего края аккреционного диска $\Omega_k(r_0)$. Момент инерции нейтронной звезды оценивался из соотношения $I = 0.4M_x R^2$, радиус звезды был принят $R = 10^6$ см.

Оценка магнитного момента нейтронной звезды μ , полученная из формулы (1.2), показывает, что наилучшее согласие с экспериментальными данными до-

стигается при значениях $\mu \simeq (0.05 - 0.1) \times 10^{30}$ Гс см³, что эквивалентно магнитному полю на поверхности нейтронной звезды ~ $(1-2) \times 10^{11}$ Гс. Данный вывод об относительной слабости магнитного поля согласуется с фактом наблюдения от источника всплесков излучения, которые могут быть классифицированы как всплески II типа (см. Мун и др. 2003). Мун и др. (2003) также установили, что эти всплески имеют много общего с наблюдавшимися ранее всплесками от другого сверхэддингтоновского пульсара GRO J1744-28 и предложили выделить так называемую группу "вспыхивающих пульсаров", магнитное поле которых составляет ~ 10^{11} Гс. Кроме того, немаловажным аргументом в пользу такой гипотезы является отсутствие с спектре источника циклотронных особенностей в диапазоне энергий 3-100 кэВ, что соответствует магнитным полям $\geq 5 \times 10^{11}$ Гс.

Отметим, что применимость рассматриваемой модели при больших значениях μ ограничена достижением параметром быстроты критического значения ω_c , при котором угловой момент не передается нейтронной звезде. Достигая этой величины пульсар от ускорения должен переходить к замедлению, что не наблюдается. Приближение значения μ к 10^{30} Гс см³ означает попадание параметра быстроты в область критических значений ω_s .

1.6 Заключение

Рентгеновский пульсар SMC X-1 неоднократно наблюдался телескопом APT-П обсерватории ГРАНАТ в 1990-1992 гг. За это время были накоплены данные, позволившие исследовать переменность источника на разных масштабах времени, его спектр, провести оценки параметров системы.

Показано, что в системе помимо периодичностей, связанных с собственным вращением нейтронной звезды и орбитальным движением, присутствует еще одна, близкая к периодической составляющая, возможно связанная с прецессией аккреционного диска. Ее период, измеренный по данным телескопа АРТ-П, $P_{prec} \sim 61$ день хорошо согласуется с результатами наблюдений других обсерваторий.

Основываясь на связи между периодом прецессии аккреционного диска и параметрами двойной системы (Ларвуд, 1998) и используя измеренную величину прецессионного периода, в диссертации определен диапазон возможных углов наклона между плоскостью аккреционного диска и плоскостью орбиты. В предположении размера аккреционного диска $\beta \simeq 0.7 - 1.0$ от размера полости Роша, отношения масс q = 10.8 и периодов $P_{orb}/P_{prec} \simeq 0.064$ этот диапазон составляет $\delta \sim 25 - 58^{\circ}$.

Спектр источника является типичным для рентгеновских пульсаров и может быть описан простым степенным законом с завалом на высоких энергиях. Проведенный анализ показал, что его форма слабо зависит от фазы орбитального цикла и интенсивности источника. Фазированная спектроскопия излучения источника в высоком состоянии также не выявила зависимости наклона спектра от фазы импульса. Проведенные оценки магнитного поля нейтронной звезды показывают, что для удовлетворения наблюдательным фактам (темп ускорения вращения звезды, всплески рентгеновского излучения, отсутствие циклотронных особенностей в спектре) оно должно быть $\sim 10^{11}$ Гс.
Глава 2

Переменность звездного ветра в системе GX 301-2/Wray 977 по данным телескопа АРТ-П обсерватории ГРАНАТ

2.1 Введение

Рентгеновский пульсар GX301-2, образующий с голубым сверхгигантом Wray 977 двойную систему с эксцентриситетом ~ 0.462 и орбитальным периодом ~ 41.5 дня (Сато и др., 1986), является одним из наиболее долгопериодических из известных на сегодняшний день пульсаров. За всю историю наблюдений данного источника период его собственного вращения неоднократно претерпевал резкие изменения. В апреле 1984 г. спутником "Тенма" было измерено максимальное значение периода пульсаций, равное 701.14 с (Сато и др., 1986), которое начало резко уменьшаться и достигло значения 677 с в 1992 г. (Лутовинов и др., 1994, Чичков и др. 1995). Однако на этом период постоянного ускорения $(\dot{P}/P \sim -4.4 \times 10^{-3} \text{ год}^{-1})$ закончился, и к ноябрю 1996 года период пульсаций стабилизировался на значении ~ 679.5 с (Правдо и др., 2001). На более мелких масштабах времени смены ускорения и замедления вращения нейтронной звезды проявляются гораздо чаще (Чичков и др., 1995, Кох и др., 1997). Важно отметить, что поток рентгеновского излучения, регистрируемый от системы, не является постоянным в течении орбитального цикла. При приближении пульсара к оптической звезде рентгеновская светимость системы растет и достигает максимума за 1.2 дня до момента прохождения периастра (Вайт и др., 1984). Наблюдается также увеличение интенсивности источника вблизи апоастра (Чичков и др., 1995, Кох и др., 1997).

Паркес и др. (1980) определили параметры оптической звезды (радиус $\sim 43R_{\odot}$ и масса $\sim 30M_{\odot}$) и расстояние до двойной системы $d \sim 1.8$ кпк. Необходимо отметить, что точный спектральный класс звезды-компаньона до сих пор

окончательно не установлен. Некоторые исследователи относят ее к классу *В*-звезд (Видал, 1973, Капер и др., 1995), другие (Паркес и др., 1980) – к классу звезд с эмиссионными линиями *Be*. Возможно, система занимает некое промежуточное положение.

Также, в настоящее время нет единого мнения о структуре и распределении вещества в системе GX301-2/Wray 977. В работе Таширо и др. (1991) сделано заключение о сферически симметричном распределении фотопоглощающего и излучающего линию железа вещества, исходя из крайне незначительного изменения характеризующих эти параметры величин в зависимости от фазы импульса. С другой стороны, Лехи и др.(1990), проделав подробную фазированную спектроскопию, сделали вывод о неоднородном распределении вещества вокруг нейтронной звезды. При этом все авторы отмечают значительную величину поверхностной плотности водорода на луче зрения, достигающую ~ 2×10^{24} см⁻².

В этой главе представлены результаты комплексного анализа данных наблюдений пульсара GX301-2, полученных телескопом АРТ-П орбитальной обсерватории "Гранат", выделяя на его кривой блеска два различных состояния ("высокое" и "низкое").

Источник наблюдался обсерваторией ГРАНАТ с января 1991 до февраля 1992 года. За это время телескопом АРТ-П было проведено 4 сеанса наблюдений этого источника с общим полезным временем ~ 97 ксек (табл. 2.1).

Необходимо отметить, что все наблюдения пульсара GX301-2 осуществлялись третьим модулем телескопа, который, как было отмечено выше, имел пониженную чувствительность в мягкой области энергий (3-8 кэВ).

2.2 Временной анализ

Проведенные исследования показали, что вблизи периастра и апоастра интенсивность излучения источника GX301-2 является сильно переменной. Условно можно выделить два состояния, "высокое" и "низкое", причем в течение одного сеанса наблюдения переходы между ними могут осуществляться несколько раз. На рис. 2.1(а) показаны кривые блеска пульсара для всех четырех сеансов наблюдений. Для каждой кривой блеска приведена жесткость излучения (рис. 2.1(б)), определяемая как отношение интенсивности источника в диапазонах энергий 30-40 и 10-20 кэВ.

Из рисунка видно, что переход источника из "низкого" состояния в "высокое" и обратно происходит достаточно быстро, его интенсивность при таких переходах изменяется примерно на порядок. Жесткость же источника при переходе в "высокое" состояние падает (в \sim 3 раза). Можно отметить тот факт, что хотя "низкое" состояние характеризуется большей абсолютной стабильностью интенсивности излучения по сравнению с "высоким", что иллюстрируется рис. 2.1, относительные амплитуды этих изменений оказываются близкими. Так, при прохождении периастра значение среднеквадратичной амплитуды отклонений изменялось от \sim 21% до \sim 34% в "низком" и "высоком" состояниях, соответствен-



Рис. 2.1. Кривая блеска пульсара GX301-2 (а) в диапазоне энергий 6-40 кэВ для четырех сеансов наблюдений, и соответствующее изменение "жесткости" излучения источника (б) – отношение скоростей счета в диапазонах 30-40 кэВ и 10-20 кэВ (фон вычтен). Пунктирной линией отмечены границы "низкого" и "высокого" состояний. По горизонтальной оси отложено время в секундах от начала сеанса наблюдения. Нули соответствуют: *a* – UT 18h34m05.502s (09 января 1991г.); *b* – UT 09h57m32.519s (13 августа 1991г.); *c* – UT 17h15m16.208s (29 января 1992г.); *d* – UT 18h16m06.201s (07 февраля 1992г.). Для каждого сеанса в скобках приведена соответствующая орбитальная фаза. Ошибки соответствуют одному стандартному отклонению.

но, в области апоастра эти значения составили ~25% и ~35% для "низкого" и "высокого" состояний. Вблизи орбитальной фазы ~ 0.3 среднеквадратичная амплитуда отклонений составляла ~34%.

В таблице 2.1 приведены значения периода пульсаций, определенные методом наложения эпох после коррекции времен прихода фотонов на движение нейтронной звезды в двойной системе и на движение Земли и космического аппарата. За все время наших наблюдений (около 13 месяцев) период уменьшился на ~ 6 секунд, что соответствует средней величине $\dot{P}/P \approx -8.2 \times 10^{-3}$ год⁻¹.

Дата	Орбитальная фаза	Экспозиция, с	Поток, мКраб	$L_X,^{6}10^{36}$ эрг с ⁻¹	Период, с
09.01.91	0.03-0.04	23584			682.83 ± 0.04
(I)		2835	32 ± 8	0.29 ± 0.07	
(II)		6126	301 ± 8	2.72 ± 0.08	
(III)		7067	126 ± 6	1.14 ± 0.05	
(IV)		7556	420 ± 9	3.81 ± 0.08	
13.08.91	0.23-0.24	33346	_ ^B	_ ^B	678.91 ± 0.43
29.01.92	0.31	11376	28 ± 5	0.26 ± 0.05	678.77 ± 1.82
07.02.92	0.52-0.53	28540			676.83 ± 0.08
(I)		986	198 ± 21	1.80 ± 0.19	
(II)		13965	37 ± 5	0.33 ± 0.04	
(III)		13589	167 ± 6	1.51 ± 0.06	

Табл. 2.1. Наблюдение пульсара GX301-2 телескопом АРТ-П в 1991-1992 гг.^а

а

б

в диапазоне энергий 6-40 keV в предположении расстояния до источника d = 1.8 кпк по техническим причинам невозможно восстановить спектр источника в



Рис. 2.2. Профили импульса GX301-2, полученные телескопом АРТ-П в разных энергетических диапазонах. Ошибки соответствуют одному стандартному отклонению.

Дата	Доля пульсирующего излучения, %				
	6-10 кэВ	10-20 кэВ	20-30 кэВ	30-40 кэВ	6-40 кэВ
09.01.91					
Ι	a	a	a	a	a
II	60.9 ± 4.9	55.2 ± 2.1	61.5 ± 3.4	35.9 ± 7.1	54.9 ± 1.8
III	78.5 ± 10.6	63.0 ± 3.3	83.6 ± 8.9	35.6 ± 7.2	64.2 ± 3.2
IV	36.6 ± 2.2	32.6 ± 1.3	43.3 ± 2.9	33.9 ± 6.6	34.2 ± 1.1
13.08.91	58.6 ± 7.7	47.4 ± 3.2	50.6 ± 7.9	20.9 ± 6.3	44.7 ± 3.0
29.01.02	$91.1^{+8.9}_{-38.9}$	76.8 ± 13.4	_б	_б	82.8 ± 15.4
07.02.92	00.0				
Ι	a	a	a	a	a
II	44.3 ^в	19.9 ^в	24.9 ^B	15.5 ^в	15.2 ^в
III	44.7 ± 3.4	53.5 ± 1.9	61.4 ± 4.1	82.1 ± 24.8	53.3 ± 1.8

Табл. 2.2. Доля пульсирующего излучения источника GX301-2

^а невозможно определить из-за малой статистики

⁶ невозможно определить по техническим причинам

^в 3*σ* верхний предел

Мы провели анализ поведения профиля импульса и доли пульсирующего излучения источника в зависимости от его состояния и энергетического диапазона. На рис. 2.2 приведены фазовые кривые блеска пульсара, усредненные по каждому из сеансов в пяти энергетических диапазонах (3-6, 6-10, 10-20, 20-30 и 30-40 кэВ). Профиль импульса имеет двухпиковую форму с незначительным преобладанием первого пика, причем с ростом энергии интенсивность второго пика возрастает относительно первого. При переходах источника из одного состояния в другое форма импульса практически не меняется, меняется лишь интенсивность излучения.

Доля пульсирующего излучения, определяемая как $P = (I_{max} - I_{min})/(I_{max} + I_{min})$, где I_{max} и I_{min} – скорректированные на фон значения скорости счета в максимуме и минимуме профиля импульса, для всех сеансов наблюдений приведена в таблице 2.2 в разных диапазонах энергий (6-10, 10-20, 20-30, 30-40 и 6-40 кэВ) в зависимости от состояния, в котором находился источник.

Из таблицы следует, что доля пульсирующего излучения остается довольно высокой и слабо зависит от диапазона энергий и интенсивности источника, хотя в диапазоне энергий 30-40 кэВ пульсаций несколько замываются, а также присутствует небольшое понижение доли пульсирующего излучения в диапазоне энергий 10-20 кэВ. При прохождении источником апоастра (7 февраля 1992 г.) было отмечено полное исчезновение пульсаций от источника, когда он находился в низком состоянии. Для данного случая в таблице приведены лишь 3*σ* верхние пределы на долю пульсирующего излучения.

Дата	I_{10}^{6} , $\times 10^{-3}$	α	Ec	E_{f}	$N_{ m H}$, $10^{23}~{ m cm}^{-2}$	$\chi^2_N(N)^{\mathrm{b}}$
09.01.91						
(I)	1.26 ± 1.06	0.32 ± 0.73			8.4 ^r	1.11(7)
(II)	15.76 ± 0.75	0.85 ± 0.10	22 ± 3	23 ± 13	0.4 ^r	1.19(17)
(III)	13.15 ± 3.40	1.77 ± 0.34			7.9 ± 3.2	1.73 (15)
(IV)	21.02 ± 0.76	0.71 ± 0.06	28 ± 2	11 ± 5	0.3 ^r	2.72(13)
29.01.92	1.66 ± 0.97	1.53 ± 0.65			$2.9^{ m r}$	0.21(5)
07.02.92						
(I)	9.10 ± 2.13	0.76 ± 0.31			3.0 ^г	0.90(8)
(II)	1.46 ± 0.69	0.59 ± 0.39			4.7 ^r	1.18(8)
(III)	10.22 ± 0.77	1.04 ± 0.24	16 ± 3	31 ± 13	0.7 ^r	0.79(16)

Табл. 2.3. Параметры аппроксимации спектра излучения GX301-2^a

^а Все ошибки даны на уровне 1σ .

⁶ Поток на 10 кэВ (фот-см⁻²с⁻¹кэВ⁻¹).

^в Значение χ^2 , нормализованное на число степеней свободы *N*.

^г 1*о* верхний предел на плотность атомов водорода по лучу зрения.

2.3 Спектроскопия

Для подробного исследования свойств пульсара GX301-2 был проведен спектральный анализ его излучения в разных состояниях. Основной моделью, применяемой при анализе, был простой степенной закон, являющийся наиболее характерным для рентгеновских пульсаров в диапазоне энергий до ~10-15 кэВ. Однако данная простая модель применялась нами не всегда. По мере необходимости использовались различные модификации модели, в общем виде задаваемые произведением компонент (5) и (7).

Формально фотопоглощение было зарегистрировано лишь в одном сеансе 9 января 1991 г., когда источник находился в "низком" состоянии. Количественное значение поверхностной плотности водорода на луче зрения составило при этом $N_H = (7.9 \pm 3.2) \times 10^{23}$ см⁻². Столь высокое значение хорошо согласуется с результатами Хаберла (1991), который в своей работе провел подробный анализ величины фотопоглощения в зависимости от орбитальной фазы. Более подробного анализа этого параметра нам провести не удалось из-за технических проблем третьего модуля телескопа, о которых говорилось выше, и для остальных сеансов наблюдений были получены только верхние пределы (см. таблицу 2.3).

Переход к более сложной модели осуществлялся на основании $\Delta \chi^2$ критерия. Модель считалась приемлемой, если вероятность, что улучшение величины χ^2 при таком переходе произошло не случайно, превышала 95%. В таблице 2.3 приведены результаты наилучшей аппроксимации спектров пульсара, усредненных за рассматриваемый промежуток сеанса наблюдения, соответствующий нахождению источника в определенном состоянии.

Как видно из таблицы 2.3, спектр источника, полученный в "высоком" состоянии, оказывается несколько мягче спектра "низкого" состояния. Энергия E_c , на которой в спектре возникает излом, как и параметр E_f , характеризующий крутизну экспоненциального завала, в пределах ошибки остаются постоянными и находятся в хорошем согласии с результатами других авторов (Лехи и др., 1990), но проявляются только в "высоком" состоянии, что, возможно, связано с недостатком статистики при анализе излучения источника в "низком" состоянии. Изменения энергетического спектра в зависимости от состояния источника иллюстрируются рис. 2.3.

Как видно из рис. 2.3, статистически значимого исследования спектров излучения пульсара выше ~ 40 кэВ нам провести не удалось. Жесткая часть спектра источника интересна тем, что там расположена линия циклотронного поглощения. Ниже (см. главу 7) будет приведен спектральный анализ излучения в широком диапазоне энергий по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ. Тут следует отметить, что спектральные параметры, полученные по данным обсерваторий ГРАНАТ и ИНТЕГРАЛ, согласуются в пределах ошибки.

2.4 Оценка параметров звездного ветра и степени его неоднородности

Несмотря на обилие наблюдательных данных точная картина аккреции в системе GX301-2/Wray 977, объясняющая природу рентгеновского излучения, окончательно не ясна. Источник проявляет непостоянство в излучении, от орбиты к орбите он ведет себя по-новому, пики и минимумы интенсивности смещаются, порой подменяя друг друга (за исключением пиков около периастра и апоастра, хотя и у них значительно изменяется интенсивность).

Для объяснения наблюдательных данных было предложено несколько моделей взаимодействия компактного объекта с межзвездным веществом в двойной системе. Правдо и др. (1995) показали, что периодические вспышки сложно объяснить только изотропной аккрецией из звездного ветра, и объясняют такое поведение источника либо взаимодействием нейтронной звезды с экваториальноусиленным звездным ветром, характерным для *Be*-звезд, либо с образованием аккреционного диска вокруг нейтронной звезды, который также может является источником углового момента, вызывая ускорение ее вращения. В работе Лехи (2002) приводятся результаты долговременного мониторинга GX301-2 и рассматриваются несколько возможных моделей генерации излучения, причем наилучшую аппроксимацию экспериментальных данных дает модель "ветер+поток".

Таам и Фрукселл (1989), проведя гидродинамическое моделирование неосесимметричного потока газа в системе GX301-2/Wray 977, показали наличие существенных апериодических флуктуаций светимости (с фактором до 10)



Рис. 2.3. Энергетические спектры излучения источника GX301-2 по данным телескопа АРТ-П. Сплошными линиями представлены результаты аппроксимации спектров соответствующими моделями (см. табл. 2.3). Ошибки соответствуют одному стандартному отклонению.

на временных масштабах порядка нескольких тысяч секунд. В работе Таширо и др.(1991) исследуются апериодические изменения интенсивности источника GX301-2, которые могут являться следствием турбулентности плазмы около поверхности нейтронной звезды и проявляют себя на временных масштабах до десятков секунд.

Рассматриваемые в данной работе изменения интенсивности источника также носят апериодический характер и наблюдаются на временах от десятков секунд до нескольких часов (см. рис. 2.1). Скорее всего, наблюдаемые флуктуации интенсивности излучения на небольших масштабах времени связаны с локальными неоднородностями в звездном ветре, его "клочковатостью". Особый интерес представляет сеанс наблюдений вблизи апоастра 7 февраля 1992 г., когда было зарегистрировано длительное понижение интенсивности источника и исчезновение пульсаций (участок II последней кривой блеска на рис. 2.1).

Одним из возможных объяснений наблюдаемого понижения интенсивности является затмение нейтронной звезды существенной неоднородностью в звездном ветре, которая попадает на луч зрения между наблюдателем и объектом. Попытаемся оценить ее характерные параметры. Следуя Кастору и др.(1975) можно записать:

$$v_{\omega}(r) = v_{\infty} \left(1 - \frac{R_c}{r} \right)^{\beta}, \qquad (2.1)$$

где v_{∞} – скорость звездного ветра на бесконечности, R_c – радиус оптического компаньона, $\beta = 0.5$. Приняв за характерное время нахождения источника в "низком" состоянии ~10 ксек, и диапазон возможной скорости ветра $v_{\infty} = 400$ км/с (Капер и др.,1995)÷1000км/с (Паркес и др.,1980), получим из формулы (2.1) размер неоднородности $l = (5 \div 12)R_{\odot}$. В данном случае скорость звездного ветра рассчитывалась в области апоастра, что соответствует расстоянию ~ 5 R_c от оптического компаньона (Сато и др., 1986).

На рис. 2.4 показаны приборные спектры пульсара GX301-2 для "низкого" и "высокого" состояний во время наблюдения 7 февраля 1992 г. Нормировка спектра "низкого" состояния домножена на фактор 2.6 для совмещения со спектром в "высоком" состоянии на энергиях выше ~ 25 кэВ, где формы этих спектров приблизительно совпадают. Видно, что в более мягких каналах спектр "низкого" состояния имеет значительный завал. Учитывая эту особенность спектра, вызванную фотопоглощением, можно оценить плотность атомов водорода на луче зрения в данный момент $N_H \sim 1.7 \times 10^{24}$ атомов см⁻². Полагая размер неоднородности $l \sim 10 R_{\odot}$ получим ее электронную плотность $n = \frac{N_H}{L} \sim 2.4 \times 10^{12}$ см⁻³.

Для сравнения на рис. 2.5 приведены приборные спектры пульсара GX301-2, полученные на орбитальной фазе 0.03-0.04 вблизи периастра. Видно, что форма спектров остается практически постоянной и не зависит от величины потока. Изменяется только их нормировка, что свидетельствует об отсутствии повышенного (дополнительного) фотопоглощения в "низком" состоянии (хотя верхние пределы, приведенные в табл. 2.3, оказываются значительными, что скорее всего связано с недостатком данных в мягкой области спектра).



Рис. 2.4. Эволюция спектра пульсара GX301-2 вблизи апоастра по данным телескопа АРТ-П, полученным 7 февраля 1992 г. Нормировка спектра низкого состояния домножена на фактор 2.6. Линиями показаны результаты аппроксимации спектров степенным законом. Ошибки соответствуют одному стандартному отклонению.

Проседание спектра источника на высоких энергиях, наблюдаемое в апоастре, может быть связано с томпсоновским рассеянием. Исходя из отношения интенсивностей 2.6 (см. выше) оптическая толща данного уплотнения по рассеянию должна быть равной ~ 1. Соответствующая электронная плотность неоднородности составляет $n = \frac{\tau}{l \cdot \sigma_T} \sim 2 \times 10^{12}$ см⁻³ (σ_T – сечение томпсоновского рассеяния) при размере $l \sim 10R_{\odot}$, что согласуется с полученными выше значениями плотности облака из наблюдаемого поглощения на низких энергиях.

Вотерс и др. (1988) для ряда рентгеновских двойных систем с *Be* звездами показали в рамках модели с экваториально усиленным звездным ветром, что его плотность вокруг таких звезд изменяется по закону:

$$n(r) = n_0 \left(\frac{r}{R_c}\right)^{-\gamma},\tag{2.2}$$

где n₀ – плотность вещества у поверхности оптической звезды, r – расстоя-



Рис. 2.5. Эволюция спектра пульсара GX301-2 вблизи периастра по данным телескопа АРТ-П, полученным 9 января 1991 г. Сплошными линиями показаны результаты аппроксимации спектров степенным законом в высоком состоянии, пунктирными линиями - в низком. Ошибки соответствуют одному стандартному отклонению.

ние от звезды, γ — параметр, равны
й ~ 3 для большинства из рассматриваемых звезд.

Используя значения n_0 из той же работы (~ 10^{-11} гр см⁻³) и формулу (2.2), получаем среднюю плотность звездного ветра в экваториальном диске вокруг оптического компаньона в районе апоастра $n(5R_c) \sim 8 \times 10^{-14}$ гр см⁻³, что соответствует электронной плотности ~ 5×10^{10} см⁻³.

Проведенные оценки показывают, что неоднородности рассматриваемого нами масштаба плотнее среднего экваториального звездного ветра, характерного для звезд этого спектрального класса, примерно в 40-50 раз.

Исходя из светимости источника в момент прохождения апоастра (~ 2×10^{36} эрг с⁻¹) можно оценить темп аккреции на нейтронную звезду: $\dot{M}_x = L_x/\alpha c^2 \approx 1 \times 10^{16}$ г с⁻¹, где α порядка 0.2, с – скорость света в вакууме. Нейтронная звезда, движущаяся с относительной скоростью v_{rel} ($v_{rel}^2 = v_w^2 + v_{orb}^2$, где v_w – скорость звездного ветра на орбите нейтронной звезды, v_{orb} – ее орбитальная скорость) в



Рис. 2.6. Зависимость "жесткости" излучения от интенсивности источника, полученные за весь сеанс наблюдений 7 февраля 1992 г. (а) и 9 января 1991 г. (б).

среде со скоростью звука c_s , будет захватывать вещество из цилиндрического объема радиусом $r_a = 2GM_x/(v_{rel}^2 + c_s^2)$ (Бонди, Хойл, 1944). Если звездный ветер при этом сферически симметричен, то аккрецировать на нейтронную звезду будет $\dot{M}_x = \pi r_a^2 n v_{rel}$. Приняв $v_{rel} = 800$ км с⁻¹, $c_s \ll v_{rel}$, а $M_x = 1.4M_{\odot}$, получим радиус гравитационного захвата $r_a \sim 5 \times 10^{10}$ см и, соответственно, плотность ветра $n = \dot{M}_x/\pi r_a^2 v_{rel} \approx 2 \times 10^{-14}$ гр см⁻³, что достаточно близко к значению средней плотности звездного ветра в экваториальной плоскости звезд *Be* класса.

Необходимо отметить, что в рамках рассмотренной простой модели затмения нейтронной звезды неоднородностью в звездном ветре с оптической толщой $\tau \sim 1$ довольно затруднительно объяснить исчезновение пульсаций. Для того, чтобы форма профиля импульса оказалась размытой при однократном рассеянии фотонов, излучение должно испытать рассеяние в облаке, размеры которого порядка $T \cdot c \approx 290R_{\odot}$, где T – период пульсара, c – скорость света в вакууме, что превышает размер двойной системы $a_x \sim 160R_{\odot}$.

В заключение отметим интересный факт: во время прохождения апоастра жесткость излучения источника оказывается пропорциональной его интенсивности (рис. 2.6а) и связана соотношением $H \propto F^{-1.3}$, где H – жесткость излучения, F – интенсивность источника в мКраб. Напротив, в момент прохождения периастра (рис. 2.6б) жесткость практически не зависит от потока от источника, что согласуется с рис. 2.5.

2.5 Заключение

Используя данные обсерватории ГРАНАТ, показано, что вариации кривой блеска и спектра пульсара GX 301-2 могут быть объяснены неоднородностями в звездном ветре размером ~ $10R_{\odot}$, электронная плотность которых составляет ~ 2×10^{12} см⁻³. Последняя величина примерно в 50 раз выше средней плотности звездного ветра в экваториальной плоскости звезд *Be* класса.

Глава 3

Долговременные наблюдения рентгеновского пульсара LMC X-4 обсерваториями ИНТЕГРАЛ и RXTE

3.1 Введение

Рентгеновский пульсар LMC X-4, расположенный в Большом Магеллановом Облаке (расстояние до объекта d = 50 кпк), представляет из себя массивную двойную систему с периодом собственных пульсаций ~13.5 секунд (Келли и др., 1983), в которой затмение компактного объекта оптическим компаньоном, О8 звездой 14 величины с массой 20 M_{\odot} (Шевалье, Иловайский, 1977), происходит каждые ~1.408 дня (Ли и др., 1978; Ланг и др., 1981, Левин и др., 2000). Левин и др. (2000) приводят следующие орбитальные параметры системы: $a_x \sin i = 26.333 \pm 0.019$ световых секунд, эксцентриситет $e < 0.003(2\sigma)$, эпоха нулевой орбитальной фазы $T_0 =$ MJD51110.86571.

Ланг и др. (1981) указали на наличие в системе суперорбитального периода длительностью ~ 30.5 дня, в пределах которого интенсивность источника изменяется примерно в 60 раз. В этой же работе было сделано предположение о том, что данный эффект вызван перекрыванием прямых рентгеновских лучей наклоненным к плоскости орбиты прецессирующим аккреционным диском, подобно тому как это наблюдается в системе Her X-1 (Тананбаум и др., 1972). Основываясь на измерениях практически одинакового потока рентгеновского излучения, наблюдаемого от источника во время затмений в низком и высоком состояниях, Ву и др. (1995) сделали заключение о постоянстве собственной светимости пульсара, что также подтверждает предположение Ланга и др. (1981). Проанализировав данные наблюдений обсерваторий RXTE и GINGA, Паул, Китамото (2002) получили оценку на темп уменьшения периода прецессии аккреционного диска $\dot{P} \sim -2 \times 10^{-5}$ с/с.

В литературе широко обсуждается вспышечная активность LMC X-4 (см., например, Епштейн и др., 1977; Скиннер и др., 1980; Келли и др., 1983; Левин и др., 1991). В среднем раз в день во время высокого состояния от источника регистрируется вспышка, длительность которой составляет от нескольких десятков секунд до нескольких десятков минут. Однако есть свидетельства (Ву и др., 1995) наличия всплесков и в низком состоянии.

В разные периоды времени пульсар LMC X-4 демонстрирует как замедление, так и ускорение собственного вращения, что может свидетельствовать о значении его периода как о близком к равновесному. В этом случае, основываясь на теории дисковой аккреции (Гош и Лэмб, 1979), нейтронная звезда с равновесным периодом ~ 13.5 сек и рентгеновской светимостью ~ 4×10^{38} эрг/с должна обладать очень высоким магнитным моментом ~ $10^{31.5}$ Гс см³ (Ву и др., 1996).

Спектр источника выше нескольких кэВ описывается степенным законом с завалом на высоких энергиях. Измеренное в направлении на источник значение поглощения (как и параметры аппроксимирующей модели) не зависит от фазы прецессионного периода и составляет величину $N_H \sim 5.5 \times 10^{20}$ атомов см⁻², близкую к Галактической плотности, что свидетельствует об отсутствии сильного внутреннего поглощение в двойной системе (Наик, Паул 2003). Разными авторами (Левин и др. 1991, Михара 1995, Ву и др. 1996, Ла Барбера и др. 2001) было сделано несколько оценок на присутствие в спектре источника линии циклотронного поглощения в диапазоне энергий от 19 до 100 кэВ, однако до сих пор нет надежных измерений ее величины и, соответственно, магнитного поля на поверхности нейтронной звезды.

3.2 Наблюдения

В рамках исследований области Большого Магелланова Облака, проведенного обсерваторией ИНТЕГРАЛ со 2 по 28 января 2003 года, было сделано около 500 индивидуальных наведений, во время которых пульсар LMC X-4 попадал в поле зрения приборов обсерватории. Суммарное время наблюдений источника составило ~ 10⁶ сек, причем во всех наведениях он находился в зоне полного кодирования. Для исследования долгопериодических характеристик источника были также использованы данные монитора всего неба (ASM) обсерватории RXTE. Эти данные представляют из себя усредненные по дням потоки от источника в энергетическом диапазоне 1.3-12.2 кэВ.

На рис. 3.1 показана карта области Большого Магелланова Облака, полученная телескопом IBIS в диапазоне энергий 18-60 кэВ. Карта построена за все время наблюдений источника в январе 2003 г. Помимо самого пульсара LMC X-4 на изображении значимо регистрируются черная дыра LMC X-1 и одиночный пульсар PSR0540-69. Излучение от остатка вспышки сверхновой SN1987A не регистрируется (Штыковский и др. 2005).



Рис. 3.1. Изображение области Большого Маггеланова облака, содержащее рентгеновский пульсар LMC X-4, полученное телескопом IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ в диапазоне энергий 20-60 кэВ. Подписаны значимо регистрируемые источники, положение остатка вспышки сверхновой SN1987A показано крестиком.

3.3 Временной анализ

3.3.1 Период прецессии

Как было сказано в параграфе 3.1, в системе LMC X-4 присутствует приблизительно 30-ти дневный период, который, скорее всего, связан с затмением излучающих областей нейтронной звезды прецессирующим наклоненным аккреционным диском. Для определения точного значения прецессионного периода мы использовали данные монитора всего неба ASM обсерватории RXTE, полученные в период с января 1996 по июль 2004 гг. Используя метод наложения эпох (Лехи и др., 1983) было найдено наилучшее значение периода прецессии аккреционного диска, равное 30.275 дня. Для оценки ошибки данного измерения был использован следующий метод: для каждой точки на кривой блеска источника в пределах 1σ ошибки на поток случайным образом выбиралась точка, используемая как новое значение потока от источника. Таким образом моделировалась очередная кривая блеска, для которой, в свою очередь, определялось лучшее значение периода. Всего было получено около 100 значений периода, разброс которых и считался нами 1 σ доверительным интервалом. Конечный результат такого анализа дал следующее значение среднего за 1996-2004 гг периода прецессии аккреционного диска $P_{prec} = 30.275 \pm 0.004$ дня.

Кривая блеска источника в жестком рентгеновском диапазоне энергий (20-50 кэВ), представленная на рис. 3.2а, имеет характерный для нее вид. Примерно через 2 дня после начала наблюдений пульсар перешел во включенное состояние, еще через 5 дней поток от него увеличился примерно в 6-8 раз и достиг максимального значения (~ 70 мКраб). Стрелками на рисунке изображены моменты "включения" и "выключения" источника по данным, полученным более 20 лет назад Лангом и др. (1981); момент "включения" был рассчитан, используя полученные этими авторами эфемериды, момент "выключения" был получен в предположении, что высокое состояние источника длится ~ 60% длительности всего периода прецессии (Ланг и др. 1981). Видно, что предполагаемая нулевая фаза (момент "включения") суперорбитального цикла оказывается сильно смещена относительно современных измерений обсерваторией ИНТЕГРАЛ. Отметим, что то же соотношение между длительностью высокого и низкого состояний получается и по результатам наблюдений источника обсерваторией ИНТЕ-ГРАЛ (рис. 3.2а).

К сожалению, непосредственно момент "включения" изучаемого объекта не наблюдался обсерваторией ИНТЕГРАЛ и для определения нулевой фазы суперорбитального периода нам пришлось воспользоваться интерполяцией. Оцененный таким образом момент перехода пульсара LMC X-4 в высокое состояние составляет MJD 52644.5 \pm 1.0. Благодаря хорошей статистике и длинному ряду наблюдений нам удалось определить среднее значение периода прецессии с высокой точностью (см. выше), что обеспечивает определение предполагаемой нулевой фазы 20 лет назад с точностью $\sim 1\,$ день в предположении постоянства периода. Используя полученное нами значение суперорбитального периода можно вычислить предполагаемую нулевую фазу, ближайшую к измеренной Лангом и др. (1981). Наш результат находится либо до этого момента на ~ 18.5 дней, либо после на $\sim 12\,$ дней. Таким образом, период прецессии аккреционного диска, в среднем, должен либо увеличиваться со скоростью $\dot{P} \sim -1.3 \times 10^{-3}$ с с⁻¹, либо уменьшаться с $\dot{P} \sim 2 \times 10^{-3}$ с с⁻¹. Следует отметить, что здесь приведены нижние пределы на приращение периода, т.к. нами не учитывалось изменение, кратное целому числу периодов.

С другой стороны, среднюю скорость изменения суперорбитального периода можно оценить просто воспользовавшись его значениями, полученными Лангом и др. (1981) и нами. Такая оценка дает величину, равную $\dot{P} = (-2.5 \pm 0.8) \times 10^{-5}$ с с⁻¹, что гораздо меньше предыдущей нашей оценки, полученной из экстра-поляции моментов включения, и согласуется в пределах ошибки со значением, определенным Паулом, Китамото (2002), равным $\dot{P} \sim -2 \times 10^{-5}$ с с⁻¹.

Наблюдаемое расхождение в оценках темпа изменения аккреционного периода, возможно, связано с тем, что эволюция периода прецессии аккреционного диска у пульсара LMC X-4 шла не равномерно, а с моментами ускоре-



Рис. 3.2. (а) Кривая блеска пульсара LMC X-4 в жестком рентгеновском диапазоне энергий (20-50 кэВ), полученная по данным телескопа IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ. Стрелками изображены моменты "включения" и "выключения" источника по данным других авторов. (б) Кривая блеска источника по данным монитора ASM обсерватории RXTE за 8 лет наблюдения, свернутая с наилучшим периодом, полученным по этим же данным. Ошибки соответствуют одному стандартному отклонению.

ния/замедления значительно выше среднего уровня.

Используя многолетние наблюдения (январь 1996 – август 2002 гг.) монитора всего неба ASM обсерватории RXTE, Кларксон и др. (2003) построили динамический спектр мощности исследуемого источника. На протяжении всего периода наблюдений значение суперорбитального периода остается постоянным вблизи значения 30.28 дня. Однако величина 3σ погрешности ± 0.46 дня не позволяет сделать окончательного заключения по вопросу о вариациях периода прецессии.

На рис. 3.26 изображена кривая блеска пульсара LMC Х-4, полученная по

данным монитора ASM обсерватории RXTE за ~ 8.5 лет наблюдения и свернутая с наилучшим периодом 30.275 дня. Интересно отметить, что вблизи фазы ~ 0.8 этого цикла присутствует значимое повышение интенсивности источника длительностью около трех дней. Похожую особенность в кривой блеска пульсара можно увидеть на рис.1 и 3 в работе Ланга и др. (1981). Аналогичное повышение интенсивности источника во время "выключенного" состояния также наблюдается у другого рентгеновского пульсара Her X-1 (Джонс, Форман 1976).

3.3.2 Орбитальный период

На рис. 3.3а приведена кривая блеска пульсара LMC X-4 в диапазоне энергий 20-50 кэВ, когда источник находился вблизи максимума наблюдаемого от него потока рентгеновского излучения. На рисунке четко просматриваются моменты затмений рентгеновского источника оптическим компаньоном. Вход и выход из затмения сопровождается плавным изменением наблюдаемой интенсивности пульсара, однако через короткий промежуток времени (порядка часа) после выхода из затмения наблюдается значительное увеличение потока от источника продолжительностью около трех часов. Длительность входа и выхода из затмения наблюдается около трех часов. Длительность входа и выхода из затмения из кривой блеска источника, ~ 3 ксек, что при скорости движения нейтронной звезды по орбите около 500 км/с (Келли и др., 1983) соответствует размеру переходной области ~ 1.5×10^6 км, что сравнимо с размерами атмосферы звезд поздних O-классов, находящихся на главной последовательности (Ву и др., 1996).

Зависимость жесткости излучения, определяемой как отношение потоков от источника в диапазонах энергий 40-60 кэВ и 20-40 кэВ, от времени показана на рис. 3.36. Видна тенденция к умягчению излучения исследуемого объекта при его приближении к моменту затмения, однако сразу после него такая зависимость нарушается. Жесткость излучения во время самих затмений не показана на рисунке из-за невозможности зарегистрировать значимый поток от источника.

Пунктирными линиями нанесены эфемериды затмений, полученные из работ Ли и др. (1978), Ланга и др. (1981) и Левина и др. (2000). Отметим, что орбитальный период в системе отличается высокой стабильностью и практически не изменился за более чем двадцатилетнюю историю изучения пульсара. Результаты наблюдений источника обсерваторией ИНТЕГРАЛ в 2003 г. подтверждают этот вывод (см. рис. 3.3). Рядом авторов (Ву и др. 1996, Левин и др. 2000) предпринимались попытки измерить темп изменения орбитального периода, однако значимость полученных величин невелика ($\dot{P}_{orb}/P_{orb} = (-5.3 \pm 2.7) \times 10^{-7}$ год⁻¹ и $\dot{P}_{orb}/P_{orb} = (1.1 \pm 0.8) \times 10^{-6}$ год⁻¹, соответственно) и не противоречит наблюдаемым результатам.

Следует отметить, что в низком состоянии поток излучения от источника не падает до нуля и продолжает регистрироваться приборами обсерватории ИНТЕГРАЛ, хотя и уменьшается. Так, по данным наблюдений, охватывающих временной промежуток MJD 52662.5–52665, поток от источника в диапазоне



Рис. 3.3. (а) Орбитальная кривая блеска пульсара LMC X-4 по данным телескопа IBIS во время яркого состояния. Пунктирными линиями показаны моменты входа и выхода из затмения по данным Ланг (1981). (б) Изменение жесткости излучения источника на масштабе орбитального периода. Ошибки соответствуют одному стандартному отклонению.

энергий 20-50 кэВ составлял 2.6 ± 0.4 мКраб, в то время как несколько дней спустя, MJD 52667–52668, он уменьшился практически в два раза, 1.3 ± 0.5 мК-раб.

Во время рентгеновских затмений пульсара LMC X-4 наблюдается резкое уменьшение интенсивности его излучения. Нами был проведен анализ излучения во время затмений для двух временных участков, когда источник находился в высоком и низком состояниях (MJD 52648.8 и MJD 52665, соответственно). В обоих случаях излучение от исследуемого объекта значимо не регистрируется и были получены только верхние пределы на поток его излучения в диапазоне энергий 20-50 кэВ, которые оказались практически одинаковыми, ~ 1.2 мКраб (1 σ). Необходимо отметить, что во время рентгеновского затмения 20 января



Рис. 3.4. Вспышка излучения, зарегистрированная телескопом IBIS обсерватории ИН-ТЕГРАЛ от пульсара LMC X-4 27 января 2003 г. во время низкого состояния. Сплошной линией показана аппроксимация профиля вспышки гауссианой.

2003 г. (MJD 52659.94-52660.17), когда источник находился на стадии уменьшения интенсивности, зарегистрированный от него поток излучения в диапазоне энергий 20-50 кэВ существенно превышал полученные выше верхние пределы 3.7 ± 1.0 мКраб, однако значимость данного измерения невелика. Подобный анализ для мягкого излучения источника (0.1-2.4 кэВ) был проведен Ву и др. (1995). Полученные этими авторами результаты свидетельствуют о неизменности интенсивности источника во время затмений, что было ими интерпретировано как доказательство неизменности собственной светимости пульсара. Данное заключение было основано на предположении, что рентгеновские лучи, наблюдаемые во время затмения, являются рассеянными на широко распределенном вокруг источника веществе, возможно, короне над внешними краями аккреционного диска, подобно тому как это наблюдается у пульсара Her X-1 (Лутовинов и др. 2000).

3.3.3 Всплески излучения

Многими авторами описывается вспышечная активность пульсара LMC X-4. Наиболее характерными для исследуемого источника являются короткие вспышки (продолжительностью до 1000 сек), в течение которых интенсивность пульсара изменяется в 2–5 раз (Левин и др., 2000). Во время низкого состояния (MJD 52666) от источника была зарегистрировано повышение наблюдаемого потока излучения на нехарактерном для него масштабе времени. Продолжительность вспышки составила около 10 часов (орбитальная фаза 0.3–0.6), а интенсивность в максимуме (~10 мКраб) превысила средний уровень низкого состояния примерно в 4 раза. На рис. 3.4 показан профиль вспышки, полученный по данным телескопа IBIS в диапазоне энергий 20-50 кэВ.

3.4 Спектральный анализ

В предыдущей части было показано, что на кривой блеска пульсара LMC X-4 можно выделить значительное число особенностей. В связи с этим представляет интерес изучение эволюции спектра излучения источника со временем. Еще одной целью спектрального анализа является поиск возможной резонансной линии циклотронного поглощения, о присутствии которой упоминалось рядом авторов (см. Введение).

Основой для спектрального анализа источника в широком диапазоне энергий (4-100 кэВ) была выбрана типичная для объектов этого класса модель, задаваемая формулой (5).

Всего было выделено четыре состояния, в которых проводился независимый анализ спектра излучения пульсара: высокое состояние (без учета моментов рентгеновского затмения), всплески излучения сразу после выхода источника из затмения, низкое состояние (также без учета моментов рентгеновского затмения) и вспышка, произошедшая 27 января 2003 г. (MJD 52666).

Параметры наилучшей аппроксимации спектров источника моделью (5) приведены в таблице 3.1. В широком диапазоне энергий (с использованием данных монитора JEM-X) удалось восстановить спектры только в высоком состоянии. Из-за недостаточной чувствительности монитора JEM-X, в низком состоянии источник значимо регистрировался только телескопом IBIS, поэтому при аппроксимации спектров в этом состоянии параметры, относящиеся к области стандартного рентгеновского диапазона (< 20 кэВ), были зафиксированы на значениях, полученных для высокого состояния. Из таблицы видно, что форма спектра источника и его параметры (наклон, параметры завала) остаются практически постоянными с изменениями интенсивности пульсара. На рис. 3.5 показан энергетический спектр LMC X-4, восстановленный по данным приборов обсерватории ИНТЕГРАЛ в широком диапазоне энергий для высокого состояния.

Для проверки гипотезы о наличии в спектре источника циклотронной особенности в диапазоне энергий 4-100 кэВ нами была модифицирована аппроксимирующая модель добавлением в нее соответствующей компоненты (формула (9)).

Используя модифицированную модель, был аппроксимирован спектр излучения пульсара во время высокого состояния за исключением моментов рентге-



Рис. 3.5. Энергетический спектр источника LMC X-4 во время яркого состояния по данным телескопов JEM-X и IBIS. Точками показан экспериментальный спектр; сплошной линией – его аппроксимация моделью, включающей в себя степенной закон и завал на высоких энергиях.

новского затмения. При этом применялась следующая процедура: энергия центра предполагаемой циклотронной линии E_{cyc} менялась в диапазоне 5-100 кэВ с шагом 5 кэВ, ее ширина была зафиксирована на 5 кэВ; для каждого пробного значения центра линии с помощью $\Delta \chi^2$ -критерия проверялась значимость улучшения статистики. В результате, в исследуемом диапазоне энергий не было найдено такой энергии циклотронной линии E_{cyc} , включение которой в модель приводило бы к улучшению качества аппроксимации спектра более чем на 2σ .

Полученный результат может свидетельствовать либо о том, что энергия циклотронной линии лежит за пределами нашего диапазона энергий (4-100 кэВ), либо, что чувствительности приборов обсерватории ИНТЕГРАЛ не хватает для обнаружения циклотронной линии в спектре источника LMC X-4. В пользу гипотезы о сильном магнитном поле (> 10^{13} Гс) в системе говорит соотношение между собственным периодом вращения нейтронной звезды и ее светимостью, в предположении, что период близок к равновесному (Ву и др. 1996).

Табл. 3.1. Параметры аппроксимации спектра излучения источника LMC X-4 по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ (JEM-X + IBIS)^a

Состояние	Светимость, ×10 ³⁷ эрг/с б	α	<i>Е</i> _с , кэВ	<i>Е</i> _{<i>f</i>} , кэВ	$\chi^2_N(N)^{\mathrm{B}}$
Высокое (MJD 52646-52650)	38.7	0.20 ± 0.15	9.1 ± 0.8	11.0 ± 0.6	0.88(128)
Вспышки (в высоком сост.)	47.9	0.44 ± 0.20	8.9 ± 1.0	11.9 ± 0.8	0.82(126)
Низкое (MJD 52662.5-52668)	1.4	0.2^{Γ}	9.1 ^г	14.8 ± 3.2	1.19(4)
Вспышка (MJD 52666)	3.1	0.2^{Γ}	9.1 ^г	17.1 ± 5.3	0.41(6)

^а Все ошибки даны на уровне 1σ .

⁶ Светимость в диапазоне 3-100 кэВ в предположении расстояния до источника 50 кпс.

^в Величина χ^2 , нормированная на число степеней свободы *N*.

^г Параметры зафиксированы на значениях, полученных для высокого состояния.

3.5 Заключение

В главе представлены результаты долговременного временного и спектрального анализа излучения рентгеновского пульсара LMC X-4, проведенного по данным наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ, выполненным в январе 2003 года, и многолетним наблюдениям (1996-2004 гг.) монитора всего неба обсерватории RXTE.

С высокой точностью определена средняя за последние ~ 8.5 года величина периода прецессии (30.275 ± 0.004 дня). Учитывая несовпадение моментов перехода источника во включенное состояние, предсказанные по данным других авторов, показано, что данная величина не является постоянной и, скорее всего, изменяется неравномерно.

По данным телескопа IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ отмечены небольшие всплески излучения, появляющиеся после выхода рентгеновского источника из затмения. Зарегистрирована вспышка излучения во время низкого состояния длительностью около 10 часов. Значение нулевой фазы орбитального периода, определенное более 20 лет назад, хорошо удовлетворяет нашим наблюдательным данным, что говорит о стабильности величины самого орбитального периода.

Для разных состояний, различаемых по интенсивности объекта, был проведен спектральный анализ. Спектр источника описывается характерной для данного класса объектов моделью, включающей в себя степенной закон с завалом на высоких энергиях. В рамках проверки гипотезы о наличии в спектре источника циклотронной особенности в диапазоне энергий 4-100 кэВ была соответствующим образом модернизирована аппроксимирующая модель. В результате такого анализа было показано, что в спектре пульсара отсутствует подобная особенность со значимостью, превышающей 2σ . Сопоставление полученных ограничений с результатами других авторов (Ву и др. 1996) свидетельствует, скорее, о сильном магнитном поле (> 10^{13} Гс) на поверхности нейтронной звезды, чем о слабом (< 5×10^{11} Гс).

Глава 4

Магнитное поле и расстояние до рентгеновского пульсара KS 1947+300

4.1 Введение

Транзиентный рентгеновский источник KS 1947+300 был открыт в июне 1989 года при наблюдениях области Суд X-1 телескопом TTM на борту модуля KBAHT орбитальной станции МИР (Бороздин и др., 1990). При этом регистрируемый от него поток составлял 70 ± 10 мКраб в диапазоне энергий 2-27 кэВ, а спектр аппроксимировался степенным законом с показателем $\gamma = -1.72 \pm 0.31$ и фотопоглощением на низких энергиях с плотностью атомов водорода на луче зрения $N_H = (3.4 \pm 3.0) \times 10^{22}$ см⁻². В апреле 1994 г. в той же области неба монитором BATSE обсерватории ComptonGRO был обнаружен рентгеновский пульсар GRO J1948+32 с периодом 18.7 сек. Спектр данного источника в диапазоне энергий 20-120 кэВ описывался степенным законом с фотонным индексом $\gamma = 2.65 \pm 0.15$ (Чакрабарти и др., 1995). Позднее было установлено, что KS 1947+300 и GRO J1948+32 представляют из себя один и тот же объект – транзиентный рентгеновский пульсар (Свонк, Морган, 2000).

До последнего времени не было известно случаев резкого сбоя периода пульсаций (так называемых глитчей, английское – glitches) у аккрецирующих рентгеновских пульсаров. Однако Галловей и др. (2004), проведя анализ данных обсерватории RXTE, указывают на наличие у источника KS 1947+300 изменений периода пульсаций за очень короткое время. Так, в январе 2001 г. частота его пульсаций увеличилась примерно на 1.8×10^{-6} Гц менее чем за 10 часов (темп изменения – $\dot{f} \approx 5 \times 10^{-11}$ Гц с⁻¹), при этом значительного увеличения рентгеновского потока не наблюдалось. Относительное же изменение частоты в данном случае составило $\frac{\Delta \nu}{\nu} = 3.7 \times 10^{-5}$, что значительно больше аналогичной величины, наблюдаемой при глитчах у радиопульсаров (Кравчик и др., 2003) и аномальных рентгеновских пульсаров (Каспи, Гавриил, 2003). В то же вре-



Рис. 4.1. Карта участка неба, содержащего KS 1947+300, полученная телескопом IBIS в энергетическом диапазоне 18-60 кэВ. Общая экспозиция составляет около 6 ксек.

мя, сравнение с результатами монитора BATSE показывает наличие замедления вращения пульсара со средней скоростью $\dot{f} \approx -8 \times 10^{-13}$ Гц с⁻¹ на масштабе нескольких лет. Основываясь на поведении периода пульсаций во время вспышки 2000-2001 гг., Галловей и др. (2004) определили параметры двойной системы: орбитальный период $P_{orb} = 40.415 \pm 0.010$ дней, проекция полуоси релятивистского объекта $a_x \sin i = 137 \pm 3$ световых сек, эксцентриситет $e = 0.033 \pm 0.013$.

Оптический компаньон в системе представляет из себя звезду спектрального класса *B0Ve*. При этом, если истинная светимость звезды характерна для звезд данного спектрального класса, то расстояние до нее оценивается в ~ 10 кпк (Негерела и др., 2003).

4.2 Наблюдения

В рамках Основной программы наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ при сканировании Галактической плоскости в поле зрения научных приборов время от времени попадает рентгеновский пульсар КЅ 1947+300. В настоящей главе анализируются данные наблюдений, проведенных ИНТЕГРАЛом с декабря 2002 года по апрель 2004 года. За это время было сделано около 700 наведений, в которых исследуемый объект попадал в поле зрения инструментов обсерватории, при этом общая экспозиция составила около 1.5 млн сек.

На рис. 4.1 показана область неба, содержащая рентгеновский пульсар KS 1947+300, полученная телескопом IBIS в диапазоне энергий 18-60 кэВ. Карта построена во время сканирования Галактической плоскости, проведенного 11 мая 2003 г. (MJD 52770). Значимость регистрации источника составила 29 σ при

Время наблюдений,	Орбитальная	Поток,	Период,
MJD	фаза	мКраб	с
52605 - 52615	0.33 - 0.58	$4.5{\pm}0.3$	$18.669 {\pm} 0.001$
52723	0.25	$6.9{\pm}2.1$	_б
52746	0.82	12.1 ± 2.3	_б
52761	0.19	$64.0{\pm}2.8$	$18.721{\pm}0.005$
52770	0.42	$77.8{\pm}2.7$	$18.718 {\pm} 0.002$
52782	0.71	$67.8{\pm}2.3$	$18.721{\pm}0.002$
52797	0.08	$15.3{\pm}2.0$	_б
52806	0.31	$6.3 {\pm} 2.5$	_б
52821	0.68	$7.7{\pm}2.3$	_б
52970	0.36	$31.0{\pm}13.9$	_б
52985	0.74	$69.8{\pm}3.4$	$18.727{\pm}0.002$
52994	0.96	$47.5{\pm}2.4$	$18.725{\pm}0.002$
53019	0.58	$6.3{\pm}2.1$	_б
53102	0.65	$96.1{\pm}2.9$	$18.730{\pm}0.002$

Табл. 4.1. Наблюдение пульсара KS 1947+300 телескопом IBIS а

^а в диапазоне энергий 18-60 keV

⁶ невозможно определить из-за малой статистики

общей экспозиции ~6 ксек.

Из-за того, что исследуемый объект в подавляющем большинстве случаев не попадал в поле зрения рентгеновского монитора JEM-X, входящего в состав обсерватории ИНТЕГРАЛ, нам не удалось проанализировать его поведение в стандартном рентгеновском диапазоне энергий. Поэтому для восполнения информации в этом диапазоне (1.3-12.2 кэВ) были использованы одновременные данные монитора ASM обсерватории RXTE. Кроме того, на основании открытых данных обсерватории RXTE была прослежена эволюция излучения источника в широком диапазоне энергий во время одной из предыдущих вспышек 2000-2001 гг. (Obs. ID 50068, 50425 и 60402).

4.3 Временной анализ

Как уже упоминалось выше, источник KS 1947+300 проявляет сильную вспышечную активность. На рис. 4.2 показана его кривая блеска в диапазоне энергий 18-60 кэВ, полученная по данным телескопа IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ в 2002 – 2004 гг. (верхняя панель), и соответствующая кривая блес-



Рис. 4.2. Кривая блеска пульсара KS 1947+300 в диапазоне энергий 18-60 кэВ (верхняя панель) и соответствующая кривая блеска в диапазоне 1.3-12.2 кэВ (нижняя панель). Ошибки соответствуют одному стандартному отклонению.

ка в диапазоне энергий 1.3-12.2 кэВ по данным монитора ASM обсерватории RXTE (нижняя панель).

Как видно из кривой блеска, во время первой серии наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ в декабре 2002 г. (MJD 52600–52650) источник находился в "низком" состоянии, при этом его интенсивность составляла ~4.5 мКраб в диапазоне энергий 18-60 кэВ. В конце указанного периода времени поток от источника начал увеличиваться и достиг ~30 мКраб, однако полностью вспышку нам пронаблюдать не удалось.

Во время дальнейших наблюдений пульсар KS 1947+300 попадал в поле зрения телескопа IBIS гораздо реже, что, однако, позволило зарегистрировать от него несколько мощных вспышек излучения. Первая из них началась в середине апреля 2003 г. (MJD 52750) и длилась приблизительно 50 дней, а максимальный поток от источника составил около 80 мКраб в диапазоне энергий 18-60 кэВ. В дальнейшем нами были зарегистрированы еще два всплеска излучения от исследуемого объекта в декабре 2003 г. и апреле 2004 г. с максимальными потоками ~ 70 (MJD 52985) и ~ 100 (MJD 53102) мКраб в диапазоне энергий 18-60 кэВ,



Рис. 4.3. Профили импульса KS 1947+300, полученные телескопом IBIS при разных интенсивностях излучения: средняя болометрическая светимость источника составляет (a) 2.6×10^{37} эрг с⁻¹ (MJD 52770), (b) 1.5×10^{37} эрг с⁻¹ (MJD 52994) и (c) 0.2×10^{37} эрг с⁻¹ (MJD 52605–52615).

соответственно. Из рис. 4.2 видна явная корреляция между интенсивностью излучения источника в жестком и мягком рентгеновских диапазонах энергий.

В таблице 4.1 приведены потоки излучения от пульсара KS 1947+300, измеренные в диапазоне энергий 18–60 кэВ, орбитальные фазы во время рассматриваемых наблюдений, рассчитанные исходя из значения $T_{\pi/2} = 51985.31$ MJD, приведенного в работе Галловея и др. (2004), и значения периода его пульсаций, определенные методом наложения эпох после коррекции времен прихода фотонов на движение Земли, космического аппарата и нейтронной звезды в двойной системе. Как видно из таблицы, частота пульсаций источника вблизи максимума апрельской вспышки 2003 г. (MJD 52760–52780) оказывается пропорциональной величине потока излучения от него. Из-за недостатка наблюдательных данных и статистики (см., например, результаты измерений периода пульсаций во время вспышки в декабре 2003 г.) значимость этого результата невелика, однако он согласуется с результатами измерений периода пульсаций во время предыдущих вспышек обсерваториями ComptonGRO и RXTE.

Анализ излучения рентгеновских пульсаров показывает, что их профили им-

пульса могут сильно зависеть от энергии и интенсивности источника (см., например, Вайт и др. 1983, Нагазе 1989, Лутовинов и др. 1994 и ссылки там). Мы исследовали поведение профиля импульса и доли пульсирующего излучения источника KS1947+300 в зависимости от его состояния. На рис. 4.3 приведены фазовые кривые блеска пульсара, полученные по данным телескопа IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ и усредненные при разных интенсивностях излучения: (а) поток от источника в диапазоне энергий 18-60 кэВ $F \approx 78$ мКраб (MJD 52770), (b) $F \approx 48$ мКраб (MJD 52994) и (c) $F \approx 5$ мКраб (MJD 52605–52615). В первом случае профиль импульса представляет из себя один широкий пик, незначительно уменьшающий свою интенсивность с ростом фазы. По мере уменьшения интенсивности источника начинает проявляться более тонкая структура профиля (разделение на несколько отдельных пиков). Во время наблюдений 7 апреля 2004 г. (MJD 53102), когда максимальный поток от источника в диапазоне энергий 18-60 кэВ составил около 96 мКраб, профиль импульса имел форму, идентичную приведенной на рис. 4.3а.

Для дальнейшего анализа полученных результатов и сравнения их с теоретическими моделями следует перейти от потоков к светимостям в широком диапазоне энергий, что однако затруднительно сделать в большинстве случаев из-за наличия в нашем распоряжении данных только в жесткой части спектра. Учитывая это, для приблизительной оценки болометрической светимости пульсара во время наблюдений обсерваторией ИНТЕГРАЛ вспышки в апреле-мае 2003 г. мы воспользовались следующим методом: в предположении основного энерговыделения в диапазоне энергий 2-100 кэВ и расстояния до объекта d = 10 кпс была получена его болометрическая светимость во время наблюдения 7 апреля 2004 г., когда исследуемый источник попадал также в поле зрения телескопа JEM-X. Затем, сравнивая потоки в жесткой части спектра по данным телескопа IBIS в этой и интересующей нас точках, можно получить величину светимости объекта из простых соображений пропорциональности. Однако следует понимать, что данная оценка верна лишь с точностью постоянства формы спектра в двух сравниваемых точках. Таким образом, представленные на рис. 4.3 профили импульса соответствуют приблизительным болометрическим светимостям источника (а) 2.5×10^{37} , (б) 1.5×10^{37} и (в) 0.2×10^{37} эрг с⁻¹, соответственно.

Для сравнения на рис. 4.4 приведены профили импульса источника KS 1947+300, полученные по данным спектрометра HEXTE обсерватории RXTE в диапазоне энергий 18-60 кэВ. Наблюдения проводились во время вспышки излучения от исследуемого источника, начавшейся в декабре 2000 г. Каждая панель рисунка соответствует средней болометрической светимости источника 10.6×10^{37} , 5.4×10^{37} , 3.4×10^{37} , 0.9×10^{37} , 0.3×10^{37} эрг с⁻¹ с уменьшением сверху вниз. Существенным различием между этой вспышкой и вспышками, зарегистрированными обсерваторией ИНТЕГРАЛ, является ее в ~3 раза большая длительность и в ~4 раза большая интенсивность. Тем не менее, в этом случае поведение профилей импульса оказывается схожим с наблюдавшимся обсерваторией ИНТЕГРАЛ (рис. 4.3). В самом ярком состоянии профиль импульса представляет из себя один широкий пик с его разделением на вершине



Рис. 4.4. Профили импульса KS 1947+300, полученные спектрометром HEXTE при разных интенсивностях излучения во время вспышки 2000-2001 гг. (фон не вычтен). Средняя болометрическая светимость источника составляет (а) 11×10^{37} эрг с⁻¹, (b) 8×10^{37} эрг с⁻¹, (c) 4.5×10^{37} эрг с⁻¹, (d) 1.2×10^{37} эрг с⁻¹, (e) 0.4×10^{37} эрг с⁻¹.

на два подпика, один из которых значительно уже второго; интенсивность профиля уменьшается с ростом фазы. С уменьшением светимости источника все более четким становится разделение на несколько подпиков. При достижении светимости объекта 0.9×10^{37} эрг с⁻¹ профиль вновь становится двухпиковым, причем основной пик смещается приблизительно на четверть фазы назад. Такое поведение профиля импульса может быть связано с различными режимами излучения в зависимости от светимости источника (Баско, Сюняев 1976). В более мягкой области спектра по данным спектрометра РСА обсерватории RXTE также существует подобная зависимость формы импульса от интенсивности источ-



Рис. 4.5. Профили импульса KS 1947+300, полученные обсерваторией RXTE в разных энергетических диапазонах. Ошибки соответствуют одному стандартному отклонению.

ника, однако не так ярко выраженная (см. рис. 3 в работе Галловея и др. 2004).

На рис. 4.5 показано изменение профиля импульса исследуемого объекта в зависимости от энергетического диапазона. На двух верхних панелях представлены фазовые кривые блеска, полученные по данным спектрометра PCA обсерватории RXTE во время наблюдений 10 февраля 2001 г. (MJD 51950), на нижней – по данным спектрометра HEXTE, усредненным за время нахождения источника вблизи максимума блеска (MJD 51941-51959). По мере роста энергии наблюдается увеличение относительной интенсивности первого пика, однако существенных изменений формы не обнаружено.

Из-за отсутствия на данный момент возможности корректного определения фона мы не смогли провести анализ поведения доли пульсирующего излучения по данным телескопа IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ. Поэтому для подобного анализа были использованы данные спектрометров НЕХТЕ и РСА обсерватории RXTE. На рис. 4.6а приведена зависимость доли пульсирующего излучения, определяемой как $P = (I_{max} - I_{min})/(I_{max} + I_{min})$, где I_{max} и I_{min} – скорректированные на фон значения скорости счета в максимуме и минимуме профиля импульса, от орбитальной фазы, полученная по данным спектрометра НЕХТЕ в



Рис. 4.6. Зависимость доли пульсирующего излучения в диапазоне энергий 18-60 кэВ от орбитальной фазы пульсара KS 1947+300 во время вспышки 2000-2001 гг. по данным спектрометра НЕХТЕ обсерватории RXTE (верхняя панель) и в диапазоне энергий 3-20 кэВ по данным спектрометра РСА обсерватории RXTE (нижняя панель).

диапазоне энергий 18–60 кэВ в области максимума вспышки 2000-2001 гг. Видно, что вблизи фазы ~0.5 существует минимум. Аналогичная зависимость, хотя несколько менее выраженная, характерна и для данных, полученных спектрометром PCA в диапазоне энергий 3-20 кэВ (рис. 4.66). Небольшой разброс точек по величине доли пульсирующего излучения на близких орбитальных фазах объясняется зависимостью этой величины от интенсивности источника.

4.4 Спектральный анализ

Как было показано в предыдущей главе, во время рентгеновских вспышек у источника KS 1947+300 наблюдается зависимость формы профиля импульса от



Рис. 4.7. Энергетический спектр излучения источника KS 1947+300 по данным наблюдений телескопами JEM-X и IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ 7 апреля 2004 года. Пунктирной линией показана наилучшим образом аппроксимирующая спектр модель.

светимости. В связи с этим представляет особый интерес исследование поведения спектра излучения объекта в зависимости от фазы вспышки.

В стандартном рентгеновском диапазоне энергий пульсар КS1947+300 был значимо зарегистрирован телескопом JEM-X обсерватории ИНТЕГРАЛ лишь один раз – во время наблюдений 7 апреля 2004 г., когда его болометрическая светимость составляла около $L_x \simeq 3.1 \times 10^{37}$ эрг с⁻¹. Спектр источника в широком диапазоне энергий хорошо описывается типичной для объектов этого класса моделью (формула (5))

Энергетический спектр KS 1947+300, восстановленный по данным телескопов JEM-X и IBIS показан на рис. 4.7, а параметры его наилучшей аппроксимации этой моделью приведены в таблице 4.2.
Дата	α	<i>Е_{Fe}</i> ⁶ , кэВ	<i>Е</i> _с , кэВ	<i>Е</i> _{<i>f</i>} , кэВ	$\chi^2_N(N)^{\rm b}$		
По данным обсерватории ИНТЕГРАЛ (IBIS)							
MJD 52605-52630	1.07 ^г	_	8.6 ^r	26.4 ± 2.7	2.91(7)		
MJD 52770	1.07 ^г	_	8.6^{r}	24.7 ± 1.9	2.30(7)		
MJD 52985	1.07 ^г	_	8.6 ^r	26.5 ± 3.4	0.66(7)		
По данным обсерватории ИНТЕГРАЛ (JEM-X + IBIS)							
MJD 53102	$1.07\substack{+0.24\\-0.13}$	_	$8.6^{+3.4}_{-1.2}$	$23.6_{-2.3}^{+5.3}$	1.18(104)		
По данным обсерватории RXTE (PCA + HEXTE)							
Февраль 2001г.	1.38 ± 0.01	6.47 ± 0.07	15.8 ± 0.5	34.2 ± 0.7	1.33(98)		
Март 2001г.	1.26 ± 0.01	6.55 ± 0.08	12.5 ± 0.5	28.5 ± 0.4	1.34(112)		
Апрель 2001г.	1.13 ± 0.02	6.34 ± 0.09	11.4 ± 0.4	25.4 ± 0.7	0.99(117)		
Май 2001г.	0.82 ± 0.08	6.65 ± 0.11	6.5 ± 0.5	18.5 ± 1.4	1.03(117)		
Июнь 2001г. ^д	0.84 ± 0.24	—	5.7 ± 1.2	11.6 ± 3.3	0.63(35)		

Табл. 4.2. Параметры аппроксимации спектра излучения источника KS1947+300^a

Все ошибки даны на уровне 1σ . а

б

Положение центра линии. Значение χ^2 , нормализованное на число степеней свободы N. Значения параметров зафиксированы. в

Г

Только по данным спектрометра РСА (3-20 кэВ). Д



Рис. 4.8. Энергетические спектры излучения источника KS 1947+300 при разных светимостях во время вспышки 2000-2001 гг. по данным обсерватории RXTE. Сплошными линиями представлены результаты аппроксимации спектра моделью степенного закона с завалом на высоких энергиях.

В остальных наблюдениях обсерватории ИНТЕГРАЛ пульсар значимо регистрировался только детектором ISGRI телескопа IBIS и его спектр мог быть восстановлен в диапазоне энергий выше 18 кэВ. При описании спектров источника в этих сеансах моделью тормозного излучения во всех трех случаях (когда была возможность восстановить спектр) его температура оставалась примерно одинаковой в пределах погрешности и составляла около $kT \sim 33$ кэВ. В таблице 4.2 приведены параметры аппроксимации тех же спектров моделью, использованной выше при описании широкополосного спектра, но параметры, значения которых выходят за пределы энергетического диапазона детектора ISGRI, были зафиксированы на значениях, полученных при анализе спектра, измеренного 7 апреля 2004 г. Видно, что характерная энергия экспоненциального завала в спектре источника E_f (которая и определяется при таком подходе) остается практически постоянной. Относительно большое значение χ^2 для некоторых спектров связано с недостатком статистики в этих наблюдениях.

Для более подробного анализа поведения спектра источника в широком диа-

пазоне энергий были использованы данные обсерватории RXTE, полученные во время вспышки 2000-2001 гг. На рис. 4.8 показаны энергетические спектры, усредненные за те же периоды времени, что и при получении профилей импульса (т.е. примерно за февраль, март, апрель и май 2001 г., соответственно), при этом в июне источник имел слишком низкую светимость для восстановления спектра его излучения по данным спектрометра НЕХТЕ и на рисунке показана лишь "мягкая" его часть, полученная по данным спектрометра РСА. Для диапазона энергий 4-20 кэВ использовались данные спектрометра РСА, для диапазона энергий 20-100 кэВ – данные спектрометра НЕХТЕ. По данным обсерватории RXTE в спектре источника была зарегистрирована особенность, связанная с эмиссионной линией нейтрального железа (~6.4 кэВ). Параметры наилучшей аппроксимации спектров пульсара в разных состояниях приведены в таблице 4.2. Интересно отметить, что с уменьшением интенсивности излучения источника его спектр становится несколько "жестче", а характерные энергии завала Е_с и E_f уменьшаются (для наблюдения в июне 2001 г. аппроксимация проводилась только по данным спектрометра РСА). Из сравнения результатов двух обсерваторий видно, что значения параметров аппроксимирующей модели для данных, полученных обсерваторией ИНТЕГРАЛ в апреле 2004 г., также удовлетворяют этой зависимость.

4.5 Обсуждение

4.5.1 Эволюция профиля импульса

Основываясь на модели, предложенной Баско и Сюняевым (1976а, см. Введение), Пармар и др. (1989) впервые объяснили зависимость формы профиля импульса транзиентного рентгеновского пульсара EXO 2030+375 от его светимости. Авторами было проведено моделирование профиля импульса с помощью простой геометрической модели, где излучение испускается из магнитных полюсов вращающейся нейтронной звезды, смещенных относительно оси ее вращения. Исследование проводилось в широком интервале интенсивности излучения: от 10^{36} до 10^{38} эрг с⁻¹. При этом указывается, что по мере уменьшения светимости источника доминирующим становится излучение вверх.

В случае пульсара KS 1947+300 поведение его формы импульса оказывается аналогичным с описанным выше. Для анализа нами были взяты данные приборов IBIS и HEXTE для двух различных вспышек излучения с интервалом интенсивностей $(0.2 - 3.1) \times 10^{37}$ и $(0.3 - 10.6) \times 10^{37}$, соответственно. Рассмотрение профилей импульса в "жестких" диапазонах энергий объясняется их относительной независимостью от внешних факторов, в частности, меньшей зависимостью формы от поглощения вдалеке от поверхности звезды. В обоих сериях наблюдений происходит переход через критическую светимость L^* , что находит свое отражение в изменении формы профиля импульса (см. рис. 4.3 и 4.4). В случае высоких светимостей (т.е. при формировании аккреционных колонок)

можно ожидать, спектр излучения должен быть "мягче", чем в низком состоянии, что подтверждается результатами спектрального анализа.

4.5.2 Циклотронные линии и магнитное поле

Для поиска в спектре излучения источника особенностей, связанных с резонансной линией циклотронного поглощения мы воспользовались методом, описанным в главе 3 при исследовании пульсара LMC X-4. При этом энергия центра линии E_{cyc} менялась в диапазоне 5-90 кэВ с шагом 5 кэВ, а ее ширина была зафиксирована на 5 кэВ. Используя критерий $\Delta \chi^2$ нами было найдено наиболее вероятное положение возможной циклотронной линии на энергии около 70 кэВ, однако значимость данной особенности не превышает ~ 2σ . Таким образом, на настоящий момент можно заключить, что либо чувствительности и эффективной экспозиции современных приборов обсерваторий ИНТЕГРАЛ и RXTE не хватает для обнаружения циклотронной линии в спектре источника KS1947+300, либо она лежит за пределами диапазона энергий 5-100 кэВ. Если верно второе, то величина магнитного поля на поверхности нейтронной звезды должна быть либо < 5.6×10^{11} Гс, либо > 10^{13} Гс.

4.5.3 Эволюция периода пульсаций

Во время вспышек у рентгеновских пульсаров происходит значительное увеличение темпа аккреции вещества на нейтронную звезду. В таком случае можно наблюдать ускорение вращения пульсара, что связано с увеличением количества вращательного момента, переданного аккрецируемым веществом нейтронной звезде; при этом важную роль играет величина магнитного поля нейтронной звезды.

Как было отмечено выше, во время одной из наблюдавшихся обсерваторией ИНТЕГРАЛ вспышек (апрель 2003 г.) была обнаружена общая для целого ряда рентгеновских пульсаров (см. Введение) зависимость между потоком излучения, регистрируемым от источника, и частотой его пульсаций, аналогичная наблюдавшейся обсерваторией RXTE во время вспышки 2000-2001 гг.

Исходя из наблюдаемых характеристик пульсара KS 1947+300 во время вспышек мы можем, основываясь на модели замагниченной нейтронной звезды (Гош, Лэмб, 1979), попытаться оценить величину ее магнитного поля и расстояние до двойной системы. В случае аккреции из диска должно выполняться следующее соотношение:

$$\dot{\nu} \propto \mu^{2/7} n(\omega_s) L^{6/7} = \mu^{2/7} n(\omega_s) (4\pi d^2 F)^{6/7},$$
(4.1)

где μ – магнитный момент нейтронной звезды с магнитным полем *B* и радиусом *R*, $n(\omega_s)$ - безразмерная функция, зависящая от параметра быстроты ω_s , *d* расстояние до системы и *F* - рентгеновский поток от нее.



Рис. 4.9. Зависимость темпа изменения частоты пульсаций источника KS1947+300 от его светимости по данным обсерваторий ИНТЕГРАЛ (треугольники) и RXTE (кружки). Сплошной линией показана модельная зависимость для значений расстояния до системы $d \sim 9.5$ кпс и магнитного поля $B \sim 2.5 \times 10^{13}$ Гс.

На рис. 4.9 показана зависимость темпа изменения частоты пульсаций от потока излучения, регистрируемого от KS 1947+300. Точки на графике соответствуют измеренным значениям ускорения и замедления пульсара в области максимума вспышки в апреле-мае 2003 г. по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ и ускорения пульсара во время вспышки 2000-2001 гг. по данным обсерватории RXTE. При аппроксимации этих данных функцией, заданной уравнением (4.1), были зафиксированы масса и радиус нейтронной звезды на значениях $1.4 M_{\odot}$ и 10⁶ см, соответственно. В результате были получены следующие величины: расстояние до источника $d = 9.5 \pm 1.1$ кпс и магнитное поле нейтронной звезды $B = 2.5^{+0.4}_{-1.1} \times 10^{13}$ Гс, что соответствует положению циклотронной особенности в спектре излучения объекта на энергии около 220 кэВ. Полученные значения согласуются с оценкой расстояния до системы из оптических наблюдений (Негерела и др. 2003), и оценкой величины магнитного поля из анализа спектров источника (см. выше). Следует отметить, что для величины безразмерного углового момента $n(\omega_s)$ использовалось выражение из работы Ли, Вонга (1996) $n(\omega_s) = 1 + \frac{20(1-1.94\omega_s)}{31(1-\omega_s)}.$ При использовании в качестве аппроксимации $n(\omega_s)$ функции, предложенной Гошем, Лэмбом (1979), получаемое значение магнитного поля оказывается несколько меньшим $B \sim 1.6 \times 10^{13}$ Гс, однако расстояние до системы значительно увеличивается $d \sim 14$ кпс. Если зафиксировать последний параметр на значении 10 кпс, то значение поля на поверхности нейтронной звезды уменьшается до величины $B \sim 5 \times 10^{12}$ Гс, однако качество аппроксимации точек на рис. 4.9 значительно ухудшается.

Как отмечалось в параграфе 4.1, средний темп замедления пульсара KS 1947+300 достаточно мал, что дает возможность рассматривать его период пульсаций как близкий к равновесному. Тогда в случае дисковой аккреции этот период связан с параметрами нейтронной звезды следующим образом: $P_{eq} \simeq 1.0 L_{37}^{-3/7} \mu_{30}^{6/7}$ сек (Липунов, 1987). Принимая светимость источника равной ~ 10^{37} эрг с⁻¹, период пульсаций ~ 18.7 с, получаем величину магнитного поля ~ 3×10^{13} Гс, что находится в хорошем согласии с приведенными выше оценками.

4.6 Заключение

Представлены результаты анализа наблюдений рентгеновского пульсара KS 1947+300, выполненного по данным обсерваторий ИНТЕГРАЛ и RXTE в широком рентгеновском диапазоне энергий 3-100 кэВ.

Обнаружена зависимость формы профиля импульса от светимости источника. Показано, что доля пульсирующего излучения существенно меняется с орбитальной фазой и достигает минимума на орбитальной фазе ~ 0.5.

Основываясь на модели замагниченной нейтронной звезды, апробирован метод для исследования свойств пульсара по изменению темпа его ускорения/замедления во время вспышек. Используя данный метод, получены оценки на величину магнитного поля пульсара KS 1947+300 и расстояния до двойной системы. В результате были получены следующие величины: расстояние до источника $d = 9.5 \pm 1.1$ кпс и магнитное поле нейтронной звезды $B = 2.5^{+0.4}_{-1.1} \times 10^{13}$ Гс, что соответствует положению циклотронной особенности в спектре излучения объекта на энергии около 220 кэВ.

Глава 5

V 0332+53 во время вспышки 2004-2005 гг.: зависимость циклотронной частоты и профиля импульса от светимости пульсара

5.1 Введение

Транзиентный рентгеновский источник V 0332+53 был открыт обсерваторией Vela 5В в 1973 году (Террел, Предгорский, 1983), когда интенсивность его излучения достигла значения ~ 1.4 Краб в диапазоне энергий 3 – 12 кэВ. Длительность вспышки составила около трех месяцев, по истечении которых источник полностью исчез из поля зрения обсерватории.

Во время более поздних наблюдений обсерваторией EXOSAT в ноябре 1983 – январе 1984 гг. были определены некоторые параметры пульсара и двойной системы: период собственных пульсаций ~ 4.375 с, орбитальный период 34.25 дня, эксцентриситет орбиты 0.31, проекция полуоси релятивистского объекта $a_x \sin i \sim 48$ световых сек (Стелла и др., 1985). В той же работе было отмечено, что уменьшение интенсивности источника сопровождается изменением формы импульса от двухпиковой к однопиковой и существенным ужестчением его спектра. Позднее, при наблюдении исследуемого объекта обсерваторией Ginga, в его спектре была обнаружена особенность, ассоциируемая с резонансной линией циклотронного поглощения на энергии $E_{cyc} = 28.5 \pm 0.5$ кэВ, что соответствует величине магнитного поля на поверхности нейтронной звезды ~ 3×10^{12} Гс (Макишима и др., 1990). Позднее, в работе Михары и др. (1998) было показано, что положение основной гармоники в спектре возможно не является постоянным, а имеет разные значения для разных светимостей.

Очередная мощная вспышка излучения от источника началась в самом конце 2004 года (Свонк и др. 2004) и была предсказана по увеличению потока от звезды-компаньона в оптическом диапазоне, который достиг максимума 31 января 2004 г. (Горанский, Барсукова, 2004). Предварительный анализ данных обсерватории RXTE, полученных в период 24-26 декабря 2004 г., показал, что кроме линии поглощения на энергии 26.34 ± 0.03 кэВ в спектре источника присутствуют еще две подобных особенности в жесткой части спектра на энергиях 49.1 ± 0.2 и 74 ± 2 кэВ, которые были интерпретированы как высшие гармоники основной циклотронной частоты (Кобурн и др., 2005). Аналогичный результат был получен по данным первых ~100 ксек наблюдений источника обсерваторией ИНТЕГРАЛ (Крейкенбом и др. 2005).

В работе Негерела и др. (1999) приведены результаты оптических наблюдений звезды BQ Cam – нормального компаньона рентгеновского источника V 0332+53, в которой уточнен спектральный класс звезды – O8-9Ve и получена оценка расстояния до двойной системы – порядка 7 кпс.

5.2 Наблюдения

Для исследования источника нами были использованы данные наблюдений, проведенных во время мощной вспышки излучения в период с конца декабря 2004 г. по конец февраля 2005 г. орбитальными астрофизическими обсерваториями ИНТЕГРАЛ и RXTE. Обсерваторией ИНТЕГРАЛ за этот период было сделано около 130 наведений на источник в различных режимах (сканирование Галактической плоскости и ТОО наблюдения), при этом общая экспозиция составила около 400 тыс. сек. В проведенном анализе использовались данные телескопа IBIS (детектор ISGRI) и рентгеновского монитора JEM-X.

Наряду с данными обсерватории ИНТЕГРАЛ в работе были использованы данные научных приборов обсерватории RXTE: одновременные данные монитора всего неба ASM, спектрометров PCA и HEXTE (Obs. ID 90427).

В таблице 5.1 приведен журнал наблюдений рентгеновского пульсара V 0332+53 по данным обсерваторий ИНТЕГРАЛ и RXTE. В первом столбце указана дата наблюдения, второй столбец показывает экспозицию, по которой осуществлялось усреднение, третий и четвертый столбцы – поток от источника и его светимость (вычислялась в предположении расстояния до источника 7 кпс) в диапазоне энергий 3 – 100 кэВ, соответственно. Указанная величина светимости объекта рассматривалась нами как близкая к болометрической в предположении, что основное энерговыделение происходит в диапазоне энергий 3 – 100 кэВ.

5.3 Кривая блеска

На рис. 5.1 (верхняя панель) представлена кривая блеска пульсара V 0332+53 по данным монитора всего неба ASM, построенная по усредненным за день наблюдениям. Как видно из рисунка нарастание интенсивности излучения источника происходило почти линейно в течении ~ 30 дней, в максимуме интенсивности источник находился около 10 дней и затем в течение ~ 50 дней

Дата, MJD	Экспозиция,	Поток ^а ,	Светимость ^б ,		
(орбита)	кс	$ imes 10^{-9}$ эрг с $^{-1}$ см $^{-2}$	$10^{37} \text{ erg s}^{-1}$		
Данные обсерватории ИНТЕГРАЛ					
53376.5 (272 rev)	28.7	58.3 ± 0.9	34.1 ± 0.5		
53379.2 (273 rev)	56.7	45.6 ± 0.4	26.7 ± 0.2		
53380.3 (274 rev)	21.1	40.7 ± 2.4	23.8 ± 1.4		
53394.0 (278 rev)	72.3	24.9 ± 1.0	14.5 ± 0.6		
53410.9 (284 rev)	149.1	12.5 ± 0.2	7.3 ± 0.1		
53413.1 (285 rev)	15.5	11.4 ± 0.3	6.7 ± 0.2		
53416.5 (286 rev)	15.4	8.4 ± 0.3	4.9 ± 0.2		
53419.1 (287 rev)	17.0	7.0 ± 0.3	3.4 ± 0.2		
53422.1 (288 rev)	20.1	3.5 ± 0.2	2.0 ± 0.1		
Да	анные обсерват	ории <i>RXTE</i>			
53367.2 (90427-01-01-00G)	1.5	82.4 ± 2.0	48.4 ± 1.2		
53368.3 (90427-01-01-01)	2.2	81.6 ± 2.4	48.0 ± 1.4		
53368.9 (90427-01-01-02)	1.8	79.2 ± 0.5	46.7 ± 0.3		
53369.6 (90427-01-01-03)	1.9	72.9 ± 0.4	42.9 ± 0.2		
53374.0 (90427-01-02-00)	0.9	68.5 ± 2.1	40.3 ± 1.2		
53375.0 (90427-01-02-01)	0.8	60.9 ± 2.1	35.8 ± 1.2		
53376.3 (90427-01-02-02)	0.7	66.0 ± 2.6	38.8 ± 1.5		
53376.7 (90427-01-02-03)	2.7	61.9 ± 1.3	36.4 ± 0.8		
53385.1 (90427-01-03-01)	9.9	43.7 ± 1.5	25.7 ± 0.9		
53385.5 (90427-01-03-02)	14.5	41.5 ± 0.2	24.4 ± 0.1		
53387.0 (90427-01-03-05)	12.8	38.0 ± 0.1	22.3 ± 0.1		
53387.4 (90427-01-03-06)	12.1	36.5 ± 0.1	21.5 ± 0.1		
53387.9 (90427-01-03-07)	9.6	37.2 ± 0.1	21.9 ± 0.1		
53388.4 (90427-01-03-09)	11.9	34.5 ± 0.8	20.3 ± 0.5		
53389.0 (90427-01-03-11)	9.9	34.5 ± 0.4	20.3 ± 0.2		
53389.3 (90427-01-03-12)	9.7	34.1 ± 1.0	20.1 ± 0.6		
53413.1 (90427-01-04-00)	6.1	14.7 ± 0.6	8.6 ± 0.3		
53413.8 (90427-01-04-04)	6.7	12.6 ± 0.4	7.4 ± 0.2		
53414.3 (90427-01-04-02)	11.8	11.1 ± 0.2	6.5 ± 0.1		
53414.5 (90427-01-04-03)	6.8	11.0 ± 0.3	6.5 ± 0.2		
53414.8 (90427-01-04-05)	2.6	10.9 ± 0.2	6.4 ± 0.1		
53416.6 (90427-01-04-01)	5.7	8.9 ± 0.2	5.2 ± 0.1		

Табл. 5.1. Наблюдения рентгеновского пульсара V0332+53 обсерваториями ИН-ТЕГРАЛ и *RXTE* в 2004–2005 гг.

^а в энергетическом диапазоне 3-100 кэВ

⁶ в энергетическом диапазоне 3-100 кэВ, предполагая расстояние до системы 7 кпс



Рис. 5.1. Кривая блеска рентгеновского пульсара V0332+53, полученная во время вспышки: (а) по данным монитора ASM/*RXTE*; (b) по данным телескопа IBIS/*INTEGRAL* в жестком диапазоне энергий; (c) по данным телескопа IBIS/*INTEGRAL* с временным разрешением 300 сек в ярком состоянии. Сплошная линия показывает наилучшую аппроксимацию небольшого всплеска гауссианой с максимумом на MJD 53380.3 и длительностью ~ 4.5 часа.

регистрируемый поток плавно уменьшался до предвсплескового значения. Последнее может быть описано экспоненциальным законом с характерным временем спада $\tau \sim 17$ дней. Сравнение вспышки 2004-2005 гг. с предыдущими показывает, что и по длительности и по рентгеновскому потоку в максимуме она является типичной для данного источника.

Ввиду ограничений по ориентации спутника относительно Солнца наблюдения обсерватории ИНТЕГРАЛ были начаты уже после прохождения источником максимума излучения. Кривая блеска пульсара по всем имеющимся в нашем распоряжении данным детектора ISGRI обсерватории ИНТЕГРАЛ в жестком диапазоне энергий 18 – 60 кэВ показана на средней панели рис. 5.1. Видно, что примерно за полтора месяца поток от источника в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ уменьшился с ~ 900 до ~ 100 мКраб, причем форма кривой блеска в жестком диапазоне несколько отличается от описанной выше кривой блеска в диапазоне энергий 1.3 – 12.2 кэВ.

При анализе кривой блеска пульсара V 0332+53 в мягком диапазоне энергий по данным монитора всего неба ASM, было замечено, что его интенсивность подвержена переменности с амплитудой около 20% (вблизи максимума вспышки). По мере уменьшения среднего потока от источника амплитуда переменности уменьшается и к концу вспышки практически исчезает. Переменность, приблизительно с той же амплитудой, была обнаружена и в жестком диапазоне энергий по данным детектора ISGRI. На рис. 5.1 (нижняя панель) представлена детальная кривая блеска пульсара с временным разрешением 300 секунд в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ для периода времени, когда источник находился в ярком состоянии и где переменность просматривается наиболее явно. В правой части рисунка показан всплеск излучения с максимумом примерно на MJD 53380.3 и общей продолжительностью около 4.5 часов. Сплошной линией показана наилучшая аппроксимация профиля всплеска гауссианой.

5.4 Спектральный анализ

Спектр источника V0332+53 заслуживает отдельного внимания. Это всего лишь второй аккрецирующий рентгеновский пульсар после 4U0115+63, в спектре которого обнаружена не только резонансная линия циклотронного поглощения на энергии ~ 25 кэВ, но и две ее высшие гармоники с энергиями ~ 47 и ~ 75 кэВ (Кобурн и др. 2005, Крейкенбом и др. 2005). Континуум спектра пульсара хорошо описывается степенным законом с экспоненциальным завалом на высоких энергиях, что типично для объектов этого класса (формула (5)).

Большое количество наблюдений пульсара V0332+53, проведенных обсерваториями ИНТЕГРАЛ и RXTE, позволяют построить спектр источника в различных фазах вспышки и проследить эволюцию его параметров. Для описания спектра источника нами была использована модель степенного закона с экспоненциальным завалом (формула (6), модель cutoffpl в пакете XSPEC), модифицированная тремя линиями поглощения в форме профиля Лоренца (формула (9)).

Рассматриваемая модель аппроксимирует спектр источника также хорошо, как и стандартная пульсарная модель степенного закона с завалом на высоких энергиях, описанная выше (модель powerlaw*highecut в пакете XSPEC), однако имеет на один параметр меньше. Кроме того, получающаяся при аппроксимации моделью powerlaw*highecut энергия слома спектра E_{cut} оказывается достаточно малой ~ (5-6) кэВ, что, при ограниченности со стороны мягких энергий диапазона используемых приборов (3 кэВ для PCA и 4.5 кэВ для JEM-X), не позволяло хорошо определять и ограничивать наклон спектра. Также, при аппроксимации данных обсерватории RXTE, в модель была добавлена линия флуоресцентного железа с энергией 6.4 кэВ. Монитором JEM-X данная особенность уверенно не регистрировалась. Отчасти это связано с более низкой по сравнению со



Рис. 5.2. Энергетический спектр пульсара V0332+53 по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ для двух состояний (272 и 284 орбиты).

спектрометром PCA чувствительностью, отчасти с несовершенством матрицы отклика монитора на таких энергиях (более подробно см. комментарии в главе 7 и работе Филипповой и др. 2005).

Типичный вид энергетического спектра источника, полученного по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ в ярком состоянии в 272 орбите (см. Таблицу 5.1), показан на рис. 5.2. При его аппроксимации описанной выше моделью были получены следующие параметры:

Параметр модели	Значение
Photon index	-0.120 ± 0.008
E_{cut} , keV	9.21 ± 0.04
$ au_{cycl,1}$	1.91 ± 0.02
$E_{cycl,1}$, keV	$25.92^{+0.07}_{-0.08}$
$\sigma_{cycl,1}$, keV	$5.44_{-0.06}^{+0.08}$
$ au_{cycl,2}$	2.12 ± 0.03
$E_{cycl,2}$, keV	$49.44_{-0.14}^{+0.07}$
$\sigma_{cycl,2}, { m keV}$	$9.89^{+0.20}_{-0.23}$
$ au_{cycl,3}$	1.26 ± 0.10
$E_{cycl,3}$, keV	$72.1_{-0.6}^{+0.5}$
$\sigma_{cycl,3}, { m keV}$	$10.1_{-0.9}^{+0.5}$
χ^2 (d.o.f)	1.25(136)

Для сравнения спектр, полученный во время низкого состояния (284 орбита) показан на том же рисунке.

В приведенном спектре хорошо видна резонансная линия циклотронного поглощения и ее вторая гармоника. Несмотря на довольно быстрый спад интенсивности источника и слабость его излучения на высоких энергиях (>65 кэВ), включение в модель третьей гармоники с энергией ~ 75-80 кэВ позволяет существенно ($\Delta \chi^2 = 18$ для трех степеней свободы) улучшить качество аппроксимации. Данная гармоника регистрируется и нескольких последующих наблюдениях, однако ее параметры (глубина и ширина) разумно ограничиваются только в ярком состоянии (до 284 орбиты). Фиксирование этих параметров на определенных по яркому состоянию не позволяет существенно улучшать аппроксимацию спектров низкого состояния. Кроме того, из-за получающихся больших ширин третьей гармоники начинают существенно меняться параметры второй гармоники, т.е. задача определения их параметров получается сильно модельнозависимой. Необходимо отметить, что положение центра основной гармоники линии циклотронного поглощения и ее параметры не зависят от включения в применяемую модель третьей гармоники. Однако, параметры линии могут несколько зависеть от формы линии поглощения, так, например, используя профиль Гаусса, Поттсшмидт и др. (2005) получили несколько отличные от наших результаты.

Проведенный анализ показал, что применяемая модель хорошо описывает спектр источника в течение всей вспышки, как по данным обсерватории ИНТЕ-ГРАЛ так и по данным обсерватории RXTE. Наибольший интерес представляет поведение циклотронной линии поглощения, особенно ее основной гармоники, так как она хорошо регистрируется на протяжении всей вспышки. На рис. 5.3 темными треугольниками и квадратами показана зависимость энергии центра этой линии от светимости пульсара, определенная по данным обеих обсерваторий. Погрешность определения энергии по данным спектрометра НЕХТЕ оказывается несколько выше, чем по данным детектора ISGRI из-за того, что экспозиция для первого оказывается меньшей. Видно, что результаты измерений хорошо согласуются между собой и ложатся практически на прямую линию, т.е. энергия циклотронной линии линейно падает с уменьшением светимости источника. Формальная аппроксимация полученной зависимости линейным законом дает $E_{cucl,1} \simeq -0.10L_{37} + 28.97$ кэВ, где L_{37} – светимость в единицах 10^{37} эрг с⁻¹. Последнее значение дает нам оценку величины магнитного поля на поверхности нейтронной звезды $B = (1+z)/11.6 \times E_{cucl} \times 10^{12} \simeq 3.0 \times 10^{12}$ Гс.

Как было отмечено выше положение центра второй гармоники циклотронной линии уверенно определяется не во всех наблюдениях, а при уменьшении светимости источника становится модельнозависимым от включения в аппроксимирующую модель третьей гармоники. Чтобы избежать возможного влияния этой компоненты на определение параметров второй гармоники мы ограничили со стороны жестких каналов рассматриваемый диапазон энергий до 65 кэВ и аппроксимировали полученные спектры той же моделью, что и раньше, но только с двумя линиями поглощения. Динамика изменения центра второй гармоники



Рис. 5.3. Зависимость энергии циклотронной линии от светимости источника (3-100 кэВ). Треугольниками показаны результаты обсерватории ИНТЕГРАЛ, квадратами – *RXTE*.

со светимостью пульсара представлена на рис. 5.4 темными треугольниками и квадратами по аналогии с рис. 5.3. Видно, что хотя разброс значений оказывается несколько большим, чем в случае основной гармоники, общая тенденция возрастания энергии центра линии с уменьшением светимости сохраняется и в этом случае. Формальная аппроксимация полученной зависимости дает $E_{cucl,2} \sim -0.08L_{37}$. Для сравнения на том же рисунке открытыми треугольниками показаны результаты определения по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ центра второй гармоники в широкополосных (до 110 кэВ) спектрах сеансов, когда в модель была включалась третья гармоника и определялись ее параметры. Видно, что получаемые обоими способами энергии центра второй гармоники отличаются друг от друга, особенно в сеансах с меньшей светимостью источника. Кроме того, из рис. 5.4 видно, что результаты измерений детектором ISGRI лежат ниже близких им по датам измерений спектрометром НЕХТЕ. Данное обстоятельство скорее всего связано с тем, что из-за более длинной экспозиции детектора ISGRI его данные в жестких каналах имеют лучшую значимость и третья гармоника циклотронной линии оказывает влияние на определение параметров второй гармоники даже в случае ограниченного до 65 кэВ диапазона



Рис. 5.4. То же, что и на рис. 5.3, но для второй гармоники. Открытые треугольники показывают результаты анализа данных обсерватории ИНТЕГРАЛ в широком диапазоне энергий (до 110 кэВ) с включением в модель третьей гармоники (подробнее см. текст).

энергий. Если исключить из рассмотрения данные обсерватории ИНТЕГРАЛ, то формальная аппроксимация результатов измерения центра второй гармоники обсерваторией RXTE дает $E_{cycl,2} \sim -0.1L_{37}$, что совпадает с полученной ранее зависимостью для основной гармоники.

5.5 Профиль импульса

Благодаря высокой интенсивности излучения пульсара V 0332+53 во время вспышки нам удалось подробно исследовать зависимость формы профиля импульса от энергетического диапазона и светимости объекта. Т.к. фон не влияет на форму профиля импульса, он не был вычтен в последующем анализе. Наиболее характерные профили импульса, полученные по данным научных приборов обсерватории ИНТЕГРАЛ в разных диапазонах энергий в зависимости от времени наблюдений (для 272 и 284 орбит), показаны на рис. 5.5 в относительных единицах. Наблюдательные особенности в форме профиля импульса могут быть разделены на две основные группы: асимметричная эволюция двухпикового профиля в относительно широких энергетических каналах и резкое изменение формы вблизи основной гармоники циклотронной линии. Ниже эти эффек-



Рис. 5.5. Профили импульса V0332+53, полученные по данным монитора JEM-Х и телескопа IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ в различных энергетических каналах и для разных светимостей источника. Нулевая фаза для каждого наблюдения выбиралась независимо.

ты будут рассмотрены более подробно.

В самом ярком состоянии (272 орбита) профиль импульса является двухпиковым синусоидальноподобным с незначительным преобладанием второго пика на самых низких энергиях (3-6 кэВ). По мере возрастания энергии фотонов относительный вклад первого пика увеличивается и уже в диапазоне энергий 10-15 кэВ превосходит интенсивность второго. При дальнейшем увеличении энергии интенсивность первого пика продолжает увеличиваться и становится существенно больше второго в канале 30-50 кэВ. Заметного смещения пиков по фазе в зависимости от энергетического диапазона в пределах наблюдения не происходит.

По мере уменьшения интенсивности излучения пульсара происходят суще-



Рис. 5.6. Изменение формы профиля импульса источника вблизи циклотронной энергии в зависимости от его светимости. Результате телескопа IBIS/ИНТЕГРАЛ показаны на верхней панеле, HEXTE/RXTE – на нижней. Нулевая фаза для каждого наблюдения выбиралась независимо.

ственные изменения формы профиля импульса в мягких каналах (по данным монитора JEM-X). Так, например, в 274 орбите в диапазоне энергий 3-6 кэВ профиль является почти однопиковым, а в 278 и 284 орбитах в диапазонах энергий 3-6 и 6-10 кэВ относительная интенсивность первого пика очень мала. В жестких каналах (по данным телескопа IBIS) эволюция формы профиля импульса происходит аналогично тому, как было описано для 272 орбиты. В последующих наблюдениях (начиная с 284 орбиты, когда болометрическая светимость источника упала до $\sim 7.3 \times 10^{37}$ эрг с⁻¹) основные описанные выше тенденции для низких энергий сохраняются, однако на энергиях порядка и выше циклотронной происходит резкое изменение формы профиля импульса: провал между пиками замывается и вместо четкого двухпикового профиль становится асимметричным однопиковым, а при увеличении энергии фаза основного минимума смещается на ~ 0.5 (рис. 5.5). В последующих сеансах наблюдений, т.е. на более низких светимостях, такая картина в широких диапазонах энергий сохраняется.

Более подробное исследование поведения профиля импульса было проведено в узких энергетических каналах в наиболее интересной области энергий – в районе основной гармоники циклотронной линии поглощения (рис. 5.6). Такое исследование было выполнено для четырех наблюдений телескопа IBIS (орбиты 272, 278, 284 и 286) и четырех наблюдений спектрометра HEXTE, близких по времени к наблюдениям ИНТЕГРАЛа (90427-01-02-03, 90427-01-03- 11+12, 90427-01-04-00 и 90427-01-04, соответственно). Последнее было сделано для получения независимого подтверждения результатов обсерватории ИНТЕГРАЛ и установления объективной картины происходящего. Энергетические каналы выбирались таким образом, что бы их ширина была примерно одинаковой и составляла порядка половины ширины циклотронной линии, а границы центральных каналов делили бы циклотронную линию пополам (т.е. два центральных канала соответствуют нижнему и верхнему крыльям циклотронной линии). При этом учитывалось, что положение центра циклотронной линии меняется с интенсивностью источника (см. Спектральный анализ).

Для самого яркого наблюдения (272 орбита) переход через центр циклотронной линии никак не отражается на изменении формы профиля импульса и сохраняются все описанные выше тенденции для более широких каналов. В последующих наблюдениях (273-278 орбиты) происходит изменение относительных интенсивностей пиков, однако профиль остается двухпиковым. При дальнейшем падении светимости до ~ 7.3×10^{37} эрг с⁻¹ (284 орбита) профиль становится асимметричным однопиковым непосредственно до циклотронной частоты (в нижнем крыле линии) с резким переходом к двухпиковой форме после нее. При этом основной импульсы непосредственно за циклотронной частотой местами не меняются (как это было в 278 орбите), а смещение на половину периода импульса, выражающееся в смещении основного минимума, происходит в следующем канале. Подобная картина сохраняется и при уменьшении светимости пульсара до ~ 4.9×10^{37} эрг с⁻¹ (286 орбита). При дальнейшем уменьшении светимости (~ 3.4×10^{37} эрг с⁻¹, 287 орбита), профиль импульса в первом канале (до циклотронной линии) вновь становится двухпиковым как и при высоких светимостях, но в нижнем крыле циклотронной линии сохраняет однопиковую форму. Также сохраняется смещение профиля на половину периода в последнем канале (за верхним крылом циклотронной линии). Необходимо отметить, что из-за уменьшения светимости источника статистика в последних сеансах наблюдений недостаточна для подробного анализа структуры профиля импульса, поэтому можно говорить лишь об общих характеристиках.

Результаты подобного анализа по данным спектрометра RXTE/HEXTE полностью подтверждают сделанные выше заключения о поведении профиля импульса источника по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ (см. нижние панели рис. 5.6).

5.6 Обсуждение

Транзиентный рентгеновский пульсар V 0332+53, демонстрирующий мощные вспышки излучения, во время которых интенсивность его излучения превышает 1 Краб, входит в состав двойной системы со звездой-компаньоном ВО Сат, которая принадлежит к классу Ве звезд. Согласно современным представлениям (см., например, Коллинз 1987) такие объекты представляют из себя достаточно быстро вращающиеся звезды с плотным, но радиально медленным звездным ветром, который образует вокруг звезды так называемый экваториальный диск, в котором формируются эмиссионные линии, регистрируемые в спектрах таких объектов, причем размеры и сам факт существования экваториального диска не являются постоянными. Подавляющее большинство рентгеновских источников в двойных системах с Ве звездами являются транзиентами и проявляют вспышечную активность. Ее причина, по-видимому, связана с эволюцией нормальной звезды, когда из вещества сформировавшегося экваториального диска происходит захват материи и формирование аккреционного диска вокруг релятивистского объекта. При накоплении в диске достаточного количества вещества начинается аккреция на нейтронную звезду и наблюдается вспышка рентгеновского излучения.

Система V 0332+53/BQ Сат является наглядным примером описанной выше картины. Как было показано Горанским (2001) предыдущим рентгеновским вспышкам, наблюдавшимся от данной системы, предшествовало значительное поярчение нормальной звезды в оптике. Последнее, как считается, связано с образованием и сбросом окружающей оболочки (экваториального диска). Начавшаяся в декабре 2004 г. вспышка не стала исключением и была предсказана по увеличению потока от оптической звезды в начале 2004 г. Такое большое (несколько сотен дней) запаздывание между оптикой и рентгеном типично для данного источника (Горанский, 2001) и, скорее всего, связано с необходимостью накопления в аккреционном диске достаточного для начала аккреции количества вещества. О том, что аккреция во время рентгеновских вспышек идет из аккреционного диска, а не из звездного ветра, свидетельствует высокая (~ 5×10^{38} эрг/с) светимость источника, которая не может быть достигнута при аккреции из звездного ветра. Кроме того, во время вспышки наблюдается высокий темп изменения периода пульсаций, что также характерно для систем с дисковой аккрецией и наблюдалось во время вспышек других транзиентных рентгеновских пульсаров с *Be* компаньонами (см., например, главу 4 для пульсара KS1947+300).

5.6.1 Циклотронная линия

Как было показано Баско, Сюняевым (1976а) и Любарским, Сюняевым (1982) высота *H*, на которой встает ударная волна в аккреционной колонке (см. Введение), зависит от светимости источника и может достигать в высоту нескольких радиусов нейтронной звезды:

$$H \simeq \dot{m} R_{NS} \ln \left(\eta \frac{1 + \dot{m}}{\dot{m}^{5/4}} \right)$$

где \dot{m} – безразмерный темп аккреции в единицах 10^{39} эрг/с, R_{NS} – радиус нейтронной звезды, η – функция, зависящая от магнитного поля B_{NS} на поверхности нейтронной звезды и ширины канала аккреции. Видно, что функция высота H ведет себя практически линейно по \dot{m} в широком диапазоне значений, т.е. с увеличением светимости источника высота ударной волны увеличивается приблизительно линейно.

Выше было показано, что энергия центра резонансной линии циклотронного поглощения, регистрируемой в спектре источника V 0332+53, линейно увеличивается с уменьшением его светимости. Относительное изменение энергии центра, а следовательно и соответствующего ей магнитного поля, составляет около ~ 25%. В приближении дипольного поля нейтронной звезды, это будет соответствовать относительному изменению высоты h, на которой формируется данная особенность, ~ 7.5%. В конце вспышки светимость источника падает до ~ 10^{37} эрг с⁻¹, ударная волна опускается, высота колонки уменьшается, и мы регистрируем излучение, идущее практически с поверхности нейтронной звезды. Из-за малости относительного изменения h/R_{NS} можно положить в первом приближении $B(h) \propto B_{NS} - \alpha h$, где α – коэффициент пропорциональности. Сравнивая с полученной выше из наблюдений зависимостью $E_{cycl,1}$ от светимости L, получаем что $h \propto L$. Таким образом, высота h, на которой формируется циклотронная особенность, ведет себя с ростом светимости источника качественно таким же образом, как и высота ударной волны H.

Непосредственно в самой ударной волне выделяется лишь малая доля запасенной в аккрецирующем веществе энергии (Баско и Сюняевым, 1976а); основная же часть поступает в расположенную под ударной волной зону оседания, в которой постепенно высвечивается через боковые стенки аккреционной колонки. Кроме того, аккреционный канал в разрезе имеет форму, близкую к треугольной, в котором собственно ударная волна занимает небольшую часть в его центральной зоне. В других областях торможение падающего вещества происходит



Рис. 5.7. Зависимость отношения энергий второй и основной гармоник циклотронной линии от светимости источника (3-100 кэВ). Треугольники и квадраты показывают результаты, полученные обсерваториями ИНТЕГРАЛ и *RXTE*, соответственно.

за счет лучистого трения (Любарский, Сюняев 1988). Таким образом, наблюдаемое нами излучение представляет собой суперпозицию излучений с разных высот над поверхностью нейтронной звезды. Поэтому, высота *h* представляет собой некую усредненную или "эффективную" высоту формирования циклотронной особенности в спектре источника, не совпадающую с положением ударной волны.

Как следует из рис. 5.4, поведение энергии центра второй гармоники циклотронной линии качественно похоже на поведение основной частоты. Однако изза малой статистики данных на высоких энергиях ее точное определение оказывается модельнозависимым. Таким образом, на данный момент точно определить темп изменения положения второй гармоники с изменением светимости источника невозможно. Однако, интересно отметить, что отношение энергий основной и второй гармоник несколько уменьшается с падением светимости и становится приблизительно гармоническим (2:1) в районе светимости ~ 2×10^{38} эрг с⁻¹ (рис. 5.7).



Рис. 5.8. Трехмерная эволюция профиля импульса для 272 (слева) и 284 (справа) орбит. Красные и синие полоски показывают нижнее и верхнее крылья циклотронной линии. На нижней панеле рисунка представлены двухмерные распределения интенсивности по энергии и фазе импульса. Сплошными линиями показаны уровни равной интенсивности. Положения циклотронных линий показаны пунктирными линиями.

5.6.2 Профиль импульса

94

По мере накопления экспериментальной информации относительно формы профилей импульса рентгеновских пульсаров и их эволюции становится ясно, что простейшая модель, объясняющая наличие пульсирующей компоненты (излучение отдельных ярких пятен на поверхности нейтронной звезды), не способна обеспечить наблюдаемое их разнообразие. Из анализа результатов, полученных в этой главе, становится видно, что источник V 0332+53 не является исключением.

Как было показано выше, поток вещества из аккреционного диска образует в области магнитных полюсов нейтронной звезды колонки, вытянутые вдоль магнитных силовых линий. В таком случае, поскольку падающий поток непрозрачен, выходящее из колонки излучение увлекается падающей плазмой и, двигаясь вместе с ней вниз, диффундирует к краю канала аккреции и высвечивается вбок, таким образом, в самых ярких наблюдениях должна преобладать пропеллерная диаграмма направленности рентгеновского излучения (Баско и Сюняев 1976а), что может объяснить наблюдаемую двухпиковость профиля. Однако, Любарский и Сюняев (1988) показали, хотя излучение и успевает выйти из колонки, но из-за релятивистских эффектов оно оказывается направленным к поверхности нейтронной звезды и простые соображения направленности излучения могут быть неприменимы. Вероятно, наблюдаемая форма профиля импульса может быть объяснена комбинацией геометрических и физических эффектов, некоторые из которых описаны ниже.

Одной из возможностей хоть качественно все же описать существующую картину может быть модель механизма формирования импульсов при большой светимости нейтронной звезды (Баско, Сюняев 1976б), суть которой состоит в том, что при дисковой аккреции собственное магнитное поле нейтронной звезды заставляет газ стекать к магнитным воронкам вдоль альвеновской поверхности. Поскольку магнитное поле в плоскости диска не обладает аксиальной симметрией, можно ожидать, что поток плазмы покрывает лишь часть альвеновской поверхности (см., например, рис 1). Слой вещества на альвеновской поверхности вращается с той же угловой скоростью, что и сама нейтронная звезда, и периодически закрывает от наблюдателя источник рентгеновского излучения вблизи магнитных полюсов. При определенной ориентации системы относительно наблюдателя, воспользовавшись описанной теорией, можно ожидать разной относительной интенсивности пиков в профиле импульса в зависимости от энергетического диапазона. Также в формирование наблюдаемого импульса может вносить свой вклад отражение от внутренней поверхности газового слоя, текущего к нижнему магнитному полюсу. При снижении светимости источника оптическая толща экранирующего слоя по рассеянию уменьшается и становятся видны более глубокие излучающие области вблизи нейтронной звезды, что приводит к большей амплитуде асимметрии в профиле импульса и появлению некоторых новых особенностей в нем.

Наиболее интересным и трудно объяснимым выглядит набор эффектов, происходящих вблизи основной гармоники циклотронной частоты на светимостях ниже $\sim 7.3 \times 10^{37}$ эрг с⁻¹. В рамках существующих моделей такое поведение профиля импульса описать очень сложно. В частности, оно может быть связано, например, с особенностями в направленности излучения вблизи циклотронной частоты (см., например, Гнедин, Сюняев, 1973, 1974). Так, например, Месзарос и Нагел (1985) показали, что форма циклотронной линии обладает сильной угловой зависимостью, и вблизи 90° она становится очень узкой, а на энергиях выше и ниже резонанса плазма более прозрачна на больших углах чем на малых и фотоны будут выходить главным образом в этих направлениях. То есть в различных энергетических каналах вблизи циклотронной частоты диаграмма направленности излучения может иметь сильно различную форму. Дополнительно, движение вещества в направлении нейтронной звезды приводит к допплеровскому сдвигу, который должен приводить к зависимости циклотронной энергии от угла наблюдения, что так же может вносить вклад в наблюдаемые особенности (Браинед, Месзарос, 1991).

Для лучшей визуализации и понимания описанного выше были построены трехмерные профили импульса (относительные интенсивности в зависимости от фазы импульса и энергетического диапазона). Для получения более-менее гладкой картины было выбрано энергетическое окно (энергетический диапазон для каждого профиля импульса) размером в 4 кэВ и шаг – 1 кэВ. Такие профили были построены в диапазоне от 6 до 45 кэВ. На рис. 5.8 (верхняя панель) показаны трехмерные профили для 272 и 284 орбит. Видны все особенности, описанные выше, для обоих наблюдений. На нижней панеле рис. 5.8 разными цветами и линиями равного уровня показаны двухмерные распределения интенсивности профиля импульса. Интересно проследить изменения максимальной интенсивности в обоих случаях: в высоком состоянии оба пика практически не меняют своего положения с энергией; в низком состоянии наблюдается резкое изменение положения максимума профиля особенно вблизи циклотронной энергии. В последнем случае явно видны одно и двухпиковые формы профиля импульса в нижнем и верхнем крыльях циклотронной линии, соответственно.

Особый интерес для будущих исследований представляет случай малых светимостей, когда излучающая плазма имеет заметную оптическую толщу только в районе циклотронной линии и профиль импульса источника отражает физические свойства потока плазмы в магнитном поле, т.е. определяется анизотропией излучения и рассеяния в плазме.

5.7 Заключение

В главе представлены результаты анализа данных обсерваторий ИНТЕГРАЛ и RXTE во время мощной вспышки излучения от рентгеновского пульсара V0332+53. Наиболее важными являются:

– Впервые подробно исследована эволюция циклотронной энергии от светимости источника и показано, что циклотронная частота линейно растет с уменьшением собственной светимости пульсара аналогично изменению высоты ударной волны в аккреционной колонке. Относительное изменение энергии центра составляет около ~ 25%. В приближении дипольного поля нейтронной звезды, это соответствует относительному изменению высоты h, на которой формируется данная особенность, ~ 7.5% или ~ 750 м.

– Поведение второй гармоники качественно совпадает с основной, однако, более подробные наблюдения необходимы для окончательного заключения.

 Обнаружены значительные изменения формы профиля импульса от светимости источника и энергетического диапазона, особенно вблизи циклотронной линии.

Глава 6

4U 0115+63 по данным обсерваторий RXTE и ИНТЕГРАЛ: вариации циклотронной частоты и формы профиля импульса

6.1 Введение

Источник 4U 0115+63 был открыт обсерваторией UHURU более 30-ти лет назад (Джиаккони и др., 1972; Форман и др., 1978). Во время наблюдений обсерваторией SAS-3 в 1978 г. Раппапорт и др. (1978), основываясь на известном периоде собственных пульсаций ~ 3.6 с (Комински и др., 1978), определили основные параметры двойной системы: орбитальный период ~ 24.3 дня, эксцентриситет орбиты 0.34, проекцию полуоси релятивистского объекта $a_x \sin i \sim 140$ световых сек (см. также Тамура и др. 1992, Лутовинов и др. 1994 для последующего уточнения параметров). Оптические наблюдения звезды V635 Cassiopeiae (Хатчингс, Крамптон, 1981, Холопов и др., 1981) – нормального компаньона рентгеновского источника 4U0115+63, проведенные Негуруела, Оказаки (2001), позволили уточнить спектральный класс звезды – B0.2Ve и получить оценку расстояния до двойной системы – 7-8 кпс.

Кроме своей транзиентности (что обеспечивает широкий динамический диапазон наблюдаемых светимостей объекта) рентгеновский пульсар 4U0115+63 уникален по своим спектральным характеристикам. Впервые резонансная линия циклотронного поглощения в спектре его излучения была обнаружена почти 30 лет назад и в настоящее время он является единственным объектом, в спектре которого зафиксировано пять гармоник циклотронной линии. Свойства циклотронной особенности у исследуемого источника подробно изучались по данным многих обсерваторий (Вейтон и др. 1979, Вайт и др. 1983, Михара и др. 1998, Хайндл и др. 1999, Сантангело и др. 1999, Лутовинов и др. 2000, Михара и др., 2004). Так, было показано, что спектр источника подвержен значительным вариациям на масштабе времени меньше периода собственного вращения нейтронной звезды, а разные гармоники циклотронной частоты ведут себя по разному в зависимости от фазы импульса; в частности, третья гармоника присутствует только на спаде второго (меньшего) пика профиля импульса (Хайндл и др., 1999). Михара и др. (1998) обнаружили, что во время наблюдений источника в 1991 г. в его спектре была зарегистрирована только одна гармоника циклотронного поглощения на ~ 16 кэВ, вместо наблюдавшихся в 1990г. двух линий с энергиями ~ 12 и ~ 22 кэВ. Используя данные, полученные обсерваторией RXTE во время очередной мощной вспышки излучения в марте-апреле 1999 г., Накаджима и др. (2006) подтвердили тот факт, что положение циклотронной линии в спектре источника зависит от светимости пульсара, а одиночная линия на ~ 16 кэВ, скорее всего, является сместившейся "вверх" основной гармоникой.

Несмотря на большое количество наблюдений и работ, посвященных исследованию рентгеновского пульсара 4U0115+63, остается целый ряд слабо изученных вопросов, связанных с изменением профиля импульса источника и его спектральных характеристик в зависимости от интенсивности излучения источника и энергетического диапазона.

Данная глава диссертации посвящена временному анализу излучения пульсара на масштабе периода пульсаций, а также исследованию его спектральных свойств в зависимости от собственной светимости, используя для этой цели данные, полученные обсерваториями RXTE и ИНТЕГРАЛ во время вспышки 2004 г., а также данные обсерватории RXTE для более ранней вспышки 1999 г.

Наблюдения

Были использованы данные наблюдений исследуемого объекта во время мощных вспышек излучения в марте-апреле 1999 г. и сентябре-октябре 2004 г. научными приборами орбитальной астрофизической обсерватории RXTE: спектрометрами PCA и HEXTE (Obs. ID 40051-05-XX-XX, 40070-01-XX-00, 40411-01-XX-00, 90014-02-XX-XX и 90089-01-XX-XX).

Также для подробного исследования свойств излучения пульсара в жестком рентгеновском диапазоне энергий были использованы данные телескопа IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ. Для проведенного анализа использовались открытые данные (орбита 238) наблюдений пульсара во время вспышки излучения, начавшейся в конце августа 2004г. (Лутовинов и др., 2004).

В таблицах 6.1 и 6.2 приведен список наблюдений рентгеновского пульсара 4U0115+63 по данным обсерваторий RXTE и ИНТЕГРАЛ в 1999 и 2004 гг. В первом столбце указана дата наблюдения, второй и третий столбцы показывают поток от источника и его светимость (вычислялась в предположении расстояния до источника 7 кпс) в диапазоне энергий 3 – 100 кэВ, соответственно.

	-	-
Дата, MJD	Поток ^а ,	Светимость ^б ,
(наведение)	$\times 10^{-9}$ эрг с ⁻¹ см ⁻²	10 ³⁷ эрг с ⁻¹
51240.15 (40411-01-01-00)	12.2 ± 1.1	7.2 ± 0.6
51241.56 (40411-01-02-00)	12.3 ± 1.0	7.3 ± 0.6
51242.87 (40411-01-03-00)	16.5 ± 0.9	9.7 ± 0.5
51243.87 (40411-01-04-00)	19.1 ± 1.2	11.2 ± 0.7
51244.31 (40070-01-01-00)	20.2 ± 0.1	11.9 ± 0.1
51244.87 (40411-01-05-00)	20.1 ± 1.3	11.8 ± 0.8
51246.27 (40411-01-06-00)	22.1 ± 1.7	13.0 ± 1.0
51246.83 (40411-01-07-00)	26.4 ± 2.0	15.5 ± 1.1
51247.76 (40411-01-08-00)	21.4 ± 1.3	12.6 ± 0.8
51248.38 (40411-01-09-00)	21.9 ± 1.4	12.9 ± 0.8
51248.94 (40070-01-02-00)	24.4 ± 1.1	14.4 ± 0.6
51249.16 (40070-01-03-00)	24.9 ± 0.3	14.6 ± 0.2
51249.76 (40411-01-10-00)	22.5 ± 1.4	13.2 ± 0.8
51250.80 (40411-01-11-00)	24.6 ± 1.3	14.5 ± 0.8
51251.28 (40411-01-12-00)	23.5 ± 1.4	13.8 ± 0.8
51252.34 (40411-01-13-00)	20.8 ± 1.5	12.3 ± 0.9
51253.40 (40411-01-14-00)	21.0 ± 1.1	12.3 ± 0.6
51254.61 (40411-01-15-00)	23.7 ± 1.4	13.9 ± 0.8
51255.33 (40411-01-16-00)	23.2 ± 1.5	13.6 ± 0.9
51256.22 (40051-05-01-00)	21.0 ± 0.8	12.3 ± 0.4
51256.54 (40411-01-17-00)	19.0 ± 0.8	11.2 ± 0.5
51257.16 (40411-01-18-00)	18.8 ± 1.2	11.1 ± 0.7
51258.31 (40051-05-02-00)	20.9 ± 0.9	12.3 ± 0.5
51258.55 (40411-01-19-00)	19.8 ± 0.7	11.6 ± 0.4
51259.20 (40411-01-20-00)	16.5 ± 0.8	9.7 ± 0.4
51260.29 (40051-05-03-00)	18.6 ± 1.0	10.9 ± 0.6
51260.42 (40411-01-21-00)	18.7 ± 2.0	11.0 ± 1.1
51261.54 (40411-01-22-00)	17.0 ± 1.1	10.0 ± 0.7
51262.23 (40051-05-04-00)	13.7 ± 0.4	8.1 ± 0.2
51263.25 (40411-01-23-00)	12.6 ± 1.2	7.4 ± 0.7
51264.39 (40051-05-05-00)	13.6 ± 0.7	8.0 ± 0.4
51265.19 (40070-01-04-00)	12.8 ± 0.1	7.5 ± 0.1
51266.07 (40051-05-06-00)	11.6 ± 0.3	6.8 ± 0.2
51266.32 (40070-01-05-00)	11.3 ± 0.1	6.6 ± 0.1
51268.22 (40051-05-07-00)	9.4 ± 0.5	5.5 ± 0.3
51269.16 (40051-05-15-02)	8.8 ± 0.3	5.2 ± 0.2
51270.22 (40051-05-08-00)	8.3 ± 0.1	4.9 ± 0.1
51271.11 (40051-05-15-01)	8.1 ± 0.7	4.7 ± 0.4
51272.21 (40051-05-09-00)	7.0 ± 0.1	4.1 ± 0.1
51273.47 (40051-05-15-00)	6.0 ± 1.0	3.5 ± 0.6
51274.14 (40051-05-10-00)	5.9 ± 0.1	3.5 ± 0.1
51276.09 (40051-05-11-00)	5.0 ± 0.3	2.9 ± 0.2
51278.21 (40051-05-12-00)	3.9 ± 0.1	2.3 ± 0.1
51280.14 (40051-05-13-00)	2.5 ± 0.2	1.5 ± 0.1
51282.09 (40051-05-14-00)	2.0 ± 0.1	1.2 ± 0.1
51284.92 (40411-01-24-00)	3.4 ± 0.2	2.0 ± 0.1
51286.92 (40411-01-25-00)	2.3 ± 0.2	1.4 ± 0.1
51288.06 (40411-01-26-00)	0.2 ± 0.3	0.1 ± 0.1

Табл. 6.1. Наблюдения пульсара 4U0115+63 обсерваторией RXTE в 1999 г.

а в диапазоне энергий 3-100 кэВ.

⁶ в диапазоне энергий 3-100 кэВ в предположении расстояния до источника d = 7 кпк.

Табл. 6.2. Наблюдения пульсара 4U0115+63 обсерваториями RXTE и ИНТЕ-ГРАЛ в 2004 г. Дата, MJD Поток^а, Светимость⁶,

Дата, MJD	Поток ^а ,	Светимость ⁰ ,		
(наведение)	$\times 10^{-9}$ эрг с ⁻¹ см ⁻²	10^{37} эрг с $^{-1}$		
По данным обсерватории RXTE (спектрометры PCA и HEXTE)				
53260.18 (90089-01-03-01)	18.3 ± 2.4	10.8 ± 1.4		
53262.20 (90089-01-03-00)	22.8 ± 2.4	13.4 ± 1.4		
53265.08 (90089-01-04-06)	18.7 ± 0.6	11.0 ± 0.4		
53267.24 (90089-01-04-04)	16.8 ± 0.5	9.9 ± 0.3		
53269.13 (90089-01-04-02)	17.2 ± 0.4	10.1 ± 0.2		
53270.51 (90089-01-04-00)	16.2 ± 0.6	9.5 ± 0.4		
53271.97 (90089-01-04-03)	14.7 ± 0.1	8.6 ± 0.1		
53272.82 (90089-01-05-00)	13.9 ± 0.3	8.2 ± 0.2		
53272.96 (90089-01-05-05)	13.8 ± 0.4	8.1 ± 0.2		
53274.85 (90089-01-05-01)	12.6 ± 1.4	7.4 ± 0.8		
53275.69 (90089-01-05-02)	11.9 ± 0.6	7.0 ± 0.4		
53276.75 (90089-01-05-03)	11.0 ± 0.2	6.5 ± 0.1		
53278.65 (90089-01-05-04)	9.6 ± 0.4	5.6 ± 0.2		
53280.73 (90089-01-06-00)	8.0 ± 1.0	4.7 ± 0.6		
53282.65 (90014-02-01-00)	6.8 ± 0.1	4.0 ± 0.1		
53284.62 (90014-02-01-02)	5.0 ± 0.1	2.9 ± 0.1		
53285.99 (90014-02-01-01)	3.8 ± 0.4	2.2 ± 0.2		
53287.83 (90014-02-02-00)	3.2 ± 0.4	1.9 ± 0.2		
53289.54 (90014-02-02-01)	2.5 ± 0.3	1.5 ± 0.2		
53290.65 (90014-02-02-02)	1.9 ± 0.1	1.1 ± 0.1		
53291.83 (90014-02-02-03)	1.5 ± 1.0	0.9 ± 0.6		
53293.46 (90014-02-03-00)	1.1 ± 0.1	0.6 ± 0.1		
53295.70 (90014-02-03-01)	0.4 ± 0.5	0.2 ± 0.3		
По данным обсерватории ИНТЕГРАЛ (телескопы JEM-X и IBIS)				
53273.8 (238 орбита)	12.5 ± 1.3	7.4 ± 0.8		

^а в диапазоне энергий 3-100 кэВ.

⁶ в диапазоне энергий 3-100 кэВ в предположении расстояния до источника d = 7 кпк.

6.2 Результаты и обсуждение

6.2.1 Профиль импульса

Средний профиль импульса, его эволюция со светимостью и энергией

Свойства профиля импульса анализировались по данным, полученным во время вспышки 1999 г., т.к. она имела больший диапазон светимостей и наблюдалась приборами обсерватории RXTE с более ранней фазы. Результаты анализа данных более поздних наблюдений 2004 г. не показали значимых отличий от результатов, полученных для вспышки 1999 г. Предполагая расстояние до двойной системы равным 7 кпс, диапазон наблюдаемых светимостей источника во время вспышки составлял ~ $(1-15) \times 10^{37}$ эрг/с. Благодаря такой высокой интенсивности излучения пульсара нам удалось не только проследить с хорошей статистической значимостью зависимость формы профиля импульса от собственной светимости объекта в различных энергетических диапазонах, но и исследовать его переменность на масштабе периода пульсаций.

На рис. 6.1 показаны скорректированные на фон фазовые кривые блеска пульсара 4U0115+63 при разных светимостях источника в разных энергетических диапазонах, полученные по данным обсерватории RXTE. На рисунке колонки расположены от начала вспышки слева направо и соответствуют светимостям ~ 7.3×10^{37} , ~ 14.6×10^{37} , ~ 6.6×10^{37} и ~ 1.5×10^{37} эрг/с. Первая и третья колонки отражают эволюцию профиля импульса с энергией для возрастания и спада вспышки, соответственно. Видно, что при одинаковой интенсивности излучения пульсара профили импульса являются практически идентичными вне зависимости от фазы вспышки.

Интересно проследить эволюцию формы профиля импульса с энергией: в мягких каналах (< 20 кэВ) профиль является двухпиковым с тенденцией к исчезновению второго пика по мере уменьшения светимости пульсара; при увеличении энергетического диапазона второй пик также исчезает и профиль становится практически однопиковым выше ~ 20 кэВ с шириной первого пика ~ 0.5 фазы, однако на энергии примерно 30 кэВ ширина первого пика увеличивается и достигает ~ 0.75 фазы, частично покрывая область второго пика. Отличительной чертой среднего профиля импульса исследуемого источника является наличие ряда особенностей в его форме – дополнительные небольшие пики (например, на фазах 0.14 и 0.92 в наблюдениях со светимостью $\lesssim 7 \times 10^{37}$ эрг/с) и несимметричность второго (обладающего меньшей интенсивностью) пика.

Для качественного объяснения наблюдаемого поведения профиля импульса (уменьшение интенсивности второго пика при уменьшении светимости и увеличении энергии) можно предложить простую, чисто геометрическую картину, способную в общих чертах описать основные наблюдаемые тренды в профиле импульса: ось вращения нейтронной звезды наклонена относительно оси ее магнитного поля таким образом, что аккреционная колонка на одном из полюсов, при его попадании в зону прямой видимости наблюдателя, видна на всю (или практически всю) высоту; у второй колонки видна только верхняя часть, излу-



Рис. 6.1. Зависимость формы профиля импульса от светимости источника и энергетического диапазона. Колонки расположены от начала вспышки слева направо и соответствуют светимостям $\sim 7.3 \times 10^{37}, \sim 14.6 \times 10^{37}, \sim 6.6 \times 10^{37},$ и $\sim 1.5 \times 10^{37}$ эрг/с. Фон вычтен.



Рис. 6.2. Скорректированные на фон карты интенсивности профиля импульса рентгеновского пульсара 4U0115+63 по данным спектрометров РСА и НЕХТЕ обсерватории RXTE в зависимости от энергетического диапазона и болометрической светимости источника (см. текст). Пунктирными линиями показаны положения гармоник циклотронной частоты в спектре источника; соответствующие светимости источника подписаны под картами.

0.1

0.8

0

0.6

əsoya

0.4

0.2

0.0

0.6 -

0.4

Phase

0.2

0.0

0.8

чающая более мягкие фотоны, а область излучения жестких фотонов закрыта поверхностью нейтронной звезды (отсюда наблюдаемое уменьшение интенсивности второго пика с увеличением энергии); при уменьшении темпа аккреции и, соответственно, светимости источника, высота колонки падает, интенсивность второго пика уменьшается и в какой-то момент мы вообще перестаем его видеть.

Естественно, для более-менее точного описания наблюдаемого поведения профилей импульса необходимо существенно усложнить описанную выше картину. Так, например, необходимо знать распределение температуры вдоль аккреционной колонки, форму диаграммы направленности излучения, ее зависимость от светимости объекта, энергетического диапазона и т.д. Кроме того, принимая во внимание близость области формирования излучения к поверхности нейтронной звезды, надо учитывать эффекты общей теории относительности, также способные влиять на форму импульса (см., например, Белобородов 2002).

Эволюция формы профиля импульса может быть наглядно проиллюстрирована картами интенсивности, построенными для следующего ряда наблюдений: 40411-01-02-00, 40070-01-03-00, 40070-01-05-00, 40051-05-09-00, 40051-05-12-00 и 40051-05-13-00 (см. таб. 6.1 и рис. 6.2). Карты были получены путем свертки кривой блеска пульсара с наилучшим периодом в узких энергетических каналах (шириной около 4 кэВ), центроид которых смещался от канала к каналу на 1 кэВ. Каждый профиль строился в единицах относительно среднего уровня скорости счета в данном канале. Результирующая карта приводится нормированной на единицу (все значения интенсивностей поделены на максимальное значение по всей карте). На рисунке для трех первых наблюдений приведены карты, полученные по данным спектрометров РСА и НЕХТЕ, для сеансов с более низкой светимостью – только РСА. Пунктирными линиями показано положение основной гармоники в спектре пульсара (а для сеансов с высокой светимостью показано положение трех первых гармоник). Данный метод анализа, использованный в главе 5 при исследовании пульсара V0332+53, позволяет обнаруживать и прослеживать крупномасштабные изменения формы профиля импульса с энергией и фазой. В частности, было обнаружено, что при всех уровнях светимости пульсара 4U0115+63 наблюдается "волнообразное" поведение формы профиля при изменении энергии. Эффект заключается в том, что каждая линия уровня равной интенсивности основного пика не лежит на одной фазе при разных энергиях, а слегка смещается то в одну, то в другую сторону. Интересно отметить, что такая переменность фазы основного пика обладает некоей повторяемостью по энергии и ее период приблизительно совпадает с расстоянием между гармониками циклотронной особенности в спектре пульсара (рис. 6.2). Как было показано в главе 5 (Цыганков и др., 2006), наличие циклотронной особенности может значительно влиять на форму профиля импульса непосредственно вблизи нее. Если предположить, что наблюдаемая "волнообразность" эволюции профиля импульса действительно связана с особенностями излучения вблизи циклотронной частоты и ее высших гармоник, можно ожидать смещения "фазы волны" в зависимости от светимости пульсара параллельно со смещением циклотронной особенности в спектре. Однако, проведенный анализ не позволил



Рис. 6.3. Зависимость доли пульсирующего излучения от энергии, полученная по данным обсерватории RXTE во время вспышки 1999 г., когда светимость пульсара была максимальной (наблюдение 40070-01-03-00).

нам значимо зарегистрировать присутствие или отсутствие такого смещения.

Доля пульсирующего излучения

Полученные карты интенсивности дают качественную картину поведения профиля импульса. Для количественного описания наблюдаемых изменений использовалась зависимость доли пульсирующего излучения, определяемой как $P = (I_{max} - I_{min})/(I_{max} + I_{min})$, где I_{max} и I_{min} – скорректированные на фон значения скорости счета в максимуме и минимуме профиля импульса, от энергии и светимости. Во всех наблюдениях, в среднем, доля пульсирующего излучения возрастает с ростом энергии. Типичный вид зависимости доли пульсирующего излучения от энергетического диапазона, полученный в широком диапазоне энергий 3-100 кэВ по данным спектрометров РСА и НЕХТЕ обсерватории RXTE, приведен на рис. 6.3 (для самого яркого наведения 40070-01-03-00). На рис. 6.4 показаны зависимости доли пульсирующего излучения для наблюдений с разной светимостью пульсара по данным спектрометра РСА в диапазоне энергий 3-20 кэВ; соответствующие светимости указаны справа от каждого графика. Видно, что с ростом светимости доля пульсирующего излучения существенно уменьшается (с ~ 65% до ~ 40% на 10 кэВ). Данный результат может быть качественно объяснен и понят в рамках предложенной выше простой модели, описывающей зависимость формы профиля импульса от светимости. При увеличении светимости геометрический размер излучающих областей растет и, со-



Рис. 6.4. Зависимость доли пульсирующего излучения от энергии для разных значений болометрической светимости пульсара (приведены справа от соответствующих кривых в единицах 10³⁷ эрг/с) по данным спектрометра PCA обсерватории RXTE.

ответственно, происходит "размытие" пульсаций. Большей компактностью излучающих областей также можно объяснить и увеличение доли пульсирующего излучения с ростом энергии (рис. 6.3).

Следует отметить, что, как видно из рис. 6.3 и 6.4, доля пульсирующего излучения растет с энергией нелинейно. На представленных зависимостях присутствуют локальные максимумы и минимумы, переодичность появления которых примерно совпадает с периодичностью "волнообразной" структуры эволюции профиля импульса (см. выше) и, возможно, имеет ту же природу.

Для проведения анализа профиля импульса в области высоких энергий (выше 20 кэВ) и исследования эволюции профиля с энергией нами были использованы наблюдения телескопа IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ, имеющего значительно большую экспозицию и, соответственно, лучшее статистическое качество данных (см. табл. 6.2). На построенной по этим данным средней карте интенсивности (рис. 6.5) вертикальными пунктирными линиями показаны положения центров второй, третьей и четвертой гармоник циклотронной линии в спектре пульсара. Видно, что отмеченная выше по данным обсерватории RXTE "волнообразная" структура эволюции профиля импульса с энергией присутствует в более явном виде и в результатах обсерватории ИНТЕГРАЛ. Тем не менее, вопрос о ее связи с положением циклотронной линии в спектре источника остается от-



Рис. 6.5. Скорректированная на фон карта интенсивности профиля импульса пульсара 4U0115+63 по данным телескопа IBIS обсерватории INTEGRAL. Светимость источника в данном наблюдении составляет ~ 7.4×10^{37} эрг/с. Пунктирными линиями показаны положения второй, третьей и четвертой гармоник циклотронной частоты в спектре источника.

крытым.

Переменность профиля импульса на масштабе периода пульсаций

Все описанные выше свойства профиля импульса относились к усредненным за большой промежуток времени (порядка тысяч секунд) импульсам. Однако, некоторые физические и геометрические свойства излучающих областей и их изменения могут приводить к переменности профиля импульса на масштабах менее одного периода вращения нейтронной звезды. Такая переменность, в частности, была обнаружена у рентгеновского пульсара A0535+26, для которого было показано, что переменность в среднем по профилю не может быть объяснена только пуассоновским процессом, а переменность одного из пиков в профиле оказывается выше среднего уровня переменности по всему профилю (Фронтера



Рис. 6.6. Кривая блеска пульсара в диапазоне энергий 17-20.3 кэВ при светимости $\sim 6.6 \times 10^{37}$ эрг/с (наблюдение 40070-01-05-00). Пунктиром показана средняя форма профиля импульса за все указанное наблюдение. Фон вычтен.

и др., 1985).

Для исследования изменения профиля от одного импульса к другому нами были проанализированы кривые блеска пульсара в разных энергетических каналах и при разных уровнях светимости и обнаружено, что профиль не является стабильным, а значительно меняется на масштабе времен порядка периода пульсаций. Для примера, на рис. 6.6 приведен произвольный участок кривой блеска источника в диапазоне энергий 17-20.3 кэВ для сеанса наблюдений 40070-01-05-00, когда светимость источника составляла ~ 6.6×10^{37} эрг/с. На том же рисунке штриховой линией показан профиль импульса в том же диапазоне энергий, усредненный за весь сеанс наблюдения. Видно, что форма импульса не является постоянной, а значительно меняется на масштабе одного периода обращения нейтронной звезды, при этом второй пик в профиле (с меньшей интенсивностью) обладает большей переменностью как по амплитуде, так и по форме.

Для количественной оценки переменности профиля импульса анализировалось среднее квадратичное отклонение скорости счета на кривой блеска от скорости счета на соответствующей фазе среднего профиля, полученного сверткой данной кривой блеска с наилучшим периодом. Данная величина (будем называть ее для краткости *RMS*) вычислялась как:
$$RMS = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N} (P_k - \langle P_k \rangle)^2 - N\sigma^2}{N}}}{\langle Flux \rangle},$$
(6.1)

где P_k – скорректированная на фон скорость счета в данном бине кривой блеска, $\langle P_k \rangle$ – скорость счета в бине с соответствующей фазой усредненного профиля, N – полное количество бинов на кривой блеска, равное количеству периодов, укладывающемуся в рассматриваемом наблюдении, умноженному на 25 (количество бинов, на которое разбивался каждый импульс), σ – средняя ошибка измерения скорости счета на кривой блеска (данное слагаемое введено для учета пуассоновского шума), $\langle Flux \rangle$ – средняя скорость счета за все наблюдение.

Полученная таким образом величина среднего квадратичного отклонения RMS отражает среднюю переменность профиля импульса источника в данном энергетическом диапазоне при данной светимости. Для исследования переменности какой-то характерной особенности в профиле, т.е. для исследования зависимости переменности профиля импульса от его фазы, величина RMS вычислялась аналогичным образом, однако суммирование велось только по бинам с соответствующими фазами импульса. На рис. 6.7 показаны полученные таким образом величины RMS, деленные на интенсивности в данном бине среднего профиля, в четырех энергетических диапазонах (верхние панели, в %); на нижних панелях для сравнения показаны средние профили импульса в соответствующих диапазонах энергий. Такие зависимости были получены для всех сеансов наблюдений, однако на рис. 6.7 мы приводим результаты только для двух из них (наблюдения 40070-01-03-00 и 40070-01-05-00) когда источник был достаточно ярким и на профиле импульса присутствовал целый ряд характерных особенностей.

Из рисунка видно, что в обоих наблюдениях отношение *RMS* к интенсивности не является постоянным и ведет себя достаточно сложным образом с фазой импульса, однако можно выделить некоторые ее особенности (в частности, для сеанса 40070-01-03-00). Во всех энергетических диапазонах первый пик (с большей интенсивностью) является наиболее стабильным (отношение *RMS* к интенсивности минимально). Его интенсивности меняется незначительно, небольшую переменность имеет только ширина пика, что отражается в увеличении *RMS* в его "крыльях" (рис. 6.7). Второй же пик гораздо более переменен как по амплитуде (его переменность как целого выше среднего уровня на несколько процентов), так и по форме: соответствующий ему участок зависимости *RMS* от фазы импульса (см. верхние панели на рис. 6.7) проявляет себя как двух или более пиковую структуру, переменность в максимумах которой выше средней уже на 5-10%.

Наблюдаемая переменность профиля импульса может быть связана с разными физическими процессами: нестационарностью процессов в аккреционном потоке, переменностью интенсивности излучения некоторого непульсирующего континуума излучения, непосредственно собственная переменность профи-



Рис. 6.7. Зависимость величины среднего квадратичного отклонения (*RMS*, см. текст), деленной на скорость счета в среднем профиле импульса в зависимости от фазы импульса (верхние панели) для двух уровней светимости источника (~ 14.6×10^{37} и ~ 6.6×10^{37} эрг/с) в разных энергетических диапазонах. На нижних панелях для сравнения приведены средние профили импульса в соответствующих энергетических диапазонах за рассматриваемые наблюдения.

ля импульса и т.д. Математически эти механизмы формирования переменности можно представить в следующем виде:

1) Мультипликативное добавление переменности – результирующая интенсивность в текущий момент времени определяется как $I_1 = \hat{F}(t) \times P(\varphi)$, где $\hat{F}(t) - \varphi$ ункция только времени, $P(\varphi)$ – интенсивность в усредненном профиле на фазе φ . Если бы реализовывался только данный механизм, то отношение *RMS* к интенсивности среднего профиля было бы постоянной величиной.

2) Аддитивное добавление переменности, когда интенсивность задается $I_2 = F(t) + P(\varphi)$. В этом случае, исходя из нашего определения *RMS*, его отношение к интенсивности будет обратно пропорционально интенсивности среднего профиля.

Как видно из рис. 6.7 (и в какой-то степени из рис. 6.6) ни одним из этих сценариев, отражающих воздействие только внешних факторов и не затрагивающих переменность самого профиля, в чистом виде, как впрочем и их линейной комбинацией, наблюдаемая картина переменности полностью объяснена быть не может. Скорее всего, для пульсара 4U 0115+63 реализуется наиболее обобщенный вариант:

3) $I_3 = F(t) + \widehat{F}(t) \times (P(\varphi) + \widetilde{P}(t, \varphi))$, где $\widetilde{P}(t, \varphi)$ – компонента, отражающая процессы, связанные с изменением самого профиля импульса.

Что же касается физических причин собственной переменности профиля $(\tilde{P}(t,\varphi))$, то кроме изменения формы и положения горячих пятен на поверхности нейтронной звезды (см., например, Романова и др., 2004) сложная структура второго пика может быть следствием, например, мультипольности магнитного поля вблизи поверхности нейтронной звезды. Тот факт, что средняя переменность профиля увеличивается с ростом энергетического диапазона (рис. 6.7), может также служить косвенным доказательством того, что эта переменность соответствует переменности аккреционного потока в непосредственной близости от поверхности нейтронной звезды, где энергия фотонов выше.

Таким образом, использованный нами метод анализа формы профиля импульса позволяет выявить его "истинную" переменность, которая "замывается" на среднем профиле, а также его стабильную составляющую. При этом, та часть переменности, которая отвечает за "собственную" переменность профиля несет в себе информацию о конкретных физических процессах в рентгеновских пульсарах и должна быть учтена при корректном моделировании формирования профиля импульса таких источников.

6.2.2 Спектральный анализ

Для описания спектра источника нами была использована комбинация моделей, состоящая из степенного закона и завала на высоких энергиях (формула (5)), модифицированная линиями поглощения в форме профиля Лоренца (формула (9)) Также, при аппроксимации данных, полученных в наблюдениях с высокой интенсивностью излучения, в спектре регистрировалась линия флуоресцентного железа с энергией 6.4 кэВ, задаваемая формулой (8).



Рис. 6.8. Энергетический спектр излучения пульсара по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ в широком диапазоне энергий. В модель (пунктирная линия) не включена компонента, связанная с эмиссионной линией железа (см. текст).

Необходимо отметить, что вопрос, связанный с присутствием в спектре источника эмиссионной линии железа остается открытым. В ряде работ (Тамура и др., 1992, Накаджима и др., 2006) для удовлетворительного описания экспериментальных данных не требовалось вводить в модель указанной особенности. Другой группой авторов (Нагасе и др., 1991, Лутовинов и др., 2000, Михара и др., 2004), напротив, такая особенность значимо регистрировалась. Такая неоднозначность является, в том числе, следствием сложности и некоторой "искусственности" используемой аналитической модели, а также того факта, что энергия завала спектра исследуемого источника *E*_{cut} оказывается близкой к энергии линии. Окончательный вывод о наличии этой особенности в спектре пульсара сделать сложно, однако, ее введение в аппроксимирующую модель значимо уменьшает величину χ^2 . Эквивалентная ширина линии для разных наблюдений изменяется с ~ 150 эВ в состоянии с высокой светимостью до ~ 50 эВ - с низкой. Эта величина совместима с ситуацией, в которой "холодным" веществом, находящимся за рентгеновским источником (например, веществом, текущим по магнитосфере нейтронной звезды, или загнутым краем аккреционного диска), перехватывается и переизлучается в направлении наблюдателя около половины попадающего на него излучения (Джордж, Фабиан, 1991). Основываясь на данном факте, уменьшение эквивалентной ширины линии железа при уменьшении светимости можно интерпретировать как уменьшение площади отражающей поверхности. Многое о геометрии отражающих областей и, в частности, расстоянии до них, можно получить исследуя поведение линии железа при изменении фазы импульса. Однако, из-за сложности формы спектра и относительно невысокой интенсивности этой линии, для ее регистрации необходимы наблюдения прибором с высоким энергетическим разрешением в районе 6.4 кэВ.

На рис. 6.8 показан спектр источника в широком диапазоне энергий, полученный по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ. Отметим, что качество аппроксимации экспериментальных данных в области энергий ниже 20 кэВ является неидеальным; в частности, это может быть связано с несовершенством матрицы отклика монитора JEM-X (см. комментарии в работе Филипповой и др., 2005). Параметры модели, состоящей из степенного закона с завалом на высоких энергиях и четырех гармоник циклотронной линии, приведены ниже:

Параметр модели	Значение
Photon index	$0.093^{+0.007}_{-0.001}$
E_{cut} , keV	8.93 ± 0.03
E_{fold}, keV	$9.06\substack{+0.09\\-0.02}$
$ au_{cycl,1}$	0.55 ± 0.01
<i>E_{cycl,1}</i> , keV	$11.16\substack{+0.03\\-0.02}$
$\sigma_{cycl,1}$, keV	$3.13_{-0.02}^{+0.07}$
$ au_{cycl,2}$	0.97 ± 0.01
$E_{cycl,2}$, keV	$21.16^{+0.11}_{-0.02}$
$\sigma_{cycl,2}$, keV	$7.55_{-0.02}^{+0.15}$
$ au_{cycl,3}$	0.40 ± 0.01
<i>E_{cycl,3}</i> , keV	$34.55_{-0.20}^{+0.01}$
$\sigma_{cycl,3}$, keV	$4.5^{+0.3}_{-0.1}$
$ au_{cycl,4}$	0.55 ± 0.01
$E_{cycl,4}$, keV	$44.93\substack{+0.15 \\ -0.27}$
$\sigma_{cycl,4}$, keV	$11.38\substack{+0.45\\-0.17}$
E_{Fe} , keV	6.4 fixed
$\sigma_{Fe}, \mathrm{keV}$	0.2 fixed
EW_{Fe} , eV	130 ± 10
χ^2 (d.o.f)	0.85(155)

Полученные значения параметров модели согласуются с результатами, полученными по данным обсерватории RXTE и ранее другими авторами.

Характерные спектры источника, полученные в двух наблюдениях с разными величинами светимости и циклотронной энергии (наблюдения 40070-01-05-00 и 40051-05-09-00) по данным спектрометра PCA, приведены на рис. 6.9.



Рис. 6.9. Характерные энергетические спектры излучения источника в состояниях с разной светимостью (~ 6.6×10^{37} и ~ 4.1×10^{37} эрг/с) по данным спектрометра РСА обсерватории RXTE. В аппроксимирующую модель (пунктирная линия) не включена компонента, связанная с эмиссионной линией железа.

Зависимость энергии циклотронной линии от светимости

В работах Михары и др. (1998) и Накаджима и др. (2006) было показано, что положение циклотронной линии поглощения меняется с изменением светимости пульсара от ~ 11 кэВ вблизи максимума вспышки до ~ 16 кэВ в конце вспышки, когда светимость источника падает больше, чем на порядок. Если предположить, что в конце вспышки регистрируемое излучение, в основном, формируется вблизи поверхности нейтронной звезды, можно получить оценку величины магнитного поля нейтронной звезды $B = (1 + z) \times E_{cycl} \times 10^{12}/11.6 \simeq$ 1.4×10^{12} Гс. Тем не менее, несмотря на длительное исследование свойств пульсара, сам процесс изменения циклотронной частоты со светимостью источника не совсем ясен. Ниже приводятся результаты исследования такого перехода во время вспышки 2004 г.; для сравнения мы также переанализировали данные вспышки 1999 г.

На рис. 6.10 и 6.11 показаны зависимости светимости (открытые квадраты) и величины основной гармоники циклотронной частоты от времени (квадраты



Рис. 6.10. Зависимость положения основной гармоники линии циклотронного поглощения в спектре пульсара (закрытые квадраты) и светимости в диапазоне 3 – 100 кэВ (открытые квадраты) от времени наблюдения по данным обсерватории RXTE в 1999 г.

и треугольники для вспышек 1999 и 2004 гг., соответственно). Из рисунков ясно видно, что при высоких светимостях (~ 10^{38} эрг с⁻¹) циклотронная энергия находится в диапазоне значений ~ 10 - 11 кэВ и практически не зависит от интенсивности излучения пульсара. При снижении светимости до ~ 5×10^{37} эрг с⁻¹ происходит резкое увеличение циклотронной энергии до ~ 14 кэВ с небольшим ее ростом до энергий ~ 15 - 16 кэВ при дальнейшем уменьшении светимости источника.

Зависимость циклотронной частоты от собственной светимости пульсара приведена на рис. 6.12 по данным обсерватории RXTE (обозначения аналогичны приведенным на рис. 6.10 и 6.11) и ИНТЕГРАЛ (закрытый круг). Видно, что результаты, полученные разными приборами и во время разных вспышек, хорошо согласуются между собой. В обоих случаях резкое изменение энергии циклотронной линии происходит при одной и той же светимости (~ 5×10^{37} эрг с⁻¹), что свидетельствует о том, что наблюдаемый скачок, по-видимому, является фундаментальным свойством исследуемого пульсара. Представляет большой интерес поиск и исследование подобного перехода на фазе возрастания вспышки, однако, во время обеих вспышек наблюдения начинались проводиться слишком поздно и характерная светимость, при которой наблюдается скачок энергии циклотронной линии, на фазе возрастания интенсивности не наблюдалась.

В предположении дипольной конфигурации магнитного поля, относительное изменение величины энергии основной гармоники $\Delta E_{cyc}/E_{cyc} \sim 60\%$ соот-



Рис. 6.11. Зависимость положения основной гармоники линии циклотронного поглощения в спектре пульсара (закрытые треугольники) и светимости в диапазоне 3 – 100 кэВ (открытые квадраты) от времени наблюдения по данным обсерватории RXTE в 2004 г.

ветствует относительному изменению высоты ее формирования $\Delta R/R \sim 20\%$, что эквивалентно изменению радиуса на ~ 2 км (принимая радиус нейтронной звезды равным 10 км).

Изучая спектральные характеристики излучения при определенной светимости источника, можно получить некоторые ограничения на высоту участка аккреционной колонки, где это излучение эффективно генерируется. В первом приближении можно считать, что при заданной величине магнитного поля энергетические уровни электрона (уровни Ландау) будут расположены по гармоническому закону (1:2:3...). В модели Баско, Сюняева (1976) предсказывается, что в аккреционной колонке более жесткое излучение выходит из областей, более близких к поверхности нейтронной звезды, где напряженность магнитного поля выше. Таким образом, отклонения энергий основной и высших гармоник в спектре 4U0115+63 от линейного закона могут использоваться для сравнения эффективного размера областей, излучающей на энергиях $\sim 11, 22, 33$ и 44 кэВ соответственно. Энергии все более высоких гармоник должны лежать выше гармонического закона. Рис. 6.13 иллюстрирует описанную выше картину для наблюдений со светимостями 7.4×10^{37} эрг с⁻¹ по данным обсерватории ИНТЕ-ГРАЛ (закрытые квадраты и жирные линии) и 11.0×10^{37} эрг с⁻¹ по данным обсерватории RXTE (открытые кружки и тонкие линии). По энергии основной гармоники циклотронной линии определялся гармонический закон (пунктирные линии) и анализировалось отклонение центроидов высших гармоник от не-



Рис. 6.12. Зависимость положения основной гармоники линии циклотронного поглощения в спектре пульсара от собственной светимости. Квадратами показаны значения во время вспышки 1999 г. по данным обсерватории RXTE, треугольниками – во время вспышки 2004 г. по данным обсерватории RXTE, кружком – во время вспышки 2004 г. по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ.

го. Поскольку формальные статистические ошибки на определение центроида линий гораздо меньше энергетического разрешения используемых приборов, то нами была введена систематическая неопределенность на уровне характерного разброса значений (~ 1 кэВ). Для этого к статистической ошибке квадратично было добавлено 0.5 кэВ.

Для определения возможного разброса высот в аккреционной колонке описанным выше методом, были взяты наблюдаемые отклонения энергий центроидов высших гармоник циклотронной линии от гармонического закона, показанного пунктирной линией. С учетом возможных статистических и систематических ошибок максимальное возможное отклонение от гармонического закона, формально совместимое с наблюдательными данными, показано на рисунке сплошними линиями для каждого из наблюдений. Это максимальное отклонение задает предельно консервативное ограничение на отклонение от гармонического закона. В результате было получено, что при светимости 7.4×10^{37} эрг с⁻¹ (данные обсерватории ИНТЕГРАЛ) наблюдаемое отклонение от гармонического закона составляет $\Delta E_{cyc}/E_{cyc} \sim 1\% \pm 3\%$ на энергии максимально наблюдаемой (четвертой) гармоники циклотронной линии (~ 45 кэВ). Заметим, что с учетом ошибок измерений этот результат полностью совместим с чисто гармонической зависимостью положения центроидов линий. В терминах эффектив-



Рис. 6.13. Зависимость положения гармоник циклотронной линии в спектре пульсара от их номера для двух наблюдений с разными светимостями: 7.4×10^{37} эрг с⁻¹ по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ (закрытые квадраты и жирные линии) и 11.0×10^{37} эрг с⁻¹ по данным обсерватории RXTE (открытые кружки и тонкие линии). Пунктирными линиями показан гармонический закон расположения гармоник, сплошными – максимальные отклонения от него.

ных высот излучающих областей (на энергиях ~ 11, 22, 33 и 44 кэВ) эти отклонения соответствуют $\Delta R/R \sim 0.3\% \pm 1\%$. Предельно консервативная оценка дает $\Delta E_{cyc}/E_{cyc} < 9\%$ и $\Delta R < 300$ м. Следовательно, эффективный размер излучающих областей в этом состоянии не отличается более чем на несколько сот метров, а скорее всего это отличие еще меньше.

Для другого наблюдения (при большей светимости 11.0×10^{37} эрг с⁻¹, наблюдения спутника RXTE) наблюдаемое отклонение от гармонического закона составило $\Delta E_{cyc}/E_{cyc} \sim 16\% \pm 3\%$ на энергии максимально наблюдаемой (третьей) гармоники циклотронной линии (~ 36 кэВ), а соответствующий предельно консервативный предел $\Delta E_{cyc}/E_{cyc} < 26\%$ ($\Delta R < 900$ м). Из рисунка видно, что в этом случае высшие гармоники действительно имеют энергии выше гармонического закона, что можно ожидать при заметном линейном размере колонки и зависимости жесткости выходящих фотонов от расстояния до поверхности звезды.

Для первого из наблюдений (при светимости 7.4×10^{37} эрг с⁻¹ заметно ниже максимальной) малые отличия от гармонического закона можно интерпретировать, как следствие компактности излучающей области или независимости жесткости выходящих фотонов от расстояния до поверхности звезды. Интересно, что ограничения на разброс ΔR значительно меньше оценки, полученной из предположения о связи скачкообразного изменения циклотронной частоты (при светимости ~ 5 × 10³⁷ эрг с⁻¹) с изменением высоты ударной волны в аккреционной колонке.

При достаточно высокой энергии гармоник могут оказаться существенными релятивистские поправки к гармоническому закону (см. формулу (4), Хардинг, Доэрти, 1991). Величина поправки составляет по порядку величины $\frac{1}{2} \frac{E}{m_e c^2}$, т.е. не превышает 4% для максимальной энергии циклотронной линии ~ 45 кэВ, наблюдавшейся для источника 4U0115+63. Поэтому релятивистские поправки практически не влияют на выводы, сделанные выше.

Постоянство энергии завала (E_{cut}) в спектре источника

Еще одной отличительной чертой пульсара 4U 0115+63 является стабильность формы спектра во время вспышки. В частности, энергия завала в спектре (E_{cut}) не коррелирует с циклотронной частотой и, будучи зафиксирована на энергии 8.9 кэВ, крайне незначительно искажает другие параметры аппроксимации и не ухудшает значение χ^2 . Для примера рассмотрим два наблюдения обсерватории RXTE 40051-05-05-00 и 40051-05-09-00, когда значения энергий основной гармоники циклотронной линии составляли ~ 10.7 и ~ 14.9 кэВ, соответственно. Так, если аппроксимировать выбранные сеансы моделью, где энергия завала E_{cut} является свободным параметром, то полная величина $\chi^2(N)$ (с N степенями свободы) будет 16.58(36) и 26.08(36), соответственно. Если же зафиксировать E_{cut} на значении 8.9 кэВ, то значения $\chi^2(N)$ становятся 17.16(37) и 26.30(37), соответственно. Данный результат интересен тем, что позволяет проверить предположение о зависимости энергии завала в спектре от величины циклотронной энергии. Корреляция этих параметров, получаемых из средних спектров различных источников была найдена в ряде работ (см, например, Макишима и др., 1999, Орландини, Фиуме, 2001, Кобурн и др., 2002). Благодаря очень широкому динамическому диапазону относительного изменения циклотронной энергии у исследуемого источника (~ 50%) можно проверить существует ли такая корреляция не для разных источников, а для одного пульсара. Используя тот же набор наблюдений (40051-05-05-00 и 40051-05-09-00) и полагая, что в более ярком состоянии (40051-05-05-00) энергия завала в спектре составляет ~ 8.9 кэВ, в аппроксимирующей модели второго спектра *E*_{cut} задавался пропорциональным величине циклотронной энергии. В результате, качество аппроксимации оказалось неприемлемым, что, в частности, выражается в резком увеличении $\chi^2(N)$ (57.35(37)).

Исходя из того, что E_{cut} и остальные параметры аппроксимирующей модели остаются практически неизменными, можно сделать предположение, что энергия завала зависит не от моментального значения циклотронной энергии (т.е. конкретной конфигурации аккреционных областей на полюсах), а скорее отражает фундаментальные свойства нейтронной звезды. Например, в работе Грубера и др. (2001) при анализе данных наблюдений рентгеновского пульсара Her X-1 было обнаружено увеличение циклотронной энергии в спектре излучения источника, что интерпретировалось, как изменение величины магнитного поля

нейтронной звезды. При этом наблюдалась прямая пропорциональность энергии завала (*E_{cut}*) и циклотронной частоты.

6.3 Заключение

В данной главе представлены результаты исследования аккрецирующего рентгеновского пульсара 4U0115+63 по данным космических обсерваторий RXTE и ИНТЕГРАЛ, полученных во время мощных вспышек в 1999 и 2004 гг. (Цыганков и др., 2007). Ниже кратко суммированы наиболее интересные и важные из них.

Исследована зависимость профиля импульса от светимости источника; показано, что с уменьшением светимости источника, равно как и с увеличением энергетического диапазона, интенсивность второго пика в профиле уменьшается и при энергиях выше ~ 20 кэВ он практически полностью исчезает. Предложена модель, качественно описывающая такое поведение профиля, в которой нижняя часть одной из аккреционных колонок (излучающая более жесткие фотоны) частично закрывается от наблюдателя поверхностью нейтронной звезды; с уменьшением светимости источника высота колонки уменьшается и все большая ее часть становится закрытой от наблюдателя.

– Показано, что доля пульсирующего излучения растет как с уменьшением собственной светимости источника, так и с увеличением энергии, свидетельствуя о большей компактности излучающих в жестких лучах областей, что совместимо с описанной выше моделью. На масштабе собственного периода пульсара выявлена компонента переменности формы профиля импульса, не описывающаяся переменностью аккреционного потока, а связанная с собственной переменностью профиля импульса.

– В спектре пульсара зарегистрирована циклотронная линия поглощения и ее 3 высших гармоники. Исследована зависимость энергии циклотронной линии поглощения от светимости пульсара и показано, что эта зависимость не является линейной, а энергия линии увеличивается скачкообразно при достижении источником светимости ~ 5×10^{37} эрг с⁻¹. По величине отклонения положения центроидов высших гармоник циклотронной линии от эквидистантного распределения оценен возможный разброс высот образования излучения с разной энергией в аккреционной колонке.

 Показано, что величина энергии завала в спектре практически не изменяется во время вспышки и не коррелирует с циклотронной энергией.

Глава 7

Жесткие спектры рентгеновских пульсаров по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ

7.1 Введение

Рентгеновские пульсары являются уникальной лабораторией для изучения поведения вещества в экстремальных условиях — при высоких температурах, в сильных магнитных и гравитационных полях. Анализ их энергетических спектров дает возможность получить представление о физических процессах в излучающей области, структуре аккрецирумого вещества и параметрах компактного объекта. Например, регистрация циклотронных линий в спектре пульсара позволяет измерять величину магнитного поля нейтронной звезды (Гнедин, Сюняев 1974).

За время изучения рентгеновских пульсаров было опубликовано множество работ, посвященных разным источникам этого класса; здесь мы упомянем лишь несколько обзорных статей, в которых обсуждались те или иные свойства этих объектов. Впервые такая попытка была сделана Вайтом и др. (1983), в работе которых были суммированы спектры и профили импульса известных к тому моменту рентгеновских пульсаров, а также была предложена эмпирическая модель для описания их спектров. Позже Нагазе (1989) представил обзор аккрецирующих пульсаров, используя новые результаты наблюдений, полученные обсерваториями Hakucho, TENMA, EXOSAT, GINGA. По данным модуля КВАНТ Гильфанов и др. (1989) проанализировали эволюцию периодов пульсаций пульсаров. Профили импульса и эволюции периодов пульсаций были подробно исследованы по данным обсерваторий ГРАНАТ (Лутовинов и др. 1994) и ComptonGRO (Билдстен и др. 1997). Кобурн и др. (2002) по данным обсерватории RXTE и Орландини, Фиуме (2001) по данным обсерватории ВерроSAX провели анализ пульсаров, в спектрах которых регистрируются циклотронные линии, связанные с резонансным рассеянием фотонов на электронах в магнитном поле, причем в некоторых случаях от объектов регистрировались несколько гармоник.

Несмотря на длительное время изучения, до сих пор не существует убедительной теоретической модели, описывающей спектр аккрецирующих рентгеновских пульсаров. Наиболее распространенная модель, используемая при аппроксимации, дает форму спектра в виде степенного закона с экспоненциальным завалом (модели (5), (6)). Для большинства источников фотонный индекс находится в диапазоне 0.3 – 2, энергия слома – 7 – 30 кэВ, а параметр завала – 9 – 40 кэВ. Чувствительность прибора IBIS в данном диапазоне энергий хорошо подходит для определения параметра завала в спектре. Также в спектре довольно часто присутствуют: поглощение на низких энергиях, которое может быть связано как с межзвездной средой, так и с внутренним поглощением в двойной системе, величина которого N_H меняется в диапазоне $10^{21} - 10^{24}$ атом см⁻²; эмиссионные линии железа на 6 – 7 кэВ; гиролинии на энергиях, соответствующих циклотронной частоте электронов и ее гармоникам.

В данной главе приведен обзор широкополосных спектров рентгеновских пульсаров, наблюдавшихся обсерваторией ИНТЕГРАЛ. В поле зрения приборов обсерватории попадало ~70 известных и недавно открытых пульсаров. Для 35 из них удалось восстановить энергетические спектры; остальные источники либо не регистрировались, либо регистрировались, но данные по ним к моменту анализа были закрыты. По большинству из анализировавшихся пульсаров ниже приведено их краткое описание и обсуждение результатов их исследования.

7.2 Наблюдения

Для построения спектров использовались наблюдения обсерватории ИНТЕ-ГРАЛ с 23 орбиты (52629 MJD, 2002-12-21) по 239 орбиту (53276 MJD, 2004-09-28) – это общедоступные к моменту анализа данные и данные российской квоты, полученные в рамках сканирования Галактической плоскости (GPS), глубокого обзора центра Галактики (GCDE) и наблюдений в Общей Программе. Исключение составляют лишь данные наблюдений рентгеновского пульсара V0332+53, проведенные с 272 орбиты (53376 MJD, 2005-01-06) по 278 орбиту (53394 MJD, 2005-01-24) и находящиеся в открытом доступе.

7.3 Анализ данных

Для всех зарегистрированных рентгеновских пульсаров были построены кривые блеска в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ и исследована их переменность. Для постоянных источников строился средний спектр, а для пульсаров с переменным потоком исследовалась зависимость спектра от состояния источника – если спектр не менялся, то также приводился средний спектр, в противном случае приводились спектры разных состояний. В тексте потоки от пуль-

саров, полученные по этим кривым блеска, приведены в единицах мКраб (1 мКраб= 1.36×10^{-11} эрг см⁻² с⁻¹ в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ, в предположении степенного спектра Крабовидной туманности с наклоном 2.1 и нормировкой 10 на 1 кэВ).

Метод восстановления изображений и спектрального анализа данных детектора ISGRI телескопа IBIS в данной главе не отличался от метода, используемого при анализе данных в других главах и описанного в Анализе данных.

Следует отметить, что данные для пульсаров, которые входят в российскую квоту, были условно разделены на две группы: до 200 орбиты и после. Такое разделение связано с тем, что наша матрица отклика прибора ISGRI строится на основе калибровочных измерений Крабовидной туманности. После 200 орбиты из-за изменения рабочих параметров прибора ISGRI поток в отсчетах от Крабовидной туманности увеличился, соответственно изменилась наша матрица отклика, которая была построена по данным 239 орбиты. Были восстановлены спектры отдельно для каждой группы данных и исследовалась переменность их формы.

Для одновременного построения спектров ниже 20 кэВ использовались данные монитора JEM-X, однако, следует иметь в виду, что его поле зрения существенно меньше, чем у телескопа IBIS, поэтому эффективная экспозиция наблюдений источников этим прибором оказывается также меньше, а в некоторых случаях источники вообще не попадали в его поле зрения или чувствительность данного прибора оказывалась недостаточной для их значимой регистрации.

Для поиска в спектре излучения особенностей, связанных с резонансной линией циклотронного поглощения, у тех источников, у которых ранее данной особенности не наблюдалось, в аппроксимирующую модель добавлялась соответствующая компонента (см. выше). При этом энергия центра линии E_{cycl} менялась в диапазоне 20 – 90 кэВ с шагом 5 кэВ, а ее ширина была зафиксирована на 5 кэВ. Выбор энергетического диапазона поиска указанных линий обусловлен наличием систематических особенностей в матрице отклика у монитора JEM-X и хорошей изученностью стандартного рентгеновского диапазона по данным других миссий. С помощью критерия $\Delta \chi^2$ находилось наиболее вероятное положение возможной циклотронной линии и ее значимость в единицах стандартного отклонения.

7.4 Результаты

Список рентгеновских пульсаров, которые попадали в поле зрения обсерватории ИНТЕГРАЛ и были значимо зарегистрированы ее приборами, приведен в Таблице 7.1. Там же указаны их параметры, параметры соответствующих двойных систем и ссылки на работы, откуда они брались (P – период собственного вращения нейтронной звезды, P_{orb} – орбитальный период системы, НМХВ – массивная двойная система, LMХВ – маломассивная двойная система). Спектры источников приведены на рис. 7.1, а параметры моделей наилучшей аппроксимации спектров представлены в Таблицах 7.2 и 7.3. В Таблице 7.2 приведены параметры для стандартной модели, а также указаны экспозиции наблюдений, по которым строился средний спектр, и потоки от пульсаров в диапазонах энергий 6 – 20 кэВ и 18 – 60 кэВ, полученные из анализа спектров. В Таблице 7.3 приведены параметры моделей, описывающих особенности в спектрах пульсаров, а именно, эмиссионную линию железа и циклотронную линию поглощения и ее гармоники.

A 0114+650

Рентгеновский пульсар А 0114+650 является одним из самых долгопериодических аккрецирующих пульсаров. Для исследования источника использовались данные с января по июль 2003 г. (52653 – 52835 MJD). В наблюдениях, полученных с 52653 по 52655 MJD источник не регистрировался, верхний (1 σ) предел на поток от него в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ составил 1 мКраб. В остальное время среднее значение потока в том же диапазоне энергий было равным ~ 8 мКраб. По этим наблюдениям был восстановлен средний спектр пульсара. Детектором JEM-X источник не регистрировался, поэтому нам удалось восстановить спектр только в жестком рентгеновском диапазоне энергий. Спектр пульсара является типичным для объектов этого класса и в мягком рентгеновском диапазоне описывается степенным законом с завалом на высоких энергиях со следующими значениями параметров: $\alpha \sim 1.3$, $E_{cut} \sim 8$ кэВ, $E_{fold} \sim 20$ кэВ (Холл и др. 2000). Из-за малой экспозиции источника телескопом IBIS, нам не удалось аппроксимировать полученный спектр моделями (5) или (6), поэтому он был аппроксимирован простым степенным законом с наклоном 2.3±0.4.

4U0115+63

Рентгеновский пульсар 4U 0115+63 наблюдался обсерваторией ИНТЕГРАЛ во время очередной мощной вспышки излучения в сентябре-октябре 2004 г. Общая время наблюдения источника составило порядка 100 кс. В спектре значимо зарегистрировано 4 гармоники циклотронного поглощения, расположенные практически эквидистантно. Более подробно результаты анализа излучения пульсара описаны в главе 6 настоящей диссертации.

SMC X-1 (4U 0115-73)

В поле зрения монитора JEM-X и телескопа IBIS источник SMC X-1 попадал во время наблюдений области Малого Магелланова Облака с 24 по 27 июля 2003 г (52843 – 52846 MJD).

При спектральном анализе нами использовалась стандартная модель (5).

При аппроксимации спектра указанной моделью были получены параметры, приведенные в Таблице 7.2. В работе Муна и др. (2003) было показано постоянство параметров спектра в зависимости от вспышечной активности источника, что также подтверждается их согласием с параметрами, полученными нами. Можно, однако, отметить несколько более высокое значение энергии завала в спектре источника, полученное по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ. Также в рамках спектрального анализа нами был получен верхний предел на наличие линии резонансного циклотронного поглощения в спектре источника методом, описанным в разделе Анализ данных. Такой особенности со значимостью выше $\sim 1\sigma$ найдено не было.

RXJ0146.9+6121

Для исследования источника RX J0146.9+6121 использовались открытые наблюдения обсерватории ИНТЕГРАЛ, покрывающие период времени с 52636 MJD по 53018 MJD. Из-за низкой величины потока от источника (в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ он составил ~ 3 мКраб) в указанный промежуток времени монитором JEM-X пульсар зарегистрирован не был. Ввиду слабости источника для аппроксимации его спектра мы использовали простой степенной закон, получив следующее значение фотонного индекса $\alpha = 2.9^{+1.1}_{-0.8}$. Следует отметить, что до настоящего времени спектр источника в жестком рентгеновском диапазоне не исследовался.

V0332+53

В рамках сканирования Галактической плоскости обсерваторией ИНТЕ-ГРАЛ научными приборами миссии была зарегистрирована мощная вспышка рентгеновского излучения от источника V 0332+53, начавшаяся в самом конце 2004 года (Свонк и др. 2004). В главе анализируются данные наблюдений, проведенных обсерваторией ИНТЕГРАЛ с 6 по 24 января 2005 года (53376 – 53394 MJD).

Аппроксимирующая модель была выбрана на основании результатов предыдущих исследований и состояла из степенного закона с поглощением на низких энергиях (значение плотности водорода на луче зрения было взято из работы Макишима и др. 1990), завалом на высоких энергиях и трех резонансных линий циклотронного поглощения ($E_{cycl1} = 24.25$ кэВ, $E_{cycl2} = 46.8$ кэВ, $E_{cycl3} = 67.9$ кэВ). При уменьшении рентгеновской светимости пульсара было обнаружено изменение формы спектра его излучения. Так, при снижении средней светимости источника в диапазоне энергий 3 – 100 кэВ с 14.9×10^{37} до 5.2×10^{37} эрг с⁻¹ фотонный индекс в используемой модели несколько уменьшился (с 0.76 ± 0.03 до 0.59 ± 0.03), однако параметры завала в пределах ошибки остались прежними. Кроме того, найдена линейная зависимость энергии циклотронной частоты от светимости (более подробно результаты описаны в главе 5).

LMC X-4 (4U 0532-664)

Рентгеновский пульсар LMC X-4 наблюдался обсерваторией ИНТЕГРАЛ в январе 2003 г. в рамках Общей программы миссии. Общая экспозиция составила более миллиона секунд по обоим приборам обсерватории (IBIS и JEM-X). Данные наблюдения охватили практически весь суперорбитальный период (~ 30.5 дней), связанный с прецессией аккреционного диска.

Вне зависимости от состояния, в котором находился исследуемый объект, спектр его излучения в пределах ошибки оставался постоянным, хотя значения всех основных параметров оказываются несколько ниже, чем по результатам других авторов (см., например, Ла Барбера и др., 2001). Более подробно исследование спектральных свойств пульсара LMC X-4 по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ проведено в главе 3 (Цыганков, Лутовинов, 2005а).

A 0535+260

Пульсар А 0535+260 является транзиентным источником. По данным обсерватории ИНТЕГРАЛ 26 октября 2003 г. (52938 MJD) от него было зарегистрировано увеличение потока до ~ 10 мКраб в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ по сравнению с верхним пределом в ~ 2 мКраб во время предыдущих наблюдений 28 октября 2003 г. (52940 MJD) поток достиг величины ~ 40 мКраб в том же диапазоне энергий. Дальнейшие наблюдения источника были прерваны из-за вспышечной активности Солнца. Вследствие малой экспозиции пульсара телескопом IBIS во время вспышки, мы построили средний спектр по всем наблюдениям за этот промежуток времени. Монитором JEM-X источник не регистрировался.

Из предыдущих работ следует, что спектр пульсара является одним из самых жестких и может простираться вплоть до ~200 кэВ (Маисак и др. 1997). Обсерваторией ИНТЕГРАЛ источник значимо регистрируется до 50 кэВ, что может быть объяснено малой экспозицией. Полученный спектр аппроксимировался степенным законом с наклоном 2.81 ± 0.38 , при этом величина приведенного $\chi^2 = 0.6(5)$. В работе Кензиора и др. (1994) спектр источника в диапазоне энергий 3-200 кэВ аппроксимировался моделью (5) со следующими значениями параметров: $\alpha \sim 1.2$, $E_{cut} \sim 24$ кэВ, $E_{fold} \sim 20$ кэВ. Мы также аппроксимировали спектр моделью (5), зафиксировав значение фотонного индекса и энергии слома спектра, полученное значение параметра завала спектра оказалось в 1.5 раз меньше, чем значение, приведенное в упомянутой выше работе. Для этой модели значение приведенного $\chi^2 = 0.07(5)$.

Vela X-1 (4U 0900-403)

Пульсар Vela X-1 регулярно попадал в поле зрения приборов во время обзора Галактической плоскости и во время наблюдений области около источника в рамках Основной программы. Предварительные результаты исследования источника по данным обсерватории представлены в статье Кречмара и др. (2004). В данной работе использовались наблюдения с января 2003 г. по июль 2003 г. (52644 – 52832 MJD). Поток от пульсара сильно переменен и подвержен орбитальным модуляциям. В фазе рентгеновского затмения от пульсара значимо регистрировался поток ~ 7 мКраб (подобно тому, как это наблюдалось обсерваторией ГРАНАТ, Лутовинов и др. 2000), а в максимуме он достигал величины



Рис. 7.1. Энергетические спектры излучения рентгеновских пульсаров, полученные по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ. Сплошные линии – результаты наилучшей аппроксимации спектра выбранной моделью. Ошибки даны на уровне одного стандартного отклонения.

700 мКраб в диапазоне энергий 18 - 60 кэВ. Были построены спектры пульсара для фазы затмения и различных значений потока. Источник не регистрировался прибором JEM-X во время затмений, поэтому нам удалось построить его спектр в эти моменты только в жестком диапазоне энергий. Мы аппроксимировали его простым степенным законом с наклоном 3.1 ± 0.3 .

Анализ спектров вне фазы затмения не выявил заметных различий в их форме, поэтому мы приводим средний спектр пульсара. У источника были зарегистрирована циклотронная линия на ~ 24 кэВ и ее гармоника на ~ 50 кэВ (Таблица 7.3), что находится в согласии с результатами, полученными ранее (см., например, Кобурн и др. 2002). Также в районе энергий 6 – 7 кэВ наблюдается ярко выраженная особенность, которая может быть описана моделью эмиссионной линии железа. Однако, принимая во внимание особенности матрицы отклика монитора JEM-X (см. выше), мы относимся к такой интерпретации очень осторожно.

Cen X-3 (3U 1118-60)

При анализе спектра пульсара использовались наведения с января 2003 г. по июль 2003 г. (52668 – 52832 MJD), полученные как во время сканирования Галактической плоскости, так и в рамках Общей программы. Используя известные орбитальные параметры системы (Бурдери и др. 2000), мы определили орбитальные фазы для наших наблюдений и исследовали излучение источника во время рентгеновского затмения и вне его. Во время затмения источник не регистрировался, верхний 1 σ предел на поток составил 2.5 мКраб в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ. Вне фазы затмения средний поток от пульсара составил ~ 17 мКраб в том же диапазоне энергий. На этом фоне было зарегистрировано несколько вспышек, поток во время которых достигал ~ 90 мКраб.

Был построен спектр излучения пульсара, усредненный по всем вспышкам, и средний спектр для спокойного состояния источника вне фазы затмения. Исследование показало, что во время вспышек спектр становится более мягким: фотонный индекс увеличивается с 0.87 до 1.16 (оба спектра приведены на рис. 7.1). При аппроксимации спектров были сделаны попытки ввести в модель компоненту, описывающую эмиссионную линию железа. В связи с упомянутыми выше трудностями при восстановлении спектров по данным монитора JEM-X корректно этого сделать не удалось, поэтому мы описывали спектр источника в стандартном рентгеновском диапазоне простым степенным законом. В остальном наши параметры модели наилучшей аппроксимации спектра (Таблица 7.2) находятся в хорошем согласии с величинами, полученными в работах Бурдери и др. (2000) и Ла Барбера и др. (2004).

4U 1145-619, 1E 1145.1-614

При анализе излучения пульсара 4U 1145-619 Вайт и др. (1978) обнаружили от него пульсации на двух близких частотах. Эта загадка была разрешена по данным обсерватории "Эйнштейн", приборы которой обнаружили второй источник, 1E 1145.1-614, менее чем в 20' от первого (Лэмб и др. 1980).

Пульсар 4U 1145-619 – транзиент, от него наблюдаются регулярные вспышки продолжительностью ~ 10 дней с интервалом ~ 186.5 дней; предполагается, что это и есть орбитальный период в системе. В конце мая 2003 года (52788 MJD) обсерваторией ИНТЕГРАЛ от него была зарегистрирована вспышка, средний поток во время которой в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ составил ~ 26 мКраб. Мы использовали доступные нам в этом временном интервале данные для построения среднего спектра пульсара. В остальное время верхний предел (1 σ) на поток от пульсара составил 4 мКраб в том же диапазоне энергий.

Изучение пульсара 1Е 1145.1-614 сильно затруднено близостью его близне-

ца, который в период вспышек становится намного ярче, а стандартные коллиматорные рентгеновские инструменты не позволяют наблюдать эти источники раздельно. Более детальное исследование пульсара после его открытия удалось осуществить лишь несколько лет спустя по данным телескопа АРТ-П (Гребенев и др. 1992) и данным обсерватории RXTE, когда его близнец находился в спокойном состоянии (Рэй, Чакрабарти, 2002). В нашей работе для исследования источника 1Е 1145.1-614 использовались наблюдения с марта 2003 г. по сентябрь 2004 г. (52710 – 53276 MJD). В это время поток от него был постоянным и имел среднее значение ~ 20 мКраб, за исключением следующих моментов времени: 52795 MJD, когда поток от пульсара увеличился до ~100 мКраб; 53196 MJD, когда источник вспыхнул вновь (Бодаги и др. 2004); и момента вспышки пульсара 4U 1145-619, когда средний поток от пульсара 1E 1145.1-614 поднялся до 40 мКраб, однако явных корреляций роста потока между обоими источниками обнаружено не было, поэтому мы сделали вывод, что эти события независимы. Мы построили спектры источника во время и вне этих вспышек. В поле зрения монитора JEM-Х источник во время вспышек не попадал, и вне их, за исключением периода вспышки источника 4U 1145-619, прибором не регистрировался. Явных отличий в форме спектра 1Е 1145.1-614 обнаружено не было, поэтому мы приводим здесь средний спектр для всех наблюдений. Полученные параметры модели наилучшей аппроксимации среднего спектра источника 1Е 1145.1-614 находятся в хорошем согласии со значениями, приведенными в статье Рэя, Чакрабарти (2002), исследовавших спектр источника по данным обсерватории RXTE, за исключением фотонного индекса, который оказался несколько меньше. Величина параметра N_H была зафиксирована на значении, приведенном в упомянутой выше работе.

Во время вспышек в 1984 и 1985 годах у пульсара 4U 1145-619 среднее значение фотонного индекса равнялось 1, поглощение на низких энергиях менялось от 26×10^{22} см⁻² до 3.1×10^{22} см⁻², энергия слома оставалась постоянной ~6 кэВ, а параметр завала спектра возрос с ~12 кэВ во время вспышки в 1984 году до ~17 кэВ во время вспышки в 1985 году (Кук, Варвик, 1987). Наш анализ показал, что спектр пульсара стал более мягким, $\alpha = 1.5 \pm 0.1$, а параметр завала спектра увеличился до 30 ± 4 кэВ. Чувствительности детектора JEM-X не хватает для определения величины поглощения на низких энергиях, а ее разброс не позволяет зафиксировать ее на каком-либо значении, поэтому при аппроксимации мы не вводили эту компоненту в стандартную модель.

GX 301-2 (3A 1223-624)

Для исследования источника нами использовались открытые данные обсерватории ИНТЕГРАЛ, которые охватывают наблюдения, проводившиеся с января по июль 2003 г. За указанный промежуток времени телескопом IBIS было совершено около 250 наведений на исследуемый объект, в которые попали два момента, близких к прохождению нейтронной звездой периастра. В соответствие с этим все полученные данные были условно разделены на "низкое" и "высокое" (момент прохождения периастра) состояния. Для "высокого" состояния в нашем распоряжении имеется около десятка наведений телескопа IBIS (в рассмотре-



Рис. 7.1 (продолжение)

ние брались наведения, для которых орбитальная фаза находится в диапазоне от 0.87 до 0.92), а для "низкого" состояния удалось восстановить широкополосный спектр, используя также 23 наведения монитора JEM-X. Предварительный анализ по нескольким первым наведениям телескопа IBIS был сделан в работе Крейкенбома и др. (2004).

В главе 2 (Цыганков и др., 2004) было показано, что форма спектра излучения источника, а также его жесткость подвержены хаотическим вариациям на масштабе времени порядка нескольких тысяч секунд. В настоящей главе нам не удалось исследовать эти вариации по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ из-за отсутствия данных монитора JEM-X в "высоком" состоянии и недостаточной

130

статистики в "низком". При спектральном анализе "низкого" состояния пульсара GX 301-2 была значительно скорректирована аппроксимирующая модель (5): к степенному закону с завалом на высоких энергиях были добавлены поглощение на низких энергиях (многими авторами отмечается значительная величина поверхностной плотности водорода на луче зрения, сильно зависящую от орбитальной фазы объекта и достигающую $\sim 2 \times 10^{24}$ атом см⁻², Эндо и др. 2002), линия железа и резонансная линия циклотронного поглощения. Последняя особенность, о существовании которой упоминалось различными авторами (см., например, Орландини и др. 2000, Кобурн и др. 2002), имеет значимость выше 3σ и существенно улучшает качество аппроксимации. В нашем случае для "низкого" состояния (средний поток от источника составил 1.9×10^{-9} эрг см⁻² с⁻¹ в диапазоне энергий 3-100 кэВ) было получено значение энергии линии циклотронного поглощение $E_{cyc} = 47.4 \pm 1.9$ кэВ, наиболее близкое к указанному в работе Орландини и др. (2000) (ширина линии была зафиксирована на значении, взятом из этой работы). В пределах ошибки наши результаты хорошо согласуются и с результатами других авторов.

Как уже упоминалось выше, для "высокого" состояния в нашем распоряжении имелись данные только телескопа IBIS. Несмотря на это, качество спектра позволило нам зарегистрировать значимое изменение фотонного индекса, который несколько увеличился по сравнению с "низким" состоянием (Табл. 7.2), однако был несколько ниже, чем в работе Боркуса и др. (1998), при хорошем согласии остальных параметров модели. При фиксировании этого параметра на значении 0.3, полученном в "низком" состоянии, качество аппроксимации резко ухудшается. В данном случае к стандартной модели (5) была также добавлена циклотронная линия резонансного поглощения на энергии ~ 49 кэВ, значимость присутствия которой составила около 2σ (Табл. 7.3).

4U 1538-522

Пульсар 4U 1538-522 является постоянным источником. За время наших наблюдений с февраля 2003 г. по сентябрь 2004 г. (52671 – 53260 MJD) средний поток от него в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ составил ~ 15 мКраб. Был построен средний спектр пульсара по всем доступным нам данным в диапазоне 4 – 80 кэВ. Полученные параметры модели наилучшей аппроксимации спектра хорошо согласуются со значениями, приведенными в статье Робба и др. (2001) (значение параметра N_H взято из этой же статьи), в которой спектр пульсара исследовался по данным обсерватории ВерроSAX.

4U 1626-67

Для исследования пульсара 4U 1626-67 использовались наблюдения с марта 2003 г. по октябрь 2003 г. (52699 – 52915 MJD), полученные в рамках сканирования Галактической плоскости и глубокого обзора центра Галактики. Кривая блеска источника не выявила значимых изменений потока, средняя величина которого составила ~ 12 мКраб в диапазоне энергий 18 - 60 кэВ, поэтому был построен средний спектр пульсара. Ввиду того, что источник находится далеко от плоскости Галактики (b = -13.1), в поле зрения монитора JEM-X он не попадал, что не позволило нам восстановить его спектр в мягком рентгеновском



Рис. 7.1 (продолжение)

диапазоне энергий. Предварительные результаты анализа пульсара по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ были представлены в работе Денис и др. (2004), в которой спектр источника описывался простым степенным законом с наклоном 3.4. В нашей работе экспозиция доступных наблюдений в 10 раз больше, поэтому нам удалось аппроксимировать спектр стандартной моделью (5), зафиксировав значение фотонного индекса на величине, указанной в статье Орландини и др. (1998), в которой спектр пульсара исследовался в широком диапазоне энергий (0.1 – 100 кэВ). Полученные нами значения параметров E_{cut} и E_{fold} находятся в хорошем согласии с величинами, приведенными в той же статье.

OAO 1657-415

Интенсивность пульсара ОАО 1657-415 подвержена сильным орбитальным модуляциям и колеблется от нескольких мКраб (в фазе рентгеновского затмения) до 100-150 мКраб в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ. Исследование спектра источника на разных орбитальных фазах (параметры орбиты системы брались из работы Байкала, 2000) не выявило заметных отличий его формы, поэтому был построен усредненный спектр по всем имеющимся данным с марта 2003 г. по апрель 2004 г. (52699 – 53097 MJD). Спектр пульсара является одним из самых жестких спектров рентгеновских пульсаров в двойных системах, простираясь вплоть до 100 кэВ (см. Табл. 7.2 и рис. 7.1), а на низких энергиях наблюдается сильное поглощение с $N_H \sim 10^{23}$ см⁻². Подробное исследование пульсара по данным обсерваторий ИНТЕГРАЛ и RXTE будет сделано в отдельной статье.

EXO 1722-363

Поток от пульсар EXO 1722-363 подвержен орбитальным модуляциям (Марквард, Свонк 2003, Лутовинов и др. 2004б) и за время наших наблюдений с марта 2003 г. по апрель 2004 г. (52698 – 53097 MJD) менялся от нескольких мКраб до 50 мКраб в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ. В работах Лутовинова и др. (2004б,в) по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ улучшена точность локализации объекта и показано, что форма жесткой части спектра пульсара остается постоянной, несмотря на сильную переменность потока, в то время как форма мягкой части спектра, исследованная по данным обсерватории RXTE, сильно зависит от орбитальной фазы системы, и величина фотопоглощения может достигать значения $N_H \simeq 10^{24}$ см⁻².

Нам не удалось восстановить спектр источника по данным монитора JEM-X, т. к. он попадал в его поле зрения только во время состояний с низким значением потока. Проведенный анализ показал, что пульсар значимо регистрируется до ~ 60 кэB, и его спектр в жестком рентгеновском диапазоне можно описать либо степенным законом с наклоном 3.5, либо моделью (6), из которой следует, что характерная энергия завала спектра ~ 15 кэB. Однако обе модели описывают спектр источника достаточно плохо и необходимы дополнительные исследования в широком диапазоне энергий для уточнения его параметров.

GX 1+4 (4U 1728-247)

Для анализа спектра излучения рентгеновского пульсара GX 1+4 мы воспользовались открытыми на данный момент данными, покрывающими промежуток времени с конца февраля до конца сентября 2003 года. Суммарная экспозиция для телескопа IBIS составила порядка 2400 ксек, в поле зрения монитора JEM-X источник попадал гораздо реже.

В рамках нашего исследования было показано, что спектральные характеристики излучения пульсара зависят от потока от него. При построении средних спектров исследуемого объекта нами учитывалась интенсивность излучения пульсара в том промежутке времени, где проводилось усреднение, в связи с чем на кривой блеска было выделено 3 участка (52698-52700 MJD, 52710-52753 MJD и 52874-52910 MJD) со средними потоками от источника в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ ~ 130, ~ 11 и ~ 6 мКраб, соответственно. В последнем случае ("низ-

ком") наиболее адекватно спектр источника аппроксимировался простым степенным законом. Несмотря на значительные погрешности, из Таблицы 7.2 видно, что с уменьшением интенсивности излучения от исследуемого объекта его спектр становится несколько мягче, что подтверждается исследованиями других авторов (Поль и др. 1995).

XTE J1807-294

Данный источник формально не является аккрецирующим рентгеновским пульсаром и относится к классу миллисекундных пульсаров. В работе Кампана и др. (2003) показано, что наилучшим образом спектр излучения источника в области низких энергий по данным обсерватории XMM-Newton описывается комбинацией моделей поглощенного черного тела и комптонизации или степенного закона без присутствия поглощения или эмиссионных линий.

Из-за своей транзиентной природы исследуемый пульсар значимо регистрировался телескопом IBIS только в период между 20 февраля и 1 мая 2003 г. (52690 – 52760 MJD)(Фаланга и др. 2005), не регистрируясь при этом монитором JEM-X. Следует отметить, что этот источник является единственным миллисекундным пульсаром в нашей выборке, что обуславливает особое внимание при выборе аппроксимирующей модели. При исследовании спектральных свойств излучения пульсара нами использовались модели (5), (6) и простой степенной закон, причем в случае составных моделей показатель степенного закона был зафиксирован на значении, взятом из работы Кампана и др. (2003). Основываясь на $\Delta \chi^2$ статистике было установлено, что наилучшим образом экспериментальным данным отвечает модель (5) с параметрами, приведенными в Таблице 7.2. Столь высокие значения $E_{cut} \sim 48$ кэВ и $E_{fold} \sim 76$ кэВ не являются редкостью для вспыхивающих миллисекундных пульсаров (см., например, Хейндл, Смит 1998).

AX J1820.5-1434

Пульсар АХ J1820.5-1434 был открыт в 1997 г. во время сканирования Галактической плоскости обсерваторией ASCA (Кинугаса и др. 1998), в этой же работе был исследован спектр источника в мягком рентгеновском диапазоне энергий. Обсерватория ИНТЕГРАЛ впервые зарегистрировала источник в жестком рентгеновском диапазоне (Лутовинов и др. 20036). Имеющиеся наблюдения можно условно разбить на 2 группы: с марта 2003 г. по апрель 2003 г. (52699 – 52759 MJD), во время которых поток от источника заметно не менялся и составлял ~ 8 мКраб в диапазоне энергий 18 – 60 к
эВ, и с сентября 2003 г. по октябрь 2003 г. (52909 – 52929 MJD), когда источник значимо не регистрировался прибором, а верхний 1 σ предел на поток составил 0.3 мКраб в том же диапазоне энергий. Мы построили средний спектр по всем данным, когда источник регистрировался, при его аппроксимации использовалась модель (5), причем фотонный индекс был зафиксирован на значении 0.9, приведенном в работе Кинугаса и др. (1998). Из рис. 7.1 видно, что пульсар значимо регистрируется вплоть до ~ 70 кэВ.



Рис. 7.1 (продолжение)

AXJ1841.0-0535

Пульсар АХ J1841.0-0535, открытый обсерваторией ASCA (Бамба и др. 2001), был зарегистрирован во время наблюдений области спирального рукава в созвездии Стрельца обсерваторией ИНТЕГРАЛ весной 2003 года. Ввиду того, что при предварительном анализе его положение несколько отличалось от положения, измеренного обсерваторией ASCA, он был назван новым источником IGR J18406-0539 (Мольков и др. 2004а). В октябре 2004 года из этой же области неба была зарегистрирована очередная вспышка излучения, которая, как и в прошлый раз, сначала была приписана новому источнику IGR J18410-0535 (Родригез и др. 2004), но позже было показано, что наблюдался тот же источ-

ник что и в 2003 г. (Халпен и др. 2004).

Более детальный анализ показал, что весной 2003 года источник значимо регистрировался лишь в двух наблюдениях, поток во время которых достигал ~ 40 мКраб в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ. Также было зарегистрировано увеличение потока от источника до ~ 10 мКраб в том же диапазоне энергий в октябре 2003 года. В остальное время верхний 1σ предел на поток от пульсара составил 1 мКраб (18-60 кэВ). В нашей работе впервые получен спектр источника в жестком рентгеновском диапазоне, усредненный за все время высокого состояния. Из-за малой статистики данных мы аппроксимировали спектр простым степенным законом с наклоном 2.2 ± 0.3 .

GS 1843+009

Средний спектр транзиентного пульсара GS 1843+009 в жестком диапазоне энергий (20-100 кэВ) был построен по данным, полученным в начале мая 2003 года (52759 – 52760 MJD), когда от источника была зарегистрирована вспышка излучения (Черепащук и др. 2003) и средний поток от него во время вспышки составил ~ 7 мКраб в диапазоне энергий 18 - 60 кэВ. Детекторами рентгеновского монитора JEM-Х исследуемый пульсар не регистрировался.

По причине отсутствия данных в более мягкой части спектра при его описании моделью (5) нами были зафиксированы следующие параметры, полученные по данным обсерватории ВерроSAX в широком диапазоне энергий во время вспышки излучения от источника в апреле 1997 г.: $\alpha = 0.34, E_{cut} = 5.95$ кэВ (Пирайно и др. 2000). Полученное значение параметра завала $E_{fold} = 17.4 \pm 1.4$ кэВ находится в хорошем согласии с результатом, приведенном в работе Пирайно и др. (2000). Данный результат может говорить о постоянстве формы спектра излучения источника вне зависимости от его светимости.

A 1845-024

В статье Соффитта и др. (1998) пульсар А 1845-024 был идентифицирован с источниками GS 1843-02 и GRO J1849-03. Для исследования его спектра мы использовали открытые наблюдения с марта 2003 г. по октябрь 2003 г. (52699 – 52930 MJD). За этот период от пульсара была зарегистрирована одна вспышка, поток во время которой достиг ~ 7 мКраб в диапазоне энергий 18-60 кэВ, вспышка началась ~ 52728 MJD и длилась ~ 40 дней. Для этого периода времени был построен средний спектр пульсара по данным детектора ISGRI, прибором JEM-Х источник не регистрировался. В остальное время верхний 1σ предел на поток от источника составил 0.4 мКраб в том же диапазоне энергий. Спектр пульсара в диапазоне энергий 18 – 90 кэВ аппроксимируется простым степенным законом с фотонным индексом $\alpha = 2.62 \pm 0.19$, что согласуется с результатом, полученным в работе Занга и др. (1996), в которой использовались данные обсерватории ComptonGRO.

XTE J1855-026

Для пульсара XTE J1855-026 нам удалось построить широкополосный спектр в диапазоне энергий 4 – 100 кэВ, используя для этой цели усредненные за 9 ксек данные монитора JEM-X, полученные 18 октября 2003 г., и усредненные по всем имеющимся у нас наблюдениям (март 2003 г. – апрель 2004 г.) данные

телескопа IBIS.

Для аппроксимации данных обсерватории ИНТЕГРАЛ использовалась модель (5); из-за низкой величины потока от источника (2.68×10^{-10} эрг см⁻² с⁻¹ в диапазоне энергий 3 – 100 кэВ) качество спектра в мягкой области (< 20 кэВ) не позволило обнаружить линию железа и поглощение на низких энергиях. Следует отметить, что существует некоторое расхождение в значениях параметров аппроксимирующей спектральной модели между нашими результатами и результатами, приведенными в работе Корбета и др. (1999) – по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ спектр оказывается несколько мягче, а характерные энергии завала на высоких энергиях имеют значение примерно на 10 кэВ больше.

XTE J1858+034

Пульсар XTE J1858+034 является транзиентным источником, который был открыт во время вспышки в 1998 году обсерваторией RXTE (Ремилард и др. 1998). Во время наблюдений обсерваторией ИНТЕГРАЛ спирального рукава в созвездии Стрельца (53116 – 53128 MJD) от источника была зарегистрирована новая вспышка, во время которой была улучшена точность его локализации (Мольков и др. 2004б). В период 53116 – 53119 MJD средний поток от источника был равен ~ 6 мКраб диапазоне 18 - 60 кэВ, в дальнейшем он нарастал и к 53128 MJD достиг ~ 83 мКраб в том же диапазоне энергий. Дальнейшее поведение источника, в связи с отсутствием данных обсерватории ИНТЕГРАЛ, было проанализировано по кривой блеска, построенной по данным прибора ASM обсерватории RXTE в диапазоне энергий 1 - 12 кэВ. Из нее следует, что поток от пульсара больше не увеличивался, а продержался на этом уровне еще примерно 4 дня, после чего начал падать.

С целью поиска возможной зависимости формы спектра пульсара от его интенсивности мы построили средние спектры источника для указанных выше интервалов времени. Исследование показало, что форма спектра пульсара практически не зависит от фазы вспышки, поэтому мы приводим средний спектр за все время наблюдений. При его аппроксимации использовалась модель (5), модифицированная поглощением на низких энергиях. Мы получили следующие значения параметров: $N_H = (14.3 \pm 0.7) \times 10^{22}$ см⁻², $\alpha = 1.38 \pm 0.02$, $E_{cut} = 25.16 \pm 0.33$ кэВ, $E_{fold} = 7.92 \pm 0.22$ кэВ. В работе Поль, Рао (1998) спектр пульсара был исследован в диапазоне энергий 2 – 50 кэВ по данным обсерватории RXTE, однако им не удалось получить разумно ограниченные значения параметров модели наилучшей аппроксимации спектра. Таким образом, наши измерения являются первым надежным определением параметров спектра источника в широком диапазоне энергий.

4U 1907+097

Для построения спектра пульсара 4U 1907+097 использовались данные наблюдений с марта по май 2003 г. (52705 – 52762 MJD), находящиеся в открытом доступе. Средний поток от источника за этот промежуток времени составил ~ 20 мКраб в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ; однако наблюдались эпизоды длительностью ~ 1 день, когда поток падал в 2 раза, а также была зарегистрирована одна вспышка, во время которой поток увеличился в 2 раза по сравнению со средней



Рис. 7.1 (продолжение)

величиной.

В работе Робертса и др. (2001) спектр источника подробно исследовался в мягком рентгеновском диапазоне по данным обсерватории ASCA, которые аппроксимировались простым степенным законом с поглощением на низких энергиях, и по данным обсерватории RXTE в диапазоне 2.5 - 20 кэВ с использованием модели (6) при их аппроксимации. Данный анализ показал, что параметры модели наилучшей аппроксимации спектра пульсара меняются незначительно с изменением потока, за исключением величины поглощения, которая на протяжении всего орбитального цикла меняется от ~ 2×10^{22} см⁻² до ~ 8×10^{22} см⁻².

Мы построили средний спектр источника по всем доступным наблюдениям и аппроксимировали его моделью (5). Полученное нами значение фотонного индекса находится в согласии с величинами, приведенными в работах Робертса и др. (2001) и Кусумано и др. (1998) (в этой работе спектр источника исследовался в широком диапазоне энергий по данным обсерватории ВерроSAX и аппроксимировался моделью (5)). А величина характерной энергии завала спектра оказался в 1.7 раз меньше, чем значения, приведенные в этих работах.

В работе Кусумано и др. (1998) в спектре пульсара была зарегистрирована циклотронная линия на 19 кэВ и ее гармоника. Наш анализ таких особенностей в спектре источника не обнаружил.

KS 1947+300

В поле зрения телескопа IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ транзиентный рентгеновский пульсар KS 1947+300 с декабря 2002 г. по апрель 2004 г. попадал около 700 раз, при этом общая экспозиция составила около 1.5 миллиона секунд. Благодаря своей вспышечной активности на кривой блеска источника можно выделить несколько различных по интенсивности состояний, для которых проводились самостоятельные спектральные исследования по данным обсерваторий ИНТЕГРАЛ и RXTE, описанные в главе 4 (Цыганков, Лутовинов, 20056).

Здесь мы приводим спектр источника (рис. 7.1), полученный обсерваторией ИНТЕГРАЛ 7 апреля 2004 г., когда он был значимо зарегистрирован как телескопом IBIS, так и монитором JEM-X, а также параметры его наилучшей аппроксимации (Табл. 7.2).

EXO 2030+375

Результаты анализа наблюдений транзиентного пульсара EXO 2030+375 обсерваторией ИНТЕГРАЛ до 52650 MJD представлены в нескольких статьях (см. например, Кузнецов и др. 2004, Камеро Арранз и др. 2004 и ссылки там). За период с 52650 MJD по 52838 MJD от источника было зарегистрировано 3 вспышки (52717 MJD, 52761 MJD, 52805 MJD), во время которых поток в диапазоне энергий 18 – 60 кэВ достигал ~ 80 мКраб. В остальное время верхний 1σ предел на поток составил 2 мКраба в том же диапазоне энергий. Из-за малого количества данных нам не удалось проанализировать спектры для каждой вспышки отдельно, поэтому был построен средний спектр для всех вспышек. Наши параметры наилучшей аппроксимации моделью (5) находятся в согласии со значениями, приведенными в статях Кузнецова и др. (2004) и Рейнолдса и др. (1993а) для жесткого и мягкого диапазонов энергий, соответственно.

7.5 Заключение

В данной главе представлен каталог спектров 35 аккрецирующих рентгеновских пульсаров и одного миллисекундного, которые наблюдались обсерваторией ИНТЕГРАЛ и значимо регистрировались ее приборами в период с 52629 по 53276 MJD. Для 18 источников из 36 удалось восстановить широкополосный спектр. Среди исследуемых источников присутствуют один миллисекундный пульсар XTE J1807-294 и 7 недавно открытых рентгеновских пульсаров: 2RXP J130159.6-635806, IGR/AX J16320-4751, IGR J16358-4726, AX J163904-4642, IGR J16465-4507, SAX/IGR J18027-2017, AX J1841.0-0535. Для пульсаров A 0114+650, RX J0146.9+6121, AX J1820.5-1434 и AX J1841.0-0535 впервые получены спектры в жестком рентгеновском диапазоне.

Для переменных источников проанализирована зависимость формы спектра от потока. Например, спектр пульсара GX 1+4 с увеличением интенсивности источника становится более жестким. Так же проведено сравнение полученных значений параметров моделей наилучшей аппроксимации с результатами предыдущих исследований, обсуждена их эволюция.

Для пульсара Vela X-1 был впервые получен спектр жесткого излучения во время затмения источника оптическим компаньоном. Нам удалось восстановить его только в жестком диапазоне энергий, т. к. прибором JEM-X пульсар в это время не регистрировался. Спектр был описан простым степенным законом с наклоном 3.1.

В спектрах нескольких пульсаров были зарегистрированы циклотронные ли-

нии и их гармоники: у 4U 0352+309 – одна гармоника, у GX 301-2 – одна гармоника и в "низком" и в "высоком" состояниях, у Vela X-1 – две гармоники, у V 0332+53 – три гармоники, у 4U 0115+63 – четыре гармоники.

Название	Тип	P,c	Р _{огb} , дней	Тип	Ссылки
	системы			компаньона	
A 0114+650	HMXB	10008	11.6	B1 Ia	[1],[2],[3]
4U 0115+63	HMXB	3.6	24.3	B0.2Ve	[4],[5],[6]
SMC X-1	HMXB	0.71	3.89	B0	[7],[8],[9]
RX J0146.9+6121	HMXB	1408	-	B5IIIe	[10],[11]
V 0332+53	HMXB	4.4	34.25	O8-9Ve	[12],[13]
4U 0352+309	HMXB	837	-	Be(XPer)	[14]
LMC X-4	HMXB	13.5	1.4	07 III-V	[15],[16],[17]
A 0535+260	HMXB	103	111	O9.7 IIIe Be	[18],[19],[20]
Vela X-1	HMXB	283	8.96	B0.5Ib	[21],[22]
CEN X-3	HMXB	4.82	2.1	O6-8f	[23],[24]
4U 1145-619	HMXB	292	187	B1Vne	[25],[26]
1E 1145.1-6141	HMXB	297	14.365	B2Iae	[27],[28]
GX 301-2	HMXB	680	41.5	Be	[29],[30]
2RXP J130159.6-635806	HMXB?	704	-	-	[31]
4U 1538-52	HMXB	528	3.7	B0Iab	[32],[33]
4U 1626-67	LMXB	7.66	0.0289	low-mass dwarf	[34],[35]
IGR/AX J16320-4751	HMXB	1300	-	_	[36],[37]
IGR J16358-4726	HMXB	5980	-	_	[38],[39]
AX J163904-4642	HMXB	900	_	_	[40]
IGR J16465-4507	HMXB	228	-	_	[38]
OAO 1657-415	HMXB	37.7	10.4	B0-6Iab	[41],[42]
EXO 1722-363	HMXB	413	9.7	Be?	[43],[44]
GX 1+4	LMXB	115	303.8	M6III	[45],[46],[47]
SAX/IGR J18027-2017	HMXB	139	4.6	_	[48],[49]
XTE J1807-294	LMXB	0.00525	0.0278	_	[50],[51]
AX J1820.5-1434	HMXB	152.3	-	Be?	[52]
AX J1841.0-0535	HMXB	4.74	-	Ве	[53],[54]
GS 1843+009	HMXB	29.477	_	B0-B2 IV-Ve	[55],[56],[57]
A 1845-024	HMXB	94.8	242	_	[58],[59],[60]
XTE J1855-026	HMXB	360.741	6.067	_	[61],[62]
XTE J1858+034	HMXB	221	-	_	[63]
X 1901+031	-	2.763	-	_	[64],[65]
4U 1907+097	HMXB	438	8.38	BI	[66],[67],[68]
KS 1947+300	HMXB	18.7	40.415	B0Ve	[69],[70],[71],[72]
EXO 2030+375	HMXB	41.7	46	Ве	[73],[74]
SAX J2103.5+4545	HMXB	355	12.68	O-B	[75],[76]

Табл. 7.1. Список пульсаров

[1] Фаинли и др. 1992; [2] Крэмптон и др. 1985; [3] Рэйг и др. 1996; [4] Комински и др., 1978; [5] Раппапорт и др. 1978; [6] Негерела, Оказаки 2001; [7] Прайс и др. 1971; [8] Рейнолдс и др. 19936; [9] Левин и др. 1993; [10] Мерегетти и др. 2000; [11] Слеттебак 1985; [12] Стелла и др. 1985; [13] Негерела и др. 1999; [14] Вайт и др. 1976; [15] Сандалик и др. 1976; [16] Ли и др. 1978; [17] Келли и др. 1983а; [18] Росенберг и др. 1975; [19] Приедхорский и др. 1983; [20] Гиангранд и др. 1980; [21] ван Керквиджик и др. 1995; [22] Хилтнер и др. 1972; [23] Келли и др. 19836; [24] Крземинский 1974; [25] Варвик и др. 1985; [26] Стивенс и др. 1997; [27] Рэй и др. 2002; [28] Иловайский и др. 1982; [29] Сато и др. 1986; [30] Паркес и др. 1980; [31] Чернякова и др. 2005; [32] Кларк 2000; [33] Паркес и др. 1978; [34] Чакрабарти и др. 2001; [35] МакКлинток и др. 1977; [36] Лутовинов и др. 2005б; [37] Родригес и др. 2003; [38] Лутовинов и др. 2005в; [39] Пател и др. 2003; [40] Волтер и др. 2004 [41] Чакрабарти и др. 1993; [42] Чакрабарти и др. 2002; [43] Марквард, Свонк 2003; [44] Лутовинов и др. 20046; [45] Льюин и др. 1971; [46] Перейра и др. 1999; [47] Шарма и др. 1993; [48] Аугелло и др. 2003; [49] Лутовинов и др. 2005а; [50] Марквард и др. 2003; [52] Кирш и др. 2004; [52] Кинугаса и др. 1998; [53] Бамба и др. 2001; [54] Халпен и др. 2004; [55] Кояма и др. 1990а; [56] Исраел и др. 2001; [57] Пирайно и др. 2000; [58] Кояма и др. 19906; [59] Занг и др. 1996; [60] Фингер и др. 1999; [61] Корбет и др. 1999; [62] Корбет и др. 2002; [63] Такешима и др. 1998; [64] Форман и др. 1976; [65] Галловей и др. 2003; [66] Маршал и др. 1980; [67] ван Керквиджик и др. 1989; [68] Ай 1986; [69] Бороздин и др. 1990; [70] Галловей и др. 2004; [71] Цыганков и др. 2005б; [72] Негерела и др. 2003; [73] Столберг и др. 1999; [74] Кое и др. 1988; [75] Байкал и др. 2000; [76] Филиппова и др. 2004.

	Экспози	ция, ксек	ксек Поток, 10 ⁻⁹ эрг см ⁻² с ⁻¹				1 0	1	
Название		IDIC	0.00 D	10 00 D	$N_H, 10^{22} \text{ cm}^{-2}$	Фотонный индекс,	E_{cut} ,кэВ	E_{fold} , кэВ	χ^2
1	JEM-X	IBIS	6-20 кэВ 4	18-60 кэВ 5	6	α 7	8	0	10
A 0114+650		40.4	- 4	0.09	-	2.3 ± 0.4	-	-	0.42(6)
4U 0115+63	75	100			_	$0.093^{+0.007}_{-0.001}$	8.93 ± 0.03	$9.06^{+0.09}_{-0.02}$	0.85 (155)
SMC X-1	70	104	1.05	0.76	_	1.48 ± 0.02	$20.5^{+1.0}_{-1.8}$	$12.9^{+0.6}_{-0.7}$	0.98(124)
RX J0146.9+6121	-	250	-	0.03	-	$2.9^{+1.1}_{-0.8}$	-	-	0.31(3)
V0332+53	178	187.4	17.87	6.22	4^{a}	0.77 ± 0.02	$24.3^{+0.5}_{-0.7}$	$14.0^{+0.5}_{-0.7}$	0.35(127)
$4U\ 0352+309$	_	50	-	0.56	—	$1.92 {\pm} 0.19$	50 ± 16	77 ± 27	0.36(9)
LMC X-4	93	176	0.79	0.78	—	0.2 ± 0.15	$9.1 {\pm} 0.8$	$11.0 {\pm} 0.6$	0.93(117)
A 0535+26	-	77	-	0.24	_	1.2 ^a	24 ^a	$13.8^{+4.5}_{-3.2}$	0.07(5)
Vela X-1(затмение)	-	203.6	-	0.1	_	$3.1 {\pm} 0.3$	_	-	0.83(7)
Vela X-1(вне затмения)	897.2	560	3.2	3.6	_	$0.88 {\pm} 0.01$	$25.5{\pm}0.2$	13.0 ± 0.1	0.34(131)
CEN X-3(спокойное состояние)	266.1	250	0.39	0.2	—	$0.87 {\pm} 0.06$	$16.4 {\pm} 0.6$	$7.1 {\pm} 0.2$	1.5(120)
CEN X-3(вспышки)	15	47	1.57	0.66	—	$1.16 {\pm} 0.04$	$15.3 {\pm} 0.2$	7.8 ± 0.2	1.4(116)
4U 1145-619	11	77.3	0.39	0.33	—	$1.5 {\pm} 0.1$	6.7 ± 1.4	$30{\pm}4$	1(142)
1E 1145.1-614	11	345.2	0.39	0.4	3.3 ^a	$1.08{\pm}0.07$	8±1	$21.9^{+1.8}_{-0.8}$	0.98(139)
GX 301-2 (высокое состояние)	-	31	-	6.04	—	$0.74\substack{+0.32 \\ -0.09}$	$23.3^{+0.3}_{-0.5}$	$8.3 {\pm} 0.7$	0.74(8)
GX 301-2 (низкое сосотяние)	62	710	0.96	0.99	$10.6 {\pm} 2.5$	$0.30{\pm}0.06$	$17.8 {\pm} 0.2$	$9.7{\pm}0.7$	0.9(118)
2RXP130159.6-635806	-	10.3	-	0.2 ^B	2.56 ^a	0.69 ^a	24.3 ± 3.4	$8.5^{+0.2}_{-0.1}$	Г
4U 1538-52	23	894.4	0.46	0.2	1.63 ^a	$1.37 {\pm} 0.06$	$28.7{\pm}0.8$	$9.9 {\pm} 0.7$	0.94(119)
4U 1626-67	-	218.2	-	0.15	_	0.87 ^a	$23.9^{+1.0}_{-1.4}$	7±1	1.25(5)
IGR/AX J16320-4752 ⁶	-	1000	-	0.2^{B}	18 ^a	$0.7{\pm}0.2$	-	13±1	Г
IGR J16358-4726 ⁶	_	1000	-	0.04^{B}	40 ^a	$0.7{\pm}0.5$	_	16 ± 5	Г
AX J163904-4642 ⁶	-	1000	-	0.06 ^B	58 ^a	$1.3{\pm}1.0$	_	11±1	Г
IGR J16465-4507 ⁶	—	1000	-	0.12^{B}	72 ^a	$1.0{\pm}0.5$	-	30 ^a	Г
OAO 1657-415	29	1663.7	0.8	1.03	$15.2^{+0.7}_{-1.4}$	$1.57 {\pm} 0.02$	$26.3^{+0.7}_{-1.8}$	$29.2^{+1.2}_{-0.5}$	0.73(119)

Табл. 7.2. Экспозиция наблюдений, потоки и параметры наилучшей аппроксимации спектров пульсаров

ЖЕСТКИЕ СПЕКТРЫ РЕНТГЕНОВСКИХ ПУЛЬСАРОВ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EXO 1722-363	-	2960.9	-	0.6	-	3.5 ^a	—	—	2.7(5)
GX 1+4 (низкое состояние)	9	2315	0.08	0.07	-	$2.24\substack{+0.06\\-0.12}$	-	-	0.93(126)
GX 1+4 (промежуточное состояние)	3.5	385	0.11	0.14	-	$1.54\substack{+0.35\\-0.22}$	$24.8^{+5.8}_{-3.0}$	$47.0^{+15.2}_{-10.7}$	1.16(125)
GX 1+4 (высокое состояние)	5	164	0.76	1.62	-	$0.93\substack{+0.12\\-0.14}$	$25.1^{+1.1}_{-1.7}$	30.4 ± 2.4	1.19(136)
IGR/SAX J18027-2017 ⁶	-	1274	_	0.06	-	0.1 ^a	-	~ 10	
XTE J1807-294	-	711	-	0.11	-	1.96 ^a	$48.1^{+7.6}_{-9.9}$	$75.7^{+58.1}_{-24.5}$	0.92(7)
AX J1820.5-1434	-	2322.3	_	0.1	-	0.9 ^a	25 ± 3	$17.0 {\pm} 2.7$	0.37(9)
AX J1841.0-0535	-	77.19	-	0.11	-	2.2 ± 0.3	—	—	0.42(5)
GS 1843+009	-	62	-	0.17	-	0.34 ^a	5.95 ^a	17.4 ± 1.4	1.2(8)
A 1845-024	-	691.8	-	0.06	-	$2.62 {\pm} 0.19$	-	-	0.46(7)
XTE J1855-026	9	652	0.16	0.17	-	$1.69 {\pm} 0.23$	$23.99\substack{+2.88\\-6.73}$	$38.49^{+10.35}_{-7.38}$	1.08(112)
XTE J1858+034	137	360	1.13	0.99	$14.3{\pm}0.7$	$1.38{\pm}0.02$	$25.16{\pm}0.33$	$7.92{\pm}0.22$	0.95(144)
X 1901+031	150	330	6.1	1.8	-	$2.035 {\pm} 0.015$	$11.27 {\pm} 0.19$	$13.22 {\pm} 0.11$	0.82(127)
4U 1907+097	180	478.3	0.6	0.18	-	$1.26 {\pm} 0.07$	$7.0 {\pm} 0.3$	$9.0^{+0.3}_{-0.6}$	0.75(131)
KS 1947+300	2	6	1.09	1.17	-	$1.07\substack{+0.24\\-0.13}$	$8.6^{+3.4}_{-1.2}$	$23.6^{+5.3}_{-2.3}$	1.18(104)
EXO 2030+375	2	25.3	0.84	0.85	-	$1.71 {\pm} 0.09$	$25.2^{+2.5}_{-3.7}$	33^{+6}_{-4}	1.06(137)
SAX J2103.5+4545	33	196.6	0.38	0.38	0.9 ^a	$1.04 {\pm} 0.15$	$8.5 {\pm} 2.4$	$21.37 {\pm} 2.75$	1.21(120)

^апараметр зафиксирован

б_{при} аппроксимации спектра использовалась модель cutoffpl

^вв диапазоне энергий 20 – 60 кэВ

^г в работе Лутовинова и др. (2005в) спектр пульсара аппроксимировался в широком диапазоне энергий совместно с данными других обсерваторий (см. текст)

Систомо	Houte	Ширица	MUTOUCUPUOCTI JUUUU	E (roB	<i>π</i> ,	σ i καΒ
Система	центр	ширина	ИНТЕНСИВНОСТЬ ЛИНИИ	E_{cycl} , KəD	rcycl	O_{cycl} , K9D
	линии Fe, кэВ	линии Fe, кэВ	Fe, ϕ otoh cm ⁻² c ⁻¹			
4U 0115+63 ^a	6.4 ⁶	0.2 ⁶	0.008 ± 0.001	$11.16^{+0.03}_{-0.02}$	0.97 ± 0.01	$3.13^{+0.07}_{-0.02}$
$V0332+53^{B}$	-	-	-	$24.25_{-0.14}^{+0.07}$	$1.98\substack{+0.02 \\ -0.04}$	7.10 ± 0.10
4U 0352+309	-	-	-	$28.8 {\pm} 2.5$	$0.33 {\pm} 0.12$	9б
Vela X-1 $^{\Gamma}$	$6.64 {\pm} 0.10$	$0.31 {\pm} 0.16$	$(4.7\pm0.8)\times10^{-3}$	$24.0{\pm}0.3$	$0.38{\pm}0.01$	$5.3{\pm}0.5$
GX 301-2 (high)	-	-	_	$49.2\substack{+4.2 \\ -2.1}$	$0.60\substack{+0.13 \\ -0.09}$	18 ⁶
GX 301-2 (low)	$6.54\substack{+0.17\\-0.11}$	$0.52\substack{+0.22 \\ -0.14}$	$(2.54 \pm 1.02) \times 10^{-3}$	$47.4^{+2.2}_{-1.1}$	$0.87 {\pm} 0.17$	18 ⁶

Табл. 7.3. Другие параметры аппроксимации спектров пульсаров

^аВ спектре пульсара найдено три высшие гармоники циклотронной линии: $\mathrm{E}_{cycl2}{=}21.16^{+0.11}_{-0.02}$, $\tau_{cycl2}{=}0.97\pm0.01,$ $\sigma_{cycl2}{=}7.55^{+0.15}_{-0.02}$

 $F_{m} = 34.55^{+0.01}$ $\sigma_{m} = 0.40^{+0.01}$ $\sigma_{m} = 4.5^{+0.3}$

$$E_{cycl3} = 54.55 \pm 0.20$$
, $\tau_{cycl3} = 0.40 \pm 0.01$, $\sigma_{cycl3} = 4.5 \pm 0.01$

 $\mathrm{E}_{cycl4}{=}44.93^{+0.15}_{-0.27}$, $\tau_{cycl4}{=}0.55\pm0.01,$ $\sigma_{cycl4}{=}11.38^{+0.45}_{-0.17}$

бПараметр зафиксирован

^вУ пульсара были зарегистрированы две высшие гармоники циклотронной линии:

 $\mathrm{E}_{cycl2}{=}46.8^{+0.2}_{-0.1}$, $\tau_{cycl2}{=}1.94^{+0.06}_{-0.07},\,\sigma_{cycl2}{=}8.9{\pm}0.4$

$$E_{cycl3}=67.9^{+3.2}_{-4.3}$$
, $\tau_{cycl3}=2.60^{+0.25}_{-0.35}$, $\sigma_{cycl3}=26.9\pm5.4$

^гУ пульсара была зарегистрирована вторая гармоника циклотронной линии

 $\mathrm{E}_{\mathit{cycl2}}{=}50.2{\pm}0.5$ к
əB, $\tau_{\mathit{cycl2}}{=}0.95{\pm}0.03,$ $\sigma_{\mathit{cycl2}}{=}12.2{\pm}0.5$ к
əB
Заключение

Основные выводы и результаты диссертационной работы.

1. Впервые подробно исследовано изменение циклотронной частоты со светимостью и показано, что для пульсара V0332+53 она растет линейно с уменьшением светимости так же, как и высота ударной волны в аккреционной колонке. Получены оценки величины магнитного поля на поверхности нейтронной звезды и высоты ударной волны в аккрецируемой плазме. Относительное изменение энергии центра линии составляет около ~ 25%. В приближении дипольного поля на которой формируется данная особенность, ~ 7.5% или ~ 750 м. Кроме того, впервые показано, что и вторая гармоника циклотронной частоты ведет себя подобным образом.

2. Показано, что для пульсара 4U0115+63 величина циклотронной частоты также зависит от светимости, однако, эта зависимость имеет более сложную морфологию и не может быть объяснена линейным изменением высоты ударной волны в аккреционной колонке от темпа аккреции в широком диапазоне светимостей.

3. Обнаружены значительные изменения формы профиля импульса в зависимости от светимости и энергетического диапазона для пульсаров V0332+53 (особенно в районе циклотронной частоты), KS1947+300 и 4U0115+63.

4. Основываясь на модели замагниченной нейтронной звезды, апробирован метод исследования свойств пульсара по изменению темпа его ускорения/замедления во время вспышек. Используя данный метод, получены оценки величины магнитного поля пульсара KS1947+300 и расстояния до двойной системы.

5. Используя данные обсерватории ГРАНАТ показано, что вариации кривой блеска и спектра пульсара GX 301-2 могут быть объяснены неоднородностями в звездном ветре размером $\sim 10R_{\odot}$, плотность которых примерно в 50 раз выше средней плотности звездного ветра в экваториальной плоскости звезд *Be* класса.

6. Показано, что в системе SMC X-1 помимо периодичностей, связанных с собственным вращением нейтронной звезды и орбитальным движением, присутствует еще одна, близкая к периодической, составляющая, возможно связанная с прецессией аккреционного диска. По величине прецессионного периода (*P*_{prec} ~ 61 день), измеренного по данным телескопа АРТ-П, получены оценки угла наклона аккреционного диска относительно орбитальной плоскости $\delta\sim 25-58^\circ.$

7. Используя данные долговременных наблюдений (~ 8.5 лет) рентгеновского пульсара LMC X-4 монитором всего неба обсерватории RXTE и данные обсерватории ИНТЕГРАЛ, измерено среднее значение периода прецессии аккреционного диска и показано, что оно не является постоянным.

8. Получен наиболее полный на сегодняшний день каталог широкополосных (3-100 кэВ) спектров 35 аккрецирующих рентгеновских и одного миллисекундного пульсаров, полученных по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ. Впервые получены спектры малоизученных аккрецирующих пульсаров А 0114+650, RX J0146.9+6121, AX J1820.5-1434 и AX J1841.0-0535 в жестком рентгеновском диапазоне энергий (> 20 кэВ). Проанализирована эволюция спектральных параметров в зависимости от интенсивности источников.

Литература

Aŭ (Iye M.) // Publ. Astron. Soc. Japan 38, 463 (1986)

Ангелини и др. (Angelini L., Stella L., White N.) // Astrophys. J. **371**, 332 (1991)

Аугелло и др. (Augello G., Iaria R., Robba N. et al.) // Astrophys. J. 596, 63 (2003)

Бааде, Цвикки (Baade W., Zwicky F.) // Phys. Rev. 45 (1933)

Байкал (Baykal A.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 313, 637 (2000)

Байкал и др. (Baykal A., Stark M., Swank J.) // Astrophys. J. 544, L129 (2000)

- Байкал и др. (Baykal A., Stark M.J., Swank J.H.) // Astrophys. J. 569, 903 (2002)
- Бамба и др. (Bamba A., Yokogawa J., Ueno M. et al.) // Publ. Astron. Soc. Japan 53, 1179 (2001)
- Баско, Сюняев (Basko M.M., Sunyaev R.A.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 175, 395 (1976а)
- Баско, Сюняев (Basko M.M., Sunyaev R.A.) // Sov. Astron. 20, 537 (1976b)

Белобородов (Beloborodov A.M.) Astrophys. J. 566, L85 (2002)

Билдстен и др. (Bildsten L., Chakrabarty D., Chiu J. et al.) // Astrophys. J. Suppl. Ser. 113, 367 (1997)

Бодаги и др. (Bodaghee A., Mowlavi N., Ballet J.) // Astron. Telegram 290,1 (2004)

Бонди, Хойл (Bondi H., Hoyle F.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 104, 273 (1944)

Боркус В.В., Каниовский А.С., Сюняев Р.А. и др. // Письма в Астрон. журнал 24, 83 (1998)

Бороздин К., Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А. и др. // Письма в Астрон. журнал 16, 804 (1990)

Bpadm u dp. (Bradt H.V., Rothschild R.E., Swank J.H.) // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 97, 355 (1993)

Браинерд, Месзарос (Brainerd J., Mezaros P.) // Astrophys. J. **369**, 179 (1991)

Булик и др. (Bulik T., Gondek-Rosinska D., Santangelo A. *et al.*) // Astron. Astrophys. **404**, 1023 (2003)

Бурдери и др. (Burderi L., Di Salvo T., Robba N. et al.) // Astrophys. J. 530, 429 (2000)

Baŭm u dp. (White N., Mason K., Sanford P. *et al.*) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **176**, 91 (1976)

Baŭm u dp.(White N., Parkes G., Sanford P. et al.) // Nature 274, 664 (1978)

Baŭm u dp. (White N., Swank J., Holt S.) // Astrophys. J. 270, 771 (1983)

Baŭm u ∂p. (White N.E., Swank J.H.) // Astrophys. J. 287, 856 (1984)

Ванг, Велтер (Wang Y.-M., Welter G.L.) // Astron. Astrophys. 102, 97 (1981)

- ван Керквиджик и др. (van Kerkwijk M., van Oijen J., van den Heuvel E.) // Astron. Astrophys. **209**, 173 (1989)
- ван Керквиджик и др. (van Kerkwijk M., van Paradijs J., Zuiderwijk E. et al.) // Astron. Astrophys. 303, 483 (1995)
- Варвик и др. (Warwick R., Watson., Willingale R.) // Space Science Reviews 40, 429 (1985)
- Ведренне и др. (Vedrenne G., Roques J.-P., Schonfelder V. et al.) // Astron. Astrophys. 411, L63 (2003)
- Вейтон и др. (Wheaton W. A., Doty J. P., Primini F. A. et al.) Nature 282, 240 (1979)

- Винклер и др. (Winkler C., Courvoisier T.J.-L., Di Cocco G. et al.) // Astron. Astrophys. 411, L1 (2003)
- Войдовски и др. (Wojdowski P., Clark G.W., Levine A.M. et al.) // Astrophys. J. 502, 253 (1998)
- Волтер и др. (Walter R. & INTEGRAL Survey Team) // AAS/High Energy Astrophysics Division, 8 (2004)
- Bomepc u dp. (Waters L.B.F.M., Taylor A.R., van den Heuvel E.P.J. et al.) // Astron. Astrophys. **198**, 200 (1988)
- By u dp. (Woo J.W., Clark G.W., Levine A.M.) // Astrophys. J. 449, 880 (1995)
- *By u dp*. (Woo J.W., Clark G.W., Levine A.M. *et al.*) // Astrophys. J. **467**, 811 (1996)
- Галловей и др. (Galloway D., Remillard R., Morgan E. et al.) // IAUC 8070, 2 (2003)
- Галловей и др. (Galloway D., Morgan E., Levine A.) // Astrophys. J. 613, 1164 (2004)
- *Гиангранд и др.* (Giangrande A., Giovannelli F., Bartolini C. *et al.*) // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **40**, 289 (1980)
- *Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А., Чуразов Е.М. и др. //* Письма в Астрон. журнал **15**, 675 (1989)
- Гнедин, Сюняев (Gnedin Yu. & Sunyaev R.) // Astron. Astrophys. 25, 233 (1973)
- Гнедин, Сюняев (Gnedin Yu. & Sunyaev R.) // Astron. Astrophys. 36, 379 (1974)
- Горанский (Goranskij V.) // Astron. Lett. 27, 516 (2001)
- *Горанский, Барсукова* (Goranskij V., Barsukova E.) // The Astronomers Telegram 245 (2004)
- Гош, Лэмб (Ghosh P., Lamb F.) // Astrophys. J. 234, 296 (1979)
- *Гребенев С.А., Павлинский М.Н., Сюняев Р.А. //* Письма в Астрон. журнал **18**, 570 (1992)
- *Гриндлей и др.* (Grindlay J., Gursky H.) // Astrophys. J. **205**, L131 (1976)

Денис и др. (Denis M., Grygorczuk J., Bulik T. et al.) // Proceedings of the 5th INTE-GRAL Workshop on "The INTEGRAL Universe", ESA Publications Division, SP-552, Eds. Schönfelder V. et al., 295 (2004)

Джиаккони и др. (Giacconi R., Gursky H., Kellogg E. et al.) // Astrophys. J. 167, L67 (1971)

Джиаккони и др. (Giacconi R., Murray S., Gursky H. *et al.*) Astrophys. J. **178**, 281 (1972) Джонс, Форман (Jones C., Forman W.) // Astrophys. J. **209**, L131 (1976)

Джордж, Фабиан (George I.M., Fabian A.C.) Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **249**, 352 (1991) *Епштейн и др.* (Epstein A., Delvaille J., Helmken H. *et al.*) // Astrophys. J. **216**, 103 (1977)

Budan (Vidal N.V.) // Astrophys. J. 186, 81 (1973)

Занг и др. (Zhang S., Harmon B., Paciesas W. et al.) // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **120**, 227 (1996)

Иловайский и др. (Ilovaisky S., Chevalier C., Motch C.) // Astron. Astrophys. 114, 7 (1982)

- Исраел и др. (Israel G., Negueruela I., Campaha S. et al.) // Astron. Astrophys. 371, 1018 (2001)
- Камеро Арранз и др. (Camero Arranz A., Reig P., Connell P. et al.) // Proceedings of the 5th INTEGRAL Workshop on "The INTEGRAL Universe", ESA Publications Division, SP-552, Eds. Schönfelder V. et al., 279 (2004)
- Кампана и др. (Campana S., Ravasio M., Israel G.L. et al.) // Astrophys. J. 594, L39 (2003)
- *Kanep u dp*. (Kaper L., Lamers H.J.G.L.M., Ruymaerkers E. *et al.*) // Astron. Astrophys. **300**, 446 1995
- Каспи, Гавриил (Kaspi V.M., Gavriil F.P.) // Astrophys. J. 596, L71 (2003)
- Kacmop u dp. (Castor J.I., Abbott D.C., Klein R.I.) // Astrophys. J. 195, 157 (1975)
- Келли и др. (Kelley R., Jernigan J., Levine A. et al.) // Astrophys. J. 264, 568 (1983a)
- Келли и др. (Kelley R., Rappaport S., Clark G. et al.) // Astrophys. J. 268, 790 (1983б)
- *Кензиора и др*. (Kendziorra E., Kretschmar P., Pan H. *et al.*) // Astron. Astrophys. **291**, L31 (1994)
- Кинугаса и др. (Kinugasa K., Torii K., Hashimoto Y. et al.) // Astrophys. J. 495, 435 (1998)
- Kupu u dp. (Kirsch M., Mukerjee K., Breitfellner M. et al.) // Astron. Astrophys. 423, 9 (2004)
- Кларк (Clark G.) // Astrophys. J. 542, 131 (2000)
- *Кларксон и др.* (Clarkson W., Charles P., Coe M., et al.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **339**, 447 (2003)
- Кобурн и др. (Coburn W., Heindl W., Rothschild R. et al.) // Astrophys. J. 580, 394 (2002)
- *Кобурн и др.* (Coburn W., Kretschman P., Kreykenbohm I. *et al.*) // Astron. Telegram **381**, 1 (2005)
- *Koe u dp*. (Coe M., Payne B., Longmore A. *et al.*) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **232**, 865 (1988)
- Коллинз (Collins G.) // in IAU Colloq. 92, Physics of Be stars, ed. A.Slettebak, T.Snow, Cambridge Univ. Press, 3 (1987)
- Комински и др. (Cominsky L., Clark G.W., Li F. et al.) Nature 273, 367 (1978)
- Корбет и др. (Corbet R., Marshall F., Peele A. et al.) // Astrophys. J. 517, 956 (1999)

Корбет, Мукаи (Corbet R., Mukai K.) // Astrophys. J. 577, 923 (2002)

- *Kox u dp*. (Koh D., Bildsten L., Chakrabarty D. *et al.*) // Astrophys. J. **479**, 993 (1997)
- Кояма и др. (Koyama K., Asaoka I., Ushimaru N. et al.) // Astrophys. J. 362, 215 (1990a)
- *Кояма и др.* (Koyama K., Kunieda H., Takeuchi Y. *et al.*) // Publ. Astron. Soc. Japan **42**, 59 (1990б)
- Кравчик и др.(Krawczyk A., Lyne A.G., Gil J.A. et al.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **340**, 1087 (2003)
- Крейкенбом и др. (Kreykenbohm I., Pottschmidt K., Kretschmar P. et al.) // Proceedings of the 5th INTEGRAL Workshop on "The INTEGRAL Universe", ESA Publications Division, SP-552, Eds. Schönfelder V. et al., 333 (2004)

- Крейкенбом и др. (Kreykenbohm I., Mowlavi N., Produit N. et al.) // Astron. Astrophys. 433, L45 (2005)
- *Кречмар и др.* (Kretschmar P., Staubert R., Kreykenbohm I. *et al.*) // Proceedings of the 5th INTEGRAL Workshop on "The INTEGRAL Universe", ESA Publications Division, SP-552, Eds. Schönfelder V. *et al.*, 267 (2004)

Крземинский (Krzeminski W.) // Astrophys. J. 192, 135 (1974)

- Крэмптон и др. (Crampton D., Hutchings J., Cowley A.) // Astrophys. J. 299, 839 (1985)
- *Кузнецов и др.* (Kuznetsov S., Falanga M., Goldwurm A. *et al.*) // Proceedings of the 5th INTEGRAL Workshop on "The INTEGRAL Universe", ESA Publications Division, SP-552, Eds. Schönfelder V. *et al.*, 285 (2004)
- Кук, Варвик (Cook M. & Warwick R.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 227, 661 (1987)
- *Кусумано и др.* (Cusumano G., di Salvo T., Burderi L., *et al.*) // Astron. Astrophys. **338**, 79L (1998)
- *Ла Барбера и др.* (La Barbera A., Burderi L., Di Salvo T. *et al.*) // Astrophys. J. **553**, 375 (2001)
- Ja Eapóepa u dp. (La Barbera A., Ferrigno C., Piraino S. et al.) // Proceedings of the 5th INTEGRAL Workshop on "The INTEGRAL Universe", ESA Publications Division, SP-552, Eds. Schönfelder V. et al., 337 (2004)
- Ланг и др. (Lang F.L., Levine A.M., Bautz M. et al.) // Astrophys. J. 246, L21 (1981)
- Ларвуд (Larwood J.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1998, v.299, L.32.
- Лебран и др. (Lebrun F., Leray J. P., Lavocat P.et al.) // Astron. Astrophys. 411, L141 (2003)
- Левин и др. (Levine A., Rappaport S., Putney A. et al.) // Astrophys. J. 381, 101 (1991)
- Левин и др. (Levine A., Rappoport S., Deeter J. et al.) // Astrophys. J. 410, 328 (1993)
- Левин и др. (Levine A., Rappaport S., Zojcheski G.) // Astrophys. J. 541, 194 (2000)
- *Jexu u dp*. (Leahy D.A., Elsner R.F., Weisskopf M.C.) // Astrophys. J. **272**, 256 (1983)

Лехи и др. (Leahy D.A., Matsuoka M.) // Adv. Space Res. 10, 95 (1990)

- *Jexu* (Leahy D.A.) // Astron. Astrophys. **391**, 219 (2002)
- *Ju u dp*. (Li F., Rappaport S., Epstein A.) // Nature **271**, 37 (1978)
- Ли, Вонг (Li X.-D., Wang Z.-R.) // Astron. Astrophys. **307**, L5 (1996)
- Липунов В.М. Астрофизика нейтронных эвезд. М.:Наука, 1987. 296 с.
- Лунд и др. (Lund N., Brandt S., Budtz-Joergesen C. *et al.*) // Astron. Astrophys. **411**, L231 (2003)
- *Лутовинов А.А., Гребенев С.А., Сюняев Р.А., Павлинский М.Н. //* Письма в Астрон. журн. **20**, 631 (1994)
- *Лутовинов А.А., Гребенев С.А., Сюняев Р.А.* Письма в Астрон. журн. **26**, 3 (2000)
- *Лутовинов А.А., Гребенев С.А., Павлинский М.Н., Сюняев Р.А. //* Письма в Астрон. журн. **26**, 803 (2000)
- *Лутовинов А.А., Гребенев С.А., Павлинский М.Н., Сюняев Р.А. //* Письма в Астрон. журн. **26**, 892 (2000)
- *Лутовинов А.А., Мольков С.В., Ревнивцев М.Г. //* Письма в Астрон. журн. 29, 803 (2003а)
- Лутовинов и др. (Lutovinov A., Walter R., Belanger G. et al.) // Astron. Telegram 155, 1 (20036)

- Лутовинов и др.(Lutovinov A., Budtz-Jorgensen C., Turler M. et al.) // Astron. Telegram 326, 1 (2004a)
- *Лутовинов и др.* (Lutovinov A., Tsygankov S., Revnivtsev M. *et al.*) // Proceedings of the 5th INTEGRAL Workshop on "The INTEGRAL Universe", ESA Publications Division, SP-552, Eds. Schönfelder V. *et al.*, 253 (20046)
- Лутовинов и др. (Lutovinov A., Revnivtsev M., Molkov S.) // Astron. Telegram 178, 1 (2004в)
- Лутовинов и др. (Lutovinov A., Revnivtsev M., Molkov S., Sunyaev R.) // Astron. Astrophys. 430, 997 (2005а)
- Лутовинов и др. (Lutovinov A., Rodriguez J., Revnivtsev M., Shtykovskiy P.) // Astron. Astrophys. 433, L41 (20056)
- Лутовинов и др. (Lutovinov A., Revnivtsev M., Gilfanov M. et al.) // Astron. Astrophys. 444, 821 (2005в)
- Льюин и др. (Lewin W., Ricker G., McClintock J.) // Astrophys. J. **169**, L17 (1971)
- Лэмб и др. (Lamb F., Petchik C., Pines D.) // Astrophys. J. 184, 271 (1973)
- Лэмб и др. (Lamb R., Markert T., Hartman R. et al.) // Astrophys. J. 239, 651 (1980)
- Любарский, Сюняев (Lyubarskii Yu., Sunyaev R.) // Sov. Astron. Lett. 14, 390 (1988)
- Maucaκ u dp. (Maisack M., Grove J., Kendziorra E. et al.) // Astron. Astrophys. 325, 212 (1997)
- *Макишима и др.* (Makishima K., Mihara T., Ishida M. *et al.*) // Astrophys. J. **365**, L59 (1990)
- Макишима и др. (Makishima K., Mihara T., Nagase F., Tanaka Y.) Astrophys. J. 525, 978 (1999)
- МакКлинток и др. (McClintok J., Bradt H., Doxsey R. et al.) // Nature 270, 320 (1977)
- Марквард, Свонк (Markwardt C., Swank J.) // Astron. Telegram 179, 1 (2003)
- *Марквард и др.* (Markwardt C., Juda M., Swank J.) // IAUC **8095**, 2 (2003)
- Маршал, Рикеттс (Marshall N., Ricketts M.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 193, 7 (1980)
- Мелатос и др. (Melatos A., Johnston S., Melrose D.B.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 275, 381 (1995)
- Meperemmu u dp. (Mereghetti S., Tiengo A., Israel G.L. et al.) // Astron. Astrophys. 354, 567 (2000)
- Месзарос, Нагел (Meszaros P., Nagel W.) // Astrophys. J. 299, 138 (1985)
- Минео и др. (Mineo T., Ferrigno C., Foschini L. et al.) Astron. Astrophys. 450, 617 (2006)
- *Muxapa* (Mihara T.) // Ph.D. thesis, University of Tokyo (1995)

Muxapa u dp. (Mihara T., Makishima K., Nagase F.) // Adv. Space Res. 22, 987 (1998)

Muxapa u dp. (Mihara T., Makishima K., Nagase F.) Astrophys. J. 610, 390 (2004)

Мольков и др. (Molkov S., Lutovinov A., Grebenev S.) // Astron. Astrophys. 411, 357 (2003)

- *Мольков и др.* (Molkov S., Cherepashchuk A., Lutovinov A. *et al.*) // Astron. Lett. **30**, 534 (2004a)
- Мольков и др. (Molkov S., Cherepashuk A., Revnivtsev M. et al.) // Astron. Telegram 274, 1 (20046)

Моррисон, МакКамон (Morrison R. & McCammon D.) // Astrophys. J. 270, 119 (1983)

- Мун и др. (Moon D.-S., Eikenberry S., Wasserman I.) // Astrophys. J. 582, L91 (2003)
- Harase (Nagase F.) // Publ. Astron. Soc. Japan 41, 1 (1989)
- Harace u dp. (Nagase F., Dotani T., Tanaka Y. et al.) Astrophys. J. 375, L49 (1991)
- Наик, Паул (Naik S., Paul B.) // Astron. Astrophys. 401, 265 (2003)
- *Накаджима и др.* (Nakajima M., Mihara T., Makishima K., Niko H.) Astrophys. J. **646**, 1125 (2006)
- *Негерела и др.* (Negueruela I., Roche P., Fabregat J. *et al.*) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **307**, 695 (1999)
- *Негерела и др.* (Negueruela I., Okazaki A.T.) Astron. Astrophys. **369**, 108 (2001)
- *Негерела и др.* (Negueruela I., Israel G., Marco A. *et al.*) // Astron. Astrophys. **397**, 739 (2003)
- Орландини и др. (Orlandini M., Fiume D.Dal, Frontera F. et al.) // Astrophys. J. 500, 163 (1998)
- *Орландини и др.* (Orlandini M., Fiume D.Dal, Frontera F. *et al.*) // Adv. Space Res. **25**, 417 (2000)
- *Орландини, Фиуме* (Orlandini M., Fiume D.Dal) // AIP Conference Proceedings **599**, 283 (2001)
- Павлинский М.Н., Гребенев С.А., Сюняев Р.А. // Письма в Астрон. журн. 18, 217 (1991)
- Паркес и др. (Parkes G., Murdin P., Mason K.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 184, 73 (1978)
- Паркес и др. (Parkes G., Mason K., Murdin P. et al.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 191, 547 (1980)
- Пармар и др. (Parmar A.N., White N.E., Stella L.) // Astrophys. J. **338**, 373 (1989)
- Пател и др. (Patel S., Kouveliotou C., Tennant A. et al.) // American Astronomical Society Meeting 203, 3103 (2003)
- Паул, Китамото (Paul B., Kitamoto S.) // J.Astrophis.Astr. 23, 33 (2002)
- Перейра и др. (Pereira M., Braga J., Jablonski F.) // Astrophys. J. 526, 105 (1999)
- Пирайно и др. (Piraino S., Santangelo A., Segreto A. et al.) // Astron. Astrophys. **357**, 501 (2000)
- Поль и др. (Paul J., Mandrou P., Ballet J. et al.) // Adv. Space Res. 11, 289 (1991)
- Поль и др. (Paul B., Agrawal P. C., Chitnis V. R. et al.) // Bull. Astron. Soc. India 23, 478 (1995)
- Поль, Pao (Paul B., Rao A.) // Astron. Astrophys. 337, 815 (1998)
- Поттсимидт и др. (Pottschmidt K., Kreykenbohm I., Wilms J. et al.) // Astrophys. J. 634, L97 (2005)
- Правдо и др. (Pravdo S.H., Ghosh P.) // Astrophys. J. 554, 383 (2001)

Прайс и др. (Price R., Groves D., Rodrigues R., et al.) // Astrophys. J. 168, 7 (1971)

Приедхорский, Террелл (Priedhorsky, Terrell) // Nature 303, 681 (1983)

- Прингл, Puc (Pringle J., Rees M.) // Astron. Astrophys. 21, 1 (1972)
- Pannanopm u dp. (Rappaport S., Clark G.W., Cominsky L. et al.) Astrophys. J. 224, L1 (1978)

- Ревнивцев М.Г., Сюняев Р.А., Варшалович Д.А. и др. // Письма в Астрон. журн. **30**, 430 (2004)
- Рейнолдс и др. (Reynolds A., Parmar A., White N.) // Astrophys. J. 414, 302 (1993a)
- *Рейнолдс и др.* (Reynolds A., Hilditch R., Bell W., Hill G.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **261**, 337 (19936)
- Ремилард и др. (Remillard R., Levine A., Takeshima T. et al.) // IAUC 6826, 2 (1998)
- Робба и др. (Robba N., Burderi L., Di Salvo T. et al.) // Astrophys. J. 562, 950 (2001)
- Робертс и др. (Roberts M., Michelson F., Leahy D. et al.) // Astrophys. J. 555, 967 (2001)
- Podpuzes u dp. (Rodiriguez J., Tomsick J., Foschini L. et al.) // Astron. Astrophys. 407, 41 (2003)
- Podpuzes u dp. (Rodriguez J., Garau A, Grebenev S. et al.) // Astron. Telegram 340, 1 (2004)
- Романова и др. (Romanova M. M., Ustyugova G. V., Koldoba A. V., Lovelace R. V. E.) // Astrophys. J. **610**, 920 (2004)
- Росенберг и др. (Rosenberg F., Eyles C., Skinner G. et al.) // Nature 226, 628 (1975)
- Рэй, Чакрабарти (Ray P. & Chakrabarty D.) // Astrophys. J. 581, 1293 (2002)
- Рэйг и др. (Reig P., Chakrabarty D., Coe M. et al.) // Astron. Astrophys. 311, 879 (1996)
- Сандалик, Филип (Sanduleak N. & Philip A.) // IAUC 3023, 1 (1976)
- Сантангело и др. (Santangelo A., Segreto A., Giarrusso, S. et al.) Astrophys. J. 523, L85 (1999)
- *Camo u dp*. (Sato N., Nagase F., Kawai N. *et al.*) // Astrophys. J. **304**, 241 (1986)
- Свонк, Морган (Swank J., Morgan E.) // IAU Circ. 7531 (2000)
- Свонк и др. (Swank J., Remillard R., Smith E.) // Astron. Telegram 349, 1 (2004)
- Сидоли и др. (Sidoli L., Mereghetti S., Larsson S. et al.) // Proceedings of the 5th INTE-GRAL Workshop on "The INTEGRAL Universe", ESA Publications Division, SP-552, Eds. Schönfelder V. et al., 475 (2004)
- Скиннер и др. (Skinner G.K., Shulman S., Share G.) // Astrophys. J. 240, 619 (1980)
- Слеттебак (Slettebak A.) // Astrophys. J. Suppl. Ser. 59, 769 (1985)
- Соффитта и др. (Soffitta P., Tomsick J., Harmon B. et al.) // Astrophys. J. 494, 203 (1998)
- Стелла и др. (Stella L., White N., Davelaar J. et al.) // Astrophys. J. 288, L45 (1985)
- *Стивенс и др.* (Stevens J., Reig P., Coe M. *et al.*) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **288**, 988 (1997)
- Столберг и др. (Stollberg M., Finger M., Wilson R. et al.) // Astrophys. J. 512, 313 (1999)
- *Сюняев и др.* (Sunyaev R.A., Babichenko S.I., Goganov D.A. *et al.*) // Adv. Space Res. **10**, 233 (1990)
- Таам и Фрукселл (Taam R.E., Fryxell B.A.) // Astrophys. J. 339, 297 (1989)
- Такешима и др. (Takeshima T., Corbet R., Marshall F. et al.) // IAUC 6826, 1 (1998)
- Тамура и др. (Tamura K., Tsunemi H., Kitamoto S. et al.) Astrophys. J. 389, 676 (1992)
- Тананбаум и др. (Tananbaum H., Gursky H., Kellog E., et al.) // Astrophys. J. 174, L143 (1972)
- *Tauupo u dp.* (Tashiro M., Makishima K., Ohashi T. *et al.*) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **252**, 156 (1991)
- *Террел, Предгорский* (Terrell J., Priedhorsky W.C.) // Bulletin of the American Astronomical Society **15**, 980 (1973)

Трюмпер и др. (Truemper J., Pietsch W., Reppin C. *et al.*) // Astrophys. J. **219**, L105 (1978) Убертини и др. (Ubertini P., Lebrun F., Di Cocco G. *et al.*) // Astrophys. J. **411**, 131 (2003) Фаинли и др. (Finley J., Belloni T., Cassinelli) // Astron. Astrophys. **262**, L25 (1992)

- Фаланга и др. (Falanga M., Bonnet-Bidaud J., Poutanen J. et al., // Astron. Astrophys 436, 647 (2005)
- Филиппова Е.В., Лутовинов А.А., Штыковский П.Е. и др. // Письма в Астрон. журн. **30**, 905 (2004)
- Филиппова Е.В., Цыганков С.С., Лутовинов А.А., Сюняев Р.А. // Письма в Астрон. журн. 31, 729 (2005)

Фингер и др. (Finger M., Bildsten L., Chakrabarty D. et al.) // Astrophys. J. 517, 449 (1999)

Форман и др. (Forman W., Tananbaum H., Jones C.) // Astrophys. J. 206, 29 (1976)

- Форман и др. (Forman W., Jones C., Cominsky L. *et al.*) Astrophys. J. Suppl. Ser. **38**, 357 (1978)
- Фронтера и др. (Frontera F., dal Fiume D., Morelli E., Spada G.) Astrophys. J. **298**, 585 (1985)

Хаберл (Haberl F.) // Astrophys. J. **376**, 245 (1991)

Хайндл и др. (Heindl W.A., Coburn W., Gruber D.E. et al.) Astrophys. J. 521, L49 (1999)

Халпен и др. (Halpern J., Gotthelf E., Helfand D.et al.) // Astron. Telegram 289, 1 (2004)

Хардинг, Доэрти (Harding A.K., Daugherty J.K.) Astrophys. J. 374, 687 (1991)

Хатчингс и др. (Hutchings J.B., Crampton D.) Astrophys. J. **247**, 222 (1981)

- Хейндл, Смит (Heindl W. & Smith D.) // Astrophys. J. 506, 35L (1998)
- *Хилтнер и др.* (Hiltner W., Werner J., Osmer P.) // Astrophys. J. **175**, 19 (1972)
- Xoeapm (Howarth I.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 198, 289 (1982)
- Холл и др. (Hall T., Finley J., Corbet R. et al.) // Astrophys. J. 536, 450 (2000)
- Холопов и др. (Kholopov P.N., Samus N.N., Kukarkina N.P. et al.) Information Bulletin on Variable Stars, 2042, 1 (1981)
- Хружина Т.С., Черепащук А.М. // Астрон. журн. 64, 345 (1987)
- Хыюиш и др.(Hewish A., Bell S. J., Pilkington J. D. et al.) // Nature 217, 709 (1968)
- Цыганков С.С., Лутовинов А.А., Гребенев С.А. и др. // Письма в Астрон. журн. **30**, 596 (2004)
- *Цыганков С.С., Лутовинов А.А. //* Письма в Астрон. журн. **31**, 427 (2005а)
- Цыганков С.С., Лутовинов А.А. // Письма в Астрон. журн. 31, 99 (20056)
- Цыганков и др.(Tsygankov S.S., Lutovinov A.A., Churazov E.M., Sunyaev R.A.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **371**, 19 (2006)
- *Цыганков С.С., Лутовинов А.А., Чуразов Е.М., Сюняев Р.А.* // Письма в Астрон. журн., принята к печати (2007)
- Чакрабарти и др. (Chakrabarty D., Grunsfeld J., Thomas A. et al.) // Astrophys. J. 403, 33 (1993)
- Чакрабарти и др. (Chakrabarty D., Koh T., Bildsten L. et al.) // Astrophys. J. 446, 826 (1995)
- Чакрабарти и др. (Chakrabarty D., Homer L., Charles P. et al.) // Astrophys. J. 562, 985 (2001)

- Чакрабарти и др. (Chakrabarty D., Wang Z., Juett A. et al.) // Astrophys. J. 573, 789 (2002)
- *Черепащук и др.* (Cherepashchuk A., Molkov S., Foschini L. *et al.*) // Astron. Telegram **159**, 1 (2003)
- Чернякова и др. (Chernyakova M., Shtykovskiy P., Lutovinov A. et al.) // Astron. Telegram **251**, 1 (2004)
- Чернякова и др. (Chernyakova M., Lutovinov A., Rodriguez J., Revnivtsev M.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **364**, 455 (2005)

Чичков М.А., Сюняев Р.А., Лапшов И.Ю. и др. // Письма в Астрон. журн. 21, 491 (1995)

Шарма и др. (Sharma D., Sood R., Strigfellow G. et al.) // Adv. Space Res. 13, 375 (1993)

Шевалье, Иловайский (Chevalier C., Ilovaisky S.) // Astron. Astrophys. 59, L9 (1977)

Шрейер и др. (Schreier E., Giacconi R., Gursky H. et al.) // Astrophys. J. 178, L71 (1972)

- Штыковский П.В., Лутовинов А.А., Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А. // Письма в Астрон. журн. **31**, 284 (2005)
- Эйсмонт и др. (Eismont N., Ditrikh A., Janin G. et al.) // Astron. Astrophys. 411, L37 (2003)
- Эндо и др. (Endo T., Ishida M., Masai K. et al.) // Astrophys. J. 574, 879 (2002)