

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2006

От Большого взрыва до Нобелевской премии и дальше

Дж. К. Мазер

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

Миссия спутника COBE (от COsmic Background Explorer — Исследователь Космического Фона) положила основания современной космологии, измерив спектр и анизотропию космического микроволнового фонового излучения (КМФИ) и обнаружив космическое инфракрасное фоновое излучение. Я описываю историю проекта COBE, его научный контекст, его создателей и его научные результаты. COBE обследовал Вселенную на наибольших возможных масштабах через построение карт космического микроволнового и инфракрасного излучений и определение их спектров. Он доставил решающее свидетельство того, что теория Большого взрыва верно описывает раннюю Вселенную, показал, что ранняя Вселенная была очень однородной, но все же не вполне, и что общая светимость объектов после Большого взрыва в два раза больше, чем прежде полагали. Концепция проекта COBE была разработана специальной исследовательской группой, созданной NASA в 1976 г., в основу его легли три конкурирующих предложения, представленных в 1974 г. COBE был смонтирован в лаборатории Годдардовского центра космических полетов, снабжен гелиевым криостатом от Ball Aerospace и запущен на ракете "Дельта", построенной в Douglas McDonnell. Он находится на круговой орбите на высоте 900 км над Землей в плоскости, наклоненной под 99 градусов по отношению к экватору и примерно перпендикулярной направлению на Солнце. Спутник несет на себе три инструмента: спектрофотометр в далеком инфракрасном диапазоне (FIRAS), дифференциальный микроволновый радиометр с тремя каналами (DMR) и прибор для наблюдения диффузного инфракрасного фона (DIRBE). Гелиевый криостат охлаждал FIRAS и DIRBE в течение 10 месяцев, пока не исчерпался гелий, всего же измерения продолжались 4 года. Последующие наблюдения подтвердили результаты COBE и позволили измерить основные космологические параметры с точностью до нескольких процентов.

PACS numbers: 01.30.Bb, 07.87.+v, 98.70.Vc

DOI: 10.3367/UFNr.0177.200712c.1278

Содержание

1. Научное введение (1278).

1.1. Спектр КМФИ и Большой взрыв. 1.2. Изотропия. 1.3. Анизотропия. 1.4. Анизотропия на малых угловых масштабах и первичные звуковые волны. 1.5. Современная космология.

2. Мое первое знакомство с космологией (1279).

2.1. Детство. 2.2. Колледж. 2.3. Институт.

3. Истоки и замысел COBE (1280).

3.1. Первоначальная Годдардовская концепция. 3.2. Формирование команды COBE. 3.3. Замысел и конструкция спутника. 3.4. FIRAS. 3.5. DMR. 3.6. DIRBE.

4. Перестройка и запуск COBE (1286).

5. Анализ и интерпретация данных (1287).

5.1. FIRAS. 5.2. DMR. 5.3. DIRBE.

6. Итоги: место COBE в истории и где мы сейчас? (1292)

Список литературы (1293).

1. Научное введение

1.1. Спектр КМФИ и Большой взрыв

В начале был Большой взрыв — так мы теперь говорим с большой уверенностью. Спутник COBE, предложенный как

проект в 1974 г. в Национальное агентство по авиационным и космическим исследованиям (NASA) и запущенный в 1989 г., предоставил очень сильные свидетельства в пользу этого: космическое микроволновое фоновое излучение (КМФИ, или реликтовое излучение) имеет спектр почти идеального черного тела с температурой $2,725 \pm 0,001$ К, и это излучение изотропно (одинаково во всех направлениях) с относительным среднеквадратичным отклонением не более 10 на миллион на угловых масштабах 7° и более. Это излучение интерпретируется как след чрезвычайно горячей и плотной ранней стадии эволюции Вселенной. В такой горячей и плотной фазе рождение и уничтожение фотонов, а также установление равновесия между ними и со всеми другими формами материи и энергии происходило бы очень быстро по сравнению с характерным масштабом времени расширения Вселенной. Такое состояние немедленно произвело бы чернотельное излучение. Расширяющаяся Вселенная должна сохранять чернотельный характер этого спектра, поэтому измерение любого значительного отклонения от идеального спектра излучения черного тела либо сделало бы несостоятельной всю идею Большого взрыва, либо показало бы, что после быстрого установления равновесия к КМФИ была добавлена какая-то энергия (например, от распада неких первичных частиц).

1.2. Изотропия

Тот факт, что это излучение изотропно в такой высокой степени является ключевым свидетельством того, что оно происходит от Большого взрыва. Все известные нам местные

Дж. К. Мазер (J.C. Mather), NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA.

системы, от нашей Солнечной системы до нашей Галактики и местного скопления и сверхскопления галактик опознаны благодаря тому, что они не однородны. В самом деле, саму изотропию было трудно объяснить, потому что она требует однородности начальных условий Большого взрыва во всей наблюдаемой части Вселенной. Это было одной из величайших загадок, с которой столкнулась наука в 1974 г.

1.3. Анизотропия

Более того, согласно данным COBE, реликтовое излучение несет на себе отпечаток первичных вариаций плотности. На больших угловых масштабах первичное излучение испытывает небольшое гравитационное красное смещение после выхода из более плотных областей (Sacks, Wolfe, 1967). Эти измеренные флуктуации имеют почти масштабно-инвариантный шумовой спектр, если среднеквадратичные вариации изобразить как функцию пространственной (угловой) частоты. Масштабно-инвариантный характер этого спектра ожидался на основании соображений общего характера (Peebles, Yu, 1970; Harrison, 1970; Zeldovich, 1972). Когда была разработана теория космической инфляции (Guth, 1981), она ясно объяснила общую изотропию реликтового излучения, так как ныне наблюдаемая часть предположительно бесконечной Вселенной была однажды заключена в малой области, существовавшей достаточное время, чтобы в ней температура успела выровняться.

1.4. Анизотропия на малых угловых масштабах и первичные звуковые волны

На малых угловых масштабах измеренный спектр возмущений кардинально меняется и имеет главный пик на характерном угловом масштабе порядка нескольких градусов. Согласно теории Большого взрыва Вселенная стала прозрачной, когда температура упала до примерно 3000 К, что произошло спустя примерно 380 000 лет после Большого взрыва. В это время области Вселенной с размером менее 380 000 световых лет обычно начинают обмениваться информацией и стирать или усиливать первичные возмущения. Мы можем описать эти неоднородности как первичные звуковые волны в многокомпонентной среде, включающей фотоны (электромагнитное излучение), обычную материю (барионы и лептоны), темную материю (имеющую массу, но не взаимодействующую электромагнитным образом) и темную энергию (вызывающую рост скорости расширения Вселенной).

1.5. Современная космология

Современная космология всерьез началась с осознания того, что галактики в действительности находятся очень далеко от нас и состоят из миллиардов звезд. Это открытие стало возможным благодаря продолжающемуся созданию все больших телескопов, таких как те четыре, что изготовил Джордж Эллери Хейл (George Ellery Hale), каждый из которых был в свое время самым большим в мире, принес славой их основателю спонсору. Общая теория относительности Эйнштейна предоставила возможность вычислить эффекты гравитации на больших масштабах, и Жорж Леметр (George Lemaître, 1927, 1931), применив эту теорию, предсказал, что Вселенная не может быть статичной, но должна расширяться или сжиматься. Эйнштейн ввел постоянную интегрирования, которая могла быть подобрана так, чтобы достигнуть равновесия между гравитационными силами притяжения и "Л-членом", однако эти решения были неустойчивыми. Эдвин Хаббл (Edwin Hubble, 1929) обнаружил, что далекие галактики удаляются от нас и что чем они дальше, тем быстрее они убегают. Это открытие, состоявшееся в год крушения мировой экономики, превратило космологию из почти чисто спекулятивной деятельности в наблюдательную дисциплину. Види-

мый возраст Вселенной есть просто отношение расстояния к скорости убегания, а обратная к нему величина называется постоянной Хаббла.

2. Мое первое знакомство с космологией

2.1. Детство

В 1950-е гг., когда я был ребенком, а космическая эра еще не началась, происходила знаменитая полемика между сторонниками теории Стационарной Вселенной и теории Большого взрыва. В 1940-е гг. Георгий Гамов изучал последствия идеи Большого взрыва, и со своими студентами Ральфом Альфером и Робертом Херманом работал над проблемой образования химических элементов. Один их ключевой результат заключался в том, что только водород и гелий происходят от эпохи Большого взрыва, а это значит, что остальные элементы должны были образоваться в ядерных реакциях внутри звезд (Alpher, Bethe, Gamov, 1948). Как раз тогда уже стало ясно что, мы, люди, сделаны из переработанного звездного материала. Их второй ключевой результат состоял в том, что Вселенная наполнена горячим излучением, оставшимся со времени Большого взрыва. Были разнообразные оценки его температуры, но, в любом случае, было бы трудно наблюдать это излучение в то время.

К 1950-м гг. всерьез началась современная эпоха. Были изобретены транзисторы, началась гонка водородного оружия, когда Советский Союз взорвал водородную бомбу в 1953 г., и США встревожились этим. Затем СССР запустил спутник в 1957 г. Так неожиданно физики и инженеры оказались надеждой на спасение страны от действительно серьезной угрозы. В общественных школах стали проводиться выставки научных проектов учащихся, бюджетные средства стали вкладываться в гражданскую оборону и научное образование. Я собрал 5-ламповый коротковолновый радиоприемник, и хотел стать радистом-любителем. Для поддержки телефонной связи и радиолокации развивалась микроволновая технология, и в моем сельском районе маленькая машиностроительная фирма начала финансировать клуб "4Н", в котором детей обучали электронике. У моего отца, одного из немногих ученых с научной степенью в стране, был счетчик Гейгера. В конце школы я уехал на летние физико-математические курсы, финансировавшиеся Национальным научным фондом. За очень немногие годы американская космическая программа прошла путь от небытия до заявления Президента Кеннеди, что мы отправим человека на Луну в ближайшее десятилетие.

2.2. Колледж

К 1965 г., когда я был студентом первого курса колледжа, я прочитал одну из популярных книг Георгия Гамова о Вселенной (Gamov, 1947). Я узнал, что Большой взрыв мог произвести излучение, которое наполнило Вселенную, и я не удивился, когда оно было открыто Пензиасом и Вильсоном (Нобелевская премия 1978 г.). В это же время это излучение пыталась обнаружить группа Роберта Дике в Принстоне. История одновременной публикации результатов двух групп широко известна.

Если открытое излучение имеет космическое происхождение, оно должно иметь чернотельный спектр и быть равно ярким во всех направлениях (изотропным). Поскольку детектирование осуществлялось на относительно низких частотах, в него вносило вклад излучение галактических электронов, которое следовало измерить и вычесть, рассчитав в рамках некоторой модели. Поначалу было возможно измерить только рэлей-джинсовскую (длинноволновую) часть спектра, а эта часть является лишенной всяких особенностей степенной функцией. Тем не менее наблюдения по меньшей мере в общих

чертах соответствовали космическому излучению с одной температурой. Также имелись сведения об измерениях вращательных температур межзвездных молекул по поглощению ими света Далеких звезд. Так оказалось, что это измерение уже было сделано Адамсом и МакКелларом около 1941 г., но ему в то время не придали значения. Позднее, в 1968 г., ракета подняла над атмосферой измерительный прибор, который зафиксировал в 50 раз большую яркость, чем ожидалось для космического чернотельного излучения (Shivanandan, Housck, Harwit, 1968).

2.3. Институт

Такова была обстановка, в которой я начал искать тему для диссертации в Калифорнийском университете в Беркли в 1970 г. Я встретил Майкла Вернера, в то время занявшего постдоковскую позицию у Чарльза Таунса (Нобелевская премия 1964 г. за мазеры), и Пола Ричардса, молодого преподавателя, с опытом работы в физике низких температур. Они начинали разрабатывать проекты измерения космического микроволнового фонового излучения в диапазоне длин волн около 1 мм. Первым был наземный эксперимент, использующий интерферометр Фабри-Перо для измерения длин волн и охлаждаемые жидким гелием детекторы, работающие в далеком инфракрасном диапазоне. Мы подняли этот прибор на Белую Гору в Калифорнии и с его помощью измерили температуру КМФИ на тех длинах волн, которые не были слишком безнадежно засорены излучениями атмосферы (Mather, Richards, Werner, 1971). Вслед за этим проектом, Ричардс получил Миллеровскую стипендию на годичный академический отпуск в Англию, и узнал о вновь разрабатываемом интерферометре Мартина-Папплетта (Puplett, Martin, 1970). У него родилась идея подвесить такой прибор в качестве полезного груза к высотному исследовательскому аэростату и запустить его на высоту, превышающую 99,5 % атмосферы. Эта идея впоследствии превратилась в спектрометр, который летал на спутнике COBE. Ричардс вернулся в Беркли и поделился этой идеей с двумя своими студентами — Дэвидом Вуди и мной.

Предлагаемая конструкция прибора включала поляризационный интерферометр, современную версию интерферометра, изобретенного Майкельсоном (Нобелевская премия 1907 г.), погруженный для охлаждения в жидкий гелий, длинноволновый инфракрасный детектор (болометр), охлажденное контрольное черное тело и конический металлический светоприемник, который выделял на небе луч шириной 7 градусов и направлял собранный свет через маленькое отверстие в измерительный прибор (Mather, Woody, Richards, 1974). Некоторые компромиссы были неизбежны в связи с присутствием теплой атмосферы в близком соседстве с жидким гелием. Во-первых, коническая антенна должна была быть соединена с отражателем из нержавеющей стали, который осуществлял переход от температуры гелия (1,5 К) к температуре атмосферы. Во-вторых, пластиковое окно из майлара удерживало атмосферу вне раствора антенны. В-третьих, маленькое теплое калибровочное тело должно было проводиться над раствором антенны, чтобы определить чувствительность прибора. Экспертная комиссия NASA посетила Лабораторию космических исследований в Беркли в 1973 г., и мы представили наш проект. Комиссия тут же сказала нам, что этот инструмент обязательно нужно запускать в космос.

Прибор не заработал при первом запуске, но вернулся целиком. Я написал мою диссертацию по наземным работам и по конструкции аэростатной измерительной аппаратуры, а Дэвид Вуди продолжил данный проект. Он построил тестовую камеру, нашел причины первоначальных неудач, исправил их, и приготовил прибор для повторного запуска. К тому времени я занял постдоковскую позицию у Патрика Тадеуша в Нью-

Йорке в Годдардовском центре космических полетов (ГЦКП). В это раз полет был успешным (Woody et al., 1975).

3. Истоки и замысел COBE

3.1. Первоначальная Годдардовская концепция

Я присоединился к группе Тадеуша с целью найти способы избавления от помех измерениям КМФИ на небе. Однако, спустя всего несколько месяцев после того, как я прибыл в ГЦКП в конце января 1974 г., NASA выпустило уведомление о возможности запуска новых маленьких спутников на ракетах типа "Скаут" или "Дельта". Тадеуш спросил сотрудников лаборатории об их идеях. Прибор, описанный в моей диссертации, не работал как следует, но главная научная трудность заключалась в атмосфере, и запуск в космос подошел бы здесь гораздо больше. Тадеуш уже очень интересовался КМФИ и померил его температуру, используя спектроскопию межзвездных молекул CN — циана (Taddeus, 1972). Он предложил мне позвать Райнера Вайса из Массачусетского технологического института, Дэйва Вилкинсона, — одного из пионеров исследований КМФИ, находившегося всего в нескольких милях от Принстона, и Майкла Хозера, который как раз всего несколько дней перед тем поступил в Годдардовский центр космических полетов в Гринбелте (штат Мэриленд). Мы поняли, что нам был бы нужен криостат на жидком гелии, и мы связались с компанией Ball Aerospace (штат Колорадо), чтобы его получить.

В то время теория Стационарной Вселенной все еще имела сильных адвокатов и изобретательных защитников. Свидетельства о возрасте Вселенной и о возрасте старейших звезд казались несовместимыми. Свидетельство о том, что КМФИ имело хороший чернотельный спектр не было очень сильным, и, в самом деле, большинство измерений показывали отклонения от этого предсказания. Еще не было никакой серьезной теории, объясняющей фундаментальную анизотропию, но думали, что КМФИ не могло иметь равную яркость во всех направлениях, даже если оно произошло из Большого взрыва.

Мы не знали, что у нас были конкуренты, но Луис Альварес из Беркли (Нобелевская премия 1968 г.) пригласил нескольких человек для работы над КМФИ, включая Ричарда Мюллера и Джорджа Смута. Их группа подготовила предложение по одному инструменту для измерения анизотропии, гораздо более простому, чем наш Годдардовский проект, и родственному тем идеям, которые они разрабатывали для приемников, предназначенных для размещения на самолете U-2 и на аэростатах. Самуэл Галкис и Майкл Дженсен из лаборатории Реактивного движения, штат Пасадена, также подготовили проект.

NASA не спешило выбирать кого-то из нас. Было представлено одновременно около 150 предложений, покрывающих огромный диапазон тем. NASA было очень заинтересовано в создании Инфракрасного Астрономического Спутника (IRAS), в сотрудничестве с Нидерландами и Великобританией. Эта миссия стала бы пионерским проектом запуска в космос криостата на жидком гелии и новых типов инфракрасных приемников, покрывающих огромный диапазон длин волн.

Я начал серьезную работу над концепцией светоприемника в форме расширяющегося раструба. Аэростатный вариант эксперимента из моей диссертации использовал конструкцию с резким соединением выделяющего луч конического светоприемника и отражателя из нержавеющей стали, предназначенного для его защиты от паразитного излучения, приходящего с углов, далеких от линии зрения. Моя новая идея состояла в том, чтобы сделать постепенный переход с расширяющимся раструбом наподобие раструбов музыкальных инструментов. Математический аппарат для такого случая

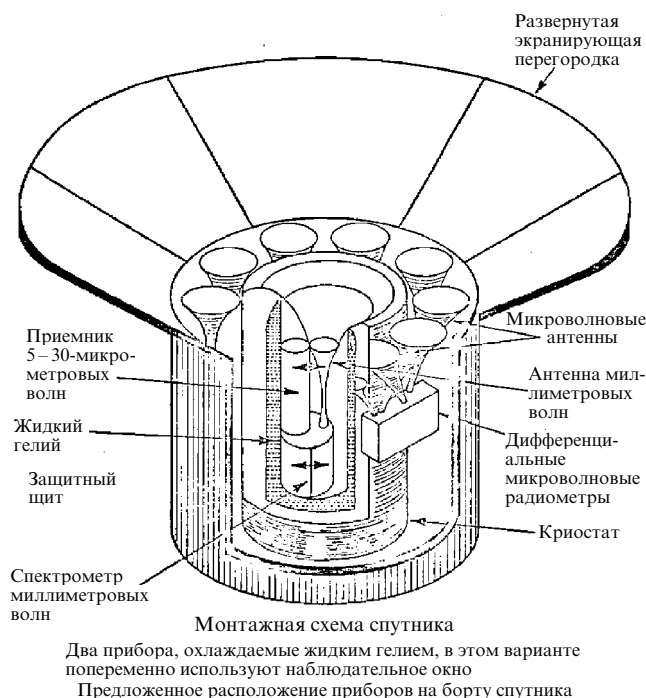


Рис. 1. Первоначальная концепция спутника COBE, предложенная Годдардовской группой в 1974 г.

уже был разработан Джозефом Келлером (Joseph Keller, 1962), под названием "геометрическая теория дифракции". Этот подход гласил, что световые лучи вне границ и препятствий распространяются по прямым линиям, и что есть ряд коэффициентов рассеяния и затухания, которые могут быть вычислены для границ и препятствий. Световые волны, действительно, отклоняются при прохождении вблизи искривленных поверхностей, но они при этом экспоненциально затухают. Это было как раз то, что мне было нужно, чтобы защитить входной сигнал прибора в широком диапазоне длин волн (Mather, 1981; Mather, Toral, Hemmati, 1986).

3.2. Формирование команды COBE

В начале 1976 г. Майкл Хозер предложил мне работу в Годдардовском центре космических полетов (ГЦКП) в Гринбелте (Мэрилэнд), полагая, что идее COBE принадлежит будущее. В любом случае стоило попытаться.

В конце 1976 г. NASA приступило к изучению идеи COBE, но избрало новую команду, составленную из шести членов трех соревнующихся групп. В нее вошли из нашей группы, кроме меня, Майкл Хозер, Дэвид Вилкинсон и Райнер Вайс плюс Джордж Смут от группы Беркли, и Сэм Гулкис от группы лаборатории Реактивного движения. Нам для разработки нового спутника следовало взаимодействовать с Нэнси Боггесс из Главного управления NASA, которая отвечала за всю инфракрасную астрономию в NASA, и с группой инженеров в Годдардовском центре космических полетов. Мы решили, что один из исходных четырех приборов Годдардовского проекта следует убрать и что микроволновые радиометры должны быть снабжены гофрированными антеннами в форме рога. Мы выбрали главных исследователей и представили их кандидатуры в Главное управление NASA на одобрение и предоставление им ответственности за отдельные приборы. Были назначены: Г. Смут, дифференциальные микроволновые радиометры; М. Хозер, эксперимент по наблюдению диффузного инфракрасного фона и я — абсолютный спектрофотометр излучения в далекой инфракрасной

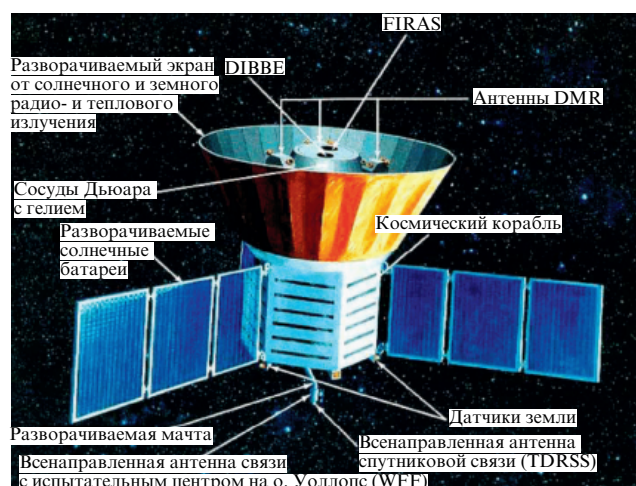


Рис. 2. Вид спутника COBE в полете глазами художника. COBE находился на орбите на высоте 900 км над Землей, Солнце находилось сбоку, Земля — внизу.

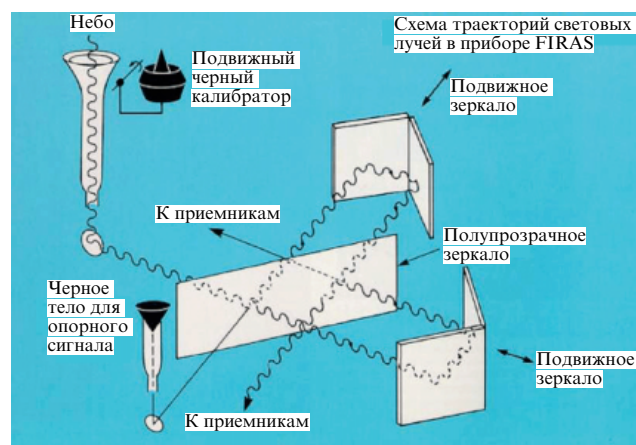


Рис. 3. Устройство абсолютного спектрофотометра в далеком инфракрасном диапазоне (FIRAS). Спектр излучения подвижного черного калибратора идентичен спектру неба.

области. Мы выбрали Райнера Вайса председателем научной рабочей группы, и NASA поручило мне выполнять функции ученого-исследователя, координирующего научные требования с инженерной группой.

Мы подготовили наш отчет с Мартином Донохоу, главным инженером. Наше исследование должно было показать, что данный эксперимент не может быть осуществлен никаким иным образом. Мы рассматривали вопрос, отвечало ли бы научным требованиям размещение аппаратуры на борту недавно одобренного Космического Челнока (Space Shuttle), и мы доказывали, что все три измерительных прибора действительно существенны. Вскоре мы получили предписание по-новому спроектировать аппаратуру под запуск на Космическом Челноке.

После этого начального витка соревнования нам велели продолжать, дали некоторые средства на покрытие расходов и людей для работы. Годдардовскую инженерную группу, приписанную к нам, возглавлял Джерри Лонганекер, управляющий проектом "Международный исследователь ультрафиолета" (IUE). Эта группа инженеров была очень опытной и быстро разбиралась в сложных задачах, которые мы перед ней ставили.

Около 1978 г. было решено, что Годдард будет собирать аппаратуру COBE целиком собственными силами, что означало, что гражданские службы и местные подрядчики будут делать основную работу. Преимущество Годдарда заключалось в том, что этот проект был прекрасным способом привлечь ярких молодых инженеров и обучить их на реальном космическом эксперименте. Преимущество эксперимента COBE состояло в том, что он позволял ученым и инженерам работать вместе в тесном контакте без препятствий, связанных с управлением, юридическими обязательствами и физической удаленностью. Это было очень важно для творческого процесса и достижения взаимной договоренности в решении проблем. Однако частью решения был самый низкий приоритет COBE среди всех главных проектов Центра.

Состав членов нашей команды со временем менялся, две фотографии (рис. 4 и рис. 5) показывают инженерную и научную группу на 1988 г. Подписи перечисляют членов команды и их роли. Роджер Мэтсон был нашим руководителем проекта, а Денис Маккарти был его помощником по техническим вопросам.

3.3. Замысел и конструкция спутника

Конструкция включала в себя защищенную область для инструментов, окруженную отражающим экраном. В центре находится криостат на жидком гелии, содержащий два прибора: абсолютный спектрофотометр в далеком инфракрасном диапазоне (FIRAS) и прибор для наблюдения диффузного фонового инфракрасного излучения (DIRBE). Приемники дифференциального микроволнового радиометра (DMR) были смонтированы в четырех (позже — трех) корпусах на внешней поверхности криостата. Солнечные батареи окружали спутник, а массивные цилиндрические болты выступали по бокам для крепления COBE к Космическому Челноку.

Внутри, скрыто от глаз, располагались баки с гидразиновым топливом для повышения орбиты от максимальной высоты, достижимой с помощью Челнока. Выбранная для COBE орбита была круговой, на высоте 900 км над Землей, с орбитальной плоскостью, наклоненной под углом 99 градусов к экватору, и почти перпендикулярной направлению на Солнце. Высота и наклон орбиты были выбраны в такой комбинации, чтобы экваториальное утолщение Земли оказывало приливное воздействие на орбитальную плоскость как раз достаточное для того, чтобы заставить ее прецессировать, совершая полный поворот за год и, тем самым, следуя за Солнцем. При таком выборе орбиты COBE оставался при полном солнечном освещении почти все время, а край диска Земли находился всего в 60 градусах от надира. Однако комбинация наклона орбитальной плоскости (9 градусов от перпендикуляра) с наклоном оси вращения Земли в 23,5 градуса от эклиптики подразумевает, что в течение примерно трех месяцев в году COBE летит сквозь тень Земли вплоть до 20 минут за виток и такое же время летит между Землей и Солнцем. Оба эти события требуют внимания. Во время тени COBE должен потреблять электроэнергию из батарей и производить некоторый нагрев тех своих частей, которые бы иначе слишком быстро остывали. Во время противоположной части витка Земля сияет над верхом защитного экрана и светит в наблюдательное окно приборов, создавая помехи в светоприемниках.

Конструкция космического аппарата для COBE имела некоторые необычные черты. Наиболее интересна, возможно, система контроля положения корабля в полете, которая была нужна, чтобы поворачивать космический корабль вокруг его оси симметрии со скоростью примерно один оборот в минуту (в полете он совершал один оборот за 72 секунды) и удерживать ось вращения примерно перпендикулярной направлению



Рис. 4. Научная рабочая группа COBE (Эли Двек отсутствует). Слева направо: Эд Ченг, Дэйв Вилкинсон, Рик Шефер, Том Мардок, Стив Мейер, Чак Беннетт, Нэнси Боггесс, Майк Джэнсен, Боб Сильверберг, Сэм Галкис, Джон Мазер, Харви Мозли, Филип Любин, Нед Райт, Майк Хозер, Райнер Вайс и Том Келсол.



Рис. 5. Руководители инженерной группы COBE. Слева направо (верхняя фотография): Дон Кросби, Джеф Гринвел, Билл Хоггард, Роджер Мэтсон, Эрнн Дутрич, Херб Миттельман, Эйлин Фербер, Боб Скулз, Джо Тертил, Морин Ментон, Боб Сэнфорд, Майк Роберто. Нижняя фотография: Пирс "Ли" Смит, Эрл Янг, Дэнис Маккарти, Дэйв Гилман, Боб Мэйчел, Чак Катц, Стив Лит, Берни Клейн, Лорен Линнстром, Тони Фрэгомони, Джон Вольфганг и Джек Пэддикорд.

на Солнце (на практике под углом 94 градуса) и примерно вертикальной в то время, когда космический аппарат обращался вокруг Земли.

Космический корабль имел комбинированную систему управления и контроля: он посылал свои технические данные через спутниковую систему получения и ретрансляции данных (TDRSS), а научные данные он передавал непосредственно на наземную станцию в испытательном центре на о. Уоллопс (WFF) Годдардовского центра космических полетов.

Криостат на жидком гелии был великим технологическим достижением отдела компании Ball Aerospace в Боулдере (штат Колорадо). Наш был почти точной копией криостата, разработанного для IRAS. Его конструкция включала внешнюю вакуумную цистерну с крышкой, которая могла быть отброшена после запуска, тороидальную цистерну, наполненную при запуске примерно 500 литрами жидкого гелия, и инструментальную камеру внутри тороидальной цистерны. Цистерна с гелием была подвешена внутри вакуумной оболочки с помощью ряда натянутых эпоксидно-стекловолоконных ремней, и окружена концентрическими алюминиевыми оболочками, охлаждаемыми трубами, несущими выходящий газообразный гелий. Между концентрическими оболочками располагались многослойные прокладки из покрытого алюминием изоляционного материала.

3.4. FIRAS

Цель FIRAS состояла в том, чтобы проверить, имеет ли излучение Большого взрыва спектр идеального черного тела.

Даже малые отклонения от идеальности означали бы, что Вселенная не проста, что есть некое новое явление, требующее своего понимания. Поскольку излучение приходит почти одинаково со всех направлений, прибор должен быть абсолютно откалиброван. Поскольку в галактиках, и в нашей Галактике, — Млечном Пути, — существуют процессы, которые производят излучение на длинах волн, перекрывающихся с КМФИ, важно составить карту излучения и посмотреть, какие части могут быть связаны с идентифицируемыми местными источниками. Главными ожидаемыми источниками являются частички пыли в Млечном Пути, нагретые звездным светом, и межзвездные молекулы, атомы и ионы, нагретые светом звезд и столкновениями с другими компонентами межзвездной среды. На волнах более длинных, чем наблюдал FIRAS, межзвездные электроны, сталкивающиеся с протонами и вращающиеся в магнитном поле, светят ярче, чем КМФИ, но все эти местные источники легко узнаются по их концентрации в плоскости Млечного Пути.

FIRAS был модернизированной версией исходного аэростатного эксперимента Пола Ричардса. Основными улучшениями были: 1) весь прибор находился в космосе, над атмосферным излучением и над областью возможного запотевания оптики; 2) апертура была увеличена для собирания большего количества света и расширения области чувствительности прибора в сторону более длинных волн; 3) интерферометр был сделан симметрично, давая доступ к обоим входным и выходным каналам, так, чтобы он мог быть использован в качестве дифференциального компаратора между входными

сигналами и таким образом весь имеющийся входящий свет мог быть наблюден; 4) первичный сигнал от неба мог быть полностью закрыт точным внешним чернотельным излучателем, эффективно моделирующим излучение Большого взрыва — внешним калибратором (XCAL); 5) чтобы сбалансировать сигнал от неба, вторичный сигнал подпитывался маленьким чернотельным излучателем с регулируемой температурой — внутренним калибратором (ICAL); 6) конический концентратор света с полезной нагрузки аэростата был заменен на более совершенный конус Винстона, — не отражающий параболический концентратор с улучшенным профилем пучка, названным Небесным Рупором; 7) отражатель теплового излучения окружающей среды, сделанный из нержавеющей стали, который присоединялся к коническому светоконцентратору, был заменен на плавно расширяющийся раструб, напоминающий трубы музыкальных инструментов; 8) температура Небесного Рупора и его расширяющейся части могла контролироваться в широком диапазоне температур, так же как и температура контрольного концентратора (Реперного Рупора) вторичного сигнала; 9) область принимаемых длин волн была расширена и разделена на два диапазона — коротких и длинных волн; 10) детекторы света были усовершенствованы; 11) время наблюдения было увеличено с нескольких часов до 10 месяцев, и все небо было картографировано одним и тем же инструментом.

Основными источниками повышения точности послужили дифференциальный способ измерения, уменьшающий динамический диапазон (контраст) между уровнем сигнала и шумом детектора, и точный внешний чернотельный калибратор.

Нам было задано много вопросов относительно калибратора. По законам Киркгофа, излучательная способность тела равна его поглощательной способности. Излучательная способность есть отношение излучения реального тела к излучению идеального черного тела той же температуры. Поглощательная способность есть поглощенная доля падающего излучения. Следовательно, идеально поглощающее тело есть идеальный излучатель. Главной задачей введения в конструкцию калибратора было обеспечение того, чтобы лучи, достигающие входа спектрометра, приходили только от калибровочного тела, но не от других мест. Мы определяем вход спектрометра как место соединения калибратора с концентратором сигнала. Есть три других источника излучения, пересекающего эту границу, которые не происходят от излучения калибровочного тела. Это: 1) излучение от концентратора, которое ударяется в калибратор и отражается назад в угол приема Небесного Рупора; 2) излучение или отражение от спектрометра, которое проходит к калибратору XCAL и отражается им назад к спектрометру; 3) утечка излучения неба или от обслуживающей калибратор аппаратуры, или от других объектов над XCAL вблизи соединения калибратора и концентратора, или через материал XCAL.

Мы проанализировали все эти возможные ошибки и, насколько мы знаем, избежали их на уровне нескольких единиц на миллион. Подробности изложены в работе Мазера и др. (Mather et al. 1998).

Чтобы достигнуть такого уровня производительности, нам был необходим материал с высокой поглощательной способностью. Мы выбрали Eccosorb — эпоксидную смолу, наполненную очень мелким железным порошком. Этот материал имеет показатель преломления около 2, так что его поверхностным отражением, составляющим примерно 10 % при перпендикулярном падении света на поверхность, нельзя пренебречь (Hemmati, Mather, Eichhorn, 1985). Таким образом, мы сконструировали XCAL как конус с повторными возвращениями, подобный сурдинке на музыкальной трубе, так, чтобы световой луч, входящий в конус, должен был бы

испытать по меньшей мере 5 зеркальных отражений, прежде чем сможет снова выйти наружу.

Перепады температур производят эффект второго порядка, и мы полагаем, что их влияние на спектр было менее нескольких миллионных долей. Однако для сравнения с измерениями других приборов нам было нужно знать температуру очень хорошо. Нашими термометрами были германиевые термометры сопротивления, откалиброванные в Национальном институте стандартов и технологии, но после запуска было сомнение относительно стабильности их калибровки на уровне нескольких милликельвинов. К счастью, были другие способы подтвердить измерения температуры после запуска.

Чтобы предотвратить утечку излучения около края калибратора, там, где он подходит к Небесному Рупору, калибратор снабдили двумя кольцами из покрытого алюминия пластиком Kapton, подогнанными так, чтобы они едва касались Небесного Рупора.

Приемники для FIRAS поддерживались в максимально холодном состоянии с помощью медных охлаждающих ремней, которые протягивались прямо от приемников к креплениям на гелиевом криостате. Это были композитные болометры, собранные в Годдарде. Каждый болометр имел очень тонкий алмазный лист с частично проводящим слоем, оптимизированным для поглощения входящего излучения и подвешенном с помощью тонких нитей из кевлара. К алмазу был прикреплен крошечный кубик кремния, допированный таким образом, чтобы стать температурно-чувствительным сопротивлением. Входящее излучение поглощалось пленкой на алмазе, превращалось в тепло и проводилось к кремниевому термометру. Постоянное напряжение прикладывалось к термометру через сопротивление, а напряжение на термометре усиливалось расположенным рядом полевым транзистором. Этот транзистор не работал бы при температуре остальных частей прибора в 1,5 K, поэтому он был подвешен внутри маленькой камеры на кевларовых нитях и электрически нагрет до температуры примерно 70 K.

В развитии концепции детекторов я преследовал замысел, выношенный мною еще в институте — построить подходящую теорию шума и предельной чувствительности болометров. Я трудился над рукописью, в то время как моя будущая жена Джейн преподавала балет; я возил ее на работу, потому что мы сломали ей руку, танцуя самбу. Эта работа превратилась в серию статей (например, Mather, 1984), которые в конце концов стали моими наиболее цитируемыми публикациями. Причина была неожиданной: наши болометры были хорошими детекторами излучения любого типа, включая космические лучи. Харвей Мозли увидел в этом перспективу, зная, что эти детекторы могут быть значительно усовершенствованы. Улучшенные детекторы летали в космос на рентгеновском спутнике Suzaku, и они прекрасно работали, будучи способными измерить энергию единичного рентгеновского фотона с энергией 6 кэВ с точностью в несколько эВ.

Зеркала интерферометра должны были двигаться точно, плавно, без трения, в течение миллионов проходов по связям в форме параллелограмма, с пластиночными пружинами на стыках, приводимые в движение соленоидом. Такая конструкция с легкостью отвечала требованиям на трение и время жизни. Положение зеркал точно измерялось масштабной линейкой. Показания линейки считывались оптическим образом посредством волоконно-оптических световодов, ведущих к источникам света и приемникам, расположенным вне криостата. Это вызвало проблему во время полета, когда космические лучи ударяли в световод, и вызывали световые всплески, которые запутывали измерение положения, и заставляли управляющую систему двигать мотор с силой против физического ограничителя. К счастью, был использован таймер, чтобы защитить оборудование от подобных событий.

3.5. DMR

Прибор DMR не располагался внутри криостата, но также преследовал цель измерения КМФИ. Я надеюсь, что историю этого инструмента более полно расскажет мой сополучатель Джордж Смут. Его назначением было измерение анизотропии, различия в яркости КМФИ по небу. Когда проект COBE только предлагался, не было никаких теоретических предсказаний ни относительно величины, ни относительно расположения таких вариаций, но наша точка зрения состояла в том, что какой бы она ни была, анизотропия должна быть измерена. За 17 лет от подачи проекта до первой публикации наших данных, предсказанные амплитуды вариаций экспоненциально убывали со временем, по мере того, как новому оборудованию раз за разом не удавалось увидеть ничего, кроме дипольного члена, связанного с движением Земли.

Не руководствуясь теорией, мы поставили цель измерить анизотропию настолько, насколько нам позволила бы наша окружающая среда. Так же, как и в случае FIRAS, есть местные источники излучения в нашей Галактике, яркие по сравнению с анизотропией, которую мы хотели измерить. Наш подход заключался в том, чтобы картографировать небо на трех (первоначально — четырех) частотах с одинаковыми диаграммами направленности приемников и воспользоваться тем, что только космическое микроволновое фоновое излучение будет иметь спектр черного тела. Электроны в нашей Галактике производят два типа излучения: через столкновения с протонами и через вращение в магнитных полях. Оба эти типа излучения сильны на длинных волнах и быстро спадают по мере того, как длина волны уменьшается. Пыль в нашей Галактике имеет противоположный тип спектра, и спектр ее излучения больше всего на длинах волн короче, чем КМФИ. В любом случае, измерения на многих длинах волн необходимы для расчета и компенсации этих типов излучения. Мы выбрали три частоты: 31,4, 53 и 90 ГГц.

Центральная идея прибора заключалась в переключателе Дике. Это устройство, которое может быстро переключать входной сигнал микроволновых приемников между двумя источниками, таким образом, что наблюдаемая в них разница яркости может распознаваться встроенным усилителем. Для составления карты КМФИ можно просто сравнить сигналы с двух антенн, направленных в разных направлениях. Наша специальная наблюдательная схема быстро проводила две антенны по всему небу, измеряя все возможные пары направлений, разделенных фиксированным углом между двумя антеннами. Наш вращающийся космический корабль, с вектором угловой скорости, плавно поворачивающимся вокруг Солнца в течение года, был блестящим решением. В ходе эксперимента радиометр наблюдал бы сотни миллионов отличий яркости между точками на небе, отстоящими друг от друга на 60 градусов. Затем, компьютерная программа подгонки по методу наименьших квадратов строила бы по ним карту, наилучшим образом представляющую все данные, включая подробный расчет систематических ошибок.

Конкретными проблемами этого прибора были чувствительность и устойчивость к систематическим ошибкам. Микроволновые приемники, имевшиеся в 1974 г., почти все были собраны на диодных смесителях, микроволновых контурах, которые смешивают сигнал от неба с сигналом местного генератора, чтобы произвести вторичный сигнал на промежуточной частоте. Этот сигнал промежуточной частоты может затем быть усилен, а его интенсивность умеренна. Пока разрабатывалась конструкция COBE, смесители были усовершенствованы, и в конце концов мы решили пожертвовать одним из начальных четырех частотных каналов, чтобы получить ресурсы для использования новой технологии. Усовершенствование было основано на охлаждении приемников. В нашем случае имелось изобилие возмож-

ностей охлаждения, поскольку приемники были защищены солнцезащитным экраном и должны были подогреваться для поддержания в теплом состоянии.

Некоторые систематические ошибки были очевидны. Во-первых, переключатели Дике были сделаны с использованием ферритовых бусинок, приводимых в действие магнитными полями, и они были чувствительны к внешним магнитным полям от Земли и от стержневых магнитов двигателей спутника. Мы предусмотрели магнитную экранировку, но знали, что некоторая проблема останется. Во-вторых, антенны приемника принимали излучение, приходящее с других направлений. Мы выбрали гофрированные рупорные антенны и научились делать их так точно, чтобы восприимчивость к паразитному излучению была очень маленькой. Мы должны были измерить этот эффект после запуска и его компенсировать. Главным источником паразитного излучения была Земля, которая в 10 миллионов раз ярче, чем космические флуктуации, которые мы, в конце концов, обнаружили. Земля скрыта от приемников большую часть года, но некоторая часть ее излучения дифрагирует на крае солнцезащитного экрана и достигает антенн. В-третьих, приемники и переключатели были чувствительны к температуре, и, предположительно, к напряжению питания, и ко всем видам менее значительных возмущений. Поскольку мы искали сигналы, остающиеся после обработки сотен миллионов наблюдений, мы должны были продумать пути обнаружения очень маленьких эффектов, которые могли бы испортить полученные данные. Большая часть из них была обнаружена и исправлена до запуска, но некоторые должны были быть измерены и компенсированы программным образом после запуска. В течение месяцев, когда Земля слегка восходила над плоскостью солнцезащитного экрана на части орбиты и когда спутник проходил сквозь тень Земли на противоположной стороне орбиты, остаточное тепловое паразитное излучение и другие эффекты были достаточно велики, чтобы данным нельзя было в полной мере доверять.

3.6. DIRBE

Прибор DIRBE был сконструирован для другой цели: поиска и измерения диффузного инфракрасного фонового света на более коротких длинах волн, чем КМФИ. Совокупный свет удаленных галактик должен давать почти однородное свечение на небе. Если бы Вселенная была бесконечной, стационарной и однородной как во времени, так и в пространстве, то каждый луч зрения оканчивался бы на поверхности некоторой звезды, и мы бы купались в свете, как если бы мы находились прямо внутри некоторой такой звезды. Расширяющаяся Вселенная дает только конечный наблюдаемый объем и конечное время, а наиболее удаленные части испытывают сильное красное смещение. Тем не менее космическое свечение является одним из наиболее важных следов удаленных частей Вселенной, космическим резервуаром потерянных фотонов. Его измерение поведало бы нам о тех тусклых, наиболее удаленных ранних галактиках, даже если никакой телескоп никогда не сможет их наблюдать.

Главным препятствием для измерения рассеянного инфракрасного фонового света является наше местное астрофизическое окружение. Существуют несколько ярких источников, начиная с межпланетной пыли в нашей Солнечной системе. Эта сероватая пыль отражает некоторую часть солнечного света и поглощает остальную, нагреваясь до температуры 200 К и переизлучая свет в среднем инфракрасном диапазоне. Эта пыль видна невооруженным глазом как зодиакальный свет, и гораздо ярче в инфракрасных лучах. Еще дальше от нас похожим образом ведет себя межзвездная пыль. Ее температура зависит от расстояния до звезд и колеблется от нескольких градусов до гораздо более высоких значений в

ударных волнах или вблизи звезд. Очень малые крупинцы пыли также мгновенно нагреваются до очень высоких температур, до 1000 К или более, посредством поглощения отдельных оптических или ультрафиолетовых фотонов, или через удары космических лучей.

Наблюдательная стратегия понимания и компенсации этих, находящихся на переднем плане, источников состоит в том, чтобы проводить измерения на возможно большем числе длин волн (10), охватывающем сколь возможно большой спектральный диапазон (от 1,2 до 240 мкм); измерять поляризацию на трех самых коротких длинах волн, потому что рассеянный солнечный свет поляризован; проводить измерения в диапазоне сколь возможно больших углов от Солнца, потому что зодиакальный свет сильно сконцентрирован в направлении на Солнце и в плоскости эклиптики. Наш диапазон углов составлял от примерно 64 до 124 градусов, что достигалось расположением линии зрения DIRBE под 30 градусов по отношению к оси вращения COBE. Широкий спектральный диапазон потребовал использования детекторов, изготовленных по четырем различным технологиям: сурьма-индиевые (In:Sb) фотоэлектрические детекторы от 1 до 5 мкм; мышьяк-кремниевые (Si:As) фотопроводники от 12 до 25 мкм; германиево-галлиевые (Ge:Ga) детекторы от 60 до 100 мкм и болометрические детекторы для 140 и 240 мкм.

Прибор также должен был иметь конструкцию, допускающую абсолютную калибровку. Для достижения этого нам было нужно, чтобы концепция прибора включала следующие черты: 1) темная внутренность инструмента, представляющая нулевой сигнал; 2) модулятор, быстро переключающий направление прибора вперед и назад между небом и внутренностью инструмента, инфракрасный аналог переключателя Дике; 3) калибровочное тело, которое могло бы загораживать луч прибора и замещать его, не излучая; 4) источник света, который мог бы определять усиление прибора и проверять его стабильность во времени; 5) точное измерение диаграммы направленности прибора для сравнения калибровки от стандартных звезд с поверхностной яркостью диффузного фона; 6) детальное понимание отклика на стандартные звезды; 7) подавление световых помех от ярких объектов вне поля зрения (таких как Луна, Земля, Солнце, центр Галактики и Юпитер). Оптическая схема DIRBE была оптимизирована под эти цели. Апертура составляла всего 20 см, но поле зрения было большим (0,7 градуса), чтобы оптимизировать чувствительность к диффузному излучению. DIRBE был заключен в криостат, так что его внутренность была, действительно, холодной и темной. Модулятор представлял собой специально сконструированный прерыватель в форме камертона с зубцами, которые открывались и закрывались с частотой 32 Гц. Телескоп был системы Джеймса Грегори, так что края поля и зрачка телескопа перед прерывателем могли ограничивать паразитное излучение. Тщательно спроектированная система разделительных перегородок в трубе телескопа перехватывала и отражала прочь любой свет, который мог быть рассеян в прибор, блестящий конус на входе трубы отражал любые лучи, касающиеся верхней границы криостата, и плотно подогнанная крышка защищала телескоп от молекулярного или пылевого загрязнения до выхода на орбиту. Все детекторы имели одно и то же поле зрения, так что относительные цвета обнаруженных объектов всегда были бы верны. Поле зрения было квадратным, так что звезда, проходящая через поле, всегда производила бы примерно одинаковый отклик, независимо от того, в каком точно месте поля это произошло.

Прибор DIRBE также использовался для получения точной информации о местоположении. По мере того, как COBE вращается, луч зрения DIRBE быстро пронесется по небу, и возможна точная хронометрия сигналов от ярких звезд, про-

ходящих через луч зрения. С помощью алгоритма, разработанного членом научной группы Эдвардом Л. (Недом) Райтом, эта хронометрия сигналов комбинировалась с моделью вращения COBE и другими его датчиками положения для получения точной информации о местоположении спутника.

4. Перестройка и запуск COBE

Проект COBE был официально одобрен в 1982 г., когда стало ясно, что спутник IRAS полетит. Криостат IRAS был чрезвычайно сложной задачей, и COBE полностью зависел от его успешной работы, поскольку у нас была почти такая же конструкция. Кроме того, бюджет NASA в то время был очень ограничен в связи с подорожанием IRAS, космического телескопа Хаббл и других проектов. В конце концов IRAS был успешно запущен 25 января 1983 г., и наш путь казался открытым. Майкл Хозер был членом научной рабочей группы IRAS и отвечал за анализ данных, так что он был весьма осведомлен о технологических подробностях и научных результатах IRAS. Спутник IRAS преподнес несколько весьма замечательных неожиданных открытий: оказалось, что многие близлежащие звезды были окружены светящимися пылевыми облаками, подобными нашему собственному зодиакальному свету, но гораздо более яркими; удаленные галактики были чрезвычайно яркими в далекой инфракрасной области, иногда в 100 или 1000 раз ярче, чем в видимом диапазоне. Наш проект продолжился со многими второстепенными исправлениями и обсуждениями главного. Наши бюджетные требования также возросли, но Главное управление не имело для нас дополнительных средств, так что мы пошли на ряд рискованных решений и "срезали некоторые углы". Это нам удалось.

К январю 1986 г. мы собрали аппаратуру спутника. Была построена фанерная модель спутника в натуральную величину для монтажа электронных блоков и электрических кабелей. Затем наступил роковой холодный день во Флориде, когда Космический Челнок "Челенджер" и 7 наших астронавтов погибли в пламени. Для нас, членов команды COBE, и для большинства из NASA, будущее казалось суровым. Дэнис Маккарти, заместитель руководителя проекта, начал искать другое транспортное средство для запуска спутника. NASA принудили отказаться от своих надежных ракет-носителей "Дельта" и всех других одноразовых ракет в пользу Челнока, так что у нас не было ничего готового. К счастью, еще оставались запасные части от ракет "Дельта", и можно было собрать целую ракету. Однако "Дельта" определенно не могла нести нашу полезную нагрузку в том виде, в каком она была. COBE был чрезмерно большим и слишком тяжелым. Наша инженерная группа не отчаивалась. COBE был предложен в 1974 г. под запуск на "Дельте", а имевшаяся конструкция спутника под Челнок использовала 5000 фунтов горючего и физическое устройство, которое не было бы нужно, если бы ракета "Дельта" могла взять нас на весь путь к необходимой орбите. В конце концов оказалось возможным просто запустить COBE на "Дельте".

И все-таки понадобилась одно новшество: солнцезащитный экран должен был быть свернут и развернут после запуска. Разворачивание осуществлялось энергией пружины после того, как круговой ремень вокруг свернутого экрана разрывался взрывным зарядом.

Затем, одно незначительное изменение было необходимо для аппаратуры DMR. Пространства, имевшегося между новым сложным экраном и оболочкой криостата, не вполне хватало для размещения корпусов микроволновых приемников без модификаций. Понадобилась изменить конструкцию корпусов и конфигурацию волноводов, но это было также возможно.

Теперь, когда у нас была новая концепция спутника, мы представили ее в Главное управление NASA. Быстро стало ясно, что COBE теперь мог бы быть первой научной экспедицией NASA в космос поле взрыва Челленджера. В конце 1986 г. нам был дан зеленый свет, и мы поспешили подготовиться к запуску как можно скорее. Неожиданно наш проект из самого низа шкалы приоритетов переместился почти на самый верх, и встал следом за космическим телескопом Хаббл. Мы начали круглосуточную работу, сколько люди могли выдерживать, чтобы закончить реконструкцию, переделать приборы и устранить все известные проблемы с аппаратурой.

Наша полезная нагрузка была наконец готова и погружена на огромный грузовик и провезена по кольцевой дороге Capital Beltway на базу воздушных сил США Andrews. Здесь грузовик был завезен прямо в ожидающий транспортный самолет C5-A и доставлен по воздуху на космодром Ванденберг в Калифорнии. На пусковой площадке была завершена окончательная сборка и проведены последние проверки. 17 октября 1989 г. в Сан-Франциско случилось землетрясение, но COBE не работал в те дни потому, что двое из наших инженеров уехали жениться.

Вечером накануне 18 ноября мы были готовы к запуску. Ральф Альфер и Роберт Херман приехали посмотреть на запуск экспедиции, которая проверит их теорию. Ранним утром в день запуска главный вопрос касался ветра. Если направление и скорость ветра слишком быстро будет меняться с высотой, контрольная система ракеты не сможет их компенсировать и ракета может разбиться. Были запущены отслеживаемые метеозонды для определения градиента скорости ветра, а собравшиеся толпы стояли на холодном и темном поле в 3 км от пусковой площадки. Мы наблюдали, как ракета набрала высоту, отбросила отработанные стартовые двигатели и исчезла из виду всего за считанные минуты. Несколькими минутами позже высотные ветры закрутили хвост ракетных выхлопов в витые петли, сделав вполне видимой ту опасность, которую Дельта только что миновала.

От COBE ничего не было слышно снова около часа, пока он не прошел над станцией слежения на Аляске. Спутник был жив и благополучен. В первые несколько дней он столкнулся с новыми опасностями. Во-первых, внешняя часть криостата быстро остывала. Мы беспокоились, что если она чересчур остынет, крышка не сможет отойти. Во-вторых, один из гироскопов в системе контроля местоположения вышел из строя спустя несколько дней после запуска. К счастью, наша инженерная группа спроектировала эту систему способной к самоисправлению во время движения. Затем мы снова открыли Антарктиду. Система энергоснабжения была рассчитана на усвоение определенной мощности солнечного света, но мы не подумали, как много солнечного света будет отражаться льдом Антарктиды. Затем, электроны и протоны, захваченные в радиационный пояс Земли (пояс Ван Аллена), нарушали функционирование электроники, управляющей зеркалами FIRAS, но мы отключили FIRAS в этой области.

Жидкий гелий в криостате сохранялся примерно 10 месяцев. Конец был резким, и за минуту температура быстро поднялась. Мы продолжали использовать DIRBE, поскольку его коротковолновые In:Sb детекторы прекрасно работали при более высокой температуре. Температура внутренности криостата остановилась примерно на 60 К. Прибор DMR, который не использовал гелий, продолжал функционировать в общей сложности в течение четырех лет.

Конечная участь спутника состояла в том, чтобы использоваться в нуждах коммуникации. Он все еще на той же самой орбите, и продолжает вращаться в правильном направлении, поскольку ему не нужно для этого никакого горючего, а

система управления надежна и имеет большой избыточный ресурс. По оценкам, орбита испортится примерно через 1000 лет.

5. Анализ и интерпретация данных

Контроль и управление космическим аппаратом, а также анализ и интерпретация данных потребовали до 100 программистов и ученых. Все три инструмента требовали специального анализа для учета систематических ошибок приборов и калибровки, и затем для понимания местного астрофизического окружения.

5.1. FIRAS

Первым прибором, который дал научные результаты, был FIRAS. Мы, как можно лучше подобрали температуру внутреннего калибровочного тела, чтобы обратиться в нуль сигнал интерферометра. Точность нуля была прямой мерой соответствия между внутренним телом и спектром КМФИ. Еще перед тем, как мы осуществили точную калибровку, мы уже знали, что соответствие прекрасное. Используя грубую калибровку, мы добавили наблюдаемую разницу к функции Планка для полученной температуры и изобразили результат. Еще не зная пределов ошибок, мы получили 1 %. Когда я представил этот спектр на съезде Американского астрономического общества в январе 1990 г. в Кристал Сити (пригород Вашингтона, округ Колумбия), аудитория в более чем 1000 человек встала, аплодируя. Никто из нашей группы COBE не предполагал такой реакции, поскольку этот спектр не был для нас неожиданностью.

Ретроспективно мы теперь понимаем причину такого энтузиазма. Было не только приятно смотреть на этот спектр, но он разом прогнал сомнения почти всех относительно теории Большого взрыва. В течение столь многих десятилетий продолжались бурные сражения между защитниками теорий Большого взрыва и Стационарной Вселенной, и в течение столь многих лет изобретательные люди объясняли ряд небольших расхождений между теорией и измерениями. Теперь споры закончились, хотя некоторые сторонники теории Стационарной Вселенной и не согласны. Теория Большого взрыва была заслуживающей доверия, Вселенная — простой, достаточно простой для того, чтобы теоретики приступили к следующей проблеме.

Всего несколько недель после запуска COBE Херб Гаш и его группа из университета Британской Колумбии запустили исследовательскую ракету с их версией прибора FIRAS (Gush, Halpern, Wishnow, 1990). Эта полезная нагрузка летала несколько раз, каждый раз безуспешно, но в этот раз она заработала. Их результаты сошлись с результатами FIRAS, с той же температурой в пределах ошибок и также не показали никаких отклонений от спектра черного тела. Если бы им повезло немного больше, они могли бы в чем-то опередить нас до того, как был запущен COBE, но чтобы прийти к нашим итоговым выводам нам действительно требовалась карта всего неба, которую мог дать только COBE.

График нашего спектра сегодня украшает многие учебники астрономии, но люди все еще продолжают задавать один элементарный вопрос: почему этот график не выглядит так, как в других учебниках? Дело в том, что наш график представляет зависимость интенсивности от частоты в обратных сантиметрах, числе волн на сантиметр. Учебники обычно изображают график интенсивности от частоты в Герцах, или от длины волны, обычно в микрометрах. На глаз кажется, что графики не согласуются не только потому, что шкалы различны, но потому, что результаты нормированы по-разному: графики дают мощность на единицу площади на единичный интервал частоты или длины волны, и эти интер-

валы также нужно преобразовывать. Когда эти преобразования сделаны, графики согласуются.

Полная калибровка и анализ данных FIRAS занял много лет. Обнаруженные нами систематические ошибки в данных не были полной неожиданностью, но построение их точных моделей требовало подбора по методу наименьших квадратов с тысячами параметров, немногие из которых были кардинально важны. Дейл Фиксен был главным творцом этого процесса. Главными ошибками, подлежащими компенсации, были следующие: 1) космические лучи, попадающие в детекторы, порождали импульсы напряжения, которые нужно было обнаружить и устранить; 2) изменения температуры по многим причинам приводило к вариациям степени усиления детектора; 3) имела место небольшая вибрация в механизме зеркал из-за натяжения в связях параллелограмма, которое возбуждалось вспомогательной цепью. Хотя она была минимизирована во вспомогательной цепи фильтром, вырезающим частоту 57 Гц, сохранилось ее маленькое остаточное влияние на форму интерференционных картин; 4) внутреннее контрольное тело не было очень хорошим черным телом; 5) калибровки термометров, по-видимому, изменились после того, как они были произведены за годы до запуска, и три термометра на внешнем калибраторе не согласовывались друг с другом с ожидаемым допуском порядка милликельвина; 6) имел место маленький оптический эффект, состоящий в том, что излучение могло многократно проходить сквозь интерферометр, и приобретать модуляцию на удвоенной или утроенной частоте. К счастью, прибор имел 4 приемника — по два на каждой стороне и по два в каждом частотном диапазоне, и он имел две разных длины прохода луча, всего 8 различных способов наблюдения. Сравнение многочисленных детекторов и длин прохода дало много способов понимания и обнаружения ошибок. Наблюдение межзвездных спектральных линий, в частности линии C II на 157,74 мкм, было способом подтверждения абсолютной частотной градуировки и, следовательно, подтверждения температурной градуировки (Fixsen, Mather, 2002).

Понимание и компенсация влияния местных астрофизических источников также были трудны. Один результат состоял в том, что пыль в нашей Галактике находится почти вся при примерно одной и той же температуре и имеет приблизительно одинаковый спектр, но не совсем. Также в плоскости Галактики есть некоторые направления, где находятся, очевидно, многочисленные пылевые облака с разной температурой на одном и том же луче зрения. Наши аналитики с удивлением увидели, что некоторые интерферограммы кажутся "испорченными" синусоидальными волнами. Эти волны были ровно тем откликом, который ожидался на яркие межзвездные спектральные линии. Линия тонкой структуры ионизированного углерода C II на 157,74 мкм до сих пор является ярчайшей из наблюдаемых линий и несет около 0,3 % полной светимости Млечного Пути. В первый раз мы наблюдали линию N II на 205,178 мкм, затем она наблюдалась в лаборатории. Другие линии от CO, C I, H₂O также были видны (Bennett et al., 1994). Линия 157,74 мкм является столь яркой, что нам удалось померить дифференциальное доплеровское смещение этой линии за счет вращения Галактики, хотя наше спектральное разрешение было очень средним.

Главным результатом было то, что спектр КМФИ соответствует спектру черного тела с температурой $2,725 \pm 0,001$ К со среднеквадратичным отклонением пика яркости в 50 миллионных долей. Интерпретация этого результата состоит в том, что менее чем 0,01 % энергии КМФИ добавилась к нему после первого года расширения Вселенной. Энергия, добавленная до этого времени изменила бы температуру излучения (Wright et al., 1994).

Энергия, добавленная между красными смещениями от 10^5 до 3×10^6 , примерно в первую 1000 лет придала бы излучению измененный спектр, соответствующий химическому потенциалу μ , что было изучено Зельдовичем и Сюняевым (Sunyaev, Zeldovich, 1970). В этом случае число заполнения фотонных мод равно $\eta = 1/(e^{x+\mu} - 1)$, где $x = h\nu/kT$, и h — постоянная Планка, ν — частота осцилляций, k — постоянная Больцмана, T — температура. Измеренное нами значение (1994) составляло $\mu = (-1 \pm 4) \times 10^{-5}$ или $|\mu| < 9 \times 10^{-5}$, с доверительным интервалом 95 %.

Излучение, добавленное позже, даст спектр КМФИ, который является смесью чернотельных спектров в некотором диапазоне температур, параметризуемой величиной y , как это описано Зельдовичем и Сюняевым (Zeldovich, Sunyaev, 1969). Здесь $y = (1/m_e c^2) \int k(T_e - T_\gamma) dt_e$, где m_e — масса электрона, c — скорость света, T_e — температура рассеивающих электронов, T_γ — температура КМФИ в то время, dt_e — дифференциальная оптическая толщина рассеивающих электронов. Искажение спектра, произведенное такого рода смесью черных тел, описывается формулой $dS_\nu/dy = T_0[x \coth(x/2) - 4] dB_\nu/dT$ где S — спектральная яркость, B — функция Планка, а T_0 — средняя температура. Мы нашли, что $y = (-1 \pm 6) \times 10^{-6}$, очень маленький параметр.

Существует длинный список предполагаемых источников энергии, которые использовались, чтобы объяснить прежние измерения отклонений спектра от чернотельного вида. Он включает в себя турбулентность, распад протона, распад других нестабильных частиц, распадающиеся массивные нейтрино, позднее — фоторождение дейтерия, взрывное или нормальное образование галактик, космические гравитационные волны, космические струны, черные дыры, активные галактические ядра, звезды III поколения, горячую межгалактическую среду и т.д. Наши результаты не исключают малых вкладов от этих источников, но показывают, что они не могли бы быть ответственными за большую часть Вселенной, которую мы сегодня видим.

Также FIRAS измерил: 1) спектр космического фонового излучения в далеком инфракрасном диапазоне, впервые обнаруженный прибором DIRBE (Fixsen et al., 1998); 2) спектр зодиакального света в далекой инфракрасной области, показывающий, что ответственные за него частицы пыли велики и имеют размер около 30 мкм; 3) спектр части КМФИ, связанной с движением Земли в космосе, называемой дипольной компонентой (Fixsen et al., 1994); 4) ограничения на пространственные вариации спектра КМФИ (Fixsen et al., 1997).

FIRAS также подтвердил планковскую формулу спектра излучения черного тела (Нобелевская премия, 1918 г.). Если бы формула Планка была неверна, программа калибровки не дала бы самосогласованных результатов. Калибровка FIRAS зависит от температуры через функцию числа заполнения фотонных мод, $\eta = 1/(e^x - 1)$, а это часть функции Планка, которую мы проверяли.

Недавняя статья Фиксена и Мазера (Fixsen, Mather, 2002) доказывает, что конструкции современных детекторов и приборов могли бы дать 100-кратное увеличение чувствительности и точности. В этом случае астрофизическая интерференция от пыли и молекул определенно ограничила бы космологические выводы. Однако если бы с этими проблемами первого уровня удалось справиться, то не является невероятной и возможность измерения искажений спектра КМФИ за счет известных форм высвобождения энергии (например, реионизации Вселенной на красных смещениях 10–20, как это обнаружено WMAP).

Написано несколько статей о возможности обнаружения искажений спектра КМФИ за счет маленьких эффектов в эпоху рекомбинации. Например, небольшая непрозрачность, связанная с молекулой гидрида лития LiH, могла бы быть видна,

если бы населенности уровней молекулы слегка отклонялись от теплового равновесия. Общий вопрос касается $\text{Lyman } \alpha$ фотонов, остающихся от последней рекомбинации каждого атома водорода. Существовало бы примерно по одному фотону на один атом водорода с длиной волны $(1+z) \times 0,1216$ мкм, где $z \sim 1,089$, и удельной шириной линии в несколько процентов. Атомы водорода гораздо менее многочисленны, чем фотоны КМФИ, более чем в 10^9 раз, а ожидаемая длина волны лежит в области спектра, которая заполнена излучением атомов, молекул и пыли Галактики, а также излучением зодиакальной пыли, так что крайне маловероятно, что эти немногочисленные фотоны удастся наблюдать.

Сейчас готовятся улучшенные наблюдения спектра КМФИ на более длинных волнах. Проект ARCADE (Kogut et al., 2004) представляет собой размещенный на аэростате микроволновый радиометр с внешним чернотельным калибратором на полный луч. Работая без защитного окна, он зависит от высокоскоростного потока газообразного гелия, предназначенного для удержания остаточной атмосферы на аэростатных высотах от попадания в прибор и конденсации на антеннах. Предварительные результаты показывают, что измеренная температура согласуется с числом, полученном FIRAS. Со временем этот подход даст улучшенные измерения параметра μ для раннего выброса энергии, поскольку это искажение наибольшее на длинных волнах.

5.2. DMR

Прибор DMR вторым дал космологические результаты. Группа анализа данных старательно работала, чтобы понять необходимые поправки для известных систематических ошибок, в частности, магнитной и тепловой чувствительностей переключателей Дике и световых помех от ярких объектов подобных Земле. Первый намек на то, что нами померена космическая анизотропия, был показан научной рабочей группе на специальном собрании всей команды в доме Нэнси Боггесс в октябре 1991 г. Недом Райтом, который написал собственную программу анализа данных DMR первого года. Немедленным ответом научной группы было то, что это очень важно, слишком важно, чтобы быстро публиковать. Нам были хорошо известны недавние липовые научные результаты по полимеризации воды, холодному термояду и другим темам, и мы были непреклонны в том, чтобы сделать все как следует.

Было три главных вопроса. Во-первых, были ли все известные инструментальные ошибки надлежащим образом описаны и компенсированы? Во-вторых, удалось ли нам правильно понять и устранить влияние находящихся на переднем плане галактических электронов и пыли? И, в-третьих, были ли наши детально разработанные компьютерные программы надежными?

Чтобы взяться за первый вопрос, мы провели встречу группы, посвященную мозговому штурму на тему всего того, что могло бы, возможно, повлиять на точность данных, и изобретения стратегии измерения и анализа каждого эффекта. Для каждого из них нам было нужно, чтобы два различных человека и две компьютерные программы пришли к согласию и чтобы научная группа проверила результаты. Ален Когут и Нед Райт были главными аналитиками, а Дэвид Вилкинсон был наиболее стойким скептиком. Этот процесс занял много месяцев.

Второй вопрос исследовался в Годдарде Чарльзом Беннеттом, Гари Хиншоу и остатком команды, он описан в работе Bennett et al., 1992. Их стратегия состояла в том, чтобы представить два вида излучений находящихся на переднем плане галактических электронов и пыли моделями с подбираемыми коэффициентами, и затем предельно эти коэффициенты, сравнивая карты, полученные DMR и другими инструментами

на разных длинах волн. Результат заключался в том, что линейная комбинация трех карт DMR, взвешенных с конкретными коэффициентами, устранит почти все излучение Галактики для направлений, лежащих вне галактической плоскости.

Третий вопрос — вопрос о надежности программного обеспечения изучался посредством тщательных проверок каждого компьютерного кода и сравнения результатов личного кода, написанного Недом Райтом, с официальным кодом, написанным командой DMR в Годдарде, и с кодом, независимо разработанным Джорджем Смутом и его группой в Беркли.

Дополнительная проверка пришла от данных аэростатных приборов. Мы согласились убрать длинноволновой канал (на 23 ГГц) из DMR, и запустить на аэростате оригинальный инструмент, чтобы картографировать часть неба на этой длине волны. Карты от этого прибора содержали сильные сигналы от нашей Галактики — Млечного Пути, но они согласовывались с данными DMR (Fixsen, Cheng, Wilkinson, 1983). Кроме того, группа Стивена Мейера, Эдварда Ченга, Кена Ганга и Лаймана Пейджа из Массачусетского технологического института и Принстона, включая двух членов команды COBE, запустила на аэростате инструмент с болометрическими детекторами на более коротких длинах волн, и достигла достаточной чувствительности, чтобы увидеть космические флуктуации (Ganga et al., 1993). Их данные были обработаны как раз вовремя, чтобы показать, что они согласуются с космическими возмущениями, видимыми DMR, прежде, чем данные DMR были преданы огласке. В самом деле, если бы DMR не был построен, возможно, аэростатные данные в конце концов были бы признаны первым обнаружением космической структуры. Для наших целей было достаточно того, что мы знали о надежности данных DMR, покрывающих все небо.

Наконец, результаты были готовы и подготовлены к публикации. Объявление было сделано на собрании Американского физического общества в апреле 1992 г. в Вашингтоне (округ Колумбия). Было достаточно предварительной рекламы и некоторой утечки информации, чтобы пресс-конференция была заполнена телекамерами и репортерами. В течение этого дня наши результаты стали известны всему миру, и знаменитое замечание Джорджа Смута о том, что "мы видим лицо Бога", прошло повсеместно по всем новостям. Передают, что Стивен Хоукинг сказал что-то вроде того, что это было "наиболее важное открытие этого века, если не всех времен". На следующий день статьи интерпретирующие наши результаты были представлены в журналы и распространены по Интернету ведущими космологами, которые все написали заранее, кроме выводов. В течение того года появились еще тысячи статей, цитирующих наши результаты.

Показанные нами результаты представляли собой карты и спектры возмущений. Карты были красиво изготовлены так, что розовые и синие пятна показывали горячие и холодные части. Как указали Сакс и Вольф (Sachs, Wolfe, 1967), более холодные области отвечают более высокой плотности из-за гравитационного красного смещения фотонов, покидающих потенциальные ямы. Спектры были статистическими характеристиками пространственных флуктуаций, математически точными описаниями типичных размеров пятен. В первом приближении, мы нашли, что не существует характерного размера — пятна всех размеров равновероятны и равно ярки. Такой спектр называется "масштабно-инвариантным", как было предсказано Харрисоном и Зельдовичем и простыми вариантами теории космической инфляции. При ближайшем рассмотрении, флуктуации немного слабее, чем надо на больших угловых масштабах (90 градусов и более), и немного более возрастают на наименьших доступных наблюдению масштабах (7 градусов), чем то должно быть по теории.

Первый факт еще не объяснен, и, возможно, он не является статистически значимым. Второй факт очень важен, связан с движениями вещества во время космической рекомбинации.

Так что же померил DMR? Мы, действительно, открыли и картографировали первичные возмущения плотности во Вселенной. Если бы они не были найдены, теоретики были бы чрезвычайно разочарованы, потому что к 1992 г. существовала почти полная теория происхождения крупномасштабной структуры Вселенной, построенной на идее космической инфляции, которая определяет начальные условия и гарантирует крупномасштабную однородность Вселенной. Эта теория считает, что первичные возмущения плотности очень малой амплитуды являются зародышами крупномасштабной структуры и что обычное вещество падает в области с наибольшей начальной плотностью, оставляя пустые места (космические пустоты) там, где начальная плотность наименьшая. Единственная необходимая здесь сила — это гравитация. Примечательным результатом теории является то, что неоднородности плотности растут со временем линейно, а не экспоненциально, как во многих других явлениях природы. Причина состоит в том, что гравитационное притяжение удаленных частей Вселенной уменьшается с расширением, замедляя экспоненциальный рост и превращая его в линейный. Следовательно, измерение крупномасштабной структуры Вселенной, представленной галактиками и скоплениями галактик, должно также представлять начальные условия, первичные возмущения. К 1992 г. у нас были наблюдения крупномасштабных неоднородностей, прослеживаемых по галактиками, так что мы полагали, что знаем, чего ожидать.

Однако в этой картине мира была одна неприятность. Обычное вещество само по себе дает неверные распределения, и оно не может свободно двигаться по отношению к остальной Вселенной пока не станет нейтральным газом в эпоху космической рекомбинации. К счастью, уже было признано, что Вселенную, возможно, заполняет некоторый дополнительный сорт материи, называемый космическим темным веществом. Предполагается, что оно невидимо и не взаимодействует со светом, кроме как гравитационным образом. С другой стороны, поскольку оно не связано с первичным электромагнитным излучением, оно свободно начать движение до космической рекомбинации и может падать в первичные гравитационные ямы и заставлять их углубляться. К тому же, ничего неизвестно об этом темном веществе, кроме той информации, о которой заявляют астрономы: нет общепризнанной теории этого вещества, нет наблюдений частиц этого вещества в лаборатории, нет сведений о массах частиц, их стабильности и о чем бы то ни было еще. До сих пор только один вид темного вещества был наблюден в лаборатории — нейтрино, с тремя их ароматами и их античастицами, но по видимому их массы недостаточны для объяснения космического темного вещества.

Другим предметом дебатов в 1992 г. был вопрос о том, является ли Вселенная пространственно плоской, или нет. Теоретики чувствовали, что Вселенная нулевой кривизны проста и привлекательна и каким-нибудь образом обязана оказаться правдой. Чтобы сделать такую Вселенную, нам нужно было бы иметь в уравнениях член космического ускорения, подобный постоянной Λ , которую Эйнштейн (Нобелевская премия 1921 г., но не за эту работу) предложил, а позднее отверг. Возможно, как раз правильное значение такого члена, который производит отрицательную пространственную кривизну, могло бы уравновесить положительную кривизну, создаваемую обычной материей и темным веществом. Это было бы удивительным совпадением, если нет какого-то неизвестного закона природы, который требует, чтобы это было так. Этот член ускорения теперь называется космической темной энергией, каковое название указывает на

то, что она может не быть просто математической постоянной интегрирования, какой видел ее Эйнштейн, но, возможно, является новым видом силы или материи со своим собственным особым уравнением состояния. Итак, интерпретация измеренных космических флуктуаций стала главной научной индустрией.

DMR работал в общей сложности четыре года, и дополнительные данные были статистически совместимы с данными первого года. Новые данные предоставляли гораздо лучшие возможности разыскивания и исправления систематических ошибок всех видов, так что конечные результаты улучшились более чем в два раза по отношению к уровню случайного шума.

Данные DMR анализировались с целью обнаружения многих интересных эффектов, но ни один из них не был найден со значительной статистической значимостью. Например, было предположение о существовании космических струн, тянущихся сквозь громадные области пространства. Одно время думали, что они сами по себе могли произвести все космические флуктуации плотности. Если бы они были достаточно сильны, то производили бы разрывы на температурных картах, и были бы видны. Так как ничего не было обнаружено, очевидно, они не ответственны за анизотропию КМФИ, но, возможно, их просто очень мало. Также искали негауссовы флуктуации; возможно, существовали особые локализованные объекты, с положительной или отрицательной (относительно фона — *примеч. переводчика*) температурой, которые могли бы быть найдены при ближайшем рассмотрении. Ни один из них также не был найден с уровнем флуктуации выше, чем от обычных гауссовых флуктуаций и от известных точечных источников, подобных Юпитеру. Угловое разрешение DMR слишком грубое, чтобы он сильно отклонялся на более тусклые объекты. Другая возможность состоит в том, что Вселенная имеет особенную топологию: предположим, что мы нашли один и тот же объект или распределение в двух различных местах на карте. В этом случае, Вселенная могла бы иметь топологию сферы или тора, в которой один и тот же объект может наблюдаться в двух различных направлениях. Эти поиски также не дали положительных результатов.

Вслед за объявлением результатов DMR, было построено еще множество инструментов, и сотни ученых по всему миру продолжили измерять и анализировать. Наземные и аэростатные приборы провели измерения с улучшенным угловым разрешением. Члены группы COBE Чарльз Беннетт и Дэвид Вилкинсон задумали, предложили и построили MAP, (Microwave Anisotropy Probe — зонд микроволновой анизотропии), запущенный в 2001 г. и работающий до сих пор. Он был переименован в WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe — зонд микроволновой анизотропии Вилкинсона), вслед за смертью Вилкинсона 5 сентября 2002 г. WMAP распространил карты всего неба DMR на гораздо более высокие чувствительность и угловое разрешение, и подтвердил, что данные DMR верны. С помощью данных WMAP, мы сейчас знаем многие из космических параметров (плотности вещества, темного вещества и темной энергии, возраст Вселенной и т. д.) с точностью до одного-двух процентов. Он также обнаружил удивительную неожиданность: свидетельство о проявлениях повторной ионизации Вселенной при красном смещении около 13. Это было распознано по поляризации КМФИ, произошедшей в результате квадрупольной анизотропии КМФИ, видимой электронами, когда они рассеялись на излучении в направлении к нам в последний раз. Угловой масштаб наблюдаемой нами поляризационной картины определяет красное смещение, на котором произошло рассеяние, а величина поляризации определяет оптическую глубину рассеяния.

Осталось несколько трудных задач перед будущими измерениями анизотропии КМФИ. Одна, привлекающая сейчас

наибольшее внимание, — это поиск поляризации, индуцированной гравитационными волнами от самого Большого взрыва. Специальная комиссия по исследованию космического микроволнового фона, возглавляемая Райнером Вайсом, подготовила прекрасный итоговый отчет о выгодах, проблемах и стратегии измерения этой поляризации. Карта поляризации представляет собой векторное поле на сфере, которое может быть разложено на две части: дивергенцию скалярного поля, называемую Е-модой, и ротор векторного поля, называемый В-модой. Согласно теории, первичные гравитационные волны должны производить поляризационную картину с ротором, и никакой другой последующий процесс не способен это сделать. Поляризационная картина была бы гораздо слабее, чем карта анизотропии температуры, а вихревая компонента была бы гораздо слабее дивергентной компоненты. Поэтому ее очень трудно измерить, но это становится уже возможно с современным поколением детекторов. Общее название этой космической экспедиции в США — "Зонд Инфляции", и три проекта поддержаны NASA. Технически такой спутник мог бы быть запущен в этом десятилетии, но соревнование за скудные средства может это задержать. При любом исходе, измерение В-моды поляризации является наиболее прямым имеющимся методом изучения сил, преобладавших во время самого Большого взрыва, могло бы помочь нам прийти к долгожданной Теории Всего и, по-видимому, было бы открытием на Нобелевскую премию. Не удивительно, что физики, занимающиеся элементарными частицами, и теоретики, и экспериментаторы, обратились к изучению КМФИ как их следующей захватывающей возможности.

5.3. DIRBE

Прибор DIRBE последним дал космологические результаты, большей частью потому, что местные помехи на длинах волн DIRBE очень ярки и сложны. Окончательные результаты DIRBE представлены в ряде статей (Hauser et al., Kelsall et al., Arendt et al., Dwek et al., 1998). Обнаруженная в данных DIRBE неожиданность состоит в том, что Вселенная в два раза ярче, чем полагали прежде, исходя из измерений индивидуальных галактик. Существует общее свечение, называемое космическим инфракрасным фоном (или КИФ), состоящее из двух частей: на длинах волн ближней инфракрасной области в несколько микрон, и далекой инфракрасной области в несколько сотен микрон. Фон в ближней инфракрасной области еще не объяснен (см. обзор Hauser, Dwek, 2001), но фон в далекой инфракрасной области, несомненно, создан прежде неизвестной популяцией очень ярких обильных пылью галактик на красных смещениях порядка нескольких единиц (2–3).

Чтобы получить этот результат, группа DIRBE была вынуждена пройти гораздо более трудный путь, чем тот, что требовался для двух других инструментов, потому что главные помехи, с которыми столкнулся DIRBE, были переменными во времени и пространстве. Они производились межпланетной пылью, которая равномерно распределена в толстом диске, вращающемся вокруг Солнца. Этот диск, тем не менее, не так прост. У него есть несколько источников: столкновения между астероидами, распад комет, и миграция маленьких частиц с периферии Солнечной системы. Из данных IRAS мы знаем, что есть, по меньшей мере, три кольца пыли, вращающихся как если бы они были обломками от столкновений определенного семейства астероидов. Также, эти частицы двигаются под влиянием гравитации, радиационного давления и дрейфа Пойнтинга–Робертсона, и электромагнитных сил для тех частиц, которые имеют электрические заряды. Сила дрейфа заставляет частицы по спирали опускаться на Солнце за времена от тысяч до миллионов лет, в зависимости от размера, при этом частицы могут испытывать тесные

сближения с планетами, и повторяющиеся гравитационные импульсы, когда их орбитальные периоды соизмеримы с периодами планет. Некоторые из частиц оказываются запертыми в орбитальных резонансах на длительные периоды времени, поскольку гравитационные силы преодолевают дрейф Пойнтинга–Робертсона. Некоторые оказываются запертыми даже в орбитальном резонансе с Землей, создавая опережающий и отстающий сгустки, которые были видны в данных DIRBE. Это явление, неприятность для ищущих космическое инфракрасное фоновое излучение, представляет огромный интерес для ищущих планеты вокруг других звезд. В самом деле, это уже видели в пылевых облаках ярких звезд, таких как Фомальгаут (Альфа Южной Рыбы), где, как предполагают, огромная планета привела к образованию пылевого кольца (Kalas, Graham, Clampin, 2005).

Вдобавок, Земля и СОБЕ вместе с ней, движется сквозь пылевое облако. Главные эффекты состоят в том, что плоскость земной орбиты не является плоскостью симметрии пылевого облака, которое испытывает более значительное воздействие от Юпитера, и что орбита Земли не является круговой, так что Земля движется внутрь и наружу, равно как и вверх и вниз в облаке. Более того, центр пылевого облака не совпадает с Солнцем, поскольку оно испытывает сильное притяжение Юпитера.

Модель этой пыли была построена эвристическим образом, и содержала много свободных параметров, подобранных так, чтобы подогнать временные и пространственные вариации неба, наблюдаемые DIRBE. Полное описание модели дано в работе Kelsall et al., 1998. Набор параметров включал температуру пыли и ее степенное изменение с расстоянием от Солнца, концентрацию пыли и ее степенное изменение с расстоянием, излучательную и отражательную способность на каждой длине волны, и функцию рассеяния. Существует модель резонанса частиц с Землей, используемая для объяснения опережающего и отстающего сгустков. Есть параметры для описания толщины пылевого диска, формы распределения плотности в нем вблизи плоскости эклиптики, и параметры для описания наклона и смещения центра пылевого диска, происходящего, как предполагается, из-за Юпитера. Даже плоскость симметрии распределения пыли деформирована, предположительно, соревнующимися гравитационными возмущениями близлежащих планет. Даже при всей этой сложности остаются значительные остаточные отклонения от модели, и как полагает Келсол, есть реальные необъясненные вариации во времени на уровне одного процента.

Определение накладывающегося на фон излучения Галактики было также сложным и было осуществлено эвристическим образом. Большая часть неба на большинстве длин волн имеет легко определяемые звезды и пылевые облака, ярчайшие из которых могут быть закрыты маской и таким образом устранены. Более слабые звезды и облака не разрешаются большим лучом DIRBE и могут моделироваться на основе априорных моделей Галактики без свободных параметров (Arendt et al., 1998).

Результат вычитания всего этого состоит в том, что существует несколько выделенных направлений, где помехи от Галактики наименьшие, возможно, благодаря сверхновым, которые вычистили пыль и газ на большом протяжении. Поскольку любой истинный космический фон должен быть приблизительно изотропным, важно, чтобы наблюдения в этих избранных направлениях давали обязательно один и тот же ответ.

Результаты DIRBE были существенны для интерпретации данных как FIRAS, так и DMR. Прежде всего, они показали, что близлежащая часть Вселенной хорошо понята, так что наблюдения FIRAS и DMR действительно отражают далекий Большой взрыв. Это было важно, например, в доказательстве

того, что только по случайному совпадению направление дипольной компоненты космического фона, связанной с движением Земли, лежит в плоскости эклиптики. Также, карты галактической пыли, полученные DIRBE, находились в согласии с картами FIRAS, показывая, что не было никаких новых и странных эффектов. И наоборот, после того, как группа DIRBE определила, что есть космический фон в далеком инфракрасном диапазоне, данные FIRAS были использованы для его подтверждения и измерения его спектра (Fixsen et al., 1998).

6. Итоги: место COBE в истории и где мы сейчас?

Эксперимент COBE, начавшийся в эпоху, когда были общепотребительны логарифмические линейки, и авиакосмические конструкторы пользовались карандашами и большими листами бумаги, привел к революции в нашем понимании Вселенной. Он подтвердил теорию Большого взрыва и открыл первичные возмущения плотности, которые образовали крупномасштабную структуру Вселенной. Он обнаружил, что Вселенная в два раза ярче, чем думали прежде. Он привел к появлению ряда даже более мощных приборов для измерения КМФИ, один из которых (WMAP) уже проверил идею, что на самом раннем этапе Вселенная испытала экспоненциальное расширение, называемое инфляцией. Теперь у нас есть точные значения (особенно от WMAP) многих космических параметров, и ныне подготавливающиеся исследования КМФИ могли бы выявить природу сил в Большом взрыве через открытие первичных гравитационных волн. Космическая экспедиция "Планк", проект Европейского космического агентства при участии NASA, должен быть запущен в 2008 г. и распространит результаты WMAP на меньшие угловые масштабы посредством использования более коротких волн. Он также будет иметь более высокую чувствительность, используя болометрические детекторы, и имеет шанс измерить космический поляризационный сигнал даже лучше, чем WMAP.

Члены нашей команды продолжили работу во многих других проектах. Райнер Вайс — один из лидеров проекта LIGO, детектора гравитационных волн на лазерном интерферометре. Джордж Смут является профессором в Калифорнийском университете в Беркли. Чарльз Беннетт, ныне работающий в университете Джона Хопкинса, и Дэвид Вилкинсон (умерший в 2002 г.), возглавляли WMAP со многими инженерами и учеными, которые строили COBE. Эдвард Райт — главный исследователь проекта WISE (широко-обзорного инфракрасного сканирования неба), который будет обзирать все небо с чувствительностью в 1000 раз большей, чем у IRAS. Майкл Хозер является заместителем директора Научного института космического телескопа, который управляет космическим телескопом Хаббл и будет управлять космическим телескопом Джеймс Вебб. Эдвард Ченг организовал маленькую компанию Analytical Concepts, а Стефан Мейер занимает позиции заместителя директора института Энрико Ферми и заместителя директора института космологической физики Кавли в Чикагском университете. Большинство старших руководителей проекта и инженеров ушли на пенсию.

Наблюдения COBE также привели к новым космическим экспедициям, нацеленным на наблюдения первых звезд и галактик, таких как космический телескоп Джеймс Вебб (JWST). Это мой нынешний проект, в котором я задействован как старший исследователь проекта. JWST является разворачиваемым 6,5 м инфракрасным телескопом, который планируется запустить в 2013 г. на орбиту около солнечно-земной точки Лагранжа L2. С его защищенным окружением и самыми современными инфракрасными детекторами и приборами он

мог бы также сделать ошеломляющие открытия. Теория уверенно предсказывает, что звездообразование началось при очень больших красных смещениях (> 20) и что некоторые из первых протогалактик и сверхновых могут наблюдаться при красных смещениях порядка 15 или больше.

Благодарности

Эксперимент COBE был впервые предложен в 1974 г., и наша команда питает громадную благодарность тем, кто прочитал наши тонкие буклеты и осознал их важность. Доктор Нэнси Боггесс, главный специалист по программе инфракрасной астрономии Главного управления NASA, была одним из этих людей. Она защищала COBE, даже когда многие астрономы не были в нем заинтересованы, и она поддерживала другие инфракрасные астрономические эксперименты, такие как IRAS, летающую обсерваторию "Куипер" (Kuiper Airborne Observatory), стратосферную инфракрасную астрономическую обсерваторию SOFIA (the Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy) космический телескоп "Спитцер" (Spitzer Space Telescope). После запуска COBE мы получили много пользы от сильной и постоянной поддержки ряда руководителей Главного управления NASA и Годдардовского центра космических полетов, которые имели терпение и веру в нашу работу. Наша команда была большой, и большинство ее членов (но не все) перечислены в книгах Мазера и Боуслока (Mather, Boslough, 1996) и Смута и Дэвидсона (Smoot, Davidson, 1993). Мы также благодарим налогоплательщиков, кто, знали они об этом или нет, финансировали проект COBE. Бенджамин Франклин, один из величайших ученых своего времени, и Томас Джефферсон, первый американский президент, поддержавший главный научно-исследовательский проект, гордились бы, увидев, что страна, которой они помогли образоваться, продолжила поддерживать науку ради общественного блага.

Мы также благодарим наши семьи, которые были участниками проекта COBE, знали они об этом или нет, и поддерживали или по меньшей мере терпели долгие часы и выходные, в которые мы работали ради успеха экспедиции. Что касается меня, то я особенно благодарю мою жену Джейн, которая знала меня еще до того, как COBE был задуман в 1974 г., и которая все время питала к этому глубокий интерес. Мои родители послали меня в школу, по своему примеру (мой отец был генетиком, работающим с молочным скотом, моя мать была учителем), и заплатили астрономические суммы за обучение. Мои учителя наставили меня на путь и поощрили мою любознательность. Я особенно благодарю руководителя моего диплома Пола Л. Ричардса, который положил начало нашей аэростатной аппаратуре, и моему однокурснику Дэвиду Вуди, который заставил эту аэростатную аппаратуру, в конце концов, заработать. Для финансирования моего участия в проекте COBE 1974 г., мой постдокковский руководитель Патрик Тадеуш получил кредит, — без его влияния не было бы COBE, или, по меньшей мере, такого COBE. Внутри команды COBE я выражаю особую благодарность нашему руководителю проекта Роджеру Мэтсону и его заместителю Дэнису Маккарти, и управляющему прибором FIRAS Роберту Мэйчелу, конструктору прибора FIRAS Майклу Роберто, и Ричарду А. Шеферу, помощнику главного исследователя. Дейл Фиксен был разработчиком калибровки FIRAS, а Ричард Исаакмен и Ширли Рид возглавляли две группы программистов FIRAS. Я также благодарю моего соавтора Джона Боуслока, без кого наша книга "Самый первый свет" не была бы написана.

С помощью средств от Нобелевской премии и от премии фонда Питера Грабера (Peter Gruber Foundation) по космологии, и с согласия моей жены Джейн, я основал фонд науки и искусства Джона и Джейн Мазер (John and Jane Mather

Foundation for Science and Arts). Джордж Смут также организовал фонд с аналогичными целями. Это один из способов выразить нашу благодарность многим людям, которые внесли свой вклад в проект COBE.

Перевел с английского М.И. Зельников
Научная редакция перевода С.М. Апенко

Список литературы

Архив проекта COBE сейчас расположен на <http://lambda.gsfc.nasa.gov/> и содержит информацию, изображения, файлы данных и документацию по проекту. Электронный Консультант по Космологии Неда Райта на <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm> включает в себя историю проекта COBE, с электронными изображениями более ранних версий COBE. Хорошо написаны статья о COBE в Википедии (<http://en.wikipedia.org/wiki/COBE>) и сводка истории измерения анизотропии в Беркли, написанная Ричардом А. Мюллером на http://muller.lbl.gov/COBE-early_history/preCOBEhistory.html. Мой любимый учебник по космологии написан Пиблсом (Peebles, 1993). Превосходное современное краткое изложение космологии дано Беннеттом (Bennett, 2006).

1. Alpher R A, Bethe H, Gamow G *Phys. Rev.* **73** 803 (1948)
2. Arendt R G et al. *Astrophys. J.* **508** 74 (1998)
3. Bennett C L *Nature* **440** 1126–1131 (2006)
4. Bennett C L et al. *Astrophys. J. Lett.* **396** L7–L12 (1992)
5. Bennett C L et al. *Astrophys. J.* **434** 587–598 (1994)
6. Dwek E et al. *Astrophys. J.* **508** 106 (1998)
7. Fixsen D J, Cheng E S, Wilkinson D T *Phys. Rev. Lett.* **50** 620–622 (1983)
8. Fixsen D J, Dwek E, Mather J C, Bennett C L, Shafer R A *Astrophys. J.* **508** 123 (1998)
9. Fixsen D J, Mather J C *Astrophys. J.* **581** 817–822 (2002)
10. Fixsen D J et al. *Astrophys. J.* **420** 445–449 (1994)
11. Fixsen D J, Hinshaw G, Bennett C L, Mather J C *Astrophys. J.* **486** 623 (1997)
12. Fixsen D J, Mather J C *Astrophys. J.* **581** 817–822 (2002)
13. Gamow G *One, Two, Three... Infinity* (New York: Viking Press, 1947)
14. Ganga K, Cheng E, Meyer S, Page L *Astrophys. J. Lett.* **410** L57 (1993)
15. Gush H P, Halpern M, Wishnow E H *Phys. Rev. Lett.* **65** 537 (1990)
16. Guth A H *Phys. Rev. D* **23** 347 (1981)
17. Harrison E R *Phys. Rev. D* **1** 2726 (1970)
18. Hauser M G, Dwek E *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **39** 249 (2001)
19. Hauser M G et al. *Astrophys. J.* **508** 25 (1998)
20. Hemmati H, Mather J C, Eichhorn W L *Appl. Opt.* **24** 4489 (1985)
21. Hubble E *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **15** 168–173 (1929)
22. Kalas P, Graham J R, Clampin M *Nature* **435** 1067 (2005)
23. Keller J B *J. Opt. Soc. Am.* **52** 116–130 (1962)
24. Kelsall T et al. *Astrophys. J.* **508** 44 (1998)
25. Kogut A et al. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **154** 493–499 (2004)
26. Lemaître G *Ann. Sci. Soc. Brussels A* **47** 41 (1927) [Translated into English: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **91** 483–490 (1931)]; Primeval atom: *Nature* **128** (Suppl.) 704 (1931)
27. Mather J C *Appl. Opt.* **23** 584–588 (1984)
28. Mather J C *IEEE Trans. Anten. Propag.* **AP-29** 967 (1981)
29. Mather J C, Boslough J *The Very First Light* (New York: Basic Books, 1996)
30. Mather J C, Toral M, Hemmati H *Appl. Opt.* **25** 2826–2830 (1986)
31. Mather J C, Werner M W, Richards P L *Astrophys. J. Lett.* **170** L59 (1971)
32. Mather J C, Fixsen D J, Shafer R A, Mosier C, Wilkinson D T *Astrophys. J.* **512** 511–520 (1999)
33. Mather J C, Richards P L, Woody D P *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **MTT-22** 1046 (1974)
34. Peebles P J E, Yu J T *Astrophys. J.* **162** 815 (1970)
35. Martin D H, Puplett E *Infrared Phys.* **10** 105–109 (1970)
36. Sachs R K, Wolfe A M *Astrophys. J.* **147** 73 (1967)
37. Shivanandan K, Houck J R, Harwit M O *Phys. Rev. Lett.* **21** 1460–1462 (1968)

38. Smoot G, Davidson K *Wrinkles in Time* (New York: W. Morrow, 1993)
39. Thaddeus P *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **10** 305 (1972)
40. Wright E L et al. *Astrophys. J.* **420** 450–456 (1994)
41. Woody D P, Mather J C, Nishioka N S, Richards P L *Phys. Rev. Lett.* **34** 1036 (1975)
42. Zeldovich Ya B *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **160** 1 (1972)
43. Zeldovich Ya B, Sunyaev R A *Astrophys. Space Sci.* **4** 301 (1969)
44. Sunyaev R A, Zeldovich Ya B *Astrophys. Space Sci.* **7** 3 (1970)

Приложение — члены команды COBE

Научная группа

Чарльз Л. Беннетт, помощник главного исследователя, DMR
Нэнси В. Боггесс, помощник научного руководителя проекта по данным; прежде научный руководитель программы по инфракрасной астрономии,
Главное управление NASA
Эдвард С. Ченг
Эли Двек
Самуэл Галкис
Майкл Дж. Хозер, главный исследователь, DIRBE
Майкл А. Джэнсен
Томас Келсол, помощник главного исследователя, DIRBE
Филип М. Любин
Джон К. Мазер, научный руководитель проекта и главный исследователь по FIRAS
Стивен С. Мейер
С. Харвей Мозли, мл.
Томас Л. Мардок
Ричард Эрик Шефер, помощник главного исследователя, FIRAS
Роберт Ф. Силверберг
Джордж Ф. Смут, главный исследователь, DMR
Райнер Вайс, председатель, научная рабочая группа
Дэвид Т. Вилкинсон
Эдвард Л. Райт, руководитель группы данных

Инженерная и управленческая группа

Дональд Ф. Кросби, инженер прибора DIRBE
Эрнст К. Дутрич, руководитель надежности полета
Ирэн К. Фербер, секретарь проекта
Энтони Д. Фрегомени, управляющий обсерваторией
Томас Дж. Гринвелл, руководитель сборки и тестирования
Дэвид Гилман, руководитель программы, Главное управление NASA
Уильям Д. Хоггард, руководитель операций связи/запуска ракеты "Дельта"
Чарльз Катц, системный инженер, все приборы
Бернард Дж. Клейн, конструктор приборов, DMR
Лорен Р. Линстром, системный инженер, DIRBE
Роберт Дж. Мейчел, конструктор приборов, FIRAS
Роджер А. Мэтсон, руководитель проекта
Дэнис К. Маккарти, помощник руководителя проекта
Морин Дж. Ментон, секретарь
Херберт Дж. Миттельман, агент по снабжению
Стивен Севин-Лит, системный инженер, DMR
Эрнестина Смарт, специалист по поддержке проекта
Пирс Л. Смит, руководитель наземных систем обработки данных
Джек В. Педдикорд, помощник руководителя проекта по снабжению
Майкл Роберто, системный инженер, FIRAS
Роберт Дж. Сэнфорд, руководитель управления спутником
Роберт Т. Скулз, руководитель поддержки проекта
Джозеф Ф. Тертил, системный инженер
Джон Ф. Вольфганг, руководитель программных систем
Эрл В. Янг, управляющий приборами