

ПРИРОДА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗБЫТКА
В СПЕКТРЕ RX J1037.5-5647

Н.Р.ИХСАНОВ, Н.Г.БЕСКРОВНАЯ

Поступила 7 июня 2011

Принята к печати 24 августа 2011

Источник, ответственный за мягкий рентгеновский избыток в спектре излучения пульсара RX J1037.5-5647, ассоциирован с горячим пятном на поверхности нейтронной звезды, локализованным у основания аккреционной колонки. Интенсивность излучения этого источника испытывает, однако, лишь незначительные (порядка 15%) вариации, в то время как интенсивность жесткого компонента существенно меняется с периодом вращения нейтронной звезды. Мы показываем, что такая ситуация реализуется, если угол между осью вращения и магнитной осью нейтронной звезды не превосходит 8° . Вариации интенсивности жесткого компонента излучения в этом случае интерпретируются в терминах анизотропии диаграммы направленности. Угол наклона орбиты двойной системы в рамках такого сценария оказывается близок к 10° .

Ключевые слова: *тесные двойные системы:аккреция:нейтронные звезды: пульсары:объект:RX J1037.5-5647*

1. *Введение.* Наблюдения рентгеновского пульсара RX J1037.5-5647, выполненные Ла Паломбара и др. [1] на телескопе XMM-Newton, выявили присутствие избытка мягкого рентгеновского излучения в его спектре. Анализируя этот результат, авторы открытия пришли к выводу, что наряду со степенным компонентом спектра излучения, формирующегося в основании аккреционной колонки пульсара, в системе присутствует дополнительный источник, спектр которого соответствует излучению абсолютно черного тела с температурой $kT \approx 1.3$ кэВ. Вклад этого источника в общее рентгеновское излучение пульсара достигает 40% и его характерный размер $R_{bb} \approx 130$ м.

Ла Паломбара и др. [1] обратили внимание на то, что вычисленный ими размер источника мягкого рентгеновского излучения близок по величине радиусу горячего пятна, образующегося на поверхности нейтронной звезды вследствие аккреции вещества на ее магнитные полюса. На этом основании они рассмотрели гипотезу, что чернотельное излучение с температурой 1.3 кэВ формируется на поверхности нейтронной звезды в окрестности аккреционной колонки и обусловлено переизлучением жестких рентгеновских квантов атмосферой нейтронной звезды. Выполненный ими временной анализ кривой блеска показал, однако, что вариации интенсивности

излучения мягкого рентгеновского источника с фазой периода пульсара не превосходят 15%, в то время как интенсивность компонента жесткого излучения со степенным спектром с фазой периода пульсара меняется более чем в два раза. Такой характер переменности рентгеновского излучения исключает возможность ассоциировать наблюдаемые пульсации с частичным затмением области энерговыделения, происходящие по мере осевого вращения нейтронной звезды, и, таким образом, вопрос о природе источника, ответственного за избыток мягкого рентгеновского излучения в спектре пульсара остается открытым.

В этой статье мы показываем, что гипотеза о локализации источника мягкого рентгеновского излучения на поверхности нейтронной звезды в окрестности основания аккреционной колонки является, по-видимому, справедливой. Особенности переменности излучения в этом случае удастся объяснить в рамках предположения об относительно малом угле наклона магнитной оси нейтронной звезды к ее оси вращения, β . При этом мы делаем вывод, что угол наклона орбиты системы к лучу зрения, i , достаточно мал, так что система наблюдается практически с полюса.

Наше исследование построено следующим образом. В разделе 2 мы приводим аргументы в пользу того, что нейтронная звезда в RX J1037.5-5647 находится в состоянии дисковой аккреции. В разделе 3 мы оцениваем геометрические параметры области энерговыделения в основании аккреционной колонки и определяем величины параметров β и i , при которых характер переменности рентгеновского излучения соответствует наблюдаемому. Основные результаты нашего исследования суммированы в разделе 4.

2. Геометрия аккреционного потока. RX J1037.5-5647 является массивной двойной системой, в состав которой входит B0 III-Ve звезда LS 1698 [2] и нейтронная звезда, вращающаяся с периодом $P_\tau \approx 853$ с. Система расположена на расстоянии порядка 5 кпк и является постоянным рентгеновским источником, светимость которого претерпевает плавные изменения в интервале $L_X \sim (1-20) \times 10^{34}$ эрг/с. Спектр рентгеновского излучения хорошо описывается в рамках сценария аккреции на нейтронную звезду, напряженность магнитного поля на поверхности которой $B_0 \sim 10^{12} - 10^{13}$ Гс [3], [1]. При этом линия железа 6.5 кэВ, наблюдаемая в спектре источника, указывает на возможность присутствия в системе аккреционного диска.

Сравнительный анализ характеристик пульсара, установленных в ходе его наблюдений на телескопах RXTE [3] и XMM - Newton [1], указывает на то, что период вращения нейтронной звезды в течение последних десяти лет уменьшался с темпом $\dot{P} \approx 2 \times 10^{-8}$ с/с. Этот результат хорошо интерпретируется в рамках модели дисковой аккреции на нейтронную звезду, в соответствии с которой ожидаемый темп ускорения вращения

нейтронной звезды оценивается выражением

$$\frac{dI \omega_s}{dt} = K_{su} + K_{sd}, \quad (1)$$

где I и $\omega_s = 2\pi/P_s$ - момент инерции и угловая скорость нейтронной звезды, а K_{su} и K_{sd} - ускоряющий и тормозящий моменты, приложенные к нейтронной звезде со стороны аккреционного потока, величина которых в случае дисковой аккреции оценивается следующим образом (см. Ихсанов [4] и процитированную там литературу)

$$K_{su} = \dot{M}(GM_{ns}R_A)^{1/2}, \quad (2)$$

$$K_{sd} = -k_t \frac{\mu^2}{R_{cor}^3}. \quad (3)$$

Здесь $\dot{M} = L_x R_{ns} / GM_{ns}$ - темп аккреции на нейтронную звезду, радиус, масса и дипольный магнитный момент которой, соответственно, R_{ns} , M_{ns} и μ . Безразмерный параметр $k_t \leq 1$ учитывает эффективность отвода углового момента нейтронной звезды турбулентными движениями потока, расположенного на границе ее магнитосферы. $R_{cor} = (GM_{ns} / \omega_s^2)^{1/3}$ - радиус кортациии и

$$R_A = \left(\frac{\mu^2}{\dot{M}(2GM_{ns})^{1/2}} \right)^{2/7} \quad (4)$$

- радиус магнитосферы (Альвеновский радиус) нейтронной звезды.

Подставляя параметры RX J1037.5-5647 в выражения (2) и (3), мы приходим к выводу, что вращательная эволюция нейтронной звезды в настоящую эпоху полностью определяется ускоряющим моментом, величина которого в 250 раз превышает величину тормозящего момента. Учитывая это обстоятельство в уравнении (1), т.е. пренебрегая последним членом в его правой части, мы получаем величину ожидаемого темпа ускорения нейтронной звезды в рамках сценария дисковой аккреции в виде,

$$\dot{P}_{exp} \approx 2 \times 10^{-8} \text{ ss}^{-1} \mu_{30}^{2/7} m^{-3/7} R_6^{6/7} I_{45}^{-1} P_{860}^2 \left(\frac{L_x}{\langle L_x \rangle} \right)^{6/7}, \quad (5)$$

которая находится в прекрасном соответствии с наблюдаемой величиной этого параметра. Здесь $\mu_{30} = \mu / 10^{30} \text{ Гс см}^3$, $m = M_{ns} / 1.4 M_\odot$, $R_6 = R_{ns} / 10^6 \text{ см}$, $I_{45} = I / 10^{45} \text{ Гс см}^2$, $P_{860} = P_s / 860 \text{ с}$ и $\langle L_x \rangle = 6 \times 10^{34} \text{ эрг/с}$ - средняя величина рентгеновской светимости пульсара в течение последней декады. Таким образом, существуют веские основания полагать, что нейтронная звезда в RX J1037.5-5647 в настоящую эпоху находится в состоянии дисковой аккреции.

3. *Геометрия области энерговыделения.* Как было впервые показано Баско и Сюняевым [5], аккреционная колонка, формирующаяся

в процессе дисковой аккреции на нейтронную звезду, является полый. Радиус основания колонки на поверхности нейтронной звезды оценивается выражением

$$a_p \approx R_{ns} \left(\frac{R_{ns}}{R_A} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

в то время как толщина аккреционного канала составляет

$$d_p \approx a_p \frac{\delta_m}{R_A} \sim (0.01 - 0.1) a_p. \quad (7)$$

Здесь δ_m - толщина диффузионного слоя на границе магнитосферы, в котором угловая скорость потока уменьшается от кеплеровой скорости (на внутреннем радиусе диска) до угловой скорости нейтронной звезды. Величина этого параметра, полученная в расчетах Гоша и Лэмба [6], оказывается порядка толщины аккреционного диска на его внутреннем радиусе и, в зависимости от параметров аккреции, составляет $\sim (0.01 - 0.1) R_A$. Основание аккреционной колонки у поверхности нейтронной звезды может, таким образом, быть аппроксимировано цилиндром, радиус основания которого a_p и толщина боковой стенки d_p . Высота такого цилиндра в системах с низкой рентгеновской светимостью ($L_x \sim 10^x$ эрг/с) порядка толщины аккреционного канала [5].

Трансформация кинетической энергии потока в рентгеновское излучение пульсара происходит в основании аккреционной колонки. Моделирование, проведенное Ла Паломбара и др. [1], показывает, что аккреционная энергия в RX J1037.5-5647 испускается преимущественно в форме рентгеновского излучения, которое в интервале энергий 2 - 10 кэВ описывается степенным спектром. Взаимодействие жестких рентгеновских квантов с поверхностью нейтронной звезды приводит к нагреву ее атмосферы и переизлучению части аккреционной энергии в мягком рентгеновском диапазоне. В рамках модели полый аккреционной колонки наибольшая эффективность нагрева поверхности звезды ожидается в области ее магнитных полюсов, расположенных внутри аккреционного цилиндра. При этом, равенство $a_p = R_{bb}$ выполняется при условии, что напряженность магнитного поля на поверхности нейтронной звезды составляет $B_0 = 2\mu/R_{ns}^3 \approx 7 \times 10^{12}$ Гс.

Отсутствие существенных вариаций интенсивности и спектра излучения мягкого рентгеновского источника указывает на то, что горячее пятно на поверхности нейтронной звезды, ответственное за это излучение, постоянно находится в поле зрения наблюдателя. Такая ситуация может быть реализована, если угол между осью вращения нейтронной звезды и ее магнитной осью относительно мал. В частности, при условии $\beta < 8^\circ$ амплитуда вариаций мягкого рентгеновского источника по мере вращения звезды не превышает 15% и обусловлена изменением площади проекции

пятна на плоскость, перпендикулярную лучу зрения. Присутствие лишь одного максимума на кривой блеска мягкого источника указывает на то, что угол наклона орбиты двойной системы удовлетворяет неравенству $i \geq \beta$.

Изменения интенсивности жесткого компонента излучения, происходящие с периодом вращения нейтронной звезды, по-видимому, обусловлены анизотропией его диаграммы направленности. На это указывают относительно малые изменения жесткости спектра и то обстоятельство, что вариации интенсивности мягкого и жесткого компонентов происходят в одной фазе. Максимум интенсивности жесткого компонента в рамках такого сценария ожидается в тот момент, когда угол между магнитной осью и направлением на наблюдателя достигает своего минимального значения. Таким образом, жесткие рентгеновские кванты покидают область энергосвыделения преимущественно в направлении силовых линий поля и излучение в этом диапазоне спектра имеет карандашную диаграмму направленности. В рамках такого сценария угол раствора диаграммы направленности жесткого излучения в RX J1037.5-5647 должен составлять $\theta \sim 2\beta \approx 16^\circ$.

В соответствии с расчетами Баско и Сюняева [7], такой угол раствора ожидается в случае аккреции на нейтронную звезду, магнитное поле на поверхности которой удовлетворяет условию

$$B_0 > B_{\text{bs}} = \pi \frac{m_e^2 V_{\text{ff}}^2 c}{h e} \approx 5 \times 10^{12} \text{ Гс}, \quad (8)$$

и рентгеновская светимость пульсара не превосходит $L^* \approx 4 \times 10^{36}$ эрг/с. Здесь m_e и e - масса и заряд электрона, c - скорость света, $V_{\text{ff}} = (2GM_{\text{ns}}/R_{\text{ns}})^{1/2}$ - скорость свободного падения потока у поверхности нейтронной звезды и h - постоянная Планка. Угол раствора пучка жесткого излучения при этих условиях оценивается как $\theta \sim (1/\tau_0)^{1/2}$, где $\tau_0 \approx 20$ - оптическая толщина по томпсоновскому рассеянию, соответствующая лучевой плотности плазмы 50 г см^{-2} в области торможения аккреционного потока у поверхности нейтронной звезды вследствие нуклон-нуклонных столкновений. Легко видеть, что RX J1037.5-5647 удовлетворяет указанным выше условиям, и, таким образом, интерпретация пульсационной активности жесткого рентгеновского излучения в терминах анизотропии его диаграммы направленности является реалистичной. Следует также отметить, что угол наклона орбиты двойной системы в рамках такого сценария не должен существенно превышать угол раствора диаграммы направленности жесткого рентгеновского излучения.

4. *Заключение.* Проведенный в этой работе анализ характеристик рентгеновского пульсара RX J1037.5-5647 позволяет ассоциировать его с нейтронной звездой, которая вращается с периодом 853 с и обладает магнитным полем $B_0 \approx 7 \times 10^{12}$ Гс. Нейтронная звезда находится в состоянии дисковой аккреции с темпом $\dot{M} \approx (5-50) \times 10^{13}$ г/с. Аккреционная колонка

является полый. Ее радиус $a_p \approx 130$ м существенно превосходит толщину аккреционного канала $d_p \sim (0.01 - 0.1)a_p$. Энергия, выделяемая в канале, излучается преимущественно в форме жестких ($kT \sim 2 - 10$ кэВ) рентгеновских квантов. Взаимодействие этих квантов с поверхностью нейтронной звезды приводит к образованию горячего пятна в полости аккреционной колонки, излучение которого является чернотельным с температурой $kT_{bb} \approx 1.3$ кэВ. Малая амплитуда изменений интенсивности компонента мягкого рентгеновского излучения ($\sim 15\%$), происходящих по мере вращения нейтронной звезды, указывает на то, что угол наклона магнитной оси нейтронной звезды к ее оси вращения удовлетворяет неравенству $\beta < 8^\circ$. Пульсационная активность жесткого компонента в этом случае связана с анизотропией диаграммы направленности излучения, генерируемого в аккреционном канале. В случае RX J1037.5-5647 диаграмма направленности жесткого компонента излучения является карандашной с углом раствора $\sim 15^\circ$. Кривая блеска пульсара в этом случае может быть интерпретирована в предположении, что угол наклона орбиты двойной системы $i \sim 10^\circ$.

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН № 19 и Программы "Ведущие научные школы" (грант № НШ-3645.2010.2).

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ikhsanov@gao.spb.ru

THE NATURE OF SOFT X-RAY EXCESS IN THE SPECTRUM OF RX J1037.5-5647

N.R.IKHSANOV, N.G.BESKROVNAYA

The source responsible for the soft X-ray excess in the spectrum of RX J1037.5-5647 is associated with the hot spot on the surface of the neutron star, located at the base of the accretion column. The intensity of this emission varies with a small amplitude (of about 15%), while the intensity of the hard component changes significantly with the period of the neutron star rotation. We show that such situation can be realized if the angle between the spin axis and magnetic axis of the neutron star does not exceed 8° . Variations of the hard X-ray component in this case can be explained in terms of anisotropy of the radiation pattern. The inclination angle of the binary system orbit in this scenario is close to 10° .

Key words: *stars:close binary systems:accretion:neutron stars:pulsars - individual: RX J1037.5-5647*

ЛИТЕРАТУРА

1. *N. La Palombara, L.Sidoli, P.Esposito, A.Tiengo, S.Mereghetti*, *Astron. Astrophys.*, **505**, 947, 2009.
2. *C.Motch, F.Huberl, K.Dennerl, M.Pakull, E.Janot-Pacheco*, *Astron. Astrophys.*, **323**, 853 1997.
3. *P.Reig, P.Roche*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **306**, 100, 1999.
4. *N.R.Ikhsanov*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **375**, 698, 2007.
5. *M.M.Basko, R.A.Sunyaev*, *Astron. Astrophys.*, **42**, 311, 1975.
6. *P.Ghosh, F.K.Lamb*, *Astophys. J.*, **232**, 259, 1979.
7. *M.M.Basko, R.A.Sunyaev*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **175**, 395, 1976.