



Пределный период вращения звезд в сценарии аккреционной раскрутки.

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

¹ГАО РАН, ²ИПА РАН

Аннотация

Обсуждается аккреционная раскрутка вырожденных магнитных звезд в тесных двойных системах при различных предположениях относительно сценария аккреции. Выполнена оценка минимально возможного периода, который вырожденная звезда может достичь в ходе такой раскрутки. Показано, что минимально возможное значение периода вращения звезда может достичь при аккреционной раскрутке в рамках сценария, в котором перестановочные неустойчивости границы ее магнитосферы предполагаются подавленными.

Введение

Мы рассматриваем тесную двойную систему, в которой вырожденная звезда (нейтронная звезда или белый карлик) с сильным магнитным полем аккрецирует вещество, теряемое ее компаньоном. В силу орбитального движения системы вещество, захватываемое гравитационным полем вырожденной звезды, обладает угловым моментом. Вследствие этого процесс аккреции массы на поверхность вырожденной звезды сопровождается передачей ей углового момента и, соответственно, ее аккреционной раскруткой.

Минимальный период вращения, который вырожденная звезда может достичь вследствие такой раскрутки, ограничен условием $r_m \leq r_{\text{cor}}$, где r_m – радиус магнитосферы вырожденной звезды и

$$r_{\text{cor}}(P_s) = \left(\frac{GM_* P_s^2}{4\pi^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

– ее радиус коротации. Здесь M_* – масса звезды-аккретора, а P_s – период осевого вращения вырожденной звезды. При этом условии звезда находится в состоянии аккретора, в котором аккреционный поток в конечном счете достигает ее поверхности. В противном случае линейная скорость границы магнитосферы оказывается больше кеплеровской скорости, и звезда переходит в состояние пропеллера (Illarionov and Sunyaev, 1975), в котором аккреция вещества на ее поверхность и, соответственно, аккреционная раскрутка оказываются невозможными.

Решая указанное выше неравенство относительно P_s , находим $P_s \geq P_{\text{pr}}$, где

$$P_{\text{pr}} = \frac{2\pi r_m^{3/2}}{GM_*} \quad (2)$$

определяет минимально возможный период, который звезда может достичь в состоянии аккреционной раскрутки. Существенная зависимость величины этого периода от радиуса магнитосферы указывает на то, что результат аккреционной раскрутки звезды может зависеть от сценария аккреции, реализуемого в той или иной двойной системе. Подтверждение этого вывода мы приводим в следующем параграфе, в котором предельное значение P_{pr} оценено для случаев квазисферической и дисковой аккреции.

*e-mail:beskrovnaya@yahoo.com

1 Минимальный период

Процесс аккреции вещества на вырожденную звезду в тесных двойных системах обычно рассматривается в следующих трех приближениях: (i) квази-сферической аккреции, (ii) кеплеровского аккреционного диска (или альфа-диска) и (iii) магнитного некеплеровского диска, именуемого в литературе Magnetically Arrested Disk (MAD) или сценарием MAD-аккреции. Реализация того или иного сценария зависит от параметров системы и ее компонентов. В предыдущих статьях (Ихсанов и Бескровная, 2023a,b) нами было отмечено, что радиус магнитосферы в случае квази-сферической аккреции может существенно отличаться от радиуса магнитосферы, реализуемого в случае дисковой аккреции. Кроме того, величина предельного периода вырожденной звезды на заключительной стадии аккреционной раскрутки безусловно зависит от угловой скорости вещества на внутреннем радиусе аккреционного потока непосредственно взаимодействующего с магнитосферой. В этой статье мы, однако, рассматриваем лишь предельный случай, принимая величину угловой скорости на внутреннем радиусе аккреционного потока равной кеплеровской. Более общий случай произвольной угловой скорости потока будет рассмотрен в одной из последующих работ.

1.1 Квази-сферическая аккреция

Радиус магнитосферы аккрецирующей звезды в общем случае определяется выполнением следующих двух основных условий: (i) баланс между давлением аккреционного потока и магнитного поля звезды на границе ее магнитосферы (уравнение баланса давлений) и (ii) баланс между темпом притока массы к границе магнитосферы и темпом проникновения аккреционного потока в магнитное поле звезды (уравнение неразрывности). Заметим, что самосогласованное решение системы из двух вышеперечисленных уравнений, как и картины течения аккреционного потока в области границы магнитосферы в случае квази-сферической аккреции в общем случае до сих пор не получено. Общепринятым в данном случае является лишь решение первого уравнения, в котором динамическое давление сферически симметричного потока полагается равным давлению дипольного магнитного поля звезды. Решение уравнения баланса давлений, полученное в столь сильно упрощенном подходе, получило название Альвеновского радиуса, величина которого оценивается формулой

$$r_A = \left(\frac{\mu^2}{\dot{M}(2GM_*)^{1/2}} \right)^{2/7}, \quad (3)$$

где $\mu = (1/2)B_*R_*^3$ – дипольный магнитный момент звезды-аккретора радиуса R_* , напряженность магнитного поля на поверхности которого B_* , и \dot{M} – темп аккреции, т.е. количество массы, двигающейся в сферическом аккреционном потоке в режиме свободного падения в направлении звезды-аккретора.

Записать уравнение неразрывности на границе магнитосферы звезды, аккрецирующей из квази-сферического потока, без дополнительных предположений затруднительно. Темп диффузии сферического аккреционного потока в магнитное поле звезды на Альвеновском радиусе, оцененный для типичных значений параметров известных на сегодня рентгеновских двойных систем, на несколько порядков величины меньше темпа аккреции, величина которого оценивается из наблюдений системы по интенсивности и спектру ее рентгеновского излучения.

В качестве альтернативного механизма проникновения аккреционного потока в магнитное поле звезды рассматривались перестановочные (Рэля-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца) неустойчивости границы магнитосферы в ее экваториальных областях (Arons and Lea, 1976) и в областях полярных касповых точек, расположенных на расстоянии порядка Альвеновского радиуса над поверхностью звезды (Michel, 1977). Темп проникновения плазмы в магнитное поле звезды в этом подходе, кроме ряда прочих параметров, определяется темпом остывания аккреционного потока в зоне ударной волны на границе магнитосферы, что является необходимым (но отнюдь не достаточным) условием развития ее неустойчивостей. Значительные сложности, возникающие при

попытке решения данной задачи, послужили основой традиции, в соответствии с которой за радиус магнитосферы звезды, аккрецирующей из квази-сферического потока, принимается радиус остановки потока ее магнитным полем, т.е. Альвеновский радиус.

Действуя в рамках сложившейся традиции и полагая $r_m = r_A$ в выражении (2), находим минимально возможный период, до которого может быть раскручена звезда в ходе аккреции из квази-сферического потока в виде

$$P_{\text{pr}}^{\text{sph}} = \frac{2\pi\mu^{6/7}}{\dot{M}^{3/7}(GM_*)^{5/7}}. \quad (4)$$

1.2 Дискосая аккреция

На ранних этапах развития теории аккреции радиус магнитосферы звезды, аккрецирующей из диска, оценивался Альвеновским радиусом, используя выражение (3), полученное ранее для случая сферической аккреции (Липунов, 1987). Решая уравнение баланса между давлением, оказываемым со стороны диска, и давлением дипольного магнитного звезды-аккретора мы приходим, однако, к выражению (Ихсанов и Бескровная, 2023а),

$$r_{\text{st}}^{(d)} \simeq 34 \alpha^{8/27} \times \frac{\mu^{16/27}}{\dot{M}^{7/27} (GM_{\text{ns}})^{7/27}}, \quad (5)$$

в котором зависимость давления диска от степени его вязкости учитывается параметром эффективности α , позволяющим нормировать масштаб и скорость турбулентных движений в диске на его толщину и скорость звука. Для типичных значений параметров рентгеновских пульсаров в известных на сегодня рентгеновских двойных системах радиус остановки диска магнитным полем звезды-аккретора оказывается меньше величины Альвеновского радиуса,

$$r_{\text{st}} \simeq 0.26 r_A \times \alpha^{8/27} \mu_{30}^{4/189} \dot{M}_{15}^{5/189} m^{-22/189}, \quad (6)$$

где μ_{30} – дипольный магнитный момент звезды-аккретора в единицах 10^{30} Гс см³, m – ее масса в единицах M_{\odot} и \dot{M}_{15} – темп аккреции в единицах 10^{15} г с⁻¹.

Радиус остановки диска магнитным полем звезды при прочих равных условиях оказывается тем меньше, чем ниже вязкость диска и, соответственно, меньше значение в нем параметра α . Это утверждение остается, однако, справедливо лишь при условии $r_{\text{st}}^{(d)} \geq r_N$, где (Ихсанов и Бескровная, 2023б),

$$r_N \simeq 0.16 \chi_0 \frac{\mu^{6/11}}{\dot{M}^{4/11} (GM_{\text{ns}})^{1/11}}, \quad (7)$$

определяет минимально возможное значение радиуса магнитосферы звезды, аккрецирующей из диска, на котором темп аномальной (Бомовской) диффузии вещества с внутреннего радиуса диска в магнитное поле звезды достигает значения темпа аккреции в самом диске¹. Здесь χ_0 – безразмерный параметр эффективности порядка единицы, учитывающий возможные отклонения рассматриваемой картины аккреции от сценария α -диска.

Полагая $r_m = r_N$ в выражении (2), находим

$$P_{\text{pr}}^{\text{d}} = \frac{0.4 \chi_0 \mu^{9/11}}{\dot{M}^{6/11} (GM_*)^{7/11}}. \quad (8)$$

Численные значения величин $P_{\text{pr}}^{\text{sph}}$ и P_{pr}^{d} для типичных значений параметров рентгеновских двойных систем с нейтронными звездами и белыми карликами приведены на Рисунке 1. Как видно

¹Заметим, что при этом условии скорость диффузии плазмы поперек силовых линий магнитного поля звезды на границе ее магнитосферы также сравнивается со скоростью радиального движения газа на внутреннем радиусе диска.

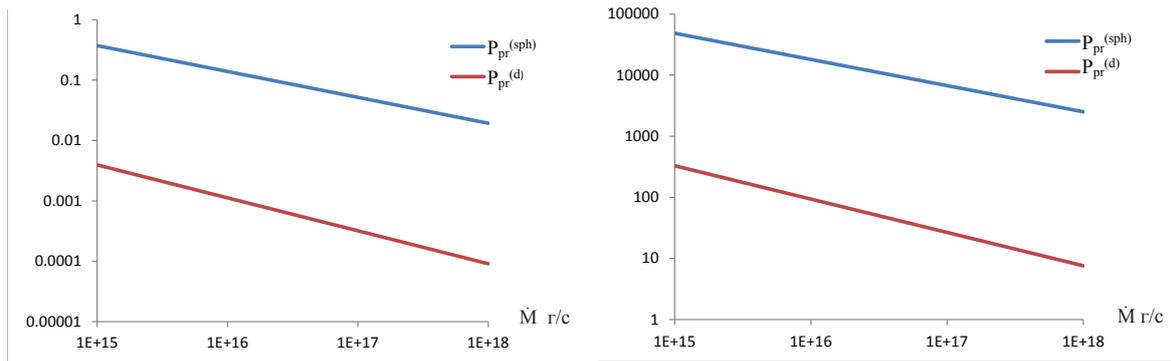


Рис. 1: Численные значения величин P_{pr}^{sph} и P_{pr}^d для типичных параметров рентгеновских двойных систем с нейтронными звездами (слева, $\mu = 10^{28} \text{ Гс см}^3$) и белыми карликами (справа, $\mu = 10^{34} \text{ Гс см}^3$)

из этих графиков, минимально возможный период P_{pr}^d , который способна достичь звезда, аккрецирующая из диска в рамках диффузионного приближения, существенно меньше величины предельного периода, P_{pr}^{sph} , оценка которого подразумевает неустойчивость границы магнитосферы к неустойчивостям перестановочного типа (Рэля-Тэйлора и/или Кельвина-Гельмгольца). Интересно также отметить, что предельное значение периода P_{pr}^d , вычисленное для магнитных быстро вращающихся белых карликов в системах АЕ Водолея и АР Скорпиона, прошедших фазу аккреционной раскрутки, соответствует периоду их вращения, наблюдаемому в настоящую эпоху и существенно меньше предельного периода, предсказываемого в сценарии с перестановочно-неустойчивой границей магнитосферы (Бескровная и Ихсанов, 2024).

2 Заключение

Представленные нами оценки показывают, что предельное значение периода осевого вращения звезды, который она может достичь в течение фазы аккреционной раскрутки, существенно зависит от выбранного сценария аккреции и предположений, принятых в нем относительно устойчивости границы магнитосферы. Минимально возможное значение периода достигается в сценарии, в котором проникновение аккреционного потока в магнитное поле звезды на границе ее магнитосферы происходит вследствие процесса диффузии. Перестановочные (Рэля-Тэйлора и/или Кельвина-Гельмгольца) неустойчивости границы магнитосферы в этом сценарии предполагаются подавленными.

Наблюдения периодов подкрученных пульсаров и белых карликов в совокупности с представленными нами результатами могут рассматриваться как один из критериев выбора сценария аккреционной раскрутки, приведшей к возникновению исследуемого источника. В частности, выполнение неравенства $P_s < P_{pr}^{sph}$ свидетельствует в пользу дисковой модели аккреционной раскрутки, которая могла происходить в условиях устойчивой границы магнитосферы, если период вращения исследуемого объекта по величине близок к значению предельного периода P_{pr}^d . Такая ситуация реализуется, в частности, для белых карликов в системах АЕ Водолея и АР Скорпиона (Бескровная и Ихсанов, 2024).

Список литературы

- Бескровная, Н.Г., Ихсанов, Н.Р. (2024), Аккреционная раскрутка белых карликов в AR Скорпиона и AE Водолея. *Астрофизический бюллетень* 79(1), в печати.
- Ихсанов, Н.Р. и Бескровная, Н.Г. (2023a). Торможение аккреционного диска магнитным полем аккретора в приближении коротации. *Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулковке* 228, с. 115–117.
- Ихсанов, Н.Р. и Бескровная, Н.Г. (2023b). Радиус магнитосферы звезды, аккрецирующей из диска в приближении коротации. *Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулковке* 229, с. 19–23.
- Липунов, В.М. (1987) *Астрофизика нейтронных звезд*. М.: Наука, 1987. – 296 с.
- Illarionov, A.F. and Sunyaev, R.A. (1975), Why the Number of Galactic X-ray Stars Is so Small? *A&A* 39, p. 185-195.
- Arons, J. and Lea, S.M. (1976), Accretion onto magnetized neutron stars: structure and interchange instability of a model magnetosphere. *ApJ*, 207, p. 914-936.
- Michel, F.C. (1977), Accretion magnetospheres: general solutions. *ApJ*, 213, p. 836-839.

Critical period of a star in the scenario of accretion-driven spin-up

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

Abstract

We consider the accretion-driven spin-up of a magnetized degenerate star in a close binary system under different assumptions about the accretion scenario. We have estimated the minimum possible spin period which the star can achieve in the course of such spin-up. We show that the star can achieve the minimum possible value of the spin period if the interchange instabilities of its magnetospheric boundary are suppressed.