





О состоянии нейтронной звезды в А 0535+26 на фазе низкой рентгеновской светимости системы

Н.Р. Ихсанов^{1,2}, Н.Г. Бескровная^{1*}

¹ГАО РАН, ²ИПА РАН

Поступила в редакцию 27 ноября 2025 / Принята к публикации 28 ноября 2025

Аннотация

Обсуждается процесс аккреции на нейтронную звезду в массивной двойной системе А 0535+26. Одной из особенностей этого источника является сильная переменность рентгеновского потока, что позволяет условно классифицировать состояние системы как высокое, основное и низкое. Временные и спектральные характеристики рентгеновского излучения системы во всех трех состояниях соответствуют модели магнитосферной аккреции на нейтронную звезду. Однако радиус остановки аккреционного потока, ожидаемый в сценарии сферической аккреции (Альвенский радиус), оцениваемый для параметров системы в низком состоянии, оказывается больше радиуса коротации нейтронной звезды. Это поднимает вопрос о возможности моделирования низкого состояния системы в терминах аккреции на нейтронную звезду. Мы показываем, что эта проблема не возникает, если аккреция происходит из диска. В этом случае переменность рентгеновского излучения системы может быть интерпретирована в терминах изменения темпа аккреции на поверхность нейтронной звезды без привлечения дополнительных предположений.

ключевые слова: аккреция, аккреционные диски, тесные двойные системы, магнитные поля, рентгеновские пульсары, звезды:нейтронные звезды, звезды: индивидуальные: А 0535+26

Введение

А 0535+26 представляет собой массивную рентгеновскую двойную систему, параметры которой приведены в таблице 1. Нормальным компонентом системы является массивная звезда О9.7Ше, которая не заполняет свою полость Роша и теряет вещество в форме звездного ветра. Вырожденным компонентом является нейтронная звезда, которая находится в состоянии ветровой магнитосферной аккреции и проявляет себя как аккреционный пульсар (детальный обзор параметров и свойств системы см., например, Camero-Arranz et al., 2012).

Одним из отличительных свойств системы является высокая амплитуда переменности ее рентгеновского блеска. На основании этого параметра можно условно выделить три состояния системы: высокое, основное и низкое. В высоком состоянии рентгеновская светимость системы достигает величины $L_x^{(h)} \sim 10^{37} - 10^{38}$ эрг/с. Параметры рентгеновского источника в течение этой фазы соответствуют сценарию магнитосферной аккреции из кеплеровского диска. В основном состоянии система проявляет себя как аккреционный рентгеновский пульсар со средней светимостью $L_x^{(b)} \sim 10^{35}$ эрг/с. В низком состоянии рентгеновская светимость системы опускается до значения $L_x^{(l)} \simeq 5 \times 10^{33}$ эрг/с, но рентгеновский источник при этом продолжает, как и в других состояниях системы, пульсировать с периодом вращения нейтронной звезды и по своим характеристикам соответствует проявлениям, ожидаемым от аккреционного пульсара (Ballhausen et al., 2017).

*e-mail:beskrovnaya@yahoo.com

Таблица 1: Параметры А 0535+26 (см. [Ikhsanov \(2001\)](#) и приведенную там литературу)

Параметр	А 0535+26
Расстояние	2 кпк
Орбитальный период	111 д
Эксцентриситет	~ 0.45
Состав системы	O9.7 IIIe + NS
Темп течения массы в системе при $L_x^{\max} = 1.2 \times 10^{38} \text{ эрг с}^{-1}$	$10^{-8} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$
Темп течения массы в системе при $L_x^{\min} = 1 \times 10^{33} \text{ эрг с}^{-1}$	$10^{-13} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$
НЗ: период вращения (P_s)	104 с
НЗ: темп торможения вращения (между вспышками) ($\dot{\nu}_s$)	$1-3 \times 10^{-13} \text{ с с}^{-1}$
НЗ: темп ускорения вращения (во время вспышек) ($\dot{\nu}_s$)	$6-12 \times 10^{-12} \text{ Гц с}^{-1}$
НЗ: дипольный магнитный момент	$2.5 \times 10^{30} \text{ Гс см}^3$
НЗ: поверхностное магнитное поле	$5 \times 10^{12} \text{ Гс}$
НЗ: угол наклона магнитной оси к оси вращения	$30^\circ - 40^\circ$

Переходы системы между различными состояниями светимости можно объяснить в терминах изменения темпа обмена массой между компонентами системы и, как следствие, темпа аккреции на поверхность нейтронной звезды, $\dot{M}_a = L_x R_{\text{ns}} / GM_{\text{ns}}$, где M_{ns} и R_{ns} – масса и радиус нейтронной звезды. Это объяснение является, однако, допустимым лишь при условии, что радиус магнитосферы нейтронной звезды, r_m , во всех трех состояниях не превосходит ее радиуса коротации,

$$r_{\text{cor}} = \left(\frac{GM_{\text{ns}}}{\omega_s^2} \right)^{1/3} \simeq 4 \times 10^9 \text{ см} \times m^{1/3} \left(\frac{P_s}{104 \text{ с}} \right)^{2/3}. \quad (1)$$

Здесь M_{ns} – масса нейтронной звезды ($m = M_{\text{ns}}/1.4 M_{\odot}$), вращающейся с угловой скоростью $\omega_s = 2\pi/P_s$, где P_s – период ее вращения.

В следующем параграфе мы показываем, что это условие выполнено в рамках сценария дисковой аккреции, но встречается с серьезными трудностями в рамках сценария сферической аккреции. Это позволяет нам заключить, что во всех трех состояниях светимости А 0535+26 аккреция на нейтронную звезду в этой системе происходит из диска.

1 Оценка радиуса магнитосферы

Радиус, на котором дипольное магнитное поле оказывается способным остановить сферический аккреционный поток, оценивается выражением

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

которое в литературе широко известно под именем Альвеновского радиуса. Это выражение получено на основе баланса между динамическим давлением газа, свободно падающим на звезду в радиальном направлении с темпом \dot{M} , и давлением магнитного поля нейтронной звезды, дипольный магнитный момент которой $\mu = (1/2)B_{\text{ns}}R_{\text{ns}}^3$ определяется ее радиусом, R_{ns} , и величиной магнитного поля на ее поверхности, B_{ns} .

Таблица 2: Отношение радуса магнитосферы к радиусу коротации нейтронной звезды в А 0535+26 в рамках сценариев сферической (r_A/r_{cor}) и дисковой (r_N/r_{cor}) аккреции

Состояние	темп аккреции	r_A/r_{cor}	r_N/r_{cor}
Высокое	$5 \times 10^{17} \text{ г/с}$	0.1	0.002
Основное	10^{15} г/с	0.6	0.02
Низкое	$5 \times 10^{13} \text{ г/с}$	1.4	0.16

Величины отношения Альвеновского радиуса к радиусу коротации, полученные для различных состояний светимости А 0535+26, приведены в таблице 2. Как видно из этой таблицы, Альвеновский радиус в состоянии низкой светимости системы оказывается больше радиуса коротации нейтронной звезды. Это означает, что либо аккреции вещества на поверхность нейтронной звезды в этом состоянии препятствует центробежный барьер (нейтронная звезда переходит в режим пропеллера, см., например, [Illarionov and Sunyaev, 1975](#)), либо нейтронная звезда аккрецирует вещество из потока, геометрия которого существенно отличается от сферической.

Как было показало в работе [Beskrovnaya and Ikhsanov \(2024\)](#), радиус магнитосферы звезды, аккрецирующей из диска, при прочих равных условиях может быть существенно меньше Альвеновского радиуса. В частности, минимально возможное значение радиуса магнитосферы, соответствующее ситуации, в которой газ с внутреннего радиуса диска проникает в магнитное поле звезды вследствие аномальной (Бомовской) диффузии, оценивается выражением ([Ихсанов и Бескровная, 2025](#))

$$r_N \simeq 0.94 \left(\frac{cm_p}{e} \right)^{2/11} \frac{\mu^{6/11}}{\dot{M}^{4/11} (GM_{\text{ns}})^{1/11}}. \quad (3)$$

Здесь c – скорость света, m_p – масса протона и e – электрический заряд электрона.

Величина отношения радиуса r_N к радиусу коротации звезды для различных состояний светимости А 0535+26 приведены в таблице 2. Как видно из этой таблицы, соответствующее отношение во всех состояниях системы остается существенно меньше единицы. Таким образом, рентгеновское излучение системы при всех наблюдаемых состояниях светимости может быть рассмотрено в сценарии дисковой аккреции.

Список литературы

- Ихсанов Н.Р. и Бескровная, Н.Г. (2025). Ограничение на период подкрученных пульсаров II. Численные оценки. Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове 237, с. 51—57.
<https://doi.org/10.31725/0367-7966-2025-237-51-57>
- Ballhausen, R., Pottschmidt, K., Fürst, F. et al. (2017) Looking at A 0535+26 at low luminosities with NuSTAR. *Astronomy Astrophysics*, 608, id.A105, 14 pp.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730845>
- Beskrovnaya, N.G. and Ikhsanov, N.R. (2024), Accretion-driven Spin-up of the White Dwarfs in AR Scorpii and AE Aquarii. *Astrophysical Bulletin*, 79, Nr. 1, p. 104-110.
<https://doi.org/10.1134/S1990341323600254>
- Camero-Arranz, A., Finger, M. H., Wilson-Hodge, C. A., et al. (2012) X-ray and optical observations of A0535+26. *ApJ*, 754(1), 20.
<https://doi.org/10.1088/0004-637x/754/1/20>.
- Ikhsanov, N.R. (2001) On the origin of quiescent X-ray emission from A0535+26. *Astronomy and Astrophysics*, 367, p. 549-566.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20000464>
- Illarionov, A.F. and Sunyaev R.A. (1975) Why the number of galactic X-ray stars is so small? *Astronomy and Astrophysics*, 39, p. 185-195.

On the state of the neutron star in A 0535+26 during the phase of low X-ray emission

N.R. Ikhsanov^{1,2} , N.G. Beskrovnaya¹ 

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo , ² The Institute of Applied Astronomy of the RAS

Received 27 November 2025 / Accepted 28 November 2025

Abstract

We discuss the process of accretion onto a neutron star in the massive binary system A 0535+26. A defining characteristic of this source is the pronounced variability in its X-ray flux, which allows for a conventional classification of the system's state as high, basic, and low modes. The temporal and spectral properties of the system's X-ray emission in all three states are consistent with the model of magnetospheric accretion onto a neutron star. However, a complication arises when considering the low state: the estimated equilibrium radius of the accretion flow (the Alfvén radius), derived under the assumption of spherical accretion, is found to exceed the neutron star's corotation radius. This finding challenges the feasibility of modeling the low state in terms of accretion onto a neutron star. We demonstrate that this inconsistency is resolved if accretion occurs via a disk. In this scenario, the observed X-ray variability can be naturally interpreted as a consequence of changes in the rate of accretion onto the neutron star's surface, without the need for additional assumptions.

key words: accretion, accretion disks, close binary systems, magnetic fields, X-ray pulsars, stars: neutron stars, stars: individual: A 0535+26