

Анизотропия реликтового излучения: открытие и научное значение

Дж.Ф. Смут III

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2006 г.)

PACS numbers: 01.30.Bb, 98.70.Vc, **98.80. - k**

DOI: 10.3367/UFNr.0177.200712d.1294

Содержание

1. **Космический реликтовый фон (1294).**
 - 1.1. Введение. 1.2. Основные законы реликтового излучения. 1.3. Переход к космологии. 1.4. Почему бы сначала не поискать зародыши формирования галактик? 1.5. Начало нового эксперимента по измерению увлечения эфира. 1.6. Контекст. 1.7. Зачем нам нужна была такая сильная команда и такие усилия? 1.8. DMR и наблюдения с U-2. 1.9. Поляризация реликтового излучения. 1.10. Измерение анизотропии в баллонных экспериментах на 3-мм. 1.11. Спектр РИ. 1.12. Проект COBE (The COsmic Background Explorer). 1.13. Результаты COBE.
 2. **Становление стандартной космологической модели — Λ CDM (1310).**
 - 2.1. Суборбитальные эксперименты по измерению РИ. 2.2. Физические выводы из спектра мощности угловых флуктуаций РИ. 2.3. Wilkinson Microwave Anisotropy Probe. 2.4. PLANCK: The Third Generation CMB Project.
 3. **Заключительные замечания (1314).**
- Список литературы (1315).

1. Космический реликтовый фон

Открытие анизотропии температуры космического реликтового излучения (РИ)^{*} произвело переворот в наших представлениях о Вселенной, и его современные исследования продолжают революцию в космологии. Построение углового спектра мощности флуктуаций температуры РИ с плато, акустическими пиками и затухающим высокочастотным концом привело к утверждению стандартной космологической модели, в которой геометрия пространства плоская (соответствует критической плотности), темная энергия и темная материя доминируют и есть лишь немного обычного вещества. Согласно этой успешно подтверждаемой модели, наблюдаемая структура Вселенной сформировалась благодаря гравитационной неустойчивости, которая усилила квантовые

флуктуации, порожденные в очень раннюю инфляционную эпоху. Современные и будущие наблюдения проверят эту модель и определят ключевые космологические параметры с выдающейся точностью и значимостью.

1.1. Введение

Согласно теории горячей Вселенной^{**}, РИ является остаточным излучением, сформировавшимся на самых ранних высокотемпературных стадиях эволюции Вселенной во времена близкие к началу расширения современной Вселенной 13,7 млрд лет назад. Само РИ может быть использовано как мощное средство для измерения динамики и геометрии Вселенной. РИ было открыто Пензиасом и Вилсоном в Лаборатории им. Белла в 1964 г. [1].

Они обнаружили постоянное изотропное излучение с термодинамической температурой около 3,2 К. В это же время физики в Принстоне (Дике, Пиблз, Уилкинсон и Ролл) [2] разрабатывали эксперимент по измерению реликтового излучения, предсказываемого теорией горячей Вселенной. Случайное открытие РИ Пензиасом и Вилсоном открыло новую эру в космологии, положив начало ее превращению из мифа и спекуляций в полноценное научное направление. Согласно теории горячей Вселенной, в начале расширения наша Вселенная находилась в состоянии почти идеального термодинамического равновесия и имела чрезвычайно высокую температуру. С тех пор она продолжает расширяться и остывает. Когда температура во Вселенной упала до 3000 К, в РИ перестало хватать достаточно энергичных фотонов для поддержания атомов водорода и гелия в ионизованном состоянии. Таким образом, первичная плазма, состоящая из заряженных ядер, электронов и фотонов превратилась в нейтральные атомы и фоновое реликтовое излучение. Тогда фотоны РИ стали свободно распространяться в пространстве, уменьшая свою энергию из-за продолжающегося расширения Вселенной, а барионное вещество (в основном водород и атомы гелия) под действием гравитационного притяжения стало собираться в звезды и формировать галактики и более протяженные структуры. Для того чтобы такие структуры смогли образоваться, в распределении первичного вещества и энергии должны были иметься начальные возмущения. Первичные флуктуации плотности вещества, из которых впоследствии сформировались крупномасштабные структуры во Все-

* В англоязычной литературе используется термин Cosmic Microwave Background (CMB). (Примеч. перев.)

Дж.Ф. Смут III (G.F. Smoot III), Lawrence Berkeley National Laboratory, Space Sciences Laboratory, Department of Physics, University of California, Berkeley, CA 94720, USA

** В англоязычной литературе используется термин Big Bang, неудачно переводимый на русский язык как "Большой взрыв". (Примеч. перев.)

ленной, оставили отпечатки в виде анизотропии температуры РИ.

1.2. Основные законы реликтового излучения

Еще будучи студентом, я узнал об открытии РИ Пензиасом и Вилсоном [1] и его интерпретации Дике, Пиблзом, Уилкинсоном и Роллом [2], но только спустя два или три года я начал понимать значимость этого открытия и перспективы, которые открывались его дальнейшим изучением. Я был аспирантом первого года обучения в МИТ (Массачусетский технологический институт — *примеч. перев.*) и работал над неким экспериментом по физике высоких энергий, когда Джо Силк, тогда аспирант в соседнем Гарварде, опубликовал работу [8] под названием "Флуктуации первичного факера" с таким резюме: "Одна из громадных трудностей реалистических космологических моделей является неадекватность теории гравитации Эйнштейна для объяснения процесса образования галактик¹⁶. Один из способов обойти эту проблему состоит в постулировании начального спектра первичных флуктуаций¹⁷. Космологическая интерпретация природы недавно открытого 3°К микроволнового фона^{8,9} означает, что флуктуации не могут сконденсироваться в расширяющейся Вселенной вплоть до эпохи, когда вещество и излучение перестанут взаимодействовать⁴ при температуре T_D порядка 4000°К. Тогда можно задать вопрос: доживут ли первичные флуктуации, рожденные в первоначальном факере, до эпохи, когда станет возможным образование галактик?"¹⁸

Мои коллеги-физики восприняли эту работу как чисто теоретическое рассуждение, а не настоящее научное исследование. Мне же показалось, что это уже готовая тема для изучения независимо от того, что из этого выйдет. Очевидно, есть много галактик, которые сами излучают в широком диапазоне электромагнитного спектра. Поэтому решающим моментом было доказать фоновую природу излучения. Если 3-градусный фон имеет космическое происхождение, в нем должны содержаться отпечатки флуктуаций с очень ранних стадий, когда энергии были очень велики. Работа Силка заставила меня осознать необычайно важную роль реликтового излучения в ранней Вселенной. Уходя в прошлое на времена, когда Вселенная имела гораздо меньшие размеры, можно дойти до эпохи, когда излучение было столь же ярким, как от Солнца. В ту эпоху Вселенная была в тысячу раз меньше, чем сейчас. Это, конечно, впечатляет, но легко и вполне резонно сделать экстраполяцию еще в тысячу раз, и тогда излучение будет в тысячу раз ярче Солнца¹.

Было ясно также, что изучение реликтового излучения, как следовало из пионерских расчетов Гамова и др. [3], позволяет заглянуть в прошлое до момента, когда Вселенная была в миллиард раз меньше. Это эпоха первичного нуклеосинтеза, когда образовывались первые ядра, и расчеты Гамова и др. правильно предсказали отношение содержания водорода и гелия и обилие нескольких легчайших ядер. В ту эпоху температура излучения была в миллион (а яркость в 10^{24}) раз больше, чем у Солнца. Всякий объект, оказавшийся в окружении такого излучения, почти мгновенно бы испарился и

превратился в однородную плазму. В те ранние времена атомы были разорваны на электроны и ядра, и даже ядра были раздроблены на элементарные составляющие. Очень ранняя Вселенная должна была существовать в очень простом состоянии, в котором реликтовое излучение полностью доминировало и разрывало на элементарные составляющие всякий объект, делая Вселенную крайне однородной.

В том же 1967 г. Денис Шиамма опубликовал статью [11], в которой указывалось, что если только что открытый 3-градусный фон был реликтовым излучением ранней Вселенной, то с его помощью можно было бы проверить принцип Маха и измерить вращение Вселенной по эффектам, которые вращение оказывает на это излучение. Можно было бы опровергнуть модель вращающейся Вселенной Геделя и вытекающую из нее возможность путешествия во времени, подтвердить наблюдательно принцип Маха и оградить нас от возможности нашего существования туристов во времени. Таким образом, космологическая природа РИ позволяла проверять фундаментальную физику и ставила перед наблюдателями захватывающие дух задачи.

Вскоре (послана в печать в октябре 1967 г., опубликована в апреле 1968 г.) Стивен У. Хоукинг и Джордж Ф.Р. Эллис опубликовали работу "Космическое реликтовое излучение и существование сингулярностей в нашей Вселенной" [10], в которой на основании теорем о сингулярностях, выведенных ранее Пенроузом, Хоукингом и Герочем, было показано, что если РИ излучение имеет космологическую природу и высокую степени изотропии (например, 1/100), то сингулярность в ранней Вселенной была бы неизбежна. Грубо говоря, их аргументы были такими. Если РИ космологическое и в высокой степени однородное, скажем, в степени 1/ X , то можно экстраполировать Вселенную в прошлое до момента, когда она была в 1/ X раз меньше. Если X достаточно велико, то плотность энергии РИ (микроволновое излучение при этом становится гораздо более интенсивным и горячим) может быть достаточным для того, чтобы сделать Вселенную замкнутой и экстраполировать ее в прошлое вплоть до сингулярности. Единственные предположения, на которых основывались эти рассуждения, таковы: 1) РИ имеет космологическую природу, 2) оно однородно с точностью до 1/10000 ($X = 100$ в их оригинальных оптимистических оценках и 10000 на современном уровне знаний), 3) ОТО или другая геометрическая теория гравитации является верной и 4) соблюдается условие энергодоминантности (не существует субстанции с отрицательной плотностью энергии или большими отрицательными давлениями). Хоукинг и Эллис привели весьма убедительные аргументы против нарушения условия энергодоминантности. Такие наблюдения стали бы, конечно, смертельными для многочисленных популярных теорий осциллирующей Вселенной и других попыток создать космологическую модель без первичной сингулярности. Этот пример еще раз показывает, какие серьезные последствия для теории могло иметь изучение РИ, если оно действительно имело космологическую природу.

Изучая РИ, нужно было вести исследования по двум направлениям: 1) быть настроенным скептически и тщательно проверять, не может ли оно быть не космологическим и 2) предполагая космологическую природу РИ и считая, что оно имеет ожидаемые свойства, искать малые отклонения от изотропии и тем самым получать информацию о ранней Вселенной, заложенную в свойствах РИ. На первых порах исследователи вынуждены были делать много предположений о РИ, однако по мере получения новых и более точных наблюдательных данных эти предположения проверялись и уточнялись. История наблюдений и теоретического изучения РИ прекрасно иллюстрирует такой подход.

Открытие Пензиаса и Вилсона было случайным. Они наткнулись на него без целенаправленного поиска и вообще поиска чего-либо нового. В ретроспективе это открытие, хотя и случайное, произошло отнюдь не в вакууме. Идея о суще-

¹ Если бы свет тысячи Солнц
Вспыхнул на небе,
Это было бы
как величие Всемогущего.
Я становлюсь Смертью,
Разрушителем миров

— так процитировал отрывок из Бхагаватгиты Роберт Опенгеймер после испытания первой атомной бомбы 16 июля 1945 г. После первого перевода Гиты на английский в 1785 г. большинство экспертов переводило этот отрывок со словом не "Смерть", а "Время". Огненный шар в первом атомном взрыве имел температуру примерно в тысячу раз более высокую, чем у Солнца.

ствовании реликтового излучения восходит к работам Гамова [3], Дорошкевича и Новикова [4], а также Дике и Пиблза [5]. В прошлом также существовал ряд наблюдательных указаний о наличии РИ, например наблюдения МакКеллара в 1941 г. аномальной температуры молекул CN в холодных облаках, после которых еще ряд наблюдателей видели нечто необычное. Однако Пензиас и Вилсон однозначно зарегистрировали сигнал, проверили потенциальные источники шумов, провели соответствующие калибровки, так что их результаты оказались весьма надежными и стали общепризнанными.

Эти огромной важности наблюдения были немедленно интерпретированы. Многие теоретики принялись за разработку космологических последствий, вытекавших из изучения свойств РИ, и сообщали об этом возможным наблюдателям. Наблюдатели, а зачастую и те, кто их финансирует, которые должны были приложить значительные усилия, потратить время и средства для организации и проведения таких наблюдений, хотели быть уверенными, что их результат докажет нечто весьма ценное.

Понимая, что при наблюдениях РИ на самом деле измеряется его электрическое поле $\mathbf{E}(v, \theta, \phi, t)$ (или магнитное поле \mathbf{B}), я сразу же нарисовал таблицу, наподобие учебного пособия, в которой записал различные свойства РИ, которые можно было бы узнать из измерений напряженности электрического поля здесь и сейчас. Моя идея состояла в систематической проверке всех этих свойств для получения однозначного ответа на вопрос, является ли космический микроволновый фон реликтовым излучением ранней Вселенной, и если да, то что он может сказать о ранней Вселенной. Во-первых, это частота ν излучения. Если бы 3-градусное излучение было действительно реликтом горячей ранней Вселенной, находившейся в термодинамическом равновесии, то его спектр был бы знаменитым спектром абсолютно черного тела, аккуратное описание которого было дано Максом Планком в 1900 г. и положило начало квантовой теории:

$$\bar{n} = \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}, \quad B(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^2} \frac{d\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1}, \quad (1)$$

$$B(\lambda) = \frac{8\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{\exp(hc/\lambda kT) - 1},$$

где \bar{n} — среднее число заполнения фотонами одного квантового состояния, а $B(\nu)$ (и $B(\lambda)$) — яркость в единицах энергии на единицу площади за секунду в единичной полосе частот (или длин волн). Этот особый спектр описывается только одним параметром — температурой $T_{\text{СВР}}$. Доказательство того, что спектр РИ действительно имеет такую форму, потребовало многолетних усилий, и попутно было получено множество неверных результатов. Потребовалось время и на создание теории возможных слабых искажений формы спектра и их значимости, а также осознание необходимости наблюдательного поиска таких искажений.

Распределение приходящего излучения по небу можно описать некоторой функцией от углов θ и ϕ . В простейшей возможной модели горячей Вселенной РИ изотропно, т.е. не зависит от углов θ и ϕ . В первом приближении Пензиас и Вилсон показали, что 3-градусный фон был изотропен. Однако как было показано Джо Силком [8], Саксом Вольфом [7] и

другими, в РИ должны были иметься остаточные возмущения плотности, из которых впоследствии образовались галактики и скопления галактик, и эти возмущения должны были привести к угловым флуктуациям температуры РИ на небе. В то время ожидалось, что возмущения будут достаточно велики (чуть меньше 10 % предела, найденного Пензиасом и Вилсоном), однако тщательный анализ понизил амплитуду флуктуаций до уровня 0,1 % ($\Delta T/T \sim 10^{-3}$). Впоследствии теоретические предсказания еще более существенно понизили эту оценку.

Плоскость, в которой колеблется вектор электрического поля теплового РИ \mathbf{E} , должна была быть абсолютно случайной, поскольку РИ возникло в условиях полного термодинамического равновесия при больших непрозрачностях для фотонов. Однако в 1968 г. Мартин Рис [13] заметил, что малые температурные флуктуации и томсоновское рассеяние фотонов на поверхности последнего рассеяния должны приводить к слабой линейной поляризации РИ.

Зависимость вектора электрического поля $\mathbf{E}(t)$ от времени t проявляется двояко. Во-первых, тепловое излучение обладает не только определенным спектральным распределением, но особым спектром статистических флуктуаций в виде

$$\langle n^2 - \bar{n}^2 \rangle = \bar{n}^2 + \bar{n}, \quad (2)$$

где первое слагаемое называется волновым шумом, а второе — дробовым шумом индивидуальных фотонов. На низких частотах $h\nu \ll kT$ (рэлей-джинсовская область) доминирует волновой шум и среднеквадратичные флуктуации есть просто $\bar{n} = 1/(\exp(h\nu/kT) - 1) \simeq kT/h\nu$. Флуктуации пропорциональны температуре T . В высокочастотной области $h\nu \gg kT$ (виновский хвост) доминирует дробовой шум. Моя группа проверяла эти особенности на низких частотах в 1970-х гг., используя корреляционные радиометры. В ранних баллонных экспериментах косвенно проверялась высокочастотная область, и предположение о таком характере флуктуаций сохранялось и при анализе результатов современных экспериментов, особенно вблизи частоты максимума интенсивности РИ, где оба эффекта одинаково важны.

В корреляционных свойствах фотонов есть и другой эффект второго порядка, который впервые наблюдался в интерферометре Хэнбери–Брауна и Твисса; он, однако, не столь существен при анализе данных наблюдений РИ.

Вторая зависимость от времени состоит в том, что температура излучения в прошлом должна возрастать обратно пропорционально размеру Вселенной: $a(\text{тогда})T_{\text{тогда}} = a(\text{сейчас})T_{\text{сейчас}}$, или $T_{\text{тогда}} = (1+z)T_{\text{сейчас}}$, где $1+z = a(\text{сейчас})/a(\text{тогда})$, и a — масштабный фактор Вселенной в интересующую эпоху. Этот закон попросту отражает растяжение длин волн с изменяющимся масштабом Вселенной в комбинации с функцией Планка для равновесного излучения. Нескольким групп экспериментаторов проверяли эту зависимость, однако с ограниченной точностью. Есть много указаний на то, что РИ — не локальное явление потому, что в противном случае частицы в холодных плотных молекулярных облаках нашей и близких галактик дополнительно возбуждались бы на частотах РИ. Однако, как было показано нами и другими исследователями, такие наблюдения сложно провести в очень далеких галактиках.

Таблица 1. Температура космического реликтового излучения, измеренная для выборочных значений красных смещений z . Значения температуры РИ получены из наблюдений переходов тонкой структуры C I и C II

z	T , К	Молекула	Квazar	Литература
1,776	$< 1,6 @ 2\sigma$	C I	QSO 1331+170	Meyer et al. <i>Astrophys. J.</i> 308 L37 (1986)
1,776	$7,4 \pm 0,8$	C I	QSO 1331+170	Songaila et al. <i>Nature</i> 371 43 (1994b)
1,9731	$7,9 \pm 1,0$	C I	QSO 0013–004	Ge et al. <i>Astrophys. J.</i> 472 (1997); astro-ph/9607145
2,309	$< 45 \text{ K} @ 2\sigma$	C II	PHL 957	Bahcall et al. <i>Astrophys. J.</i> 182 L95 (1973)
2,909	$< 13,5 \text{ K} @ 2\sigma$	C II	QSO 0636+680	Songaila et al. <i>Nature</i> 368 599 (1994)
4,3829	$< 19,6 \text{ K} @ 3\sigma$	C II	QSO 1202–07	Lu, Sargent, Womble, Barlow, Preprint (1995)

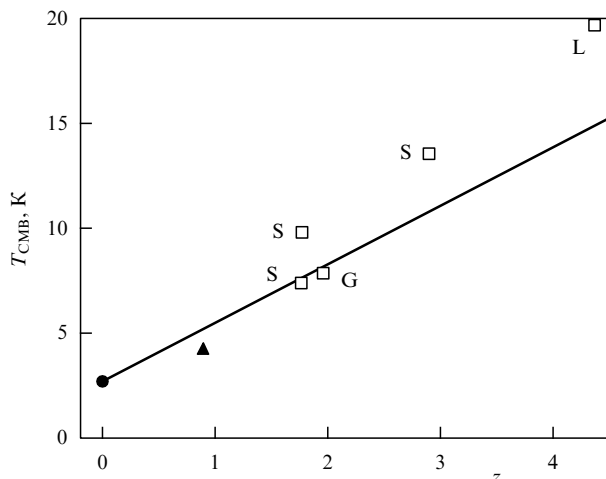


Рис. 1. Сводка измерений температуры РИ в зависимости от красного смещения. Черный кружок — результат измерения COBE (Mather et al. 1994). Квадраты и верхние пределы получены по линиям C I или C II в работе Songaila et al. (1994ab,S), Lu et al. (1996,L) и Ge et al. (1997,G). Черный треугольник — данные Combes et al. Прямая линия показывает ожидаемую зависимость $(1+z)$. Рисунок из работы Combes et al. 1999.

В реальной Вселенной с галактиками и скоплениями галактик можно привести еще одно доказательство того, что РИ заполняет Вселенную и может служить еще одним космологическим тестом. В 1970 г., и более явно в 1972 г., Р.А. Сюняев и Я.Б. Зельдович [14] предсказали, что горячая ионизованная среда в скоплениях галактик имеет достаточное количество свободных электронов для того, чтобы рассеять малую часть фотонов РИ, проходящих через скопления. В среднем, поскольку электроны горячее фотонов РИ, при рассеянии фотоны преимущественно будут приобретать энергию. При этом число фотонов на низких энергиях будет уменьшаться, а на высоких — увеличиваться относительно среднего уровня. Это означает, что скопления галактик будут немного затенять РИ на низких частотах и создавать поярчение на высоких, поскольку фотоны РИ идут с самых далеких возможных расстояний. Было также ясно, что этот спектральный эффект не должен зависеть от красного смещения и может быть использован для наблюдений скоплений галактик во всей наблюдаемой Вселенной. Для поиска эффекта СЗ (эффекта Сюняева–Зельдовича) мы совместно с Ричем Маллером использовали радиотелескоп в Голдстоуне (ключевое звено в Глубокой Космической Сети НАСА), оснащенный новым мазерным приемником, для наблюдения скопления галактик в Волосах Вероники с рекордным на то время угловым разрешением на низких частотах. К сожалению, этих наблюдений оказалось недостаточно для обнаружения эффекта. Однако Марк Биркиншоу [15] и другие исследователи продолжали такие наблюдения на протяжении последующих двух десятилетий, постоянно повышая уровень чувствительности. Значительный прорыв был достигнут на обсерватории Хат Крик Карлстромом, Хольцапфелем и др. [80], которые провели наблюдения скоплений галактик с высоким отношением сигнала к шуму и обнаружили ожидаемый эффект, к тому же скоррелированный с рентгеновскими наблюдениями. В результате не осталось никаких сомнений в том, что РИ заполняет Вселенную и рождается за пределами самых далеких наблюдаемых скоплений галактик. Начиная с 2007 г. мы ожидаем большого продвижения в изучении эффекта СЗ при наблюдениях с новыми инструментами, такими как APEX-SZ и телескоп на Южном полюсе (SPT) [81].

1.3. Переход к космологии

Хотя я был весьма заинтересован в только что появившейся науке космологии в начале 1970-х годов, я решил сосредоточиться на завершении своего обучения в аспирантуре и получении степени доктора философии. Тем не менее я продолжал следить за развитием космологии. Одним из определяющих факторов стало то, что в то время профессор Стивен Вайнберг был в MIT и читал курс лекций по космологии, которые впоследствии превратились в его очень известную монографию *Гравитация и космология*. Мне не удалось присутствовать на всех его лекциях, но я все же записал часть их, а позже прочел и всю книгу. Неподдельный интерес Вайнберга и его серьезное отношение к космологии придали весомость этой науке среди моих коллег. Это послужило основанием для моего увлечения этой наукой в то время, пока я проводил большую часть своего аспирантского времени, изучая физику частиц.

В своей диссертации я проверял распады частиц, идущие по каналу слабого взаимодействия, в которых изменение заряда каона при распаде равнялось изменению его странности. Для этой цели четыре аспиранта — я, Оррин Факлер, Джим Мартин и Лоран Сомпариак — под руководством профессора Дэвида Фриша (отделение физики MIT) направляли специальный пучок K^+ на компактную платиновую мишень, установленную перед магнитным спектрометром для производства K^0 и наблюдения их распадов в магнитном поле внутри детектора частиц. Это был высокотехнологичный и точный эксперимент. Мы установили [17], что правило $\Delta S = \Delta Q$ (изменение странности равно изменению заряда распадающейся частицы) выполняется в распадах по каналу слабых взаимодействий. Теперь это правило считается автоматическим следствием кварковой модели. Этот пример иллюстрирует прогресс в науке и то, как молодые студенты учатся вести научную работу. В нашем случае профессор Фриш дал нам большое ответственное задание. Он заставлял нас работать независимо большую часть времени, но всегда вокруг были коллеги, у которых мы могли спросить совета и поучиться. Теперь я был готов двигаться дальше и начал свою жизнь как новоиспеченный доктор философии и стал искать себе работу. Я разослал свои анкету и резюме в разные институты и лаборатории, большинство из которых было связано с физикой частиц, как наиболее подходящие моему опыту и связям моего руководителя. Одно из собеседований было в группе профессора Луиса Альвареса из Беркли, а именно в отделе, где пытались использовать космические лучи для получения новых результатов в физике частиц. В ходе этих исследований произошел неудачный запуск баллона, научная программа замедлилась, и сотрудники искали новые возможности применения своей техники. Одна из идей это использовать сверхпроводящий магнитный спектрометр для исследования космических лучей. Альварес, как и все физики-ядерщики того времени, прекрасно знал, что при каждом взаимодействии частиц высоких энергий рождается равное количество вещества и антивещества. В Беркли, в частности в Национальной лаборатории им. Лоуренса были открыты антипротон и антинейтрон, что способствовало установлению представлений о том, что у каждой частицы в природе есть своя античастица. В то время физики-ядерщики, получившие классическое образование, полагали, что в модели горячей Вселенной должно быть равное количество вещества и антивещества. Тогда возникал вопрос: где же антивещество? Было хорошо известно, что его нет ни на Земле, ни, вероятно, и в Солнечной системе, так как в противном случае наблюдалась бы аннигиляция вещества и антивещества. Ханс Альвен, который был знаком с Альваресом, придумал космологическую модель, в которой существовал барьер для аннигиляции, удерживающий большинство вещества и антивещества на умеренно удаленных друг от друга расстояниях. Альвен

вдохновил Альвареса и его группу на поиски каких-нибудь протечек между такими областями в виде наиболее вероятных частиц, приходящих с больших расстояний — космических лучей. Магнитный спектрометр космических лучей идеально подходил для таких поисков антивещества. Умение и навыки, которыми я овладел в аспирантуре, прекрасно подходили для этой задачи, и Луис Альварес со своими коллегами, в частности, с Лари Смитом, Майком Воулингом и Эндрю Баффингтоном взяли меня в свою группу и привлекли к совместной работе над этим проектом.

Совместно с несколькими очень квалифицированными техниками и инженерами мы спроектировали, построили и запустили несколько раз в стратосферу сверхпроводящий магнитный спектрометр для наблюдения космических лучей. В процессе этих исследований мы получали все более низкие пределы на содержание антивещества — от менее одной тысячной до менее одной десятитысячной доли по отношению к обычному веществу. Первый предел соответствовал тому, что антивещества нет в окрестностях звезд, а второй — во всей нашей Галактике и, возможно, за ее пределами. Для меня вопрос "где антивещество?" сменился на вопрос "почему вещество преобладает над антивеществом в нашей Вселенной?" Этот вопрос и до сих пор остается одним из ключевых в современной космологии. Следует иметь в виду, что имеются очень веские причины полагать, что ранняя Вселенная содержала равное количество вещества и антивещества. В ту эпоху фотоны реликтового излучения обладали достаточной энергией для рождения пар частица–античастица, и в состоянии простого теплового равновесия в очень ранней Вселенной должно было быть равное количество фотонов, частиц и соответствующих античастиц. В наше время на каждый протон и нейтрон (и таким образом на каждый электрон) приходится более миллиарда фотонов РИ. В очень ранней Вселенной должно было быть примерно равное число (на одну степень свободы) любых частиц и античастиц, и все эти частицы должны были быть релятивистскими наподобие фотонов и нейтрино и находиться в полном тепловом равновесии. По мере того, как Вселенная расширялась и остывала, тяжелые частицы и античастицы в конце концов аннигилировали в более легкие, включая фотоны РИ, которые к тому моменту были уже слишком холодные, чтобы привести к обратным реакциям. Если не предполагать наличия какого-либо дисбаланса в этом процессе, то вещества в настоящее время было бы гораздо меньше и в то же время сохранилось бы одинаковое количество вещества и антивещества в областях, разделенных большим расстоянием.

В 1964 г. А.Д. Сахаров (реабилитированный властями СССР в 1986 г.) сформулировал необходимые условия существования барионной асимметрии (избытка вещества над антивеществом) во Вселенной: 1) нарушение закона сохранения барионного числа, 2) нарушение СР-четности и 3) неравновесность. С тех пор теоретики пытаются найти правильную теорию, а экспериментаторы — свидетельства выполнения этих условий.

Наши эксперименты по поиску антивещества подходили к концу, и я стал задумываться над тем, что делать дальше. Стоит ли и дальше повышать точность наших экспериментов или следует заняться чем-то новым? Альварес рекомендовал нам все время следить за новыми научными достижениями. Его советы и мой опыт привели меня к следующему заключению: когда в исследованиях возникает естественная пауза, стоит попробовать себя в новых направлениях, которые открываются из-за 1) новых научных знаний и идей, 2) новых инструментов и 3) новых технических возможностей, инфраструктуры и т.д. Для выбора нового пути важно было понять, как, объединив эти аспекты, можно достичь существенного прогресса в исследованиях. Все это требовало серьезных раздумий.

В 1973 г. я разыскал статью Денниса Шиамы, в которой он рассматривал возможность проверки принципа Маха и измерения вращения Вселенной по эффектам вращения на РИ. В статье не уточнялся специфический вид анизотропии, которая должна при этом возникать. В 1969 г. вышла статья Стивена Хоукинга [16], в которой рассматривалась специфическая анизотропия для моделей Бианки разных типов, но она была слишком сложна для неэксперта. К сожалению, было неясно, как быстро должна была вращаться Вселенная — ее вращение рассматривалось на уровне аналогии с вращением известных объектов, начиная от электронов и кончая галактиками. Этого было недостаточно, чтобы убедить моих коллег и других экспериментаторов в целесообразности подобных измерений.

В 1971 г. Джим Пиблз опубликовал свою книгу *Физическая космология*, которая была гораздо более астрофизической и ориентированной на наблюдателей, чем *Гравитация и космология* Стивена Вайнберга. В *Физической космологии* Пиблза имелся раздел "Проявления первичного фэйрбола". В этом разделе Пиблз подробно обсуждал вопрос, каковы могут быть наблюдательные и теоретические следствия "возможно открытого первичного фэйрбола", т.е. космического микроволнового фона. Пиблз писал ясно и понятно для неспециалистов. Как одну из возможностей Пиблз обсуждал эксперимент, озаглавленный "Проверка увлечения эфира", в котором можно было использовать РИ (с нулевым полным импульсом в системе отсчета излучения) как естественную систему отсчета для измерения относительного движения наблюдателя, чтобы описать расширение Вселенной. Угловые вариации температуры относительно направления движения наблюдателя под углом θ вследствие эффекта Доплера равны

$$T(\theta) = \frac{T_0 \gamma}{1 - \beta \hat{n}} \simeq T_0 (1 + \beta \cos \theta), \quad (3)$$

где $\beta = v/c$ и \hat{n} характеризует направление наблюдения. Эта формула и величина ожидаемого сигнала могли быть легко проверены. Из астрономических наблюдений следовало, что солнечная система движется в пространстве из-за вращения нашей Галактики с орбитальной скоростью около 200 км с^{-1} или $v/c = \beta = 0,7 \times 10^{-3}$. Это дает ожидаемый сигнал на уровне около 2 мК ($0,002 \text{ К}$). Астрономам также было известно, что наша Галактика и туманность Андромеды вращаются вокруг общего центра масс, из-за чего возникала дополнительная компонента скорости наблюдателя относительно РИ. Но очень мало кто даже задумывался об этом в то время. На эту тему было написано всего несколько работ.

Первая работа была статья Денниса Шиамы 1967 г., озаглавленная "Пекулярная скорость Солнца относительно космического микроволнового фона". В ней предсказывалось: "Пекулярная скорость Солнца относительно удаленных галактик грубо оценивается по красному смещению близких галактик $v \sim 400 \text{ км с}^{-1}$ в направлении $l^{\text{II}} \sim 335^\circ$, $b^{\text{II}} \sim 7^\circ$. Эта оценка может быть проверена в будущих наблюдениях углового распределения космического микроволнового фона в случае его космологической природы. Если проверка окажется успешной, то это будет означать, что "локальная" инерциальная система отсчета не вращается относительно далекого вещества с точностью порядка 10^3 угловой секунды в столетие, что является увеличением существующей точности в 5000 раз". Следом за этой работой вышла статья Дж.М. Стюарда и Д.У. Шиамы [19], озаглавленная "Пекулярная скорость Солнца и ее отношение к космическому микроволновому фону". В ее резюме было написано: "Если микроволновое чернотельное излучение является космологическим и изотропным, то оно может быть изотропным только для наблюдателя, покоящегося относительно далекой материи, на которой произошло последнее рассеяние этого излучения. В работе оценивается скорость движения Солнца относительно далекой материи, на основании которой делается предсказание

ожидаемого уровня анизотропии микроволнового излучения. Это предсказание вскоре можно будет сравнить с экспериментальными результатами".

1.4. Почему бы сначала не поискать зародыши формирования галактик?

Почему бы сначала не поискать зародыши формирования галактик, которые в то время предсказывались на том же самом уровне? Оценки угловых размеров ожидаемого сигнала сильно разнились. Одним из самых больших (по угловому размеру) скоплений галактик было скопление в Волосах Вероники, занимающее примерно полградуса. Угловой размер большинства скоплений порядка угловых минут, а галактик — угловых секунд. С существовавшими в то время приемниками излучения наблюдения надо было проводить в длинноволновом диапазоне, что требовало использования очень больших радиотелескопов в течение длительного периода времени. Радиотелескопы не были приспособлены для таких наблюдений и были подвержены влиянию ряда систематических эффектов, включая значительный фоновый сигнал от Земли. Легко можно было оценить ожидаемый угловой размер флуктуаций в доминирующей тогда модели Вселенной, состоящей из изолированных галактик с пуассоновским распределением в пространстве. Угловой размер причинного горизонта оценивался в 2 градуса, а размер первичных зародышей галактик примерно в 100 раз меньше этой величины (около одной угловой минуты). В этой устаревшей модели ожидалось, что флуктуации будут представлять из себя случайно распределенные пятна размером порядка угловой минуты и амплитуды порядка милкельвина, в то время, как эффект Доплера из-за увлечения эфира,

неоднородного хаббловского расширения или вращения Вселенной давали ожидаемые сигналы на большем уровне когерентно по всему небу. Наблюдение этих эффектов могло привести к открытию новых физических явлений.

1.5. Начало нового эксперимента по измерению увлечения эфира

Таким образом, появился проект поиска гарантированного сигнала с четко определенной угловой зависимостью и амплитудой. Его можно было предлагать на рассмотрение коллегам, подавать заявки на финансирование и т.д. Одна из проблем, которую надо было при этом преодолеть, состояла в сильном предубеждении квалифицированных специалистов, усвоивших уроки эксперимента Майкельсона и Морли и СТО об отсутствии предпочтительных систем отсчета. Предстояла просветительская работа, чтобы убедить их в том, что этот эксперимент не противоречит СТО и находит систему отсчета, в которой расширение Вселенной выглядит наиболее просто. Более современные попытки найти нарушение СТО рассматривают эту систему отсчета как некую специальную естественную систему, так что возмущения были не совсем бесосновательными. Нам пришлось изменить название эксперимента на "Новый эксперимент по обнаружению увлечения эфира", поскольку название "Эксперимент по обнаружению увлечения эфира" слишком уж напоминало эксперимент Майкельсона и Морли.

Имея это в виду, мои коллеги Рич Маллер и Терри Маст сильно заинтересовались этой тематикой и начали разработку эксперимента, который превзошел другие аналогичные проекты. В конечном счете, мы убедили достаточное количество коллег в том, что часть опытного технического персонала нашей группы могут быть задействованы для разработки этого эксперимента. Ключевыми техническими сотрудниками проекта стали Джон Эймон — программирование, Хэл Дафферти — механика, Джон Гибсон — электроника, Робби Смитс — система вращения, Джон Ямада — техническая сборка. Были найдены начальные источники финансирования и фирмы-поставщики, затем была подана заявка в НАСА и т.д. — эксперимент начал претворяться в жизнь. Ключевым шагом оказалось привлечение аспиранта Марка Горенштейна к работе над проектом. Я знал Марка еще студентом в MIT до его поступления в аспирантуру на отделение физики в Беркли и эта связь оказалось очень полезной, так же как и знакомства с Майком Воулигом и Энди Баффингтоном, которые тоже были в группе Фриша в MIT, когда я был студентом и аспирантом до их перехода в Беркли. Дружеские контакты и связи, а также доверительные отношения сильно пригодились.

Так мы создали ядро группы, перед которой стояла четко поставленная задача — создать инструмент с достаточной чувствительностью и точностью, чтобы измерить анизотропию РИ на уровне 2 мК (10^{-3}) в больших угловых масштабах. Мы начали работу и, имея в виду предыдущий неудачный опыт с научным запуском стратосферного баллона, изучали возможность установки дифференциального микроволнового радиометра (DMR) на самолете Y-2. Терри Маст покинул группу для работы над новым проектом 10-метрового телескопа. Мы были счастливы, что к нам присоединился Тони Тайсон, проводивший научный отпуск в Беркли из Лаборатории им. Белла, в которой он работал над созданием детектора гравитационных волн. Тони стал экспертом по низкошумящим детекторам и вибрационной изоляции, которые принадлежали к числу двух ключевых технологий, необходимых для нашего эксперимента и были важны при разработке DMR.

1.6. Контекст

Шел 1973 г., когда я начал работать над экспериментом по измерению РИ. Это уже была область, в которой активно работали наши коллеги на восточном побережье США благо-

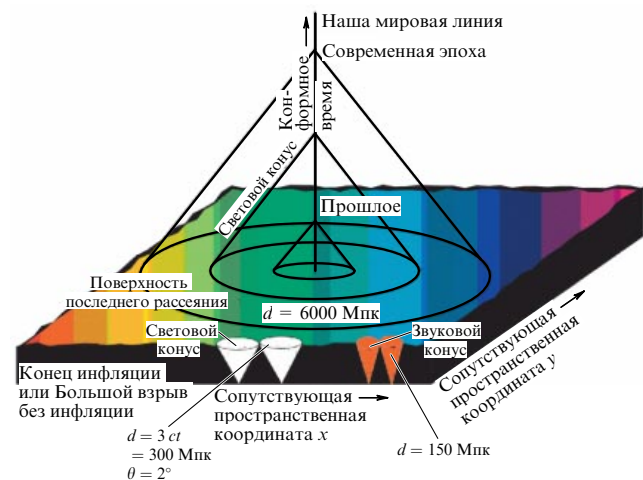


Рис. 2. Пространственно-временная диаграмма в единицах конформного времени (по вертикали) $\eta = \int c dt/a(t)$, где $a(t)$ — масштабный фактор Вселенной, и сопутствующих координат, которые пересчитываются в физические расстояния при умножении на фактор $a(t)$. В этих координатах свет распространяется под углом 45°. Линия в центре показывает нашу мировую линию во времени в пренебрежении пекулярным движением (в действительности очень малым). Начиная с эпохи инфляции или первичной сингулярности, Вселенная является оптически толстой до поверхности последнего рассеяния фотонов в эпоху рекомбинации. Длительность оптически непрозрачной эпохи показана преувеличенной относительно интервала времени, прошедшего с момента рекомбинации до сегодняшнего дня, чтобы показать причинный горизонт (расстояние, которое может пройти свет, $d = 3ct$ физических единиц) и звуковой горизонт (расстояние, которое может пройти звук в ранней Вселенной). Эти два горизонта имеют особое значение для физической структуры Вселенной.

даря деятельности Джима Пиблза и Боба Дикке, приведшей к пионерским работам Дэвида Уилкинсона сначала с П. Роллом в 1965 г., а затем с рядом аспирантов, начиная с Брюса Партриджа [12] в 1967 г. Из Принстона в MIT перешел Райнер Вайс, который работал там с Дирком Мюльнером. Обе эти группы начали с наблюдений спектра РИ и впоследствии занялись измерением анизотропии РИ. Я же предпочел начать с анизотропии и лишь позднее перешел к измерению спектра и других свойств РИ.

В 1970 г. Джо Силк перешел на работу в Беркли и начал кампанию по пропаганде теоретической космологии среди экспериментальных групп Западного берега по организации космологических наблюдений. Вскоре после этого профессор Пол Ричардс взял в аспирантуру Джона Мазера и затем Дейва Вуди. Ричардс планировал разработать болометры и интерферометр Майкельсона для спектральных измерений РИ, которые послужили прототипом для прибора COBE FIRAS. Значительно позднее приборы, построенные на основе этих болометров, стали ключевыми детекторами для измерения анизотропии РИ (см. Нобелевскую лекцию Джона Мазера, с которым я разделил эту Нобелевскую премию).

Совместно с Джоном Силком мы разработали программу по подготовке студентов для участия в этих экспериментах. Студенты, которые готовились для анализа и обработки наблюдений, должны были поработать со мной в течение семестра или целого года. Затем они помогали в разработке возможных наблюдательных программ или в проведении необходимых теоретических исследований. Такими студентами, впоследствии работавшими вместе со мной, были Майк Уилсон, Джон Негропонт и Эрик Гавайзер.

1.7. Зачем нам нужна была такая сильная команда и такие усилия?

Ожидаемый сигнал был на уровне одной тысячной от средней интенсивности РИ (~ 3 К), что в свою очередь составляло одну сотую от окружающей температуры ~ 300 К. Эквивалентный шум приемника радиосигнала был на том же уровне. Таким образом, ожидаемая анизотропия находилась на уровне одной стотысячной (10^{-5}) от уровня шума. Для получения значимых измерений чувствительность наших приемников должна была быть еще в десять раз лучше, т.е. на уровне одной миллионной (10^{-6}). Для достижения такой чувствительности требовались долгие наблюдения и хорошая стабильность приемной аппаратуры.

Какой техникой могли мы воспользоваться? Во-первых, можно было использовать методику Боба Дикке 1940-х годов, при которой приемник быстро переключался с одного источника на другой и измерял разницу принятых сигналов. Чем ближе по уровню были сравниваемые сигналы и чем быстрее происходило переключение, тем менее существенным была неизбежная инструментальная ошибка из-за внутреннего шума прибора $1/f$ и тепловых флуктуаций окружающей среды $1/f^2$, которые не позволяли измерять флуктуации РИ на уровне одной миллионной. Для измерения РИ с такой точностью нужен был опорный сигнал с температурой вблизи 3 К. С целью достижения такой точности спектральных измерений обычно использовалась опорная нагрузка, охлаждаемая жидким гелием. В нашем эксперименте мы использовали две идентичные антенны, направленные в различные участки неба и быстро переключались с одной антенны на другую. Мы назвали эту конфигурацию дифференциальным микроволновым радиометром (DMR).

Затем нужно было исключить, отбросить и усреднить сигналы и источники шума. Нам надо было наблюдать на такой частоте, где флуктуации РИ имели бы амплитуду больше, чем другие источники (или, по крайней мере, могли быть отличимы от них), в частности, от излучения нашей Галактики. Поэтому мы выбрали длину волны вблизи одного

сантиметра и отобрали области неба для наблюдений. Анизотропия РИ должна была доминировать везде, кроме областей вблизи галактической плоскости, а на длине волны 1 см (полоса K) было мало излучение земной атмосферы. Поэтому именно в этой области начинались первые измерения микроволнового фона. Затем стало ясно, что в полосе K присутствует линия излучения молекул воды, поэтому полоса приемника была модифицирована инженерами в полосу K_4 . Таким образом, все стандартные компоненты микроволновой приемной аппаратуры были оптимизированы именно для этой полосы частот.

Электронный шум приемника имеет фоновый сигнал на уровне

$$\delta T_{\text{rms}} = \frac{2T_{\text{system}}}{\sqrt{B\tau}} + \frac{\Delta G}{G} T_{\text{diff}} \sim \frac{27 \text{ мК}}{\sqrt{\tau/c}} + 100 \text{ мК} \frac{\Delta G}{G} \sim \frac{0,5 \text{ мК}}{\sqrt{\tau/c}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{system}} \sim 300$ К эффективная шумовая температура приемника в то время, B — полоса частот порядка 500 МГц и τ — время наблюдений, а ΔG — изменение мощности приемника во время наблюдений, определяемая переключением между приемниками с эффективной разностью температур T_{diff} . (Заметим, что эти два эффекта должны добавляться квадратично, поскольку они независимы.) Первое слагаемое в этой формуле возникает из-за дисперсии $\bar{n}^2 + \bar{n}$ наблюдаемого числа фотонов вследствие тепловых флуктуаций чернотельного излучения, а второе означает флуктуации коэффициента усиления приемника. При малой разнице температур T_{diff} (а тогда можно было достичь $|T_{\text{diff}}| < 0,1$ К) вряд ли можно было рассчитывать на значительное увеличение среднеквадратичного шума, поскольку вариации коэффициента усиления приемника были значительно меньше, чем 0,5 % для времени переключения при требуемой чувствительности порядка 0,3 мК. Для достижения такого уровня чувствительности нам надо было наблюдать каждую область неба порядка двух часов.

Таким образом, мы планировали избавиться от случайного шума во время двухчасовых сеансов наблюдений, но нам также нужно было исключить неслучайные сигналы. Главная проблема состояла в отбрасывании сигналов, приходящих от боковых лепестков антенны, которые возникают из-за дифракции волн. В то время минимальными боковыми лепестками (т.е. с уменьшенным внесосевым приемом сигнала) обладала "стандартная рупорная антенна", которая имела оптимальное усиление при простой пирамидальной конфигурации рупора. Рупор по сути дела представлял собой плавно расширяющийся волновод и имел в одной плоскости (E -плоскость, в которой колеблется вектор электрического поля) однородное распределение поля по апертуре до самого края. Распределение поля по апертуре в ортогональном направлении (H -плоскость) изменяется по синусоидальному закону с нулевой амплитудой на краях волновода (рупора) и максимумом посередине. Такая конфигурация поля является наименьшей и наилучшим образом поддерживаемой модой в волноводе, а все остальные компоненты антенны создаются для оптимальной работы именно с этой модой.

Поле в дальней зоне, эквивалентное функции отклика пучка, является просто фурье-преобразованием электрического поля на апертуре. Фурье-преобразование электрического поля, которое равно нулю вне рупора и однородно внутри рупора, представляет собой известную физикам функцию $\sin(x)/x$. При разумных размерах рупора диаграмма направленности достаточно широкая, но что более важно, боковые лепестки подавлены примерно в 10000 раз под углом 90° к главному лепестку. Поскольку фон неоднороден и в миллион раз больше, чем ожидаемый уровень анизотропного сигнала, надо было искать конфигурацию с лучшими свой-

ствами. Я решил, что мне нужно изучить теорию антенн, чтобы суметь подавить боковые лепестки до нужного уровня. Конфигурация H -плоскости с синусоидальным распределением поля по апертуре, в частности стремление поля к нулю на краях апертуры рупора, имела достаточно малые боковые лепестки, и это указывало путь к решению проблемы. Хотелось иметь распределение электрического поля плавно заходящее на краю апертуры. В идеале хотелось бы занулить на краях как поле, так и его производные, даже если бы это означало уменьшение прямого усиления антенны при данном диаметре апертуры из-за недоосвещенности по сравнению с однородным распределением поля по апертуре (однородное распределение поля используется в стандартной конструкции рупора с оптимальным усилением). Тот факт, что для H -плоскости поле достаточно мало, означал, что можно было достичь необходимого подавления боковых лепестков при уменьшении электрического поля до практически нулевого значения.

На проблему можно было взглянуть с другой стороны. Энергия в волне запасена в электрическом поле и учитывая, что распространение волны можно обратить во времени, задача состояла в том, как взять поле, тесно привязанное к волноводу, послать его наружу, отделить от антенны и превратить в волну, свободно распространяющуюся в пространстве. Если электрическое поле не равно нулю на металлическом конце рожка антенны, оно будет порождать в проводнике электрические токи, которые обратят поле внутри металлического проводника в нуль. Из-за этих токов поле будет распространяться наружу в разных направлениях. Поэтому вблизи конца раструба антенны нужно отделить электрическое поле от антенны и обратить его в нуль на конце ее проводящих стенок. Существуют два способа это сделать, которые, в конечном счете, и были использованы в двух инструментах для измерения РИ на спутнике COBE. Первый состоял в том, чтобы раскрыть рупор антенны наподобие трубы или тромбона. Эти музыкальные инструменты имеют сходную проблему излучения звуковых волн, которые изначально тесно связаны с мундштуком трубы, но должны свободно распространяться наружу от раструба. Поэтому на рисунках, которые я показывал в Принстоне (группа Уилкинсона), рассказывая об эксперименте по измерению анизотропии РИ, были изображены эти музыкальные инструменты с колоколообразным раструбом, — но только для приема ЭМ волн, а не для их излучения. Электромагнитные волны стремятся распространиться вдоль прямой линии и эффективно сходят с кривой. Этот подход обладает преимуществом для работы в широком диапазоне (полосе частот), однако недостатком его является значительное расширение размера апертуры, — чем сильнее нужно подавить боковые лепестки, тем шире должен быть раструб. Этот подход применялся в инструменте COBE FIRAS, в котором использовалась одна рупорная антенна, работающая в широком диапазоне частот.

Второй подход, который и был в конечном счете выбран для нашего эксперимента, состоял в том, чтобы отделить электрическое поле от антенны еще глубоко внутри и использовать ее оставшуюся часть для формирования диаграммы направленности, а затем на конце апертуры сделать четвертьволновую дифракционную решетку. Четвертьволновая решетка вызовет токи точно в противофазе с электрическим полем ($1/4$ длины вниз и $1/4$ длины назад означает $1/2$ длины волны или 180° разницы по фазе). Это зануляет поверхностные токи на краю апертуры рупора антенны и не позволяет им формировать боковые лепестки. Проблема на горловине рупора состоит в том, чтобы возбудить вторую моду, поле которой в центре пучка сфазировано со стандартной модой, а на краю E -плоскости ее поле точно скомпенсирует электрическое поле стандартной первой моды, создавая конфигурацию

поля, которая очень похожа на H -плоскость и имеет слабо выраженные боковые лепестки. Я изучил литературу, проконсультировался с инженерами из TRG Alpha фирмы (Бостон, Массачусетс) и модифицировал программное обеспечение JPL HORN из Лаборатории реактивного движения (JPL) для расчета такой антенны. Вскоре стало ясно, что задача может быть успешно решена с конфигурацией антенны, называемой "гофрированный рупор", особенно для рупора конической формы. Первая канавка должна была иметь половину длины волны, чтобы избежать слишком большого отражения. Затем можно было или перейти к четвертьволновым канавкам (в конусе), которые было легче изготовить, или, как мы и делали в дальнейшем, плавно уменьшать глубину канавок от полу-волны до четверти волны в нескольких (5–10) канавках, а примерно оставшуюся треть канавок оставить с глубиной в четверть волны. Эта конфигурация имела очень слабые боковые лепестки, была очень компактной и имела малые потери в антенне, поскольку электрическое поле не вызывало значительных электрических токов на стенках антенны. Недостатком ее была относительная дороговизна в исполнении, поскольку требовался хороший механик для того, чтобы вырезать точно все эти канавки на достаточно больших алюминиевых блоках. Эта разработка была достаточно успешной и в конце концов нам даже потребовалось создать специальную технику для измерения столь слабых боковых лепестков (что было необходимо для COBE DMR) и мы использовали чувствительную антенную решетку в JPL, расположенную на краю плоского холма [25]. Эта калибровка была повторена для антенн COBE DMR в GSFC [26] на специально разработанной для этого решетке. Это было важнейшее звено всего эксперимента, поскольку для точного измерения анизотропии РИ требуется отсекающий паразитный боковой сигнал с точностью лучше одной миллиардной доли, а антенны DMR должны были быть достаточно компактными, чтобы поместиться в небольшом пространстве спутника.

Для такой конфигурации надо было создать две идентичные рупорные антенны, выходной сигнал с которых быстро и попеременно то с одной, то с другой подавался на приемник. Поскольку антенны были идентичны и сигнал к ним проходил один и тот же путь в атмосфере, то этих измерений должно было быть достаточно для достижения нужной точности. Однако создать две совершенно одинаковые антенны невозможно, поэтому надо было вращать приемник и попеременно менять направление антенн на небе для того, чтобы можно было отделить любой внутренний инструментальный сигнал от сигнала, идущего с неба. Это была общая проблема, которую многие годы мои студенты называли правилом переключения Смута — как только в эксперимент вводится переключение (или иная техника) для исключения внутренних шумов, появляются два новых эффекта, которые нужно учитывать: 1) сделать так, чтобы сам прибор производил хоть какой-то сигнал, 2) сделать так, чтобы в процессе измерения (например, при вращении инструмента) возникал сигнал. Эти эффекты всегда присутствуют на каком-то уровне, поэтому схему эксперимента следует сделать так, чтобы они были малы или компенсировали друг друга. Например, переключение входа приемника с одной антенны на другую всегда приводит к появлению дополнительного сигнала в виде острого пика, ступеньки или иной формы, который следует исключать при поиске истинного сигнала. К тому же переключение от одной антенны к другой происходит через разные промежутки времени. Этот эффект следует измерить и учесть как можно лучше, а также обеспечить вращение аппарата таким образом, чтобы сигнал менялся местами (а значит, имел противоположный знак) в зависимости от того, на какую антенну он поступает. Далее следует проверить, что вращение не меняет состояние или функционирование DMR,

например, из-за вращения Земли или по другой причине. Вообще при измерении таких слабых сигналов надо все тысячу раз перепроверить и провести многократное тщательное тестирование аппаратуры.

1.8. DMR и наблюдения с У-2

Наконец, мы создали необходимые инструменты и разработали методику наблюдений РИ и регистрации его дипольной анизотропии вследствие движения детектора относительно поверхности последнего рассеяния, которая определяет систему отсчета с нулевым импульсом относительно РИ. В этом эксперименте использовался прибор DMR, детально описанный в работе [22]. Наиболее подходящим носителем для проведения такого эксперимента в то время был самолет-разведчик У-2, обладавший высокой степенью стабилизации и предназначенный для полетов от Турции до Скандинавии, а также над горячими точками планеты, которые нужно было фотографировать с большой высоты с высоким разрешением (отсюда и высокая степень стабилизации платформы). Самолет У-2 был также приспособлен для проведения исследований окружающей среды и поиска полезных ископаемых по программе НАСА, руководимой из центра Эймса в Моффет Филд (Калифорния). После серии полетов, обработки данных и их анализа [20] мы обнаружили дипольную анизотропию РИ и показали, что она дает доминирующий вклад в сигнал [21]. В дальнейшем мы добавили к этим наблюдениям результаты полетов по аналогичной программе с территории Перу, чтобы охватить также и Южное полушарие [23]. В результате наблюдений с У-2 выяснилось, что температура РИ плавно менялась от $-3,5$ мК в направлении созвездия Володая до $+3,5$ мК в направлении созвездия Льва (рис. 3). К нашему удивлению это означало, что солнечная система двигалась со скоростью 350 км s^{-1} в направлении, противоположном ожидаемому направлению вращения вокруг галактического центра. Мы вынуждены были заключить, что Млечный Путь двигался со скоростью около 600 км s^{-1} в направлении созвездия Льва. Это движение было неожиданным в модели, в которой галактики двигались по невозмущенным мировым линиям, задаваемым простым хаббловским расширением Вселенной и которая являлась идеализированным представлением того времени. Этот результат также означал, что галактика в Андромеде вместе с многочисленными менее массивными членами местной группы галактик двигались в пространстве примерно с теми же скоростями. Такое групповое движение означало, что где-то на значительном расстоянии должен существовать притягивающий центр (впоследствии получивший название "Великий Аттрактор") из огромного скопления материи, так что его притяжение достаточно однородно и не разрывает группу галактик гравитационно слабо связанных между собой.

Хотя обнаруженная дипольная анизотропия имела не собственно космологическое происхождение, из ее измерения можно было сделать интересные выводы о крупномасштабной структуре Вселенной, а значит, об условиях, которые должны были существовать в самом начале расширения. Раз нам удалось убедить астрономов в справедливости этого предположения и в том, что Великий Аттрактор или аналогичная структура могут быть на самом деле обнаружены из наблюдений РИ, то стоило провести предложенный Деннисом Шиамоу тест по проверке принципа Маха и измерить наше вращение относительно удаленного вещества во Вселенной. Потребовалось время для того, чтобы этот тест был серьезно воспринят астрономическим сообществом (здесь помог энтузиазм астронома Джорджа Эйбела из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе). В результате этих наблюдений было установлено, что существование скоплений и сверхскоплений галактик, а также наше движение и другие относительные движения во Вселенной были естественным следствием наличия в ней

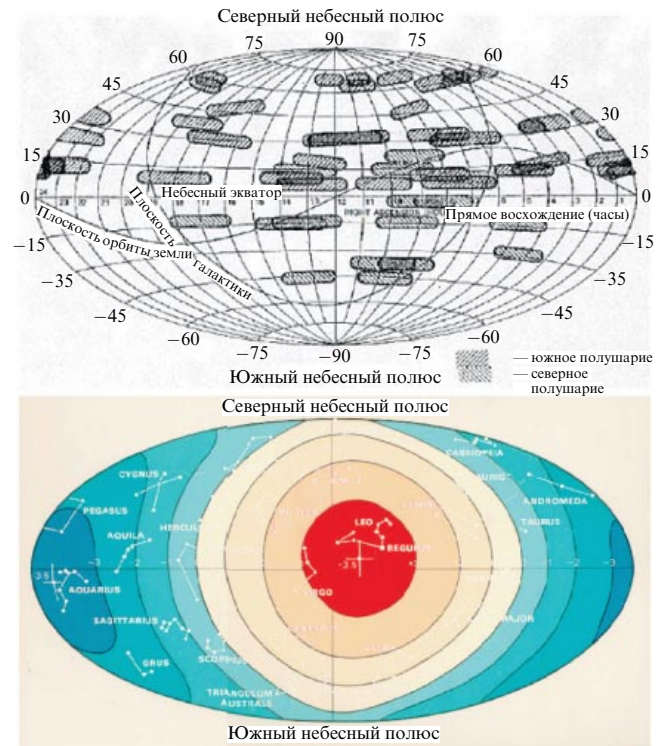


Рис. 3. Дипольная анизотропия РИ, измеренная в экспериментах на самолете У-2 (1976 г.). Верхний рисунок: область неба, снятая при полете У-2 в Северном и Южном полушариях. Нижняя панель: карта дипольной анизотропии, построенная по результатам экспериментов У-2. Центральное пятно вблизи созвездия Льва соответствует избытку температуры $3,5$ мК от средней температуры фона, а пятно в направлении созвездия Володая — $-3,5$ мК [20,22].

крупномасштабной структуры материи. В то же время наблюдение вещества во все больших масштабах (на больших расстояниях и красных смещениях) стали сходиться к "верному" ответу, даваемому реликтовым излучением. Наилучшие современные измерения дипольной анизотропии РИ ($3,358 \pm 0,017$ мК) показывают, что солнечная система движется со скоростью 368 ± 2 км s^{-1} относительно наблюдаемой Вселенной в направлении с галактической долготой $l = 263,86^\circ$ и широтой $b = 48,25^\circ$ (ошибка меньше, чем $0,1^\circ$) [82]. Это достаточно далеко от направления апекса галактического вращения (250 км s^{-1} в направлении $l = 90^\circ$ и $b = 0^\circ$).

Удивительно, что скорость движения и координаты направления оси диполя РИ оказались близки к предсказанным в оригинальных статьях Денниса Шиамоу 1967 г. (~ 400 км s^{-1} в направлении $l^{\text{II}} \sim 335^\circ$, $b^{\text{II}} \sim 7^\circ$), которые были основаны на очень неполных данных того времени. Это показывает, как критический анализ наблюдательных данных с четким теоретическим пониманием физических процессов позволили осознать, что во Вселенной существовала крупномасштабная структура и должны были ожидаться отклонения от простого хаббловского расширения вследствие малых ускорений из-за гравитационного притяжения со стороны этой структуры, которые действовали на протяжении миллиардов лет. Если смогли образоваться большие пустоты (войды) и сверхскопления, то должны существовать и глобальные потоки вещества во Вселенной. Движение нашей Галактики слегка отклоняется от "нормы", отсюда и вывод о существовании одного из многих Великих Аттракторов.

Регистрация собственной анизотропии РИ уже сама по себе представляла сложную техническую проблему, так как требовалась точности измерений порядка одной стотысячной. При этом шумовой сигнал создавался излучением галактики,

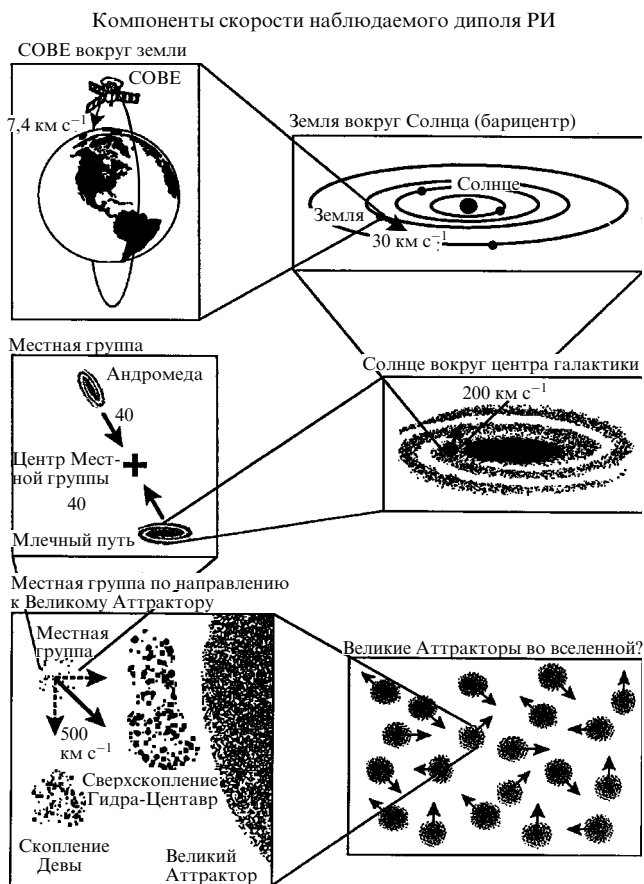


Рис. 4. Дипольная анизотропия является результатом сложения многих скоростей вследствие гравитационного притяжения различных масс.

внегалактических источников, фоновыми излучениями и шумами самих инструментов, что в сумме было гораздо больше, чем ожидаемый сигнал от РИ. Даже в экспериментах с борта самолета У-2, которые проводились на высоте более двадцати километров, ниже которой было сосредоточено свыше 95 % атмосферы (стратосферные баллонные эксперименты проводились в похожих условиях), точность была далеко не достаточной для измерения слабого первичного "космического шепота". Наблюдения из космоса могли дать гораздо более точные результаты, поэтому последующие измерения РИ следовало проводить с бортов космических аппаратов.

1.9. Поляризация реликтового излучения

Пензиас и Уилсон установили первый предел на поляризацию реликтового излучения на уровне менее десяти процентов. Затем Мартин Рис предсказал [13], что РИ должно быть линейно поляризованным на уровне нескольких процентов при наличии любой собственной анизотропии. В 1970-х годах аспирант Джордж Нанос из Принстонской группы Уилкинсона [27] и наша группа [28, 29] начали проводить наблюдения по улучшению пределов на поляризацию РИ и проверке предсказания Риса. В то время мы все еще думали в терминах классической анизотропии на больших угловых масштабах. Простейшая модель поляризации возникла в случае, когда Вселенная расширялась с разной скоростью по трем взаимно ортогональным направлениям. Оптимальным случаем было бы квадрупольное осесимметричное расширение, дающее максимальную степень линейной поляризации.

Нанос закончил наблюдения и работу над своей диссертацией и опубликовал результаты в 1979 г. Вот абстракт его

работы: "Сделана попытка зарегистрировать линейную поляризацию 2,7 К фона на длине волны 3,2 см, используя поляриметр с фарадеевским переключением, направленный в зенит и который из-за вращения Земли описывает угол с постоянным наклоном (40,35 градусов с.ш.). Использовалась двухступенчатая калибровка. Сначала изменение постоянного напряжения на втором детекторе измерялось 300 К поглотителем для определения усиления микроволновым излучением на входе приемника. Затем, подавая заданные переменные напряжения с синхронизированной частотой в той же самой точке, проводилась калибровка остальной части приемника". Нулевой результат был интерпретирован в аксиально-симметричной модели Риса, как верхний предел на асимметрию хаббловского расширения. Впоследствии Нанос сделал карьеру на военноморском флоте, стал вице-адмиралом, а затем и директором Лос-Аламосской Национальной Лаборатории.

Поскольку эксперимент на У-2 прошел успешно, совершенствовалась техника и инструменты, я почувствовал, что пора приниматься за наблюдения поляризации. Я взял к себе в аспирантуру Фила Любина и предложил ему в качестве темы кандидатской диссертации провести эксперимент по измерению поляризации на длине волны 1 см. По нашим расчетам эти наблюдения можно было проводить с земли, используя базовое оборудование для DMR на У-2, но с одной антенной, принимающей обе линейные поляризации и снабженной приемником с быстрым переключателем между двумя поляризациями. Наблюдения показали, что атмосфера не вносила искажения в поляризацию, поэтому эксперимент можно было проводить с земли. Нам нужно было только направить антенну вверх, и из-за вращения Земли она замела бы полный круг на небе. Наклоняя радиометр чуть к югу или к северу, можно было замечать целые полосы на небесной сфере. Хэл Дафферти изготовил механическую систему, а Джон Гиббсон — электронику и блок питания. Система должна была вращаться вокруг своей оси для отделения инструментальных эффектов от небесных сигналов. Затем Фил настроил всю систему и начал успешные наблюдения. Данные были получены в основном в Беркли и лишь часть — в южном полушарии (Лима, Перу).

В дальнейшем схема и конструкция прибора были усовершенствованы нашим замечательным инженером Хэлом Дафферти и использованы на длине волны 3 см в проекте Филиппа Мелеза д'Опиталья, а потом и на длине волны 0,3 см. Наши данные использовались для измерения линейной поляризации реликтового излучения и позволили получить первые измерения его круговой поляризации. В этих экспериментах использовались одиннадцать наклонов антенны для поиска линейной и одно — для круговой поляризации на длине волны 9 мм [28, 29]. Ни линейной, ни круговой поляризации не было найдено на уровне 20–60 мкК для различных моделей анизотропии. Для линейной поляризации верхний предел на 95%-ном уровне значимости составил 0,1 мК (0,00003) в осесимметричной анизотропной модели, а для сферических гармоник до третьего порядка был достигнут предел в 0,2 мК. Для переменной во времени и постоянной составляющей круговой поляризации при склонении 37° на уровне значимости 95 % были получены верхние пределы в 12 и 20 мК соответственно. При таком склонении чувствительность в пределах главного лепестка антенны (7°) была 0,2 мК.

После этих наблюдений интерес к поляризации РИ значительно угас вплоть до обнаружения анизотропии РИ радиометром DMR в эксперименте СОБЕ, после которого изучение поляризации РИ стало главным направлением исследований.

1.10. Измерение анизотропии в баллонных экспериментах на 3-мм

После детектирования дипольной анизотропии и первых оценок вида карт анизотропии РИ настало время разраба-

тывать детекторы для получения реальной карты распределения температуры РИ по небу. Вместе со мной Фил Любин, недавно защитивший диссертацию, разработал схему нового более чувствительного приемника по сравнению с тем, что использовался в экспериментах на борту самолета У-2. Новый приемник был способен построить карту РИ в течение разумного времени наблюдений. Нам было известно, что для увеличения чувствительности приемника его нужно было охладить до криогенных температур. Мы приобрели дьюар с жидким гелием, и Хэл приспособил его для охлаждения антенны, входа приемника и других частей детектора. Нам надо было перенастроить приемник в область более высоких частот для того, чтобы весь прибор был достаточно компактным, и запускать его на большую высоту во избежание атмосферных помех. Таким образом, возникла концепция криогенного эксперимента, запускаемого на баллоне в стратосферу. Нам нужно было подготовить вход приемника, а Хэл и Джон изготовили механические части и электронику. Самым сложным оказалось изготовить большой механический переключатель для быстрых перенаведений между точкой наблюдения и подходящим калибровочным источником на небе. Для этого я взял в аспирантуру нового аспиранта Джеральда Эпштейна. После двух запусков в северном полушарии у него уже было достаточно результатов для диссертации, однако нам хотелось покрыть также и южное полушарие. Тогда мы взяли в аспирантуру бразильского студента Тирсо Виллела, что было естественно для запуска баллона с территории Бразилии. Таким образом, мы смогли получить карту, покрывающую примерно 70% неба, на которой прекрасно была видна дипольная анизотропия РИ, и было ясно, что анизотропия в меньших угловых масштабах (квадрупольный момент и т.д.) была значительно меньше. Также важно, что проект продемонстрировал возможность запуска компактной криогенной системы для более чувствительных измерений РИ. Этот опыт понадобился для улучшения чувствительности DMR приемников, которые впоследствии использовались в эксперименте COBE. Это был ключевой момент, представленный инженерам GSFC и в конце концов комиссии в штаб-квартире НАСА, который убедил их в необходимости перехода к пассивно (радиационно) охлаждаемым DMR приемникам на борту COBE; в то же время теория продолжала показывать, что нам необходимо бороться за малейшее увеличение чувствительности.

Этот баллонный проект впоследствии превратился в такие эксперименты, как MAX, MAXIMA, BOOMERANG и MAXIPOL, когда в результате сотрудничества с группой Пола Ричардса и развития технологии изготовления болометров, изготовление решетки болометров стало реальной возможностью. Фил Любин получил позицию профессора в Калифорнийском университете в Санта-Барбаре и продолжил сотрудничество со мной. Джеральд Эпштейн перешел на работу в ОТА и стал заниматься научной политикой. Тирсо Виллела получил позицию исследователя и профессора в INPE (Бразильское космическое агентство) в Сан-Хосе-дос-Кампос.

1.11. Спектр РИ

Наблюдения спектра микроволнового фона начались с его открытия Пензиасом и Уилсоном. С самого начала предполагали, что это было реликтовое излучение из ранней Вселенной, а значит, должно было иметь в первом приближении чернотельный (планковский) спектр. Позднее теоретические исследования подтвердили, что в первом порядке реликтовое излучение должно иметь спектр абсолютно черного тела из-за чрезвычайной близости ранней Вселенной к состоянию теплового равновесия.

Если нет никакого взаимодействия с веществом, то планковский спектр с температурой T_i на красном смещении z_i при расширении Вселенной сохраняет свой вид и при красном

смещении z_r имеет температуру $T_r/(1+z_r) = T_i/(1+z_i)$. Поэтому однажды установившееся тепловое равновесие (например, в эпоху нуклеосинтеза) сохраняется при расширении даже после того, как фотоны отделяются от вещества на красном смещении $z \sim 1089$. Так как на один нуклон во Вселенной приходится 10^9 фотонов, переход от ионизированной первоначальной плазмы к нейтральным атомам при $z \sim 1089$ не меняет существенно вид спектра РИ [33].

Вскоре после открытия Пензиаса и Уилсона и первоначальных оценок спектра РИ, было проведено большое количество наблюдений РИ и оценок его температуры на различных длинах волн, которые стали началом доказательства чернотельности спектра РИ. Дэйв Уилкинсон и Питер Ролл [34] провели пионерские радиометрические наблюдения с крыши Девин Холла в Принстоне. Уилкинсон с коллегами, прежде всего со Стоксом и Партриджем [35], продолжили наблюдения в длинноволновой области на исследовательской станции Уайт Маунтин в Калифорнии. Эта высокогорная станция Калифорнийского университета является неплохим местом для наблюдения РИ из-за большой высоты (3657,60 м над уровнем моря), низкой относительной влажности и относительной доступности (дорога туда открыта примерно в течение полугода). Как мы упоминали выше, к 1974 г. проф. Пол Ричардс начал программу наблюдений вместе со своими аспирантами Джоном Мазером и Дэйвом Вуди. Были разработаны болометры и интерферометры Майкельсона для спектральных измерений, которые явились прообразом будущего прибора FIRAS в эксперименте COBE. Схема инструмента FIRAS явилась непосредственным развитием концепции инструмента, использовавшегося в этих наблюдениях на Уайт Маунтин, который впоследствии был переделан в инструмент Вуди и Ричардса для баллонных измерений спектра РИ. Группа FIRAS под руководством Джона Мазера изучила результаты и проанализировала работу инструмента Вуди и Ричардса в их эксперименте и сконструировала FIRAS максимально симметричным для использования при той же температуре, что и температура принимаемого космического сигнала. Другой ключевой особенностью явилось создание чернотельного излучателя, симулирующего космический сигнал. Он был тщательно сконструирован, изготовлен и оказался очень хорошим эталоном абсолютно черного тела при заданной температуре.

В начале 1980-х годов, когда проводились эксперименты Вуди и Ричардса, моя группа вступила в международную коллаборацию по измерению низкочастотной части спектра дополнительно к высокочастотным наблюдениям Вуди и Ричардса. В эту коллаборацию входили группа из Миланского университета под руководством Джорджо Сирони, болонская группа Назарено Мандолеззи, теоретики из Падуанского университета Луиджи Данезе и Джанфранко Де Зотти, а также группа из Хаверфорда под руководством Брюса Партриджа. Мы тщательно разработали радиометры для измерения спектра на длинах волн 12, 6, 3, 1 и 0,3 см (частоты 2,5, 5, 10, 30 и 90 ГГц). Была создана очень большая (0,75 м в диаметре) опорная нагрузка, охлаждаемая жидким гелием (3,8 К) для того, чтобы иметь источник чернотельного излучения с температурой, близкой к температуре РИ. Надо было создать соответствующую технику, смоделировать излучение Галактики и найти места, где его вклад был наиболее низок, и, что самое главное, смоделировать остаточный сигнал от атмосферы на большой высоте. Мы не только промоделировали атмосферу, но также получили серию зенитных сканов, а хаверфордская группа создала постоянно действующий атмосферный монитор. В течение нескольких последовательных летних сезонов мы проводили наблюдения на станции Уайт Маунтин, а затем в течение двух лет на Южном полюсе, который также представляет из себя сухое высокогорное место с очень стабильным низким атмосферным сигналом.

Таблица 2. Значения температуры РИ

ν , ГГц	λ , см	$T_{\text{СМВ}}^{\text{th}}$, К	Литература
0,408	73,5	$3,7 \pm 1,2$	Howell & Shakeshaft <i>Nature</i> 216 753 (1967)
0,6	50	$3,0 \pm 1,2$	Sironi et al. <i>Astrophys. J.</i> 357 301 (1990)
0,610	49,1	$3,7 \pm 1,2$	Howell and Shakeshaft <i>Nature</i> 216 7 (1967)
0,635	47,2	$3,0 \pm 0,5$	Stankevich et al. <i>Australian J. Phys.</i> 23 529 (1970)
0,820	36,6	$2,7 \pm 1,6$	Sironi et al. <i>Astrophys. J.</i> 378 550 (1991)
1	30	$2,5 \pm 0,3$	Pelyushenko & Stankevich <i>Sov. Astr.</i> 13 223 (1969)
1,4	21,3	$2,11 \pm 0,38$	Levin et al. <i>Astrophys. J.</i> 334 14 (1988)
1,42	21,2	$3,2 \pm 1,0$	Penzias & Wilson <i>Astrophys. J.</i> 142 419 (1965)
1,43	21	$2,65_{-0,30}^{+0,33}$	Staggs et al. <i>Astrophys. J.</i> 458 407 (1996)
1,44	20,9	$2,5 \pm 0,3$	Pelyushenko & Stankevich (1969)
1,45	20,7	$2,8 \pm 0,6$	Howell & Stankevich <i>Nature</i> 210 1318 (1966)
1,47	20,4	$2,27 \pm 0,19$	Bensadoun et al. <i>Astrophys. J.</i> 409 1 (1993)
2	15	$2,5 \pm 0,3$	Pelyushenko & Stankevich <i>Sov. Astr.</i> 13 223 (1969)
2	15	$2,55 \pm 0,14$	Bersanelli et al. <i>Astrophys. J.</i> 424 517 (1994)
2,3	13,1	$2,66 \pm 0,7$	Otoshi & Stelzreid <i>IEEE Trans. on Inst. Meas</i> 24 (1975)
2,5	12	$2,71 \pm 0,21$	Sironi et al. <i>Astrophys. J.</i> 378 550 (1991)
3,8	7,9	$2,64 \pm 0,06$	De Amici et al. <i>Astrophys. J.</i> 381 341 (1991)
4,08	7,35	$3,5 \pm 1,0$	Penzias & Wilson <i>Astrophys. J.</i> 142 419 (1965)
4,75	6,3	$2,70 \pm 0,07$	Mandolesi et al. <i>Astrophys. J.</i> 310 561 (1986)
7,5	4,0	$2,60 \pm 0,07$	Kogut et al. <i>Astrophys. J.</i> 355 102 (1990)
7,5	4,0	$2,64 \pm 0,06$	Levin et al. <i>Astrophys. J.</i> 396 3 (1992)
9,4	3,2	$3,0 \pm 0,5$	Roll & Wilkinson <i>Phys. Rev. Lett.</i> 16 405 (1966)
9,4	3,2	$2,69_{-0,21}^{+0,16}$	Stokes et al. <i>Phys. Rev. Lett.</i> 19 1199 (1967)
10	3,0	$2,62 \pm 0,058$	Kogut et al. <i>Astrophys. J.</i> 325 1 (1988)
10	3,0	$2,721 \pm 0,010$	Fixsen et al. <i>Astrophys. J.</i> 612 86 (2004)
10,7	2,8	$2,730 \pm 0,014$	Staggs et al. <i>Astrophys. J.</i> 473 L1 (1996b)

Таблица 3. Значения температуры РИ. Измерения FIRAS, COBRA и по молекулам CN не включены

ν , ГГц	λ , см	$T_{\text{СМВ}}^{\text{th}}$, К	Литература
19,0	1,58	$2,78_{-0,17}^{+0,12}$	Stokes et al. <i>Phys. Rev. Lett.</i> 19 1199 (1967)
20	1,5	$2,0 \pm 0,4$	Welch et al. <i>Phys. Rev. Lett.</i> 18 1068 (1967)
24,8	1,2	$2,783 \pm 0,089$	Johnson & Wilkinson <i>Astrophys. J. Lett.</i> 313 L1 (1987)
30	1,0	$2,694 \pm 0,032$	Fixsen et al. <i>Astrophys. J.</i> 612 86 (2004)
31,5	0,95	$2,83 \pm 0,07$	Kogut et al. <i>Astrophys. J.</i> 470 653 (1996)
32,5	0,924	$3,16 \pm 0,26$	Ewing et al. <i>Phys. Rev. Lett.</i> 19 1251 (1967)
33,0	0,909	$2,81 \pm 0,12$	De Amici et al. <i>Astrophys. J.</i> 298 710 (1985)
35,0	0,856	$2,56_{-0,22}^{+0,17}$	Wilkinson <i>Phys. Rev. Lett.</i> 19 1195 (1967)
37	0,82	$2,9 \pm 0,7$	Puzanov et al. <i>Sov. Astr.</i> 11 905 (1968)
53	0,57	$2,71 \pm 0,03$	Kogut et al. <i>Astrophys. J.</i> 470 653 (1996)
83,8	0,358	$2,4 \pm 0,7$	Kislyakov et al. <i>Sov. Astr.</i> 15 29 (1971)
90	0,33	$2,46_{-0,44}^{+0,40}$	Boyton et al. <i>Phys. Rev. Lett.</i> 21 462 (1968)
90	0,33	$2,61 \pm 0,25$	Millea et al. <i>Phys. Rev. Lett.</i> 26 919 (1971)
90	0,33	$2,48 \pm 0,54$	Boynton & Stokes <i>Nature</i> 247 528 (1974)
90	0,33	$2,60 \pm 0,09$	Bersanelli et al. <i>Astrophys. J.</i> 339 632 (1989)
90	0,33	$2,712 \pm 0,020$	Schuster et al., UC Berkeley PhD Thesis
90,3	0,332	$< 2,97$	Bernstein et al. <i>Astrophys. J.</i> 362 107 (1990)
90	0,33	$2,72 \pm 0,04$	Kogut et al. <i>Astrophys. J.</i> 470 653 (1996)
154,8	0,194	$< 3,02$	Bernstein et al. <i>Astrophys. J.</i> 362 107 (1990)
195,0	0,154	$< 2,91$	Bernstein et al. <i>Astrophys. J.</i> 362 107 (1990)
266,4	0,113	$< 2,88$	Bernstein et al. <i>Astrophys. J.</i> 362 107 (1990)

Мы опубликовали серию работ по теории, наблюдениям и их интерпретации, которые существенно улучшили измерения РИ на длинных волнах [36–41, 45]. Несколько дополнительных наблюдений, которые пытались улучшить наши измерения, являлись, по сути дела, баллонными версиями наших приборов, наблюдавших РИ на фоне гораздо более слабых атмосферных помех. В разное время в этих экспериментах участвовали: Дж.Ф. Смут (LBL/UCB), Дж. Де Амичи (UCB), С.Д. Фридман (UCB), С. Витебский (UCB), Н. Мандолези (Болонья), Р.Б. Партридж (Хаверфорд), Дж. Сирони (Милан), Л. Данезе (Падуа), Дж. Де Зогги (Падуа), Марко Берзанелли (Милан), Алан Когут (UCB), Сив Левин (UCB), Марк Бензадоун (UCB), С. Кортильони (Болонья), Дж. Мо-

риджи (Болонья), Дж. Бонелли (Милан), Дж.Б. Косталес (UCB), Майкл Лимон (UCB), Йоеель Рефаели (Тель-Авив).

1.12. Проект COBE (The COsmic Background Explorer)

В 1976 г. NASA сформировала группу по научной разработке проекта COBE, в которую вошли Сэм Галкис из JPL, Майкл Хаузер (руководитель инструмента DIRBE) и Джон Мазер (руководитель инструмента FIRAS) из GSFC, Джордж Смут (руководитель инструмента DMR) из SSL/LBL/UC Беркли, Райнер Вайс из MIT (председатель всей группы) и Дейв Уилкинсон из Принстона.

В 1980-х годах к научной группе COBE присоединились Чак Беннетт (GSFC), Нэнси Боггесс (NASA/GSFC), Эд Ченг

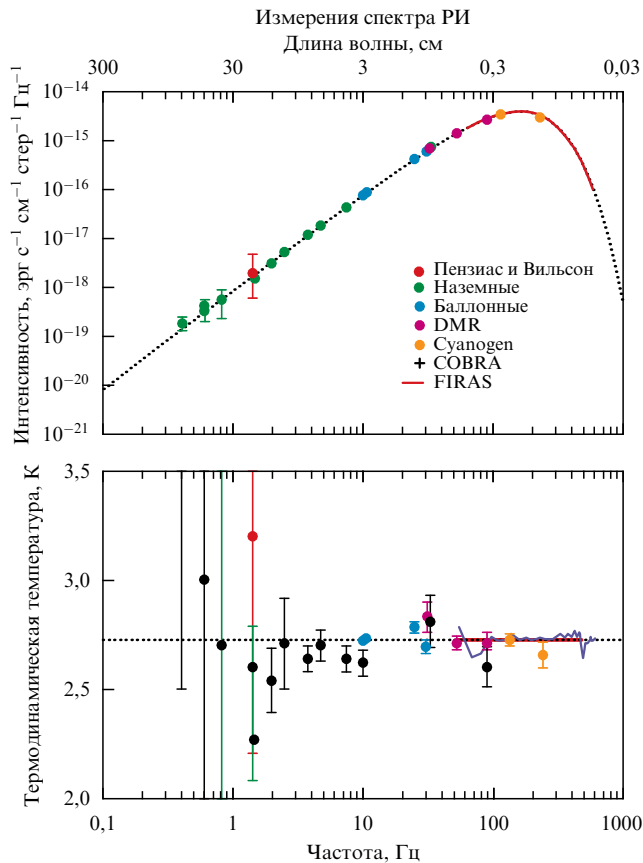


Рис. 5. Избранные наблюдения частотного спектра РИ.

(GSFC), Эли Дук (GSFC), Майк Янссен (JPL), Фил Любин (UCSB), Стефан Майер (Чикагский университет), Харви Мозели (GSFC), Том Мурдок (Дженерал Ресеч Корпорэйшн), Рик Шафер (GSFC), Боб Сильверберг (GSFC), Том Келзалл (GSFC) и Нед Райт (UCLA).

В то же время вместе с увеличением численности научного состава группы росло число менеджеров, инженеров, техников и другого вспомогательного персонала. 18 ноября 1989 г. после длительной подготовки и переносов НАСА запустило свой первый спутник COBE, специально предназначенный для космологических наблюдений. На борту COBE находились три научных прибора:

1. Спектрофотометр абсолютных измерений в далеком инфракрасном диапазоне (FIRAS) для измерения спектра РИ в диапазоне длин волн $100 \text{ мкм} < \lambda < 1 \text{ см}$ с угловым разрешением 7° , предназначенный для установления чернотельной

природы спектра РИ. Он работал по схеме сравнения спектра РИ со спектром эталонного АЧТ для измерения малейших отклонений от планковского спектра.

2. Эксперимент по измерению диффузного ИК-фона (DIRBE) для построения карты спектра в десяти широкополосных интервалах в диапазоне длин волн $1,25 \text{ мкм} < \lambda < 240 \text{ мкм}$ с угловым разрешением $0,7^\circ$ для измерения космического инфракрасного фона (СІВ). Измерения СІВ предназначались для поиска оптического излучения от очень далеких неразрешенных галактик. Свет от всех таких удаленных галактик краснеет из-за космологического расширения Вселенной. Видимый свет от галактик наблюдается в инфракрасных полосах или поглощается пылью и переизлучается в далеком инфракрасном диапазоне, который в свою очередь смещается в субмиллиметровую область из-за космологического красного смещения. Измерения СІВ ограничивали модели космологической истории звездообразования и временной эволюции образования пыли и тяжелых элементов.

3. Дифференциальные микроволновые радиометры (DMR) для построения карты анизотропии РИ в трех частотных полосах 31,5, 53 и 90 ГГц с разрешением 7° и чувствительностью лучше, чем одна соты тысячная от средней температуры реликтового фона (см. рис. 3). Простейшая схема DMR использовалась в 1940-х годах Робертом Дике из Принстонского университета. DMR измеряет не абсолютную температуру в данном направлении на небе, а разницу температур в двух направлениях. В симметричном DMR две антенны принимают сигнал с различных направлений и измеряют разницу между сигналами. Если сигналы инструментального происхождения, то они не зависят от направления, и их разница не меняет знак при переключении между антеннами. А если сигнал космологического происхождения, то разница должна менять знак. Такая схема значительно уменьшает систематические ошибки и увеличивает точность регистрации. Карта анизотропии (т.е. карта разницы температур) представляет собой "фотографию" Вселенной в эпоху рекомбинации примерно 380 тыс. лет после начала расширения. Эта карта показывает первоначальные структуры, которые не были подвержены изменению из-за физических процессов, происходящих со скоростью, меньше скорости света в эпоху рекомбинации. Многие физические параметры, описывающие динамику и геометрию Вселенной, а также начальные условия в модели горячей Вселенной, могут быть получены из анализа карты анизотропии РИ.

1.13. Результаты COBE

Проект COBE был чрезвычайно важен. С помощью измерений на инструменте FIRAS была доказана чернотельная природа спектра РИ (см. рис. 8) и измерена его температура $T_0 = 2,726 \pm 0,010 \text{ К}$ (на уровне значимости 95 %) [45]. Инстру-

Таблица 4. Температура РИ, измеренная по молекулам CN

ν , ГГц	λ , см	$T_{\text{СМВ}}^{\text{th}}$, К	Наблюдаемая звезда	Литература
113,6	0,264	$2,70 \pm 0,04$	z Per	Meyer & Jura <i>Astrophys. J.</i> 297 119 (1985)
113,6	0,264	$2,74 \pm 0,05$	z Oph	Crane et al. <i>Astrophys. J.</i> 309 822 (1986)
113,6	0,264	$2,76 \pm 0,07$	HD21483	Meyer et al. <i>Astrophys. J.</i> 343 L1 (1989)
113,6	0,264	$2,796^{+0,014}_{-0,039}$	ζ Oph	Crane et al. <i>Astrophys. J.</i> 136 (1986)
113,6	0,264	$2,75 \pm 0,04$	ζ Per	Kaiser & Wright <i>Astrophys. J.</i> 356 L1 (1990)
113,6	0,264	$2,834 \pm 0,085$	HD154368	Palazzi et al. <i>Astrophys. J.</i> 357 14 (1990)
113,6	0,264	$2,807 \pm 0,025$	16 stars	Palazzi et al. <i>Astrophys. J.</i> 398 53 (1992)
113,6	0,264	$2,729^{+0,023}_{-0,031}$	5 stars	Roth et al. <i>Astrophys. J.</i> 413 L67 (1993)
227,3	0,132	$2,656 \pm 0,057$	5 stars	Roth et al. <i>Astrophys. J.</i> 413 L67 (1993)
227,3	0,132	$2,76 \pm 0,20$	ζ Per	Meyer & Jura <i>Astrophys. J.</i> 297 119 (1985)
227,3	0,132	$2,75^{+0,24}_{-0,29}$	ζ Oph	Crane et al. <i>Astrophys. J.</i> 309 822 (1986)
227,3	0,132	$2,83 \pm 0,09$	HD21483	Meyer et al. <i>Astrophys. J.</i> 343 L1 (1989)
227,3	0,132	$2,832 \pm 0,072$	HD154368	Palazzi et al. <i>Astrophys. J.</i> 357 14 (1990)



Рис. 6. Фотография членов рабочей группы COBE (за исключением Эли Двек). Снимок сделан во время рабочей встречи в 1988 г. Слева направо: (последний ряд) Эд Ченг, Рик Шафер, Стефан Майер, Майк Янссен, Джон Матер, Нед Райт, Джордж Смут, Том Келсалл; (средний ряд) Дейв Уилкинсон, Том Мурдок, Чак Беннетт, Боб Сильверберг, Харвей Мозелей, Майкл Хаузер, Райнер Вайс; (впереди) Нэнси Боггесс, Сэм Гулчис, Фил Любин.

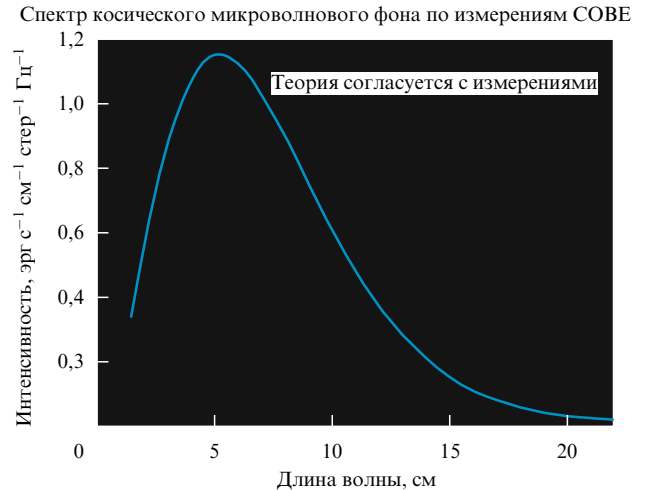


Рис. 8. Сплошная кривая показывает ожидаемую интенсивность чернотельного спектра, предсказываемого теорией горячей Вселенной. Данные FIRAS описывают ожидаемую чернотельную кривую с температурой $T = 2,726$ К настолько точно, что ошибки измерений меньше толщины кривой. Данные наблюдений полностью покрываются теоретической кривой и не видны [45].

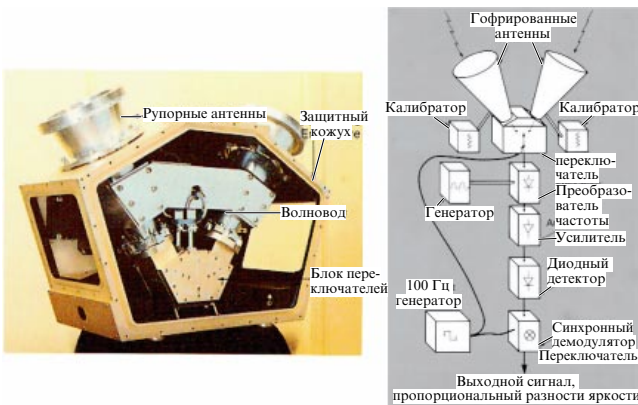


Рис. 7. Конструкция инструмента DMR. Слева: фотография DMR; справа: схема DMR. DMR сыграл важную роль в измерении анизотропии РИ в экспериментах У-2 и COBE. Дифференциальные радиометры также используются в эксперименте WMAP в качестве основных приборов для наблюдения РИ [66].

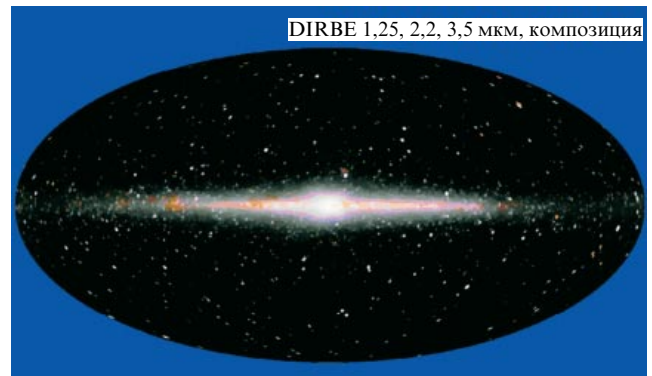


Рис. 9. Вид Галактики в ближней инфракрасной области по данным DIRBE (наложены изображения в длинах волн 1,25, 2,2, 3,5 мкм). Главным источником инфракрасного излучения на этих длинах волн являются звезды Млечного Пути (видны как тонкий диск с балджем в центре). Разрозненные яркие источники также наблюдаются над диском Галактики [66].

мент DIRBE получил абсолютно прокалиброванные карты неба на многих длинах волн, впервые построил изображения нашей Галактики на этих длинах волн и измерил с хорошей точностью космический инфракрасный фон, создаваемый первыми звездами на больших красных смещениях. Значительная часть этого фона происходит в очень ярких удаленных галактиках с большим содержанием пыли.

Наблюдения FIRAS надежно установили, что космический микроволновый фон является реликтовым тепловым излучением ранней Вселенной, а результаты DIRBE относились к излучению в более поздней Вселенной. Открытие анизотропии РИ в результате измерений DMR привлекло наибольшее внимание и вызвало большой всплеск активности как в теоретических исследованиях, так и инициировало дополнительные наземные и космические эксперименты. Открытие анизотропии РИ было многоступенчатым процессом, включающим разработку, изготовление инструментов, их калибровку, создание матобеспечения, проведение наблюдений, их обработку и окончательный анализ. Выше мы кратко описали историю некоторых из этих аспектов. Развитие

эксперимента COBE DMR, включая его разработку, калибровку, создание матобеспечения, проходило долгое время с привлечением большого количества персонала. Выдающимися инженерами были Роджер Рэтлифф (микроволновые компоненты), Джон Марушак (тестирование компонент и их проверка), Роберт Патчке (31,4 ГГц), Мария Лече (53 ГГц), Лари Хиллард (90 ГГц), Кати Ричардс (усовершенствование приемника), Рик Миллс (тестовая камера и организация эксперимента), Петер Янг (результаты тестирования), Марко Торал (антенны), Джин Гочар (инженер по механике), Франк Киршман (термический дизайн), Дейв Амазон (командные процедуры), Крис Витебски (90 ГГц дизайн), Дейв Нейс и Берни Кляйн (инструментальные инженеры), Дик Вебер (системный инженер) и др. Они собирали отдельные компоненты и подсистемы, а затем проводили тестирование дифференциальных радиометров и их калибровку. В центре им. Годдарда было ограниченное количество персонала для проведения этих работ, а так как проект COBE был целиком организован в этом центре, к работе над ним были привлечены дополнительные люди и много молодежи. С этими

людьми было приятно работать и видеть, как постепенно растет их опыт и умение при выполнении ответственных заданий при работе над этим выдающимся экспериментом.

В конце этого периода группа по обработке данных и их анализа стала разрабатывать процедуру и методику обработки данных с их моделированием и систематическими проверками. Серхио Торрес, Джон Аймон, Чарльз Бакус, Лори Роке, Фил Кеестра, Чак Беннетт, Луис Тенорио, Эд Кайта, Р. Холленхорст, Дейв Хон, Ки Хи Хуанг, Ал Когут, Гари Хиншоу, Роберт Каммерер, Хаиро Сантана, Крис Горски, Тони Бендей, Чарли Лайнуивер, Джованни Де Амичи, Пет Джексон, Кевин Галук, Виджей Кумар и Карен Левенштайн были среди многих, кто участвовал в обработке и анализе данных DMR. Конечно, это лишь малая часть всех сотрудников, которые были задействованы в эксперименте COBE на протяжении многих лет.

Сначала наша команда состояла из пяти постдоков и одного аспиранта, которые стали разрабатывать программное обеспечение примерно за полтора года до запуска спутника. По мере приближения даты запуска команда медленно увеличивалась. Примерно через полчаса после запуска COBE он пролетал над Антарктидой и избыточный сигнал, отраженный отражением солнечного света ото льда, вызвал выработку избыточной мощности солнечных батарей, и центр управления полетом попросил включить приборы DMR раньше намеченного срока для использования части этой избыточной мощности. Я быстро согласился, и инструменты DMR приступили к работе. По мере того, как включались радиометры DMR, внутренний шум калибровочных вышел на запрограммированный уровень, давая сильный сигнал. Затем, по мере вращения космического аппарата COBE, антенны DMR попали на Луну (случайное совпадение), и мы смогли, глядя на обрабатываемый в реальном времени сигнал, убедиться в том, что радиометры DMR благополучно пережили запуск и заработали в штатном режиме. Только время могло показать, будут ли инструменты достаточно надежны и стабильны для проведения требуемых экспериментов.

В конце первого дня Серхио Торрес и Дейв Хон проверили всю цепочку построения карты неба и убедились, что она хорошо работала. С помощью DMR были построены карты, покрывающие половину неба. Они были зашумлены, но, тем не менее, это были лучшие карты, полученные к тому времени. Мы все были в хорошем настроении и исполнены оптимизма на длительный срок, необходимый для наблюдений и обработки полученных данных. Через шесть месяцев в нашем распоряжении было значительное количество данных, эксперимент проходил достаточно гладко, поэтому мы смогли построить подробные карты, покрывающие все небо. Эти карты были достаточно качественны, и, как мы понимаем сейчас, их чувствительность была достаточной для обнаружения анизотропии РИ. Мы заметили, что в наших данных есть маленький, но значимый эффект, но из осторожности решили опубликовать только верхний предел на анизотропию, поскольку у нас было пока немного времени для полного понимания эксперимента и в результатах могли присутствовать различные систематические ошибки, связанные с самим инструментом, нашими оценками различных возможных астрофизических фонов, а также с процедурой обработки и анализа данных. Мы понимали, что обработка данных может быть значительно улучшена с учетом различных остаточных эффектов. Кроме того, мы хотели лучше изучить чувствительность приборов для того, чтобы убедиться в надежности получаемых данных.

Пока я был начинающим ученым, мои наставники Дейв Фриш, Луис Альварес и их коллеги постоянно подчеркивали, как важно поддерживать высокий научный уровень исследований. Это относилось как к выбору проектов, так и к их

выполнению. Я знал, как важно было в таких экспериментах не ошибаться и быть уверенным в своей правоте. Зачастую даже самый тщательный исследователь теряет бдительность, когда эксперимент дает ожидаемый результат, и наоборот, становится очень внимательным, когда результат получается неожиданным. Такова человеческая природа, и надо быть очень осторожным, чтобы не попасть в эту ловушку. Например, в одной известной работе проводились измерения скорости света как функции времени. Она систематически менялась во времени, но почти всегда внутри ошибок измерений, но при усреднении по многим измерениям эти вариации выходили за рамки многих стандартных отклонений. Этот результат был неоспоримым доказательством вышеупомянутой тенденции и показывал необходимость быть систематичным и строгим независимо от получаемого результата. Нужно проверять свои результаты до тех пор, пока не удостовериться в их справедливости, а не просто начинать верить в свои результаты. Во многих областях науки требуется дважды перепроверить эксперимент, чтобы избавиться от возможной субъективности.

Поэтому как только мы многократно перепроверили нашу процедуру построения карт, мы получили карты по результатам первого года наблюдений. На этих картах был ясно виден сигнал, превышающий уровень шума. Надежным индикатором правильности построенных карт было то, что когда мы строили карты на каждой частоте DMR (31,4, 53 и 90 ГГц), для достижения максимальной чувствительности на каждой частоте складывали сигналы обоих каналов (А и В). Однако мы также могли вычесть карту А из карты В, что должно было заглушить космический сигнал и оставить только независимый инструментальный шум. Сглаженные А + В карты значительно отличались от А – В карт. Вид А – В карт находился в согласии с ожидаемыми гауссовыми флуктуациями белого шума приемника. Вопрос состоял в том, являлись ли наблюдаемые сигналы флуктуациями РИ, или они были обусловлены астрофизическими источниками, систематикой инструментов, экспериментальной процедуры или артефактом обработки данных? На одном из научных совещаний группы COBE я доложил всей группе, что мы видим некоторые эффекты, но еще слишком рано говорить о том, что эти явления не артефакты. Я поставил перед участниками группы анализа данных DMR задачу систематически проверить все шаги и процедуры и показать, что все систематические эффекты и погрешности учтены должным образом, поскольку в подобных экспериментах к излучению реликтового фона приписывалось все, что нельзя было приписать к известным источникам. Мы составили тщательный план работы по систематической проверке всех шагов анализа данных. Участники группы занялись тяжелой работой в соответствии с этим планом и не стали выступать со скороспелыми заявлениями, что наблюдаемый эффект действительно является анизотропией РИ. Примерно через полгода после этого (август 1991 г.) Нед Райт заметил, что карты DMR, построенные по результатам первого года наблюдений находятся в согласии с предсказанием космологической модели с холодной скрытой массой (CDM). Это не слишком повлияло на команду DMR, которая строго придерживалась временных рамок выполнения проекта. В октябре 1991 г. Нед Райт обработал карты первого года наблюдений своей программой и пришел к выводу, что результаты согласуются со спектром Харрисона – Зельдовича с амплитудой квадруполь в 15 мкК. Официальное матобеспечение DMR давало амплитуду в 30 мкК. Нед был очень возмущен возможными выводами DMR и хотел доложить их на очередном совещании научной группы. Мы согласились сделать это в более узком кругу на специальном вечернем заседании после ужина в доме Алана и Нэнси Боггесс, поскольку это была крайне деликатная проблема. Научная рабочая группа COBE (как я и предполагал) сочла, что лучше

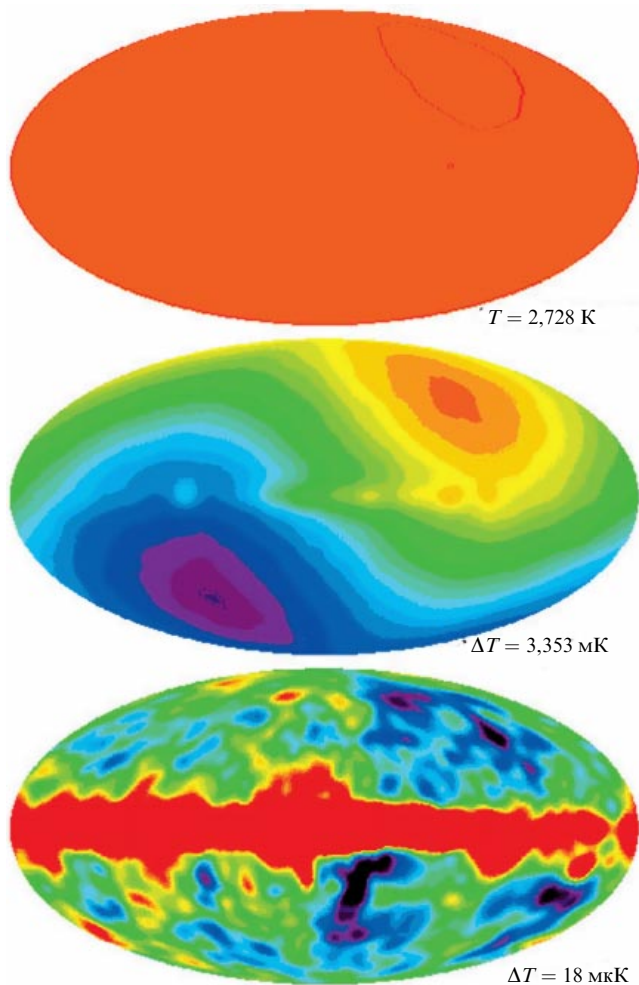


Рис. 10. Карты реликтового излучения, полученные DMR COBE [66]. Вверху: монополь; в середине: диполь; внизу: мультиполи. На уровне $T \sim 3$ К (вверху) излучение принимается изотропно со всех направлений. При увеличении чувствительности до уровня милликельвинов появляется диполь, который связан с пекулярным движением солнечной системы относительно системы отсчета, задаваемой РИ. После вычитания диполя проявляется мультиполярная анизотропия на уровне $\Delta T \sim 10$ мкК. Эти очень малые флуктуации температуры РИ несут информацию о ранней Вселенной.

быть консервативными. Всем участникам группы были сообщены статус и степень надежности результатов, а участникам группы DMR было поручено подготовить и представить на расширенном заседании научной группы обзор всех деталей эксперимента DMR. Этот обзор был назначен на конец 1991 г.

Повышенное внимание со стороны научной рабочей группы COBE стало влиять на работу группы анализа DMR. Они не хотели упустить радости открытия и, особенно, его возможные космологические последствия. Я пытался сдерживать научных сотрудников (включая себя) от написания научных статей прежде, чем все проверки будут сделаны. Должна была быть высочайшая степень уверенности в надежности проделанной работы. Дело дошло до того, что я был готов предложить два бесплатных билета в любую точку земного шара любому, кто нашел бы эффект, кроме излучения РИ, для объяснения того, что мы видели. Мы разделились на специалистов в области инструментальных ошибок (которые руководил выдающийся Алан Коугт, которому пришлось иметь дело со многими потенциальными проблемами в этой области), галактических фоновых излучений (Чак Беннетт и Гарри Хиншоу), математического обеспечения

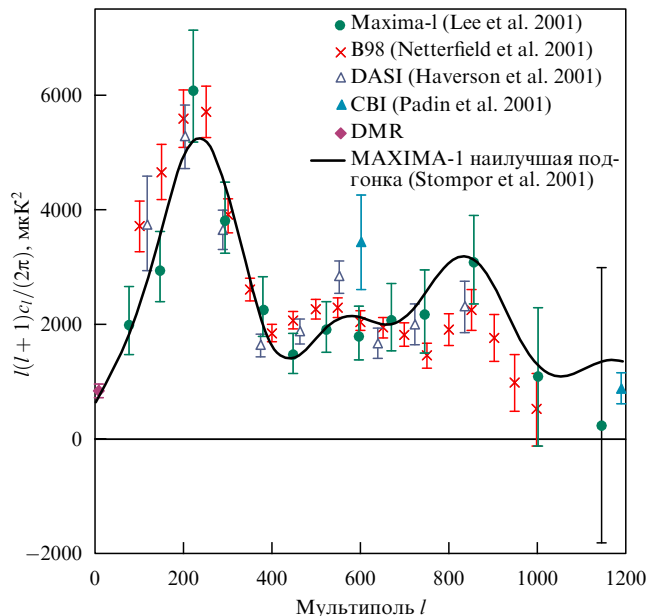


Рис. 11. К 2001 г. в спектре мощности угловых флуктуаций РИ был измерен первый акустический пик и обнаружены следы второго пика (наблюдения COBE DMR, MAXIMA, BOOMERanG, DASI и CBI). Еще через пару лет появилось гораздо больше данных, а результаты первого года наблюдений WMAP прописали плато и первые пики. Сплошная линия — предсказания модели с $n = 1$, $H = 50$ км с⁻¹ Мпк⁻¹ и холодной скрытой массой [67].

(Серхио Торрес, отвечающий за официальное программное обеспечение DMR, Джорж Смут и мои студенты Луис Тенорио и Чарльз Лайнуивер, разработавшие независимое программное обеспечение и тесты, и Нед Райт со своей собственной программой обработки карт РИ) и т.д. Дэвид Уилкинсон был настроен особенно скептически, удерживая всех в узде.

23 апреля 1992 г. на ежегодном собрании Американского физического общества команда COBE провозгласила историческое открытие анизотропии космического реликтового фона с характерной величиной анизотропии $\Delta T/T \approx 10^{-5}$ или $\Delta T \sim 30$ мкК на угловых масштабах больше, чем $\sim 7^\circ$ [47]. Анизотропия РИ несет богатейшую информацию о ранней Вселенной, позволяет вычислять космологические параметры и проверять возможные космологические модели. Карты анизотропии, полученные прибором DMR на спутнике COBE, состоят из 6144 пикселей, каждый с угловым размером $2,6^\circ \times 2,6^\circ$. Этот угловой масштаб сравним с размером участка неба (около 1°), под которым был бы виден горизонт событий во Вселенной с начала расширения. То есть возмущения, зарегистрированные DMR, идут из самого первоначального состояния Вселенной. После четырехлетних измерений DMR, характерное отношение сигнала к шуму на сглаженной по угловым размерам 10° и усредненной по всем частотам карте выросло до ~ 2 , так что анизотропию можно было видеть простым глазом. Температура РИ по измерениям DMR оказалась равной $T_0 = 2,725 \pm 0,020$ К, что отлично совпало с результатами измерений прибором FIRAS. Если из карты вычесть эту постоянную температуру, а полученную разность увеличить в 1000 раз, становится виден диполь с амплитудой $3,358 \pm 0,024$ мК, в направлении галактических координат $(l^G, b^G) = (264,31^\circ \pm 0,16^\circ, 48,05^\circ \pm 0,10^\circ)$, что подтверждает результаты экспериментов с самолета У-2. При увеличении масштаба в 100000 раз обнаруживаются более высокие мультиполи ($l \geq 2$). Эти особенности приведены на рис.10. Амплитуда квадруполя оценивалась в диапазоне от 4 до 28 мкК. Анализ мультиполей с $l > 2$ показал, что флуктуации согласуются с масштабно инвариантным спектром пер-

воначальных флуктуаций (степенной закон с показателем $n = 1$), который предсказывается в инфляционной модели Вселенной (рис. 11). Другой важный тест предсказаний инфляционной теории — гауссово распределение первоначальных флуктуаций температуры. Данные COBE DMR не обнаружили отклонения от гауссова характера флуктуаций [49]; не обнаружено это до сих пор и в последующих экспериментах.

2. Становление стандартной космологической модели — Λ CDM

2.1. Суборбитальные эксперименты по измерению РИ

Анизотропия реликтового фона остается главным космологическим наблюдательным фактом, поэтому в 1990-х годах вслед за проектом COBE было проведено множество наземных и стратосферных экспериментов [52]. Хотя некоторые из них измеряли анизотропию в больших угловых масштабах на частотах, отличных от использованных в измерениях DMR, большинство проектов работало на малых угловых масштабах, которые не измерялись на COBE. Измерение анизотропии РИ в малых угловых масштабах, полученное в этих экспериментах, наложило очень жесткие ограничения на космологические модели. Результаты некоторых из них по измерению спектра мощности флуктуаций РИ представлены на рис. 12. Из наблюдений далеких сверхновых астрономы сделали вывод об ускоренном расширении Вселенной [56, 57]. Это привело к возвращению космологической постоянной в уравнения Эйнштейна, которая первоначально была введена им совершенно из других соображений и вскоре отвергнута. Из других астрономических наблюдений, в частности, из наблюдений скоплений галактик, получили информацию, которая позволила независимо проверить выводы, следующие из наблюдений РИ. Некоторые результаты суборбитальных экспериментов и наблюдений представлены в табл. 5 и показаны на рис. 12 и 17.

2.2. Физические выводы из спектра мощности угловых флуктуаций РИ

Наблюдения анизотропии РИ позволили перейти от спекуляций относительно ранней Вселенной, основанных на скудных наблюдательных данных, к построению рабочих космологических моделей, в которых Вселенная является пространственно

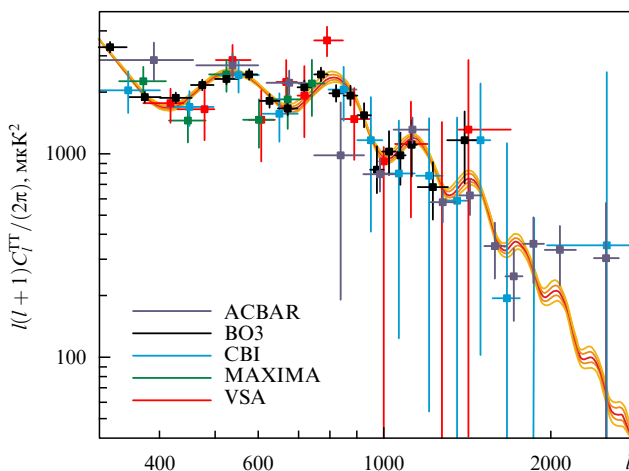


Рис. 12. Сплошная кривая показывает ожидаемый спектр мощности угловых флуктуаций РИ в модели Λ CDM с параметрами, полученными из анализа данных WMAP и измерений РИ в наземных и баллонных экспериментах [51]. Рисунок иллюстрирует большое количество деталей в спектре мощности угловых флуктуаций РИ на высоких мультиполях $l > 300$.

плоской и состоит в основном из невидимой материи с малой примесью обычного вещества, достаточного для производства первичного состава легчайших элементов. Вся сложная крупномасштабная структура вещества (космическая паутина) сформировалась из первичных адиабатических флуктуаций, которые, как полагают, произошли из квантово-механических флуктуаций в ранней Вселенной, в инфляционную эпоху (доли секунды после начала расширения). Современные наблюдения достигли точности нескольких процентов в определении ключевых космологических параметров, и, вполне вероятно, что в ближайшее десятилетие эта точность достигнет уровня менее процента. Это станет возможным, главным образом, из-за ожидаемого улучшения точности измерения температуры и поляризации РИ. Эти изменения не только углубят наше понимание и способность определять основные космологические параметры, но и позволят проверить основные физические компоненты космологической модели и даже определить естественные минимальные начальные параметры расширения Вселенной.

Эти новые результаты, их анализ и интерпретация будут иметь далеко идущие последствия для физики и астрономии. Современные космологические модели привлекают новую физику: темную энергию, темную материю, инфляцию (или схожую с ней альтернативную теорию), асимметрию вещества и антивещества. Кроме того, делается четыре важных вывода: от ранней Вселенной не осталось других заметных реликтовых частиц, отсутствуют дополнительные измерения в больших масштабах, фундаментальные константы не изменяются со временем и не заметно действия новых экзотических сил. Все эти положения будут тщательно проверяться.

Основной причиной принципиальной возможности такой проверки является физическая простота ранней Вселенной и процессов, которые оставили свой отпечаток в свойствах РИ. Реликтовое излучение является важнейшим источником информации, поскольку в эпоху рекомбинации все возмущения еще были линейными, а физика заполняющих Вселенную компонент хорошо известна из лабораторных исследований. Это позволяет делать четкие проверяемые наблюдениями предсказания. В ранней Вселенной доминировали фоновые фотоны, которые сильно взаимодействовали с электронами. После эпохи рекомбинации электроны связались с протонами и ядрами гелия и образовывали так называемую фотонно-барионную плазму. В этой плазме происходили обычные акустические колебания до тех пор, пока Вселенная не остыла так, что образовались нейтральные атомы, а барионы и фотоны перестали взаимодействовать друг с другом. После этого фотоны, оставшиеся от первоначальной плазмы, стали свободно распространяться по Вселенной, а сама поверхность последнего рассеяния образовала космическую фотосферу наподобие видимой поверхности Солнца (солнечной фотосферы). Фотоны, которые стали свободно распространяться после перехода космической плазмы в нейтральные атомы, и составляют космическое микроволновое излучение, присутствующее повсюду в космосе. Когда мы измеряем это излучение, мы практически смотрим на фотографию ранней Вселенной.

Легко сосчитать, что рекомбинация произошла, когда масштаб Вселенной был в 1089 раз меньше, чем сейчас, а возраст Вселенной составлял 379000 лет от начала расширения. Из-за адиабатического расширения температура РИ обратно пропорциональна масштабному фактору Вселенной. Поэтому когда Вселенная была в 1089 раз меньше, чем сейчас, температура реликтовых фотонов была в 1089 раз больше, т.е. около 3000 К. Из-за большого отношения числа фотонов к барионам этой температуры достаточно для поддержания Вселенной в полностью ионизованном состоянии. (Если в равновесное уравнение Саха подставить энергию ионизации водорода 13,6 эВ и температуру 3000 К, что эквивалентно

средней энергии фотона около $1/4$ эВ, то фотонов с энергией выше 13,6 эВ будет достаточно, чтобы ионизовать весь водород и гелий.) Рекомбинация происходит достаточно быстро, но не мгновенно и занимает примерно $\Delta z \approx 70$ по сравнению с 1089, что похоже на отношение толщины кожуры яблока к его размерам. Конечная толщина области последнего рассеяния фотонов на первоначальной плазме является основной причиной, по которой возмущения в малых угловых масштабах (т.е. с большой пространственной частотой l) затухают. Это позволяет нам понять быстрый спад (уменьшение сигнала) в спектре мощности флуктуации на малых угловых масштабах.

2.2.1. Геометрия пространства-времени. Геометрия пространства-времени может быть измерена по наблюдениям звуковых волн в первичной плазме. Фотоны РИ доминировали в ранней Вселенной, поэтому эти фотоны (и другие релятивистские частицы), движущиеся со скоростью света в разных направлениях, составляли ту среду, в которой распространялись звуковые колебания в ранней Вселенной. Так как мы живем в трех измерениях, скорость звука в такой среде будет равна скорости света, деленной на квадратный корень из трех ($v_s = c/\sqrt{3}$)².

Согласно теории Джинса, которая изначально была построена для объяснения формирования солнечной системы и колебаний звезд под действием силы тяжести, если время свободного падения в среде короче времени пересечения возмущенной области звуковой волной, наступает гравитационный коллапс возмущения плотности. Если время пересечения звуковой волной короче времени свободного падения, то область успеет подстроиться под изменившиеся физические условия и начнутся акустические колебания. Например, любое возмущение на Солнце вызывает его колебание. Аналогичный процесс происходит и в ранней Вселенной. Поскольку скорость звука чрезвычайно велика, а гравитационные возмущения крайне малы (10^{-5}), сила гравитации мала и время свободного падения очень большое. Все первоначальные возмущения начинаются вблизи нулевого времени и испытывают акустические колебания во Вселенной, т.е. являются акустическими волнами. Первичные фотоны перестают взаимодействовать с плазмой при $1+z = 1089$ или примерно 379000 лет после начала расширения, так что флуктуации РИ несут информацию об этих фотонах в эпоху рекомбинации. Можно сказать, что в течение 379000 лет первичные флуктуации осциллировали со скоростью звука.

По прошествии этих 379000 лет наибольшее из этих когерентных акустических колебаний имело длину волны примерно 220000 световых лет (или 70000 парсек). На большее попросту не хватило времени: при скорости звука в $0,6$ скорости света за время 379000 лет максимально возможная область, в которой могут происходить когерентные колебания, будет иметь пространственный размер $0,6 \times 379000 = 220000$ световых лет. Этот верхний предел называется звуковым горизонтом. Одна из причин, по которым эти колебания представляют большой интерес для космологии, состоит в том, что наблюдения анизотропии РИ позволяют определить видимый угловой размер звукового горизонта на небе.

Когда образовались первые стабильные атомы, звуковые волны в космической плазме привели к малым флуктуа-

циям температуры космического микроволнового излучения. Разумеется, флуктуации микроволнового фона присутствовали и до того, как образовались атомы. Спутники WMAP и Planck и другие суборбитальные инструменты могут построить высокоточную карту флуктуаций температуры РИ вплоть до очень малых угловых масштабов.

Однако наблюдается не абсолютный размер звукового горизонта, а его угловой размер на небе. Но мы же уже знаем его абсолютный размер, а именно те самые 220000 световых лет, о которых говорилось выше. Сравнивая угловой и абсолютный размеры, мы можем определить кривизну нашего космоса — является ли пространство плоским, или имеет сферическую или седловидную форму. В обычном евклидовом пространстве (плоское пространство) нам хорошо знакомо соотношение: угловой размер ("видимый размер") данного объекта линейно уменьшается с расстоянием, по крайней мере для удаленных объектов. Следующий рисунок иллюстрирует соотношение между пространственным размером L измерительного стержня, расстоянием до него и видимым угловым размером α . Пунктиром показаны световые лучи, идущие от конца стержня к наблюдателю: (рис. 13).

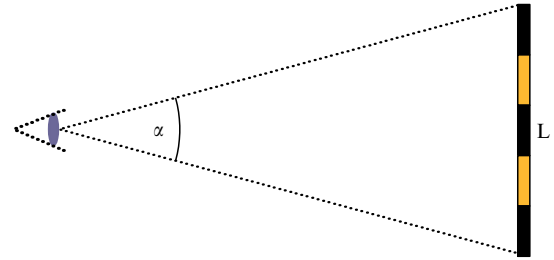


Рис. 13. Плоская (евклидова) геометрия.

По-другому обстоит дело в пространстве с положительной кривизной, которое является трехмерным аналогом сферической поверхности. В таком пространстве свет распространяется не по прямым линиям, а параллельные линии сходятся, как показано на рис. 14. Угловой размер ("видимый размер") данного объекта уменьшается с расстоянием медленнее, чем по линейному закону, по крайней мере для удаленных объектов. В таком пространстве измерительный стержень, находящийся на том же расстоянии от нас будет иметь больший видимый размер, соответствующий большему углу α (рис. 14).

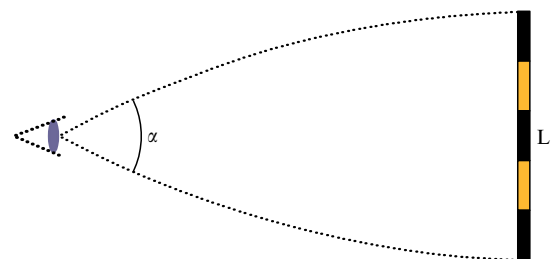


Рис. 14. Геометрия с положительной постоянной кривизны (закрывающаяся модель).

В пространстве с отрицательной кривизной все наоборот: параллельные линии расходятся и в результате тот же измерительный стержень, находящийся на том же расстоянии, будет иметь меньший видимый размер, соответствующий меньшим углам α (рис. 15).

² На поверхности последнего рассеяния плотность барионов слегка влияла на скорость звука. Отношение плотностей импульса барионов к фотонам $R = (\rho_b + p_b)/(\rho_\gamma + p_\gamma) \approx 0,6(\Omega_b h^2 / 0,02091000 / 1 + z)$, так что $v_s = c/\sqrt{3(1+R)} \approx c/\sqrt{3(1+3\rho_b/4\rho_\gamma)}$, и это дает малую поправку к обсуждаемой оценке.

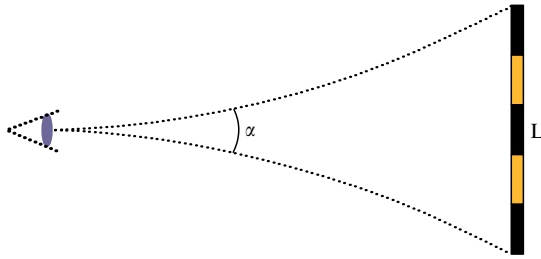


Рис. 15. Геометрия с отрицательной постоянной кривизной (открытая модель).

Следовательно, легко определить кривизну пространства из наблюдений космического микроволнового фона. Мы знаем абсолютный размер самых больших звуковых волн в ранней Вселенной и можем измерить видимый размер создаваемых ими возмущений на небе. Расстояние до поверхности формирования микроволнового фона может быть вычислено следующим образом. Мы знаем температуру, при которой сформировался реликтовый фон и можем измерить его сегодняшнюю температуру. Разница температур тогда и сейчас прямо связана с тем, насколько Вселенная увеличилась от той эпохи к сегодняшнему дню. А это, в свою очередь, прямо пересчитывается в расстояние. Сравнивая видимый и истинный размеры для вычисленного расстояния, мы получаем кривизну пространства. Таким образом удалось определить, что с большой точностью пространство нашей Вселенной плоское.

2.2.2. Акустические колебания. Рассмотрим, почему в спектре мощности угловой анизотропии РИ появляются акустические пики и о чем они нам говорят.

Геометрия пространства-времени наиболее точно определяется из измерения углового масштаба первого акустического пика в спектре мощности. Наблюдая несколько пиков, можно определить несколько космологических параметров и измерить геометрию пространства-времени с еще более высокой точностью. Почему же на низких мультиполях появляется плато, а на более высоких видны акустические пики?

Концептуально это опять-таки просто. Если какая-нибудь физическая система подвержена воздействию кратковременного возмущения (как предельный случай можно взять возмущение в виде дельта-функции Дирака, т.е. с нулевой длительностью по времени), то в системе в среднем одинаково (но стохастически) возбуждаются все возможные моды колебаний. В ранней Вселенной это эквивалентно появлению возмущений равной мощности (или среднеквадратичной амплитуды) в виде плоских волн (для плоского пространства-времени) или соответствующих мод. Поэтому при правильном представлении спектр мощности угловых флуктуаций должен был быть практически плоским и не зависеть от угловой частоты. Конечная толщина поверхности последнего рассеяния подавляет спектр на высоких угловых частотах. К этому добавляется другой эффект — ускользание фотонов из области высокочастотных возмущений из-за малых краевых эффектов. Распространение возмущений в четырехмерной геометрии пространства-времени во Вселенной, заполненной компонентами с различным уравнением состояния, приводит к тому, что масштабно-инвариантный плоский спектр возмущений модулируется фундаментальной угловой частотой и ее гармониками. Так возникают акустические пики. На самом деле это трехмерные возмущения, которые наблюдаются в виде угловых флуктуаций на кажущемся сферическом небе.

В самых больших угловых масштабах, близких к наблюдаемому в эксперименте COBE DMR, проявляются в основном начальные условия. Эти масштабы столь велики, что даже при

максимальной скоростью звука ($c/\sqrt{3}$), изменения в таких областях будут малы по сравнению с их размерами. Поэтому за время, прошедшее от начала расширения до времени последнего рассеяния РИ, самые крупномасштабные возмущения успевают совершить только малую часть колебания. Возмущения в масштабах больше звукового горизонта почти не меняются и проявляются в спектре мощности в виде плато на низких угловых частотах (больших угловых масштабах), которое отражает первоначальные масштабно-инвариантные возмущения. Без наличия акустических колебаний угловой спектр мощности остался бы плоским вплоть до высоких угловых частот (малых физических масштабов), начиная с которых он бы резко затухал.

Почему же наблюдается четко выраженный первый пик, если все масштабы одинаково осциллируют и в больших угловых масштабах затухание не существенно?

Когда возмущение достигает масштаба около 220000 световых лет на поверхности последнего рассеяния, оно успевает полностью сжаться. Из-за сжатия эта область разогревается, и это проявляется в виде повышенной температуры идущего из нее реликтового излучения.

Если акустическое возмущение имеет размер в два раза меньше, то за это время оно успевает сжаться и расшириться, достигнув максимального разрежения. Температура такой области будет меньше, чем средний фон. В угловом спектре мощности это проявится в виде второго пика на удвоенной частоте, поскольку при построении спектра мощности учитываются квадраты вариаций температур.

Если акустическое возмущение имеет размер в три раза меньше, то оно успевает сжаться, расшириться и вновь сжаться до максимального значения. Так появляется третий пик и так далее. На масштабах третьего пика РИ будет теплее среднего фона. Если возмущение имеет размер $3/4$ от звукового горизонта, оно сжимается и затем расширяется вновь до первоначального размера, поэтому на этом масштабе не будет контраста температуры относительно среднего значения. Таким образом, измеряя среднеквадратичные флуктуации во всех угловых масштабах, мы ожидаем увидеть пики, соответствующие звуковому горизонту, половине звукового горизонта, трети звукового горизонта и т.д. и минимумы флуктуаций между этими пиками. Однако движение колебаний создает дополнительный эффект: в серединной фазе звуковая волна движется с максимальной скоростью и из-за эффекта Доплера в спектре мощности появляется малый вторичный пик, который будет находиться точно в противофазе с максимальным сжатием и расширением. Из-за этого спектр мощности флуктуации между звуковыми пиками несколько отличен от нуля.

Ключевые моменты в этой картине следующие: 1) сжатая сплошная среда горячее; 2) частота колебаний обратно пропорциональна их размеру; 3) колебания прекращаются на поверхности последнего рассеяния; 4) нули колебаний соответствуют максимальному эффекту Доплера от движущейся среды; 5) флуктуации плотности отражаются во флуктуации температуры РИ на поверхности последнего рассеяния.

Все эти эффекты легко сосчитать, так как они зависят только от геометрии и скорости звука. Скорость звука вблизи поверхности последнего рассеяния несколько корректируется из-за барионной нагрузки (барионы становятся более важными по мере того, как Вселенная расширяется, а реликтовое излучение остывает), а также из-за эффектов, связанных с темной материей и даже в небольшой степени с темной энергией. Оказывается, что высота первого пика пропорциональна полному количеству материи во Вселенной, в то время, как второй пик (разрежения) больше зависит от доли барионов во Вселенной и так далее. В результате, подгоняя космологическую модель к наблюдаемым спектрам мощности РИ, можно получить жесткие ограничения на физическую плотность

барионов, темной материи, а также на геометрию пространства-времени.

Первый акустический пик наблюдается на $l \sim 220$, что соответствует угловому масштабу примерно $0,9^\circ$ плоской Вселенной. Уже первые наблюдения установили это и показали, что Вселенная почти плоская. Теперь наблюдения становятся настолько точными, что требуется учитывать малые поправки, которые связаны с возможной вариацией состава Вселенной. Следует учесть, что фотонно-барионная жидкость не полностью радиационно доминирована на поверхности последнего рассеяния. Барионы дают вклад в массу, но не дают вклада в давление такой плазмы. К тому же Вселенная не полностью состоит из вещества, а присутствует заметное содержание темной энергии. Темная энергия стала доминировать на поздних стадиях расширения и несколько изменяет расстояние до поверхности последнего рассеяния, что таким образом несколько изменяет видимые угловые размеры возмущений на небе. Все эти эффекты малы, но их учет становится важным на уровне точности в несколько процентов. Но наиболее важным фактором является геометрия Вселенной, и в рамках общей теории относительности полное содержание энергии во Вселенной близко к критическому значению. В современных моделях это означает $\Omega_{\text{total}} = \Omega_{\text{m}} + \Omega_{\Lambda} = 1,02 \pm 0,02$.

2.2.3. Темная материя и доля барионов во Вселенной. К моменту рекомбинации плотность энергии темной материи уже превышала плотность энергии фотонов. В результате инерция и гравитационный потенциал темной материи служили возвращающей силой для акустических колебаний и прямо воздействовали на их амплитуду. Таким образом, высота акустических пиков пропорциональна полной плотности, обусловленной в основном темной материей. Измеряя высоту пиков, в частности, самого первого, можно хорошо определить физическую плотность такой материи $\Omega_{\text{m}} h^2$.

Барионы (или обычное вещество), находящиеся в фотонно-барионной плазме, дают вклад в инерциальную и гравитационную массу осциллирующей системы. Легко оценить влияние этого эффекта на высоту акустических пиков. Если подвесить массу на пружине и дать ей свободно двигаться в гравитационном поле, то чем больше масса, тем больше максимальное растяжение пружины. Затем под действием сил упругости пружины масса возвращается в первоначальное положение. По аналогии с этим примером добавление барионной нагрузки в осциллирующую фотонно-барионную плазму приводит к тому, что максимальное сжатие возмущения увеличивается (пружина растянута больше), а разрежение остается тем же (пружина возвращается в первоначальное положение).

Поскольку нечетные акустические пики (первый, третий, пятый и т.д.) связаны с тем, как сильно плазма сжимается (падает в гравитационные потенциальные ямы, создаваемые материей), то они усиливаются при увеличении доли барионов во Вселенной. Четные пики (второй, четвертый, шестой) связаны с тем, насколько плазма разрежается (возвращается в первоначальное положение в гравитационном поле под действием упругих сил).

Таким образом, добавление барионов увеличивает контраст нечетных пиков по сравнению с четными. Из-за добавления барионов первый акустический пик становится гораздо больше, чем второй. Чем больше доля барионов, тем сильнее подавлен второй пик по сравнению с первым.

Если барионы составляют незначительную долю всей массы в плазме, то температура PI на дне потенциальной ямы осциллирует симметрично относительно нуля. С добавлением барионов плазма "тяжелее". Внутри потенциальной ямы плазма сжимается сильнее задолго до того, как сила давления остановит сжатие и начнется расширение. колеба-

ния становятся асимметричными в том смысле, что экстремумы, представляющие сжатие внутри потенциальных ям, превышают экстремумы, соответствующие разрежениям. Спектр мощности не зависит от знака флуктуаций и отражает абсолютные значения флуктуаций температур. Таким образом, первый и третий пики усиливаются относительно второго. При аккуратном расчете спектра мощности физическая картина полностью аналогична рассмотренному примеру груза на пружине. Амплитуды нечетных акустических пиков увеличиваются относительно четных по мере того, как возрастает барионная плотность во Вселенной.

Есть и эффекты второго порядка. Поскольку увеличение массы на пружине замедляет осцилляции, добавление барионов в плазму уменьшает частоту осцилляций, сдвигая положение пиков в область несколько больших мультиполей l . (Большая доля барионов означает меньшую скорость звука, поэтому данное число циклов колебаний должно происходить в меньшем объеме $v_s \downarrow \Rightarrow l \uparrow$.) Барионы также меняют характер затухания звуковых волн, что сказывается на падении спектра при больших l . Различные способы проявления барионов в спектре мощности дают возможность проводить независимые измерения барионной плотности во Вселенной. Плотность барионов является тем параметром, который можно измерить по флуктуациям PI с максимальной точностью. Плотность барионов, полученная из наблюдений PI , согласуется с оценками, выводимыми из первичного нуклеосинтеза, и составляет примерно $4,4 \pm 0,4\%$ от критической плотности. Оценка по первичному нуклеосинтезу основана на законах ядерной физики и условиях в первую минуту после начала расширения. Отношения амплитуд акустических пиков PI основаны на законах атомной физики и условиях 380000 лет после начала расширения. Из этого можно сделать вывод о том, что отношение числа барионов к фотонам значительно не менялось на энергетическом масштабе от MэВ до эВ и, вероятно, вплоть до сегодняшнего дня, характеризуемого энергетическим масштабом $1/4000 \text{ эВ}$, т.е. в течение существенной части всей истории расширения Вселенной.

2.2.4 Другие космологические параметры, включая темную энергию и ее уравнение состояния. Анизотропия PI в различной степени чувствительна к ряду других космологических величин, включая плотность темной энергии, ее уравнение состояния, возраст Вселенной, оптическую толщину в эпоху вторичной ионизации, и к изменению наклона спектра первичных возмущений. Угловой спектр мощности PI чрезвычайно чувствителен к некоторым из этих параметров, для других же появляется вырождение или почти вырождение, для снятия которого и получения более точных оценок требуется дополнить измерение PI иными наблюдениями. Все же бесспорно, что анизотропия PI дает очень значительную информацию. В принципе, измерение спектра мощности мультиполей анизотропии PI дает до 3000 независимых параметров, хотя стандартная космологическая модель хорошо описывается всего 20 параметрами. Таким образом, при переходе от миллионов пикселей на картах PI в предположении инвариантности относительно вращений к 3000 числам, характеризующим спектр мощности угловых флуктуаций, и в конечном счете к паре десятков космологических параметров, в задаче оценки параметров появляется значительная переопределенность.

2.3. Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Космический проект WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) был следующим после COBE космологическим проектом НАСА. Карты реликтового излучения WMAP имеют в 45 раз лучшую чувствительность и в 33 раза большее угловое разрешение, чем карты DRM COBE. В эксперименте WMAP используется пять различных частотных полос в диапазоне от

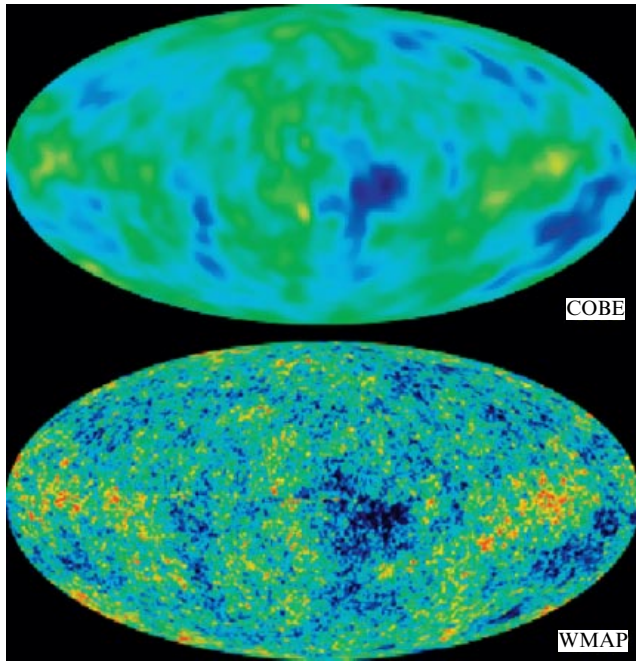


Рис. 16. Визуальное сравнение карт COBE DMR и WMAP. На картах COBE заметны только структуры в масштабах, превышающих горизонт ($\sim 10^\circ$), в то время как угловое разрешение WMAP достаточно для наблюдения деталей структур в масштабах меньше горизонта ($\sim 0,3^\circ$).

23 до 94 ГГц. Целью проекта WMAP было построение карт относительных флуктуаций температуры РИ по всему небу с угловым разрешением $\sim 0,3^\circ$, чувствительностью 20 мкК на пиксель с размерами $0,3^\circ \times 0,3^\circ$ при допустимых систематических погрешностях 5 мкК на пиксель. Данные результатов первого года наблюдений WMAP были опубликованы в феврале 2003 года, а трех лет наблюдений — в марте 2006 года [68]. Эти результаты подтвердили основные предсказания инфляционных теорий и позволили получить сильные ограничения на космологические модели. Лучше всего данные результатов WMAP и других независимых экспериментов описываются в модели Λ CDM (почти плоская Вселенная с содержанием темной энергии $\sim 70\%$, холодной темной материи $\sim 25\%$ и барионного вещества $\sim 5\%$); см. табл. 5 и рис. 17.

Таблица 5. Параметры модели Λ CDM, полученные с использованием результатов только наблюдений WMAP за три года (средний столбец) и с учетом других наблюдений (правый столбец). Ω — плотность в единицах критической плотности

Космологические параметры для Λ CDM модели		
Параметр	3-летние наблюдения WMAP	Все эксперименты*
h_0 (параметр Хаббла)	$73,5 \pm 3,2 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$	$70,8^{+1,5}_{-1,6} \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$
h (приведенный параметр Хаббла)	$0,735 \pm 0,032$	$0,708^{+0,015}_{-0,016}$
n_s (наклон скалярного спектра)**	$0,951 \pm 0,016$	$0,938^{+0,015}_{-0,014}$
$\Omega_b h^2$ (плотность барионов)	$0,0223^{+0,00075}_{-0,00073}$	$0,02193^{+0,00067}_{-0,00068}$
Ω_Λ (плотность энергии)	$0,763 \pm 0,034$	$0,738 \pm 0,016$
Ω_m (плотность материи)	$0,237 \pm 0,034$	$0,262 \pm 0,016$
σ_8 (флуктуации материи на масштабе $8h^{-1} \text{ Мпк}$)	$0,742 \pm 0,051$	$0,751^{+0,032}_{-0,031}$
t_0 (возраст Вселенной)	$13,73^{+0,16}_{-0,15} \text{ млрд лет}$	$13,84 \pm 0,14 \text{ млрд лет}$
τ (оптическая толщина в эпоху вторичной ионизации)	$0,088^{+0,029}_{-0,030}$	$0,070^{+0,027}_{+0,028}$

* Данные экспериментов WMAP, 2df, SDSS, BOOMERanG, ACBAR, CB I, VSA, SN Astier, SN gold, WL и BAO.
** При $k = 0,002 \text{ Мпк}^{-1}$.

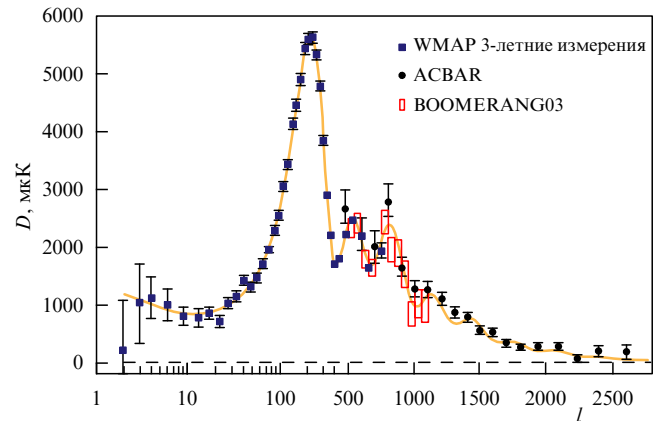


Рис. 17. Угловой спектр флуктуации РИ в модели Λ CDM (сплошная кривая) и данные трех лет наблюдений спутника WMAP, экспериментов ACBAR и BOOMERANG03.

2.4. PLANCK: The Third Generation CMB Project

Космическим проектом третьего поколения является проект Planck. Он выполняется Европейским космическим агентством (ЕКА) и его запуск планируется в 2008 году. В 1992 году в ЕКА были поданы заявки на осуществление двух потенциальных космических экспериментов по измерению РИ: COBRAS и SAMBA. Они были одобрены в виде объединенного проекта COBRAS/SAMBA, который впоследствии был переименован в *PLANCK* в честь немецкого физика Макса Планка. В проекте Planck предусматривается построение карт всего неба на нескольких частотах в диапазоне от 30 до 857 ГГц и измерение анизотропии РИ с угловым разрешением до $5'$ и чувствительностью $\Delta T/T \sim 2 \times 10^{-6}$ [58]. Planck превзойдет WMAP в 10 раз по чувствительности, от 2 до 3 раз по угловому разрешению и в 6 раз по частотному покрытию. Угловое разрешение проектов COBE, WMAP и Planck наглядно проиллюстрировано на рис. 19. Ожидается, что точное измерение РИ в проекте Planck с угловым разрешением в $19'$ позволит ограничить физические теории на масштабе энергии свыше 10^5 ГэВ и произведет настоящую революцию в космологии.

3. Заключительные замечания

Убедительная демонстрация того, что космический микроволновой фон является реликтовым излучением из очень

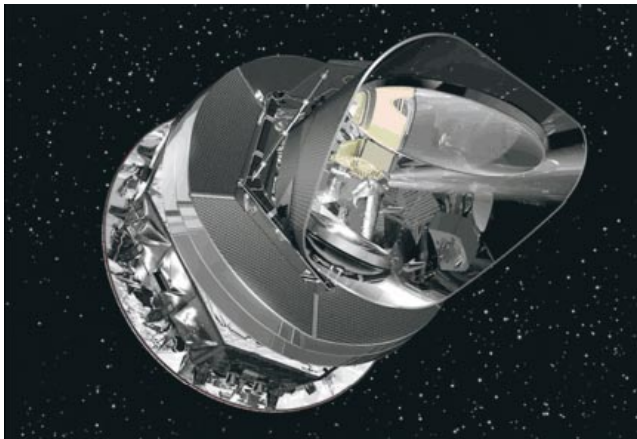


Рис. 18. Спутник Planck в космическом пространстве глазами художника [69].

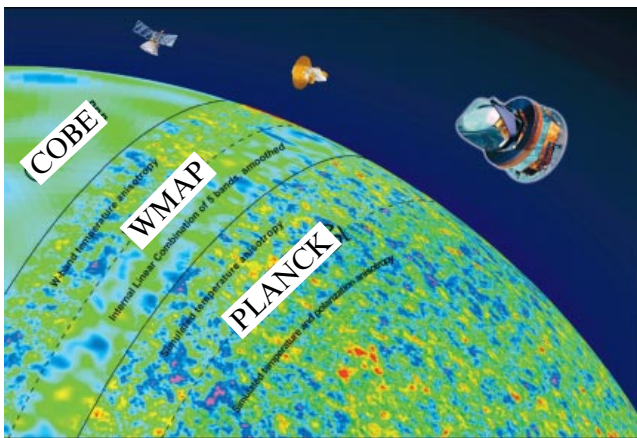


Рис. 19. Схематические изображения улучшения угловой разрешающей способности карт РИ, полученных в экспериментах COBE DMR, WMAP и ожидаемая карта в эксперименте Planck [69].

ранней Вселенной, позволила выполнить обещание, что само его существование и малые флуктуации являются уникальным средством для проверки космологических моделей. Измерение флуктуаций РИ положило начало эре, которую сейчас называют "прецизионная космология". Именно благодаря достигнутой точности космология превратилась в настоящую физическую науку и стала средством для лучшего понимания Вселенной и проверки фундаментальных физических теорий. Наступающая эра проекта Planck с дополнительными наземными экспериментами по измерению РИ и другими космологическими наблюдениями обещает вывести нас на уровень точности лучше 1% для всех космологических параметров. Достижение такой точности в сочетании с дополнительными наблюдениями позволяет не только определить параметры Вселенной, но также строго проверить предположения, сделанные при определении этих параметров.

Еще многие особенности РИ предстоит изучить в полной мере и одним из важнейших вопросов является вопрос о его поляризации. Другая проблема — измерение эффекта Сюняева–Зельдовича на скоплениях галактик. Линейная поляризация РИ возникает при рассеянии реликтовых фотонов на свободных электронах, так как сечение рассеяния на одном свободном электроны имеет квадрупольную угловую анизотропию. Поэтому, как предсказал Мартин Рис в 1968 году, при рассеянии на флуктуациях плотности, произведенных первичными возмущениями, которые в конечном счете

ответственны за формирование крупномасштабной структуры Вселенной, должна возникнуть линейная поляризация РИ. Так как томсоновское рассеяние анизотропного поля излучения также приведет к линейной поляризации, предсказывается, что степень линейной поляризации РИ будет 5% [83]. Эта поляризация наблюдалась в эксперименте DASI [84] и на некоторых других инструментах. В 2003 году эксперимент WMAP продемонстрировал способность измерения ТЕ кросс-корреляционного спектра мощности [64]. Кросс-корреляционный спектр мощности дополнительно подтверждает адиабатическую природу возмущений и непосредственно ограничивает толщину поверхности последнего рассеяния. Поскольку анизотропная поляризация РИ генерируется на этой поверхности последнего рассеяния, существование корреляций в угловых масштабах, намного превышающих один градус, показывает, что во Вселенной существовали флуктуации с длиной волны, превышающей хаббловский горизонт в эпоху рекомбинации. В настоящее время мы все еще находимся на начальной стадии наблюдения и изучения поляризации РИ.

Поляризация РИ может также создаваться различными источниками, которые пока не наблюдаются, например из-за дополнительного рассеяния реликтовых фотонов в эпоху вторичной ионизации или реликтовыми гравитационными волнами, порожденными в инфляционную эпоху, а также из-за наличия мелкомасштабной анизотропии. Ожидается, что измерение поляризации значительно повысит точность определения космологических параметров и будет являться независимым тестом для проверки космологических моделей. Так, измерение В-моды поляризации (вследствие гравитационных волн) позволит получить значительную информацию об энергетическом масштабе инфляционной эпохи. Кроме того, измерения РИ могут быть потенциально использованы для проверки теоретически предсказанных реликтов инфляционной эпохи таких, как топологические дефекты [67], которые напрямую связаны с физикой очень ранней Вселенной ($T \sim 10^{12}$ ГэВ).

Благодарности

Я хотел бы выразить признательность многим сотрудникам, которые внесли вклад в эту работу, в особенности многим моим коллегам, с которыми я сотрудничал на протяжении многих лет, и в частности группе COBE. Развитие космологии является значительным интеллектуальным достижением, основанном на многолетнем труде большого количества ученых, инженеров и технических работников. Часть слайдов и рисунков, которые я использовал в своей нобелевской лекции, были предоставлены моими коллегами, и многих из них я не смог упомянуть. К сожалению, по техническим причинам качество слайдов во время их демонстрации было неидеальным. Среди многих слайдов были и предоставленные мне Доном Грумом, Элом Когутом, Уэйном Ху, Недом Райтом, WMAP+SDSS, Максом Тегмарком, Дэвидом Уилкинсоном, Джулианом Боррилом и другими. Я благодарю ряд моих коллег, особенно аспирантов и постдоков, за обсуждение и комментарии как в настоящее время, так и на протяжении многих лет, а также за их большой энтузиазм и упорные усилия при выполнении различных заданий. Еунхва Джеонг и Брюс Гроссан помогли мне написать этот текст. Работа поддержана Национальной лабораторией им. Лоуренса (Беркли) и физическим факультетом Калифорнийского университета в Беркли.

Перевел с английского К.А. Постнов
Научная редакция перевода С.М. Апенко

Список литературы

1. Penzias A A, Wilson R W "A measurement of excess antenna temperature at 4080 mc/s" *Astrophys. J.* **142** 419–421 (1965)

2. Dicke R H, Peebles P J E, Roll P G, Wilkinson D T "Cosmic black-body radiation" *Astrophys. J.* **142** 414 (1965)
3. Alpher R A, Bethe H, Gamow G "The origin of chemical elements" *Phys. Rev.* **73** 803–804 (1948); Alpher R A, Herman R, Gamow G A "Thermonuclear reactions in the expanding Universe" *Phys. Rev.* **74** 1198–1199 (1948); Alpher R A, Herman R C "The origin and abundance distribution of the elements" *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **2** 1–40 (1953); Alpher R A, Follin J W (Jr.), Herman R C "Physical conditions in the initial stages of the expanding Universe" *Phys. Rev.* **92** 1347–1361 (1953); Alpher R A, Gamow G, Herman R "Thermal cosmic radiation and the formation of protogalaxies" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **58** 2179–2186 (1967); Alpher R A, Herman R "Reflections on early work on 'big bang' cosmology" *Phys. Today* **41** (8) 24 (1988); "Early work on 'big-bang' cosmology and the cosmic blackbody radiation", in *Modern Cosmology in Retrospect* (Eds B Bertotti, R Balbinot, S Bergia) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1990) p. 129
4. Дорошкевич А Г, Новиков И Д *ДАН СССР* **154** 809 (1964) [Doroshkevich A G, Novikov I G *Sov. Phys. Dokl.* **9** 111 (1964)]
5. Dicke R H, Peebles P J *Space Sci. Rev.* **4** 419 (1965)
6. Partridge R B *3K: The Cosmic Microwave Background Radiation* (Cambridge Astrophys. Ser., Vol. 25) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995)
7. Sachs R K, Wolfe A M "Perturbations of a Cosmological Model and angular variations of the microwave background" *Astrophys. J.* **147** 73 (1967)
8. Silk J "Fluctuations in the primordial fireball" *Nature* **215** 1155–1156 (1967)
9. Silk J "Cosmic black-body radiation and galaxy formation" *Astrophys. J.* **151** 459–471 (1968)
10. Hawking S W, Ellis G F R "The cosmic black-body radiation and the existence of singularities in our Universe" *Astrophys. J.* **152** 25 (1968)
11. Sciamia D W "Peculiar velocity of the Sun and the cosmic microwave background" *Phys. Rev. Lett.* **18** 1065 (1967)
12. Partridge R B, Wilkinson D T *Phys. Rev. Lett.* **18** 557 (1967)
13. Rees M J "Polarization and spectrum of the primeval radiation in an anisotropic Universe" *Astrophys. J.* **153** L1 (1968)
14. Sunyaev R A, Zeldovich Ya B *Comm. Astrophys. Space Phys.* **4** 173 (1972); *Astrophys. Space Sci.* **7** 3 (1970)
15. Birkinshaw M *Phys. Rep.* **310** 97 (1999)
16. Hawking S W "On the rotation of the Universe" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **142** 129–141 (1969)
17. Fackler O, Frisch D, Martin J, Smoot G, Sompayrac L "Test of the $\Delta S = \Delta Q$ rule in K_s^0 decay" *Phys. Rev. Lett.* **31** 847–850 (1973); Smoot G F, Fackler O D, Frisch D H, Martin J F, Sompayrac L M " K^0 production by K^+ on platinum at 3 GeV/c" *Nucl. Phys. B* **96** 379–400 (1975)
18. Peebles P J E *Physical Cosmology* (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1971); *Principles of Physical Cosmology* (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1993) p. 168
19. Stewart J M, Sciamia D W "Peculiar velocity of the Sun and its relation to the cosmic microwave background" *Nature* **216** 748 (1967)
20. Smoot G F, Gorenstein M V, Muller R A "Detection of anisotropy in the cosmic blackbody radiation" *Phys. Rev. Lett.* **39** 898 (1977)
21. Gorenstein M V, Smoot G F "Large-angular-scale anisotropy in the cosmic background radiation" *Astrophys. J.* **244** 361–381 (1981)³
22. Gorenstein M V, Muller R A, Smoot G F, Tyson A J "Radiometer system to map the cosmic background radiation" *Rev. Sci. Instrum.* **49** 440 (1978)
23. Smoot G F, Lubin P M "Southern Hemisphere measurements of the anisotropy in the cosmic microwave background radiation" *Astrophys. J. Lett.* **234** L83–L86 (1979)
24. Smoot G F "'Aether drift' and the isotropy of the Universe: A measurement of anisotropies in the primordial black-body radiation", Semi-Annual Report, Ser. 20, No. 17, 1 Nov. 1978–31 Oct. 1979 (Berkeley: Univ. of California, Lawrence Berkeley Lab., 1978–1979)⁴
25. Janssen M, Bednarczyk S, Gulkis S, Marlin H, Smoot G "Pattern measurements of a low-sidelobe horn antenna" *IEEE Trans. Anten. Propag.* **AP-27** 551–555 (1979)
26. Toral M A, Ratliff R B, Lecha M C, Maruschak J G, Bennett C L, Soot G F "Measurements of very low-sidelobe conical horn antennas" *IEEE Trans. Anten. Propag.* **AP-37** 171–177 (1989)
27. Nanos G P (Jr.) "Polarization of the blackbody radiation at 3.2 centimeters" *Astrophys. J.* **232** 341–347 (1979)
28. Lubin P M, Smoot G F "Search for linear polarization of the cosmic background radiation" *Phys. Rev. Lett.* **42** 129–132 (1979)
29. Lubin P, Melese P, Smoot G "Linear and circular polarization of the cosmic background radiation" *Astrophys. J. Lett.* **273** L51–L54 (1983)
30. Lubin P M, Epstein G L, Smoot G F "3-mm anisotropy measurement and the quadrupole component in the cosmic background radiation" *Phys. Rev. Lett.* **50** 616 (1983); Lubin P, Vilella T, Epstein G, Smoot G "A map of the cosmic background radiation at 3 millimeters" *Astrophys. J. Lett.* **298** L1–L5 (1985)
31. Lubin P M, Epstein G L, Smoot G F "Four-WAY stretch Universe denied" *Sci. News* **123** 126 (1983); Friedmann A A, Boynton P, Melchiorri F, Smoot G "A possible 4-WAY stretch in the Universe" *Sci. News* **117** 54 (1980)
32. Lubin P, Vilella T, Epstein G, Smoot G F "A map of the cosmic background radiation at 3 millimeters" *Astrophys. J. Lett.* **298** L1–L5 (1985)⁵
33. Peebles P J E *Principles of Physical Cosmology* (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1993) p. 168
34. Roll P G, Wilkinson D T "Cosmic background radiation at 3.2 cm — support for cosmic black-body radiation" *Phys. Rev. Lett.* **16** 405 (1966); "Measurement of cosmic background radiation at 3.2-cm wavelength" *Ann. Phys. (New York)* **44** 289 (1967)
35. Stokes R A, Partridge R B, Wilkinson D T "New measurements of the cosmic microwave background at $\lambda = 3.2$ cm and $\lambda = 1.58$ cm — evidence in support of a blackbody spectrum" *Phys. Rev. Lett.* **19** 1199–1202 (1967); Wilkinson D T "Measurement of the cosmic microwave background at 8.56-mm wavelength" *Phys. Rev. Lett.* **19** 1195–1198 (1967); Boynton P E, Stokes R A, Wilkinson D T "Primeval fireball intensity at $\lambda = 3.3$ mm" *Phys. Rev. Lett.* **21** 462 (1968)
36. Danese L, de Zotti G "The relic radiation spectrum and the thermal history of the Universe" *Nuovo Cimento Riv. Ser. 2* **7** 277–362 (1977)

³ Представлены результаты продолжительной серии измерений анизотропии трехградусного космического реликтового фона, проведенные с борта самолета. Двухантенный микроволновой радиометр, работающий на частоте 33 ГГц, был установлен на борту самолета У-2, совершившего 11 полетов на высоте 20 км в период с декабря 1976 года по май 1978 года. Была измерена дифференциальная интенсивность в двух направлениях, охватывающих практически все Северное полушарие. В измерениях четко видна анизотропия, которая интерпретируется как следствие движения Солнца относительно источника наблюдения. Анизотропия хорошо описывается сферической гармоникой первого порядка с амплитудой $3,6 \pm 0,5$ мК, соответствующих скорости движения 360 ± 50 км/с в направлении $11,2 \pm 0,5$ часов прямого восхождения и 19 град ± 8 град склонения.

⁴ Обнаружена анизотропия 3-градусного чернотельного реликтового излучения в больших угловых масштабах и построены карты реликтового фона с чувствительностью 2×10^{-4} К и угловым разрешением около 10 град. Измерено движение Земли относительно далекого вещества во Вселенной ("увлечение эфира") и проверена однородность и изотропия Вселенной ("космологический принцип"). В эксперименте используются два радиометра Дикке, один — на частоте 33 ГГц для определения космической анизотропии, а другой — на частоте 54 ГГц для определения анизотропии в остаточном кислороде над детектором. Система была установлена на самолете У-2, используемом для мониторинга поверхности Земли по программе NASA-Ames, и успешно функционировала в серии полетов в Северном и Южном полушариях. Получение и анализ данных по измерению анизотропии были успешными.

⁵ Представлены данные по измерению крупномасштабной угловой анизотропии космического чернотельного излучения на длине волны 3,3 мм, полученные в серии баллонных полетов как в Северном, так и в Южном полушариях. Данные покрывают 85 % неба с предельной чувствительностью 0,7 мК в поле зрения 7 град. В данных обнаруживается дипольная анизотропия на уровне 50σ (только статистическая ошибка) с амплитудой $3,44 \pm 0,17$ мК в направлении $\alpha = 11,2h \pm 0,1$ и $\delta = -6,0^\circ \pm 1,5^\circ$. Верхний предел на доверительном уровне 90 % на среднеквадратичную амплитуду квадрупольной составляющей 0,00007. В полетах, разделенных интервалом времени в 6 месяцев, проявляется движение Земли вокруг Солнца. Галактические шумы очень малы и дают вклад менее 0,1 мК в дипольную и квадрупольную анизотропию. По этим данным построены карты неба.

37. Danese L, de Zotti G "Double Compton process and the spectrum of the microwave background" *Astron. Astrophys.* **107** 39 (1982)
38. Smoot G F, De Amici G, Friedman S D, Witebsky C, Mandolesi N, Partridge R B, Sironi G, Danese L, De Zotti G "Low-frequency measurement of the spectrum of the cosmic background radiation" *Phys. Rev. Lett.* **51** 1099–1102 (1983); "New multifrequency measurements of the spectrum of the cosmic background radiation", in *Classical Relativity and Gravitation: Proc. of the 10th Intern. Conf. on General Relativity and Gravitation, July 4–9, 1983, Padova, Italy* Vol. 1 (Eds B Bertotti, F de Felice, A Pascolini) (Rome: Consiglio Nazionale delle Ricerche, 1983) p. 865
39. Smoot G, de Amici G, Friedman S D, Witebski C, Mandolesi N, Partridge R B, Sironi G, Danese L, de Zotti G "New multifrequency measurements of the spectrum of the cosmic background radiation", in *High-Energy Astrophysics and Cosmology: Proc. of the COSPAR/IAU Symp., Pamporovo, Bulgaria, July 18–23, 1983* (Eds G F Bignami, R A Sunyaev) (Oxford: Pergamon Press, 1984) p. 465; *Adv. Space Res.* **3** (10–12) 465–467 (1984)
40. Smoot G F, Bensadoun M, Bersanelli M, de Amici G, Kogut A, Levin S, Witebsky C "Long-wavelength measurements of the cosmic microwave background radiation spectrum" *Astrophys. J. Lett.* **317** L45–L49 (1987)
41. Smoot G, Levin S M, Witebsky C, de Amici G, Rephaeli Y "An analysis of recent measurements of the temperature of the cosmic microwave background radiation" *Astrophys. J.* **331** 653–659 (1988)
42. Johnson D G, Wilkinson D T "A 1% measurement of the temperature of the cosmic microwave radiation at $\lambda = 1.2$ cm" *Astrophys. J. Lett.* **313** L1–L4 (1987)
43. Staggs S T et al. "A measurement of the cosmic background spectrum at 1.4 GHz" *Astrophys. Lett. Commun.* **32** 3–6 (1995)
44. Fixsen D J, Kogut A, Levin S, Limon M, Lubin P, Mirel P, Seiffert M, Wollack E "The temperature of the cosmic microwave background at 10 GHz" *Astrophys. J.* **612** 86–95 (2004)⁶
45. Mather J C et al. "Measurement of the cosmic microwave background spectrum by the COBE FIRAS instrument" *Astrophys. J.* **420** 439–444 (1994)
46. Smoot G, Bennett C, Weber R, Maruschak J, Ratliff R, Janssen M, Chitwood J, Hilliard L, Lecha M, Mills R, Patschke R, Richards C, Backus C, Mather J, Hauser M, Weiss R, Wilkinson D, Gulkis S, Boggess N, Cheng E, Kelsall T, Lubin P, Meyer S, Moseley H, Murdock T, Shafer R, Silverberg R, Wright E "COBE differential microwave radiometers — instrument design and implementation" *Astrophys. J.* **360** 685–695 (1990)
47. Smoot G F et al. "Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps" *Astrophys. J.* **396** L1–L5 (1992)
48. Davis R L, Hodges H M, Smoot G F, Steinhart P J, Turner M S "Cosmic microwave background probes models of inflation" *Phys. Rev. Lett.* **69** 1856–1859 (1993); Smoot G F, Steinhart P J "Gravity's rainbow (microwave anisotropy and gravitational waves)" *Class. Quantum Grav.* **10** S19–S32 (1993)
49. Smoot G F et al. "Statistics and topology of the COBE differential microwave radiometer first-year sky maps" *Astrophys. J.* **437** 1–11 (1994)
50. Torres S, Aymon J, Backus C, Bennett C, Gulkis S, Hollenhorst R, Hon D, Huang Q H, Janssen M, Keihm S, Olson L, Smoot G F, Wright E "Cosmic background Explorer/COBE/Satellite anisotropy experiment data analysis techniques", in *Proc. of the Third Intern. Workshop on Data Analysis in Astronomy, June 20–27, 1988, Erice, Sicily, Italy* (Ettore Majorana Intern. Sci. Ser. Phys. Sci., Vol. 40, Eds V Di Gesù, L Scarsi, P Crane, J H Friedman, S Levialdi, M C Maccarone) (New York: Plenum Press, 1989) p. 319
51. Spergel D N et al. "Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) three year results: Implications for cosmology", *astro-ph/0603449*; "Three-year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: Implications for cosmology" *Astrophys. J. Suppl.* **170** 377 (2007)
52. Smoot G F "The cosmic microwave background anisotropy experiments", *astro-ph/9705135*
53. Seljak U, Zaldarriaga M *Astrophys. J.* **469** 437 (1996)
54. Keegstra P B, Smoot G F, Gorski K M, Hinshaw G, Tenorio L "Generalized spherical harmonics for all-sky polarization studies", in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI* (Astron. Soc. of the Pacific Conf. Ser., Vol. 125, Eds G Hunt, H E Payne) (San Francisco, Calif.: Astron. Soc. of the Pacific, 1997) p. 198
55. Kogut A, Banday A J, Bennett C L, Gorski K M, Hinshaw G, Jackson P D, Keegstra P, Lineweaver C, Smoot G F, Tenorio L, Wright E L "Calibration and systematic error analysis for the COBE DMR 4 year sky maps" *Astrophys. J.* **470** 653 (1996)
56. Perlmutter S et al. "Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae" *Astrophys. J.* **517** 565–586 (1999)
57. Riess A G et al. "Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant" *Astron. J.* **116** 1009–1038 (1998); *astro-ph/9805201*
58. Planck Science Team, PLANCK BLUEBOOK, <http://www.rssd.esa.int/Planck/>
59. Smoot G, Davidson K *Wrinkles in Time* (New York: Avon Books, 1993)
60. Smoot G F "COBE observations of the early universe" *J. R. Astron. Soc. Can.* **88** 114 (1994)
61. Wright E L et al. "Interpretation of the cosmic microwave background radiation anisotropy detected by the COBE Differential Microwave Radiometer" *Astrophys. J.* **396** L13–L18 (1992)
62. Boggess N W et al. "The COBE mission — Its design and performance two years after launch" *Astrophys. J.* **397** 420–429 (1992)
63. Hu W, Dodelson S *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **40** 171 (2002); Carlstrom J E, Holder G P, Reese E D *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **40** 643 (2002)
64. Kogut A et al. *Astrophys. J. Suppl.* **148** 161 (2003)
65. Hu W, Dodelson S *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **40** 171 (2002)
66. COBE: Cosmic Background Explorer, <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>
67. Smoot Group. Astrophysics & Cosmology, <http://cosmos.lbl.gov/>
68. WMAP, Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, <http://map.gsfc.nasa.gov/>
69. Planck Science Team Home, <http://www.rssd.esa.int/Planck/>
70. Harrison E R "Fluctuations at the threshold of classical cosmology" *Phys. Rev. D* **1** 2726 (1970); Peebles P J E, Yu J T "Primeval adiabatic perturbation in an expanding universe" *Astrophys. J.* **162** 815 (1970); Zel'dovich Ya B "A hypothesis, unifying the structure and entropy of the universe" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **160** 1P (1972)
71. Cheng E S, Saulson P R, Wilkinson D T, Corey B E "Large-scale anisotropy in the 2.7 K Radiation" *Astrophys. J. Lett.* **232** L139–L143 (1979)
72. Boughn S P, Cheng E S, Wilkinson D T "Dipole and quadrupole anisotropy of the 2.7 K radiation" *Astrophys. J. Lett.* **243** L113–L117 (1981)
73. Fixsen D J, Cheng E S, Wilkinson D T "Large-scale anisotropy in the 2.7-K radiation with a balloon-borne maser radiometer at 24.5 GHz" *Phys. Rev. Lett.* **50** 620–622 (1983)
74. Uson J M, Wilkinson D T "Small-scale isotropy of the cosmic microwave background at 19.5 GHz" *Astrophys. J.* **283** 471–478 (1984); "Improved limits on small-scale anisotropy in cosmic microwave background" *Nature* **312** 427–429 (1984)
75. Timbie P T, Wilkinson D T "A search for anisotropy in the cosmic microwave radiation at medium angular scales" *Astrophys. J.* **353** 140–144 (1990)
76. Conklin E K, Bracewell R N *Phys. Rev. Lett.* **18** 614 (1967)
77. Fixsen D J et al. *Astrophys. J.* **473** 576 (1996)
78. Peebles P J E, Yu J T *Astrophys. J.* **162** 815 (1970)
79. Sciamia D W "Eppur Si Muove" *Comm. Astrophys. Space Phys.* **4** 35 (1972)
80. Carlstrom J E, Joy M, Grego L, Holder G, Holzapfel W L, LaRoque S, Mohr J J, Reese E D "The Sunyaev–Zel'dovich effect: Results and future prospects", in *Constructing the Universe with Clusters of Galaxies, IAP 2000 Meeting, Paris, France, July 2000* (Eds F Durret, D Gerbal); *astro-ph/0103480*
81. South Pole Telescope, <http://spt.uchicago.edu/>; http://cosmology.berkeley.edu/group/swlh/sp_telescope/
82. Jarosik N et al. "Three-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: beam profiles, data processing, radiometer characterization, and systematic error limits", *astro-ph/0603452*; *Astrophys. J. Suppl.* **170** 263 (2007)
83. Hu W, White M *Astrophys. J.* **479** 568 (1997)
84. Kovac J M, Leitch E M, Pryke C, Carlstrom J E, Halverson N W, Holzapfel W L "Detection of polarization in the cosmic microwave background using DASI" *Nature* **420** 772–787 (2002); Leitch E M, Kovac J M, Halverson N W, Carlstrom J E, Pryke C, Smith M W E "Degree Angular Scale Interferometer 3 year cosmic microwave background polarization results" *Astrophys. J.* **624** 10–20 (2005)

⁶ Измеренная радиометрическая температура КИ $2,721 \pm 0,010$ К при 10 ГГц и $2,694 \pm 0,032$ К при 30 ГГц.