

-  [Новости](#)
-  [Астрономия](#)
-  [Методика](#)
-  [Космонавтика](#)
-  [Это интересно](#)
-  [Справочный материал](#)
-  [Солнечная система](#)
-  [Фотогалерея](#)
-  [Работы учащихся](#)
-  [Разное](#)

Астрономические даты и открытия. Введение

[Главная](#)

История астрономии. Глава 21. Реликтовое излучение (продолжение)

CP, 06/01/2011 - 20:32 — mav

Открытие реликтового излучения. В 1960 в Кроуфорд-Хилле, Холмдел (шт. Нью-Джерси, США) была построена антенна для приема радиосигналов, отраженных от спутника-баллона «Эхо». К 1963 для работы со спутником эта антенна была уже не нужна, и радиофизики Роберт Вудро Уилсон (р. 1936) и Арно Элан Пензиас (р. 1933) из лаборатории компании «Белл телефон» решили использовать ее для радиоастрономических наблюдений. Антенна представляла собой 20-футовый рупор. Вместе с новейшим приемным устройством этот радиотелескоп был в то время самым чувствительным инструментом в мире для измерения радиоволн, приходящих с широких площадок на небе. В первую очередь предполагалось провести измерения радиоизлучения межзвездной среды нашей Галактики на волне длиной 7,35 см. Арно Пензиас и Роберт Уилсон не знали о теории горячей Вселенной и не собирались искать реликтовое излучение.

Для точного измерения радиоизлучения Галактики необходимо было учесть все возможные помехи, вызываемые излучением земной атмосферы и поверхности Земли, а также помехи, возникающие в антенне, электрических цепях и приемниках. Предварительные испытания приемной системы показали несколько больший шум, чем ожидалось по расчетам, но казалось правдоподобным, что это связано с небольшим избытком шума в усилительных цепях. Чтобы избавиться от этих проблем, Пензиас и Уилсон использовали устройство, известное как «холодная нагрузка»: сигнал, приходящий от антенны, сравнивается с сигналом от искусственного источника, охлажденного жидким гелием при температуре около четырех градусов выше абсолютного нуля (4 К). В обоих случаях электрический шум в усилительных цепях должен быть одинаков, и поэтому полученная при сравнении разница дает мощность сигнала, идущего от антенны. Этот сигнал содержит вклады только от антенного устройства, земной атмосферы и астрономического источника радиоволн, попадающего в поле зрения антенны.

Пензиас и Уилсон ожидали, что антенное устройство будет давать очень небольшой электрический шум. Однако, чтобы проверить это предположение, они начали свои наблюдения на сравнительно коротких волнах длиной 7,35 см, на которых радиошум от Галактики должен быть пренебрежимо мал. Естественно, какой-то радиошум ожидался на такой длине волны и от земной атмосферы, но этот шум должен иметь характерную зависимость от направления: он должен быть пропорционален толщине атмосферы в том направлении, в каком смотрит антенна: немного меньше в направлении зенита, чуть больше в направлении горизонта. Ожидалось, что после вычитания атмосферного члена с характерной зависимостью от направления не останется никакого существенного сигнала от антенны и это подтвердит, что электрический шум, производимый антенным устройством, пренебрежимо мал. После этого можно будет начать изучение самой Галактики на больших длинах волн – около 21 см, где излучение Млечного Пути имеет вполне заметное значение. (Отметим, что радиоволны с длинами в сантиметры или дециметры, вплоть до 1 м, обычно называют «микроволновым излучением». Такое название дано потому, что эти длины волн меньше, чем у тех ультракоротких волн, которые использовали в радарах в начале Второй мировой войны.)

К своему удивлению, Пензиас и Уилсон обнаружили весной 1964, что они принимают на длине волн 7,35 см довольно заметное количество микроволнового шума, не зависящего от направления. Они нашли, что этот «статический фон» не меняется в зависимости времени суток, а позднее обнаружили, что он не зависит и от времени года. Следовательно, это не могло быть излучением Галактики, ибо в этом случае его интенсивность менялась бы в зависимости от того, смотрит антенна вдоль плоскости Млечного Пути или поперек. К тому же, если бы это было излучением нашей Галактики, то большая спиральная галактика М 31 в Андромеде, во многих отношениях похожая на нашу, тоже должна была бы сильно излучать на волне 7,35 см, а этого не наблюдалось. Отсутствие каких-либо вариаций наблюдаемого микроволнового шума с

направлением весьма серьезно указывало на то, что эти радиоволны, если они действительно существуют, приходят не от Млечного Пути, а от значительно большего объема Вселенной.

Исследователям было ясно, что необходимо снова проверить, не может ли сама антенна производить больше электрического шума, чем ожидалось. В частности, было известно, что в рупоре антенны угнездилась пара голубей. Они были пойманы, отправлены по почте на принадлежащий компании «Белл» участок в Вилпани, выпущены на волю, вновь обнаружены несколькими днями спустя на своем месте в антенне, снова пойманы и наконец утихомирены более решительными средствами. Однако во время аренды помещения голуби покрыли внутренность антенны тем, что Пензиас назвал «белым диэлектрическим веществом», которое при комнатной температуре могло быть источником электрического шума. В начале 1965 был демонтирован рупор антенны и вычищена вся грязь, однако это, как и все другие ухищрения, дало очень малое уменьшение наблюдаемого уровня шума.

Когда все источники помех были тщательно проанализированы и учтены, Пензиас и Уилсон вынуждены были сделать вывод, что излучение приходит из космоса, причем со всех сторон с одинаковой интенсивностью. Оказалось, что пространство излучает так, как будто бы оно нагрето до температуры 3,5 кельвина (точнее, достигнутая точность позволяла заключить, что «температура космоса» от 2,5 до 4,5 кельвина). Необходимо заметить, что это очень тонкий экспериментальный результат: например, если перед рупором антенны расположить брикет мороженого, то он сиял бы в радиодиапазоне, в 22 млн. раз более ярком, чем соответствующей участок неба. Обдумывая неожиданный результат своих наблюдений, Пензиас и Уилсон не торопились с публикацией. Но события развивались уже помимо их воли.

Случилось так, что Пензиас позвонил по совершенно другому поводу своему приятелем Бернарду Берку из Массачусетского технологического института. Незадолго до этого Берк слышал от своего коллеги Кена Трннера из Института Карнеги о докладе, который тот, в свою очередь, слышал в Университете Джонса Хопкинса, сделанном теоретиком из Принстона Филом Пиблслем, работавшим под руководством Роберта Дикке. В этом докладе Пиблс приводил аргументы в пользу того, что должен существовать фоновый радишум, оставшийся от ранней Вселенной и имеющий сейчас эквивалентную температуру около 10 К.

Пензиас позвонил Дикке, и обе группы исследователей встретились. Роберту Дикке и его коллегам Ф.Пиблсу, П.Роллу и Д.Уилкинсону стало ясно, что А.Пензиас и Р.Уилсон обнаружили реликтовое излучение горячей Вселенной. Ученые решили одновременно опубликовать два письма в престижном «Астрофизическом журнале» («Astrophysical Journal»). Летом 1965 были опубликованы обе работы: Пензиаса и Уилсона об открытии реликтового излучения и Дикке с коллегами – с его объяснением с помощью теории горячей Вселенной. По-видимому, не до конца убежденные в космологической интерпретации своего открытия, Пензиас и Уилсон дали своей заметке скромное название: *Измерение избыточной антенной температуры на частоте 4080 МГц*. Они просто объявили, что «измерения эффективной зенитной температуры шума... дали значение на 3,5 К выше, чем ожидалось», и избежали всяких упоминаний о космологии, за исключением фразы, что «возможное объяснение наблюдаемой избыточной температуры шума дано Дикке, Пиблсом, Роллом и Уилкинсоном в сопутствующем письме в этом же выпуске журнала».

В последующие годы на различных длинах волн от десятков сантиметров до доли миллиметра были проведены многочисленные измерения. Наблюдения показали, что спектр реликтового излучения соответствует формуле Планка, как это и должно быть для излучения с определенной температурой. Подтвердилось, что эта температура примерно равна 3 К. Было сделано замечательное открытие, доказывающее, что Вселенная в начале расширения была горячей. Такого сложное переплетение событий, завершившееся открытием горячей Вселенной Пензиасом и Уилсоном в 1965. Установление факта сверхвысокой температуры в начале расширения Вселенной явилось отправной точкой важнейших исследований, ведущих к раскрытию тайн не только астрофизических, но и тайн строения материи.

Наиболее точные измерения реликтового излучения проведены из космоса: это эксперимент «Реликт» на советском спутнике «Прогноз-9» (1983–1984) и эксперимент DMR (Differential Microwave Radiometer) на американском спутнике COBE (Cosmic Background Explorer, ноябрь 1989–1993) Именно последний позволил точнее всего определить температуру реликтового излучения: $2,725 \pm 0,002$ К.

Микроволновый фон как «новый эфир». Итак, спектр реликтового излучения с очень высокой точностью соответствует излучению абсолютно черного тела (т.е. описывается формулой Планка) с температурой $T = 2,73$ К. Однако наблюдаются небольшие (около 0,1%) отклонения от этой средней температуры в зависимости от того, в каком направлении на небе проводится измерение. Дело в том, что реликтовое излучение изотропно лишь в системе координат, связанной со всей системой разбегающихся галактик, в так называемой «сопутствующей системе отсчета», которая расширяется вместе с Вселенной. В любой другой системе координат интенсивность излучения зависит от направления. В первую очередь это вызвано движением измеряющего прибора относительно реликтового излучения: эффект Доплера приводит к «посинению» фотонов, летящих навстречу прибору, и к «покраснению» догоняющих его фотонов.

При этом измеренная температура по сравнению со средней (T_0) зависит от направления движения: $T = T_0 (1 + (v/c) \cos \theta)$, где v – скорость прибора в системе координат, связанной с

реликтовым излучением; c – скорость света, i – угол между вектором скорости и направлением наблюдения. На фоне однородного распределения температуры появляется два «полюса» – теплый в направлении движения и прохладный в противоположном направлении. Поэтому такое отклонение от однородности называют «дипольным». Дипольная составляющая в распределении реликтового излучения была обнаружена еще при наземных наблюдениях: в направлении на созвездие Льва температура этого излучения оказалась на 3,5 мК выше средней, а в противоположном направлении (созвездие Водолея) на столько же ниже средней. Следовательно, мы движемся относительно реликтового излучения со скоростью около 400 км/с. Точность измерений оказалась настолько высокой, что обнаружились даже годовые вариации дипольной составляющей, вызванные обращением Земли вокруг Солнца со скоростью 30 км/с.

Измерения с искусственных спутников Земли существенно уточнили эти данные. По данным COBE, после учета орбитального движения Земли получается, что Солнечная система движется так, что амплитуда дипольной составляющей температуры реликтового излучения $\Delta T = 3,35$ мК; это соответствует скорости движения $V = 366$ км/с. Двигается Солнце относительно излучения в направлении границы созвездий Льва и Чаша, к точке с экваториальными координатами $\alpha = 11^{\text{h}} 12^{\text{m}}$ и $\delta = -7,1^{\circ}$ (эпоха J2000); что соответствует галактическим координатам $l = 264,26^{\circ}$ и $b = 48,22^{\circ}$. Учет движения самого Солнца в Галактике показывает, что относительно всех галактик Местной группы Солнце движется со скоростью 316 ± 5 км/с в направлении $l_0 = 93 \pm 2^{\circ}$ и $b_0 = -4 \pm 2^{\circ}$. Поэтому движение самой Местной группы относительно реликтового излучения происходит со скоростью 635 км/с в направлении около $l = 269^{\circ}$ и $b = +29^{\circ}$. Это примерно под углом 45° относительно направления на центр скопления галактик в Деве (Virgo).

Изучение движений галактик в еще большем масштабе показывает, что совокупность ближайших скоплений галактик (119 скоплений из каталога Абеля в пределах 200 Мпк от нас) движется как целое относительно реликтового излучения со скоростью около 700 км/с. Таким образом, наша окрестность Вселенной плывет в море реликтового излучения с заметной скоростью. Астрофизики неоднократно обращали внимание на то, что сам факт существования реликтового излучения и связанной с ним выделенной системой отсчета отводит этому излучению роль «нового эфира». Но ничего мистического в этом нет: все физические измерения в этой системе отсчета эквивалентны измерениям в любой другой инерциальной системе отсчета. (Обсуждение проблемы «нового эфира» в связи с принципом Маха можно найти в книге: Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. *Строение и эволюция Вселенной*. М., 1975).

Анизотропия реликтового излучения. Температура реликтового излучения является лишь одним из его параметров, описывающих раннюю Вселенную. В свойствах этого излучения сохранились и другие явные следы очень ранней эпохи эволюции нашего мира. Астрофизики находят эти следы, анализируя спектр и пространственную неоднородность (анизотропию) реликтового излучения.

Согласно теории горячей Вселенной, по прошествии примерно 300 тыс. лет после начала расширения температура вещества и связанного с ним излучения уменьшилась до 4000 К. При этой температуре фотоны уже не могли ионизовать атомы водорода и гелия. Поэтому в ту эпоху, соответствующую красному смещению $z = 1400$, произошла рекомбинация горячей плазмы, в результате которой плазма превратилась в нейтральный газ. Тогда еще никаких галактик и звезд, конечно, не было. Они возникли значительно позже.

Став нейтральным, заполняющий Вселенную газ оказался практически прозрачным для реликтового излучения (хотя в ту эпоху это были не радиоволны, а свет видимого и ближнего инфракрасного диапазонов). Поэтому древнее излучение почти беспрепятственно доходит до нас из глубин пространства и времени. Но все же по пути оно испытывает некоторые влияния и как археологический памятник несет на себе следы исторических событий.

Например, в эпоху рекомбинации атомы испускали много фотонов с энергией порядка 10 эВ, что в десятки раз превышает среднюю энергию фотонов равновесного излучения той эпохи (при $T = 4000$ К таких энергичных фотонов крайне мало, порядка одной миллиардной доли от их общего числа). Поэтому рекомбинационное излучение должно было бы сильно исказить планковский спектр реликтового излучения в диапазоне длин волн около 250 мкм. Правда, расчеты показали, что сильное взаимодействие излучения с веществом приведет к тому, что выделившаяся энергия в основном «рассосется» по широкой области спектра и не сильно его исказит, но будущие точные измерения смогут заметить и это искажение.

А значительно позже, в эпоху формирования галактик и первого поколения звезд (при $z \sim 10$), когда огромная масса уже почти остывшего вещества вновь испытала значительный нагрев, спектр реликтового излучения вновь мог измениться, поскольку, рассеиваясь на горячих электронах, низкоэнергичные фотоны увеличивают свою энергию (так называемый «обратный эффект Комптона»). Оба описанные выше эффекта искажают спектр реликтового излучения в его коротковолновой области, которая пока наименее исследована.

Хотя в нашу эпоху большая часть обычного вещества плотно упакована в звездах, а те в галактиках, все же и вблизи нас реликтовое излучение может испытать заметное искажение спектра в том случае, если его лучи по пути к Земле проходят сквозь крупное скопление галактик. Обычно такие скопления заполнены разреженным, но очень горячим межгалактическим газом, имеющим температуру около 100 млн К. Рассеиваясь на быстрых электронах этого газа, низкоэнергичные фотоны увеличивают свою энергию (все тот же

обратный комптон-эффект) и переходят из низкочастотной, рэлей-джинсовской области спектра в высокочастотную, виновскую область. Этот эффект был предсказан Р.А.Сюняевым и Я.Б.Зельдовичем и обнаружен радиоастрономами в направлении многих скоплений галактик в виде понижения температуры излучения в рэлей-джинсовской области спектра на 1–3 мК. Эффект Сюняева – Зельдовича был открыт первым среди эффектов, создающих анизотропию реликтового излучения. Сравнение его величины с рентгеновской светимостью скоплений галактик позволило независимо определить постоянную Хаббла ($H = 60 \pm 12$ км/с/Мпк).

Вернемся к эпохе рекомбинации. В возрасте менее 300 000 лет Вселенная представляла собой почти однородную плазму, содрогавшуюся от звуковых, а точнее – инфразвуковых волн. Расчеты космологов говорят, что эти волны сжатия и расширения вещества генерировали в непрозрачной плазме также колебания плотности излучения, и поэтому ныне они должны обнаруживаться в виде чуть заметной «зыби» в почти однородном реликтовом излучении. Поэтому сегодня оно должно приходить на Землю с разных сторон с чуть разной интенсивностью. В данном случае речь идет не о тривиальной дипольной анизотропии, вызванной движением наблюдателя, а о вариациях интенсивности, действительно присущих самому излучению. Их амплитуда должна быть крайне мала: примерно одна сотысячная доля самой температуры излучения, т.е. порядка 0,00003 К. Их очень трудно измерить. Первые попытки определить величины этих малых флуктуации в зависимости от направления на небе были сделаны сразу после открытия самого реликтового излучения в 1965. Позже они не прекращались, но открытие состоялось лишь в 1992 с помощью аппаратуры, вынесенной за пределы Земли. В нашей стране такие измерения были проведены в эксперименте «Реликт», но более уверенно эти малые флуктуации были зарегистрированы с американского спутника COBE.

В последнее время проводится и планируется много экспериментов по измерению амплитуды флуктуаций реликтового излучения в различных угловых масштабах – от градусов до секунд дуги. Различные физические явления, происходившие в самые первые мгновения жизни Вселенной, должны были оставить свой характерный отпечаток в приходящем к нам излучении. Теория предсказывает определенную зависимость между размерами холодных и горячих пятен в интенсивности реликтового излучения и их относительной яркостью. Зависимость очень своеобразная: в ней заключена информация о процессах рождения Вселенной, о том, что происходило сразу после рождения, а также о параметрах сегодняшней Вселенной.

Угловое разрешение первых наблюдений – в экспериментах «Реликт-2 и COBE – было очень плохое, примерно 7°, поэтому информация о флуктуациях реликтового излучения была неполной. В последующие годы такие же наблюдения проводились с помощью как наземных радиотелескопов (в нашей стране для этой цели используется инструмент РАТАН-600 с незаполненной апертурой диаметром 600 м), так и радиотелескопов, которые поднимались на воздушных шарах в верхние слои атмосферы.

Принципиальным шагом в исследовании анизотропии реликтового излучения стал эксперимент «Бумеранг» (BOOMERANG), выполненный учеными США, Канады, Италии, Англии и Франции с помощью беспилотного аэростата НАСА (США) объемом 1 млн кубометров, который с 29 декабря 1998 по 9 января 1999 совершил круг на высоте 37 км вокруг Южного полюса и, пролетев около 10 тыс. км, сбросил гондолу с приборами на парашюте в 50 км от места старта. Наблюдения проводились субмиллиметровым телескопом с главным зеркалом диаметром 1,2 м, в фокусе которого размещалась охлажденная до 0,28 К система болометров, измерявшая фон в четырех частотных каналах (90, 150, 240 и 400 ГГц) с угловым разрешением 0,2–0,3 градуса. За время полета наблюдениями было покрыто около 3% небесной сферы.

Зарегистрированные в эксперименте «Бумеранг» температурные неоднородности реликтового излучения с характерной амплитудой 0,0001 К подтвердили правильность «акустической» модели и показали, что четырехмерную пространственно-временную геометрию Вселенную можно считать плоской. Полученная информация позволила также судить и о составе Вселенной: подтвердилось, что обычное барионное вещество, из которого состоят звезды, планеты и межзвездный газ, составляет всего около 4% массы; а остальные 96% заключены в неизвестных пока формах материи.

Эксперимент «Бумеранг» был прекрасно дополнен подобным ему экспериментом MAXIMA (Millimeter Anisotropy eXperiment IMaging Array), в основном выполненном учеными США и Италии. Их аппаратура, летавшая в стратосферу в августе 1998 и в июне 1999, исследовала менее 1% небесной сферы, но с высоким угловым разрешением: около 5'. Аэростат совершал ночные полеты над континентальной частью США. Главное зеркало телескопа имело диаметр 1,3 м. Приемная часть аппаратуры состояла из 16 детекторов, покрывавших 3 частотных диапазона. Вторичные зеркала охлаждались до криогенной температуры, а болометры – даже до 0,1 К. Такую низкую температуру удавалось поддерживать до 40 часов, чем и ограничивалась длительность полета.

Эксперимент MAXIMA выявил мелкую «зыбь» в угловом распределении температуры реликтового излучения. Его данные были дополнены наблюдениями наземной обсерватории с помощью интерферометра DASI (Degree Angular Scale Interferometer), установленного радиоастрономами Чикагского университета (США) на Южном полюсе. Этот 13-элементный криогенный интерферометр наблюдал в десяти частотных каналах в диапазоне 26–36 ГГц и выявил еще более мелкие флуктуации реликтового излучения, причем зависимость их амплитуды от углового размера хорошо подтверждает теорию акустических колебаний,

унаследованных от молодой Вселенной.

Кроме измерений интенсивности реликтового излучения с поверхности Земли, планируются и космические эксперименты. В 2007 предполагается запустить в космос радиотелескоп «Planck» (Европейское космическое агентство). Его угловое разрешение будет существенно выше, а чувствительность примерно в 30 раз лучше, чем в эксперименте COBE. Поэтому астрофизики надеются, что многие факты о начале существования нашей Вселенной будут выяснены.

Владимир Сурдин

[Войдите на сайт](#) для отправки комментариев



Copyright © ОблЦИТ 2001-2013