

УДК 524.354.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ПУЛЬСАРОВ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ ОБСЕРВАТОРИЙ

С.С. Цыганков, А.А. Лутовинов

### STUDIES OF X-RAY PULSARS WITH SPACE OBSERVATORIES

S.S. Tsygankov, A.A. Lutovinov

В работе представлены результаты исследования рентгеновских аккрецирующих пульсаров, полученные по данным космических обсерваторий ГРАНАТ, RXTE и ИНТЕГРАЛ.

The work presents the results of the extended studies of X-ray pulsars obtained with the space observatories GRANAT, RXTE and INTEGRAL.

Рентгеновские пульсары, которых к настоящему времени известно около сотни, представляют собой быстро вращающиеся нейтронные звезды, входящие в состав тесных двойных систем и аккрецирующее вещество от своего нормального звездного компаньона. Именно аккреция вещества является основным механизмом, способным обеспечить наблюдаемую у них высокую светимость ( $L_x \sim 10^{35} - 10^{38}$  эрг/с). Считается, что пульсации рентгеновского излучения связаны с тем, что магнитные поля на поверхности нейтронных звезд в таких системах очень велики ( $B \sim 10^{12} - 10^{13}$  Гс). При таких значениях магнитного поля существует некоторый радиус  $R_A$ , на котором давление падающего вещества уравновешивается давлением магнитного поля нейтронной звезды. Вещество не может проникнуть внутрь магнитосферы и стекает по силовым линиям в область полюсов, образуя на поверхности нейтронной звезды два горячих пятна. При соответствующей ориентации оси магнитного диполя относительно оси вращения эти пятна могут периодически появляться на луче зрения наблюдателя, демонстрируя пульсации рентгеновского излучения.

Рентгеновские пульсары можно рассматривать как своего рода уникальную лабораторию для изучения поведения вещества в экстремальных условиях – при высоких температурах, в сильных магнитных и гравитационных полях. 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 механизмах формирования излучения, о его взаимодействии с окружающей материей, о конкретном состоянии вещества на разных расстояниях от нейтронной звезды.

На примере нескольких систем с рентгеновскими пульсарами, исследованных в широком диапазоне энергий 3–100 кэВ, в данном обзоре будут показаны основные наблюдательные свойства таких объектов и даны некоторые оценки их параметров.

*Временной анализ.* Кривые блеска рентгеновских пульсаров демонстрируют переменность на разных временных масштабах от долей секунды до десятков дней. Наиболее быстрой переменностью в таких системах является переменность интенсивности излучения, связанная с собственным вращением нейтронной звезды. Фазовые кривые блеска пульсаров на таких масштабах времен (профили импульса) прояв-

ляют широкое разнообразие форм, меняясь при этом от относительно простых синусоидально-подобных до сильно структурированных профилей, зависящих от энергетического диапазона и светимости объекта [1].

Например, профиль импульса пульсара GX 301-2 имеет двухпиковую форму с незначительным преобладанием первого пика, причем с ростом энергии интенсивность второго пика возрастает относительно первого [2]. При переходах источника из одного состояния в другое форма импульса практически не меняется. Для транзиентного пульсара KS 1947+300, наоборот, наблюдается зависимость формы профиля импульса от светимости источника [4]. По мере уменьшения интенсивности объекта вместо одиночного широкого пика на фазовой кривой блеска начинает проявляться более тонкая структура профиля (разделение на несколько отдельных пиков).

Наиболее интересным в этом отношении является транзиентный рентгеновский пульсар V 0332+53, вспыхнувший в конце 2004 – начале 2005 г. Нами было показано, что существует сложная зависимость формы профиля импульса от светимости источника и энергетического диапазона, особо выделяющаяся вблизи основной циклотронной частоты ( $E_{\text{сис}} = 24.3$  кэВ), где импульс меняет свою форму от двухпиковой к однопиковой со значительным смещением по фазе (см. рис. 1).

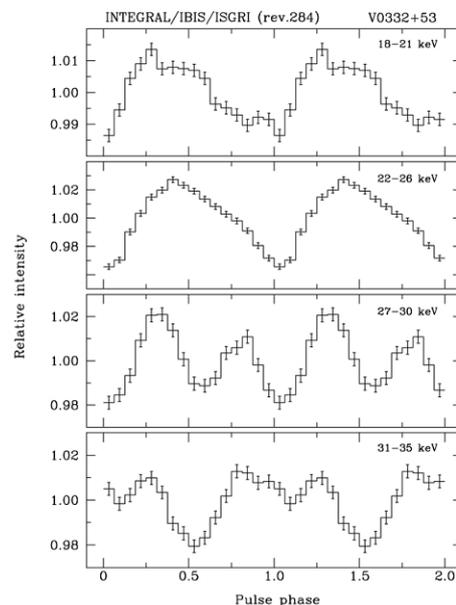


Рис. 1. Эволюция профиля импульса пульсара V0332+53 для светимости источника  $6 \cdot 10^{37}$  эрг/с.

Существует критическое значение светимости  $L^*$  ( $\sim 10^{37}$  эрг·с $^{-1}$ ), которое разделяет два режима аккреции: режим, при котором влиянием излучения на падающее вещество можно пренебречь, и режим, при котором это влияние существенно [4]. При  $L < L^*$  зона свободного падения простирается почти до самой поверхности нейтронной звезды и полярная шапка излучает в основном вверх. В противном случае ( $L > L^*$ ) на полюсах должны формироваться аккреционные колонки, вытянутые вдоль линий магнитного поля и излучающие преимущественно вбок. Во время наших наблюдений пульсаров KS 1947+300 и V 0332+53 происходил переход через упомянутую выше критическую светимость  $L^*$ , что нашло свое отражение в изменении формы профиля импульса.

Величина периода рентгеновских пульсаций подвержена изменениям, связанным с взаимодействием аккрецирующего вещества с магнитосферой нейтронной звезды. Основываясь на модели замагниченной нейтронной звезды [5] и результатах наблюдений, можно оценить величину ее магнитного поля и расстояние до двойной системы. В случае аккреции из диска темп изменения частоты пульсаций  $\nu$  можно записать как:

$$d\nu/dt \sim \mu^{2/7} n(\omega_s) L^{6/7} = \mu^{2/7} n(\omega_s) (4\pi d^2 F)^{6/7}, \quad (1)$$

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

При аппроксимации имеющихся в нашем распоряжении данных функцией (1) (масса и радиус нейтронной звезды были зафиксированы на значениях  $1.4 M_{\text{sun}}$  и  $10^6$  см, соответственно) были получены следующие величины: для пульсара KS1947+300 расстояние до системы  $d \approx 9.5$  кпс и магнитное поле на поверхности нейтронной звезды  $B \approx 2.5 \cdot 10^{13}$  Гс (рис. 2); для пульсара V 0332+53  $d \approx 8$  кпс и  $B \approx 2.7 \cdot 10^{12}$  Гс соответственно.

Следующим масштабом переменности в двойных системах является орбитальный период. Для рентгеновских пульсаров он колеблется в пределах от одного до нескольких сотен дней. Во всех исследуемых нами системах этот параметр является, пожалуй, наиболее стабильным.

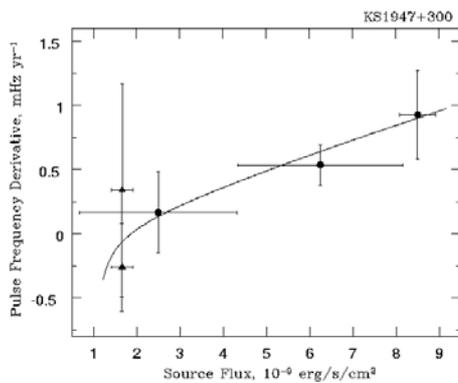


Рис. 2. Аппроксимация экспериментальной зависимости приращения частоты пульсаций от потока для пульсара KS1947+300 выражением (1).

Особый интерес представляет обнаружение в ряде систем третьего вида переменности на масштабе времен десятков дней, связанной с периодическим затмением излучающих областей нейтронной звезды прецессирующим наклоненным аккреционным диском. В нашем обзоре присутствуют два источника с такой суперорбитальной переменностью: SMC X-1 и LMC X-4 [6, 7].

Рентгеновская светимость пульсара SMC X-1 модулируется синусоидально-подобным сигналом с периодом около 61 дня от  $\sim 10^{37}$  эрг/с до несколько  $\times 10^{38}$  эрг/с [6]. Данное обстоятельство, а также наблюдаемое на протяжении более 30 лет со времени открытия пульсара постоянное ускорение вращения нейтронной звезды (см. [8] и ссылки там) являются свидетельством того, что в системе Sk160/SMCX-1 помимо сильного звездного ветра также присутствует аккреционный диск. Исходя из отношения величины орбитального и суперорбитального периодов, мы оценили угол наклона аккреционного диска относительно плоскости орбиты нейтронной звезды для пульсара SMC X-1 как  $25\text{--}58^\circ$ . Исследования кривой блеска источника, проведенные в работе [9], показали, что предполагаемый период прецессии сам по себе не является постоянным, а плавно меняется в диапазоне 40–60 дней с характерным временем  $\sim 1600$  дней.

Непостоянство величины суперорбитального периода также было установлено и для другого источника этого класса LMC X-4 ([7]). Средний период прецессии аккреционного диска у этого пульсара составляет около 30.275 дня, на масштабе которых светимость меняется более чем в 50 раз.

Еще одним видом переменности в описываемых двойных системах является хаотическая переменность интенсивности излучения на различных масштабах времени. Так, например, для системы пульсара GX 301-2 она обнаружена на масштабах времен порядка нескольких часов и связана с попаданием на луч зрения неоднородностей в звездном ветре от оптического компаньона, плотность которых выше средней примерно в 50 раз [2].

*Спектры.* 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 на высоких энергиях. Для большинства источников фотонный индекс находится в диапазоне 0.3–2, энергия слома 7–30 кэВ, а параметр завала 9–40 кэВ [10]. 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 меняется в диапазоне  $10^{21}\text{--}10^{24}$  см $^{-2}$ ; эмиссионные линии железа на 6–7 кэВ; гиролинии на энергиях, соответствующих циклотронной частоте электронов и ее гармоникам.

Из полученных в нашей работе наиболее интересным является энергетический спектр пульсара V 0332+53 (рис. 3), в котором регистрируется линия поглощения, связанная с резонансным рассеянием

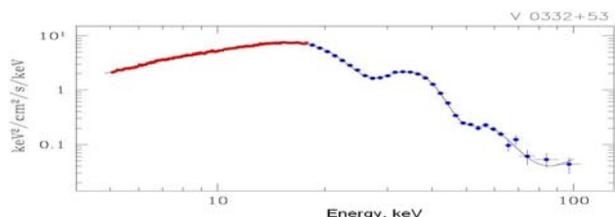


Рис. 3. Энергетический спектр транзientного пульсара V0332+53 в ярком состоянии.

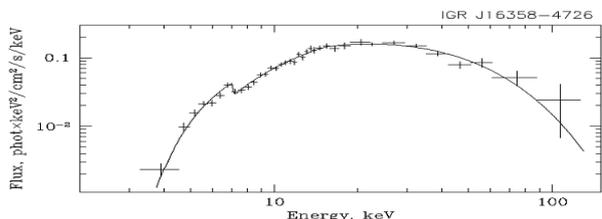


Рис. 4. Энергетический спектр сильнопоглощенного рентгеновского пульсара IGR J16358-4726.

фотонов на электронах с энергией, соответствующей гирочастоте (24.3 кэВ), и две ее высшие гармоники (46.8 и 66 кэВ). Исходя из положения основной гармоники в спектре источника, можно оценить величину магнитного поля на поверхности нейтронной звезды как  $B = (1+z)/11.6 E_{\text{cyc}} \cdot 10^{12} \text{ Гс} = 2.7 \cdot 10^{12} \text{ Гс}$ , что находится в хорошем согласии с величиной, полученной из анализа изменения частоты пульсаций.

В 2003 г. обсерваторией «Интеграл» был открыт новый класс сильнопоглощенных источников, многие из которых оказались рентгеновскими пульсарами. Последующие наблюдения этих объектов в более мягком энергетическом диапазоне показали, что источники обладают очень большим внутренним фотопоглощением  $\sim 10^{24}$  атомов  $\text{см}^{-2}$ , возникающим из-за сильного звездного ветра в системе, и слабо излучают на энергиях меньше 10 кэВ [11] (рис. 4).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. White N., Swank J., Holt S. // *Astrophys. J.* 1983. V. 270. P. 771.
2. Цыганков С.С., Лутовинов А.А., Гребенев С.А. и др. // *Письма в АЖ.* 2004. Т. 30, № 8. С. 596–604.
3. Цыганков С.С., Лутовинов А.А. // *Письма в АЖ.* 2005. Т. 31, № 2. С. 99–109.
4. Basko M.M., Sunyaev R.A. // *MNRAS.* 1976. V. 175. P. 395.
5. Ghosh P., Lamb F. // *Astrophys. J.* 1979. V. 234. P. 196.
6. Лутовинов А.А., Цыганков С.С., Гребенев С.А. и др. // *Письма в астрономический журнал.* 2004. Т. 30, № 1. С. 58–66.
7. Цыганков С.С., Лутовинов А.А. // *Письма в АЖ.* 2005. Т. 31, № 6. С. 427–436.
8. Bildsten L., Chakrabarty D., Chiu J. et al. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1997. V. 113. P. 367.
9. Clarkson W., Charles P., Coe M. et al. // *MNRAS.* 2003. V. 339. P. 447.
10. Филиппова Е.В., Цыганков С.С., Лутовинов А.А. и др. // *Письма в АЖ.* 2005. Т. 31, № 11. С. 819–838.
11. Lutovinov A., Revnivtsev M., Gilfanov M. et al. // *astro-ph/0411550.*