



Ограничение на период подкрученных пульсаров

Н.Р. Ихсанов^{1,2} , Н.Г. Бескровная¹ 

¹ГАО РАН, ²ИПА РАН

Поступила в редакцию 10 марта 2025 / Принята к публикации 14 марта 2025

Аннотация

Обсуждается процесс аккреционной раскрутки вырожденной магнитной звезды (нейтронной звезды или белого карлика) в тесной двойной системе. В рамках сценария магнитосферной аккреции из кеплеровского диска вычислены предельные значения периода вращения вырожденной звезды на заключительной стадии ее раскрутки, исходя из условия баланса радиуса магнитосферы и радиуса коротации, а также из условия баланса между ускоряющим и тормозящим моментом сил, приложенных к звезде в ходе ее раскрутки. Показано, что второе условие оказывается эффективным и существенно ограничивает нижний предел периода вращения звезды на заключительном этапе процесса ее раскрутки в сценариях, предполагающих значение радиуса магнитосферы звезды, близких к его минимально возможному значению.

ключевые слова: магнитное поле, нейтронные звезды, белые карлики, аккреция, двойные системы

1 Введение

Мы рассматриваем тесную взаимодействующую двойную систему, компонентами которой являются звезда Главной последовательности (донор вещества) и вырожденная звезда (нейтронная звезда или белый карлик) с сильным магнитным полем, аккрецирующая вещество из кеплеровского диска. Процесс обмена массой между компонентами системы сопровождается частичной трансформацией орбитального углового момента двойной системы в угловой момент осевого вращения вырожденной звезды, аккрецирующей вещество на свою поверхность. При определенных условиях это приводит к увеличению вращательной энергии аккрецирующей звезды, т.е. к ее аккреционной раскрутке, в процессе которой период осевого вращения звезды уменьшается. В этой статье мы кратко обсуждаем ограничения на минимальную величину периода вращения, который звезда может достичь в ходе аккреционной раскрутки.

2 Минимальный период

Основное условие реализации процесса аккреционной раскрутки записывается следующим образом (см., например, [Липунов, 1987](#), и приведенную там литературу):

$$r_m \leq r_{\text{cor}} = \left(\frac{GM_*}{\omega_s^2} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

где r_m – радиус магнитосферы аккрецирующей звезды, а r_{cor} – ее радиус коротации, определяемый массой звезды, M_* , и угловой скоростью ее осевого вращения с периодом P_s , $\omega_s = 2\pi/P_s$. Это условие записано в предположении о твердотельном вращении магнитосферы по крайней мере

*e-mail:beskrovnaya@yahoo.com

до радиуса r_m и отражает тот факт, что аккреция вещества на поверхность раскручивающейся звезды оказывается возможной лишь до момента, когда тангенциальный компонент линейной скорости вращения магнитосферы на ее границе, $v_\perp = \omega_s r_m$, достигнет значения кеплеровской скорости на радиусе r_m , т.е. $v_k(r_m) = (GM_*/r_m)^{1/2}$. В противном случае звезда оказывается в состоянии пропеллера, в котором взаимодействие ее магнитосферы с аккреционным потоком приводит к торможению ее вращения.

Решая неравенство (1) относительно P_s , находим $P_s \geq P_{cr}^{(0)}$, где

$$P_{cr}^{(0)} = \frac{2\pi r_m^{3/2}}{(GM_*)^{1/2}}. \quad (2)$$

Существует, однако, по крайней мере один фактор, способный воспрепятствовать вырожденной звезде достичь значения периода $P_{cr}^{(0)}$ в процессе аккреционной раскрутки. Этим фактором является магнитное поле звезды, оказывающее эффект торможения ее осевого вращения. Темп потери вращательной энергии вырожденной звездой с моментом инерции I , $dE_{rot}/dt = I\omega_s\dot{\omega}_s$, напряженность магнитного поля на поверхности которой B_* , в первом приближении может быть оценена формулой для магнито-дипольных потерь,

$$L_{md} = \frac{k_f \mu^2}{c^3} \omega_s^4, \quad (3)$$

в соответствии с которой величина тормозящего момента силы, $K_{sd} = I\dot{\omega}_s$, приложенного к звезде, вращающейся с угловой скоростью ω_s и обладающей дипольным магнитным моментом $\mu = (1/2)B_*R_*^3$, где R_* - радиус звезды, может быть оценена из выражения

$$K_{sd} = \frac{k_f \mu^2 \omega_s^3}{c^3}. \quad (4)$$

Здесь $\dot{\omega}_s = d\omega_s/dt$, c - скорость света и k_f - безразмерный параметр порядка единицы, значение которого определяется свойствами магнитосферы звезды (см., например, Бескин и др., 2013, и приведенную там литературу).

Присутствие тормозящего момента силы означает, что процесс аккреции может приводить к раскрутке звезды лишь при условии

$$K_{sd} \leq K_{su}, \quad (5)$$

где

$$K_{su} = \dot{M} (GM_* r_m)^{1/2} \quad (6)$$

определяет ускоряющий момент силы, приложенной к звезде со стороны вещества, аккрецируемого ею из диска.

Решая неравенство (5) относительно P_s , мы приходим к условию $P_s \geq P_{cr}^{(k)}$, где

$$P_{cr}^{(k)} = \frac{2\pi}{c} \left(\frac{k_f \mu^2}{\dot{M}} \right)^{1/3} \left(\frac{1}{GM_* r_m} \right)^{1/6}. \quad (7)$$

Ситуация, в которой аккреционная раскрутка вырожденной звезды прекращается до момента достижения ею периода $P_{cr}^{(0)}$, т.е. реализация неравенства $P_{cr}^{(k)} \geq P_{cr}^{(0)}$, возможна в случае $r_m \leq r_0$, где

$$r_0 = \frac{1}{c^{3/5}} \left(\frac{k_f \mu^2 GM_*}{\dot{M}} \right)^{1/5} \simeq 4.5 \times 10^7 \text{ см} \times k_f^{1/5} \mu_{30}^{2/5} m^{1/5} \dot{M}_{17}^{-1/5}. \quad (8)$$

Здесь $\mu_{30} = \mu/10^{30} \text{ Гс см}^3$, $m = M_*/1.4 M_\odot$ и $\dot{M}_{17} = \dot{M}/10^{17} \text{ г с}^{-1}$.

Нормируя радиус магнитосферы на его минимально возможное значение (см. Beskrovnaya and Ikhsanov, 2024, и приведенную там литературу),

$$r_N \simeq 0.94 \lambda_0 \left(\frac{c m_p}{e} \right)^{2/11} \frac{\mu^{6/11}}{\dot{M}^{4/11} (GM_*)^{1/11}}, \quad (9)$$

приведенное выше условие можно записать в виде следующего неравенства $r_N/r_0 \leq 1$. Здесь m_p – масса протона, e – заряд электрона и λ_0 – безразмерный параметр порядка единицы, учитывающий возможные отклонения параметров аккреционного потока от стандартной модели вязкого α -диска.

Используя формулы (8) и (9), находим

$$\frac{r_N}{r_0} \simeq 0.94 \lambda_0 \left(\frac{c m_p}{e} \right)^{2/11} \frac{c^{3/5}}{k_f^{1/5}} \frac{\mu^{8/55}}{\dot{M}^{9/55} (GM_*)^{16/55}}. \quad (10)$$

С учетом (10), неравенство $r_N/r_0 \leq 1$ можно записать в виде:

$$\mu \leq 10^{34} \text{ Гс см}^3 \times k_f^{11/8} \lambda_0^{-55/8} \dot{M}_{17}^{9/8} m^2. \quad (11)$$

3 Заключение

Приведенные нами оценки показывают, что при выполнении условия (11) минимально возможный период осевого вращения вырожденной звезды, находящейся в состоянии раскрутки, вызванной аккрецией вещества из кеплеровского диска, ограничен неравенством $P_s \geq P_{\text{cr}}^{(k)}$, в котором предельное значение периода определяется на основе формулы (7). Полученный нами результат справедлив в предположении, что радиус магнитосферы звезды, аккрецирующей из диска, близок по величине к своему минимально возможному значению (см. выражение 9) и вращение магнитосферы вплоть до радиуса r_m может быть аппроксимировано твердотельным вращением.

Список литературы

- Бескин, В.С., Истомин, Я.Н., Филиппов, Н.Н. (2013). Радиопульсары – поиски истины. Успехи физических наук, 183, с. 179–194.
- Липунов, В.М. (1987) Астрофизика нейтронных звезд. М.: Наука, 1987. – 296 с.
- 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.

Constraints on the period of recycled pulsars

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 10 March 2025 / Accepted 14 March 2025

Abstract

Our discussion focuses on the process of accretion-driven spin-up of a degenerate magnetic star (a neutron star or a white dwarf) in a close binary system. Within the framework of the scenario of magnetospheric accretion from a Keplerian disk, we calculate the limitations on the rotation period of the degenerate star at the final stage of its spin-up. This calculation is based on the balance between the magnetospheric radius and the corotation radius, as well as the balance between the accelerating and braking torques applied to the star during its spin-up. It is demonstrated that this second condition plays a crucial role and significantly constrains the lower limit of the star's rotation period during the final phase of its spin-up, particularly in scenarios where the magnetospheric radius of the star approaches its minimum possible value.

key words: magnetic field, neutron stars, accretion, white dwarfs, binary systems