



*Методические заметки
по фундаментальным проблемам
естествознания*

**ВОЗМОЖНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ОТ
ОДИНОЧНЫХ ПУЛЬСАРОВ***

Е.В. Бакланов, В.В. Корухов

Одним из впечатляющих достижений астрофизики второй половины прошлого века (1967 г.) явилось открытие пульсаров – объектов, отождествленных с теоретически предсказанными еще в 30-х годах нейтронными звездами (НЗ). Стандартная модель пульсара – это магнитный диполь, ось которого наклонена к оси вращения, что и приводит к появлению периодических радиосигналов. С физической точки зрения нейтронная звезда представляет собой вращающийся компактный объект, характеризующий определенный этап в процессе эволюции звездных образований. В настоящее время за стандартные параметры НЗ приняты следующие значения: масса $1,4 M_0$ (M_0 – масса Солнца), радиус 10 км. Внутри НЗ реализуются состояния со сверхбольшими плотностями ($\sim 10^{14}$ г/см³) и сверхсильными магнитными полями ($\sim 10^{12}$ Гс) [1].

Для пульсара, входящего в двойную систему, общая теория относительности (ОТО) предсказывает увеличение орбитального периода вращения вокруг центра инерции благодаря гравитационному излучению. Дж. Вейсберг и Дж. Тейлор [2] обнаружили этот эффект в двойной системе, одним из компонентов которой является пульсар PSR B1913+16. Результаты наблюдений, проводившихся в течение 20 лет, находятся в полном

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-06-80426).

согласии с расчетами, сделанными в рамках ОТО. Показано, что изменение орбитального периода $\dot{P} = (-4 \pm 1) 10^{-13}$ с/с обусловлено излучением гравитационных волн. Этот результат служит *косвенным* экспериментальным доказательством существования гравитационного излучения. Аналогичные результаты были получены недавно для двойного пульсара PSR J1141–6545 (белый карлик – нейтронная звезда) [3].

В этой работе мы исследуем возможность обнаружения гравитационных волн от одиночного пульсара. Если доминирующим фактором потерь энергии, как и у Вейсберга и Тейлора [4], является гравитационное излучение, то увеличение периода может быть рассчитано в рамках ОТО. Помимо гравитационного излучения существуют другие факторы, влияющие на регулярное вековое увеличение периодов пульсаров. Наиболее обсуждаемые механизмы потери энергии связаны с различного рода электрическими и магнитными процессами. Энергия, теряемая НЗ за счет излучения гравитационных волн, определяется тензором механического квадрупольного момента масс (см. приложение), что обусловлено существованием асимметрии в плоскости, перпендикулярной оси вращения звезды. Из причин, приводящих к аксиальной асимметрии НЗ, можно отметить магнитные напряжения и напряжения, связанные с силой Магнуса [5].

В нашей работе рассматривается меридиональная асимметрия ε , обусловленная магнитными напряжениями внутри НЗ [6]. Оценим эту величину исходя из следующих соображений. Численное значение величины ε можно получить из анализа баланса характерной величины магнитного давления $p_B = B^2/8\pi$, определяемого значением однородного магнитного поля с напряженностью B внутри звезды и характерной величиной гравитационного давления, удерживающего ее в стационарном состоянии, $p_G = GM^2/R^4$. Имеем

$$\varepsilon = p_B/p_G = B^2 R^4 / 8\pi G M^2.$$

Для стандартной НЗ при $B = 10^{12}$ Гс имеем $\varepsilon \sim 10^{-12}$. Тем самым мы оценили *степень асимметрии* вращающейся НЗ для случая, когда она обусловлена магнитными напряжениями. В наибольшей степени влияние магнитных напряжений на появление меридиональной асимметрии может быть проявлено на открытых недавно объектах – магнитарах, у которых необычно высокое значение напряженности магнитного поля – вплоть до $\sim 10^{15}$ Гс. Для этих НЗ при стандартных параметрах степень асимметрии может достигать значений $\varepsilon \sim 10^{-6}$.

При анализе баланса механизмов потери энергии вращающейся НЗ (гравитационного или электромагнитного) в случае *непосредственного измерения* аксиальной асимметрии ε каким-либо независимым методом существует три возможных варианта развития событий.

Первый состоит в том, что при стандартных параметрах НЗ и измеренных значениях скорости изменения периода вращения можно оценить величину асимметрии, при которой доминирующим будет гравитационный механизм потерь. В приложении рассмотрен вопрос о гравитационном механизме потерь в отношении к известному миллисекундному пульсару PSR 1937+21 ($T = 1,588$ мс). Показано, что если степень асимметрии *в точности* равна рассчитанному значению $\varepsilon = \varepsilon_0 = 3,7 \cdot 10^{-9}$, тогда с достаточной степенью уверенности можно говорить о подтверждении (хотя и косвенном) того, что замедление вращения НЗ связано с потерей энергии посредством гравитационного излучения.

Второй вариант заключается в следующем: если измеренное значение $\varepsilon < \varepsilon_0$, тогда механизм потери энергии скорее всего связан с каким-либо другим доминирующим процессом торможения.

Третий вариант развития событий несколько экзотичен, но и им нельзя пренебрегать. Если для конкретной НЗ измеренное непосредственным образом значение $\varepsilon < \varepsilon_0$, тогда (при любых значениях магнитного поля) можно сделать нетривиальный вывод. Классический механизм гравитационного излучения в рамках эйнштейновской теории гравитации должен быть пересмотрен. Данная ситуация в некотором смысле может быть рассмотрена как конкретный тест на справедливость ОТО.

Чтобы реализовать указанную возможность обнаружения гравитационных волн от одиночных пульсаров, необходимо проанализировать периоды замедления для высокостабильных по частоте пульсаров. В результате наблюдения за реперными пульсарами [7] было установлено, что стабильность их вращения сопоставима со стабильностью атомных стандартов на длительных интервалах времени – около года и более. В настоящее время ведутся работы по построению пульсарной шкалы времени [8]. Прежде всего это связано с тем, что у некоторых пульсаров (например, PSR 1937+21) стабильность частоты на масштабах нескольких лет превышает стабильность современных атомных и лазерных стандартов частоты. Так, для пульсара PSR 1937+21 с периодом 1,558 мс (частота вращения 641,85 Гц) наблюдаемое замедление периода $\dot{P} = 10^{-19}$ с/с. При этом степень аксиальной асимметрии не должна превышать $\varepsilon = 3,7 \cdot 10^{-9}$, так как в противном случае придется предположить отсутствие гравитационных волн (см. приложение). Это очень малая деформация НЗ (10 мкм)

по отношению к ее радиусу (10 км). Отметим, что приведенные оценки получены для стандартных значений параметров пульсара. Существуют модели, в рамках которых радиус и масса могут от них существенно отличаться. Например, в одной из моделей пульсара PSR 1937+21 значение радиуса может быть меньше 1 км [9].

Для пульсара со слабой интенсивностью сигнала точное измерение частоты требует достаточно большого времени наблюдения. Чем больше времени ведется непрерывное накопление сигнала, тем точнее может быть измерена частота его вращения, так как отношение сигнал/шум на детекторе растет как $T^{1/2}$, где T – время наблюдения. Тем самым использование пульсаров с высокой стабильностью частоты излучения позволяет за очень большое время измерить очень малую величину эффекта.

Для того чтобы рассчитать в рамках различных моделей степень аксиальной асимметрии пульсара, необходимо знать его внутреннее строение. В настоящее время существует достаточно много моделей НЗ, в рамках которых, зная определяющие параметры звезды (масса, радиус, магнитное поле), можно получить численное значение степени аксиальной асимметрии. Тем самым мы можем ответить на вопрос о существовании гравитационных волн в рамках рассмотренной модели. Для этого необходимо рассчитать степень аксиальной асимметрии пульсара и замедление периода, соответствующее излучению гравитационных волн. Затем надо сравнить данные наблюдений по замедлению периода вращения с рассчитанным значением.

Этой статьей мы инициируем работы по обнаружению гравитационных волн от одиночных пульсаров, что потребует провести большую работу по сбору и анализу данных.

Приложение

Энергия, теряемая системой тел в единицу времени за счет излучения гравитационных волн (мощность излучения), равна:

$$-\dot{E} = \frac{G}{45c^5} \sum_{i,k} \ddot{D}_{ik}^2,$$

где $i, k = x, y, z$, G – гравитационная постоянная; D_{ik} – тензор квадрупольного момента масс [10]. Для тел, относительное расстояние между которыми не меняется, это выражение переписывается в виде

$$-\dot{E} = \frac{G}{15c^5} \sum_{i,k} \ddot{I}_{ik}^2,$$

где I_{ik} – тензор момента инерции, который выражается через главные моменты инерции I_x, I_y, I_z . Для тела, вращающегося с циклической частотой ω вокруг оси z вдоль направления I_z ,

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \frac{I_x - I_y}{2} \cos 2\omega t + \frac{I_x + I_y}{2}, \\ I_{yy} &= -\frac{I_x - I_y}{2} \cos 2\omega t + \frac{I_x + I_y}{2}, \\ I_{xy} &= \frac{I_x - I_y}{2} \sin 2\omega t. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$-\dot{E} = \frac{32}{15} \frac{G}{c^5} \frac{(I_x - I_y)^2 \omega^6}{2}.$$

Если считать тело почти симметричным, с моментом инерции I , то малая безразмерная величина $\varepsilon = (I_x - I_y) / I$ характеризует степень аксиальной асимметрии тела. В этом случае

$$-\dot{E} = \frac{32}{15} \frac{GI^2 \varepsilon^2 \omega^6}{c^5}.$$

Потери энергии из-за излучения гравитационных волн приводят к замедлению вращения тела. Увеличение периода вращения $P = 2\pi/\omega$ можно найти следующим образом. Пусть ΔP – приращение периода за время P , связанное с уменьшением кинетической энергии вращения $E = I\omega^2/2 = I(2\pi/P)^2/2$. Если заменить $P \rightarrow P + \Delta P$, то потеря энергии за период есть $\Delta E = -I\omega^2 \Delta P / P$. Учитывая, что $\dot{E} = \Delta E / P$, получим

$$\dot{P} = \frac{64\pi}{5} \frac{G\omega^3 I \varepsilon^2}{c^5},$$

где $\dot{P} = \Delta P / P$ – увеличение периода за период.

Для однородного шара $I = 2MR^2/5$, где M – масса шара; R – его радиус, имеем

$$\dot{P} = \frac{128\pi}{25} \varepsilon^2 \frac{GM}{c^2} \frac{\omega^3 R^2}{c^3}.$$

Это выражение перепишем в виде

$$\dot{P} = A \varepsilon^2 \frac{r}{R} \left(\frac{v}{c} \right)^3,$$

где $A = 64\pi/25 = 8,04$; $r = 2GM/c^2$ – гравитационный радиус шара; $v = \omega R$ – максимальная линейная скорость вращения.

Для значений $M = 1,4M_{\odot}$ ($M_{\odot}$ – масса Солнца), $R = 10$ км, $P = 1,558 \cdot 10^{-3}$ с (PSR 1937+21) $v = 2R/P = 4 \cdot 10^4$ км/с, $v/c = 0,13$, имеем

$$\Delta P / P = 7,4 \cdot 10^{-3} \varepsilon^2.$$

Отсюда для пульсара PSR 1937+21 при значении $\Delta P/P = 10^{-19}$ получаем $\varepsilon_0 = 3,7 \cdot 10^{-9}$.

Примечания

1. См.: Бескин В.С. Радиопульсары // Успехи физических наук. – 1999. – Т. 169, № 11. – С. 1169–1198.
2. См.: Weisberg J.M., Taylor J.H. The relativistic binary pulsar B1913+16. См.: Astroph/0211217. – V. 1, 11 Nov. 2002.
3. См.: Bailes M., Ord S.M., Knight H.S., Hotan A.W. Self-consistency of relativistic observables with general relativity in the white dwarf-neutron star binary pulsar PSR J1141–6545. См.: Astro-ph/0307468. – V.1, 27 Jul 2003.
4. См.: Weisberg J.M., Taylor J.H. The relativistic binary pulsar B1913+16.
5. См.: Jones D.I. Gravitational waves from rotating neutron star. См.: Gr-qc/0111007. – V. 1, 2 Nov. 2001.
6. Ibid.
7. См.: Попов С.Б., Прохоров М.Е. Астрофизика одиночных нейтронных звезд: радиотихие нейтронные звезды и магнитары. См.: astronnet.ru/db/msg/1177322.
8. См.: Ильясов Ю.П., Конейкин С.М., Родин А.Е. Астрономическая шкала времени, основанная на орбитальном движении пульсара в двойной системе // Письма в астрономический журнал. – 1998. – № 24. – С. 275.
9. См.: Xu Ren-Xin, Xu Xuan-Bin, Wu Xin-Ji. The fastest rotating pulsar: a strange star? См.: astro-ph/0101013. – V.3, 28 Mar 2001.
10. См.: Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. – М.: Наука, 1967.

Институт лазерной физики СО РАН,
г. Новосибирск
Институт философии и права СО РАН,
г. Новосибирск

Baklanov, E.V. and V.V. Korukhov. The possibility of discovery of gravitation waves from single pulsars

In the authors' view, to discover gravitation waves from single pulsar it is necessary to calculate the degree of axial asymmetry and rotation period deceleration corresponding to gravitation waves radiation and then to compare observed data about rotation period deceleration with calculated value. But it needs a large work to collect and analyze data.