

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ 1978 ГОДА

523.164

КОСМИЧЕСКОЕ МИКРОВОЛНОВОЕ ФОНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ *)

Р. Вильсон

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиоастрономия значительно увеличила наши возможности исследования структуры и динамики Вселенной. Один из наиболее весомых вкладов в наше понимание этой проблемы дало открытие космического микроволнового фонового излучения, которое, по-видимому, является остатком взрывного события в момент образования Вселенной. Эта статья посвящена открытию космического микроволнового фонового излучения. Она начинается с раздела об измерительной радиоастрономической технике. За ней следует история обнаружения фонового излучения, его идентификация и в заключение дана сводка современных сведений о его свойствах.

2. РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Радиотелескоп, направленный на небо, принимает излучение не только из космического пространства, но также и от других источников, включая Землю, земную атмосферу и компоненты самого радиотелескопа. Используемая для обнаружения микроволнового фонового космического излучения антенна 20-футового рупорного рефлектора в лабораториях «Белл» была, в частности, приспособлена для того, чтобы отделить это слабое однородное излучение от других более мощных источников. Чтобы понять процесс измерений, необходимо обсудить конструкцию и действие радиотелескопа, в особенности две его наиболее важные части: антенну и радиометр ¹.

а) Антенна

Антенна, нацеленная в заданном направлении, принимает излучение, которое падает на ее поверхность, называемую апертурой, и фокусирует его на приемник. Антенна обычно проектируется так, чтобы максимально увеличить чувствительность в направлении, на которое она наведена, и минимизировать ее в других направлениях.

Показанный на рис. 1 20-футовый рупорный рефлектор был построен А. Б. Кроуфордом и его сотрудниками ² в 1960 г., чтобы использовать его совместное с приемником связи ультранизкого шума для приема сигналов, отраженных от спутника «Эхо». Он состоит из большого расширяющегося волновода или рупора, с внеосевым параболическим рефлектором на конце. Фокус параболоида расположен в апексе рупора, так что аксиально-сим-

*) Wilson Robert W. The Cosmic Microwave Background Radiation: Nobel Lecture, December 8, 1978.— Перевод В. А. Догеля.

© The Nobel Foundation 1978.

© Перевод на русский язык,
Главная редакция физико-математической
литературы издательства «Наука»,
«Успехи физических наук» 1979

метричная плоская волна фокусируется на приемник в горловине рупора, конструкция которого хорошо заэкранирована от излучения Земли. Как легко видеть из рисунка, при такой конфигурации приемник хорошо закрыт от Земли рупором.

На рис. 2 показано измерение чувствительности антенны малого рупорного рефлектора к излучению, приходящему из различных направлений.

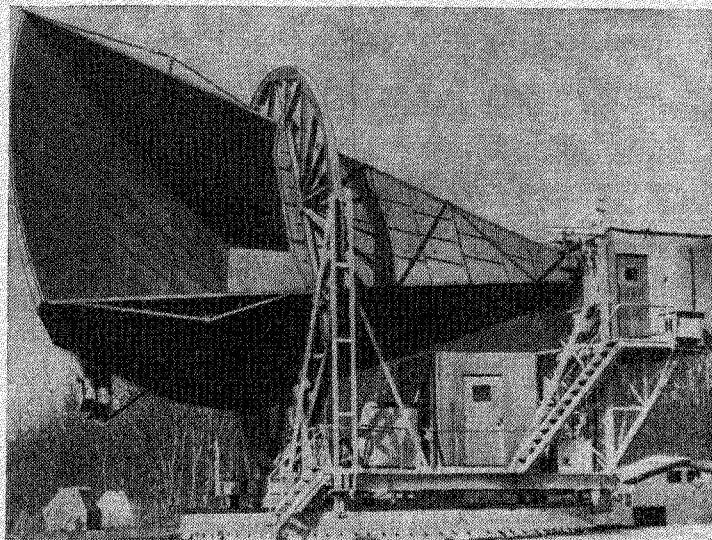


Рис. 1. 20-футовый рупорный рефлектор, который использовался для обнаружения космического микроволнового фонового излучения.

Круг, обозначенный изотропной антенной, показывает чувствительность воображаемой антенны, которая принимает одинаково со всех направлений. Если бы такая изотропная, свободная от потерь антенна была установлена в открытом поле, то она была бы одинаково чувствительна к излучению Земли и к излучению неба. У рупорного рефлектора чувствительность в направлении, обратном главному, меньше $1/3000$ чувствительности изотропной антенны. Если бы изотропная антенна принимала излучения Земли, температура которой 300 К, и холодного неба с температурой 0 К, то половина отклика антенны была бы связана с Землей, а другая половина с небом. В результате эквивалентная температура антенны была бы равна 150 К. В противоположность этому рупорный рефлектор принимал бы излучение от Земли с эквивалентной температурой менее 0,05 К.

Из такой картины чувствительности можно определить характеристики идеальной, с отсутствием потерь, антенны, поскольку такая антенна не дает вклада в общий измеряемый поток. Точно так же, как кривое зеркало может сфокусировать горячие лучи от Солнца и зажечь кусок бумаги, не нагреваясь, радиотелескоп может сфокусировать излучение холодного неба, не мешая своим собственным излучением.

б) Радиометр

Радиометр является устройством для измерения интенсивности излучения. Микроволновой радиометр состоит из фильтра выделения требуемого интервала частоты, за ним следует детектор, выходное напряжение которого пропорционально его входной мощности. Обычно чувствитель-

ность действующих детекторов недостаточна для низких уровней мощности сигнала, принимаемого радиотелескопом, поэтому для увеличения уровня сигнала перед детектором устанавливается усилитель. Шум от первого каскада этого усилителя и от линии связи, которая соединяет усилитель с антенной (входным источником), производит выходной сигнал детектора даже тогда, когда отсутствует входной сигнал от антенны. Основным пределом чувствительности радиометра являются флуктуации в уровне мощности этих шумов.

В конце 1950 г. Х. Э. Д. Сквилл и его сотрудники из лабораторий «Белл» и Мюррей Хил создавали микроволновые усилители с самым низким в мире уровнем шумов — рубиновые лазеры бегущей волны³. Эти усилители охлаждались жидким гелием до температуры 4,2 К или даже меньше, и передавали системе соответственно малое количество шума. Поэтому радиометр, соединенный с этими усилителями, мог быть очень чувствительным.

Астрономические радиоисточники производят хаотический тепловой шум, который очень похож на шум от горячего резистора, поэтому калибровка радиометра выражается в единицах тепловой системы. Вместо того, чтобы задавать мощность шума, которую радиометр получает от антенны, мы задаем температуру резистора, который бы посылал на радиометр ту же мощность шума. (Радиометры часто содержат калибровочный источник шума, представляющий собой резистор с известной температурой.) Эта «эквивалентная температура шума» пропорциональна получаемой мощности для всех длин волн, за исключением очень коротких, о чем речь будет идти ниже.

в) Наблюдения

Для того чтобы измерить радиотелескопом интенсивность внеземных радиоисточников, необходимо выделить этот источник из шума локальных источников — радиометра, Земли, земной атмосферы и самой антенны. Этого можно достигнуть, если наводить антенну попеременно на интересующий нас источник и на область фона поблизости от него. Долю локального шума можно вычесть, измеряя разницу в отклике радиометра для

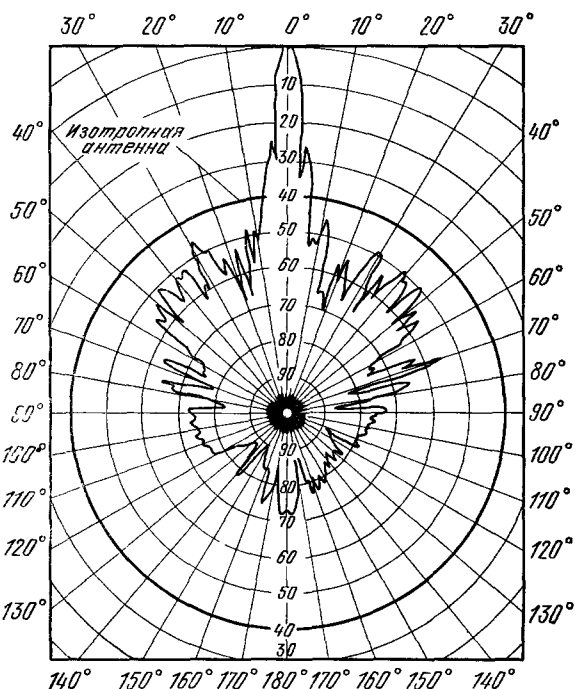


Рис. 2. Картина чувствительности малой антенны рупорного рефлектора.

График (в логарифмическом масштабе) зависимости чувствительности антенны от угла, отсчитываемого от главного лепестка диаграммы направленности антенны. Каждый круг ниже уровня главного лепестка обозначает уменьшение чувствительности на порядок. В направлении заднего лепестка антенны (180°) чувствительность падает на круг с отметкой 70, что соответствует уменьшению чувствительности на величину 10^{-2} от нулевого уровня.

этих двух областей. Чтобы определить абсолютную интенсивность астрономического радиисточника, необходимо откалибровать антенну и радиометр или, как обычно и делается, пронаблюдать калибровочный источник известной интенсивности.

3. РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ПЛАНЫ РАБОТЫ С 20-ФУТОВЫМ РУПОРНЫМ РЕФЛЕКТОРОМ

В 1963 г., когда 20-футовый рупорный рефлексор был больше не нужен для работы со спутником, Арно Пензиас и я начали готовить его для использования в радиоастрономии. Может возникнуть вопрос, почему мы намеревались начать наши радиоастрономические исследования в лабораториях «Белл», используя антенну с апертурой только в 25 кв. метров, когда имелись значительно большие радиотелескопы. Ответ заключен в специфических особенностях 20-футового рупорного рефлексора. Его чувствительность или апертура может быть точно вычислена и, кроме того, измерена с помощью передатчика, расположенного на расстоянии, меньшем 1 км. Зная эти параметры, можно было использовать рефлексор вместе с откалиброванным радиометром для простейших измерений интенсивности нескольких внеземных радиисточников. Эти источники могли бы быть использованы в будущем как вторичные стандарты другими обсерваториями. Кроме того, нам удалось бы определить все источники шума антенны, например, количество излучения, приходящего от Земли, так что излучение фоновых областей было бы измерено абсолютно. Возможность использования мазерного усилителя бегущей волны совместно с 20-футовым рупорным рефлексором делало этот радиотелескоп самым чувствительным в мире для источников с угловыми размерами, превышающими угол раствора антенны.

Мой интерес к проведению фоновых измерений на 20-футовом рупорном радиотелескопе зародился в процессе работы над диссертацией в Калтехе (Калифорнийский технологический институт), где я работал вместе с Дж. Г. Болтоном. Мы составили карту излучения Млечного Пути на 31 см и изучили распределение дискретных источников и диффузного газа в нем. Метод построения был следующим. Антенна наводилась на западную часть Млечного Пути и затем из-за вращения Земли сканировала его поперек. При такой методике все локальные шумы оставались постоянными, включая излучение, которое антенна принимала от Земли. Области по обеим сторонам Млечного Пути, где яркость становилась постоянной, брались в качестве нулевого уровня. Поскольку мы находимся внутри Галактики, невозможно выбрать такое направление, чтобы луч зрения находился вне нее. Поэтому применяемый метод не удовлетворял нас полностью, но он был вполне достаточен для этих исследований. Низкочастотные измерения указывали, что вокруг нашей Галактики есть большое радиоизлучающее гало, которое я не смог бы обнаружить таким методом. Однако 20-футовый рупорный рефлексор является идеальным инструментом для изучения этого слабого гало на более коротких длинах волн. Когда я пришел в лаборатории «Белл», в мои планы уже входило проведение таких измерений.

В 1963 г. на 20-футовом рупорном рефлексоре был установлен мазер с длиной волны 7,35 см⁴. Однако прежде чем начать радиоастрономические измерения, мы должны были сделать два дела: 1) построить хороший радиометр, включающий мазерный усилитель на 7,35 см, и 2) закончить точные измерения апертуры (чувствительности) 20-футового рупорного рефлексора, которые начал Д. К. Хогг. Наши планы работы на 7 см включали измерение абсолютной интенсивности нескольких традицион-

ных астрономических источников, используемых для калибровки, и получение серии сканирований Млечного Пути как продолжение моей диссертационной работы. Из имеющихся низкочастотных наблюдений мы ожидали, что вне Млечного Пути наша Галактика должна иметь на 7 см яркостную температуру меньше 0,1 К. Таким образом, фоновые измерения должны были дать нулевой результат, и это было бы хорошей проверкой наших измерительных способностей.

После завершения этой программы измерений на 7 см мы планировали построить подобный радиометр на 21 см. На этой длине волны галактическое гало должно быть достаточно ярким для обнаружения. Мы также собирались наблюдать распределение нейтрального водорода в линии 21 см и планировали несколько экспериментов по нейтральному водороду, включая (как продолжение измерений, проведенных в диссертации Арно) исследование распределения водорода в скоплениях галактик.

Когда мы строили радиометр на 7 см, нас посетил Джон Болтон. Мы перечислили ему наши проекты и попросили их прокомментировать. Он сразу же выбрал самый трудный и самый важный: фоновые измерения на 21 см. Однако сначала мы должны были закончить наблюдения на 7 см.

4. РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Прежде всего было необходимо суметь выполнить точные измерения температуры антенны. Для того чтобы сделать это, мы должны были найти возможность использовать радиометр таким образом, чтобы сравнить температуру антенны с температурой эталонного источника, в данном случае излучателя в жидком гелии. Я собрал переключатель, который мог соединять мазерный усилитель либо с антенной, либо с охлажденным в жидком гелии эталонным источником шума Арно⁵ (холодная нагрузка). Это позволяло провести точное сравнение эквивалентной температуры антенны с температурой холодной нагрузки, так как шум от радиометра не менялся во время переключения. Диаграмма этой калибровочной системы⁶ показана на рис. 3 и ее действие описывается ниже.

а) Переключатель

Переключатель для сравнения температур холодного источника и антенны, показанный на рис. 3, состоял из двух поляризационных ответвителей и вращателя поляризации. Такой тип переключателя Д. Х. Ринг

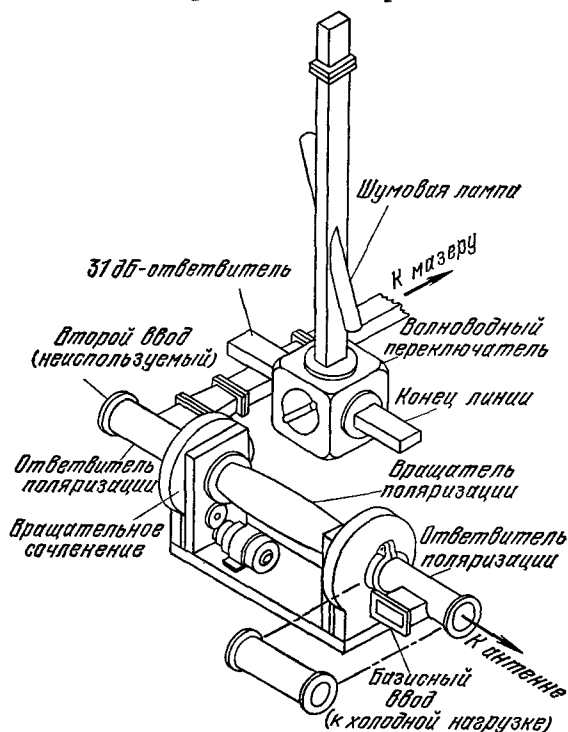


Рис. 3. Переключатель и система калибровки нашего 7,35 см-радиометра.

Входное отверстие обычно соединялось через аттенуатор, имеющий дополнительный шум, с охлажденным в гелии эталонным источником.

использовал на нескольких радиометрах в Холмделе. Он дает выигрыш в стабильности, имеет низкие потери и малое отражение. Круговой волновод, идущий от антенны, пропускает две ортогональные моды поляризации, принимаемые антенной. Первый ответвитель отражает одну моду поляризации обратно на антенну и заменяет ее в волноводе, идущем на вращатель, сигналом от холодной нагрузки. Второй поляризационный ответвитель выбирает одну из двух линейнополяризованных мод, приходящих с поляризационного вращателя, и направляет ее в прямоугольный (одномодовый) волновод, который идет к мазеру. Вращатель поляризации является микроволновым эквивалентом полуволновой пластинки в оптике. Он представляет собой часть кругового волновода, который в середине деформирован таким образом, что в сечении образуется эллипс. Характер деформации таков, что для проходящих сквозь вращатель волн с линейной поляризацией, соответствующей главным осям эллипса, образует фазовый сдвиг в 180° . Если этот волновод вращается, то вращается и поляризация сигналов, проходящих сквозь него. Таким образом, с мазером оказываются связанными либо антенна, либо холодная нагрузка.

Такой тип переключателя не является совершенно симметричным, но потери в нем очень низкие и он стабилен, так что его асимметрия в 0,05 К была точно измерена и скорректирована.

б) Э т а л о н н ы й и с т о ч н и к ш у м а

На рис. 4 показан чертеж эталонного источника шума, охлаждаемого в жидком гелии. Он состоит из куска волновода (длиной 122 см) из латуни с 90% содержанием меди. Волновод соединяет тщательно подобранный

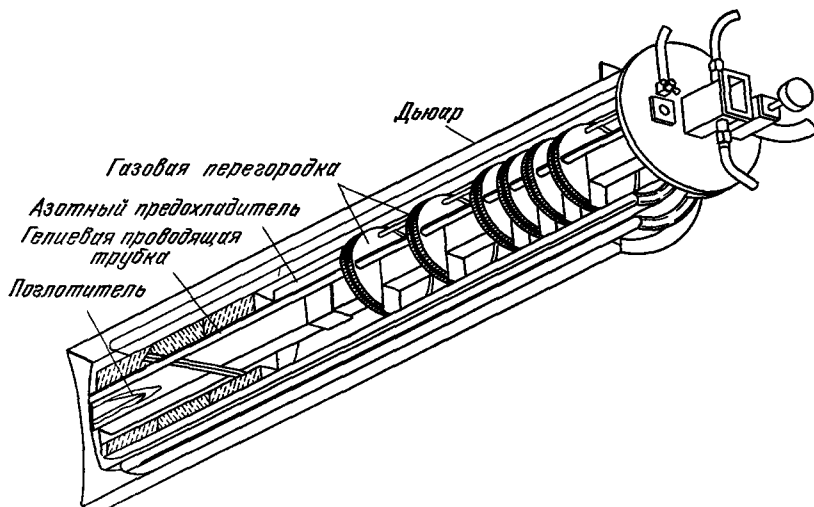


Рис. 4. Охлажденный в гелии эталонный источник шума.

микроволновый поглотитель, находящийся в жидком гелии, с фланцем в верхней части, находящемся при комнатной температуре. Жидкий гелий сквозь маленькие отверстия заполняет нижнюю часть волновода и, таким образом, температура поглотителя известна. В то же время майларовое окно, расположенное под углом в 30° , препятствует выходу жидкости в остальную часть волновода и образует между двумя частями волновода микроволновой переход с низким отражением. Остальные части источника также охлаждены. С помощью газовых перегородок создается обмен теп-

лом между волноводом и испарившимся гелиевым газом, что значительно увеличивает время использования загруженного жидкого гелия. Двадцать литров гелия охлаждали «холодную» нагрузку и их хватало примерно на двадцать часов работы.

Выше уровня жидкого гелия температура стенок волновода превышала 4,2 К. Излучение из-за потерь в этой части волновода могло увеличить температуру источника шума выше 4,2 К, что необходимо было учитывать. Для этого мы следили за температурным распределением вдоль волновода с помощью нескольких диодных термометров и затем вычисляли вклад каждой части волновода в эквивалентную температуру эталонного источника. В начале охлаждения вычисленная общая температура эталонного источника шума была порядка 5 К, а спустя несколько часов, когда уровень жидкого гелия понизился, она увеличилась до 6 К. Для контроля этой процедуры калибровки мы в течение этого периода сравнивали температуру антенны (предполагаемую постоянной) и эффективную температуру эталонного источника шума, и обнаружили совпадение в пределах 0,1 К.

в) К а л и б р о в к а м а с ш т а б а

Обычно между холодной нагрузкой и соответствующим входом радиометра помещался переменный аттенюатор. Поскольку это устройство находилось при комнатной температуре, то с увеличением ослабления сигнала на вход переключателя от холодной нагрузки шел дополнительный шум. Для его учета проводилась калибровка в области 0,11 дБ, что соответствовало 7,4 К дополнительного шума.

На рис. 3 также показаны шумовая лампа и направленный ответвитель, которые использовались в качестве дополнительных стандартов нашего температурного масштаба.

г) В ы х о д н а я ч а с т ь р а д и о м е т р а

Для того чтобы измерить интенсивность сигналов, выходящих из мазерного усилителя, перед регистрацией необходимо было их дополнительно усилить. Выходная часть нашего радиометра состояла из преобразователя на 70 МГц, за которым помещались усилитель в соответствующем интервале частот, точный переменный аттенюатор и диодный детектор. Выходной сигнал с диодного детектора усиливался и регистрировался на ленте самописца.

д) Д е й с т в и е у с т р о й с т в а

На рис. 5 показана помещенная в кабину 20-футового рупорного рефлектора аппаратура радиометра. Фланец в крайнем правом углу является частью антенны, и он вращается вместе с ней в вертикальной плоскости. Двойное дроссельное соединение позволяет антенне вращаться, в то время как остальная регистрирующая аппаратура фиксирована в кабине рефлектора. Чтобы измерить шум от дроссельного соединения, оно закрывалось струбциной. Как оказалось, величина шума незначительна. Мы регулярно измеряли коэффициент отражения основных компонент системы и поддерживали его ниже уровня 0,03%; только у мазера коэффициент отражения не мог быть уменьшен ниже 1%. Поскольку все

входные отверстия нашей волноводной системы находились при низкой температуре, ошибки из-за наличия этого отражения незначительно сказывались на результатах.

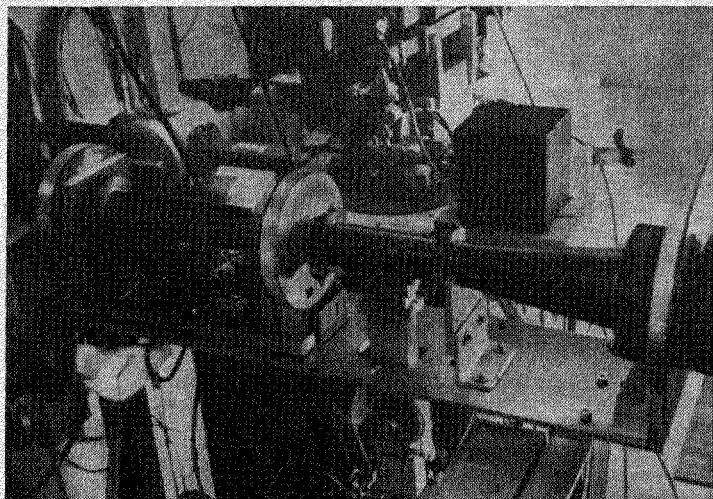


Рис. 5. Наш радиометр на 7,35 см, установленный в кабине 20-футового рупорного рефлектора.

5. ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Первый рупорный рефлектор с мазером бегущей волны был построен совместно Де-Грассе, Хоггом и Омом в 1959 г. (см. ⁷). Он продемонстрировал возможность создания станции связи Земля — спутник на 5,31 см

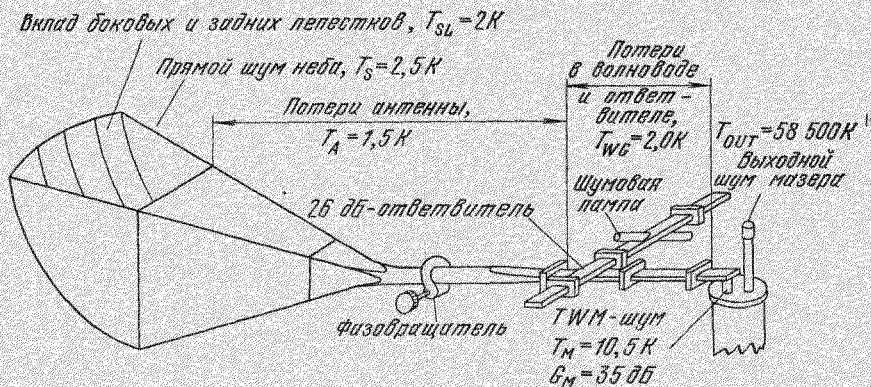


Рис. 6. Диаграмма приемника с низким шумом, используемого Де-Грассе, Хоггом, Омом и Сквиллом.

Она демонстрирует возможность существования станции связи с очень низкими помехами от Земли. Указан вклад шума от каждой из компонент системы.

с низким шумом. Хотя они достигли наименьшей общей температуры шума системы со значением 18,5 K, они предполагали понизить ее до более низкого уровня. На рис. 6 показана их система (на рисунке также обозначены температуры шума для каждой компоненты). Как видно из раздела а) гл. 2, температура 2 K, которую они указали для вклада задних лепестков

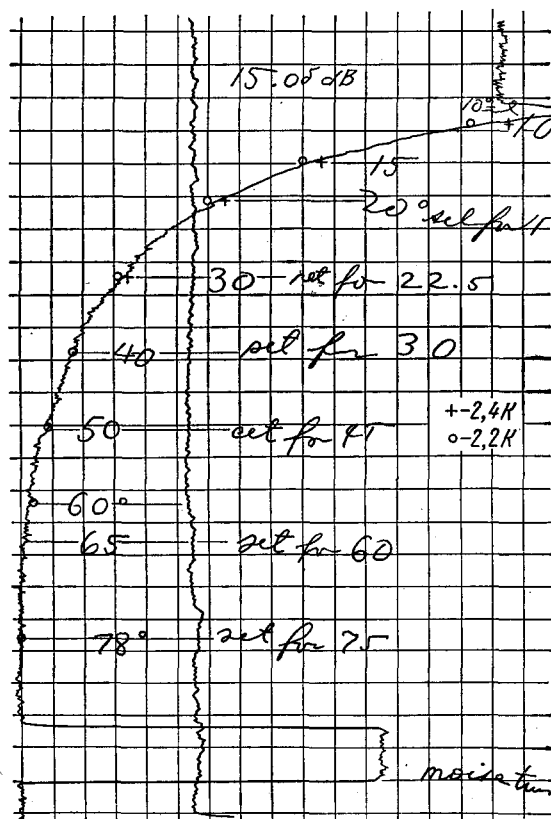


Рис. 7. Измерения атмосферного шума на длине волны 7,35 см и график теоретических расчетов излучения атмосферы с температурой в зените 2,2 К и 2,5 К.

TABLE II - SOURCES OF SYSTEM TEMPERATURE

Source	Temperature
Sky (at zenith)	$2.30 \pm 0.20^\circ\text{K}$
Horn antenna	$2.00 \pm 1.00^\circ\text{K}$
Waveguide (counter-clockwise channel)	$7.00 \pm 0.65^\circ\text{K}$
Maser assembly	$7.00 \pm 1.00^\circ\text{K}$
Converter	$0.60 \pm 0.15^\circ\text{K}$
Predicted total system temperature	$18.90 \pm 3.00^\circ\text{K}$

the temperature was found to vary a few degrees from day to day, but the lowest temperature was consistently $22.2 \pm 2.2^\circ\text{K}$. By realistically assuming that all sources were then contributing their fair share (as is also tacitly assumed in Table II) it is possible to improve the over-all accuracy. The actual system temperature must be in the overlap region of the measured results and the total results of Table II, namely between 20 and 21.9°K . The most likely minimum system temperature was therefore

$$T_{\text{system}} = 21 \pm 1^\circ\text{K}^*$$

The inference from this result is that the "+" temperature possibilities of Table II must predominate.

Рис. 8. Абзац из статьи Ома о приемнике спутника «Эхо», в котором говорится, что температура системы была на 3,3 К выше, чем предсказывалось.

антенны, слишком высока. Кроме того, прямые измерения температуры шума мазера дали величину примерно на градус ниже, чем показано на рисунке. Таким образом, их система была на 3 К горячее, чем можно было ожидать. Компонента, обозначенная на рис. 6 T_s , является излучением земной атмосферы, которое принимает антенна, когда она направлена вертикально вверх. Компонента T_s была измерена методом, впервые предложенным Р. Х. Дикке⁸. Если температура антенны измеряется как функция угла над горизонтом, под которым она направлена, то излучение атмосферы минимально, когда антенна направлена вертикально вверх. Излучение увеличивается, когда антенна наведена на горизонт, поскольку в этом случае увеличивается толщина атмосферы. На рис. 7 показана запись наблюдений, полученных Арно Пензиасом и мной с помощью 20-футового рупорного рефлектора, который сканировал область углов от зенита до 10° над горизонтом. Кружочки и крестики показывают ожидаемое изменение температуры, основанное на стандартной модели земной атмосферы с температурой в зените 2,2 и 2,4 К соответственно. Видно, что согласие между теорией и наблюдениями хорошее, и вероятность того, что используемая нами величина излучения атмосферы неверна, мала.

Рис. 8 взят из статьи Э. А. Ома⁹, в которой описан приемник, используемый для приема сигналов, отраженных от спутника Эхо. Он обнаружил, что температура его системы на 3,3 К выше, чем ожидалось из суммирования вкладов от всех компонент. Поскольку ошибки эксперимента были больше 3 К, то этому явлению, как и предыдущей работе на длине волны 5,3 см, не было уделено внимания. Для того чтобы точно определить присутствие дополнительного источника излучения с температурой 3 К, требовалась более точная измерительная аппаратура. В последующих измерениях это было достигнуто при помощи комбинации переключателя и эталонного источника шума, которую не имела система связи.

6. НАШИ НАБЛЮДЕНИЯ

На рис. 9 воспроизведены первые измерения на нашей системе. Внизу приведен перечень напряжений диодного термометра, из которого мы могли определить температуру холодной нагрузки. Величина отклонения записи самописца (или температуры) увеличивается направо. В средней части записи мазер был переключен на холодную нагрузку при различных уровнях шума, вносимого аттенуатором. Изменения в 0,1 дБ соответствует изменению температуры в 6,6 К, поэтому на записи изменения шума от максимума до минимума составляли величину, меньшую 0,2 К. В верхней части записи мазер был подключен к антенне и имел примерно ту же самую температуру, что и холодная нагрузка плюс 0,04 дБ, что все вместе составило примерно 7,5 К. Интерпретация такого результата вызывала трудности. Температура антенны должна была равняться сумме атмосферного вклада (2,3 К) и излучения от стенок антенны и Земли (1 К). Таким образом, обнаруженное в предыдущих экспериментах превышение температуры системы, вопреки нашим ожиданиям, было связано либо с самой антенной, либо с излучением вне нее. Поскольку мы провели прямое сравнение температуры антенны с температурой холодной нагрузки, то наше превышение температуры было обусловлено антенной, в то время как в предыдущих случаях измерялась только общая температура системы. Если бы мы не учли какие-то потери, то холодная нагрузка была бы только теплее, чем вычислено, но она не могла быть никак холоднее 4,2 К — температуры жидкого гелия. Антенна же была горячее этого значения, по крайней мере, в два раза. Не разобравшись в «загадке антенны»,

нельзя было проводить измерения на 21 см. Мы рассмотрели несколько возможных причин этого превышения и проверили их:

а) В это время некоторые радиоастрономы предполагали, что микроволновое поглощение земной атмосферы примерно в два раза больше

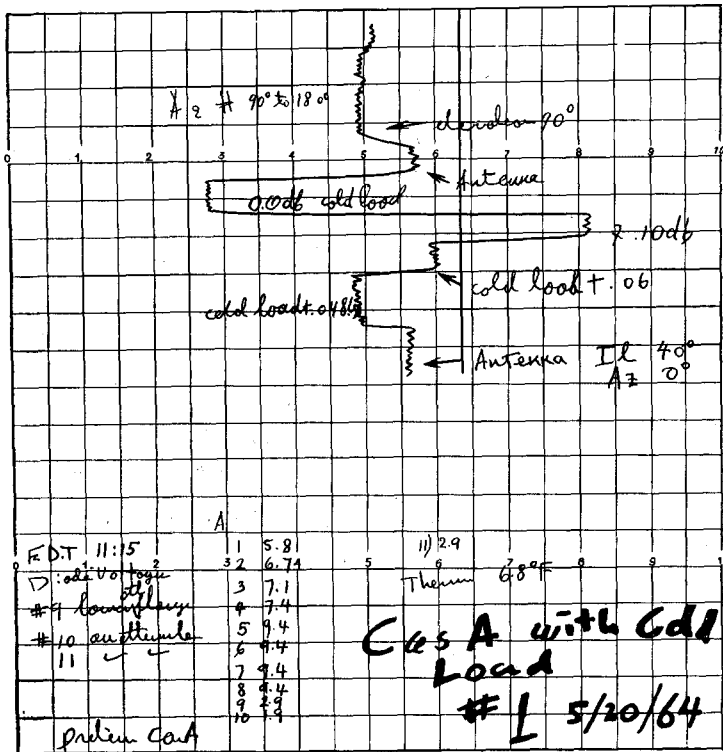


Рис. 9. Первое измерение, демонстрирующее наличие микроволнового фона.

На рисунке температура шума увеличивается вправо. Как видно в верхней части рисунка, антенна, направленная вертикально вверх, имела температуру, равную температуре холодной нагрузки с добавкой в 0,04 дБ (все вместе около 7,5 К). Эта величина значительно превышает ожидаемую температуру, равную 3,3 К.

используемой нами величины. Другими словами, «температура неба» на рис. 6 и 8 должна равняться 5 К вместо 2,5 К.

Из наших измерений (показаны на рис. 7) мы знали, что это не так.

б) Мы учитывали возможность того, что наша антенна улавливает шум, связанный с деятельностью человека. Мы направляли нашу антенну на Нью-Йорк и на какое-либо другое место на горизонте, однако температура антенны никогда не превышала сколько-нибудь значительно тепловой температуры Земли.

в) Мы исследовали излучение нашей Галактики. Измерения излучения от Млечного Пути были разумной экстраполяцией низкочастотных измерений. Подобная экстраполяция для самой холодной части неба (удаленной от Млечного Пути) предсказывала на нашей длине волны температуру, примерно равную 0,02 К. Кроме того, вклад от Галактики должен был бы меняться с изменением координат наблюдений, мы же видели изменения температуры, соответствующие изменениям на более низких частотах, только вблизи Млечного Пути.

г) Мы исключили внеземные дискретные радиоисточники, как источники нашего излучения, поскольку они имеют спектры, подобные спектру

Галактики. К ним применялась та же самая экстраполяция от низкочастотных наблюдений. Самый сильный дискретный источник на небе давал максимальную антенную температуру 7 К.

Таким образом, антенна у нас осталась единственным возможным источником избыточного шума. Используя стандартную теорию волноводов, мы вычислили величину ее потерь на сопротивление (0,9 К). Большая часть потерь антенны происходила в ее горловине маленького диаметра, которая была сделана из химически чистой меди. Мы исследовали подобные волноводы в лаборатории и внесли исправления в расчеты потерь за счет неидеальности поверхностных условий, которую мы обнаружили в таких волноводах. Остальная часть антенны была сделана из склепанных алюминиевых листов, и, хотя мы не ожидали здесь каких-либо неприятностей, мы не могли исключить возможности потерь в местах склепки. Чтобы проверить это, мы поместили пару голубей в той небольшой части рупора, где она соприкасается с теплой кабиной. Вскоре они подобно своим городским собратьям покрыли всю внутренность белым веществом. Мы выпустили голубей и почистили внутренность антенны, но получили лишь небольшое уменьшение температуры антенны.

В течение этого времени проблема температуры антенны оставалась нерешенной, и мы выполнили измерения, где подобный фактор был несуществен. Дейв Хогг и я сделали очень точные измерения усиления антенны¹⁰, а Арно и я хотели закончить измерения абсолютного потока, прежде чем усовершенствовать антенну далее.

Весной 1965 г., закончив измерения потока⁵, мы основательно почистили 20-футовый рупорный рефлектор и положили алюминиевые ленты на склепанные стыки. В результате температура антенны даже несколько повысилась. Мы также разобрали горловину антенны и проверили ее, но обнаружили, что она в порядке.

К тому времени прошел почти год. Поскольку за это время превышение антенной температуры не изменилось, мы могли исключить еще два вероятных источника: 1) если бы источник находился в Солнечной системе, то его угловые размеры должны были бы меняться, и мы заметили бы изменения в температуре антенны, 2) в 1962 г. после высотного ядерного взрыва пояса Ван-Аллена были заполнены заряженными частицами. Они находились на большом расстоянии от Земли и поэтому излучение от них не имело бы той же зависимости от угла возвышения над горизонтом, как у излучения Земли. По этой причине мы могли не распознать его. Однако за год наших наблюдений излучение от этого источника должно было значительно уменьшиться.

7. ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ

Последовательность событий, которые привели к разгадке нашей тайны, началась в момент, когда Арно, беседуя с Бернардом Бёрке из М. И. Т. (Массачусетский технологический институт) на совершенно другие темы, упомянул о нашем необъяснимом шуме. Бэрни вспомнил о том, что слышал о теоретической работе Р. Дж. Э. Пиблза из группы Дикке в Принстоне об излучении Вселенной. Арно позвонил Дикке, и тот выслал нам копию препринта Пиблза. Принстонская группа исследовала модель осциллирующей Вселенной, в которой имелась фаза горячего сжатия. Эта фаза была необходима для того, чтобы уничтожить тяжелые элементы предыдущего цикла, так что каждый последующий цикл начинался с одного и того же исходного состояния. Хотя это и не было новой идеей¹¹, следует отметить одно важное обстоятельство в модели, развиваемой Дикке. Если излучение в период горячей фазы было достаточно велико, то оно могло

наблюдаться и в настоящую эпоху. В своем препринте Пиблз, следуя предположению Дикке, подсчитал, что Вселенная в настоящее время должна быть заполнена реликтовым чернотельным излучением с минимальной температурой 10 К. Пиблз знал об измерениях атмосферного излучения на 6 см Хогга и Семплака¹², которые использовали систему Де-Грассе и др. Он сделал вывод, что современная температура излучения Вселенной должна быть меньше температуры их системы, которая равнялась 15 К. В заключение он также писал, что Дикке, Ролл и В. Уилкинсон начинают эксперимент по измерению фонового излучения.

Вскоре после получения препринта Дикке и его сотрудники посетили нас, чтобы обсудить наши измерения и посмотреть аппаратуру. Они быстро убедились в точности наших измерений. Мы договорились об одновременной публикации двух писем в «Астрофизическом журнале»: одного из Принстона¹³ о теории и другого из лабораторий «Белл»¹⁴ о наших измерениях избытка антенной температуры. В нашем письме Арно и я не должны были касаться любого обсуждения космологической теории происхождения фонового излучения, поскольку мы не участвовали в этой работе. Однако мы считали, что результаты наших измерений не зависят от теории и представляют самостоятельный интерес. Тем не менее нам было приятно, что тайна шума, появляющегося в нашей антенне, среди всех прочих объяснений может быть связана с таким важным космологическим явлением. Однако наше настроение в этот период можно было назвать осторожным оптимизмом.

8. РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе подготовки нашего письма для публикации мы сделали окончательную проверку антенны, чтобы быть уверенными, что мы не принимаем однородное 3 К излучение от Земли. Мы измеряли отклик антенны на излучение Земли, используя передатчик, расположение которого менялось. Наш передатчик искусственно увеличивал яркость Земли на длине волны нашего приемника до уровня достаточно высокого, чтобы сигнал от задних лепестков антенны был измерим. Хотя такие измерения не были идеальными для определения структуры задних лепестков антенны, они все же были достаточно хороши для определения их среднего уровня. Как

	Новая горловина		Старая горловина
Температура Не	4,22	4,22	
Вычисленный вклад от волновода холодной нагрузки	0,38	0,70±0,2	
Аттенюатор, установленный для баланса	2,73	2,40±0,1	
Общая температура холодной нагрузки	7,33	7,32±0,3	6,7±0,3
Атмосфера		2,3±0,3	2,3±0,3
Потери в волноводе и антенне		1,8±0,3	0,9±0,3
Вклад задних лепестков антенны		0,1±0,1	0,1±0,1
Общая величина помех измерений		4,2±0,7	3,3±0,7
Фон		3,1±1	3,4±1

Рис. 10. Результаты наших измерений микроволнового фона в 1965 г. Надписи «Старая горловина» и «Новая горловина» относятся к первоначальной и замененной горловинной части 20-футового рупорного рефлектора.

мы и ожидали, уровень шума от задних лепестков был мал, и излучение Земли давало незначительный вклад в температуру антенны.

В правой колонке на рис. 10 показан окончательный результат наших наблюдений. Числа слева были получены позже, в 1965 г., когда мы поста-

вили на 20-футовый рупорный рефлектор новую горловину. Из общей температуры антенны мы вычли вклад всех известных нам источников, в результате получив остаток $3,4 \pm 1$ К. Поскольку ошибки в этих измерениях не статистические, мы суммировали максимальные ошибки от каждого источника. Максимальная ошибка, равная 1 К, была значительно меньше измеряемой величины, и это давало нам уверенность в подлинности наших результатов. Мы утверждали в нашей первоначальной статье: «Избыток температуры в пределах ошибки наших измерений является изотропным, неполяризованным и неподверженным сезонным вариациям». Наши пределы на изотропию и поляризацию не могли существенно повлиять на большинство ошибок, перечисленных на рис. 10, хотя мы и не обсуждали этого подробно в статье. Их влияние могло сказаться на результате в пределах 10% или 0,3 К.

Из сравнения нашей величины 3,5 К и исследований северной части неба на длине волны $\lambda = 74$ см, выполненных в Кембридже Паулини-Тос и Шейкшафтом в 1962 г.¹⁵, удалось определить предельную форму спектра фонового излучения. Минимальная температура неба при $\lambda = 74$ см равнялась 16 К. Таким образом спектр был не круче, чем $\lambda^{0.7}$ в области длин волн, меняющихся на порядок. Отсюда было ясно, что наше излучение не могло быть связано с какими-либо известными в это время источниками, так как их спектры имели зависимость в интервале от $\lambda^{2.0}$ до $\lambda^{3.0}$. Предварительные измерения на 6 см в лабораториях «Белл» исключали спектр, который бы быстро рос в сторону коротких длин волн.

9. ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

После нашей встречи экспериментальная группа из Принстона начала переделывать свою аппаратуру таким образом, чтобы измерять фон с температурой 3 К вместо 10 К.

Однако первое подтверждение существования космического микроволнового фона было получено из измерений совершенно другого вида. Как оказалось, эти измерения были сделаны Адамсом и Дунханом тридцать лет назад¹⁶⁻²¹. Адамс и Дунхан обнаружили несколько тонких межзвездных линий поглощения в оптике, которые позднее были идентифицированы с линиями молекул CN, CN⁺ и CN. Для молекулы CN дополнительно к основному уровню была обнаружена линия поглощения и для первого возбужденного вращательного уровня. Используя данные Адамса о распространенности этих двух уровней, Мак-Келлар²² вычислил, что температура возбуждения CN должна быть равна 2,3 К. Этот вращательный переход происходит на длине волны 2,64 мм, вблизи пика спектра 3 К чернотельного излучения. Вскоре после открытия фонового излучения Г. Б. Филд²³, И. С. Шкловский²⁴ и Р. Таддеус (под руководством Н. Дж. Вулфа)²⁵ независимо пришли к заключению, что CN находится в равновесии с фоновым излучением. (Других источников, которые могли бы вызвать возбуждение молекул, в межзвездном пространстве нет.) Кроме подтверждения существования ненулевого фона, из этих наблюдений можно было заключить, что спектр фонового излучения для длин волн, больших пиковой, близок к чернотельному. Они также указывали на то, что в области коротких длин волн спектр отличается от длинноволновой (рэлей-джинсовской) зависимости и следует планковской зависимости интенсивности от длины волны. В 1966 г. Филд и Хитчкок²³ доложили о своих новых наблюдениях, в которых они использовали пластинки Хербига ζ Oph и ζ Per. Они получили температуру возбуждения, равную $3,22 \pm 0,15$ К и $3,0 \pm 0,6$ К. Таддеус и Клаузер²⁵, также используя новые пластинки, получили значение температуры $3,75 \pm 0,5$ К в ζ Oph.

Обе группы утверждали, что основным источником возбуждения молекул CN является фоновое излучение.

В начале 1966 г. Ролл и Уилкинсон²⁶ представили свои измерения фона на длине волны 3,2 см. По их данным температура фона была равна $3,0 \pm 0,5$ К, и это было первым подтверждением наших измерений в микроволновой области. Вскоре после этого Хауэлл и Шейкшафт²⁷ получили значение $2,8 \pm 0,6$ К на длине волны 20,7 см²², а несколько позже наши измерения дали величину $3,2 \pm 1$ К на 21,1 см²⁸. К середине 1966 г. тепловой характер микроволнового излучения был хорошо установлен в интервале длин волн от 2,6 мм до 21 см.

10. РАННИЕ ТЕОРИИ

Я уже говорил, что первое экспериментальное свидетельство существования космического микроволнового фонового излучения было получено (но не опознано) задолго до 1965 г. Вскоре мы узнали, что теоретическое предсказание этого было сделано за шестнадцать лет до нашего обнаружения. Джордж Гамов рассчитал условия на ранних стадиях развития Вселенной в попытке понять условия образования галактик²⁹. Хотя эти расчеты не были вполне строгими, он понял, что на ранних стадиях Вселенная должна быть очень горячей, чтобы весь водород не слился в более тяжелые элементы. Кроме того, из его расчетов следовало, что в ранней горячей Вселенной плотность излучения была намного выше, чем плотность вещества. В этой работе Гамов не определял, каков должен быть остаток этого излучения в современную эпоху. В 1949 г. Альфер и Герман³⁰ исследовали эволюцию температуры горячего излучения от ранней Вселенной до настоящего времени и предсказали температуру реликтового излучения в 5 К. Они заметили, что плотность этого излучения экспериментально не определялась. В 1953 г. Альфер, Фоллин и Герман³¹ сделали, можно сказать, первый вполне современный анализ ранней истории Вселенной, но забыли пересчитать или упомянуть о температуре излучения Вселенной в настоящее время.

В 1964 г. Дорошкевич и Новиков^{32, 33} также рассчитали реликтовое излучение и определили, что оно должно иметь чернотельный спектр. Для расчетов они использовали статью Ома о приемнике на спутнике Эхо, но неправильно трактовали эти измерения, и в результате пришли к заключению, что температура излучения Вселенной в настоящее время близка к нулю *).

Более полное обсуждение этих первых расчетов дано в докладе Арно³⁴.

11. ИЗОТРОПИЯ

Принимая температуру излучения в пространстве единственной, эти теории предполагают, что она одна и та же во всех направлениях. В соответствии с современной теорией рассеяние фонового космического микроволнового излучения происходило до момента, когда электроны и ядра образовали нейтральные атомы (рекомбинация), т. е. когда возраст Вселенной равнялся миллиону лет. Таким образом, изотропия фонового излучения является мерой изотропии самой Вселенной в то время и мерой изотропии ее расширения с тех пор.

До рекомбинации излучение доминировало во Вселенной и джинсовская масса или масса наименьших гравитационно-нестабильных образова-

*) См. примечание переводчика к статье А. Пензиаса на с. 590 (УФН, 1979, т. 129, вып. 4).

ний, была больше массы скоплений галактик. Поэтому галактики могли сформироваться только в период после рекомбинации.

В 1967 г. Рис и Шьяма³⁵ предложили искать анизотропию фонового излучения в больших масштабах, которая могла остаться со времени, предшествующего рекомбинации. В том же году Уилкинсон и Партридж³⁶ завершили эксперимент, который был специально предназначен для поисков анизотропии в экваториальной плоскости. Они получили верхний предел $\sim 0,1\%$ для 24-часовой асимметрии и вероятную 12-часовую анизотропию, равную $0,2\%$. Тем временем мы просмотрели свои старые наблюдения, которые покрывали большую часть видимого нам неба и получили

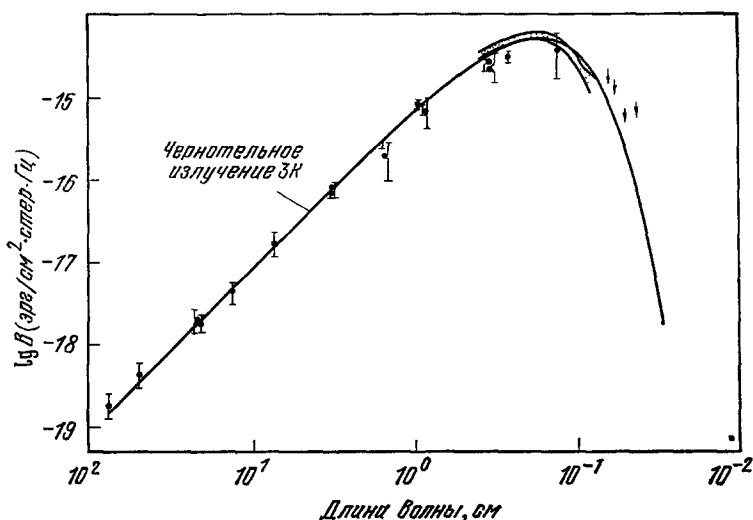


Рис. 11. Измерения спектра космического микроволнового фонового излучения.

Они показывают четкую косинусоидальную зависимость яркости, которая может возникать при наличии скорости Земли относительно фонового излучения. Штриховкой и стрелками обозначены результаты Вуда и Ричардса.

предел флуктуаций в больших масштабах порядка $0,1\text{ K}$ ³⁷. Затем в серии измерений³⁸⁻⁴⁰ была обнаружена 24-часовая анизотропия, которая связана с движением Земли относительно фонового излучения. Данные наиболее точных в настоящее время измерений⁴¹ показаны на рис. 11. Они демонстрируют поразительную косинусоидальную анизотропию с амплитудой около $0,003\text{ K}$, такую, что фоновое излучение имеет максимум температуры в одном направлении и минимум в противоположном. Обычно используемое объяснение этого эффекта состоит в том, что Земля движется в направлении, где излучение наиболее горячее, и происходит это из-за голубого смещения излучения, которое увеличивает измеряемую температуру в этом направлении. Из данных Смута и др. можно определить, что Солнце движется по отношению к фоновому излучению со скоростью $390 \pm 60\text{ км/с}$ в направлении $10,8^{\text{h}}\text{ R.A.}, 50^{\circ}\text{ Dec.}$ Величина этой скорости не вызывает удивления, так как значение орбитальной скорости Солнца вокруг Галактики равно 300 км/с . Однако направление ее другое, отсюда значение пекулярной скорости нашей Галактики примерно равно 600 км/с . Поскольку другие ближайшие галактики, включая скопление Девы, имеют малые скорости относительно Галактики, то вызывает недоумение тот факт, что масса, содержащаяся в огромном объеме, имеет такую высокую скорость относительно материи, с которой связано последнее рассеяние фонового излучения. Выделив 24-часовую анизотропию, можно

исследовать анизотропию с более сложной структурой, чтобы получить наблюдательные пределы на такие явления, как вращение Вселенной ⁴¹. В пределах шума в 0,001 К эти виды анизотропии равны нулю.

К настоящему времени не обнаружено мелкомасштабной анизотропии. Было выполнено несколько экспериментов по проверке модели, в которой фоновое излучение связано с дискретными источниками. В наиболее чувствительных экспериментах при растворе антенны 80", выполненных Бойтоном и Партриджем ⁴², было обнаружено, что относительные вариации интенсивности должны быть, если они есть, во всяком случае меньше $3,7 \cdot 10^{-3}$. Чтобы получить такую степень «гладкости», требуется количество источников на порядок больше, чем известное число галактик.

Согласно предположению Сюняева и Зельдовича ⁴³ в направлении скоплений галактик интенсивность фонового излучения должна уменьшаться из-за обратного комптоновского рассеяния электронами в межгалактическом газе. Этот эффект был обнаружен Беркиншоу и Галлом ⁴⁴. Он дает возможность определять плотность межгалактического газа в скоплениях и может дать альтернативный способ измерения постоянной Хаббла.

12. СПЕКТР

Начиная с 1966 г. было сделано большое число измерений на длинах волн от 74 см до 0,5 мм. Измерения проводились на поверхности Земли, на вершинах гор, на самолетах, на баллонах и ракетах. Кроме того, были повторены измерения в оптике интенсивности линий межзвездных молекул. Мы провели прямые наблюдения интенсивности линий в миллиметровой области, что позволило прямо установить равновесное состояние их возбужденных уровней с фоновым излучением ⁴⁵. На рис. 12 показаны результаты этих измерений ⁴⁶. Первые измерения в Принстоне были сделаны в интервале длин волн от 3,2 см до 0,33 см. Они хорошо совпадали с 2,7 К чернотельным излучением ⁴⁷⁻⁵⁰. Последующая серия ракетных и баллонных измерений в миллиметровой и субмиллиметровой области приблизила температуру излучения к 3 К. Данные Робсона и др. ⁵¹ и Вуди и Ричардса ⁵² простирались до длин волн 0,8 мм; как раз за спектральным пиком. В своих последних экспериментах Д. Вуди и П. Ричардс показали, что результаты хорошо согласуются с 3 К излучением до длин волн 0,8 мм; в атмосферных окнах до длин волн 0,4 мм получены верхние пределы для интенсивности излучения. Все это доказывает, что фоновое излучение имеет чернотельный спектр, который трудно воспроизвести с помощью каких-либо других типов космических источников. Источник излучения должен быть оптически толстым, и поэтому должен возникнуть раньше, чем другие наблюдаемые радиоисточники.

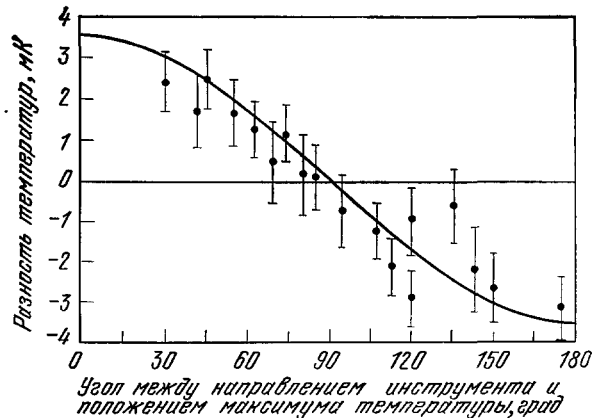


Рис. 12. Результаты эксперимента по обнаружению изотропии в больших масштабах, выполненного Смоатом, Горенштейном и Мюллером.

Имеющиеся спектральные данные достаточно точны для того, чтобы исследовать систематические отклонения от однотемпературного черного излучения, которые могут быть связаны с ограниченностью применимости простейшей космологии. Анализ результатов, выполненный Данезе и Де-Зотти⁵³, не обнаруживает в спектральных данных, представленных на рис. 12, статистически значимых отклонений подобного типа, за исключением данных Вуди и Ричардса.

13. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Космология — это наука, которая имеет незначительное число наблюдательных данных для проверки теории. Открытие космического микроволнового излучения добавило лишь еще один — значение температуры Вселенной в современную эпоху. Однако это значительно расширило наши представления, так как потребовалась космология с источником излучения на ранней стадии развития Вселенной. Эти измерения являются зондом, с помощью которого можно изучать ту далекую эпоху. Более чувствительное измерение фонового излучения в будущем позволят нам получить дополнительные сведения о Вселенной.

14. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа, которую я изложил, была сделана совместно с Арно А. Пензиасом. В течение пятнадцати лет нашего сотрудничества он был постоянным источником помощи и поддержки. Я хочу поблагодарить В. Д. Ланджер и Элизабет Вильсон за внимательное чтение рукописи и предложенные изменения.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Более полный обзор об антеннах радиотелескопов и приемниках можно найти в нескольких книгах. Например, с этим вопросом можно ознакомиться, прочитав гл. 6 и 7 книги: Kraus J. D., *Radio Astronomy*.— N.Y.: McGraw-Hill, 1966.
2. Crawford A. B., Hogg D. C., Hunt L. E.— *Bell. Syst. Tech. J.*, 1961, v. 40, p. 1095.
3. De Grasse R. W., Shucultz-Du Bois E. O., Scovil H. E. D.— *Ibid.*, 1959, v. 38, p. 305.
4. Tabor W. J., Sibia J. T.— *Ibid.*, 1963, v. 42, p. 1863.
5. Penzias A. A.— *Rev. Sci. Instr.*, 1965, v. 36, p. 68.
6. Penzias A. A., Wilson R. W. *Astrophys. J.*, 1965, v. 142, p. 1149.
7. De Grasse R. W., Hogg D. C., Ohm E. A., D. Scovil H. E. D.— *Proc. Nat. Electron. Conference*, 1959, v. 15, p. 370.
8. Dicke R., Beringer R., Kyhl R. L., Vane A. V.— *Phys. Rev.*, 1946, v. 70, p. 340.
9. Ohm E. A.— *Bell. Syst. Tech. J.*, 1961, v. 40, p. 1065.
10. Hogg D. C., Wilson R. W.— *Ibid.*, 1965, v. 44, p. 1019.
11. Ср., Hoyle F., Taylor R. J., *Nature* 1964, v. 203, p. 1108.— Менее подробное обсуждение этой работы дано в²⁹.
12. Hogg D. C., Semplak R. A.— *Ibid.*, 1961, v. 40, p. 1331.
13. Dicke R. H., Peebles P. J. E., Roll P. G., Wilkinson D. T. *Astrophys. J.*, 1965, v. 142, p. 414.
14. Penzias A. A., Wilson R. W.— *Ibid.*, p. 420.
15. Pauliny-Toth I. I. K., Shakeshaft J. R.— *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1962, v. 124, p. 61.
16. Adams W. S. *Astrophys. J.*, 1941, v. 93, p. 11.
17. Adams W. S.— *Ibid.*, 1943, v. 97, p. 105.
18. Dunham T. Jr.— *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 1937, v. 49, p. 26.
19. Dunham T. Jr.— *Proc. Amer. Phil. Soc.*, 1939, v. 81, p. 277.
20. Dunham T. Jr.— *Publ. Amer. Astron. Soc.*, 1941, v. 10, p. 123.
21. Dunham T. Jr., Adams W. S.— *Ibid.*, 1937, v. 9, p. 5.
22. McKellar A.— *Publ. Dominion Astrophys. Obs. Victoria B. C.*, 1941, v. 7, p. 251.

23. Field G. B., Herbig G. H., Hitchcock J. L., Talk at the American Astronomical Society Meeting 22—29 December 1965. *Astron. J.*, 1966, v. 71, p. 161.
24. Шкловский И. С.— *Астрон. циркул.*, 1966, № 364.
25. Thaddeus P., Clauser J. F.— *Phys. Rev. Lett.*, 1966, v. 16, p. 819.
26. Roll P. G., Wilkinson D. T.— *Ibid.*, p. 405; 1967, v. 19, p. 1195.
27. Howell T. F., Shakeshaft J. R.— *Nature*, 1965, v. 210, p. 138.
28. Penzias A. A., Wilson R. W.— *Astron. J.*, 1967, v. 72, p. 315.
29. Gamow G., *Nature*, 1948, v. 162, p. 680.
30. Alpher R. A., Herman R. C.— *Phys. Rev.*, 1949, v. 75, p. 1089.
31. Alpher R. A., Follin J. W., Herman R. C.— *Phys. Rev.*, 1953, v. 92, p. 1347.
32. Дорошкевич А. Г., Новиков И. Д.— *ДАН СССР*, 1964, т. 154, с. 809.
33. Doroshkevich A. G., Novikov I. D.— *Sov. Phys.— Doklady*, 1964, v. 9, p. 111.
34. Penzias A. A. The Origin of the Elements: Nobel Prize Lecture, December 8, 1978.— (Перевод: УФН, 1979, т. 129, с. 581.)
35. Rees M. J., Sciama D. W.— *Nature*, 1967, v. 213, p. 374.
36. Wilkinson D. T., Partridge R. B.— *Phys. Rev. Lett.*, 1967, v. 18, p. 557.
37. Wilson R. W., Penzias A. A.— *Science*, 1967, v. 156, p. 1100.
38. Conklin E. K.— *Nature*, 1969, v. 222, p. 971.
39. Henry P. S.— *Nature*, 1971, v. 231, p. 516.
40. Corey B. E., Wilkinson D. J.— *Publ. Astron. and Astrophys. Soc.*, 1976, v. 8, p. 351.
41. Smoot G. F., Gorenstein M. V., Muller R. A.— *Phys. Rev. Lett.*, 1977, v. 39, p. 898.
42. Boynton P. E., Partridge R. B.— *Astrophys. J.*, 1973, v. 181, p. 243.
43. Sunyaev R. A., Zeldovich Ya. B., *Comm. Astrophys. and Space Phys.*, 1972, v. 4, p. 173.
44. Birkinshaw M., Gull S. F.— *Nature*, 1978, v. 275, p. 40.
45. Penzias A. A., Jeffers K. B., Wilson R. W.— *Phys. Rev. Lett.*, 1972, v. 28, p. 772.
46. Данные на рис. 11 почти все взяты из работы Данезе и Де-Зотти ⁵², за исключением измерений на волне 13 см (см.: Otoshi T.— *IEEE Trans. Instrum. and Meas.*, 1975, v. IM-24, p. 174). В миллиметровой области я использовал измерения Вуди и Ричардса ⁵² и не включил данных Робсона и др. ⁵¹, чтобы избежать противоречий.
47. Wilkinson D. J.— *Phys. Rev. Lett.*, 1967, v. 19, p. 1195.
48. Stokes R. A., Partridge R. B., Wilkinson D. J.— *Ibid.*, p. 1199.
49. Boynton P. E., Stokes R. A., Wilkinson D. J.— *Ibid.*, 1968, v. 21, p. 462.
50. Boynton P. E., Stokes R. A.— *Nature*, 1974, v. 247, p. 528.
51. Robson E. I., Vickers D. G., Huizinga J. S., Beckman J. E., Clegg P. E. *Nature*, 1974, p. 251, p. 591.
52. Woody D. P., Richards P. L. (частное сообщение).
53. Danese L., De Zotti G.— *Astron. and Astrophys.*, 1978, v. 68, p. 157.