

монополюных гравитационных волн. Однако любая реальная звезда вращается и деформируется центробежными силами. Эти деформации связывают сферические моды пульсаций с квадрупольными модами, заставляя их излучать. Предсказываемое время торможения излучением равно

$$\tau_{\text{сфер}} \sim e^{-4} \tau_{\text{квадруп}} \sim (\Omega^2 R^3 / GM)^2 \tau_{\text{квадруп}} \quad (1.14.20)$$

в согласии с оценками Уилера (1966). Здесь e обозначает эксцентриситет звезды и Ω — ее угловую скорость. Для нейтронных звезд, связанных с наблюдаемыми пульсарами, $e \sim 1/30 \div 10^{-3}$ и, следовательно, $\tau_{\text{сфер}}$ заключено в пределах от одной недели до 10^5 лет. Поэтому, вероятно, другие механизмы затухания существеннее. (См. также Чао (1967). *З. и Н.*)

§ 15. Детектирование гравитационных волн *)

Недавно Вебер (1969) сообщил об обнаружении всплесков гравитационного излучения от космических источников. Если такая интерпретация наблюдений правильна, она окажет громадное воздействие на релятивистскую астрофизику.

Чтобы разобраться в результатах Вебера, необходимо описать его эксперименты. Каждый детектор представляет собой большой алюминиевый цилиндр длиной около двух метров и весом около тонны. Цилиндр подвешен на проволоке в вакууме и механически изолирован от всего окружающего. Посредине цилиндра прикреплены пьезоэлектрические датчики, присоединенные к электронной цепи, чувствительной к основной (собственной) моде колебаний цилиндра. Частота этой моды равна

$$\nu_0 = 1660 \text{ гц}, \quad (1.15.1)$$

а ее добротность Q (число колебаний, необходимых для уменьшения энергии колебаний в e раз) есть

$$Q \approx 10^5, \quad (1.15.2)$$

т. е. если по цилиндру быстро стукнуть молотком (или воздействовать всплеском гравитационных волн), он начнет «звенеть» с периодом $T_0 = 1/\nu_0 \approx 6 \cdot 10^{-4}$ сек и звон затухнет за время $\tau_0 = QT_0/2\pi \approx 10$ сек.

Именно такого типа резкие возбуждения, необъяснимые пока ничем, кроме гипотетических всплесков гравитационных волн, наблюдал Вебер. Более того, он наблюдал этот неожиданный «звон» не на одном цилиндре, а одновременно на двух, разнесенных на 1000 км (один вблизи Чикаго, а другой неподалеку от Вашингтона)! Точность определения момента времени, с которой Вебер

*) См. примечание на стр. 64.

фиксирует появление «звона», составляет $0,44$ сек, с этой же точностью звон был одновременным.

Каковы характеристики гравитационных волн, которые могли вызвать этот «звон»? Ясно, что они должны нести ощутимую энергию на частотах, близких к $\nu_0 = 1660$ гц. Более того, всплеск должен продолжаться менее чем $\tau_0 = 10$ сек, так как «звон» затухал в соответствии с естественным временем затухания колебаний в цилиндре.

Сколько энергии должны сообщать волны каждому цилиндру? Величина этой энергии менялась от всплеска к всплеску. Для «типичных» событий, зарегистрированных Вебером — они случались в среднем дважды в месяц — полная энергия, приобретаемая основной модой каждого цилиндра, составляет

$$E_{\text{приобр}} \approx 3kT \approx 6 \cdot 10^{-14} \text{ эрг.} \quad (1.15.3)$$

Здесь T — комнатная температура (300°K), а величина $3kT$ означает, что энергия в двух цилиндрах одновременно и быстро вырастает до величины, в три раза превышающей тепловой шум. Вероятность случайной корреляции такой величины меньше одного раза в год. Заметим, что это возбуждение соответствует амплитуде собственного колебания цилиндра δL порядка

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} (10^6 \text{ г}) (2\pi \cdot 1,7 \cdot 10^3 \text{ 1/сек})^2 (\delta L)^2 &\approx E_{\text{приобр}}, \\ \delta L &\approx 6 \cdot 10^{-14} \text{ см.} \end{aligned} \right\} \quad (1.15.4)$$

Разумеется, Вебер не мог прямо измерить такую амплитуду, но он мог и действительно измерил напряжения, которые эти амплитуды вызывают в цилиндрах.

Сколько энергии должны нести волны, чтобы передать $6 \cdot 10^{-14}$ эрг цилиндрам Вебера? Для расчета этой энергии необходимо знать эффективное поперечное сечение механического осциллятора, поглощающего гравитационные волны в полосе $\Delta\nu_0 \approx \approx \nu_0/Q$. Это сечение есть [см., например, Вебер (1962)]

$$\sigma \approx 20 (r_g/\lambda_0) QL^2, \quad (1.15.5)$$

где $r_g = \frac{2Gm}{c^2}$ — гравитационный радиус осциллятора, λ_0 — резонансная длина волны осциллятора, L — длина осциллятора, Q — его добротность. Для цилиндров Вебера эффективное поперечное сечение равно

$$\sigma \approx 3 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2. \quad (1.15.6)$$

Оно, конечно, очень мало в силу малости гравитационного радиуса детектора ($r_g \approx 10^{-22}$ см, $\lambda_0 \approx 10^7$ см, $r_g/\lambda_0 \approx 10^{-29}$). В действительности выписанное сечение относится к ситуации, в которой детектор, находящийся при нулевой температуре, испытывает

статическое воздействие строго резонансного длинного пуга волн (время прохождения луча много больше времени затухания детектора). Веберовские события несколько отличаются от этого: температура и связанный с нею шум высоки, а волновой пуг — короткий. В результате для отдельных событий, которые наблюдались Вебером, поперечное сечение может быть в десять раз выше, чем (1.15.6).

Деля передаваемую энергию на поперечное сечение, мы видим, что приходящая на Землю в каждом всплеске полная энергия на единицу площади в полосе частот детектора есть

$$\left(\frac{dE}{dA}\right)_{\text{на } \nu_0 \text{ в } \Delta\nu_0} \approx 10^5 \text{ эрг/см}^2. \quad (1.15.7)$$

Следовательно, если источник расположен на расстоянии l_{nc} (в парсеках) от Земли, то полная энергия, испускаемая источником в полосе от ν_0 до $\nu_0 + \Delta\nu_0$, равна

$$E_{\text{испуск. на } \nu_0 \text{ в } \Delta\nu_0 = \nu_0/Q = 10^{-5} \nu_0} \approx 10^{43} l_{nc}^2 \text{ эрг}. \quad (1.15.8)$$

Если ширина полосы излучения порядка ν_0 и источник находится в ядре нашей Галактики ($l_{nc} \approx 8,6 \cdot 10^3$), то

$$E_{\text{полн. испуск}} \approx 7 \cdot 10^{55} \text{ эрг} \approx 40 M_{\odot} c^2. \quad (1.15.9)$$

Хотя эти цифры могут оказаться некорректными даже по порядку величины (большая неопределенность заложена в предположении относительно ширины спектра излучения), ясно, что теоретикам будет очень трудно объяснить эти наблюдения! См. обзоры, цитированные в конце § 13.

«События», регистрируемые Вебером, представляют собой выделение огромных порций энергии (конечно, если правильна их интерпретация как всплесков гравитационного излучения из центра Галактики). Поэтому естественно предполагать, что в этих событиях выделяется энергия и в других видах. В работе Чармана и др. (1970) сообщается о попытках наблюдения всплесков радиоизлучения на частоте 151 Мгц от центра Галактики, аналогичных всплескам гравитационного излучения. Результат отрицателен. Поток энергии в радиодиапазоне по крайней мере на 19 порядков меньше, чем в опытах Вебера. Баккал и Дэвис (1971) определили верхний предел потока нейтрино из центра Галактики. Чувствительность детектора к нейтрино зависит от их энергии; поток энергии меньше $20 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$, если $E_{\nu} = 10 \text{ Мэв}$, и меньше $0,1 \text{ эрг/см} \cdot \text{сек}$, если $E_{\nu} = 100 \text{ Мэв}$. Средний поток энергии гравитационных волн, по Веберу, больше $10^4 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$.

При столкновении нейтронных звезд значительная доля энергии выделилась бы в виде ν и $\bar{\nu}$. По-видимому, только столкновение коллапсаров могло бы давать энергию в единственной форме гравитационного излучения.