1976 г. Июнь *Том 119, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.11.164

КОСМИЧЕСКОЕ ФОНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ*)

А. Вебстер

Пространство между галактиками заполнено излучением в диапазоне от радиоволн до γ-лучей. Это излучение генерировано рядом процессов, причем некоторые из них относятся к ранним стадиям расширения Вселенной.

Ни одна часть Вселенной не является пустой. Межпланетное пространство заполнено «ветром» ионизованного газа, выброшенного Солнцем, и пылью, которая наблюдается с Земли в виде зодиакального света. Межзвездное пространство содержит вещество в самых разнообразных формах: от нейтрального водорода, чье излучение и поглощение на волне 21 *см* исследуется радиоастрономами, до пыли, которая вызывает ослабление и покраснение света далеких звезд. Даже в наибольших масштабах огромные области пространства между галактиками не пусты. Правда, ни газа ни пыли или других форм вещества там не было до сих пор обнаружено, однако совершенно ясно, что эти области пространства пропитаны однородным фоном электромагнитного излучения. Этот космический фон излучения детектирован к настоящему времени в большей части электромагнитного спектра, от радиоволн с длиной волны 300 *м* до гамма-лучей с длиной волны 10^{-14} *м*. Это дает богатую информацию о ранних стадиях эволюции Вселенной.

Измерения космического фона излучения проведены только в прошлом десятилетии, но интерес к этому вопросу возник еще два с половиной столетия назад. В начале XVIII века Э. Галлей задался вопросом: «Почему небо ночью темное?» На этот, казалось бы, наивный вопрос не так легко ответить, потому что если бы Вселенная имела простейшую вообразимую структуру в наибольших возможных масштабах, то фоновая светимость неба имела бы большую интенсивность. Представим себе статическую бесконечную Вселенную, т. е. Вселенную бесконечных размеров, в которой звезды и галактики неподвижны по отношению друг к другу. Взгляд, брошенный на небо в любом направлении, неизбежно попал бы на поверхность какой-либо звезды, и небо казалось бы составленным из перекрывающихся дисков звезд. Видимая яркость звездной поверхности не зависит от расстояния до нее, так что небо повсюду было бы столь же ярким, как

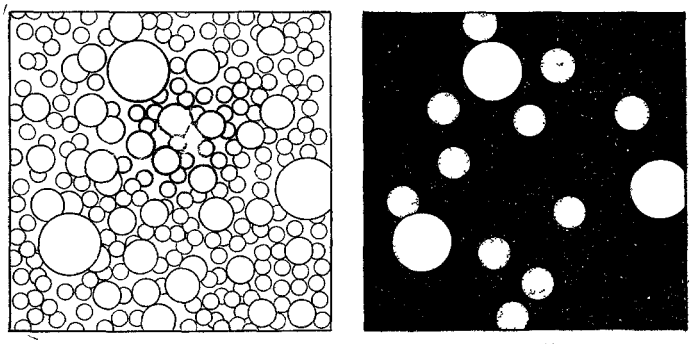
*) Adrian Webster, The Cosmic Background Radiation. Scientific American **231** (2), 26 (August 1974). Перевод Г. В. Чибисова.

А. Вебстер проводит исследования на Муллардской радиоастрономической обсерватории, будучи научным сотрудником Королевской комиссии выставки 1851 г. и Клар-Холла.

© Scientific American, Inc., 1974.
© Перевод на русский язык,
Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука»,
«Успехи физических наук», 1976 г.

и поверхность усредненной звезды. Поскольку Солнце можно считать такой усредненной звездой, то все небо днем и ночью было бы столь же ярким, как и поверхность Солнца. Это явное противоречие с действительностью позже (после XVIII столетия) получило название парадокса Ольберса по имени немецкого астронома Генриха Ольберса. Этот парадокс относится не только к звездному свету, но также и к излучению в других диапазонах электромагнитного спектра. Это указывает, что в модели статической бесконечной Вселенной что-то принципиально ошибочно, но не указывает, что именно.

Парадокс Ольберса был решен в 1929 г., когда Э. Хаббл показал, что Вселенная не является статической, а однородно расширяется (рис. 1) *). Все галактики разбегаются одна от другой и скорость разбегания, как это воспринимается на Земле, прямо пропорциональна расстоянию



а) б)

Рис. 1. Парадокс Ольберса утверждает, что если бы Вселенная была бесконечной в пространстве и все звезды были бы неподвижны по отношению друг к другу, то тогда поверхности звезд были бы видны во всех направлениях и ночное небо было бы очень ярким (*а*).

Поскольку такое явление не наблюдается, то что-то неправильно в такой модели Вселенной. В действительности существует расширение Вселенной, которое приводит одновременно к покраснению и ослаблению света далеких звезд, так что ночное небо в основном черное (*б*). Парадокс также решается и в других областях спектра.

до галактики. Скорость разбегания оказывает сильное влияние на свет, идущий от галактики к Земле. Прежде всего, с каждым прошедшим моментом времени очередные фотоны (кванты света), излученные звездами галактики, должны идти дольше, чтобы достичь Земли, так что их скорость прибытия меньше, чем это было бы в случае неподвижных галактик. Во-вторых, допплер-эффект сдвигает фотоны в область более низких частот, так что они имеют меньшие энергии (рис. 2).

Эти два эффекта совместно ослабляют свет от звезд далеких галактик дополнительно к ослаблению из-за большого расстояния до галактики. Оба эффекта становятся особенно сильными, когда скорость галактики сравнима по величине со скоростью света, поскольку в этом случае нужно учитывать специальную теорию относительности. Результат всех этих ослабляющих эффектов состоит в том, что плотность энергии звездного света не достигает абсурдно больших значений и поэтому не вызывает свечения неба столь же яркого, как Солнце. Те же аргументы применимы к фотонам других длин волн.

*) Расширение Вселенной было предсказано еще в 1922 г на основе эйнштейновской общей теории относительности советским ученым А. А Фридманом. Затем в 1929 г. Хаббл обнаружил это явление с помощью астрономических наблюдений. (*Прим. перев.*)

К настоящему моменту фоновое излучение обнаружено в четырех диапазонах электромагнитного спектра: радио-, микроволновом, рент-

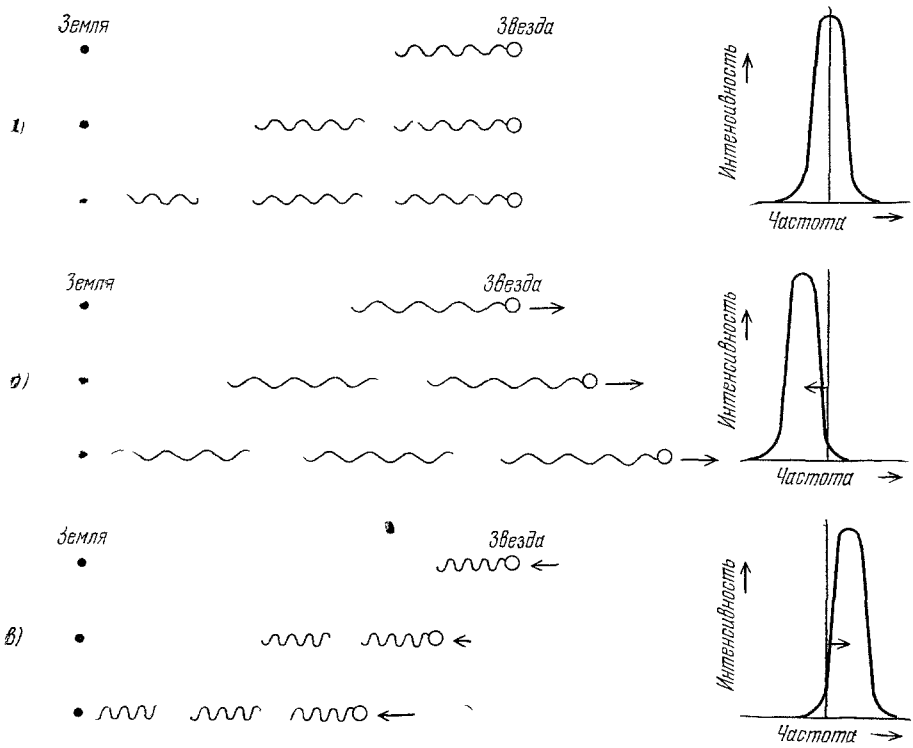


Рис. 2. Допплеровский сдвиг частоты света от движущейся звезды может быть использован для определения как скорости, так и направления движения звезды по отношению к Земле.

Если звезда покоится (*а*), ее свет останется без изменения, и каждая линия в ее спектре будет наблюдаться на частоте «покоя» (указана вертикальной линией в спектре справа). Если звезда удаляется от Земли (*б*), ее свет будет сдвинут в сторону более длинных (красных) длин волн и будет также ослаблен, потому что меньше фотонов (кусочки волнистых линий), излученных звездой, достигнет Земли за данный интервал времени, чем в случае, если бы звезда покоилась. И наоборот, если звезда движется по направлению к Земле (*в*), ее свет будет сдвинут в сторону более коротких (голубых) длин волн, и фотоны будут прибывать на Землю с большей частотой.

геновском и гамма-диапазонах. Фоновое излучение на каждой из различных длин волн несет различную информацию об истории Вселенной, поэтому я буду рассматривать каждую область отдельно, начиная с длинных волн и переходя ко все более коротким.

Космическое фоновое излучение в радиодиапазоне обнаружено в области частот от одного мегагерца до 500 *Мгц*, соответственно с длинами волн от 300 *м* до 60 *см*. Детектирование этого излучения представляет определенные трудности, поскольку наша Галактика сама является источником радиоволн. Фоновый поток радиоизлучения со всех направлений маскируется накладывающимся на него галактическим излучением. Измерения яркости радионеба на частоте 20 *Мгц* в направлении Большого Магелланова Облака показали, однако, что некоторые радиосигналы приходят извне нашей Галактики. В пределах Большого Магелланова Облака, которое является одной из двух малых галактик, близких к нашей, существует облако ионизованного газа, поглощающее радиоволны на частоте 20 *Мгц*. К. Шайн (C. A. Schain) из Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization в Австралии обнаружил, что в направлении этого

облака ионизованного газа, обозначаемого 30 Золотой Рыбы, имеется провал в радиояркости неба. Его наблюдения ясно показывают, что ионизованный газ 30 Золотой Рыбы поглощает излучение, так что должно существовать излучение, приходящее с расстояния большего, чем то, на котором находится Большое Магелланово Облако, и таким образом приходящее полностью извне нашей Галактики.

Для исследования фонового излучения в широком диапазоне частот в радиообласти используется методика, разработанная радиоастрономами

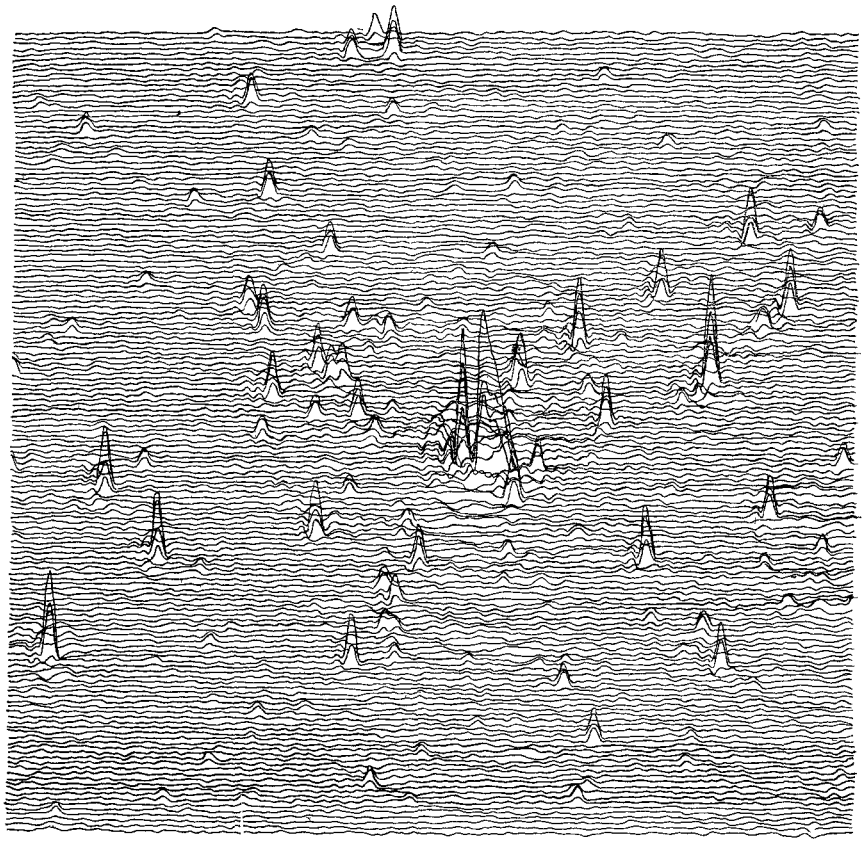


Рис. 3. Карта радиоисточников на малом участке неба построена с помощью трех зеркал одномильного телескопа Кембриджского университета, которые использовались в качестве интерферометра.

Каждый набор пиков на карте представляет собой радиогалактику или квазар. Карты, такие, как эта, показывают, что существует гораздо больше слабых небесных радиоисточников, чем можно было бы ожидать, исходя из числа ярких источников. Полагают, что космическое фоновое излучение в радиодиапазоне спектра обусловлено суммарным излучением всех радиоисточников на небе. Слабые источники являются в действительности мощными источниками на огромных расстояниях, видимыми сейчас такими, какими они были в далеком прошлом, из-за времени, необходимого сигналам, чтобы достичь Земли. Такие наблюдения указывают, что источники были более многочисленны в прошлом, чем в настоящее время.

Кембриджского университета. Точные карты радионеба строятся на различных длинах волн и сравниваются друг с другом (рис. 3). Фоновое излучение не меняется сколько-нибудь заметно по силе в зависимости от направления, и таким образом приводит к увеличению на постоянную величину результатов всех измерений на одной длине волны на всех картах; нулевой уровень, от которого отсчитывается яркость на каждой карте,

определяется фоновым излучением. Характер изменения нулевого уровня от карты к карте на разных длинах волн дает интенсивность фонового излучения на каждой длине волны.

С помощью этой методики составления карт было обнаружено, что интенсивность или плотность энергии фона радиоизлучения падает с увеличением частоты, т. е. количество энергии на коротких волнах меньше, чем на длинных. С таким типом спектра обычно сталкиваются в радиоастрономии; его называют нетепловым спектром, чтобы подчеркнуть отличие его от теплового излучения горячего газа, для которого соотношение между интенсивностью и частотой полностью противоположное. Считается, что нетепловое излучение генерируется синхротронным механизмом, когда высокоэнергичные частицы, вращаясь по спирали вокруг силовой линии магнитного поля, излучают энергию на длине волны, попадающей в радиодиапазон.

Происхождение радиофона достаточно понятно: это суммарное излучение всех радиоисточников во Вселенной. Эти источники, такие, как галактики и квазары, обладают спектрами почти такого же типа, как и фоновое излучение. На картах, полученных с помощью радиотелескопов наивысшей чувствительности, можно насчитать достаточно радиоисточников, чтобы заключить, что излучение их всех, включая слишком слабые и не проявляющиеся как индивидуальные источники, при сложении дает как раз интенсивность радиофона. В результате анализа радиофона можно изучать одновременно гораздо больше радиоисточников, чем можно было бы надеяться когда-либо обнаружить и исследовать индивидуально. Много полезной информации выяснилось из такого анализа.

Например, радиофон подтвердит свидетельства, вытекавшие из обзоров индивидуальных радиоисточников, о том, что в недалеком космическом прошлом радиогалактик и квазаров было гораздо больше, чем теперь. Причина состоит в том, что если посчитать интенсивность фона от существующего сейчас числа галактик и квазаров, то результат оказался бы много меньше, чем наблюдаемая интенсивность. Допущение о большем числе таких объектов в прошлом приводит вычисления в согласие с наблюдениями. Такое подтверждение жизненно важно для современной космологии, поскольку оно показывает, кроме прочего, что теория стационарности (steady-state) Вселенной полностью ошибочна. Эта теория постулирует, что любая часть Вселенной в среднем почти такая же, как и любая другая, и что в настоящее время Вселенная почти такая же, какой она была всегда и когда-либо будет. Одним из следствий теории стационарности является ее требование непрерывного творения материи, чтобы противодействовать убыванию плотности из-за расширения Вселенной. Теория стационарности ловко обходит все проблемы, связанные с рождением Вселенной и началом времени, утверждая, что нет необходимости в существовании начала. Ясно, однако, что поскольку в прошлом было гораздо больше радиоисточников, чем существует сейчас, то Вселенная не была тогда такой же, и что основной постулат теории стационарности ошибочен.

Альтернативной гипотезой к теории стационарности является модель эволюционирующей Вселенной. Эта модель утверждает, что вначале вся материя Вселенной расширялась из сверхплотного состояния. Наблюдения радиофона достаточно легко согласуются с эволюционирующей моделью: эпоха, начиная примерно с четверти возраста Вселенной до настоящего времени, была эпохой радиогалактик и квазаров. Эта эпоха явно подходит к концу, поскольку осталось лишь незначительное число таких объектов. В будущем их вообще может не быть.

Обращает на себя внимание отсутствие одной важной характеристики радиофона. Хорошо известно, что в пространстве между звездами нашей Галактики находится заметное количество нейтрального (неионизованного) водорода, излучающего на его характеристической длине волны 21 *см*.

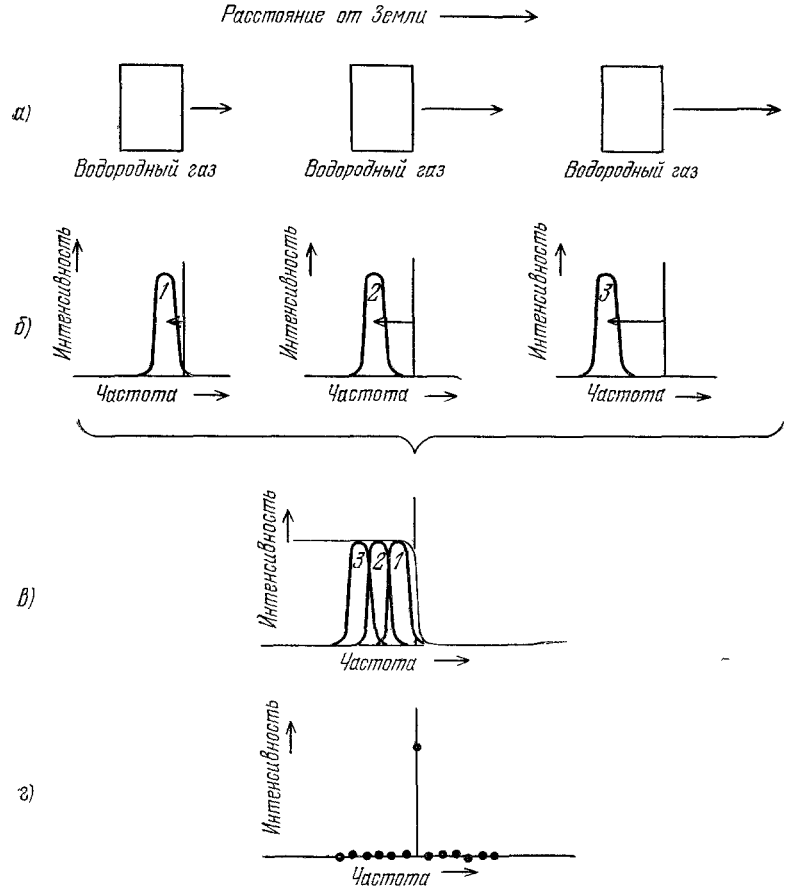


Рис. 4. Нейтральный (неионизованный) водородный газ не заполняет пространство между галактиками, по крайней мере, постольку, поскольку он не был обнаружен радиотелескопами.

Если бы Вселенная была заполнена водородом, то, по-видимому, газ, который находится дальше от Земли, удалялся бы быстрее, чем газ, который находится ближе (*а*), аналогично ситуации с наблюдаемым разбеганием галактик. Поэтому эмиссионная линия на радиоволне 21 *см* (соответствующей частоте 1420 *Мгц*) газа, более удаленного от Земли (*б*), была бы сильнее сдвинута из-за допплер-эффекта в сторону более длинных волн и низких частот, чем эмиссионная линия газа, находящегося ближе к Земле. Результат состоял бы в том, что все эмиссионные линии газа на различных расстояниях, складываясь, давали бы «ступеньку» (*в*) в радиоспектре ниже 1420 *Мгц*. Никакой такой ступеньки, однако, не было обнаружено в радиоспектре (*г*). Отчетливый сигнал (темные кружки) точно на частоте 1420 *Мгц* идет от газа в нашей собственной Галактике.

Излучение на 21 *см* искалось в спектре космического радиофона и не было найдено (рис. 4). Следовательно, не может быть много нейтрального водорода и в пространстве между галактиками. Этот результат особенно интересен, поскольку согласно канонической горячей эволюционирующей модели, к которой я еще вернусь ниже, Вселенная должна была быть заполнена нейтральным водородом, когда бывшее первоначально горячим вещество уже остыло. Вероятно, бóльшая часть водорода была уже использована при образовании звезд и галактик, а остальное могло быть ионизовано снова.

Следующий диапазон спектра, в котором космический фон излучения был обнаружен, это — микроволновой диапазон. Микроволновой фон доминирует на всех частотах между 500 *Мгц* и 500 *Ггц*, соответственно на длинах волн между 60 *см* и 0,6 *мм*. Микроволновой фон был открыт в 1965 г. сотрудниками Лабораторий фирмы «Белл». А. Пензиасом и Р. Вилсоном. Ранние измерения интенсивности излучения на различных длинах волн дали кривую, напоминающую спектр «черного тела» (идеального излучателя) при температуре около 3 °К (градусы Цельсия выше абсолютного нуля). Это излучение, по-видимому, имеет постоянную интенсивность по небу, и его существование прекрасно укладывается в рамки эволюционирующей модели.

С того времени было сделано много новых измерений микроволнового фона. Все они подтвердили чернотельную кривую между 408 *Мгц* и 115 *Ггц*, соответственно на длинах волн между 74 *см* и 2,6 *см*. Наилучшим и наиболее современным значением характеристической температуры этого излучения является 2,76 °К; измерения столь точны, что невероятно, чтобы эта величина отличалась от истинного значения более, чем на три процента. Инструменты, поднимаемые наверх баллонами и ракетами, должны скоро дать точные измерения в области более высоких частот микроволнового излучения, между 115 и 500 *Ггц*, соответственно на длинах волн между 2,6 *мм* и 0,6 *мм*. Эти измерения должны быть выполнены вне основной части земной атмосферы, потому что атмосфера сильно поглощает излучение на миллиметровых волнах. Это очень важные измерения, поскольку они обеспечат окончательную проверку того, является ли микроволновой спектр в действительности чернотельным *).

Каноническая горячая эволюционирующая модель представляет собой схему, которая недавно была разработана, чтобы объяснить полную историю Вселенной. Она была выведена, исходя из современного состояния Вселенной и для более ранних времен, используя все известные законы физики, чтобы вычислить, какие основные процессы имели место на каждой стадии. Детали вычислений поразительны; удивительно, сколь многое может быть надежно выяснено о том, что было так давно. Здесь, однако, я могу дать только краткое изложение результатов.

Рис. 5 схематически показывает историю Вселенной с момента, когда температура повсюду составляла 10^{12} °К. До этого времени Вселенная была заполнена короткоживущими частицами и античастицами при огромной плотности, температуре и давлении. Эти частицы находились в равновесии с полем излучения, т. е. частицы могли, взаимодействуя, рождать фотоны, а при взаимодействии фотонов могли рождаться частицы. Чем выше была энергия фотонов, тем более массивные и своеобразные частицы мог образовывать каждый фотон. Со временем температура упала до 10^{12} °К, однако Вселенная была уже столь холодна, что единственными частицами, чье существование определялось равновесием с фотонами, были пары позитронов и электронов, а также пары нейтрино и антинейтрино. Кроме того, на этой стадии осталось некоторое количество протонов и нейтронов, но все другие тяжелые частицы и античастицы уже аннигилировали.

До того как температура упала до 10^{11} °К, плотность вещества, все еще большая по современным представлениям, была уже достаточно мала, чтобы нейтрино и антинейтрино прекратили взаимодействовать с другими

*) Такие измерения выполнили недавно Вуди, Мазер и др. (D. P. Woody, I. C. Mather N. S. Nishioka, P. L. Richards, Phys. Rev. Lett. 34, 1036 (1975)). Их результат $T=2{,}99^{+0{,}07}_{-0{,}14}$ °К в пределах ошибок измерений достаточно хорошо согласуется с чернотельным характером спектра в целом. (*Прим. перев.*)

частицами. С этого момента нейтрино и антинейтрино распространяются свободно. Предполагается, что они все еще находятся вокруг нас, но в настоящее время, по-видимому, нет никаких возможностей их обнаружить.

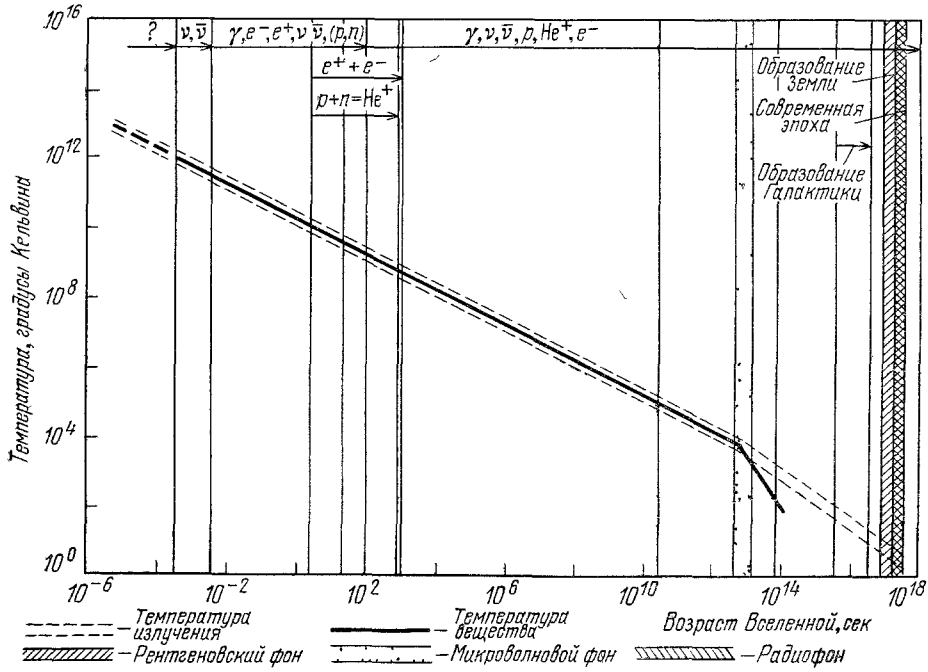


Рис. 5. Схема событий во Вселенной, начиная с ранних стадий расширения, показывает, когда и как образовалось космическое фоновое излучение в различных областях спектра.

События во Вселенной в пределах первой одной тысячной (10^{-3}) секунды недостаточно выяснены в основном из-за того, что они определяются взаимодействиями ядерных частиц, которые в свою очередь недостаточно понятны. Для возраста Вселенной в одну сотую (10^{-2}) секунды нейтрино (ν) и антинейтрино ($\bar{\nu}$) встречаются в изобилии; они легко взаимодействуют с фотонами (γ) и другими частицами. Затем нейтрино и антинейтрино более не взаимодействуют, и, таким образом, они становятся несущественными для соответствующих физических процессов. Между 10^{-2} секунды и 100 *сек* Вселенная состоит в основном из фотонов, электронов (e^-), позитронов (e^+), нейтрино, антинейтрино и следов протонов (p) и нейтронов (n). В течение этого времени и в продолжение еще некоторого периода все позитроны рекомбинируют с электронами ($e^+ + e^-$); кроме того, нейтроны объединяются с протонами в ядра гелия (He^+). Большая часть гелия в современной Вселенной была синтезирована в это время. От 100 *сек* до настоящего момента Вселенная состоит в основном из фотонов, нейтрино, антинейтрино, протонов, ядер гелия и достаточного количества электронов, обеспечивающих общую электронейтральность. Частицы ионизованного газа, состоящего из водорода и гелия эффективно взаимодействуют с фотонами излучения, так что вещество и излучение остаются при одинаковой температуре. Эта температура, однако, постоянно убывает в ходе расширения Вселенной. Где-то в интервале между примерно 100 и 10^{14} *сек* плотность энергии электромагнитного излучения становится меньше энергии покоя вещества, так что фотоны и частицы уже не взаимодействуют столь эффективно. В результате динамика Вселенной в больших масштабах изменяется, и температура падает немного быстрее, чем раньше. Примерно при 10^{13} *сек* электроны рекомбинируют с ионизованным газом, высвобождая излучение в видимой области, которое затем было смещено в микроволновую область спектра из-за доплер-эффекта в расширяющейся Вселенной; микроволновой фон является этим излучением от момента рекомбинации. Газ (вещество) и излучение теперь охлаждаются порознь каждый в своем темпе; конечная температура излучения в настоящее время составляет 2,76 °К. Как рентгеновский фон, так и радиофон образовались позднее, когда появились рентгеновские и радиоисточники. Слишком мало известно о происхождении γ-фона, чтобы можно было включить его в схему.

Когда температура упала до 10^9 °К, фотоны обладали меньшими энергиями, чем энергия, эквивалентная массе электрон-позитронной пары (в соответствии с формулой $E = mc^2$). В результате равновесие между фотонами и парами частиц было нарушено: позитроны и электроны, которые рекомбинировали с образованием фотонов, не восстанавливались обратной реакцией. Позитроны непрерывно аннигилировали, оставляя небольшой избыток электронов.

Примерно при той же температуре протоны и нейтроны участвовали в серии ядерных реакций, которые привели к образованию ядер гелия (состоящих из двух протонов и одного нейтрона или из двух протонов и двух нейтронов). Большая часть гелия сегодняшней Вселенной была образована в то время; наблюдение числа атомов гелия в современной Вселенной является важной проверкой условий на той стадии эволюции Вселенной. После той стадии не осталось свободных нейтронов. Вселенная в то время состояла из протонов и ядер гелия, которые вместе с электронами образовывали ионизованный газ, находившийся в тепловом равновесии с фотонами. Загадочные нейтрино также были повсюду. Фотоны на этой стадии эффективно взаимодействовали с ионизованным газом и не дожили до настоящего дня.

Когда температура упала ниже примерно 5000 °К, ядра и электроны ионизованного газа рекомбинировали, в результате чего образовался неионизованный газ. Этот газ не взаимодействовал далее с фотонами и с тех пор не оказывал на них никакого влияния. Это те фотоны, которые мы детектируем, когда наблюдаем микроволновой фон сегодня. Со времени, когда они были образованы, допплеровское смещение, вызванное расширением Вселенной, ослабило излучение; хотя во время рекомбинации оно было чернотельным излучением с температурой примерно 5000 °К (как поле излучения на поверхности Солнца), теперь оно является чернотельным излучением с температурой только 2,76 °К (рис. 6).

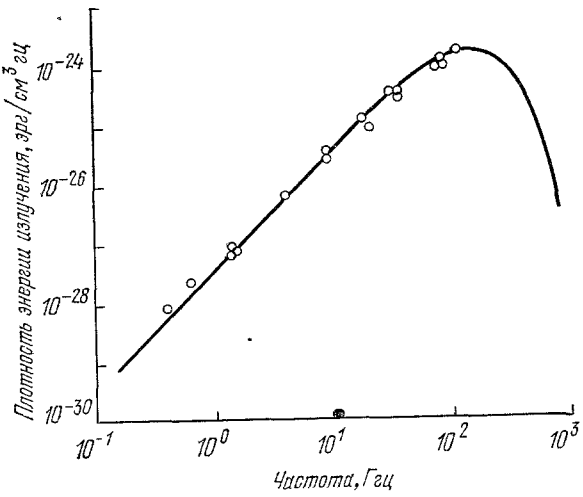


Рис. 6. Спектр микроволнового фона показывает, как хорошо измерения (кружки) согласуются с теоретической кривой для черного тела (идеальный излучатель) при температуре 2,76 °К.

Дальнейшие измерения необходимо провести в диапазоне частот между 10^2 и 10^3 *Гц*, чтобы подтвердить, что спектр действительно является чернотельным.

Каноническая горячая эволюционирующая модель представляет собой основу, на которой многие астрофизики обычно пытаются понять все события в эволюции Вселенной. Несмотря на большой скачок в понимании, вызванный открытием микроволнового фона, многие вопросы еще требуют ответа. Почему и как образовывались галактики? Почему они имеют именно такие размеры, а не больше и не меньше? Почему они вращаются? Откуда взялись их магнитные поля? Почему и как образовались квазары? Почему сейчас меньше квазаров, чем в прошлом? Эти и многие другие вопросы подвергаются энергичному исследованию в попытке найти объясняющие их процессы во Вселенной, описываемой канонической горячей эволюционирующей моделью.

Есть некоторые интересные проблемы и на более фундаментальном уровне, которые нуждаются в ответе не столько в рамках модели, как требуют объяснений для того, чтобы модель сама по себе выглядела менее неопределенной. Идя назад, в прошлое, от современного состояния Вселенной, можно добыть некоторые познания о том, что начальные условия

не были совершенно произвольными, но этого недостаточно, чтобы *объяснить* начальные условия. По-видимому, наибольшее, что мы можем ожидать от этого подхода, это то, что мы будем в состоянии *описать* те условия.

Одним из нерешенных вопросов этой категории является следующий: почему Вселенная вообще расширяется? Мы знаем, что она расширяется сейчас, и, двигаясь вспять по времени — в прошлое, мы получаем в результате вычислений, что она также расширялась и на всех более ранних стадиях. Но что заставило расширение начаться на самой ранней стадии? Есть и другие такие вопросы, возможно, менее очевидные, но не менее важные. Например, после того как огромное число частиц и античастиц взаимно аннигилировало, почему существовал маленький остаток реальных частиц (протонов, электронов и нейтронов), которые составляют вещество во Вселенной в настоящее время? Вероятно, могли бы существовать больший или меньший избыток частиц, или больший или меньший избыток античастиц, или могло бы иметь место точное их взаимоуничтожение, так что ни частиц, ни античастиц не осталось бы вообще. Не существует каких-либо физических принципов, которые позволяли бы предпочесть одну из этих возможностей. Затем, почему плотность частиц во Вселенной именно такая, как она есть? Этот вопрос относится к начальным условиям, потому что наиболее вероятная возможность состоит в том, что избыток существовал всегда и что это является характерной чертой Вселенной во все времена. Еще не очень ясно, где следует искать ответа на эти более глубокие вопросы, но эти проблемы определенно находятся среди наиболее вызывающих и стимулирующих в современной астрономии.

Теперь позвольте мне вернуться к наблюдательной ситуации. Как в случае микроволнового фона, так и в случае радиофона предпринимались многочисленные попытки найти различия в яркости между различными направлениями на небе, но никаких таких различий не было обнаружено. Современное состояние измерений таково, что вариации яркости в любом участке неба с характерными угловыми размерами от 180° до, примерно, 0,1° должны быть не больше, чем 0,1%. Другими словами, микроволновой фон действительно является очень однородным.

Можно вывести много интересных следствий из этого факта. Во-первых, Солнечная система должна двигаться не быстрее, чем примерно 300 *км/сек* по отношению к системе отсчета, определяемой микроволновым фоном. Если это было бы так, допплер-эффект вызвал бы увеличение яркости излучения из направления, в котором движется Солнечная система, по отношению к остальному небу примерно на 0,1%. Вероятно, небольшое улучшение этих наблюдений выявит скорость в 200 *км/сек* вращения Солнечной системы вокруг центра нашей Галактики.

Второе следствие состоит в том, что Вселенная должна расширяться с одной и той же скоростью по всем направлениям. В противном случае различия в допплеровских сдвигах излучения, выходящего из различных областей рекомбинирующего ионизованного газа, вызывали бы вариации яркости по небу. Третье следствие состоит в том, что Вселенная не может вращаться с какой-либо существенной угловой скоростью, иначе опять релятивистский допплер-эффект привел бы к наблюдаемым вариациям яркости. Верхний предел, установленный для любых возможных вращений этими измерениями, составляет феноменально малую величину, равную одной миллионной угловой секунды в год.

Измерения однородности фона излучения в наиболее малых угловых масштабах предназначались для того, чтобы обнаружить флуктуации

плотности рекомбинирующего ионизованного газа, которые сконденсировались в скопления и сверхскопления галактик современной Вселенной. Большинство вычислений предсказывает, что ожидаемые неоднородности яркости будут очень малыми, поэтому не очень удивительно, что они до сих пор не найдены.

Одно интригующее явление внутри нашей Галактики было обнаружено посредством микроволнового фона. Во внутренней части определенных малых плотных облаков газа и пыли вдоль Млечного Пути имеется существенная концентрация молекул формальдегида (H_2CO). Радионаблюдения этих облаков выявили линию поглощения в их спектрах на длине волны шесть сантиметров, характерной для молекул формальдегида. На этой длине волны единственным излучением с непрерывным спектром, достаточно сильным, чтобы вызвать поглощение формальдегидом, является микроволновой фон. Тот факт, что формальдегид поглощает энергии больше, чем излучает, указывает на то, что его температура должна быть ниже, чем 2,76°К микроволнового фона. Фактически, температура формальдегида примерно 1 °К *). Это ставит вопрос, как формальдегид смог стать таким холодным и как он остается в таком состоянии? В конце концов, если формальдегид был бы предоставлен сам себе, он был бы нагрет до 2,76°К микроволновым фоновым излучением. Некоторый тип космического рефрижератора, о котором ранее и не подозревали, должен работать внутри облаков, чтобы сохранять формальдегид охлажденным.

В рентгеновской области космический фон представлен излучением на частотах выше, чем $2{,}5 \cdot 10^{17}$ *гц* или, соответственно, на длинах волн меньше, чем 1,3 *нм*. Это излучение имеет нетепловой спектр, который простирается далеко в γ-область; наиболее энергичные фотоны, обнаруженные до сих пор, имеют энергию, большую, чем 100 *Мэв* **). Происхождение рентгеновского и γ-фона еще не установлено, но оно определенно приходит извне нашей Галактики. Интенсивность излучения почти такая же во всех направлениях вдали от плоскости Млечного Пути, где источники могли бы предположительно концентрироваться, если бы они были внутри Галактики.

Рентгеновский фон является, вероятно, суммой излучения от большого числа дискретных источников, так же как радиофон является суммой излучения от радиогалактик и квазаров. Предпринимались попытки обнаружить гранулированность рентгеновского фона, что выявило бы, приходит ли он от большого числа дискретных источников или нет, но чувствительность рентгеновских телескопов еще недостаточно высока, чтобы обнаружить ожидаемые флуктуации. Более того, слишком мало внегалактических рентгеновских источников было найдено для того, чтобы вклад таких источников в рентгеновский фон был бы надежно подсчитан. Тем не менее вполне вероятно, что полная эмиссия всех рентгеновских источников может объяснить весь фон.

В области гамма-излучения ситуация не так ясна. γ-телескопы еще недостаточно чувствительны, чтобы найти какой-либо индивидуальный

---

*) Следует отметить, что температура в 1 °К соответствует лишь относительной населенности двух уровней в молекуле. Температура газа молекул в облаке может быть намного выше. (*Прим. ред.*).

**) В области $h\nu \sim 100$ *Мэв* γ-излучение от плоскости Млечного Пути намного превышает уровень фона. Надо отметить также, что основным механизмом генерации γ-лучей с энергией порядка 100 *Мэв* является рождение π^0-мезонов при столкновениях протонов космических лучей с ядрами межзвездного газа и последующий распад π^0-мезонов на два γ-кванта. В мягком рентгеновском диапазоне $h\nu \sim 240$ *эв* интенсивность галактической составляющей превышает уровень фона. (*Прим. ред.*)

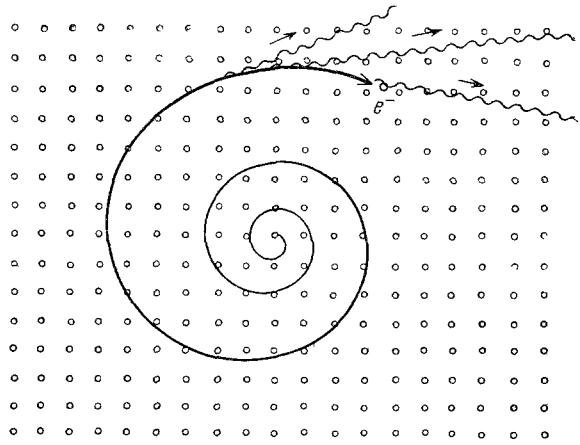


Рис. 7. Синхротронное излучение (волны), испускаемое заряженной частицей (в этом случае — электроном), вращающейся по спирали в магнитном поле, по-видимому, ответственно за фоновое излучение в радиодиапазоне.

Здесь линии магнитного поля перпендикулярны к плоскости рисунка (светлые кружки). Электрон движется по спирали на читателя и испускает излучение по касательной к своей траектории.

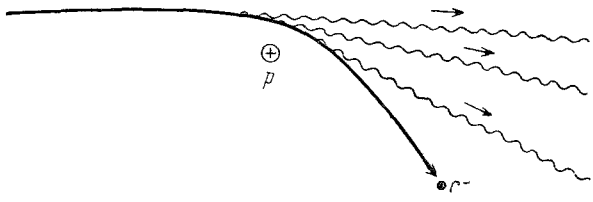


Рис. 8. Тормозное излучение генерируется, когда электрон проходит достаточно близко от ядра (знак плюс в кружке), которое искривляет его траекторию.

Замедление электрона приводит к излучению фотонов. Этот механизм, по-видимому, ответствен за космическое фоновое излучение в микроволновой области. (По-немецки это излучение называют Bremsstrahlung)

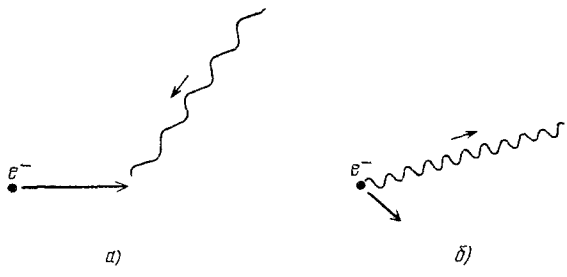


Рис. 9. Обратное комптоновское рассеяние, по-видимому, объясняет фоновое излучение в рентгеновской и γ-областях.

Здесь низкоэнергетичный фотон сталкивается с высокоэнергетичным электроном (*а*). Электрон передает часть своей энергии фотону, а сам замедляется (*б*).

источник *). Плавный переход спектра из рентгеновской в γ-область позволяет предположить, что γ-лучи имеют то же самое происхождение, что и рентгеновские, но это еще не доказано.

Изучение фона излучения в рентгеновской и γ-областях спектра еще находится в ранней стадии его развития. Несомненно, много интересной информации может быть получено из таких исследований. Однако полное значение даже современных наблюдений не может быть оценено до тех пор, пока не решен основной вопрос о происхождении излучения. Нет недостатка в возможных механизмах генерации фотонов; обратный комптон-эффект и механизм тормозного излучения — оба являются вероятными кандидатами (рис. 7—9). Нет также никакого недостатка в гипотезах о месте происхождения излучения. Решающие наблюдения просто еще не были сделаны.

В инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях спектрах космическое фоновое излучение еще не было обнаружено. Существуют технические трудности в проведении некоторых наблюдений в этих областях. Например, инфракрасные и ультрафиолетовые наблюдения не могут быть выполнены с поверхности Земли, потому что земная атмосфера сильно поглощает на этих длинах волн, а баллоны или ракеты являются чрезвычайно сложными и ненадежными наблюдательными платформами. Существуют естественные препятствия в проведении других наблюдений. Слабое свечение земной атмосферы ночью, зодиакальный свет и слабые звезды в нашей Галактике все вместе по крайней мере в сто раз ярче, чем фоновое излучение могло бы быть в видимом диапазоне. Прямые наблюдения фонового излучения никогда не могут быть осуществлены в далекой ультрафиолетовой области: атомы нейтрального водорода в межзвездном пространстве нашей Галактики поглощают такие фотоны так сильно, что внегалактическое фоновое излучение, вероятно, не может достичь вообще Солнечной системы.

Как я уже указывал, однако, распространение наблюдений космического фонового излучения на другие области спектра далеко не безнадежно. Действительно, представляется несомненным, что мы можем ожидать от наблюдений, что они приведут к новым и захватывающим выводам о природе и истории Вселенной в больших масштабах.

ЛИТЕРАТУРА

D. W. Sciama, Modern Cosmology, Cambridge Univ. Press., 1971.
M. S. Longair, Rept. Progr. Phys. 34 (pt. 3), 1125 (1971).
S. Weinberg, Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity, J. Wiley and Sons, Inc., 1972.
D. W. Sciama, Comm. Astrophys. and Space Phys. 4 (2), 35 (1972).

---

*) В настоящее время обнаружено по крайней мере пять галактических источников γ-излучения и среди них такие известные астрономические объекты, как Крабовидная туманность и пульсар в ней, пульсар Vela и центр Галактики, а также один внегалактический источник — ближайшая к нам радиогалактика Cen A (см. обзор «Дискретные источники гамма-излучения» А. М. Гальпера, В. Г. Кириллова-Угрюмова и Б. И. Лучкова, Изв. КРАО (1975). (*Прим. перев.*)