



Оценка скорости звездного ветра массивного компонента ОАО 1657-415

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

¹ГАО РАН, ²ИПА РАН, ³АФИФ, Казахстан

Поступила в редакцию 3 мая 2024 / Принята к публикации 13 мая 2024

Аннотация

Обсуждаются проявления аккрецирующей нейтронной звезды в массивной рентгеновской двойной системе ОАО 1657-415. Мы оцениваем темп обмена массой между компонентами системы в рамках сценария ветровой аккреции и показываем, что рентгеновскую светимость пульсара можно объяснить лишь при условии, что скорость звездного ветра массивного компонента в плоскости орбиты двойной системы находится в интервале $200\text{--}500\text{ км с}^{-1}$.

ключевые слова: аккреция, пульсары, звездный ветер, массивные рентгеновские двойные системы, Индивидуальные: ОАО 1657-415

Введение

Delgado-Martí, et al. (2001) обратили внимание, что массивные рентгеновские двойные системы с нейтронными звездами при определенных условиях оказываются уникальными естественными лабораториями по изучению звездного ветра, генерируемого звездами ранних спектральных классов. Нейтронная звезда в этих системах выступает в качестве зонда. Двигаясь по орбите сквозь звездный ветер своего массивного компаньона, она захватывает газ своим гравитационным полем и аккрецирует его на свою поверхность. Свойства рентгеновского источника, появляющегося вследствие этого процесса, позволяют судить о количестве газа, захватываемого нейтронной звездой в единицу времени (темп обмена массой между компонентами системы) и угловом моменте вещества, падающего на ее поверхность. Комбинация этой информации с наблюдаемыми параметрами двойной системы и характеристиками ее массивного компонента позволяет нам оценить физические условия в звездном ветре, истекающем от массивной звезды в плоскости орбиты системы.

Оценки, выполненные Delgado-Martí, et al. (2001) в рамках предложенной ими методики в отношении массивной рентгеновской двойной системы X Персея, позволили установить, что скорость звездного ветра массивной звезды в плоскости орбиты этой системы, по-видимому, не превосходит 150 км с^{-1} . В противном случае количество вещества, захватываемое нейтронной звездой из ветра ее компаньона, оказывается недостаточным для объяснения наблюдаемой величины рентгеновского излучения пульсара. Вместе с тем, полученное ими значение скорости ветра в плоскости орбиты системы почти на порядок величины уступает типичному значению терминальной скорости ветра горячих массивных звезд и в несколько раз меньше оценки скорости ветра звезды в данной конкретной системе, вычисленной из анализа спектральных линий, наблюдаемых от X Персея в ультрафиолетовой части спектра.

В этой работе мы применили методику, предложенную Delgado-Martí, et al. (2001), для оценки скорости звездного ветра массивной звезды в рентгеновской двойной системе ОАО 1657-415. Наши оценки, следующие за кратким описанием основных параметров системы, представлены в

*e-mail:beskrovnaya@yahoo.com

Таблица 1: Наблюдаемые параметры пульсара ОАО 1657-415

Sp опт.	M_{opt} (M_{\odot})	P_{orb} (сут)	a (АЕ)	P_s (сек)	L_x (эрг/с)	d (кпк)
Ofpe [a]	14.3 ± 0.8 [a]	10.45 [b]	0.24	37.3 [c]	$(1-20) \times 10^{36}$ [d]	6.4 ± 1.5 [f]

[a] - Mason, et. al. (2009) , [b] - Jenke, et. al. (2012), [c] - Falanga, et. al. (2015),
[d] - Sidoli, Paizis (2018), [e] - Orlandini, et. al. (1999), [f] - Chakrabarty, et. al. (1993),

следующем параграфе. Обсуждая полученный результат в параграфе 2, мы отмечаем, что метод, предложенный в работе Delgado-Martí, et al. (2001), существенно зависит как от модели аккреции, так и от внутренних свойств нейтронной звезды, но, однако, позволяет надежно определить предельно допустимые границы параметров звездного ветра. Полученное нами значение предельно допустимой скорости звездного ветра массивной звезды в ОАО 1657-415 существенно выше оценки скорости звездного ветра массивного компонента в X Персея, полученной Delgado-Martí, et al. (2001), но также существенно меньше типичных значений терминальной скорости ветра от звезд ранних спектральных классов.

1 Скорость звездного ветра

ОАО 1657-415 (далее ОАО 1657) представляет собой тесную массивную рентгеновскую двойную систему, параметры которой приведены в Таблице 1. Этот объект принадлежит к числу наиболее полно изученных затменных ярких квазиравновесных аккреционных рентгеновских пульсаров, параметры орбиты и величина рентгеновского потока которого определены с высокой степенью надежности. Некоторую неопределенность в отношении величины его рентгеновской светимости вносят лишь противоречивые оценки расстояния до этого источника. Вместе с тем, не вызывает сомнений, что массивный компонент системы не заполняет своей полости Роша и обмен массой между компонентами системы происходит в соответствии со сценарием ветровой аккреции.

Рентгеновская светимость пульсара оценивается выражением (см., например Липунов, 1987, и приведенную там литературу)

$$L_x = \dot{M}_a \frac{GM_{\text{ns}}}{R_{\text{ns}}}, \quad (1)$$

где \dot{M}_a – темп аккреции, т.е. количество вещества, падающего на поверхность нейтронной звезды массой M_{ns} и радиуса R_{ns} в единицу времени.

В рамках сценария стационарной задачи темп аккреции принимается равным темпу захвата вещества нейтронной звездой из ветра ее массивного компонента, который оценивается выражением

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

Здесь

$$r_G = \frac{2GM_{\text{ns}}}{v_{\text{rel}}^2} \quad (3)$$

определяет радиус гравитационного захвата (так называемый радиус Бонди) вещества нейтронной звезды и ρ_w – плотность звездного ветра в области его взаимодействия с нейтронной звездой. Скорость нейтронной звезды относительно ветра в области взаимодействия в общем случае оценивается выражением

$$v_{\text{rel}} = \left(v_{\text{orb}}^2 + v_w^2 + c_{s(w)}^2 \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где v_{orb} – орбитальная скорость нейтронной звезды, v_w – скорость звездного ветра и $c_{s(w)}$ – скорость звука в звездном ветре.

В интересующих нас условиях скоростью звука в выражении (4) можно пренебречь (полагая, что температура звездного ветра не превосходит несколько миллионов градусов). Минимально возможное значение относительной скорости нейтронной звезды в этом случае ограничено величиной ее орбитальной скорости, которую, с учетом малого эксцентриситета орбиты и реализуемого в системе неравенства $M_{\text{ns}} \ll M_2$, можно аппроксимировать кеплеровской скоростью, т.е. $v_{\text{rel}} \geq v_k^{(\text{ns})}(a)$, где

$$v_k^{(\text{ns})}(a) = \left(\frac{GM_2}{a} \right)^{1/2} \simeq 240 \text{ км с}^{-1} \left(\frac{M_2}{15 M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{a}{0.24 \text{ AU}} \right)^{-1/2}. \quad (5)$$

Здесь M_2 – масса оптического компонента системы и a – расстояние между компонентами системы (примерно соответствующее радиусу орбиты нейтронной звезды). Подставляя это значение скорости в выражение (2) и решая полученное уравнение в системе с уравнением (1), находим нижний предел на плотность звездного ветра в плоскости орбиты системы, $\rho_w \geq \rho_0$, где

$$\rho_0 = \frac{L_x R_{\text{ns}}}{4\pi (GM_{\text{ns}})^3} \left(\frac{GM_2}{a} \right)^{3/2} \simeq 10^{-16} \text{ г см}^{-3} L_{36} R_6 m^{-3} \left(\frac{M_2}{15 M_{\odot}} \right)^{3/2} \left(\frac{a}{0.24 \text{ AU}} \right)^{-3/2}, \quad (6)$$

где $L_{36} = L_x/10^{36}$ эрг с⁻¹, $R_6 = R_{\text{ns}}/10^6$ см и $m = M_{\text{ns}}/1.4 M_{\odot}$.

Полагая, с другой стороны, что скорость звездного ветра превосходит орбитальную скорость нейтронной звезды в приближении сферически симметричного истечения звездного ветра от массивного компонента системы, находим, следуя методике, предложенной в работе (Delgado-Martí, et al., 2001), рентгеновскую светимость пульсара в виде

$$L_x = \dot{\mathfrak{M}}_c \frac{GM_{\text{ns}}}{R_{\text{ns}}} = \frac{\dot{\mathfrak{M}}_{\text{out}} (GM_{\text{ns}})^3}{a^2 R_{\text{ns}} v_w^4}, \quad (7)$$

где $\dot{\mathfrak{M}}_{\text{out}}$ – темп потери массы оптическим компонентом системы в виде звездного ветра. Решая это уравнение относительно v_w , находим $v_w \leq v_{\text{max}}$, где

$$v_{\text{max}} \simeq 440 \text{ км с}^{-1} \times m^{3/4} R_6^{-1/4} L_{36}^{-1/4} \left(\frac{a}{0.24 \text{ AU}} \right)^{-1/2} \left(\frac{\dot{\mathfrak{M}}_{\text{out}}}{10^{-7} M_{\odot} \text{ год}^{-1}} \right)^{1/4}. \quad (8)$$

Рентгеновская светимость источника в этом выражении нормирована на величину, полученную в предположении, что исследуемый нами объект находится на расстоянии порядка 6 кпк. Используя оценку минимально возможного расстояния до источника $d \geq 2.5$ кпк, полученную на основе наблюдений телескопа Gaia (Saavedra et al., 2022), можно утверждать, что скорость звездного ветра в плоскости орбиты системы не превосходит 700 км с^{-1} .

2 Заключение

Представленный нами анализ процесса ветровой аккреции в массивной рентгеновской двойной системе ОАО 1657-415 указывает на то, что скорость движения нейтронной звезды относительно звездного ветра ее массивного компаньона в этой системе может быть ограничена неравенством $v_k^{(\text{ns})}(a) \leq v_{\text{rel}} \leq v_{\text{max}}$, нижний и верхний пределы в котором определяются, соответственно, выражениями (5) и (8). Неопределенность в оценке величины нижнего предела, который соответствует орбитальной скорости нейтронной звезды, в рассматриваемом нами случае затменной двойной системы незначительна и позволяет оценить нижнюю границу допустимого значения плотности звездного ветра в области его взаимодействия с нейтронной звездой выражением (6). Оценка верхней границы относительной скорости является модельно зависимой. Она получена

в предположении о сферически симметричном истечении ветра массивного компонента системы со скоростью, существенно превосходящей орбитальную скорость нейтронной звезды. Величина этой скорости, кроме того, зависит от расстояния до объекта, которое до настоящего времени остается предметом дискуссии. Вместе с тем, полученная нами оценка, представленная выражением (8), может быть в дальнейшем использована для анализа структуры аккреционного потока и картины аккреции в целом.

Благодарности

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

Список литературы

- Липунов, В.М. (1987) Астрофизика нейтронных звезд. М.: Наука, 1987. – 296 с.
- Chakrabarty D., Grunsfeld J. M., Prince T. A., Bildsten L., Finger M. H., Wilson R. B., Fishman G. J., Meegan C. A., Paciesas W. S. Discovery of the Orbit of the X-Ray Pulsar OAO 1657-415. // *The Astrophysical Journal* - 1993. - Vol. 403. - P.L33. - DOI: <https://doi.org/10.1086/186715>
- Delgado-Martí H., Levine A. M., Pfahl E., Rappaport S. A. The Orbit of X Persei and Its Neutron Star Companion. // *The Astrophysical Journal* - 2001. - Vol. 546. - P.455-468. - DOI: <https://doi.org/10.1086/318236>
- Falanga M., Bozzo E., Lutovinov A., Bonnet-Bidaud J. M., Fetisova Y., Puls J. Ephemeris, orbital decay, and masses of ten eclipsing high-mass X-ray binaries. // *Astronomy and Astrophysics* - 2015. - Vol. 577. - P.A130. - DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425191>
- Jenke P. A., Finger M. H., Wilson-Hodge C. A., Camero-Arranz A. Orbital Decay and Evidence of Disk Formation in the X-Ray Binary Pulsar OAO 1657-415. // *The Astrophysical Journal* - 2012. - Vol. 759. - P.124. - DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/759/2/124>
- Mason A. B., Clark J. S., Norton A. J., Negueruela I., Roche P. Spectral classification of the mass donors in the high-mass X-ray binaries EXO 1722-363 and OAO 1657-415. // *Astronomy and Astrophysics* - 2009. - Vol. 505. - P.281-286. - DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912480>
- Orlandini M., dal Fiume D., del Sordo S., Frontera F., Parmar A. N., Santangelo A., Segreto A. The broad-band spectrum of OAO1657-415 with it BeppoSAX: in search of cyclotron lines. // *Astronomy and Astrophysics* - 1999. - Vol. 349. - P.L9-L12. - DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/9908094>
- Saavedra, E.A., Fogantini, F.A., Combi, J.A., Garsia, F., Chaty, S. A NuSTAR observation of the eclipsing binary system OAO 1657-415: The revival of the cyclotron line. // *Astronomy and Astrophysics* - 2022. - Vol. 659. - A48. - DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142066>
- Sidoli L., Paizis A. An INTEGRAL overview of High-Mass X-ray Binaries: classes or transitions?. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* - 2018. - Vol. 481. - P.2779-2803. - DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2428>

On the estimate of the stellar wind velocity of the massive component in OAO 1657-415

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 3 May 2024 / Accepted 13 May 2024

Abstract

We discuss manifestations of the accreting neutron star in the massive X-ray binary system OAO 1657-415. We estimate the mass transfer rate between the system components within a scenario of wind-fed accretion and show that the X-ray luminosity of the pulsar can be explained only under condition that the velocity of stellar wind of the massive component in the orbital plane of the system is in the interval 200–500 km s⁻¹.

key words: accretion, pulsars, stellar wind, massive X-ray binaries, Individual: OAO 1657-415