

УДК: 524.354.4

РЕЛАКСАЦИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ПУЛЬСАРА VELA
В РАМКАХ ОТО. КВАРКОВАЯ МОДЕЛЬ
НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ

М.В.АЙРАПЕТЯН

Поступила 31 мая 2000

Принята к печати 10 июля 2000

Проведено сравнение ранее развитой теории релаксации угловой скорости пульсаров в рамках ОТО с наблюдательными данными для пульсара Vela на основе кварковой модели нейтронной звезды. Найлены относительные моменты инерции и местоположения областей релаксации. Показано, что модель нейтронной звезды с нормальной кварковой материей не согласуется с наблюдениями релаксации угловой скорости пульсаров.

1. *Введение.* Известно, что угловая скорость большого количества пульсаров, помимо всеобщего векового изменения порядка $|\dot{\Omega}|/\Omega \approx 10^{-13} + 10^{-11} \text{с}^{-1}$, претерпевает также скачки порядка $\Delta\Omega/\Omega \approx 10^{-6} + 10^{-9}$ [1-5]. Из первых же наблюдений стало ясно, что для объяснения как скачка, так и характерных времен послескачковой релаксации необходимо вовлечение сверхтекучей компоненты внутри нейтронной звезды [6-14]. В сверхтекучем состоянии находятся нейтроны в ядре и внутренней коре звезды. Протоны, составляющие до 5% от числа нейтронов, образуют сверхпроводящий конденсат в ядре звезды. Теория скачков и релаксации угловой скорости пульсаров на основе динамики движения двухкомпонентной сверхтекучей системы в ядре нейтронной звезды рассмотрена в [12-14]. Кластер нейтронно-протонных вихрей, возникающий из-за эффекта увлечения сверхпроводящих протонов нейтронной жидкостью, движется с чрезвычайно большим трением, обусловленным рассеянием нормальных электронов на магнитном поле кластера, порядка 10^{14} Гс. Вследствие этого после скачка угловой скорости пульсара происходит релаксационный процесс с характерными временами, согласующимися с наблюдательными данными.

Обобщение уравнений движения двухкомпонентной сверхтекучей системы в рамках ОТО было проведено в [15,16]. Полученные уравнения были использованы для теории послескачкового поведения угловой скорости пульсара Vela в Ω -приближении [17]. Сравнения теории релаксации угловой скорости пульсаров с наблюдательными данными для шести скачков пульсара Vela [1] были проведены в [14,18]. Это позволило найти относительные моменты инерции областей, ответственных за релаксацию,

с учетом поправок ОТО в квадратичном по угловой скорости приближении. На одной из стандартных моделей нейтронной звезды ($M = 1.4 M_{\odot}$, $R \approx 10 \text{ км}$, $I \approx 10^{45} \text{ г.см}^2$ [19]), с уравнением состояния из [20], были найдены также местоположения этих областей в ядре звезды. Развита таким образом теория релаксации угловой скорости пульсаров на основе динамики сверхтекучей системы в ядре нейтронной звезды находится в хорошем согласии с наблюдениями и подтверждает стандартную модель нейтронной звезды [19] как приемлемую модель пульсара.

Однако в последнее время рассматриваются также модели нейтронных звезд с уравнениями состояния, приводящими при определенных значениях плотности к "выдавливанию" кварков из нуклонов и образованию кварковой ферми-жидкости. Между тем сравнение теории релаксации угловой скорости пульсаров с наблюдениями может ответить на вопрос, насколько реалистичны такие модели нейтронных звезд.

Цель данной работы - провести сравнение теории релаксации угловой скорости пульсаров с учетом поправок ОТО с наблюдательными данными пульсара Vela, используя модель нейтронной звезды с кварковой центральной частью ядра.

Вращение нейтронной звезды считается аксиально-симметричным, а поведение сверхтекучей жидкости рассматривается в гидродинамическом приближении. Кварковая материя считается нормальной.

2. Уравнения движения. Уравнения движения для угловой скорости сверхтекучей компоненты $\Omega_s(r, t)$ и нормальной компоненты $\Omega_e(t)$ нейтронной звезды в рамках ОТО имеют вид [17,18]:

$$\frac{\partial \omega_s}{\partial t} = -\frac{\omega_s}{\tau} + \frac{\omega_e}{\tau} q, \quad (1)$$

$$\frac{d \omega_e}{dt} + p_0 \int_0^1 \frac{\partial \omega_s}{\partial t} q^{-1} dy = -\gamma. \quad (2)$$

Здесь ω_s , ω_e и q - безразмерные величины, определяемые как

$$\omega_s = \frac{\Omega_s(r, t)}{\Omega_s(r, 0)}, \quad \omega_e = \frac{\Omega_e(t)}{\Omega_e(0)}, \quad q = \frac{\Omega_e(t)}{\Omega_s(r, 0)},$$

где $\Omega_e(0)$ и $\Omega_s(r, 0)$ - начальные значения для $\Omega_e(t)$ и $\Omega_s(r, t)$ сразу после скачка, $p_0 = I_s/I_e$ - относительный момент инерции сверхтекучей компоненты, $\gamma = K_{ext}/I_e \Omega_e(0)$, K_{ext} - внешний тормозящий момент сил, действующих на звезду. Время релаксации τ в (1) определяется как

$$\frac{1}{\tau} = \frac{2 n_s \pi \hbar}{n_e \eta} (1 + \kappa). \quad (3)$$

Здесь $n_e \eta$ представляет собой коэффициент трения единицы длины вихря с нормальной компонентой, $\kappa = g_{03}/\Omega_e g_{33}$, где компоненты метрического тензора $g_{\alpha\beta}$ в Ω -приближении в сферических координатах (R, θ, φ) имеют вид:

$$g_{00} = -e^{\nu}, \quad g_{11} = e^{\lambda}, \quad g_{22} = R^2, \quad g_{33} = R^2 \sin^2 \theta, \quad g_{03} = \omega R^2 \sin^2 \theta.$$

Функции ν, λ, ω находятся из уравнений Эйнштейна

$$G_k^l = 8\pi T_k^l,$$

и в дальнейшем будем считать их данными величинами [21-23].

Решение уравнений (1),(2) в трехслойной модели областей релаксации [14,18] приводит к следующей зависимости частоты вращения пульсара от времени:

$$\nu(t) = \nu_0 - \frac{\nu_0}{\tau_0} t - \sum_{j=s,i,l} \frac{P_j}{1+P_j} \Delta\nu \left(1 - e^{-t/\tau_j}\right), \quad (4)$$

где суммирование ведется по, так называемым, активным областям в s, i, l - слоях, ответственным за релаксацию [14,18], при этом

$$\tau_0 = \frac{1+P_l}{\gamma}, \quad \tau_j = \frac{\tau_j}{1+P_j}, \quad j = s, i, l,$$

а P_j - относительный момент инерции активной области j -го слоя. Для наблюдаемой величины $\dot{\nu}(t)$ получаем из (4):

$$\dot{\nu}(t) = -\frac{\nu_0}{\tau_0} - \sum_{j=s,i,l} \frac{P_j}{1+P_j} \frac{\Delta\nu}{\tau_j} e^{-t/\tau_j}, \quad (5)$$

где $\Delta\nu$ - величина скачка частоты вращения пульсара.

3. *Сравнение с наблюдениями.* Для сравнения развитой теории релаксации угловой скорости пульсаров с наблюдательными данными для пульсара Vela воспользуемся интерполяционной формулой из [1], которая имеет следующий вид:

$$\dot{\nu}(t) = \dot{\nu}_0 + \dot{\nu}_l + \dot{\nu}_s e^{-t/\tau_s} + \dot{\nu}_i e^{-t/\tau_i} + (\ddot{\nu}_0 + \ddot{\nu}_l)t. \quad (6)$$

Значения параметров $\dot{\nu}_0, \dot{\nu}_l, \dot{\nu}_s, \dot{\nu}_i, \ddot{\nu}_0, \ddot{\nu}_l$ для шести послескачковых наблюдений пульсара Vela приведены в [1]. Сравнение (5) и (6) позволяет

найти относительные моменты инерции активных областей $\frac{I_{ss}}{I_e}, \frac{I_{sl}}{I_e}$ и $\frac{I_{sl}}{I_e}$ в s, i, l - слоях соответственно, значения которых для шести скачков приведены в табл.1. Для каждого скачка на модели нейтронной звезды

Таблица 1

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ МОМЕНТЫ ИНЕРЦИИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ РЕЛАКСАЦИИ В s, i, l - СЛОЯХ ПОСЛЕ ШЕСТИ СКАЧКОВ ПУЛЬСАРА Vela

	$\left(\frac{I_{ss}}{I_e}\right) \times 10^{-3}$	$\left(\frac{I_{sl}}{I_e}\right) \times 10^{-3}$	$\frac{I_{sl}}{I_e}$
1	1.98	17.8	0.28
2	1.58	13.1	0.18
3	0.44	3.53	0.517
4	2.41	11.3	0.416
5	0.81	1.89	0.43
6	2.48	5.5	0.108

можно найти области релаксации, характеризующиеся соответствующими временами релаксации τ , и моментом инерции I_y .

В качестве модели нейтронной звезды мы выбрали конфигурацию с массой $M = 1.4 M_\odot$, радиусом $R = 10.3$ км и полным моментом инерции $I = 38.38 \cdot 10^{43}$ гсм² [21-23]. Центральная часть ядра звезды содержит область кварковой материи, которая считается нормальной. Эффективный момент инерции нормальной части равен $I_e = 19.77 \cdot 10^{43}$ гсм². В табл.2

Таблица 2

МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ РЕЛАКСАЦИИ В s, i, l - СЛОЯХ ПОСЛЕ ШЕСТИ СКАЧКОВ ПУЛЬСАРА Vela

	l-слой, км	i-слой, км	s-слой, км
1	7.95-8.28	8.28-8.335	8.585-8.595
2	7.96-8.315	8.315-8.36	8.698-8.702
3	7.96-8.45	8.45-8.46	8.6995-8.7005
4	7.96-8.345	8.345-8.375	8.627-8.633
5	7.96-8.548	8.548-8.552	8.6295-8.6305
6	7.97-8.49	8.50-8.52	8.697-8.703

указаны местоположения активных областей релаксации в s, i, l - слоях после шести скачков пульсара Vela. В табл.3 приведены значения I_{sl}/I_e , полученные из сравнения теории с наблюдениями и рассчитанные на модели звезды. Видно, что кварковая модель нейтронной звезды не удовлетворяет наблюдательным данным пульсара Vela из-за нехватки момента инерции области, ответственной за линейную релаксацию.

Для сравнения отметим, что при использовании модели нейтронной звезды с массой $M = 1.4 M_\odot$, радиусом $R = 13.64$ км и моментом инерции $I = 92.5 \cdot 10^{43}$ гсм² и не содержащей кварковой жидкости [23], согласование теории с наблюдениями более чем достаточно. Эта конфигурация в ядре

Таблица 3

ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ В l - СЛОЕ, ПОЛУЧЕННЫЙ ПРИ СРАВНЕНИИ ТЕОРИИ РЕЛАКСАЦИИ С НАБЛЮДЕНИЯМИ, И ВЫЧИСЛЕННЫЙ НА КВАРКОВОЙ МОДЕЛИ НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ

	$\left(\frac{I_{sl}}{I_e}\right)_{\text{набл.}}$	$\left(\frac{I_{sl}}{I_e}\right)_{\text{модель.}}$
1	0.28	0.11
2	0.181	0.12
3	0.517	0.17
4	0.416	0.13
5	0.43	0.21
6	0.108	0.18

содержит чисто адронное вещество. В этой модели, согласно [24], нейтронно-протонная жидкость в ядре звезды полностью находится в сверхтекучем состоянии, а момент инерции нормальной компоненты составляет всего лишь $I_e = 0.17 \cdot 10^{43}$ г см² (кора звезды). В зависимости от скачка, толщина активной области s -слоя составляет $2 \div 20$ см, i -слоя - $4 \div 100$ см, а l -слоя - порядка 10 м.

Таким образом, теория релаксации угловой скорости пульсаров с использованием кварковой модели нейтронной звезды не согласуется с наблюдениями релаксации угловой скорости, что связано с большим значением момента инерции нормальной части. Если принять, что кварковая жидкость может находиться в сверхтекучем состоянии, то эффективный момент инерции нормальной компоненты окажется малым. Это может привести к согласованию наблюдений и теории релаксации угловой скорости пульсаров и для кварковой модели нейтронной звезды.

Автор выражает глубокую благодарность академику Д.М.Седракяну за обсуждение результатов, а также Г.Погосяну и О.Григоряну за любезное предоставление модельных расчетов нейтронных звезд.

Ереванский государственный университет,
Армения

THE RELAXATION OF THE Vela PULSAR ANGULAR VELOCITY IN FRAME OF GRT. THE QUARK MODEL OF THE NEUTRON STAR

M.V.HAIRAPETIAN

The comparison of recently developed theory of relaxation of pulsars' angular velocity in frame of GRT with the observational data of the Vela pulsar carried out using the quark model of the neutron star. It is obtained the relative moments of inertia and destination of the relaxation regions. It is shown, that the model of the neutron star with normal quark matter is not in agreement with the observations of relaxation of the pulsars' angular velocity.

ЛИТЕРАТУРА

1. *J.M.Cordes, G.S.Downs, J.Krause-Polstorff*, *Astrophys. J.*, **330**, 841, 1988.
2. *A.G.Lyne*, *Nature*, **326**, 569, 1987.
3. *P.M.McCulloch, P.A.Hamilton, D.McConnel, F.A.King*, *Nature*, **346**, 822, 1990.
4. *C.S.Flanagan*, *Nature*, **345**, 416, 1990.
5. *A.G.Lyne, F.Graham-Smith, R.S.Pritchard*, *Nature*, **359**, 706, 1992.
6. *G.Байт, С.Реттик, Д.Пайнс, М.Рудерман*, *Nature*, **224**, 872, 1969.
7. *M.A.Alpar, P.W.Anderson, D.Pines, J.Shaham*, *Astrophys. J.*, **276**, 325, 1984.
8. *M.A.Alpar, H.F.Chou, K.S.Cheng, D.Pines*, *Astrophys. J.*, **409**, 345, 1993.
9. *P.B.Jones*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **243**, 257, 1990.
10. *P.B.Jones*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **246**, 315, 1990.
11. *P.B.Jones*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **263**, 619, 1993.
12. *А.Д.Седракян, Д.М.Седракян*, *Ж. эксперим. и теор. физ.*, **102**, 721, 1992.
13. *A.D.Sedrakian, D.M.Sedrakian*, *Astrophys. J.*, **447**, 305, 1995.
14. *A.D.Sedrakian, D.M.Sedrakian, J.M.Cordes, Y.Terzjan*, *Astrophys. J.*, **447**, 324, 1995.
15. *Д.М.Седракян*, *Астрофизика*, **40**, 403, 1997.
16. *D.Langlois, D.Sedrakian, B.Carter*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **297**, 1189, 1998.
17. *М.В.Айрапетян, Д.М.Седракян*, *Астрофизика*, **42**, 89, 1999.
18. *Д.М.Седракян, М.В.Айрапетян*, *Астрофизика*, **43**, 85, 2000.
19. *F.Weber*, "Hadron Physics and Neutron Star Properties". Habilitation Thesis, Univ. Munich, 1992.
20. *R.B.Wiringa, V.Fiks, A.Fabrochini*, *Phys. Rev.C.*, **38**, 1010, 1988.
21. *E.Chubarian, H.Grigorian, G.Poghosyan, D.Blaschke*. *Classical and Quantum Gravity*. 1999 (in press).
22. *D.Blaschke, H.Grigorian, G.Poghosyan, C.D.Roberts, S.Schmidt*. *Physics Lett. B.*, **450**, 207, 1999.
23. *G.Poghosyan*. Ph.D., Yerevan, 2000.
24. *M.Baldo, J.Cugnon, A.Lejeune, U.Lombardo*, *Nucl. Phys.A.*, **536**, 349, 1992.