

УДК: 52-336

СИГНАЛЫ ОТ SN 1987A В АНТЕННАХ АМАЛЬДИ-ВЕБЕРА КАК ВОЗМОЖНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ СКАЛЯРНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Ю. В. БАРЫШЕВ

Поступила 1 апреля 1997

Принята к печати 10 мая 1997

Получено выражение для поперечного сечения металлического цилиндра Вебера относительно скалярных гравитационных волн, возможных в рамках полевой теории гравитации. Показано, что сигналы, зарегистрированные гравитационно-волновыми антеннами Амальди и Вебера в момент вспышки сверхновой SN 1987A, могут быть интерпретированы как результат воздействия скалярных гравитационных волн на твердотельные детекторы. Необходимая энергия гравитационных волн имеет величину около $1M_{\odot}c^2$. Вместе с наблюдаемым избытком (около 1%) гравитационного излучения от двойной системы с пульсаром PSR 1913+16, сигналы от SN 1987A являются вторым наблюдательным свидетельством в пользу реального существования скалярных гравитационных волн. Современные твердотельные антенны третьего поколения способны обнаруживать скалярные волны от событий, аналогичных SN 1987A, с расстояния до 5 Мпк. Ожидаемый уровень сигнала от SN 1993I составляет около $7\mu K$. С помощью интерферометрических антенн на свободных массах возможна экспериментальная проверка продольного характера скалярных волн.

1. *Введение.* В работе Вебера [1] возобновляется дискуссия о сигналах, зарегистрированных во время вспышки сверхновой SN 1987A гравитационными антеннами в Риме (группа Амальди) и в Мэрилэнде (группа Вебера) [2,3]. В [1] отмечается, что вероятность случайной корреляции сигналов на выходе детекторов гравитационных волн с сигналами на выходе нейтринных детекторов Mont Blanc (UNO) и Kamioka составляет менее 10^{-5} .

Острота дискуссии вокруг сигналов Амальди-Вебера обусловлена тем, что до сих пор не предложено реалистичной интерпретации этих событий. Действительно, оба детектора в тот момент работали при комнатной температуре и имели эффективную шумовую температуру около 30К. В частности, сигнал на выходе римского детектора в момент прихода пяти нейтринных импульсов ($02^h52^m36^s$ UT 23 февраля 1987г.) составил 4σ. Для того, чтобы объяснить это событие воздействием тензорной гравитационной волны в рамках общей теории относительности (ОТО), необходимо потребовать превращения более чем $2000M_{\odot}$ в энергию этих волн, тогда как масса предсверхновой составляла около $20M_{\odot}$ [4].

В работе [1] Вебер предлагает отказаться от классической формулы для поперечного металлического цилиндра, полученной в рамках ОТО, и заменить ее квантовомеханическим расчетом взаимодействия безмассовых частиц спина 2 (гравитонов) с большим числом атомов, составляющих антенну. В этом случае согласно [1] удастся повысить поперечное сечение детектора более чем в 10^4 раз и таким образом снять проблему энергии гравитационного излучения. Однако возражением против такого подхода является то, что в пределе большого числа гравитонов квантовый расчет должен дать результат, совпадающий с классической теорией, аналогично тому, как взаимодействие большого числа фотонов, составляющих электромагнитную волну, с электронами описывается классической электродинамикой.

В настоящей работе предлагается другая интерпретация сигналов гравитационных антенн, в которой классический и квантовый подходы дают одинаковый результат. События Амальди-Вебера можно действительно рассматривать как реальное обнаружение воздействия гравитационных волн на детектор, однако эти волны должны быть не тензорными (спин 2), а скалярными (спин 0). В п.2 приводятся параметры антенн и имеющиеся наблюдательные данные. В п.3 дается классическая оценка ожидаемого квадрупольного излучения в стандартной модели коллапса. В п.4 рассмотрена качественная картина гравитационного коллапса в полевой теории гравитации и получена оценка величины и характера скалярного гравитационного излучения. В п.5 приводится расчет поперечного сечения цилиндра Вебера для скалярных волн. В п.6 дается интерпретация событий Амальди-Вебера как обнаружения скалярных гравитационных волн. В п.7 обсуждаются другие возможные источники скалярных волн. Основные выводы сформулированы в п.8.

2. Гравитационно-волновые наблюдения SN 1987A. Хотя к началу 1987 года существовали криогенные установки, обеспечивающие работу твердотельных детекторов гравитационных волн второго поколения с эффективной шумовой температурой около 20мК, в момент прихода первых нейтринных сигналов от взрыва SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке, включенными оказались только две антенны при комнатной температуре - антенна группы Амальди в Риме и антенна группы Вебера в Мэрилэнде, расположенные на расстоянии около 8000км друг от друга.

Римская антенна (GEOGRAV) имела следующие параметры: массу алюминиевого цилиндра $M=2300$ кг, резонансную частоту $\nu_R=858$ Гц, скорость звука в цилиндре $V_s=2.85 \cdot 10^3$ см/с, время затухания $\tau_c=10$ с, время накопления сигнала $\Delta t=1$ с, эффективную шумовую температуру $T_{эф}=29$ К. Параметры антенны в Мэрилэнде: $M=3100$ кг, $\nu_R=1660$ Гц, $\Delta t=0.1$ с,

$T_{эф} = 22\text{K}$. Отдельные фрагменты записей сигнала на выходе этих детекторов приведены в работах [2,3].

Корреляционный анализ сигналов от гравитационных антенн и импульсов нейтрино, зарегистрированных нейтринными обсерваториями Mont Blanc и Kamioka, обнаружил несколько совпадающих событий [2,3,1], наиболее выдающимся из которых является сигнал на выходе римской антенны в $02^h52^m35^s$, достигший амплитуды 135K и опередивший группу из пяти нейтринных импульсов на 1.2с [2]. Согласно [1] вероятность случайного совпадения импульсов на выходе гравитационных и нейтринных детекторов менее 10^{-5} . Кроме того, фурье-анализ комбинированных данных для детекторов Рим, Мэрилэнд и Kamioka обнаружил периодическую составляющую в 192-х нейтринных событиях Kamioka с периодом 67.3с в интервале длительностью около двух часов с центром в $02^h52^m36^s$ [1].

3. *Релятивистский коллапс в общей теории относительности.* Если считать, что в момент излучения второго нейтринного сигнала (зарегистрированного в $07^h35^m40^s$) в центре предсверхновой выделилась в виде тепла энергия $E \approx 3 \cdot 10^{51}$ эрг, то вся последующая картина развития взрыва SN 1987A хорошо описывается современной теорией, включая форму и энергетику нейтринного сигнала, а также массу сброшенной оболочки $10-15M_{\odot}$ [4,5].

Однако главной, не решенной до сих пор проблемой, является выяснение механизма выделения этой тепловой энергии в центре звезды, позволяющей сбросить оболочку. Численные расчеты поздних стадий эволюции массивных звезд в рамках ОТО показали [5], что для массы СО-ядра, большей $3-10M_{\odot}$, происходит "тихий" коллапс ядра в черную дыру без выделения энергии, достаточной для сброса массивной оболочки. Последнее связано с тем, что релятивистские поправки ОТО приводят к быстрому росту эффективной силы гравитации (формально до бесконечности), которой не может противостоять никакое реальное давление вещества, что и приводит к образованию черной дыры.

Численные расчеты излучения тензорных (квадрупольных) гравитационных волн в процессе релятивистского коллапса ядра предсверхновой представляют чрезвычайно трудную задачу. Дело в том, что сферически-симметричные движения не генерируют тензорных волн, и вычислительной мощности современных компьютеров недостаточно для выполнения реалистических трехмерных расчетов гравитационного коллапса [6]. Однако качественная картина излучения гравитационных волн коллапсирующим ядром в рамках ОТО хорошо известна и проверена численными расчетами при различных приближениях [7,6]. Гравитационное излучение носит характер короткого импульса или последователь-

ности нескольких импульсов с длительностью $\tau_g \approx 10^{-3}$ с и полосой излучаемых частот $\Delta\nu_g \approx 10^3$ Гц. КПД преобразования ϵ энергии коллапса в энергию гравитационных волн может быть представлен в виде произведения

$$\epsilon = \alpha \cdot \beta, \quad (1)$$

коэффициента несферичности $\alpha \approx \Delta R / R$ и степени релятивизма $\beta \approx R_g / R$. Оптимистические оценки величины ϵ составляют менее 10^{-3} для характерных параметров ядра предсверхновой.

Поперечное сечение цилиндра Вебера, рассчитанное в рамках ОТО для тензорного неполяризованного излучения, дается выражением [8]

$$\Sigma_{(GR)} = (64 / 15) (G / c) (v_s / c)^2 M \sin^4 \theta, \quad (2)$$

где M - масса цилиндра, v_s - скорость звука в материале детектора, θ - угол между осью детектора и направлением распространения волны.

Для римского детектора формула (2) дает $\Sigma_{(GR)} \approx 10^{-21} \text{см}^2 \text{Гц}$, где учтено, что в момент прихода сигнала $\theta = 60^\circ$. Для амплитуды зарегистрированного сигнала $T = 100 \text{К}$ спектральная плотность энергии в импульсе на Гц частоты составит

$$S_\nu = kT / \Sigma_{(GR)} \approx 1.3 \cdot 10^7 \text{ эрг / см}^2 \text{Гц}. \quad (3)$$

Учитывая, что $\Delta\nu_g \approx 10^3$ Гц и расстояние до SN 1987A D = 52 кпк, получаем величину полной энергии, выделившейся в виде гравитационного излучения в процессе коллапса:

$$E_g = 4\pi D^2 S_\nu \Delta\nu_g \approx 2200 M_\odot c^2. \quad (4)$$

Полная же энергия коллапса с учетом оптимистического КПД $\epsilon \approx 10^{-3}$ составит

$$E_{\text{tot}} = E_g / \epsilon \approx 2.2 \cdot 10^6 M_\odot c^2, \quad (5)$$

тогда как масса предсверхновой, отождествленной с голубым сверхгигантом В31а Sk-69202 в Большом Магеллановом Облаке, составляла около $20 M_\odot$ [4].

Абсурдность оценки (5) привела Вебера [1] к отказу от формулы (2) для поперечного сечения твердотельной антенны. Его квантовомеханический расчет Σ дал величину на шесть порядков больше, чем (2), что дает приемлемую величину полной энергии около $1 M_\odot c^2$. Однако в этом случае нарушается классический предел теории, и гипотеза Вебера не получает признания.

4. Картина релятивистского коллапса в полевой теории

гравитации. Взрыв сверхновой SN1987A в Большом Магеллановом Облаке дает уникальную возможность провести сравнение предсказаний различных теорий гравитации потому, что источником энергии для этого взрыва является релятивистский гравитационный коллапс. В рамках ОТО результат коллапса известен, мы обсудили его в предыдущем параграфе: излучение гравитационных волн может быть связано только с отклонениями от сферической симметрии (при этом $\epsilon \ll 1$), носит характер короткого всплеска (невозможны длительные пульсации) и излучается широкий спектр частот $\Delta\nu_g \approx 10^3$ Гц.

Совершенно иная картина гравитационного коллапса имеет место в полевой теории гравитации (ПТГ). ПТГ - это релятивистская квантовая теория гравитационного поля в плоском пространстве-времени Минковского, в которой все классические релятивистские эффекты слабого гравитационного поля имеют ту же величину, что и в ОТО. Основы ПТГ были заложены в работах Пуанкаре, Фирца, Паули, Биркгофа, Тирринга, Фейнмана. Обзор полевого подхода к гравитации содержится в работе [9] (см. также [10,11]).

В рамках ПТГ гравитационное поле описывается симметричным тензором второго ранга ψ^{ik} , которому соответствует совокупность частиц с разными спинами:

$$\{\psi^{ik}\} = \{2\} \oplus \{1\} \oplus \{0\} \oplus \{0\}. \quad (6)$$

В квантовых виртуальных процессах участвуют все эти частицы, а в свободном состоянии могут находиться только частицы спина 2 (тензорные волны) и спина 0 (скалярные волны):

$$\{\psi^{ik}\} = \{2\} \oplus \{0\}. \quad (7)$$

Источник скалярных гравитационных волн описывается следом $T_{(a)}$ тензора энергии-импульса $T_{(\Sigma)}^{ik}$ системы частицы + гравитационное поле, так что уравнение для скалярной компоненты $\psi = \eta_{ik}\psi^{ik}$ гравитационного поля ψ^{ik} в плоском пространстве с метрикой Минковского η^{ik} имеет вид:

$$\square\psi = -8\pi G T_{(\Sigma)} / c^2. \quad (8)$$

Решения волнового уравнения (8) в запаздывающих потенциалах описывают излучение скалярных гравитационных волн [12].

Согласно [11] тензор энергии-импульса плоских монохроматических скалярных гравитационных волн имеет вид

$$T_{(0)}^{ik} = (1 / 32\pi G)\psi^i\psi^k. \quad (9)$$

Если использовать безразмерный скалярный потенциал

$h(t) = \psi(t) / c^2 = h_0 \cos(\omega t)$, то для усредненного по периоду колебаний потока энергии в плоской монохроматической волне будем иметь

$$F = \left(c^3 / 64\pi G \right) \omega^2 h_0^2 \left(\text{эрг} / \text{с см}^2 \right), \quad (10)$$

В приближении медленных движений в источнике мощность излучения скалярных волн для тензора энергии-импульса (9) дается выражением

$$L_{\{0\}} = \frac{G}{2c^5} \left(\dot{E}_k \right)^2 \left(\text{эрг} / \text{с} \right), \quad (11)$$

где E_k - кинетическая энергия частиц.

Скалярные гравитационные волны являются продольными и могут излучаться при сферических пульсациях тел. На релятивистских стадиях коллапса, когда размеры тел близки к гравитационному радиусу R_g и скорости близки к скорости света c , энергия, уносимая скалярными волнами, сравнима с энергией всего коллапсирующего тела Mc^2 [12,13].

Второй отличительной особенностью ПТГ является отсутствие сингулярностей и черных дыр, неизбежных в рамках ОТО. Невозможность достижения любым телом его гравитационного радиуса в рамках ПТГ есть прямое следствие закона сохранения энергии для самого гравитационного поля [9,10,11]. При этом энергия гравитационного поля является величиной строго положительной и локализуемой - гравитон обладает энергией $h\nu$. Физическая причина выделенности гравитационного радиуса любого тела в ПТГ связана с тем, что энергия E_g , запасенная в гравитационном поле вокруг тела с массой покоя M и радиусом R , есть интеграл от положительной величины, а именно, T^{00} компоненты самого гравитационного поля, равной $(\nabla\phi_N)^2 / 8\pi G$. Из условия $E_g < Mc^2$ следует условие $R > R_g = GM / c^2$. Это условие совершенно аналогично условию применимости классической электродинамики ($E_{el} < m_e c^2$ означает, что $R > R_e = e^2 m_e c^2$) и носит чрезвычайно общий характер.

Вследствие конечного запаса энергии в гравитационном поле, в процессе релятивистского коллапса сила гравитации не стремится к бесконечности (как это имеет место в ОТО), а, напротив, после достижения некоторого максимального значения начинает уменьшаться, так что наступает момент времени, когда внутреннее давление превышает силу гравитации и тело начинает расширяться. Таким образом, релятивистский коллапс в ПТГ должен иметь пульсационный характер. Это утверждение является следствием таких фундаментальных физических принципов, как положительность энергии гравитонов и выполнимость

законов сохранения энергии-импульса, включая само гравитационное поле (см. [9,10,11]). Уравнения движения релятивистского газа в ПГТ рассматривались в работе [14].

Следовательно в рамках ПГТ нет принципиальной проблемы с объяснением взрыва массивных сверхновых звезд. Пульсирующее релятивистское ядро предсверхновой способно как остановить падающую массивную оболочку, так и выделить достаточное количество энергии для ее сброса. Кроме того, сферически-симметричные пульсации ($\epsilon \approx 1$) будут генерировать мощное узкополосное скалярное гравитационное излучение, которое может регистрироваться имеющимися детекторами гравитационных волн. Пока это только качественная картина и для детального расчета процесса релятивистского коллапса в ПГТ требуется как развитие самой теории гравитации на случай сильных полей, так и проведение численных расчетов для реалистичных уравнений состояния вещества предсверхновой. Однако уже этой качественной картины достаточно для получения оценки величины и характера гравитационного излучения от коллапса ядра сверхновой, что и будет сделано в п.б.

5. Поперечное сечение цилиндра Вебера для скалярных волн.

Для оценки энергии скалярных гравитационных волн, воздействующих на детектор, необходимо получить выражение для поперечного сечения гравитационной антенны. Методика расчета поперечного сечения цилиндра Вебера описана в [8] и легко переносится на случай скалярных волн.

Рассмотрим модель резонансного детектора скалярных гравитационных волн в виде осциллятора, состоящего из двух масс m_0 , расположенных на концах пружины, длина которой в состоянии равновесия равна l_0 . Под действием скалярной гравитационной волны $h(t) = h_0 \cos(\omega t)$ пробные массы совершают малые продольные колебания в направлении распространения волны. Пусть детектор обладает собственной угловой частотой колебаний ω_0 и временем затухания $\tau_\alpha = Q/\omega_0$ (где Q - добротность резонатора). Тогда, в случае малости длины детектора l_0 по сравнению с длиной волны λ гравитационного излучения, для относительного смещения масс $\xi(t)$ будем иметь уравнение

$$\ddot{\xi} + \dot{\xi} / \tau_\alpha + \omega_0^2 \xi = A \cos(\omega t), \quad (12)$$

где амплитуда вынуждающего ускорения A есть

$$A = (1/4) l_0 \omega^2 h_0 \cos\theta \quad (13)$$

и θ - угол между направлением распространения волны и осью детектора.

Стационарное решение уравнения (12) имеет вид

$$\xi(t) = b \cos(\omega t + \delta), \quad (14)$$

где величины b и δ вблизи резонанса, когда $\omega = \omega_0 + \gamma$ и γ - малая величина, с учетом того, что $\omega_0 \gg 1/\tau_\alpha$, даются выражениями

$$b = A/2\omega_0 \left(\gamma^2 + (1/2\tau_\alpha)^2 \right)^{1/2}, \quad (15)$$

$$\text{tg} \delta = \tau_\alpha / 2\gamma. \quad (16)$$

Скорость диссипации энергии волны во внутреннюю энергию детектора вблизи резонанса будет

$$I(\gamma) = \frac{2m_0 A^2 (1/2\tau_\alpha)}{4(\gamma^2 + (1/2\tau_\alpha)^2)}. \quad (17)$$

Ее можно приравнять скорости поглощения энергии приходящих волн, которая равна поперечному сечению $\Sigma(\gamma)$, умноженному на падающий поток F (формула (10)) в плоской монохроматической скалярной гравитационной волне

$$I(\gamma) = F \cdot \Sigma(\gamma) = c^3 \omega^2 h_0^2 \Sigma(\gamma) / 64\pi G. \quad (18)$$

Таким образом, поперечное сечение антенны для поглощения энергии монохроматических гравитационных волн вблизи резонанса будет

$$\Sigma(\gamma) = \frac{\pi G (2m_0) l_0^2 - \omega_0^2 \cos^2 \theta}{2c^3 \tau_\alpha (\gamma^2 + (1/2\tau_\alpha)^2)}. \quad (19)$$

В случае гравитационного сигнала с непрерывным спектром в интервале $\Delta\nu_g \approx 1/\tau_g$ и при условии $\Delta\nu_g \geq \Delta\nu_\alpha$ необходимо пользоваться резонансным интегралом от поперечного сечения

$$\Sigma_\alpha = \int \Sigma(\gamma) d\gamma = (\pi/2) (G/c^3) (2m_0) l_0^2 \omega_0^2 \cos^2 \theta. \quad (20)$$

Для перехода к распределенной массе в цилиндре Вебера обычно делают замену: $M = 2m_0$ - масса цилиндра, $L = \pi^2 l_0 / 4$ - длина цилиндра, $V_s = \omega_0 L / \pi$ - скорость звука в цилиндре, тогда

$$\Sigma_\alpha = (8/\pi) (G/c^3) M V_s^2 \cos^2 \theta. \quad (21)$$

Формула (21) дает поперечное сечение веберовского цилиндра для поглощения скалярных гравитационных волн. Скалярные волны являются продольными и фактор $\cos^2 \theta$ учитывает направление прихода волны.

6. Возможное обнаружение скалярных гравитационных волн от SN 1987A. В рамках ПТГ релятивистский гравитационный коллапс имеет характер сферически симметричных пульсаций, которые генерируют мощное скалярное гравитационное излучение в узкой полосе частот. Оценим энергию скалярного излучения, необходимую для объяснения

основного события на выходе римского детектора [2], совпадающего с приходом пяти нейтринных импульсов UNO в момент $2^h52^m35^s$.

Рассмотрим предельный случай, когда частота волны совпадает с резонансной частотой антенны GEOGRAV $\nu_0 = \nu_R = 858$ Гц, и пусть длительность гравитационного сигнала составляет порядка 10 с, т.е. $\Delta\nu_g \approx 0.1$ Гц. Время затухания антенны $\tau_\alpha \approx 10$ с, так что $\Delta\nu_\alpha \approx \Delta\nu_g \approx 0.1$ Гц, и условия для использования резонансного интеграла приближенно выполняются. В момент прихода сигнала угол $\theta=60^\circ$ и согласно формуле (21) поперечное сечение антенны $\Sigma_\alpha \approx 3 \cdot 10^{-22}$ см²Гц.

Регистрируемые отсчеты на выходе антенны содержат смесь шума и сигнала, так что точное значение чистого сигнала неизвестно. В качестве консервативной оценки сигнала можно принять значение, равное дисперсии шумовых отсчетов, т.е. $T_s \approx 30$ К. Тогда спектральная плотность энергии скалярных гравитационных волн на Гц частоты будет

$$S_\nu \approx kT_s / \Sigma_\alpha \approx 1.4 \cdot 10^7 \text{ (эрг/см}^2\text{Гц)}. \quad (22)$$

Полная энергия, выделившаяся в виде скалярных гравитационных волн,

$$E_g = 4\pi D^2 S_\nu \Delta\nu_g \approx 0.25 M_\odot c^2, \quad (23)$$

а так как пульсации сферически-симметричны ($\alpha=1$) и близки к гравитационному радиусу ($\beta \approx 0.1$), то КПД $\epsilon \approx 0.1$, и следовательно полная энергия коллапса

$$E_{\text{tot}} = E_g / \epsilon \approx 2.5 M_\odot c^2. \quad (24)$$

Оценка полной энергии (24) согласуется с представлениями о коллапсе ядра предсверхновой с массой 3-10 M_\odot и, таким образом, в рамках ПТГ существует принципиальная возможность качественного объяснения сигнала на выходе гравитационной антенны как обнаружения скалярной гравитационной волны.

Главной отличительной особенностью данного объяснения является узкополосность ($\Delta\nu_g \approx 0.1$ Гц) и эффективность ($\epsilon \approx 0.1$) генерации скалярных волн, что становится возможным только в ПТГ, где на релятивистских стадиях коллапса сила гравитации конечна и невозможно образование черных дыр. В случае узкополосного сигнала возникает проблема точного совпадения частоты сигнала с резонансной частотой детектора. Однако она может быть решена, если учесть, что в реальном процессе коллапса частота пульсации ядра изменяется со временем. Тогда дрейф частоты может привести к тому, что в какой-то момент времени частота волны будет соответствовать частоте детектора. Кроме того, реальная форма пульсации может содержать и высшие гармоники

N_{ν_0} , так что возможно появление сигнала на нескольких частотах одновременно или с запаздыванием. По-видимому, в случае SN 1987A наблюдалась такая ситуация, так как антенна в Мэрилэнде имела резонансную частоту примерно в два раза большую, чем GEOGRAV. Для получения более детальной картины коллапса в ПТГ необходимо провести трудоемкие численные расчеты релятивистских стадий с учетом излучения гравитационных волн и нейтрино для реалистических уравнений состояния.

7. *Дополнительные свидетельства обнаружения скалярных волн.* В работе [15] приводятся данные о наличии корреляции между сигналами на выходе антенн Амальди-Вебера и сигналами с датчиков продольных микросейсмических колебаний, записанными в течение двух часов, включая момент основного события $2^{\text{h}}52^{\text{m}}$. При этом не было обнаружено корреляции между сигналами на выходе гравитационных антенн и сейсмическими данными, записанными датчиками поперечных колебаний. Характер сейсмических сигналов согласуется как с продольностью скалярных гравитационных волн, так и с достаточно большой длительностью (10-20 с) воздействия скалярной волны на Землю.

В настоящее время существует несколько твердотельных гравитационных антенн третьего поколения (ALLEGRO, AURIGA, EXPLORER, NAUTILUS, UWA), которые способны непрерывно работать в течение нескольких месяцев с эффективной шумовой температурой в несколько мК. Поскольку выигрыш в чувствительности по сравнению с наблюдениями SN 1987A составляет 10^4 раз, то сигнал, аналогичный обнаруженному от SN 1987A, можно зарегистрировать на расстоянии $50 \text{кпк} \cdot 10^2 = 5 \text{Мпк}$. Учитывая среднюю частоту вспышек сверхновых, можно рассчитывать на появление одного события в месяц.

Согласно [16], существуют записи сигнала на выходе антенн ALLEGRO и EXPLORER в интервале времени около двух месяцев вокруг вспышки сверхновой SN 1993J. В результате анализа данных не было найдено совпадений сигналов на уровне 200 мК. Однако в случае узкополосного сигнала таких совпадений и не должно быть, так как резонансные частоты детекторов различны. Таким образом, необходимо использовать другие критерии отбора событий, например, введение задержки в зависимости от разности резонансных частот детекторов. Ожидаемый уровень сигнала от SN 1993J составляет 7 мК.

В ближайшее время начнут работу высокочувствительные интерферометрические антенны со свободными массами LIGO (USA) и VIRGO (Европе). С помощью этих антенн возможна проверка продольного характера скалярных гравитационных волн, при этом в схеме отбора сигналов необходимо учитывать, что изменение длин плеч интерферометра будет

происходить синфазно. Направление максимальной чувствительности антенны к скалярным волнам совпадет с направлениями плеч интерферометра.

Кроме вспышек сверхновых, источниками скалярного гравитационного излучения являются двойные звезды с эллиптическими орбитами (в случае круговой орбиты скалярного излучения нет) [12]. Так, для двойной системы с пульсаром PSR1913+16 излучение скалярных волн приводит к дополнительной потере орбитальной энергии, кроме хорошо известной потери энергии на тензорное (квадрупольное) излучение. Величина дополнительных потерь зависит от конкретного выбора вида тензора энергии-импульса скалярного поля [12,17,11]. Для ТЭИ вида (9) скалярное гравитационное излучение приводит к избытку потери энергии величиной 0.735% от расчетного значения для тензорных волн. Наблюдаемая величина избытка составляет $0.9\% \pm 0.4\%$ [18], что согласуется с предсказанной величиной скалярного гравитационного излучения этой системой [11].

8. *Заключение.* Начиная с 1970г., гравитационные антенны непрерывно работали, ожидая сигнала от взрыва сверхновой. И когда 23 февраля 1987г. такой сигнал был получен, оказалось, что он не может быть объяснен в рамках общей теории относительности. Этот факт, безусловно, стимулирует более внимательное рассмотрение альтернативных теорий гравитации и, в особенности, предсказаний характера релятивистского гравитационного коллапса.

В рамках полевой теории гравитации, вследствие положительности и локализованности энергии гравитационного поля, а также выполнения закона сохранения для этой энергии, релятивистский коллапс имеет характер сферически-симметричных пульсаций, которые генерируют мощное скалярное гравитационное излучение. В этой теории существует принципиальная возможность объяснения событий Амальди-Вебера как реального обнаружения скалярных гравитационных волн. Требуемая энергия гравитационного излучения при этом составляет около $1M_{\odot}c^2$, что согласуется с представлениями о ядре предсверхновой для SN 1987A.

Обнаружение продольных микросейсмических сигналов, коррелирующих с сигналами на выходе антенн Амальди-Вебера (при отсутствии корреляций с поперечными микросейсмическими сигналами), можно считать аргументом в пользу продольного характера воздействовавших на Землю гравитационных волн.

Имеющиеся твердотельные антенны третьего поколения способны обнаруживать скалярные гравитационные волны от событий, аналогичных SN1987A, с расстояний до 5M пк, причем разница в резонансных частотах антенн играет определяющую роль. Ожидаемый уровень сигнала от SN

1993J составляет около 7 мК. С помощью интерферометрических антенн со свободными массами возможна экспериментальная проверка продольности скалярных волн.

Дополнительным свидетельством в пользу реальности существования скалярных гравитационных волн является наблюдаемый избыток потери орбитальной энергии (по сравнению с расчетной величиной для чисто тензорного излучения) двойной системой с пульсаром PSR1913+16.

Астрономический институт
Санкт-Петербургского университета, Россия

EVENTS OBSERVED BY AMALDI-WEBER ANTENNAS FROM SN1987A AS A POSSIBLE DETECTION OF SCALAR GRAVITATIONAL WAVES

Yu.V.BARYSHEV

Cross section of Weber bar antenna for scalar gravitational radiation is derived within the framework of field gravitation theory. It is shown that events observed by Amaldi and Weber gravitational wave antennas at the moment of supernova SN 1987A explosion can be explained as the result of the scalar gravitational wave interaction with the bar detectors. Total radiated gravitational energy required for observed signals is about one solar mass energy. Together with the observed excess (about 1%) of gravitational radiation from the binary pulsar PSR 1913+16, the SN 1987A signal is the second observational evidence in favor of the scalar gravitational waves. Modern third generation bar antennas could detect scalar waves from the supernova explosions up to the distance 5 Mpc. Expected level of signal from SN 1993I is about 7 мК. Interferometer gravitational antennas could experimentally check the longitudinal character of the scalar waves.

ЛИТЕРАТУРА

1. *J.Weber*, First Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Wave Experiments, eds. E.Coccia, G.Pizzella, F.Ronga, World Scientific, 1995, p.416.
2. *E.Amaldi et al.*, Europhys. Lett., 3, 1325, 1987.

3. *E.Amaldi et al.*, Supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud, eds. M.Kafatos, A.Michalitsianos, Cambridge Univ. Press, 1987, p.453.
4. *Д.Моррисон*, Успехи физ. наук, 156, 719, 1988.
5. *В.С.Имшеник, Д.К.Надежин*, Итоги науки и техн., Астрономия, 21, 63, 1982.
6. *B.Schutz*, First Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Wave Experiments, eds. E.Coccia, G.Pizzella, F.Ronga, World Scientific, 1995, p.3.
7. *K.Thorne*, Three Hundred Years of Gravitation, eds. S.Hawking, W.Israel, Cambridge Univ. Press, 1987, p.330.
8. *Э.Амальди, Г.Пиццелла*, Астрофизика, кванты и теория относительности, Мир, М., 1982, с.241.
9. *Ю.В.Барышев*, Гравитация, т.2, вып.2, с.3, 1996.
10. *V.V.Sokolov*, Astrophys. Space Sci., 191, 231, 1992.
11. *Yu.V.Baryshev*, First Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Wave Experiments, eds. E.Coccia, G.Pizzella, F.Ronga, World Scientific, 1995, p.251.
12. *Ю.В.Барышев*, Астрофизика, 18, 93, 1982.
13. *Ю.В.Барышев, В.В.Соколов*, Астрофизика, 21, 361, 1984.
14. *Ю.В.Барышев*, Вестн. ЛГУ, сер.1, вып.2, с.80, 1988.
15. *V.K.Kravchuk, V.N.Rudenko*, First Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Wave Experiments, eds. E.Coccia, G.Pizzella, F.Ronga, World Scientific, 1995, p.424.
16. *Z.K.Geng et al.*, First Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Wave Experiments, eds. E.Coccia, G.Pizzella, F.Ronga, World Scientific, 1995, p.128.
17. *V.V.Sokolov*, Astrophys. Space Sci., 198, 53, 1992.
18. *J.Taylor et al.*, Nature, 355, 132, 1992.