

В. Б. Брагинский, А. В. Гусев, В. П. Митрофанов, В. Н. Руденко, В. Н. Якимов. О поисках низкочастотных всплесков гравитационного излучения. Практически все создаваемые и работающие антенны веберовского типа и лазерные антенны, предназначенные для обнаружения всплесков гравитационного излучения внеземного происхождения, рассчитаны на диапазон частот $\Delta\omega/2\pi \sim 0,5 - 10$ кГц. В этом диапазоне, по-видимому, есть лишь экзотические источники по частоте событий, и поэтому они должны быть расположены достаточно далеко от наземной антенны (например, несимметричный взрыв сверхновой с кон-

версией $\sim M_{\odot} c^2$ в гравитационное излучение маловероятно наблюдать чаще чем один раз в месяц в 300-х ближайших галактиках). Удаленность источников приводит к предсказанию малых оценок величины h амплитуды вариации метрики, вызванной такими явлениями: для этого диапазона оптимистическая оценка $h \sim 10^{-20} - 2 \cdot 10^{-19}$. Всплески с большей длительностью $\tau_{\text{гр}}$ и меньшей средней частотой $\omega_{\text{гр}} \approx 2\pi/\tau_{\text{гр}}$ должны иметь большую величину h . Например, в диапазоне $10^{-1} - 10^{-2}$ Гц можно ожидать $h \approx 10^{-17} - 10^{-16}$. Отметим, что источники таких всплесков могут быть расположены и в нашей галактике.

Цель данного доклада — рассмотреть альтернативную программу поиска всплесков гравитационного излучения в низкочастотном диапазоне². Два обстоятельства в этом рассмотрении являются исходными:

1) Недавно М. А. Садовским и др.³ была обнаружена блоковая структура пород, составляющих земную кору; в этой структуре выделяются блоки с линейными размерами $l \approx (5-7) \cdot 10^6$ см.

2) Даже несильные сейсмические возмущения, регистрируемые в спокойных в сейсмическом отношении районах, порождены источниками, локализованными вне этих районов⁴.

Один или несколько таких блоков можно использовать как естественные гравитационные антенны, разместив на них для регистрации откликов смещений (ускорений) ряд низкочастотных сейсмографов.

Приведем несколько характерных оценок для такой схемы опыта: если положить, что период колебаний сейсмографа $\tau_0 \approx \tau_{\text{гр}} \approx 2\pi/\omega_{\text{гр}} \approx 30$ с, $h \approx 2 \cdot 10^{-17}$, $l \approx 7 \cdot 10^6$ см, то величина отклика для $t \ll \tau_{\text{гр}}/2$ будет примерно равна

$$\Delta l_{\text{гр}} \approx \frac{1}{2} h l \approx 7 \cdot 10^{-11} \text{ см.} \quad (1)$$

Учитывая, что спектральная плотность смещений в диапазоне $\tau_0 \approx 30 - 40$ с, $S \approx 7 \cdot 10^{-13}$ см²/Гц⁵, то вариации амплитуды колебаний сейсмографа за время $\sim \tau_0/2$ будут примерно равны

$$\Delta l_{\text{сейсм}} \approx \sqrt{S \frac{\omega Q}{2\pi}} \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau^*}} \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ см.} \quad (2)$$

Как видно из сравнения величин $\Delta l_{\text{гр}}$ и $\Delta l_{\text{сейсм}}$, для $h \approx 2 \cdot 10^{-17}$ отклик должен быть приблизительно на 3,5 порядка меньше сейсмического фона. Эти две величины одновременно определяют нижнюю границу динамического диапазона сейсмографа. Для того чтобы отклик превышал уровень собственных тепловых флуктуаций сейсмографа за $\tau \approx \tau_0/2$

$$\Delta l_{\tau} \approx \sqrt{\frac{kT\tau_0}{4M\omega Q}}, \quad (3)$$

к нему должны быть предъявлены вполне умеренные требования. Например, при $T = 300$ К и $M = 3 \cdot 10^3$ г необходимо, чтобы добротность $Q \gtrsim 10^5$.

Отметим одну важную особенность такой схемы опыта. Плотность потока энергии \tilde{I} для случая $\omega_{\text{гр}}\tau_{\text{гр}} \approx 2\pi$ связана с h простым соотношением

$$\tilde{I} \approx \frac{c^5 \omega_{\text{гр}} h^2}{16G}, \quad (4)$$

где c — скорость света, G — гравитационная постоянная. Для известных программ поиска высокочастотных всплесков величина $h \approx 2 \cdot 10^{-19}$ соответствует $\tilde{I} \approx 2,5 \cdot 10^4$ эрг/см²; в обсуждаемой программе при $h \approx 2 \cdot 10^{-17}$ и $\omega_{\text{гр}} \approx 0,2$ рад/с величина $\tilde{I} \approx 2,5 \cdot 10^3$ эрг/см². Для такого источника в центре нашей галактики необходима конверсия около $10^{-5} M_{\odot} c^2$ на один всплеск, т. е. в 10^5 меньше, чем для высокочастотного всплеска.

Реализация предлагаемой программы зависит от принципиальной возможности выделения сигнала (1) на преобладающем шумовом фоне (2),

создаваемым главным образом импульсными помехами. Это можно обеспечить за счет специфических особенностей гравитационно-волнового возмущения.

Как известно, объемное гравитационно-волновое возбуждение сплошной среды в длинноволновом приближении сводится к пограничному⁶. В простейшей одномерной модели блока измеряемая деформация W описывается уравнением

$$\begin{aligned} W_{tt} + 2\delta W_t &\approx v_3^2 W_{xx}, \\ W(-l, t) &= n_1(t) - \frac{1}{2} h(t), \\ W(l, t) &= n_2(t) - \frac{1}{2} h(t); \end{aligned} \quad (5)$$

здесь δ — эффективность затухания, v_3 — скорость звука; $n_i(t)$ ($i = 1, 2$) — флуктуационные деформации, обусловленные действием импульсных помех. Характерная особенность гравитационно-волнового воздействия заключается в одновременности, синфазности и равенстве амплитуд для источников на обеих границах ($x = -l, l$). Учет этой специфики позволяет снизить импульсный шумовой фон (вероятность ложной тревоги) на фактор q :

$$q = \frac{\Delta a}{A} \frac{\Delta t}{T_0} \Delta \varphi < 10^{-3}, \quad (6)$$

где Δa , Δt , $\Delta \varphi$ — приборные погрешности измерения амплитуды, временного положения и разности фаз, A — максимально возможная величина амплитуды шумового импульса, T_0 — средняя пауза. Указанных факторов достаточно для эффективного снижения шумового импульсного фона. Предельные значения Δa , Δt , $\Delta \varphi$ в (6) ограничены интенсивностью гауссовых помех типа белого шума, $\Delta a/A \approx \Delta t/\tau_0 \approx \Delta \varphi \approx \rho^{-1}$, где ρ — отношение сигнал/шум; при этом $q \ll (\tau_0/T_0) \rho^{-3}$; для сохранения (6) достаточно, чтобы было $\rho \geq 10$, что с запасом выполняется по отношению к тепловым флуктуациям блока. Алгоритм различения — гравитационный «всплеск» или шумовой импульс — связан с анализом антисовпадений четных и нечетных мод блока. Переход к двумерной модели (измерительные приборы расположены по периметру поверхности блока) меняет лишь структуру антенно-сейсмической решетки, делая ее четырехточечной (вместо пары приборов в одномерной модели).

Предложенный метод принципиально отличается от идеи Дж. Вебера и Ф. Дайсона^{6, 7}, предполагавших использовать Землю для регистрации непрерывного излучения от пульсаров в очень узкой, заранее известной полосе частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thorne K. S. — Rev. Mod. Phys., 1980, v. 52, p. 285.
2. Брагинский В. Б., Митрофанов В. П., Якимов В. Н. О методах поиска низкочастотных гравитационных волн: Препринт физического факультета МГУ № 1. — Москва, 1985.
3. Садовский М. А., Болховитников Л. Г., Писаренко В. Ф. Изв. АН СССР. Сер. «Физика Земли», 1982, № 12, с. 3.
4. Монахов Ф. И. Низкочастотный сейсмический шум Земли. — М.: Наука, 1977, с. 94.
5. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. — М.: Мир, 1983, т. 1, с. 880.
6. Dyson F. J. — Astrophys. J., 1969, v. 156, p. 529.
7. Weber J. — Phys. Rev. Lett., 1968, v. 21, p. 395.