

## ЭЛЕМЕНТЫ СОВРЕМЕННОЙ КОСМОЛОГИИ

Космология изучает физическое строение и эволюцию наблюдаемой части Вселенной в больших масштабах — сотни и тысячи мегапарсек и более, а также эволюцию Вселенной как единого целого. Данные, используемые в космологии, получают из наблюдений внегалактических объектов в различных диапазонах длин волн, а также измеряя интенсивность и флуктуации яркости реликтового микроволнового излучения. Создаваемые *космологические модели* основаны на современных теоретических представлениях о свойствах пространства–времени (теория гравитации) и элементарных частиц и стремятся описать совокупность известных наблюдательных фактов о Вселенной с минимумом произвольных допущений.

Ниже мы будем пользоваться наиболее разработанными космологическими моделями, основанными на общей теории относительности (ОТО), с учетом, где это требуется, космологической постоянной (А. Эйнштейн, 1917). Где необходимо, используется «стандартная модель» физики элементарных частиц, хорошо проверенная в экспериментах на современных ускорителях до энергий порядка 1 ТэВ. Мы ограничимся самыми общими представлениями о современной космологии, опуская сложные выкладки и детальное описание исторически важных, но уже устаревших моделей.

Наблюдательные данные последних десятилетий произвели настоящую революцию в наших представлениях о Вселенной. В первую очередь это относится к открытию ускоренного расширения Вселенной (конец 1990-х гг.) по измерениям блеска далеких сверх-

новых типа Ia, которые в максимуме блеска могут быть использованы как «стандартные свечи» (т. е. источники с известной мощностью энерговыделения), и независимо — по измерениям угловых флуктуаций температуры реликтового фона на небе и по особенностям крупномасштабного распределения галактик.

В результате анализа имеющихся данных установлено, что энергия, заключенная в обычном веществе, из которого состоят все видимые астрономические объекты (барионы, электроны и другие элементарные частицы), составляет не более 5% от средней плотности энергии во Вселенной. Примерно на четверть Вселенная состоит из вещества неизвестной природы, которое взаимодействует с обычным веществом только через гравитационное притяжение и, возможно, электрослабое взаимодействие («скрытая масса») и наблюдается в масштабах галактик и скоплений галактик. Оставшиеся ~ 70% плотности энергии во Вселенной приходится на субстанцию еще менее понятной природы, которую иногда называют «темной энергией» (англ. *«dark energy»*). В отличие от обычного вещества и скрытой массы, «темная энергия» не подвержена гравитационному сгущиванию, а наоборот, в больших масштабах ее действие можно представить как своего рода всепроникающую антигравитацию, что и проявляется в современном ускоренном расширении Вселенной.

ОТО, в ее «классическом» варианте, обходится без такого понятия, как гравитационное поле, трактуя гравитацию как кривизну четырехмерного пространства–времени. Величина кривизны зависит как от плотности материи, так и от того, как происходит ее расширение. При этом даже при ненулевой плотности материи кривизна трехмерного пространства может оказаться нулевой. Действительно, из наблюдений флуктуаций реликтового излучения был сделан вывод, что пространственная геометрия Вселенной в масштабах 10 млрд. световых лет является евклидовой с точностью до нескольких процентов (!), то есть сумма углов треугольника любого размера, стороны которого образованы световыми лучами (геодезическими линиями), равна 180 градусам по крайней мере с точностью до нескольких градусов. Близость геометрии пространства к евклидовой ранее теоретически предсказывалась инфляционной теорией начальной стадии расширения Вселенной (см. ниже).

Важность космологии для физики в целом диктуется ее способностью косвенно проверять фундаментальные физические теории,

в том числе, описывающие поведение частиц на энергиях вплоть до планковских значений ( $\sim 10^{19}$  ГэВ) путем сравнения наблюдаемых данных с теоретическими предсказаниями. Общеизвестно, что любая фундаментальная физическая теория должна как давать предсказания, которые могут быть проверены экспериментально, так и согласовываться с имеющимися наблюдательными данными.

## 12.1. «Краткий курс» истории космологии XX века

Очень схематично историю современной космологии можно проследить по датам важнейших наблюдательных и теоретических открытий:

1910–1922, В. Слайфер (США) – первые измерения красных смещений в спектрах галактик

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}},$$

где  $\lambda_{em}$ ,  $\lambda_{obs}$  – излучаемая и наблюдаемая длина волны спектральной линии;

1916, А. Эйнштейн (Германия) – создание общей теории относительности;

1917 – введение космологической постоянной в уравнения ОТО для описания «стационарной» Вселенной;

1922–1924, А. Фридман (СССР) – получение нестационарных решений уравнений Эйнштейна (фридмановские космологические модели);

1929, Э. Хаббл (США) – открытие закона пропорциональности между скоростью удаления галактик и расстоянием до них  $v = H_0 l$ ; скорость удаления галактики определяется по красному смещению и интерпретируется эффектом Доплера; первое измерение постоянной Хаббла;

1946–1949, Г. Гамов, Р. Алфер, Р. Херман (США) – выдвижение гипотезы «горячей Вселенной» («Big Bang»); предсказание существования изотропного реликтового излучения с равновесным спектром и температурой несколько К;

1932–1975, Ф. Цвикки (США), Я. Эйнасто (Эстония), Дж. Острайкер (США) – предположение о существовании скрытой массы и ее изучение различными методами;

1964, А. Пензиас, Р. Вилсон (США) – открытие изотропного космического микроволнового фона (реликтовое излучение) с тем-

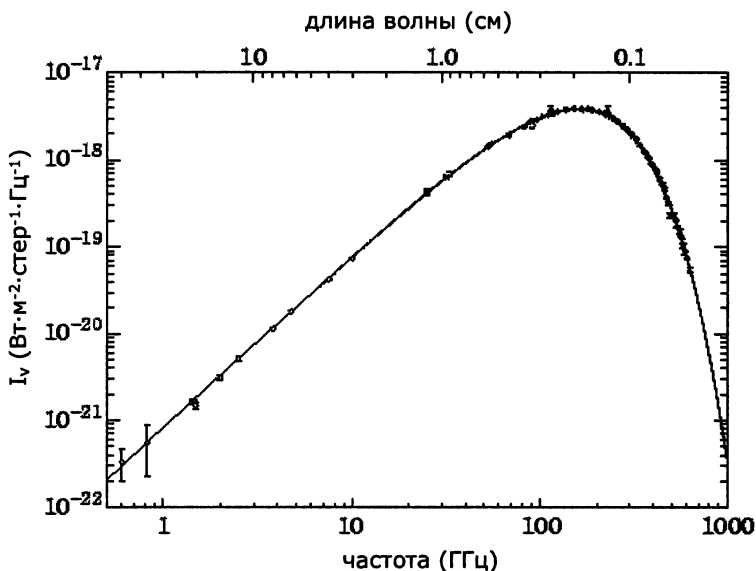


Рис. 12.1. Спектр интенсивности космического микроволнового (реликтового) излучения. Сплошная кривая — функция Планка для абсолютно черного тела с температурой  $T = 2.726$  К. По данным наземных наблюдений, с ракетных и баллонных экспериментов и космического эксперимента COBE.

пературой около 3 К. Последующее развитие теории горячей Вселенной. «Срастание» космологии ранней Вселенной с физикой элементарных частиц;

1979–80, А. Гус (США), А. А. Старобинский, А. Д. Линде, Д. А. Киржниц (СССР) — разработка гипотезы «инфляционной» (раздувающейся) Вселенной для решения парадоксов классической фридмановской космологии (впервые предложено Э. Б. Глинером (СССР) в середине 1960-х гг.);

1991–1993 — в космических экспериментах «Реликт-1» (СССР), COBE (США) впервые обнаружены флуктуации реликтового излучения на уровне  $\Delta T/T \lesssim 10^{-5}$  в угловых масштабах  $\sim 10$  градусов;

1998 — уточнение формы хаббловских зависимостей «красное смещение–расстояние» для далеких сверхновых типа Ia; вывод о том, что современное расширение Вселенной происходит с ускорением, что указывает на существование положительной космологической постоянной (Эйнштейн, 1917) или более сложного вида ма-

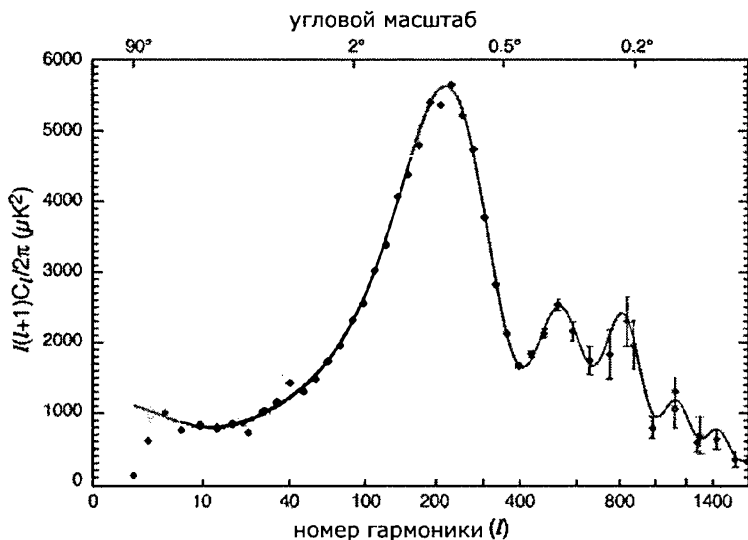


Рис. 12.2. Спектр флуктуаций реликтового излучения по данным космического эксперимента WMAP, наземного эксперимента CBI и балонного эксперимента ACBAR. По горизонтали — номер угловой гармоники (мультиполя) и соответствующий ей угловой масштаб (сверху), по вертикали — нормированный спектр мощности флуктуаций. Сплошная линия — подгонка в модели с космологической постоянной и холодной скрытой массой ( $\Lambda$ -CDM). Положение первого пика вблизи угловой гармоники с номером  $l \approx 200$  соответствует плоской геометрии пространственных сечений Вселенной (параметр  $\Omega_{tot} = 1 \pm 0.015$ ).

терии («темной энергии»), дающей основной вклад в современную плотность энергии Вселенной;

2000–2006 — измерение углового спектра флуктуаций реликтового микроволнового излучения в экспериментах BOOMERaNG, DASI, MAXIMA и WMAP. Открытие первого пика в спектре углового распределения амплитуд флуктуаций на масштабах около 1 градуса, предсказанного А. Д. Сахаровым в 1967 г. (т. н. «сахаровские колебания»). Доказательство плоской (евклидовой) геометрии пространственных сечений наблюдаемой Вселенной с точностью лучше 10% до красных смещений  $z \sim 1000$  (эпоха рекомбинации) (см. цв. вставку и рис. 12.2). Указания на существование эпохи вторичной ионизации межгалактической среды на красных смещениях  $z \sim 10$ .