УДК: 524.354.6-423

ГРАВИТАЦИОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ МЕДЛЕННО ВРАЩАЮЩИХСЯ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Д.М.СЕДРАКЯН, М.В.АЙРАПЕТЯН, М.К.ШАХАБАСЯН

Поступила 26 октября 2005

Рассмотрено гравитационное излучение медленно вращающихся пульсаров с шероховатой поверхностью. Источником излучения гравитационных волн принимается энергия, которая передается коре звезды во время нерегулярных изменений угловой скорости вращения. Показано, что одиночные пульсары, угловая скорость которых регулярно претерпевает скачки, излучают периодический гравитационный сигнал, который можно выделить из шумов детекторами нового поколения. Одновременная регистрация гравитационного сигнала и скачка угловой скорости пульсара обеспечит достоверность детектирования гравитационного излучения.

1. *Введение.* Как известно, наблюдение сближения компонентов двойной системы PSR 1913+16 из-за гравитационных эффектов послужило косвенным доказательством существования гравитационных волн [1]. Возможными источниками гравитационных волн могут быть также столкновения или тесные сближения астрофизических объектов, а также гравитационный коллапс массивной звезды, приводящий к образованию нейтронной звезды или черной дыры [2]. Однако эти явления достаточно редки и непредсказуемы, следовательно мала вероятность детектирования гравитационного излучения от них. Поэтому в последнее время все больше внимания уделяется возможности гравитационного излучения от одиночных компактных объектов: нейтронных звезд и белых карликов, за которыми можно проводить непрерывные наблюдения. С учетом этого, современные детекторы гравитационного излучения на основе земных (LIGO и VIRGO) и космических (LISA) интерферометров имеют цель именно прямого детектирования гравитационных волн.

Общеизвестно, что одиночная нейтронная звезда будет излучать гравитационные волны, если ее квадрупольный момент зависит от времени. В работах [3-9] рассмотрены различные механизмы, которые приводят к временной зависимости квадрупольного момента звезды. Квазирадиальные пульсации сплюснутой из-за вращения звезды рассмотрены в работе [3], где вычислены интенсивность и характерное время затухания пульсаций. Было показано, что квазирадиальные пульсации нейтронных звезд будут затухать через несколько секунд,

следовательно для непрерывного их поддержания и излучения гравитационных волн необходимо наличие источника энергии в звезде. В работе [4] принималось, что источником гравитационного излучения может служить энергия, обусловленная деформацией вращающейся нейтронной звезды. Деформационная энергия звезды выделяется при замедлении из-за магнитодипольного излучения звезды. Замедление не является непрерывным и сопровождается накоплением критических напряжений и "звездотрясением", которое и возбуждает квазирадиальные пульсации в звезде. В этой же работе указан еще один источник генерации и поддержания квазирадиальных пульсаций - энергия, выделяемая при скачках и флуктуациях угловой скорости пульсаров. Предполагалось, что при нерегулярных изменениях угловой скорости часть энергии вращения передается коре нейтронной звезды путем возбуждения квазирадиальных пульсаций. Оценки амплитуды гравитационной волны h для земного наблюдателя от пульсаров Vela и Crab показывают, что ее значение пока ниже предела чувствительности существующих детекторов гравитационного излучения, что подтверждается недавними измерениями [10].

Изучались также различные моды пульсаций и прецессии нейтронной звезды с учетом сверхтекучести внутренних слоев звезды [5-9]. Согласно результатам работы [8], где изучались долгоживущие прецессии трехосной нейтронной звезды, амплитуда гравитационной волны для земного наблюдателя оказывается не выше 10^{-30} , что существенно ниже порога чувствительности планируемых детекторов. В работах [6,7] рассматривалась возможность гравитационного излучения на различных модах пульсаций двухкомпонентной сверхтекучей системы в нейтронной звезде. Но, как показано в [9], рассмотренные в [6,7] моды пульсаций вещества не могут вызывать изменения квадрупольного момента звезды, следовательно эти пульсации не могут сопровождаться излучением гравитационных волн.

В работе [5] рассматривалась возможность гравитационного излучения от нейтронной звезды в форме трехосного эллипсоида вращения. Такую форму звезда может приобрести из-за напряжений, возникающих в кристаллической коре при замедлении звезды, и из-за шероховатости в виде "гор", появляющихся при кристаллизации поверхности звезды. Но, как показывают расчеты (см. далее), характерные размеры неоднородностей на поверхности нейтронной звезды не могут превышать 10^{-1} см из-за сильного гравитационного поля звезды. Размеры неоднородностей малы, и если принять, что звезда излучает гравитационные волны за счет энергии вращения или энергии деформации, то рассмотренные в работах [4,5] механизмы

гравитационного излучения могут быть достаточно эффективными только для миллисекундных пульсаров. Благодаря быстрому вращению эти звезды наиболее сплюснуты и обладают большим запасом энергии вращения и энергии деформации. Преобразование этих видов энергии в гравитационное излучение в течение всего времени жизни может обеспечить такую интенсивность излучения, которую можно измерить детекторами гравитационных волн. Таким образом, миллисекундные пульсары являются одним из вероятных источников гравитационных волн для детекторов нового поколения.

Однако основная популяция пульсаров имеет угловые скорости вращения значительно меньше, чем у миллисекундных пульсаров. От медленно вращающихся нейтронных звезд можно ожидать гравитационные волны с измеряемыми амплитудами в случае более мощного источника, т.е. преобразование энергии источника в гравитационное излучение должно происходить за короткое время. Такое может произойти во время скачков и флуктуаций угловой скорости вращения, при которых угловая скорость претерпевает изменения порядка $\Delta\Omega/\Omega \sim 10^{-6} - 10^{-9}$, а ее производная - порядка $|\dot{\Delta\Omega}/\Omega| \sim 10^{-2} - 10^{-4}$. При замедлении звезды в нем накапливается неустойчивость, при снятии которой часть энергии вращения внутренних слоев звезды передается коре. За счет этой энергии кора звезды внезапно ускоряется, а в звезде возбуждаются квазирадиальные пульсации. В дальнейшем в звезде устанавливаются незатухающие квазирадиальные пульсации за счет постоянных флуктуаций угловой скорости, которые сопровождаются непрерывной передачей энергии вращения коре звезды.

Цель данной статьи - изучить гравитационное излучение медленно вращающихся нейтронных звезд, испытывающих квазирадиальные пульсации. При этом источником энергии гравитационного излучения принимается энергия, выделяемая во время нерегулярных изменений угловой скорости - скачков угловой скорости и "шумов" между скачками. Далее в разделе 2 вычислены интенсивность гравитационного излучения и амплитуда гравитационных волн для наблюдателя на Земле при квазирадиальных пульсациях нейтронной звезды с шероховатой поверхностью, т.е. с наличием "гор" на поверхности. В разделе 3 приводятся оценки размеров шероховатостей на поверхности нейтронной звезды, а в разделе 4 обсуждается возможность детектирования гравитационных волн от медленно вращающихся пульсаров при скачках и дальнейшей релаксации угловой скорости.

2. Гравитационное излучение пульсирующей нейтронной звезды с шероховатой поверхностью. Рассмотрим медленно вращающуюся с угловой скоростью $\Omega \ll \Omega_{кр}$ нейтронную звезду с шероховатой

поверхностью, где $\Omega_{кр}$ - максимальное значение угловой скорости вращения для данной конфигурации, соответствующее истечению вещества из экватора. При вращении нейтронная звезда сплющивается из-за центробежных сил так, что ее полярный радиус отличается от экваториального. Мы предполагаем, что из-за наличия гор на поверхности сечение нейтронной звезды экваториальной плоскостью представляет собой эллипс. Такой объект обладает отличным от нуля квадрупольным моментом. Если принять также, что из-за постоянных флуктуаций угловой скорости вращения и качания в нейтронной звезде возбуждается главная мода пульсаций вещества - квазирадиальные пульсации, то квадрупольный момент звезды зависит также от времени. Таким образом, нейтронная звезда с шероховатой поверхностью и испытывающая квазирадиальные пульсации, является источником гравитационного излучения. Интенсивность гравитационного излучения определяется формулой [11]:

$$J = \frac{G}{45c^5} \ddot{D}_{\alpha\beta}^2, \quad (1)$$

где

$$D_{\alpha\beta} = \int \rho (3 x_\alpha x_\beta - r^2 \delta_{\alpha\beta}) dV \quad (2)$$

тензор квадрупольного момента масс. При подобных пульсациях координаты x_α меняются по закону

$$x_\alpha = x_\alpha^0 (1 + \eta \sin \omega t), \quad (3)$$

где η - относительная амплитуда этих колебаний, ω - их частота. Предполагается, что $\eta \ll 1$ и не зависит от радиальных и угловых координат. Подставляя (3) в (2), получим зависящий от времени квадрупольный момент пульсирующей звезды:

$$D_{\alpha\beta}(t) = D_{\alpha\beta}^0 (1 + 2\eta \sin \omega t), \quad (4)$$

где $D_{\alpha\beta}^0$ - квадрупольный момент звезды без пульсаций. Так как рассматриваемая нами звезда вращается медленно, т.е. $\Omega \ll \Omega_{кр}$, значения полярного и экваториального радиусов мало отличаются. Можно считать также, что плотность вещества звезды зависит только от сферического радиуса: $\rho = \rho(r)$. Направим ось X координатной системы с началом в центре масс по направлению "горы", а ось Z - в направлении полюсов звезды. Тогда для отличных от нуля компонентов $D_{\alpha\beta}^0$ имеем следующие соотношения:

$$D_{yy}^0 = D_{xx}^0 = -\frac{D_{zz}^0}{2}. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (1) и учитывая (5), для интенсивности гравитационного излучения получим:

$$J = \frac{8G}{15c^5} \eta^2 \omega^6 |D_{\alpha\alpha}^0|^2 \cos^2 \omega t' = J_0 \cos^2 \omega t', \quad (6)$$

где $t' = t - R_0/c$, и

$$J_0 = \frac{8G}{15c^5} \eta^2 \omega^6 |D_{\alpha\alpha}^0|^2, \quad (7)$$

а R_0 - расстояние от звезды до точки наблюдения. Как будет показано в дальнейшем (см. раздел 3), размеры шероховатостей на поверхности малы по сравнению с радиусом звезды. Если ввести эллиптичность ε согласно определению

$$\varepsilon = \frac{2(a-b)}{a+b}, \quad (8)$$

где a и b полуоси эллипса экваториального сечения, то имеем $b = R$, $a = R(1 + \varepsilon)$, а R - радиус звезды. Тогда выражение (7) для J_0 можно привести к следующему виду:

$$J_0 = \frac{32G}{135c^5} \eta^2 \omega^6 \varepsilon^2 I_0^2, \quad (9)$$

где $I_0 = 4\pi \int_0^R \rho(r) r^4 dr$ - момент инерции звезды относительно центра.

Два типа линейно поляризованных плоских волн, излучаемых объектом, определяются величинами h_+ и h_x , для которых имеем следующие выражения:

$$h_+ = \frac{1}{2} (h_{yy} - h_{zz}) = -\frac{G}{3c^4 R_0} (\ddot{D}_{yy} - \ddot{D}_{zz}), \quad (10)$$

$$h_x = h_{yz} = -\frac{2G}{3c^4 R_0} \ddot{D}_{yz}, \quad (11)$$

где R_0 - расстояние нейтронной звезды от земного наблюдателя. Если волновой вектор гравитационной волны составляет угол Φ с направлением оси X , то, вращая систему координат так, чтобы направление волнового вектора совпадало с осью X , для h_+ и h_x можно получить:

$$h_+ = \frac{4G}{3c^4 R_0} \eta \omega^2 \varepsilon I_0 \sin^2 \Phi \sin \omega t' = h_0 \sin \omega t', \quad (12)$$

$$h_x = 0, \quad (13)$$

где после усреднения по углам Φ для амплитуды h_0 гравитационной волны имеем:

$$h_0 = \frac{2G}{3c^4 R_0} \eta \omega^2 \varepsilon I_0. \quad (14)$$

Таким образом, если задать энергию источника гравитационного

излучения, т.е. задать значение J_0 , то, как видно из формул (7) и (14), можно получить выражение для амплитуды гравитационной волны h_0 в следующем виде:

$$h_0 = \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{15 J_0 G}{8 c^3 \omega^2}}. \quad (15)$$

При заданном значении J_0 из (9) можно найти также величину η :

$$\eta = \frac{1}{\omega^3 \varepsilon I_0} \sqrt{\frac{135 J_0 c^5}{32 G}}. \quad (16)$$

Для применимости наших расчетов необходимо, чтобы выполнялось условие $\eta \ll 1$.

3. *Оценки размеров шероховатостей на поверхности нейтронной звезды.* Как видно из формул (9) и (15), интенсивность гравитационного излучения и амплитуда волн зависят от эллиптичности ε . Для оценки этой величины необходимо знать характерные размеры шероховатостей на поверхности нейтронной звезды. Согласно общепринятой картине внутреннего строения нейтронных звезд, кора звезды состоит из внутренней (Аен-фаза) и внешней (Ае-фаза) частей [12]. Ае-фаза состоит в основном из ядер ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ и вырожденного газа нормальных электронов. Ядра железа образуют объемно-центрированную кристаллическую решетку, создавая тем самым твердую внешнюю кору нейтронной звезды. Плотность вещества в Ае-фазе меняется от 10^4 г см^{-3} до $10^{11} \text{ г см}^{-3}$. Теперь оценим наибольшую высоту горы, которая может выдержать собственную тяжесть в условиях гравитационного поля нейтронной звезды [13]. Как известно, модуль упругости коры нейтронной звезды по отношению к поперечным колебаниям равен

$$Y = \frac{Z^2 e^2}{a_0^4}, \quad (17)$$

где a_0 - межъядерное расстояние. Предельное напряжение сдвига составляет примерно 0.01 части этой величины:

$$S = \frac{Z^2 e^2}{100 a_0^4}. \quad (18)$$

А высоту горы можно оценить как

$$H = \frac{S}{\rho g} = \frac{10^{12}}{\rho g} \rho^{1/3} \text{ см}, \quad (19)$$

где ρ - плотность поверхностного слоя, g - ускорение свободного падения на поверхности. После нахождения высоты горы на поверхности, из формулы (8) мы получим для эллиптичности выражение $\varepsilon = H/R$, которое будем использовать в дальнейшем для оценки

интенсивности излучения и амплитуды гравитационной волны.

4. *Гравитационное излучение при скачках угловой скорости медленно вращающихся нейтронных звезд.* Как уже было сказано выше, у пульсаров наблюдаются скачки угловой скорости порядка $\Delta\Omega/\Omega \sim 10^{-6} - 10^{-9}$ и ее производной порядка $|\dot{\Delta\Omega}/\dot{\Omega}| \sim 10^{-2} - 10^{-4}$. Мы предполагаем, что одним из возможных источников генерации и поддержания квазирадиальных пульсаций могут служить скачки и постоянные флуктуации угловой скорости звезды. Можно полагать, что при нерегулярных изменениях угловой скорости часть энергии, вовлеченная в процесс ускорения звезды, передается коре нейтронной звезды путем возбуждения квазирадиальных пульсаций и затем уносится гравитационным излучением. При скачках коре нейтронной звезды передается энергия

$$\Delta \dot{W} = I \Omega \Delta \dot{\Omega}, \quad (20)$$

где I - момент инерции звезды. Мощность, которая передается коре звезды, определяется как

$$\Delta \dot{W} = I \Omega \Delta \dot{\Omega} = I \Omega \dot{\Omega} \frac{\Delta \dot{\Omega}}{\dot{\Omega}} = \dot{W} \frac{\Delta \dot{\Omega}}{\dot{\Omega}}, \quad (21)$$

где $\dot{W}$ - стационарные потери энергии вращения нейтронной звезды при вековом замедлении. При получении (21) учтено, что $(\dot{\Omega}/\Delta\Omega)(\Delta\Omega/\Omega) \ll 1$. Мы полагаем, что вся энергия квазирадиальных пульсаций излучается в виде гравитационных волн. Следовательно, мы должны принять, что

$$J_0 = \Delta \dot{W}. \quad (22)$$

Для того, чтобы выяснить, можно ли детектировать гравитационные волны от медленно вращающихся нейтронных звезд, оценим интенсивность возможного гравитационного излучения на примере пульсара Vela PSR 0833-45. Угловая скорость вращения и темп замедления этого пульсара равны соответственно $\Omega = 70 \text{ с}^{-1}$ и $|\dot{\Omega}| = 10^{-10} \text{ с}^{-2}$, а расстояние до него $r = 0.3 \text{ кпк}$. Известно также, что при скачках величина $\dot{\Omega}$ изменяется на максимальную величину порядка $|\dot{\Delta\Omega}/\dot{\Omega}|_{\max} \sim 10^{-2}$, а после релаксации $\dot{\Omega}$ претерпевает изменения порядка $|\dot{\Delta\Omega}/\dot{\Omega}| \sim 10^{-4}$. Для определения J_0 и h_0 , как видно из формул (21), (22) и (15), необходимо также знать момент инерции нейтронной звезды и частоту квазирадиальных пульсаций вещества звезды. Равновесные конфигурации нейтронных звезд и их квазирадиальные пульсации исследовались в работах [14,15] в связи с определением интегральных характеристик и условий устойчивости этих звезд. Если взять в основу стандартную модель нейтронной звезды из работы [14] с центральной плотностью

$\rho_c = 10^{15} \text{ г см}^{-3}$, то масса звезды составляет примерно $M = 1.3 M_\odot$, радиус - $R = 10 \text{ км}$, а момент инерции порядка $I = 10^{45} \text{ г см}^2$. Согласно исследованиям, проведенным в работе [15], при $M > 0.5 M_\odot$ частота пульсаций ω слабо зависит от массы звезды и меняется от $2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ до 10^4 с^{-1} . Для выбранной нами модели нейтронной звезды значение частоты пульсаций равно примерно $\omega = 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Используя вышеприведенные значения для массы M и радиуса R звезды, из формулы (19) можно найти высоту горы на поверхности. Если взять плотность поверхностного слоя равной 10^4 г/см^3 , то для H получим значение $H = 0.6 \text{ см}$. Тогда эллиптичность звезды, которая определяется как $\varepsilon = H/R$, будет равна $\varepsilon = 6 \cdot 10^{-7}$. Теперь обратимся к формулам (9) и (14) для оценки интенсивности гравитационного излучения и амплитуды волн. Так, для максимального значения интенсивности J_0 из (9) получим значение $J_{0 \max} = 7 \cdot 10^{34} \text{ эрг/с}$, а из (14) находим $h_{0 \max} = 4 \cdot 10^{-27}$. Обычно после сотни дней от момента скачка устанавливается флуктуационное поведение угловой скорости, при котором $|\Delta\dot{\Omega}/\dot{\Omega}| \sim 10^{-4}$. Тогда для интенсивности J_0 и амплитуды h_0 получим соответственно $J_0 = 7 \cdot 10^{32} \text{ эрг/с}$ и $h_0 = 4 \cdot 10^{-28}$. Заметим также, что, согласно выражению (16), значение η равняется $\eta = 10^{-4} \ll 1$, что указывает на правильность наших расчетов.

Ранее в работе [4] также было рассмотрено гравитационное излучение осцилляций нейтронной звезды, но в этой работе деформация звезды была обусловлена вращением. Можно сравнить полученные нами значения h_0 со значением этой величины из работы [4], и сравнение показывает, что они одинакового порядка. Таким образом, нейтронная звезда может излучать энергию скачка в виде гравитационных волн на частоте осцилляций ω благодаря сплюснутости из-за вращения и шероховатой поверхности.

В конце заметим, что одиночные пульсары, угловая скорость которых регулярно претерпевает скачки, представляют другой класс объектов - кандидатов в источники гравитационного излучения. Заметим также, что у пульсаров Vela и Crab скачки происходят в среднем раз в два-три года. Этого времени достаточно для выделения из шумов периодического гравитационного сигнала и его регистрации. Одновременная регистрация гравитационного сигнала и скачка угловой скорости пульсара (скажем, Vela и Crab) обеспечит достоверность детектирования гравитационного излучения.

Авторы выражают благодарность гранту ANSEF N05-PS-astroth-811-78 и гранту CRDF/NFSAT №ARP2-3232/YE-04 за финансовую поддержку.

GRAVITATIONAL RADIATION OF THE SLOWLY
ROTATING NEUTRON STARS

D.M.SEDRAKIAN, M.V.HAYRAPETYAN, M.K.SHAHABASYAN

The gravitational radiation of slowly rotating pulsars with a rough surface is considered. The source of gravitational waves accepts energy, which is transferred to the core of a star at the glitch-time of angular velocity of rotation. It is shown, that the pulsars, which regularly undergoes glitches, radiate a periodic gravitational signal, which is possible to detect by new generation detectors. The simultaneous registration of a gravitational signal and glitch of angular velocity of a pulsar will ensure reliability of detection of gravitational radiation.

Key words: *stars: neutron: gravitational radiation*

ЛИТЕРАТУРА

1. *J.H.Taylor, J.M.Weisberg, Astrophys. J., 253, 908, 1982.*
2. *С.Шаниро, С.Тьюколски, Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды, т.2, Мир, М., 1985.*
3. *Ю.Л.Вартанян, Г.С.Аджян, Астрон. ж., 54, 1047, 1977.*
4. *Д.М.Седракиан, М.Бенаквиста, К.М.Шахабасян, А.А.Садоян, М.В.Айрапетян, Астрофизика, 46, 545, 2003.*
5. *M.Zimmerman, Phys. Rev. D, 21, 891, 1980.*
6. *D.I.Jones, N.Andersson, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 324, 811, 2001.*
7. *N.Andersson, C.T.Comer, astroph/0101193, 2001.*
8. *A.D.Sedrakian, I.Wasserman, J.Cordes, Astrophys. J., 524, 341, 1999.*
9. *A.D.Sedrakian, I.Wasserman, Phys. Rev. D, 63, 024016, 2000.*
10. *V.Abbott, M.Kramer, A.G.Lyne et. al., gr-qc/0410007, 2004.*
11. *Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, Теория поля, Наука, М., 1972.*
12. *Г.С.Саакян, Равновесные конфигурации вырожденных газовых масс, Наука, М., 1972.*
13. *Ф.Дайсон, Д.Тер-Хаар, Нейтронные звезды и пульсары, Наука, М., 1973.*
14. *В.В.Папоян, Д.М.Седракиан, Э.В.Чубарян, Астрон. ж., 49, 750, 1972.*
15. *Г.Г.Арутюнян, Д.М.Седракиан, Э.В.Чубарян, Астрон. ж., 49, 1216, 1972.*