



Оценка скорости звездного ветра массивных компонентов рентгеновских двойных систем

Н.Р. Ихсанов^{1,2}, В.Ю. Ким^{1,3} и Н.Г. Бескровная^{1*}

¹ГАО РАН, ²ИПА РАН, ³АФИФ, Казахстан

Поступила в редакцию 6 ноября 2024 / Принята к публикации 8 ноября 2024

Аннотация

Обсуждаются проявления аккреционных пульсаров в массивных рентгеновских двойных системах с ветровой аккрецией. Отмечается, что рентгеновская светимость пульсара в этом случае зависит от темпа захвата газа нейтронной звездой из ветра ее массивного компонента. Ключевым параметром, ограничивающим темп захвата, является скорость нейтронной звезды относительно ветра, истекающего в плоскости орбиты двойной системы. Мы показываем, что наблюдаемые значения светимости рентгеновских пульсаров в исследуемых нами системах можно объяснить при условии, что скорость звездного ветра массивного компонента в плоскости орбиты двойной системы не превосходит 1000 км с^{-1} , принимая в большинстве случаев среднее значение в интервале $300 - 600 \text{ км с}^{-1}$.

ключевые слова: аккреция, пульсары, звездный ветер, массивные рентгеновские двойные системы

Введение

В предыдущей статье (Ихсанов и др., 2024) мы обсуждали оценку скорости звездного ветра массивного компонента в рентгеновской двойной системе ОАО 1657-415, выполненную на основе методики, исходно предложенной Delgado-Martí et al. (2000). Предметом исследований в рамках этой методики является массивная рентгеновская двойная система (МРДС) с нейтронной звездой, находящейся в состоянии ветровой аккреции. Это подразумевает, что нейтронная звезда, двигаясь по орбите, захватывает газ из звездного ветра своего массивного компаньона и аккрецирует его на свою поверхность. Измерение интенсивности рентгеновского излучения, генерируемого в ходе этого процесса, позволяет оценить темп аккреции газа на поверхность нейтронной звезды и, соответственно, минимальное значение темпа, с которым она захватывает газ из ветра своего компаньона. Комбинируя этот результат с информацией о массивном компоненте системы, полученной из наблюдений, мы приходим к оценке скорости нейтронной звезды относительно звездного ветра массивной звезды, истекающего в плоскости орбиты системы (см. параграф 1). В этой статье мы расширяем список исследуемых объектов и приводим полученные нами оценки относительной скорости нейтронной звезды в некоторых из наиболее полно изученных МРДС (см. параграф 2). Предположения, принятые нами в ходе оценок, и некоторые выводы из представленных результатов кратко обсуждаются в параграфе 3.

* e-mail: beskrovnaya@yahoo.com

1 Методика оценки

Светимость источника, возникающего вследствие аккреции газа на поверхность нейтронной звезды, оценивается выражением (см., например, [Липунов, 1987](#), и приведенную там литературу)

$$L_a = \dot{\mathcal{M}}_a \frac{GM_{\text{ns}}}{R_{\text{ns}}}. \quad (1)$$

Здесь $\dot{\mathcal{M}}_a$ – темп аккреции, т.е. количество вещества, выпадающего в единицу времени на поверхность нейтронной звезды, масса и радиус которой, соответственно, M_{ns} и R_{ns} . В рамках сценария аккреции на нейтронную звезду с сильным магнитным полем (соответствующему рассматриваемому нами случаю аккреционных рентгеновских пульсаров) энергия аккреционного источника высвечивается преимущественно в “классической” части рентгеновского диапазона (с энергией квантов $\sim 1 - 10$ кэВ). Это создает наиболее благоприятную возможность оценки темпа аккреции на поверхность нейтронных звезд,

$$\dot{\mathcal{M}}_a = \frac{L_x R_{\text{ns}}}{GM_{\text{ns}}}, \quad (2)$$

по наблюдениям интенсивности рентгеновского излучения этих объектов в совокупности с оценками их удаленности от солнечной системы и при учете того обстоятельства, что масса и радиус нейтронных звезд ограничены достаточно узким интервалом возможных значений ([Потехин, 2010](#)).

Темп, с которым нейтронная звезда захватывает газ, двигаясь сквозь звездный ветер своего компаньона, оценивается выражением

$$\dot{\mathcal{M}}_c = \pi r_G^2 \rho_w v_{\text{rel}} = \frac{4\pi(GM_{\text{ns}})^2 \rho_w}{v_{\text{rel}}^3}. \quad (3)$$

Здесь

$$r_G = \frac{2GM_{\text{ns}}}{v_{\text{rel}}^2} \quad (4)$$

определяет радиус гравитационного захвата нейтронной звезды (так называемый радиус Бонди), двигающейся относительно звездного ветра со скоростью

$$v_{\text{rel}} = \left(v_{\text{orb}}^2 + v_w^2 + c_{s(w)}^2 \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где v_{orb} – орбитальная скорость нейтронной звезды, v_w – скорость звездного ветра (в системе отсчета массивного компонента) и $c_{s(w)}$ – скорость звука в звездном ветре. Наконец, ρ_w – плотность звездного ветра в области его взаимодействия с нейтронной звездой, которая в приближении сферически симметричного истечения звездного ветра оценивается выражением

$$\rho_w = \frac{\dot{\mathcal{M}}_{\text{opt}}}{4\pi a^2 v_w}. \quad (6)$$

Здесь $\dot{\mathcal{M}}_{\text{opt}}$ – темп потери массы оптическим компонентом системы в виде звездного ветра и a – расстояние между компонентами системы.

Комбинируя выражения (3) и (6) в приближении $v_{\text{rel}} \approx v_w$ и решая неравенство $\dot{\mathcal{M}}_a \leq \dot{\mathcal{M}}_c$ относительно v_{rel} , находим $v_{\text{rel}} \leq v_{\text{max}}$, где

$$v_{\text{max}} \simeq 500 \text{ км с}^{-1} \times L_{36}^{-1/4} R_6^{-1/4} m^{3/4} \left(\frac{a}{0.21 \text{ AU}} \right)^{-1/2} \left(\frac{\dot{\mathcal{M}}_{\text{out}}}{10^{-7} M_{\odot} \text{ год}^{-1}} \right)^{1/4} \quad (7)$$

определяет максимально возможную величину скорости звездного ветра в плоскости орбиты нейтронной звезды. Здесь $L_{36} = L_x/10^{36} \text{ эрг с}^{-1}$, $R_6 = R_{\text{ns}}/10^6 \text{ см}$ и $m = M_{\text{ns}}/1.4 M_{\odot}$.

Таблица 1: Оценка допустимого интервала значений скорости звездного ветра в МРДС

Объект	L_x $\times 10^{36}$ эрг/с	M_{opt} M_{\odot}	Спектр. класс	P_{orb} сутки	a a.e.	v_{wind} (min) км/с	v_{wind} (max) км/с
Cen X-3	0.58–14	20.2	O6.5 II-III	2.03	0.08	440	990
4U 1538-52	0.42–4.3	20	B0.2 Ia	3.73	0.11	510	800
Vela X-1	0.061–10	26	B0.5 Ia	8.96	0.23	300	1000
ОАО 1657-415	1–20	14.3	Ofpe/WNL	10.45	0.21	300	500
2S 0114+650	0.67–12	16	B1 Ia	11.6	0.26	260	540
GX 301-2	0.23–30	43	B1.5 Ia	41.5	0.83	110	390
X Per	0.12–0.63	15.5	B0 Ve	250	2.0	190	300
RX J0146.9+6121	0.1-0.11	9.6	B1 V	330	2.1	296	302

2 Оценка относительной скорости

Результаты оценки относительной скорости нейтронной звезды в МРДС, выполненной по описанной выше методике с использованием выражения (7) для наиболее полно изученных квазистационарных рентгеновских пульсаров в МРДС представлены в Таблице. В ней также приведены значения основных параметров этих объектов, использованных нами при вычислениях (см. Falanga et al., 2000; Sidoli & Paizis, 2018; Kim et al., 2023, и приведенную там литературу): максимальной и минимальной светимости рентгеновского источника, массы и спектрального класса оптического (массивного) компонента системы, орбитального периода и размера системы. Величины относительной скорости вычислены для состояния максимальной светимости, v_{wind} (min), и минимальной светимости, v_{wind} (max).

3 Обсуждение

Полученные нами оценки допустимого интервала значений максимальной скорости нейтронной звезды относительно звездного ветра ее компаньона указывают, что скорость ветра в плоскости орбиты системы для всех рассмотренных нами объектов существенно меньше значений терминальной скорости и скорости ветра, истекающего из полярных областей массивной звезды. Таким образом, наш результат свидетельствует в пользу гипотезы о многокомпонентной структуре звездного ветра массивных звезд.

Нижняя граница полученного нами интервала значений относительной скорости во всех рассмотренных случаях оказывается больше орбитальной скорости нейтронной звезды, значение которой при условии $M_{\text{ns}} \ll M_2$ и малом эксцентриситете орбиты хорошо аппроксимируется кеплеровской скоростью,

$$v_k^{(\text{ns})}(a) \simeq 240 \text{ км с}^{-1} \left(\frac{M_2}{15 M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{a}{0.24 \text{ AU}} \right)^{-1/2}. \quad (8)$$

Здесь M_2 – масса оптического компонента системы и a – расстояние между компонентами системы (примерно соответствующее радиусу орбиты нейтронной звезды). Это дает основание полагать, что относительная скорость нейтронной звезды близка к собственной скорости звездного ветра и, таким образом, аппроксимация $v_w \approx v_{\text{w}}$, использованная нами при выводе выражения (7), допустима. Здесь следует, однако, заметить, что скорость звука в истекающем ветре существенно зависит от наличия или отсутствия горячей короны массивного компонента системы. Прямая наблюдательная идентификация корон в МРДС затруднительна в силу высокой интенсивности рентгеновского излучения аккреционного источника. В отношении одиночных звезд ранних спектральных классов существуют свидетельства присутствия горячих корон, температура которых

может достигать нескольких десятков миллионов градусов (Schulz et al., 2003). Скорость звука в газе, нагретом до таких температур, сопоставима с полученными нами оценками относительной скорости нейтронной звезды. Вместе с тем, скорость истечения газа, нагретого до такой температуры, также будет сопоставима (или превосходить) скорость звука. Принимая это во внимание, можно утверждать, что выбранная нами аппроксимация $v_{\text{rel}} \approx v_w$ вполне допустима.

Наконец, следует обратить внимание, что значения относительной скорости в тесных системах (с относительно малой величиной орбитального периода) и в широких парах оказываются сопоставимы. Более того, заметна тенденция уменьшения величины критической скорости с увеличением размера системы. Этот несколько неожиданный результат указывает, что скорость ветра, истекающего в плоскости орбиты системы, с расстоянием от массивного компонента изменяется незначительно и, скорее всего, в сторону уменьшения. Следует также заметить, что умеренная скорость ветра в плоскости орбиты системы оказывается присуща не только системам с Ве-звездами, для которых такой результат является вполне ожидаемым, но и системам, нормальные компоненты которых не показывают Ве-феномена и/или являются звездами существенно более раннего спектрального класса.

Благодарности

НРИ и НГБ выражают благодарность Астрофизическому институту им. А.Г. Фесенкова за плодотворное сотрудничество и теплое гостеприимство.

Список литературы

- Ихсанов Н.Р., Ким В.Ю. и Бескровная, Н.Г. (2024). Оценка скорости звездного ветра массивного компонента ОАО 1657-415. Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове 233, с. 34–38.
- Delgado-Martí, H., Levine, A.M., Pfahl, E. and Rappaport, S.A. (2000), The orbit of X Persei and its neutron star companion. *ApJ*, 546, p. 455-469.
- Липунов, В.М. (1987) Астрофизика нейтронных звезд. М.: Наука, 1987. – 296 с.
- Потехин, А.Ю. (2010). Физика нейтронных звезд. *Успехи физических наук*, 180, с. 1279–1304.
- Falanga, M., E. Bozzo, E., Lutovinov, A. et al. (2015), Ephemeris, orbital decay, and masses of ten eclipsing high-mass X-ray binaries. *A&A*, 577, A130, p. 1-16
- Kim, V., Izmailova, I., and Aimuratov, Y. (2023), Catalog of the Galactic Population of X-Ray Pulsars in High-mass X-Ray Binary Systems. *ApJS*, 268 (1), 21 *Astrophys. J. Suppl.* 268, 21 (25 pp.)
- Schulz, N.S., Canizares, C., Huenemoerder, D. and Tibbets, K. (2003), X-ray modeling of very young early-type stars in the orion trapezium: signatures of magnetically confined plasmas and evolutionary implications. *ApJ*, 595, p. 365–383
- Sidoli, L., Paizis, A. (2018), An INTEGRAL overview of High-Mass X-ray Binaries: classes or transitions? *MNRAS*, 481, p. 2779–2803

On the estimate of the stellar wind velocity of the massive components in X-ray binary systems

N.R. Ikhsanov^{1,2}, V.Yu. Kim^{1,3} and N.G. Beskrovnaya¹

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo, ² The Institute of Applied Astronomy of the RAS, ³ Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan

Received 6 November 2024 / Accepted 8 November 2024

Abstract

We discuss manifestations of the wind-fed accreting pulsars in the massive X-ray binary systems. We point out that the X-ray luminosity of a pulsar in this case depends on the mass capture rate by a neutron star from the wind of its massive component. The key parameter constraining the mass capture rate is the relative velocity of the neutron star with respect to the wind outflowing in the orbital plane of the binary system. We show that the observed luminosity of the X-ray pulsars in these systems can be explained under condition that the velocity of stellar wind of the massive component in the orbital plane of the system does not exceed 1000 km s^{-1} , while the mean value in most cases is in the interval $300\text{--}600 \text{ km s}^{-1}$.

key words: accretion, pulsars, stellar wind, high-mass X-ray binaries