

# Реликтовое излучение в космологии

*Б. Новосядлый*

Астрономическая обсерватория

Львовского национального университета имени Ивана Франко

В 2010 году прошло 45 лет со времени открытия реликтового излучения, научное значение которого невозможно переоценить. Его предвидение Георгием Гамовым, одесситом от рождения, открытие и последующее целенаправленное исследование — одна из захватывающих страниц истории становления физической космологии. Без преувеличения можно сказать, что результаты этих исследований в значительной степени определяют наше понимание строения и происхождения Вселенной, научную картину мира и наше мировоззрение в целом.

## Гипотеза Гамова

Впервые идея существования реликтового излучения была выдвинута в 1946 г. Георгием Гамовым. Он предположил, что на ранних стадиях расширения Вселенная была горячей и от этой эпохи осталось тепловое излучение, приходящее со всех направлений. Вместе со своими учениками Ральфом Алфером и Робертом Германом он использовал эту гипотезу в 1948 г. для объяснения синтеза всех элементов таблицы Менделеева и их изотопов сразу после Большого Взрыва, когда плотность и температура были достаточно высокими для протекания реакций синтеза тяжелых элементов из легких присоединением свободных нейтронов и протонов. Эти идеи легли в основу так называемой «горячей модели» Вселенной. Согласно современным представлениям, в ранней Вселенной, в первые три минуты после Большого Взрыва, синтезировались только легкие элементы (водород, гелий, литий и их изотопы). Все остальные синтезировались гораздо позже, в недрах звезд и вспышках сверхновых. С течением времени вследствие расширения Вселенной тепловое излучение «охладилось», и его современная температура, по оценкам Гамова и коллег, должна быть всего 5-6 градусов Кельвина. Сам Гамов, однако, не верил в возможность экспериментального подтверждения его гипотезы. Он считал, что реликтовое излучение практически невозможно выделить на фоне суммарного излучения звезд, межзвездного газа и пыли. Именно поэтому почти 15 лет никто из астрономов-наблюдателей не делал практических попыток обнаружить реликтовый фон.

И только весной 1964 г. в журнале «Доклады Академии наук СССР» появилась статья Андрея Дорошкевича и Игоря Новикова «Средняя плотность излучения в метagalктике и некоторые вопросы релятивистской космологии», которая содержала подробный анализ соотношения интенсивностей излучения галактик и реликтового излучения и показывала, что последнее можно зарегистрировать на длинах волн от нескольких сантиметров до нескольких миллиметров, где вклад «свечения» галактик минимален. Независимо к такому же выводу пришли британские астрофизики Фред Хойл и Роджер Тейлер, статья которых вышла в том же году в сентябрьском номере *Nature*. В начале 1965 г. группа астрофизиков из Принстона (США) — Роберт Дикке, Филлип Джеймс Пиблс, Питер Ролл и Дэвид Уилкинсон — начала создания антенны для поиска реликтового излучения. Они первые подошли к постановке целенаправленного эксперимента по его регистрации, но, по иронии судьбы, не они стали его первооткрывателями.

## История открытия

В 1964 г. радиофизики Роберт Вильсон и Арно Пензиас, работавшие в лаборатории компании Белл в Кроуфорд Хилл (США), готовили наиболее чувствительный в то время радиотелескоп для изучения Галактики на длине волны 21 см. Для измерений галактического радиоизлучения необходимо было исключить все источники помех и шумов — наземные, атмосферные, аппаратурные. Для этого ученые перенастроили приемник на волну 7,35 см (в этой области галактическое излучение практически отсутствует). Устранив все возможные шумы в приемнике и электрических цепях, вычленив свечение атмосферы, они весной 1964 г. к своему удивлению обнаружили сигнал, уровень которого не зависел ни от направления на небо,

ни от сезона, когда проводились наблюдения. Они еще раз проверили всю приемную аппаратуру, демонтировали и почистили антенну, но помеха не исчезала. И только убедившись, что это не шумы антенны и приемной аппаратуры, астрономы обратились к теоретикам Принстонской группы за помощью в интерпретации этого сигнала. Дикке с коллегами сразу поняли, что Пензиас и Вильсон зарегистрировали тепловое излучение ранней Вселенной, предсказанное Гамовым. Обе группы решили опубликовать в *Astrophysical Journal* два коротких сообщения: одно — о результатах измерений, второе — их интерпретация в свете гипотезы Гамова. Статьи вышли в одном номере журнала летом 1965 г. Сообщение Пензиаса и Вильсона называлось «Измерение избыточной температуры антенны на 4080 МГц» и заняло всего полторы страницы. В нем авторы описали только результаты измерений шумов, соответствующих избыточной температуре  $3,5 \pm 1$  К, а за интерпретацией отослали к сопутствующей статье «Космическое тепловое излучение» (5 страниц). За это открытие Пензиас и Вильсон в 1978 г. были удостоены Нобелевской премии по физике.

### **Физическая природа и свойства**

В последующих экспериментах было подтверждено существование электромагнитного излучения, которое приходит на Землю со всех участков неба практически с одинаковой интенсивностью. Важной задачей стало изучение его энергетического распределения, т.е. зависимости его интенсивности от длины волны. Сейчас Вселенная холодна, но в прошлом она была горячей. Когда Вселенной было 400 тыс. лет, температура реликтового излучения достигала 3000 К. Меньше возраст — выше температура... Атомы, состоящие из ядер и вращающихся вокруг них электронов, существовать в таких условиях не могли. Энергия фотонов излучения была столь велика, что они легко ионизировали атомы, образуя плазму из атомных ядер и свободных электронов. Фотоны рассеивались на них, как свет в тумане, поэтому среда была непрозрачной для излучения. Такую плазму называют барионно-фотонной (барионы — общее название частиц, из которых состоят ядра известных нам атомов). Если вернуться к первой секунде после Большого Взрыва, то температура тогда составляла несколько миллиардов градусов Кельвина. В таких условиях даже ядра элементов существовать не могли — фотоны разрушали и их. Но в следующие три минуты возникли условия для синтеза легких элементов — водорода, гелия, лития, бериллия и их изотопов. Этот этап жизни Вселенной называют эпохой космологического нуклеосинтеза. Из наблюдаемого соотношения концентраций водорода, гелия и дейтерия в межгалактической среде можно получить значения средней плотности барионного вещества: оказалось, что она составляет всего ~ 5% от полной средней плотности Вселенной. В еще более раннюю эпоху — порядка миллиардной доли секунды после Большого Взрыва — фотоны имели такую энергию, что разрушали протоны и нейтроны (нуклоны), расщепляя их на составляющие кварки и глюоны.

Для количественного описания первых минут Вселенной необходимо установить точное значение температуры реликтового излучения и возможные отклонения энергетического спектра от планковского. С этой целью было проведено более 50 экспериментов. Наиболее полно и точно эту задачу удалось решить с помощью специально созданного для таких исследований спектрометра микроволнового и дальнего инфракрасного диапазона, который установили на космической обсерватории COBE (COsmic Background Explorer), созданной американским аэрокосмическим агентством и выведенной на гелиосинхронную орбиту 18 ноября 1989 г. Было доказано, что спектр реликтового излучения одинаков по всему небу в широком диапазоне длин волн (0,05-10 см). Он соответствует температуре  $T = 2,725 \pm 0,002$  К. Задача была чрезвычайно сложной: такие измерения можно провести, лишь охладив аппаратуру телескопа до 1,5 К, а из полученной карты микроволнового фона необходимо вычлесть излучение огромного количества более близких источников, которые в данном случае являются помехами. Значимость результатов этих исследований для космологии подтверждена присуждением Нобелевской премии по физике за 2006 г. Джону Мазеру (John Mather), автору идеи и руководителю проекта.

Максимум интенсивности излучения находится на длине волны 1,1 мм. Плотность его энергии составляет  $4 \times 10^{-13}$  эрг/см<sup>3</sup> (400 фотонов в одном кубическом сантиметре). В среднем на каждую элементарную частицу во Вселенной приходится миллиард квантов реликтового излучения. Это естественный космический микроволновый фон.

### **Анизотропия реликтового излучения и ее обнаружение COBE**

Теоретические расчеты, подтвержденные наблюдательными данными, свидетельствуют, что реликтовое излучение, перед тем, как окончательно «отделиться» от материи, успело многократно рассеяться на свободных электронах, составляющих горячей плазмы молодой Вселенной. Оно начало свободно распространяться, когда вследствие расширения Вселенная охладилась настолько, что энергии фотонов уже не хватало на разрушение связи положительно заряженных ядер легких элементов (водорода, гелия, лития, бериллия и их изотопов) и электронов с отрицательным зарядом. Таким образом, начали образовываться нейтральные атомы дозвёздного вещества. Его химический состав определён физическими условиями горячей расширяющейся Вселенной: по количеству атомов в единице объёма это в основном водород ( $\approx 92\%$ ) и гелий ( $\approx 8\%$ ), остальных — доли процента. Период времени, когда из плазмы возникли атомы, называют эпохой космологической рекомбинации. Она происходила одновременно во всей Вселенной, когда ее возраст составлял около 380 тыс. лет (отсчитывая от момента Большого Взрыва). Рекомбинация длилась примерно 50 тыс. лет. С тех пор тепловое излучение свободно распространяется в пространстве таким образом, что в каждый момент времени оно приходит в каждую точку со всех направлений с одинаковой интенсивностью и энергетическим спектром. В современную эпоху, когда возраст Вселенной составляет 13,7 млрд. лет, реликтовое излучение приходит из сферического слоя вокруг нас, толщина которого значительно меньше расстояния до него. Его называют сферой последнего рассеяния реликтового излучения. Высокая изотропность приходящего излучения указывает на такую же однородность и изотропность распределения вещества на сфере последнего рассеяния. Но в наше время наблюдается противоположная картина: вещество сконцентрировано в звездах, галактиках, скоплениях галактик. Они сформировались и существуют благодаря гравитации. Известный советский физик Евгений Лившиц еще в 1946 г. вывел закон развития возмущений плотности и скорости вещества в расширяющейся Вселенной. Из него следовало, что для образования галактик или скоплений галактик под действием самогравитации необходимы зародышевые неоднородности соответствующего масштаба, сгенерированные на самых ранних стадиях расширения Вселенной. Это означает, что такие неоднородности должны существовать на сфере последнего рассеяния и нарушать изотропию реликтового фона. Американские астрофизики Р. Сакс и А. Вольф в 1967 г. первыми исследовали этот эффект теоретически. Они показали, что возмущения плотности и скорости вещества, а также возмущения метрики пространства-времени (фактически гравитационного поля) вызывают угловые вариации температуры реликтового излучения на уровне 0,1% на больших угловых масштабах (более  $10^\circ$ ). В теории анизотропии реликтового излучения его называют теперь эффектом Сакса-Вольфа.

В следующем году Дж. Силк из Оксфордского университета детально исследовал анизотропию на меньших угловых масштабах, где основной вклад должен давать эффект разности скоростей движения (эффект Доплера), а также неоднородности температуры и плотности (адиабатический эффект) различных областей расширяющейся Вселенной. Силк показал, что упомянутые возмущения галактических и больших масштабов «выживают» в горячей плазме, в то время как меньшие быстро затухают. По его оценкам вследствие этих эффектов на угловых масштабах около  $1^\circ$  ожидаемые отклонения температуры должны быть порядка 0,2%.

Эти работы положили начало очень важному направлению современной космологии — теории анизотропии реликтового излучения. Они также стимулировали постановку экспериментов для регистрации этой анизотропии. Очевидно, что столь малые отклонения можно зарегистрировать только при чрезвычайно прецизионных измерениях. Однако ни

первый такой эксперимент, проведенный в конце 60-х годов, ни последующие — в 70-х и 80-х — не имели успеха. Чувствительность инструментов постепенно возрастала, но результата все не было...

В конце 70-х радиотелескопы микроволнового диапазона могли регистрировать угловые вариации температуры реликтового излучения порядка 0,05%, десятилетием позже — до 0,02%. Самым дорогим и чувствительным инструментом того времени, созданным для этих исследований, был советский космический телескоп «Реликт» (1983-1984 гг.), размещенный на искусственном спутнике Земли «Прогноз-9». Он провел измерения отклонений температуры от средней, сканируя разные участки неба на частоте 37 ГГц с угловой разрешающей способностью  $\sim 6^\circ$  и чувствительностью 0,0006 К. За полгода было «осмотрено» все небо, осуществлено около 15 млн. измерений. Проектом руководил заведующий лабораторией Института космических исследований Игорь Струков. Первые результаты обработки данных появились в январском номере журнала «Письма в Астрономический журнал» за 1984 г. Они указывали на отсутствие отклонений температуры, превышающих 0,0002 К. Более основательная обработка данных, проведенная в последующие три года, еще примерно вчетверо снизила уровень, выше которого вариаций уверенно нет, то есть вариации температуры  $\Delta T/T$ , связанные с неоднородностями в больших масштабах, не превышают величины  $2 \times 10^{-5}$ . Такой поворот событий уже вызвал беспокойство в кругах теоретиков — дальнейшее снижение уровня анизотропии означало бы ошибочность разработанной на тот момент теории формирования структуры Вселенной.

В 1989 г. начались измерения вариаций температуры реликтового излучения высокочувствительным дифференциальным микроволновым радиометром DMR, установленным на американской космической обсерватории COBE. Было просканировано все небо с разрешающей способностью  $\sim 7^\circ$  на трех частотах: 32, 53 и 90 ГГц. Это дало возможность эффективнее учесть (и исключить) вклад излучения более близких галактических и внегалактических источников. Результаты обработки полученных данных появились в сентябрьском номере американского журнала *The Astrophysical Journal* за 1992 г. и вызвали сенсацию. Наконец-то анизотропия реликтового излучения была зарегистрирована! Ее характерная величина на масштабах свыше  $7^\circ$  составляла  $1,1 \times 10^{-5}$ . Научным руководителем проекта DMR был Джордж Смут.

Регистрация флуктуаций температуры реликтового излучения в эксперименте COBE стала подтверждением еще двух ключевых идей современной космологии, касающихся существования темной материи и кратковременной фазы экспоненциального расширения очень ранней Вселенной — инфляции. Действительно, предусмотренная Саксом и Вольфом амплитуда угловых вариаций температуры реликтового излучения до  $\sim 0,1\%$  в больших масштабах базировалась на теории гравитационной неустойчивости расширяющейся Вселенной, содержащей только барионное вещество и излучение. Отсутствие вариаций с такой амплитудой, надежно подтвержденное экспериментами 70-х годов прошлого века, указывало на то, что в больших масштабах либо законы гравитации отличаются от известных нам, либо состав Вселенной другой.

В начале 80-х годов группа московских ученых-ядерщиков на основании своих экспериментов заявила, что нейтрино — сверхлегкая частица, практически не взаимодействующая с барионным веществом и возникающая в реакциях термоядерного синтеза — имеют массу покоя порядка 30 электрон-вольт (эВ), что примерно в 30 млн. раз меньше массы покоя протона или нейтрона, из которых состоят ядра атомов. Но количество нейтрино во Вселенной почти в миллиард раз больше! Отсюда следует, что средняя массовая плотность нейтрино значительно превосходит плотность барионного вещества. Поскольку нейтрино не излучают и не поглощают свет, их посчитали одной из составляющих темной материи. В раннюю эпоху, задолго до рекомбинации, нейтрино взаимодействовали с веществом и были разогреты до высоких температур. Такую форму темной материи называют горячей. И хотя измеренное значение массы нейтрино не было подтверждено другими экспериментами, идея темной материи в форме массивных слабодействующих частиц стала одной из ключевых

в современной космологии. Сегодня рассматриваются как холодные, так и теплые ее модели. Структуризация в них идет от объектов меньших масс к большим путем иерархического скучивания, что согласуется с наблюдаемыми характеристиками крупномасштабной структуры Вселенной. В присутствии темной материи амплитуда вариаций температуры реликтового излучения значительно меньше, чем в чисто барионной. Это спасало теорию. Определенная в эксперименте COBE амплитуда  $\Delta T/T$  вместе с современными теоретическими разработками уверенно указывает на существование темной материи в форме массивных слабовзаимодействующих частиц. В эксперименте COBE была впервые получена карта флюктуаций температуры реликтового излучения для всего неба. Даже несмотря на ее сравнительно низкое разрешение, после применения статистических методов анализа она позволила получить уникальную информацию о Вселенной. Были выявлены «горячие» и «холодные» пятна и получен спектр мощности пространственных неоднородностей температуры. Оказалось, что он практически совпадает с тем, который предсказывают инфляционные модели ранней Вселенной.

После того, как существование анизотропии реликтового излучения было подтверждено в десятках других экспериментов, Джорджу Смуту была присуждена Нобелевская премия по физике за 2006 г. (совместно с Джоном Мазером). В представлении комитета говорилось: «результаты наблюдений обсерватории COBE являются отправной точкой космологии как точной науки». Эта премия вручалась на фоне следующей успешной космической миссии -- WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe).

### **Космический картограф WMAP**

Проект по созданию нового зонда микроволновой анизотропии (начальное название MAP) стартовал на следующий день после официального завершения проекта COBE — 1 ноября 1996 г. — и является его логическим продолжением. Это совместный проект NASA и Принстонского университета. Его руководителем стал Чарльз Беннет, участник проекта COBE. Назначение зонда — получить карту флюктуаций температуры реликтового излучения по всему небу с угловой разрешающей способностью в 33 раза лучше ( $\sim 15'$ ) при соотношении сигнал/шум в 45 раз большей, чем у DMR-COBE. Цель была достигнута путем сканирования всего неба уже на 5 частотах (23, 33, 41, 61 и 94 ГГц) с использованием дифференциальных высокочувствительных радиометров в качестве приемников. Телескоп отправился не на околоземную орбиту, а в точку Лагранжа  $L_2$ , расположенную на расстоянии 1,5 млн. км от Земли в противоположном от Солнца направлении. Запущенный 30 июня 2001 г. ракетой-носителем Delta с мыса Канаверал, MAP достиг точки Лагранжа 1 октября 2001 г. и сразу же приступил к выполнению программы.

Зонд представлял собой два совершенно идентичных телескопа с эллиптическими главными зеркалами (размеры главных осей эллипса 1,6 и 1,4 м), смотрящими в разные стороны (угол между оптическими осями составляет  $141^\circ$ ), и вторичными, направляющими излучение на приемники, которые измеряли разницу температуры излучения разных участков неба. MAP вращался вокруг главной оси, делая один оборот за 2 мин. 9 секунд; ось вращения прецессировала с периодом 1 час вокруг направления Солнце-Земля, к которому она наклонена под углом  $22,5^\circ$ . Эта ось вследствие вращения нашей планеты вокруг Солнца за сутки смещалась на  $1^\circ$  в плоскости эклиптики. Таким образом, за полгода зонд мог просканировать все небо. Рабочая температура радиометров составляла 90К ( $-183^\circ\text{C}$ ), что обеспечивалось пассивным охлаждением в тени солнечных батарей и термоизоляцией от теплой части зонда.

В 2003 г. MAP был переименован в WMAP в честь Дэвида Вилкинсона — одного из научных руководителей проекта, преждевременно ушедшего из жизни в 2002 г.

Результаты обработки данных одного года наблюдений были опубликованы в 2003 г. Полученную карту флюктуаций температуры реликтового излучения можно трактовать как фотографию ранней (380 тыс. лет после Большого Взрыва) Вселенной, в которой еще не было ни звезд, ни галактик. На ней хорошо просматриваются «горячие» и «холодные» пятна, обусловленные зародышами структур масштаба сверхскоплений галактик. Характер углового

спектра мощности флуктуаций температуры реликтового излучения подтвердил предположения Силка и четко показал, какой сценарий реально имел место в нашей Вселенной. Более того, точность измерений оказалась настолько высока, что дала возможность надежно определить положения и амплитуды пиков в таком спектре, зависящих от геометрии пространства-времени, содержания и состава материи, постоянной Хаббла и других космологических параметров. Сравнением теоретического и наблюдаемого спектров удалось установить, что кривизна пространства наблюдаемой области Вселенной практически равна нулю (колебания около нуля в определениях разных авторов обусловлены погрешностями экспериментальных данных), т.е. геометрия трехмерного пространства в больших масштабах является евклидовой. Попытки установить ее на основе астрономических наблюдений продолжались фактически со времени публикации работы Фридмана в 1922 г.

История определения величины постоянной Хаббла столь же продолжительна — она началась еще в 1929 г. На протяжении нескольких десятков лет второй половины XX века ее величина по определениям разных авторов попадала в диапазон 50-100 км/с/Мпк. Такая большая неопределенность создавала проблемы для космологии и астрофизики, поскольку приводила к неопределенностям других величин (возраста Вселенной, например). Поэтому ключевой задачей для Космического телескопа имени Хаббла (КТХ), выведенного на орбиту в 1990 г., было уточнение значения этой постоянной. Задача была решена: на основе исследования цефеид и сверхновых звезд в далеких галактиках ее значение оказалось равно  $70 \pm 7$  км/с/Мпк. Это стало большим достижением наблюдательной космологии. Но данные WMAP вместе с данными КТХ позволили определить ее с точностью  $\sim 5\%$  ( $71 \pm 4$  км/с/Мпк). Соответственно был уточнен и возраст Вселенной —  $13,7 \pm 0,4$  млрд. лет.

Точность, с которой определены важнейшие параметры мироздания на основе данных первого года наблюдений WMAP, еще недавно считалась недостижимой, поэтому, по мнению многих ученых, их публикация открыла эпоху прецизионной космологии. В 2007 г. были опубликованы данные трехлетних наблюдений, а в 2009 г. — пятилетних, в 2010 — семилетних. Последние подтвердили и уточнили результаты предыдущих измерений.

Принципиальное значение для астрофизики и физики элементарных частиц имеет определение состава Вселенной. И хотя природа «скрытых» компонент — темной материи и темной энергии, доминирующих по средней плотности — пока неизвестна, факт установления их существования и определения их плотностей имеет, несомненно, фундаментальное значение для физики, астрофизики и космологии. Согласно результатам 7-летних наблюдений WMAP, опубликованным в январе 2010 г., состав Вселенной по средней плотности таков: барионное вещество —  $4.5 \pm 0.3\%$ , холодная темная материя —  $22.2 \pm 0.3\%$ , темная энергия —  $73.3 \pm 0.3\%$ .

Полученные экспериментальные данные о температуре, энергетическом распределении и анизотропии реликтового излучения дают возможность строить теоретические модели очень ранней Вселенной, когда элементарные частицы и фотоны имели энергии значительно больше тех, которые достигнуты на крупнейших современных ускорителях. Таким образом, открытие и исследование реликтового излучения стало мостом, соединившим два «берега» науки о мире, в котором мы живем — космологию (науку о Вселенной как целом) и физику элементарных частиц и высоких энергий, которая изучает фундаментальные свойства материи в масштабах микромира.

### **Космическая обсерватория Планк**

Космический аппарат WMAP девять лет измерял анизотропию реликтового излучения. За год или два будут опубликованы результаты рекордных по длительности непрерывных измерений анизотропии реликтового излучения. 19 августа 2010 г. его ресурс был исчерпан (планировались наблюдения в течении только 3-х лет) и он прекратил измерения, а 8 сентября он был переведён из точки Лагранжа 2 на околосолнечную орбиту. Проект WMAP — один из самых успешных в истории исследований космоса. Свидетельством этого является то, что публикации данных WMAP занимают три первых места в списке самых цитируемых работ по физике и астрономии XXI века.

WMAP передал эстафету европейской космической обсерватории Планк, названной в честь всемирно известного физика Макса Планка. Она начала сканирование неба в микроволновом диапазоне электромагнитного излучения 27 августа 2009 г., а в июле 2010 г. уже была опубликована карта всего неба, построенная по данным Планка. Эта обсерватория, как и WMAP, находится вблизи точки Лагранжа 2, но приборы, установленные на ней, значительно совершеннее: измерения проводятся на девяти частотах в диапазоне 30-857 ГГц, приемники охлаждены до самой низкой удерживаемой сегодня температуры (0,1 К), чувствительность приемников в 5 раз выше, а пространственная разрешающая способность — в 3 раза лучше, чем у WMAP. С помощью телескопа Планк ученые надеются точнее определить космологические параметры, характеристики первоначального (послеинфляционного) спектра возмущений, содержание барионной и темной материи и другие фундаментальные параметры нашей Вселенной. Но главное, на что надеются исследователи — это выявление «отпечатков пальцев» реликтовых гравитационных волн, сгенерированных в инфляционную эпоху. Таким образом космическая обсерватория Планк позволит ученым заглянуть (хоть и косвенно) в то далекое время, когда наша Вселенная только зарождалась. Обсуждение результатов, полученных уникальным инструментом, будет также стимулировать дальнейшие исследования в этом направлении.