

Глава 1

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННОЙ КОСМОЛОГИИ

1.1. Введение

Всю историю развития космологии, начиная с Птолемея и Аристотеля и вплоть до нашего времени можно условно разделить на два этапа: до и после экспериментального открытия реликтового излучения (РИ). О первом этапе написано сотни книг и он уже стал не только достоянием науки, но и истории развития человечества. Второй этап датируется 1965 годом, когда американские исследователи А. Пензиас и Р. Вилсон [Penzias, Wilson, 1965] опубликовали в журнале “Astrophysical Journal” свою знаменитую статью под названием “A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s”, в которой сообщалось о детектировании нового радифона Вселенной. В этом же номере журнала, предваряя сообщение Пензиаса и Вилсона, была помещена статья Р. Дикке, П.Дж.Е. Пибблса, П. Ролла и Д. Уилкинсона [Dicke et al., 1965], в которой сообщалось о подготовке аналогичного эксперимента, но на другой длине волны и давалась интерпретация результатов Пензиаса и Вилсона как подтверждение теории “горячей Вселенной”. Открытое Пензиасом и Вилсоном излучение, имеющее температуру около трёх градусов Кельвина, объяснялось как остывшее вследствие расширения Вселенной излучение горячей плазмы, существовавшей в самом начале расширения.

Формально, так просто и буднично начинался новый этап изучения Вселенной, катализатором которого послужили несколько журнальных страниц одного и того же тома. Нужно отметить, что “рождение ребенка” не явилось полной неожиданностью для астрофизиков. Ещё в середине 40-х годов Г. Гамов [Gamov, 1946] опубликовал работу, в которой предложил так называемую модель “горячей” начальной фазы космологического расширения, стимулировавшую исследования Р. Альфера и Р. Хермана [Alpher, Herman, 1953] по объяснению химического состава догалактического вещества (обзор и ссылки см. [Novikov, 2001]).

Отправной точкой исследования этих авторов была попытка объяснить особенности распространённости во Вселенной всех химических элементов и изотопов. Предполагалось, что все они произошли в самом начале расширения Вселенной. Таблицы распространённости разных изотопов показывают, что доминируют изотопы с преобладанием нейтронов. Отсюда следовало, что свободные нейтроны должны были существовать достаточно долго в первичном веществе, а это возможно только при высокой температуре. Так возникла идея горячего начала расширения Вселенной. В первых работах авторов теории горячей Вселенной был целый ряд непоследовательностей, на которых мы здесь не будем останавливаться. С деталями можно ознакомиться, например, в монографиях [Zeldovich, Novikov, 1983; Weinberg, 1977].

Согласно современной точке зрения в первые три минуты расширения Вселенной “варятся” только лёгкие элементы, более тяжёлые возникают в ядерных процессах в звёздах гораздо позже, а самые тяжёлые – при взрывах сверхновых звёзд. Важно отметить, что основная идея Гамова, Альфера и Хермана о необходимости высокой температуры первоначального вещества оказалась правильной. О современной теории нуклеосинтеза в ранней Вселенной см., например, монографии [Zeldovich, Novikov, 1983; Kolb, Turner, 1990].

Однако существовала и ещё одна, курьёзная причина, почему авторы теории “горячей Вселенной” считали необходимым “сварить” все химические элементы буквально в первые секунды космологического расширения. Дело в том, что в 40-х годах прошлого века величина постоянной Хаббла H_0 , а следовательно, и возраст Вселенной оценивались неправильно. Постоянная Хаббла завышалась в несколько раз по сравнению с её измеренным современным значением, а возраст Вселенной при этом занижался до $(1 \div 4) \cdot 10^9$ лет в отличие от $13 \div 15$ млрд лет, принятых в настоящее время. Этого короткого промежутка времени недостаточно для синтеза элементов в звёздах, поэтому Гамов с коллегами пришли к выводу о том, что все химические элементы должны были быть “сварены” из первичного вещества.

Сейчас, благодаря данным космохронологии, мы знаем, что возраст Вселенной заведомо превышает возраст Земли ($4 \cdot 10^9$ лет), а сама Земля сформировалась из протопланетного вещества, прошедшего обогащение в звёздах продуктами термоядерного синтеза, протекающего в их недрах. Тем самым

необходимость объяснения всего химического состава вещества, включая и элементы тяжелее железа, в рамках модели “горячей Вселенной” попросту отпала. Однако главная идея создателей этой теории – идея о высокой начальной температуре и плотности космической плазмы, выдержала испытание временем.

Вернёмся, однако, к истории открытия реликтового излучения. Из не совсем последовательных оценок Гамов с коллегами получили, что вследствие горячего начала Вселенной сегодня в пространстве должно существовать равновесное излучение с температурой в несколько кельвинов. Казалось бы, сделано важнейшее предсказание, требующее наблюдательной проверки, и радиоастрономы должны были попытаться обнаружить это излучение. Однако этого не случилось. Выдающийся американский ученый, лауреат Нобелевской премии по физике С. Вейнберг в своей уже цитированной выше книге “Первые три минуты: современный взгляд на происхождение Вселенной” [Weinberg, 1977] писал: “...Обнаружение реликтового электромагнитного излучения было одним из наиболее важных научных открытий двадцатого столетия. Но почему же оно было сделано случайно? Или, говоря иначе, почему оно не искалось целенаправленно, задолго до 1965 года?..” Мы уже упоминали выше, что предсказания о возможном существовании электромагнитного излучения с температурой порядка нескольких кельвинов было сделано Гамовым и его коллегами более чем за 15 лет до его обнаружения. Быть может, требовались какие-то специальные радиотелескопы с недостижимой на тот момент чувствительностью? По-видимому, это не так, и необходимые приёмники уже тогда существовали. Главная причина, на наш взгляд, скорее психологического характера. И тому есть убедительные подтверждения, о которых речь пойдет несколько ниже.

Дело в том, что история науки изобилует примерами, когда предсказания новых явлений и в особенности пионерских открытий намного опережали по времени их экспериментальное подтверждение. С. Вейнберг [Weinberg, 1977] приводит прекрасный пример с предсказанием существования в природе антипротона, сделанным ещё в 1930 году. Тогда, сразу же после теоретического предсказания, физики даже не могли представить себе контуры физического эксперимента, способного подтвердить, а может быть, как это часто бывает, и опровергнуть столь фундаментальное следствие теории. Это стало возможным лишь почти 20 лет спустя, после того как в Беркли был построен

ускоритель частиц, блестяще подтвердивший предсказания теории.

Однако, как мы увидим ниже, в случае предсказания реликтового излучения приёмники, позволяющие начать его поиски, уже существовали. Но радиоастрономы просто не знали о том, что следует искать. Сказывалась разобщённость теоретиков и наблюдателей, да и среди теоретиков большого доверия к ещё несовершенной теории горячей Вселенной не было. Мысли о том, как можно было бы зарегистрировать электромагнитный “отзвук Большого Взрыва”, возникли лишь к середине 60-х годов, да и то в значительной мере благодаря случаю. Другая причина, и, быть может, самая главная, была озвучена А. Пензиасом в его Нобелевской лекции 1979 года [Penzias, 1979]. Дело в том, что ни в одной из работ Г. Гамова с коллегами не было отмечено, что микроволновое излучение, дошедшее до нас от эпохи космологического нуклеосинтеза и остывшее вследствие расширения Вселенной до нескольких кельвинов, можно измерить, хотя бы в принципе. Более того, складывалось абсолютно противоположное впечатление, которое А. Пензиас в Нобелевской лекции сформулировал так: «Что же касается обнаружения реликтового излучения, то, по-видимому, они считали, что в первую очередь это излучение проявит себя как увеличение плотности энергии. Этот вклад в приходящий на Землю общий поток энергии должен быть замаскирован космическими лучами и суммарным оптическим излучением звёзд. Обе эти составляющие имеют сравнимые плотности энергии. Мнение о том, что действия трёх компонентов с приблизительно равными энергиями нельзя разделить, можно найти в письме Г. Гамова, написанном Р. Альферу в 1948 г. (не опубликовано: любезно предоставлено мне Р. Альфером): “Температура космического пространства, равная 5 К, объясняется современным излучением звёзд (С-циклы). Единственно, что мы можем сказать, – это то, что оставшаяся от исходного тепла Вселенной температура не выше 5 К”. Они, по-видимому, не осознавали того, что своеобразные спектральные характеристики реликтового излучения должны выделять его среди других эффектов».

Но это поняли А.Г. Дорошкевич и И.Д. Новиков, опубликовавшие в 1964 г. в журнале “Доклады Академии наук СССР” статью под названием “Средняя плотность излучения в метagalктике и некоторые вопросы релятивистской космологии” [Дорошкевич, Новиков, 1964]. Основная идея, сформули-

рованная в этой работе, не потеряла своей актуальности даже сейчас. Предположим, что мы знаем, как излучают галактики разных типов на разных длинах волн электромагнитного излучения. Если задаться определёнными предположениями относительно эволюции галактик в прошлом и учесть покраснение света от далёких галактик из-за расширения Вселенной, то можно рассчитать, сколько излучения от галактик на каждой длине волны будет сегодня во Вселенной. При этом необходимо учесть, что светят не только звёзды, многие галактики интенсивно излучают радиоволны метровой и дециметровой длины. Нетривиальный момент заключается в том, что если Вселенная была “горячей”, то к рассчитываемому спектру излучения необходимо добавить реликтовый радиофон, что и было сделано в названной статье. Это излучение должно иметь длины волн порядка сантиметров и миллиметров и приходиться как раз на тот диапазон спектра, где вклад от излучения галактик практически отсутствует. Поэтому в указанном диапазоне реликтовое излучение должно в десятки тысяч и даже миллионы раз превышать излучение известных источников радиоизлучения. А следовательно, его можно наблюдать! Вот что сказал по этому поводу в своей Нобелевской лекции А. Пензиас: «Первое опубликованное признание реликтового излучения в качестве обнаружимого явления в радиодиапазоне появилось весной 1964 года в краткой статье А.Г. Дорошкевича и И.Д. Новикова, озаглавленной “Средняя плотность излучения в метагалактике и некоторые вопросы релятивистской космологии”. Хотя английский перевод появился в этом же году в широко известном журнале “Советская физика – Доклады”, статья по-видимому, не привлекла к себе внимания других специалистов в этой области. В этой замечательной статье не только выведен спектр реликтового излучения как чернотельного радиоволнового явления, но также отчетливо сконцентрировано внимание на двадцатифутовом рупорном рефлекторе лаборатории “Белл” в Кроуфорд Хилл, как наиболее подходящем инструменте для его обнаружения!». Заметим, что именно с помощью этого инструмента реликтовое излучение было открыто в 1965 г.

Однако на этом драматизм истории предсказания и открытия реликтового излучения не исчерпывается. Оказывается, с косвенным проявлением РИ астрономы сталкивались ещё задолго до 60-х годов. В 1941 г. канадский астроном Э. Мак-

Келлар обнаружил существование молекул циана в межзвёздном пространстве. Способ, которым исследовался межзвёздный газ, был следующим. Если свет какой-либо звезды на пути к нам проходит сквозь облако межзвёздного газа, то атомы и молекулы этого газа вызывают поглощение света звезды на строго определённых длинах волн. Так возникают линии поглощения, широко известные в астрономии и успешно используемые для изучения свойств не только межзвёздного газа в нашей Галактике, но и в других задачах астрофизики. Положение линий поглощения в спектре излучения зависит от того, какой элемент или какая молекула вызвала это поглощение, а также от того, в каком состоянии они находились. В качестве объекта исследований Э. Мак-Келлар выбрал линии поглощения, вызываемые в спектре звезды ϵ Змееносца молекулами циана. Он пришёл к выводу о том, что эти линии могут возникать только при поглощении света вращающимися молекулами. Выполнив сравнительно несложные подсчёты, Мак-Келлар пришёл к выводу о том, что для возбуждения вращательных степеней свободы циана необходимо присутствие стороннего излучения с эффективной температурой 2,3 К. Ни сам Мак-Келлар, ни кто-нибудь другой, конечно, даже не могли представить, что он столкнулся с проявлением реликтового излучения. Напомним, что это было задолго до пионерских работ Гамова и его коллег! Только после открытия реликтового излучения, уже в 1966 г., были опубликованы сразу три работы: И.С. Шкловского [Шкловский, 1966], Дж. Филда и Р. Тадеуша, в которых было показано, что возбуждение вращательных степеней циана вызвано квантами РИ. Таким образом, ещё в 1941 г. было получено, хотя и косвенное, указание на существование во Вселенной реликта её “горячего” прошлого.

Но и это ещё не конец истории. Вернёмся к вопросу, готова ли была экспериментальная радиофизика к открытию реликтового излучения, скажем так, задолго до результатов Пензиаса и Вилсона? В своей книге С. Вейнберг [Weinberg, 1977] пишет: “Трудно ответить точно, но мои коллеги-экспериментаторы говорят мне, что наблюдения могли быть проведены задолго до 1965 года, возможно, в середине 50-х, а может быть, даже и в середине 40-х годов” Так ли это?

Осенью 1983 г. одному из авторов настоящей монографии (И. Новикову) позвонил сотрудник института общей физики Т. Шмаонов, с которым автор до этого не был знаком, и сказал, что он хотел бы побеседовать по вопросу открытия реликтового

излучения. При встрече Т. Шмаонов рассказал, как он в середине 50-х годов под руководством известных советских радиоастрономов С.Э. Хайкина и Н.Л. Кайдановского проводил измерения интенсивности радиоизлучения космоса на длине волны 3,2 см с помощью рупорной антенны, подобной той, которая спустя много лет была использована А. Пензиасом и Р. Вилсоном. Т. Шмаонов со всей тщательностью изучил возможные собственные шумы приёмной аппаратуры, которая, конечно же, уступала американской (учтите фактор времени, который в те годы был решающим с точки зрения качества приёмников), и пришёл к выводу об обнаружении сигнала. Т. Шмаонов опубликовал свои результаты в 1957 г. в советском журнале "Приборы и техника эксперимента" и включил их в свою кандидатскую диссертацию [Шмаонов, 1957]. Вывод из этих измерений был таков: "Оказалось, что абсолютная величина эффективной температуры радиоизлучения фона... равна 4 ± 3 К". Более того, было показано, что интенсивность излучения не зависит ни от времени, ни от направления измерений. Хотя погрешности измерений температуры были и высоки, сейчас понятно, что Т. Шмаонов наблюдал именно реликтовое излучение на длине волны 3,2 см, хотя ни сам автор, ни другие радиоастрономы, с которыми он обсуждал результаты своих экспериментов, к сожалению, не придали должного значения этому эффекту. Более того, уже после опубликования работы А. Пензиаса и Р. Вилсона сам автор не понял, что речь идёт об одном и том же источнике сигнала (правда, в то время Т. Шмаонов работал уже совсем в другой области физики). Лишь спустя 27 лет после своих измерений Шмаонов сделал специальный доклад о своём открытии.

Но и это ещё не всё! Совсем недавно мы узнали, что в самом начале 50-х годов прошлого века японскими физиками предпринимались попытки измерения реликтового излучения. Однако ни тогда, ни до сих пор нам не встретились какие-либо достоверные ссылки на эти исследования.

Очевидно, что драма идей и случайных блужданий эпохи 40–50-х годов в поисках проявлений реликтового радиофона ещё ждёт своего историографа, в то время как период с 1965 г. и вплоть до наших дней носит характер целенаправленного штурма космического излучения, и не только в радио-, но и в оптическом, инфракрасном, ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма-диапазонах.