

## Г Л А В А 15

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

#### § 1. Введение

Детальное исследование реликтового излучения — его спектра и углового распределения, — в принципе, может дать весьма ценную информацию об отклонениях Метагалактики от идеального однородного и изотропного космологического решения.

Существование таких отклонений несомненно: в предыдущей главе показано, что отклонения необходимы для возникновения структуры Вселенной — скоплений галактик, галактик, звезд.

Однако обратная задача — определение отклонений от однородности на стадии до образования небесных тел по наблюдаемой сейчас макроструктуре Вселенной — оказывается трудной и неоднозначной. Исследование реликтового излучения существенно дополняет наши сведения о возмущениях. Возмущения малого масштаба затухают еще до рекомбинации водорода во Вселенной и не оставляют видимого следа в структуре. Однако, затухая, эти возмущения выделяют энергию и искажают спектр реликтового излучения, создают отклонения спектра от равновесного планковского закона.

С другой стороны, возмущения самого большого масштаба имеют, по-видимому, малую амплитуду. Статистика внегалактических объектов (скоплений, квазаров, радиисточников) имеет дело с дискретными телами. Эта дискретность создает дополнительные источники «шума», случайных ошибок. Поэтому, например, точность определения константы Хаббла до сих пор не лучше 20%. Изотропия константы Хаббла, определенной в разных направлениях на небе, тоже установлена с точностью не лучше 20%. Между тем измерение температуры реликтового излучения, приходящего с различных направлений, отвечает практически на тот же вопрос об одинаковости расширения во всех направлениях, т. е. об изотропии Вселенной. Точность измерения разности температур в наиболее удобной сантиметровой области лучше 0,1%. В настоящее время наблюдатели не обнаружили ни искажений спектра, ни зависимости температуры от направления, несмотря на разработанную теорию таких отклонений, известную наблюдателям. На этом месте

нетерпеливый читатель может прервать чтение главы «о несуществующих эффектах». Мы же продолжим детальное обсуждение вопроса по двум причинам. Во-первых, сегодня негативные результаты наблюдений дают возможность получить неравенства, верхние границы возмущений. Эти верхние границы достаточно интересны, особенно в сопоставлении с наблюдаемой структурой. Вырисовывается картина начального состояния Вселенной вблизи сингулярности с весьма малыми отклонениями от идеализированной модели Фридмана. Во-вторых, завтра можно ожидать дальнейшего уточнения экспериментальных методов. Одновременные измерения в нескольких спектральных интервалах позволят точнее отделить флуктуации реликтового излучения от вклада близких к нам источников. Можно надеяться, что эффекты, рассматриваемые ниже, будут реально обнаружены уже после повышения чувствительности на один-два порядка (до  $\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-6}$ ), и тогда теория, излагаемая ниже, станет практически важной для обработки наблюдений.

Напомним, что пространственно-однородная ситуация уже была рассмотрена ранее (см. гл. 8). Было выяснено, какие искажения спектра возникают в результате выделения данной энергии в тот или иной период, при том или ином значении  $z$ .

В § 2 и § 3 рассматриваются две конкретные причины выделения энергии — аннигиляция вещества и антивещества (§ 2) и превращение в тепло кинетической энергии пекулярных движений (§ 3). Показано, какие ограничения на количество и распределение антивещества следуют из отсутствия отклонений спектра от равновесного (§ 2). В § 3 аналогичные ограничения получены на пекулярные движения вещества.

Дальше рассматривается вопрос о зависимости температуры реликтового излучения от направления при наличии возмущений. В § 4 дана общая схема вычисления распределения температуры при заданном пекулярном движении вещества и заданном распределении возмущений плотности. В поле излучения, которое в первом приближении равносильно, однородно и изотропно, задача очень упрощается: никакое отклонение лучей, их фокусировка или дефокусировка не могут изменить яркости. Только пекулярные движения (через доплер-эффект) создают изменения яркостной температуры. В следующих параграфах эта общая схема применяется к различным видам возмущений. В § 5 она применяется к адиабатическим возмущениям, т. е. к потенциальным движениям с одновременными изменениями плотности вещества. Эти возмущения растут в силу гравитационной неустойчивости (и поэтому наибольшая их амплитуда достигается в настоящее время).

Адиабатические возмущения вызывают также общее движение того вещества — того скопления или сверхскопления, — к которому принадлежит наша Галактика, Солнце и, в конечном счете,

наша планета, несущая наблюдательную аппаратуру. Реликтовое излучение позволяет определить в каждой точке систему отсчета, относительно которой измеряется эта пекулярная (случайная, обязанная возмущениям) скорость движения. В § 6 обсуждаются измерения пекулярной скорости и следующие из них ограничения на амплитуду адиабатических возмущений.

Наконец, в § 7 рассматриваются вихревые возмущения и длинные гравитационные волны как возможный источник флуктуаций реликтовой температуры \*). Для этих типов возмущений характерно их ослабление в ходе расширения. Поэтому эффект зависит главным образом от ситуации в наиболее ранний момент, доступный наблюдению, в данном случае — в момент рекомбинации, когда плазма становится прозрачной. В определенном интервале длин волн возмущений эффект сильно зависит от того, что рекомбинация и просветление плазмы происходят не мгновенно: излучение, приходящее с определенного направления, усредняет температуру толстого слоя.

Далее, вторичная ионизация всего первичного газа или части его, не вошедшей в скопления, приводит к рассеянию и сглаживает возможную угловую зависимость интенсивности реликтового излучения. Поэтому, казалось бы, отсутствие наблюдаемых возмущений всегда можно приписать сглаживающему действию рассеяния, даже тогда, когда в момент рекомбинации возмущения велики.

Однако такое универсальное объяснение — или, скорее, отговорка — сталкивается с большими трудностями. Для эффективного сглаживания нужна большая оптическая толщина, что в свою очередь требует ранней вторичной ионизации (при  $z \sim 50-80$ ), но в ранний момент велика скорость теплоотдачи, трудно удерживать плазму горячей и ионизованной. Сами процессы, нагревающие газ, вносят новые возмущения в реликтовое излучение. В целом вывод заключается в том, что наблюдаемая высокая степень изотропии реликтового излучения является сильным доводом в пользу малости возмущений фридмановской однородной и изотропной модели, в частности в пользу теории адиабатических возмущений, и против вихревой (турбулентной) теории образования галактик.

## § 2. Аннигиляция антивещества

Рассмотрим аннигиляцию антивещества (антипротонов, антиядер гелия) и вещества в РД-периоде.

В литературе обсуждается зарядово-симметричная космологическая модель, где с самого начала предполагается, что в среднем во Вселенной имеется равное количество вещества и антивещества.

---

\*) Все вопросы, связанные с гравитационными волнами и, в частности, вопрос о флуктуациях реликтового излучения выделены в отдельную главу.