

ГРАВИТАЦИОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СВЕРХТЕКУЧЕЙ НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ

М.В.АЙРАПЕТЯН

Поступила 18 февраля 2008

Принята к печати 22 июля 2008

Рассмотрено гравитационное излучение нейтронной звезды при наличии слабо-связанной сверхтекучей компоненты. Предполагается, что в ядре звезды могут существовать области, вращающиеся с значительно большими величинами угловой скорости, чем наблюдаемые значения угловой скорости пульсаров. Такая звезда обладает квадрупольным моментом порядка максимального значения для обсуждаемых конфигураций нейтронных звезд и может стать мощным источником гравитационного излучения для планируемого детектора Advanced LIGO.

Ключевые слова: *звезды:нейтронные:вращение*

1. *Введение.* Детектирование гравитационных волн является одной из важнейших проблем современной астрофизики. С этой целью планируется ввести в строй высокочувствительные детекторы нового поколения (Advanced LIGO), с помощью которых можно зарегистрировать гравитационные волны с относительной амплитудой $h_0 \sim 10^{-23} + 10^{-24}$ в рабочем диапазоне частот от 0.1 кГц до нескольких килогерц [1]. Наиболее перспективными источниками для этого типа земных детекторов являются одиночные пульсары. Рассмотренные ранее механизмы гравитационного излучения от одиночных пульсаров и миллисекундных пульсаров [2-4] дают значения для h_0 порядка $h_0 \leq 10^{-26}$ для частот гравитационных волн порядка килогерц. Это значение лежит далеко от предела чувствительности как ныне работающих (GEO-600, LIGO), так и планируемых детекторов гравитационных волн. Поэтому важно обсудить другие механизмы гравитационного излучения пульсаров, которые могут привести к значениям h_0 , необходимой для детектирования гравитационных волн.

Известно, что нейтронная звезда может стать источником гравитационного излучения, если ее квадрупольный момент зависит от времени [5]. К такой зависимости могут привести осцилляции сплюснутой из-за вращения нейтронной звезды. В работе [6] рассматривались квазирадиальные, затухающие осцилляции быстровращающейся нейтронной звезды, где были получены выражения для интенсивности гравитационного излучения и

времени затухания осцилляций звезды. В работах [2,3] предлагались источники энергии для поддержания незатухающих осцилляций нейтронных звезд. Ими могут быть энергия деформации замедляющейся нейтронной звезды или часть энергии вращения звезды, которая передается из внутренних сверхтекучих слоев коре нейтронной звезды во время внезапного скачка угловой скорости. В последнем случае механизм гравитационного излучения может быть эффективным, если время затухания осцилляций τ_s меньше времени между двумя последовательными скачками τ_{glitch} . Тогда, при заданном значении энергии гравитационного излучения $\Delta W = I \Omega \Delta\Omega$, где $\Delta\Omega$ - величина скачка угловой скорости, интенсивность гравитационного излучения, определенная как

$$J_0 = \frac{\Delta W}{\tau_s} = \frac{I \Omega \Delta\Omega}{\tau_s}, \quad (1)$$

может принять большие значения, что в свою очередь необходимо для получения больших значений амплитуды h_0 гравитационного излучения.

Известно, что время затухания осцилляций τ_s обратно пропорционально квадрату квадрупольного момента звезды [6]. Нейтронная звезда может приобрести большое значение квадрупольного момента при быстром вращении, т.е. вышеуказанный механизм может быть достаточно эффективным для миллисекундных пульсаров [4]. В работах [2-4] принималось, что угловые скорости вращения сверхтекучей и нормальной компонент звезды мало отличаются друг от друга - $\Omega_n \approx \Omega_s$, т.е. звезда совершает почти твердотельное вращение. Но известно, что из-за наличия слабосвязанной сверхтекучей нейтрон-протонной жидкости, динамическое время релаксации звезды может значительно превышать время жизни пульсара ($\tau_0 \approx 10^4$ лет для пульсара Vela и $\tau_0 \approx 10^3$ лет для пульсара Crab) [7,8]. Это означает, что если при рождении горячей нейтронной звезды она вращалась с угловой скоростью порядка 6000 с^{-1} ($p \sim 1 \text{ мс}$), то при охлаждении и переходе в сверхтекучее состояние ее внутренние области могут вращаться быстрее, чем наблюдаемая угловая скорость коры звезды [9]. Тогда быстровращающиеся внутренние части нейтронной звезды более сплюснуты, чем при твердотельном вращении с наблюдаемой угловой скоростью. В этом случае молодые пульсары типа Vela и Crab с временем жизни порядка 10^3 - 10^4 лет могут обладать квадрупольным моментом, близким к значению этой величины для быстровращающихся нейтронных звезд. Следовательно, пульсары, наблюдаемые скорости вращения которых на один-два порядка меньше максимального значения угловой скорости, соответствующие истечению вещества из экватора, могут быть достаточно эффективными источниками гравитационного излучения.

Цель данной статьи - изучить гравитационное излучение нейтронных звезд с быстровращающимися внутренними сверхтекучими областями.

Источником энергии гравитационного излучения принимается энергия, вовлеченная в процесс скачка угловой скорости. На примере пульсаров Vela вычисляются интенсивность гравитационного излучения и амплитуда гравитационных волн для земного наблюдателя.

2. *Гравитационное излучение осциллирующей звезды и время затухания осцилляций.* При квазирадиальных "подобных" осцилляциях по закону

$$x_{\alpha} = x_{\alpha}^0(1 + \eta \sin \omega t), \quad (2)$$

нейтронная звезда излучает гравитационные волны с средним значением интенсивности [2,6]

$$J_0 = \frac{G}{15c^5} \eta^2 \omega^6 |D_{\alpha}^0|^2, \quad (3)$$

где η - относительная амплитуда осцилляций ($\eta \ll 1$), ω - их частота, D_{α}^0 - квадрупольный момент звезды относительно оси вращения без осцилляций. Амплитуда плоской гравитационной волны на расстоянии R_0 от источника равна:

$$h_0 = \frac{1}{2} \frac{G}{c^4 R_0} |D_{\alpha}^0|^2 \omega^2 \eta = \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{15 J_0 G}{4 c^3 \omega^2}}. \quad (4)$$

Осцилляции звезды будут затухать за характерное время τ_g , выражение для которого имеет вид [2,4]

$$\tau_g = \frac{15c^5}{G} \frac{I_0}{\omega^4 |D_{\alpha}^0|^2}, \quad (5)$$

где I_0 - момент инерции звезды относительно центра.

Как видно из формул (1) и (5), для вычисления интенсивности гравитационного излучения необходимо знать значение квадрупольного момента звезды. Для оценки значения D_{α}^0 нейтронной звезды необходимо знать, в какой части нейтронной звезды угловая скорость вращения сверхтекучего вещества значительно превышает угловую скорость вращения коры звезды. Величина угловой скорости вращения сверхтекучей компоненты в зависимости от радиуса r звезды определяется значением времени релаксации τ_d , которое в свою очередь является функцией от радиуса r звезды. Зависимость $\tau_d(r)$ будет обсуждаться в разделе 3.

3. *Время динамической релаксации и квадрупольный момент звезды.* Известно, что ядро нейтронной звезды - "пре"-фаза, состоит из сверхтекучих нейтронов, сверхпроводящих протонов и нормальных электронов. Связь нейтрон-протонного конденсата с замедляющейся нормальной компонентой осуществляется через рассеяние электронов на магнитном поле вихревого кластера, возникающего из-за эффекта увлечения

сверхпроводящих протонов сверхтекучими нейтронами [7]. Как показывают расчеты на основе стандартных моделей НЗ [7,8], динамическое время релаксации звезды, характеризующее связь между нормальной и сверхтекучей компонентами нейтронной звезды, монотонно увеличивается от нуля на границе раздела "пре"-фазы и коры, до значения порядка 10^4 лет при $r = 6.65$ км, при котором сверхпроводящая щель протонов замыкается.

Как было сказано выше, в областях звезды, где динамическое время релаксации τ_d превышает время жизни пульсара, угловая скорость вращения сверхтекучей компоненты может намного превышать наблюдаемую угловую скорость вращения звезды. Используя стандартную модель НЗ и расчеты времени τ_d [8], можно найти, что условие $\tau_d \geq \tau_0$ ($\tau_0 \sim 10^4$ лет) выполняется в области $6.65 \text{ км} \leq r \leq 8 \text{ км}$. Теперь нам необходимо оценить квадрупольный момент НЗ, вращающейся с угловой скоростью Ω , в которой область $6.65 \text{ км} \leq r \leq 8 \text{ км}$ вращается угловой скоростью порядка $\Omega_{\max}$, где $\Omega_{\max}$ - максимальная угловая скорость вращения для данной конфигурации. Используя расчеты значения накопленного момента инерции нейтронной звезды для модели массой $M = 1.4 M_\odot$ и полным моментом инерции $I_0 = 1.15 \cdot 10^{45} \text{ г см}^2$ [10], можно найти, что момент инерции области $6.65 \text{ км} \leq r \leq 8 \text{ км}$ составляет примерно $\Delta I = 3.44 \cdot 10^{44} \text{ г см}^2$, следовательно, относительный момент инерции этой области - $\Delta I/I = 0.3$. Для однородно вращающейся нейтронной звезды с угловой скоростью Ω можно полагать, что квадрупольный момент этой области также составляет $\Delta D_0 = 0.3 D_\alpha^0$, где D_α^0 - полный квадрупольный момент звезды. Но, как известно, квадрупольный момент пропорционален квадрату угловой скорости вращения, следовательно, если область нейтронной звезды $6.65 \text{ км} \leq r \leq 8 \text{ км}$ вращается с угловой скоростью $\Omega_{\max}$, то ее квадрупольный момент будет в $(\Omega_{\max}/\Omega)^2$ раз превышать значение ΔD_0 , т.е.

$$\Delta D = 0.3(\Omega_{\max}/\Omega)^2 D_\alpha^0 = 0.3 D_\alpha^{0\max}, \quad (5)$$

где $D_\alpha^{0\max}$ - квадрупольный момент нейтронной звезды, вращающейся с угловой скоростью $\Omega_{\max}$. Теперь квадрупольный момент нейтронной звезды с быстровращающейся внутренней частью можно оценить как

$$D_\alpha^{\text{в}} = D_\alpha^0 - \Delta D_0 + \Delta D = D_\alpha^0 - 0.3 D_\alpha^0 + 0.3(\Omega_{\max}/\Omega)^2 D_\alpha^0 = 0.3 D_\alpha^{0\max}, \quad (6)$$

где было учтено, что $\Omega_{\max}/\Omega \approx 100$. Таким образом, значение квадрупольного момента нейтронной звезды с быстровращающейся внутренней частью оказывается одного порядка с максимальным значением этой величины.

4. *Обсуждение результатов.* Перейдем к оценке интенсивности гравитационного излучения и амплитуды гравитационных волн, обусловленных скачками угловой скорости вращения на примере пульсара Vela. При больших скачках порядка $\Delta\Omega/\Omega \sim 10^{-6}$ энергия, которая может

излучаться в виде гравитационных волн осцилляциями звезды, равна $\Delta W = I \Omega \Delta \Omega = I \Omega^2 (\Delta \Omega / \Omega)$. Для нахождения интенсивности гравитационного излучения по формуле (1) необходимо найти время затухания осцилляций звезды τ_g . Его можно найти по формуле (4), если известны интегральные характеристики нейтронной звезды - момент инерции I_0 и максимальное значение квадрупольного момента $D_{\alpha\alpha}^{0\max}$, и частота осцилляций ω . Задачи исследования вращения и устойчивости нейтронных звезд изучались в работах [11,12]. Из них следует, что для стандартной модели нейтронной звезды с массой $M = 1.4 M_\odot$ момент инерции составляет примерно $I_0 = 10^{45}$ гсм², квадрупольный момент - $D_{\alpha\alpha}^{0\max} = 9.73 \cdot 10^{43}$ гсм², а частота осцилляций - $\omega = 3 \cdot 10^3$ с⁻¹. Подставляя эти значения в формулу (4) и учитывая (6), получим $\tau_g = 7.4 \cdot 10^5$ с. Тогда, если учесть, что для пульсара Vela $\Omega = 70$ с⁻¹, для интенсивности гравитационного излучения из формулы (1) получим $J_0 = 6.7 \cdot 10^{37}$ эрг/с. Подставляя найденное значение J_0 и вышеприведенное значение ω в формулу (4), находим амплитуду гравитационного излучения для земного наблюдателя $h_0 = 3 \cdot 10^{-25}$, где мы учли, что пульсар Vela находится на расстоянии $R_0 = 0.3$ кпк от Земли. Примечательно, что полученное нами значение h_0 всего на один порядок меньше предполагаемого инструментального значения этой величины для детектора Advanced LIGO [1].

При получении вышеприведенных оценок квадрупольного момента $D_{\alpha\alpha}^{0\alpha}$ мы основывались на механизме связывания сверхтекучей и нормальной компонент нейтронной звезды [7]. Нами не было учтено, что внутренняя область нейтронной звезды при $r < 6.65$ км полностью может также содержать сверхтекучую материю в виде адронного вещества или же в центральной части ядра звезды может находиться кварковое вещество. В первом случае мы имеем сверхтекучую компоненту, не связанную с нормальной компонентой звезды - нормальными электронами и протонами. Следовательно эта область также может вращаться с угловой скоростью, значительно превышающей наблюдаемую скорость вращения пульсара. Очевидно, что учет этого обстоятельства будет увеличивать значение $D_{\alpha\alpha}^{0\alpha}$. Во втором случае, т.е. при наличии кваркового вещества, как показано в работе [13], магнитное поле проникает в кварковое вещество в виде квантовых вихрей. Можно полагать, что если связь сверхтекучей кварковой материи с нормальной компонентой звезды осуществляется рассеянием электронов на сильном магнитном поле вихря, то время релаксации в этой области также будет иметь значение $\tau_d \geq \tau_0$. Следовательно область кварковой материи также будет вносить вклад и увеличивать значение $D_{\alpha\alpha}^{0\alpha}$. Таким образом, в обоих случаях мы вправе ожидать более оптимистичных значений амплитуды гравитационной волны в рамках рассмотренной модели, близкой к порогу чувствительности планируемого детектора Advanced LIGO.

Автор выражает благодарность академику НАН РА Д.М.Седракяну за проявленный интерес к работе и обсуждение результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках гранта ANSEF PS-astroth-1389.

Ереванский государственный университет,
Армения, e-mail: mhayr@server.physdep.r.am

GRAVITATIONAL RADIATION FROM DIFFERENTIALLY ROTATING SUPERFLUID NEUTRON STAR

M.V.HAYRAPETYAN

Gravitational radiation of a neutron star with weak-coupled superfluid interiors is considered. It is supposed, that in the core of a neutron star may exist a region with an angular velocity higher than observed angular velocities of pulsars. The estimated value of quadrupole moment of such a neutron star with fast rotating interiors is of the order of its maximal value for these objects. Therefore the considered objects can become a source of strong gravitational radiation for planning ground-based detector Advanced LIGO.

Key words: *stars: neutron: rotation*

ЛИТЕРАТУРА

1. R.N.Manchester, arXiv:0710.5026 [astro-ph], 2007.
2. Д.М.Седракян, М.Бенаквиста, К.М.Шахабасян, А.А.Садоян, М.В.Айрапетян, *Астрофизика*, **46**, 545, 2003.
3. Д.М.Седракян, М.К.Шахабасян, М.В.Айрапетян, *Астрофизика*, **49**, 221, 2006.
4. Д.М.Седракян, М.В.Айрапетян, Л.Р.Седракян, *Астрофизика*, **51**, 479, 2008.
5. Л.Д.Ландау, И.М.Лифшиц, *Теория поля.*, Наука, М., 1972.
6. Ю.Л.Вартанян, Г.С.Адзян, *Астрон. ж.*, **54**, 1047, 1977.
7. A.D.Sedrakian, D.M.Sedrakian, *Astrophys. J.*, **447**, 305, 1995.
8. Д.М.Седракян, К.М.Шахабасян, Ю.Брук, *Астрофизика*, **40**, 497, 1997.
9. A.Sedrakian, J.Cordes, *Astrophys. J.*, **502**, 378, 1998.
10. F.Weber, *Hadron Physics and Neutron Star Properties*, Habilitation Thesis, University of Munich, 1992.
11. В.В.Папоян, Д.М.Седракян, Э.В.Чубарян, *Астрон. ж.*, **49**, 750, 1972.
12. Г.Г.Арутюнян, Д.М.Седракян, Э.В.Чубарян, *Астрон. ж.*, **49**, 1216, 1972.
13. D.M.Sedrakian, D.Blaschke, *Астрофизика*, **45**, 203, 2002.