

УДК: 524.354.4—327

МАГНИТО-ДИПОЛЬНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СТВОЛОВ НЕЙТРОННЫХ ВИХРЕВЫХ НИТЕЙ

Д. М. СЕДРАКЯН, А. Д. СЕДРАКЯН, К. М. ШАХАБАСЯН

Поступила 17 февраля 1989

Принята к печати 23 мая 1989

Рассмотрено магнито-дипольное излучение нормальных стволос квантованных сверхтекучих нейтронных вихревых нитей в сильных локальных магнитных полях, создаваемых плотной сетью протонных вихревых нитей. Показано, что этот механизм объясняет наблюдаемое замедление угловой скорости вращения подавляющего большинства пульсаров. В рамках этого механизма проведена оценка радиусов «пре»-фазы нейтронных звезд с использованием имеющейся статистики пульсаров.

1. *Введение.* В последние годы рядом авторов [1] были предприняты попытки теоретического объяснения наблюдаемого теплового неимпульсного рентгеновского излучения пульсаров [2]. В работе [1] был предложен механизм магнито-дипольного излучения сверхтекучими нейтронами — MDRSN. Согласно механизму MDRSN сверхтекучие вихри могут излучать фотоны в среднем магнитном поле $B \sim 10^{12}$ Гс, в то время как куперовские пары нейтронов находятся в состояниях 3P_2 . В работах [1, 3] рассматривался вопрос уменьшения угловой скорости вращения нейтронной звезды в рамках механизма MDRSN.

Нами предложен механизм магнито-дипольного излучения стволос сверхтекучих нейтронных вихрей в сильных локальных магнитных полях $B \sim 10^{14}$ Гс, создаваемых сетью протонных вихрей [4]. Излучение только стволос вихрей, состоящих из нормальных нейтронов, достаточно для объяснения уменьшения угловой скорости вращения пульсаров. Механизм магнито-дипольного излучения стволос вихрей — МДИСВ действует и тогда, когда сверхтекучие нейтроны спарены в состояниях 1S_0 . Тем самым механизм действует во всей «пре»-фазе. Проведена оценка возможных радиусов «пре»-фазы нейтронных звезд на основе статистики пульсаров в предположении, что уменьшение угловой скорости звезды обусловлено только механизмом МДИСВ. Полученные результаты хорошо согласуются с теорией строения нейтронных звезд.

В «пре»-фазе нейтронной звезды имеем вращающуюся сверхтекучую нейтронную жидкость, которая представляет собой регулярную решетку квантованных вихрей со стволами из нормальных нейтронов. Количество вихрей N и расстояние b между ними задается формулами

$$N = \left(\frac{2m_n \Omega}{n\hbar} \right) R^2, \quad (1)$$

$$b = \left(\frac{n\hbar}{2m_n \Omega} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где R — радиус «пре»-фазы, Ω — угловая скорость вращения нейтронной звезды, m_n — масса нейтрона, n — квантовое число циркуляции. Радиус ствола a_0 нейтронного вихря представляет собой длину когерентности нейтронной жидкости

$$a_0 = \frac{E_F}{k_F \Delta} \approx (3\pi^2)^{1/3} \frac{\hbar^2}{2m_n^{1/3}} \frac{\rho^{1/3}}{\Delta}, \quad (3)$$

где E_F — энергия Ферми, $\hbar k_F$ — импульс Ферми нейтронов, ρ — плотность нейтронной жидкости, Δ — величина энергетической щели.

В работе [4] было показано, что вокруг каждого нейтронного вихря возникает из-за эффекта увлечения [5] плотная сеть протонных вихрей, которая занимает площадь $\pi r_j^2 < \pi b^2$. Средняя индукция магнитного поля вокруг нейтронного вихря [6]

$$\bar{B} = \frac{k\Phi_0}{4\pi\lambda^2}, \quad (4)$$

где k — коэффициент увлечения протонов нейтронами, λ — глубина проникновения магнитного поля, Φ_0 — квант магнитного потока, равный $2 \cdot 10^{-7}$ Гс·см².

При 1S_0 -спаривании спины нейтронов в куперовской паре направлены антипараллельно и полный магнитный момент пары равен нулю. Нормальные же нейтроны в стволе обладают некомпенсированным магнитным моментом и из-за вращения в магнитном поле будут излучать фотоны с частотой, равной частоте вращения

$$\omega_c = \frac{n\hbar}{2m_n a_0^2}. \quad (5)$$

При плотностях ρ больших, чем плотность $\rho_0 = 2 \cdot 10^{14}$ г/см³ для сверхтекучей нейтронной жидкости преобладает 3P_2 — спаривание. Как утверждалось в работе [1], в этом случае возможно также излучение сверхтекучих нейтронов, так как полный спин пары при 3P_2 — спаривании равен

н. Однако, на наш взгляд, и в этом случае излучение возможно только из стволов нейтронных вихрей, где нейтроны нормальны. Вращательное движение сверхтекучих нейтронов вокруг ствола нейтронного вихря квантовано, и если вихрь находится в основном стационарном состоянии с $n = 1$, то сверхтекучая часть нейтронов не может излучать.

Возможное излучение с переходом вихря из состояния $n \neq 1$ в основное состояние было рассмотрено в работе [7].

2. Магнито-дипольное излучение нормальных стволов нейтронных вихрей. Интенсивность излучения одного нормального нейтрона выражается формулой:

$$W = \frac{2\omega_c^4}{3c^3} \sum_f |\langle f | \hat{M}_z | i \rangle|^2 = \frac{2\omega_c^4}{3c^3} \langle i | \hat{M}_z^+ \hat{M}_z | i \rangle, \quad (6)$$

где $|i\rangle$ — начальное состояние, $|f\rangle$ — конечное состояние, $\hat{M}_z$ — оператор магнитного момента. Рассматривая когерентный конечный объем ΔV и полагая

$$\langle i | \hat{M}_z^+ \hat{M}_z | i \rangle = \langle i | |\hat{M}_z|^2 | i \rangle \approx M_{\Delta V}^2, \quad (7)$$

где $M_{\Delta V}$ — соответствующий макроскопический магнитный момент, получим для энергии, излученной этим объемом, следующее выражение:

$$W_{\Delta V} = \frac{2\omega_c^4}{3c^3} M_{\Delta V}^2. \quad (8)$$

Макроскопический магнитный момент определяется следующим образом:

$$M_{\Delta V} = \chi_n \bar{H} \Delta V. \quad (9)$$

Здесь $\bar{H}$ — средняя напряженность магнитного поля, создаваемого протонными вихрями, χ_n — парамагнитная восприимчивость нормальных нейтронов, равная

$$\chi_n = \frac{1}{2} \gamma^2 \hbar^2 \frac{dn}{d\varepsilon}, \quad (10)$$

где $\gamma = g_n \mu_0 / \hbar$ — гиромагнитное соотношение для нейтрона, $dn/d\varepsilon = m_n \hbar k_F / 2\pi^2 \hbar^3$ — плотность состояний на поверхности Ферми, $g_n = -3.826$, $\mu_0 = e\hbar/2m_p c$ — ядерный магнетон.

Средняя напряженность магнитного поля определяется согласно работе [8] следующим образом:

$$\bar{H} = \frac{3}{8\pi} \bar{B}. \quad (11)$$

Для мощности, излучаемой одним нейтронным вихрем, получаем

$$W_1 = \frac{2}{3} \frac{\omega_c^4}{c^3} \chi_n^2 \left(\frac{3\bar{B}}{8\pi} \right)^2 (\pi a_0^2 \lambda_c)^2 \frac{\bar{L}}{\lambda_c}, \quad (12)$$

где $\lambda_c = 2\pi c/\omega_c$ — длина волны, соответствующая угловой скорости вращения ω_c , $\bar{L}$ — средняя длина вихревой нити, равная

$$\bar{L} = \frac{1}{N} \sum_i L_i = \frac{\pi}{2} R \left(1 - \frac{R_0^2}{R^2} \right). \quad (13)$$

Здесь R_0 — радиус ядра звезды, состоящего из смеси нормальных элементарных частиц.

Полная мощность магнитно-дипольного излучения стволов нейтронных вихревых нитей звезды определяется следующим выражением:

$$W_m = N W_1 = \frac{3}{128\pi^2} \frac{\gamma^4 m_n^2}{h^2 c^3} \bar{\Delta}^2 \bar{B}^2 \bar{L} R^3 p^{-1}, \quad (14)$$

где p — период вращения пульсара. Подставляя значения $\bar{B}$ и $\bar{L}$ из (4) и (13) и проводя вычисления, получаем:

$$W_m = K_m p^{-1}, \quad (15)$$

где

$$K_m = 7.54 \cdot 10^{-2} (k\Phi_0)^2 \left(\frac{\bar{\Delta}}{\lambda^2} \right)^2 R^3 \left(1 - \frac{R_0^2}{R^2} \right). \quad (16)$$

Таким образом, потери энергии, обусловленные магнитно-дипольным излучением стволов вихрей, обратно пропорциональны периоду вращения пульсара. Принимая $R_0 = 10^6 R_{06}$, $R = 10^6 R_6$, $\Delta = 1.6 \cdot 10^{-6} \Delta_{M\odot}$, $\lambda = 10^{-11} \lambda_{11}$ и учитывая, что коэффициент увлечения $k = 0.5$ [6], имеем

$$K_m = 1.93 \cdot 10^{34} \frac{R_6^3 \Delta_{M\odot}^2}{\lambda_{11}^4} \left(1 - \frac{R_{06}^2}{R_6^2} \right). \quad (17)$$

3. Замедление вращения звезды. Энергия нормальных нейтронов, находящихся в стволах вихревых нитей, уменьшается из-за излучения фотонов. Поскольку эти нейтроны взаимодействуют с нормальными электронами, то их энергия пополняется за счет энергии вращения звезды. В результате происходит уменьшение угловой скорости пульсара, которое определяется из соотношения:

$$-I\Omega\dot{\Omega} = W_m. \quad (18)$$

Подставляя сюда $\Omega = 2\pi/p$, $\dot{\Omega} = -2\pi\dot{p}/p^2$, получаем

$$\dot{p} = B_1 p^2, \quad (19)$$

где

$$B_1 = \frac{K_m}{4\pi^2 I} = 4.89 \cdot 10^{32} \frac{\Delta_{M_{av}}^2}{I \lambda_{11}^4} R_6^3 \left(1 - \frac{R_{06}^2}{R_6^2}\right). \quad (20)$$

Уравнение (19) запишем в виде:

$$(10^7 p p)^{1/2} = (10^{14} B_1)^{1/2} \cdot p^{3/2}. \quad (21)$$

Обозначая $D = 10^7 (p p)^{1/2}$ и $a = \lg (10^{14} B_1)^{1/2}$, имеем:

$$\lg D = a + \frac{3}{2} \lg p. \quad (22)$$

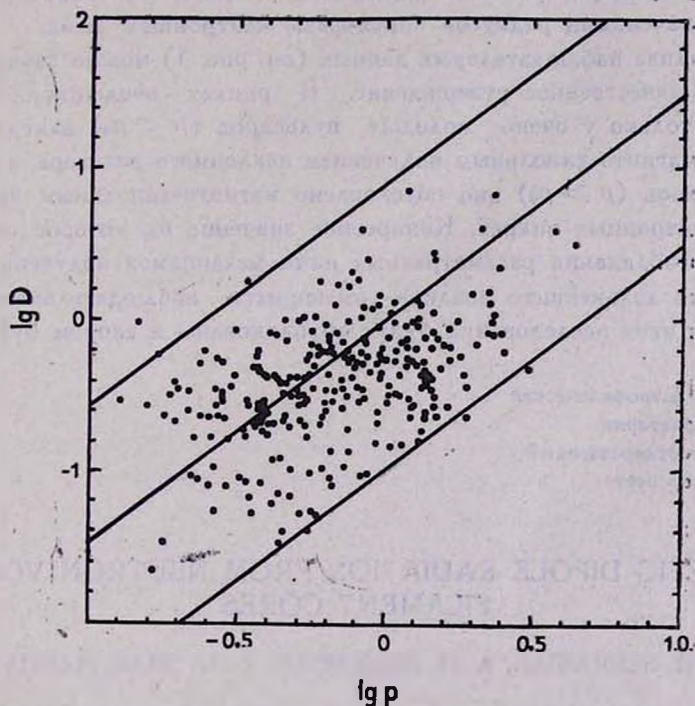


Рис. 1. Зависимость $\lg D$ от $\lg p$ для 291 пульсара. Три прямые представляют собой соответственно графики функции $\lg D = a + 1.5 \lg p$ для значений $a = -1; 0; 0.9$.

Зависимость $\lg D$ от $\lg p$ для 291 пульсара приведена на рис. 1. Полагая $I = 5 \cdot 10^{44} \text{ г} \cdot \text{см}^2$, $\lambda_{11} = 1$, $R_0 \gg R_{06}$ и $\Delta_{M_{av}} = 0.1$, получаем

$$a = \frac{1}{2} \lg (0.98 R_6^3). \quad (23)$$

Из уравнения (22) и рис. 1 следует, что a изменяется от -1 до 0.6 . Вычислив радиусы «пре»-фазы нейтронных звезд из уравнения (23), приходим к выводу, что у 80% пульсаров эти радиусы лежат в интервале допустимых значений: $4 \text{ км} \leq R \leq 12 \text{ км}$.

Если замедление пульсара происходит только из-за магнито-дипольного излучения наклонного магнитного момента нейтронной звезды, то у старых пульсаров, то есть у пульсаров с большими значениями периода P должны были наблюдаться только малые значения производной периода $\dot{P}$. Однако такой корреляции не наблюдается (см. рис. 1). Данная проблема теории разрешается, если предположить, что замедление вращения пульсаров происходит не только из-за вышеуказанного механизма излучения, но и из-за механизма излучения, предложенного в настоящей статье. В рамках такой теории разброс наблюдаемых значений P и $\dot{P}$ объясняется различными значениями радиусов «пре»-фазы нейтронных звезд.

Из анализа наблюдательных данных (см. рис. 1) можно также сделать следующее качественное утверждение. В рамках эволюционной теории пульсаров только у очень молодых пульсаров ($P < P_0$) замедление обусловлено магнито-дипольным излучением наклонного ротатора, а у остальных пульсаров ($P > P_0$) оно обусловлено магнито-дипольным излучением створов нейтронных вихрей. Конкретное значение P_0 , которое определяет границу преобладания рассмотренных нами механизмов излучения, можно получить из дальнейшего анализа имеющихся наблюдательных данных. Результаты этих исследований будут опубликованы в скором будущем.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория
Ереванский государственный
университет

MAGNETIC DIPOLE RADIATION FROM NEUTRON VORTEX FILAMENT CORES

D. M. SEDRAKIAN, A. D. SEDRAKIAN, K. M. SHAHABASSIAN

The magnetic dipole radiation from quantized superfluid neutron vortex filament normal cores in strong local magnetic field caused by dense network of proton filament is considered. It has been shown that this mechanism explains the observed angular velocity reduction in prevailing majority of pulsars. In the scope of this mechanism an evaluation of radii of neutron star „pre“-phase using available pulsar statistic is made.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. —H. Huang, R. E. Lingenfelter, Q. —H. Peng, K. —L. Huang, *Astron. and Astrophys.*, 113, 9, 1982.
2. D. J. Helfand, G. A. Chanan, R. Novick, *Nature*, 283, 337, 1980.
3. J. —H. Huang, K. —L. Huang, Q. —H. Peng, *Astron. and Astrophys.*, 117, 205, 1983.
4. Д. М. Седракин, К. М. Шахабасян, А. Г. Мовсисян, *Астрофизика*, 19, 303, 1983.
5. Д. М. Седракин, К. М. Шахабасян, *Астрофизика*, 18, 727, 1980.
6. Д. М. Седракин, К. М. Шахабасян, А. Г. Мовсисян, *Астрофизика*, 21, 547, 1984.
7. Q. —H. Peng, K. —L. Huang, J. —H. Huang, *Astron. and Astrophys.*, 107, 258, 1982.
8. Г. С. Мкртчян, Д. М. Седракин, *Астрофизика*, 19, 135, 1983.