

## § 1. Введение

Гравитационные волны, предсказанные общей теорией относительности, распространяются со скоростью света, характеризуются определенной плотностью энергии и потоком импульса [см., например, Зельдович, Новиков (1971)] или — в хаотическом наборе волн — плотностью энергии и давлением. Отличительная особенность гравитационных волн — их слабое взаимодействие с обычным веществом и между собой.

Сенсационные сообщения Вебера (1969) об открытии гравитационных волн, испущенных ядром нашей Галактики, по-видимому, не подтвердились более поздними опытами \*). Тем не менее эти сообщения чрезвычайно усилили интерес к различным аспектам гравитационных волн и, в частности, к вопросу об их космологической роли.

Мы уже неоднократно упоминали, что во Вселенной могут существовать космологические гравитационные волны с самого начала расширения. Они не имеют каких-либо источников, точнее, их источником являлось сингулярное состояние. Спектр их может быть, вообще говоря, произвольным. Это могут быть как высокочастотные гравитационные волны, скажем, с длиной волны того же порядка, что и у реликтового электромагнитного излучения, так и гораздо более низкочастотные, с длиной волны порядка размеров скоплений галактик и больше.

Не состоит ли Вселенная в основном из гравитационных волн? Не может ли плотность гравитационных волн (плотность энергии, деленная на квадрат скорости света) превышать в настоящее время

---

\*) Обзор экспериментальных данных дан в докладе Тайсона (1973); см. также Брагинский и др. (1974).

Эти работы содержат прямое опровержение утверждения Вебера о том, что он регистрирует гравитационные волны. Воспринимающий элемент, «антенна», в упомянутых работах практически не отличается от веберовской, однако техника регистрации деформаций антенны усовершенствована.

Возможно, что разгадка разногласий связана с помехами, влияющими на аппаратуру Вебера. В этой связи весьма интересен впервые отмеченный Адамянц, Алексеевым и Колосницыным (1972) факт корреляции всплесков Вебера с земной и солнечной магнитной активностью.

плотность обычного вещества или, по крайней мере, плотность электромагнитного излучения?

Каков спектр гравитационных волн? Слабое взаимодействие волн с веществом не позволяет дать прямой экспериментальный ответ на поставленные вопросы. Поэтому в данной главе мы будем обсуждать косвенную информацию, т. е. судить о гравитационном излучении, заполняющем Вселенную, по различным астрофизическим проявлениям. Перечислим различные эффекты:

1) Влияние гравитационного излучения на общее расширение Вселенной и в особенности на возраст Вселенной.

2) Влияние гравитационного излучения (через скорость расширения) на закон роста возмущений, связь с теорией образования галактик.

3) Влияние гравитационного излучения на нуклеосинтез на весьма ранней стадии, при температуре порядка  $10^9$ — $10^{10}$  °К,— также косвенно, через изменение температуры в процессе расширения, но на стадии более ранней, чем в пп. 1), 2).

4) Передача энергии от гравитационных волн галактикам в скоплениях или самим скоплениям.

5) Влияние гравитационных волн на распространение реликтового излучения. Для длинных волн этот подход наиболее информативен. Точность измерения такова, что в области длинных волн удастся доказать космологическую малость плотности энергии гравитационного излучения, по крайней мере в указанной части спектра.

Теория в свою очередь приводит к некоторым предсказаниям о гравитационном излучении. Следует рассмотреть такие проблемы:

6) Тепловое коротковолновое гравитационное излучение, аналогичное электромагнитному реликтовому излучению; первым стоит вопрос об установлении термодинамического равновесия вблизи сингулярности.

7) Длинноволновое излучение и его связь с другими типами возмущения метрики, в частности с адиабатическими возмущениями плотности.

8) Генерация гравитационных волн в галактиках и в ядрах галактик.

Для такого полного рассмотрения вопросов, связанных с космологической ролью гравитационного излучения, необходимо напомнить фундаментальные классические результаты, касающиеся гравитационных волн, а именно:

9) Общие выражения и числовые оценки стандартной теории \*).

10) Результаты, относящиеся к эволюции гравитационных волн в расширяющейся Вселенной.

\*) Изложенное ниже развивает сведения о гравитационных волнах, содержащиеся у Ландау и Лифшица (1973) и в ТТ и ЭЗ.

Перечисленные 10 пунктов в основном исчерпывают содержание данной главы. Общий вывод, хотя и неокончательный, скорее неутешителен для любителей сенсаций; устанавливается ряд неравенств, ограничивающих плотность гравитационного излучения. Однако ударение следует сделать на тех областях спектра, которые остаются неизученными в настоящее время. В предлагаемой главе намечается программа дальнейших исследований и обсуждаются пути и методы исследования.

Порядок расположения следующих параграфов не соответствует расположению перечисленных 10 пунктов.

## § 2. Общие сведения о гравитационных волнах

В пустом пространстве ( $T_{ik}=0$ ) возможно решение уравнений ОТО с метрикой вида

$$ds^2 = c^2 dt^2 - g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \quad g_{\mu\nu} = \delta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}(t, \mathbf{x}), \quad (16.2.1)$$

соответствующей слабовозмущенной метрике Минковского. Систему координат можно выбрать таким образом, что уравнения Эйнштейна  $R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = 0$  в линейном по  $h_{\mu\nu}$  приближении приводят к уравнениям для  $h_{\mu\nu}$  вида

$$\square h_{\mu\nu} = 0. \quad (16.2.2)$$

Элементарные решения этого уравнения суть

$$h_{\mu\nu} = h_{\mu\nu}(\mathbf{k}) = h_{\mu\nu}^{(0)} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x} - i\omega t}, \quad \omega = c|\mathbf{k}|. \quad (16.2.3)$$

Координатные условия, обращающие уравнения Эйнштейна в уравнения (16.2.2), позволяют наложить еще следующие условия на  $h_{\mu\nu}$ :

$$h_{\mu}^{\mu(0)} \equiv h = 0, \quad h_{\mu\nu}^{(0)} k^\mu = h_{\mu\nu}^{(0)} k^\nu = 0. \quad (16.2.4)$$

Четыре условия (16.2.4) для  $h_{\mu\nu}$  образуют четыре связи, оставляя из шести компонент независимыми только две. Эти две компоненты характеризуют два состояния поляризации плоской гравитационной волны.

Элементарные решения (16.2.3) образуют полную систему (в смысле теории интеграла Фурье), любое решение может быть представлено в виде суперпозиции [линейной комбинации  $\int h_{\mu\nu}(\mathbf{k}) a(\mathbf{k}) d^3\mathbf{k}$ ] таких решений. При пользовании записью в комплексной форме подразумевается, что  $h_{\mu\nu}$  — вещественная часть комплексного выражения либо что все выражения удовлетворяют соотношению вида  $C(\mathbf{k}) = C^*(-\mathbf{k})$ , — условие, обеспечивающее вещественность интеграла Фурье.