

## РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Отлаживая аппаратуру для наблюдений радиоизлучения гало Галактики, американские астрофизики А. Пензиас и Р. Вильсон обнаружили в рупорной приемной антенне своего радиотелескопа слабый неисчезающий фон. Попытки устранить или снизить его с помощью технических усовершенствований ни к чему не привели. Нельзя было приписать его и земным помехам. Радиошум оставался неизменным в течение почти целого года непрерывной работы, и это означало, что он никак не зависит от ориентации антенны, изменяющейся при годовом вращении Земли.

Неустранимый шум создавался в антенне космическим фоном радиоволн, равномерно заполняющих всю Вселенную. Такое объяснение дали этому явлению Р. Дикке и его сотрудники из Принстонского университета (США). Но еще ранее, почти за 20 лет до того, космический фон излучения был предсказан Г. Гамовым. Фоновое излучение не было испущено какими-либо источниками, а существовало во Вселенной с самых первых мгновений ее расширения. Оно сохранилось с тех времен, когда вещество планет, звезд и галактик находилось в состоянии «первичной» плотной и горячей плазмы, однородно заполняющей все пространство. Это остаточное, реликтовое излучение.

За открытие реликтового излучения А. Пензиасу и Р. Вильсону присуждена Нобелевская премия по физике 1968 года. В традиционной лекции при получении премии Р. Вильсон вспоминал, что в 1965 г. в первом сообщении о своих результатах авторы старались избежать любого обсуждения космологического объяснения их открытия: «мы никоим образом не занимались этим вопросом. Мы считали, что наши результаты не зависят от теоретических интерпретаций и могут пережить любую из них. Нас удовлетворяло, что загадочный шум, присущий нашей антенне, имеет хотя бы какое-то объяснение, а тем более относящееся к важным вопросам космологии».

## Чернотельный спектр

Антенна А. Пензиаса и Р. Вильсона была настроена на длину волны 7,35 см. К настоящему времени проведены многочисленные наблюдения реликтового излучения на различных длинах волн от полуметра до долей миллиметра. По этим данным можно построить зависимость энергии излучения от длины волны или частоты. Найденная таким образом зависимость в точности соответствует тому, что нужно ожидать для чернотельного теплового излучения с температурой 2,7 К (рис. 37).

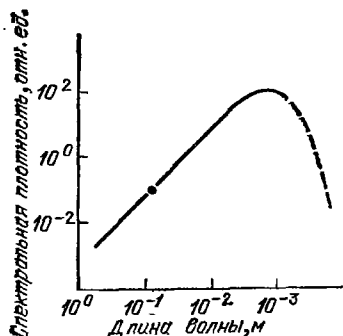


Рис. 37. Спектр реликтового излучения. По вертикальной оси — спектральная плотность, т. е. энергия, приходящая в единицу времени на единицу площади антенны из единичного телесного угла в единичном интервале частот. Кружком на кривой показан результат измерений Пензиаса и Вильсона. Штриховая линия — область, где нет прямых измерений.

Это очень низкая температура, почти абсолютный нуль. И тем не менее тепловое излучение с такой температурой оказалось вполне измеримым. Его не «забывает» излучение горячего вещества звезд, оно четко выделяется из всей совокупности электромагнитных волн различного происхождения, распространяющихся во Вселенной.

Дело в том, что реликтовое излучение и излучение звезд принадлежат к различным областям спектра электромагнитных волн. Солнце, например, излучает главным образом в видимой области, максимум его спектра приходится на длину волны  $5 \cdot 10^{-8}$  м. Максимум в спектре реликтового излучения приходится на миллиметровые волны. Согласно общему соотношению, связывающему частоту в максимуме спектра,  $\omega_m$ , с температурой  $T$ , при  $T=2,7$  К имеем

$$\omega_m = 2,8kT/\hbar \approx 10^{12} \text{ рад/с.} \quad (7.1)$$

Этой частоте соответствует длина волны

$$\lambda_m = 2\pi c/\omega_m = 1,8 \text{ мм} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^* \quad (7.2)$$

Частота  $\omega_m$  и длина волны  $\lambda_m$  лежат вблизи границы радиодиапазона и диапазона инфракрасных волн.

На рис. 38 показано распределение энергии реликтового излучения и суммарного излучения космических источников — звезд, радиоисточников, инфракрасных источников. Реликтовое излучение выделяется и по положению

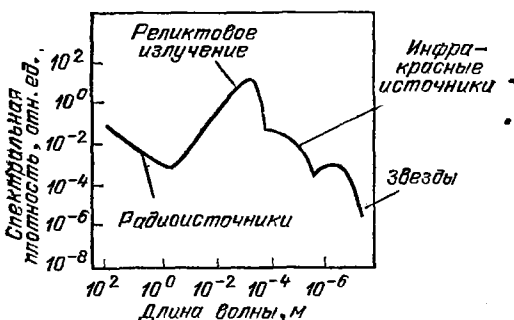


Рис. 38. Общий спектр электромагнитного излучения во Вселенной (по А. Г. Дорошкевичу и И. Д. Новикову).

в спектре электромагнитных волн и по сравнительно высокой интенсивности в своем максимуме. На основании этих соображений советские астрофизики А. Г. Дорошкевич и И. Д. Новиков в 1964 г., за год до открытия реликтового излучения, обосновали возможность наблюдения космического фона электромагнитных волн, соответствующего равновесному тепловому излучению с температурой в несколько кельвинов. Их расчет, проделанный по предложению Я. Б. Зельдовича, ставил своей целью выяснение наблюдательного критерия, по которому можно было бы выбрать один из двух теоретически возможных вариантов космологической модели для ранней Вселенной — «холодный» или «горячий» (см. далее).

\*) Соотношения (7.1) и (7.2) относятся к распределению интенсивности по частотам. Если построить распределение интенсивности по длинам волн, то максимуму распределения будет соответствовать длина волны

$$\tilde{\lambda}_m = 0,201 \frac{2\pi h c}{kT} = 0,57 \lambda_m.$$

При  $T=2,7 \text{ К}$  находим  $\tilde{\lambda}_m=1 \text{ мм}$ .

Пользуясь общими соотношениями для равновесного теплового излучения, можно оценить концентрацию фотонов реликтового излучения:

$$n_\gamma = 0,24 (kT/\hbar c)^3 \approx 400 \text{ см}^{-3} = 4 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}. \quad (7.3)$$

Интересно сравнить  $n_\gamma$  со средней по всей Вселенной концентрацией частиц, из которых состоят звезды и галактики. Согласно астрономическим данным средняя «размазанная» плотность вещества  $\bar{\rho} \sim 10^{-27} \text{ кг/м}^3$ .

Эта величина получается путем подсчета общей массы галактик в больших объемах Вселенной, содержащих многие сотни и тысячи звездных систем, и деления этой массы на соответствующий объем. Если объем достаточно велик, так что его линейный размер превышает несколько сотен мегапарсек, то, как оказывается, результат вычисления средней плотности одинаков для различных объемов, где бы во Вселенной их ни выбирать. Это означает, что распределение вещества во Вселенной однородно в среднем по большим масштабам. В этом смысле и сама Вселенная однородна.

Величина средней плотности определяется не слишком точно и кроме того, величина  $\bar{\rho}$  не включает в себя невидимых скрытых масс, о которых мы говорили в гл. 5. Природа скрытых масс остается до сих пор неизвестной, но их вклад в среднюю плотность Вселенной существенно превышает, вероятно, вклад светящегося вещества.

О плотности  $\bar{\rho}$  говорят еще как о плотности барионов во Вселенной. Вещество звезд состоит из протонов, нейтронов и электронов. Электронов в них столько же, сколько протонов, а нейтронов приблизительно в 10 раз меньше — это следует из химического состава звезд: 75–80% водорода, 1–2% тяжелых элементов, а остальное гелий-4, ядро которого содержит два протона и два нейтрона. Масса электрона мала по сравнению с массой протона, и ее можно не учитывать в оценках средней плотности, которую создают главным образом протоны и нейтроны, принадлежащие к классу тяжелых элементарных частиц, барионов.

Деля среднюю плотность  $\bar{\rho}$  на массу бариона  $m \approx 10^{-27} \text{ кг}$ , найдем среднюю концентрацию барионов во Вселенной  $\bar{n} \approx 1 \text{ м}^{-3}$ . Концентрация реликтовых фотонов много больше этой величины,  $n_\gamma/\bar{n} \approx 4 \cdot 10^8$ .

Стоит заметить, что концентрация реликтовых квантов определена гораздо точнее, чем концентрация барионов. Плотность энергии реликтовых квантов  $w_\gamma = aT^4 \approx$

$\approx 4 \cdot 10^{-14}$  Дж/м<sup>3</sup>. (Здесь константа  $a$  связана с постоянной Стефана — Больцмана:  $a = \frac{3}{4}\sigma/c$ .) Представим эту величину в единицах плотности массы:  $\rho_r = w_r/c^2 = 4 \cdot 10^{-31}$  кг/м<sup>3</sup>. Связь между  $w_r$  и  $\rho_r$  соответствует эйнштейновской формуле  $E = mc^2$ .

Из всех этих рассуждений видно, что несмотря на очень высокую концентрацию фотоны не создают значительного вклада в общую массу Вселенной, их плотность  $\rho_r$  в несколько сотен раз меньше плотности барионов.

Вскоре после открытия реликтового излучения И. С. Шкловский, а также Дж. В. Филд и Дж. Л. Хичкок в США заметили, что первое астрономическое проявление реликтового излучения было зарегистрировано в действительности еще в начале 40-х годов. По наблюдениям спектров межзвездного газа в те годы было установлено, что радикалы циана CN, входящие в состав межзвездной среды, находятся в возбужденном состоянии, причем энергия возбуждения  $4,8 \cdot 10^{-3}$  эВ соответствует температуре между 2 и 3 К. Причина оставалась неизвестной вплоть до открытия реликтового излучения, которое, как теперь ясно, служит источником возбуждения этих межзвездных молекул.

Межзвездные молекулы оказались, таким образом, естественным термометром, указывавшим астрономам температуру реликтового фона задолго до его открытия. Но астрономы не были еще подготовлены, чтобы правильно это понять.

### Горячее начало

Существование реликтового излучения и даже — ориентировочно — его температура были предсказаны в конце 40-х годов Гамовым. Основанием для него послужила теория расширяющейся Вселенной, созданная А. А. Фридманом в 1922—1924 гг. и получившая затем подтверждение в открытии общего разбегания галактик.

Согласно космологической теории Фридмана все вещество Вселенной находилось в далеком прошлом в гораздо более плотном, чем сейчас, состоянии. 18 млрд. лет назад вещество было однородно перемешано и его плотность превышала даже плотность атомных ядер. Из этого состояния началось развитие, приведшее к современной картине мира. Вещество расширялось, его плотность падала, в нем появлялись и росли отдельные сгущения и разрежения. Постепенно сгущения превратились в звездные системы и отдельные звезды, стало возможным

формирование планет, возникновение жизни. Космология Фридмана дает полное и детальное описание общей динамики расширения Вселенной от начала этого процесса и до современной эпохи.

Вопрос, который оставался нерешенным, связан, как мы говорили в гл. 1, с термодинамикой ранней Вселенной. Именно: была ли Вселенная в начале расширения горячей или холодной? Теория допускала в принципе и бесконечную (формально) температуру, и температуру, равную нулю. Г. Гамов выдвинул предположение о том, что сверхплотное вещество ранней Вселенной было также и сверхгорячим. Оно находилось в состоянии термодинамического равновесия, и при этом, в соответствии с общими законами термодинамики, вместе с веществом должно было существовать и равновесное тепловое электромагнитное излучение. По мере космологического расширения происходило охлаждение и вещества, и излучения. Вещество собиралось в сгустки, давшие начало наблюдаемым астрономическим структурам, а излучение оставалось равномерно распределенным по всему пространству и создавало, таким образом, общий фон электромагнитных волн во Вселенной.

Предсказать температуру фонового излучения удалось на основании анализа ядерных превращений, происходивших при высоких плотностях и температурах в исходном веществе Вселенной в первые минуты после начала расширения. В итоге этих превращений возникло наблюдаемое соотношение между самыми распространенными элементами — водородом и гелием (более тяжелые элементы формируются при термоядерном синтезе в недрах звезд и при их взрывах). Доля гелия зависит от соотношения между плотностью и температурой вещества в эпоху ядерных реакций; на основе теории Фридмана можно выразить это соотношение через характеристики современного состояния мира и, зная хотя бы ориентировочно современную плотность вещества, указать ожидаемую современную температуру излучения. С учетом известных неопределенностей это позволило оценить температуру реликтового фона в пределах от 2 до 10 К. Действительная температура, 2,7 К, лежит внутри этого теоретически предсказанного интервала.

Один из «побочных» результатов теории горячей Вселенной — предсказание вместе с фоном реликтовых фотонов еще и фона реликтовых нейтрино. В сверхплотном и сверхгорячем начальном состоянии Вселенной в термо-

динамическом равновесии с веществом и излучением должен был существовать и газ нейтрино, причем концентрация нейтрино (и антинейтрино) приближалась к числу электромагнитных квантов в единице объема. Это их соотношение почти точно сохранялось и в ходе дальнейшей эволюции Вселенной вплоть до современной эпохи. Следует ожидать, что концентрация нейтрино составляет сейчас 350 частиц в кубическом сантиметре. Если масса покоя нейтрино равна нулю, то, подобно реликтовым фотонам, реликтовые нейтрино должны быть равномерно рассеяны по всему пространству. При отличной от нуля массе покоя нейтрино образуют, вероятно, невидимые короны галактик. В последнем случае указанная здесь концентрация нейтрино должна пониматься как усредненная по всему пространству.

При массе покоя  $m_\nu = 30 \text{ эВ} = 4,8 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 5,3 \cdot 10^{-35} \text{ кг}$ , о которой сообщают московские экспериментаторы, средняя плотность, связанная с нейтрино, составила бы  $\rho_\nu \approx 10^{-26} \text{ кг/м}^3$ , что заметно превосходит плотность светящегося вещества звезд и галактик. Если существование массы покоя нейтрино будет надежно доказано, это приведет к заключению, что Вселенная состоит главным образом из нейтрино, а все остальные частицы — лишь небольшая по массе примесь.

Предсказание и открытие реликтового излучения — крупнейшее достижение физики и астрономии. По своему значению оно стоит рядом с предсказанием и открытием расширения Вселенной. Обнаружение реликтового излучения создало надежную основу для теоретической реконструкции прошлого Вселенной, ее эволюции на протяжении предшествующих 18 млрд. лет. Это обширная, богатая идеями область современной науки. Мы не будем здесь углубляться в нее; подробное и доступное изложение читатель может найти в книгах С. Вайнберга «Первые три минуты» (М.: Энергоиздат, 1981) и И. Д. Новикова «Эволюция Вселенной» (М.: Наука, 1979).

Расскажем о новых астрономических открытиях, сделанных с помощью наблюдений реликтового излучения.

### Новый эфир

Космологическая модель Фридмана обладает максимальной пространственной симметрией — все точки и все направления в пространстве равноправны, т. е. пространство Вселенной однородно и изотропно. Симметрия

представляла собой исходную гипотезу, на которой строились все дальнейшие выводы теории и прежде всего вывод о нестационарности Вселенной как целого.

Гипотеза симметрии подтверждается астрономическими данными о распределении и движении вещества во Вселенной. Вещество заполняет Вселенную в среднем равномерно, однородно. Вместе с тем закон разбегания галактик, закон Хаббла  $v=HR$  ( $v$  — относительная скорость галактик,  $R$  — их относительное расстояние) указывает на изотропию космологического расширения, ибо коэффициент пропорциональности  $H$  не зависит от направления на галактику.

Согласно общей теории относительности пространство, однородно заполненное веществом, и само должно быть однородным. Точно так же изотропия движения вещества влечет за собой изотропию самого пространства.

(Изотропия представляет собой симметрию более высокую, чем однородность. В геометрии доказано, что условие изотропии пространства автоматически означает и его однородность. Однородность же возможна, вообще говоря, не только в изотропном, но и в анизотропном пространстве, т. е. в пространстве, в котором имеются выделенные или предпочтительные направления.)

С открытием реликтового излучения изотропия мира получила необычайное по силе подтверждение. Потоки реликтовых фотонов приходят изотропно, равномерно со всех сторон. Точность, с которой устанавливается одинаковость потоков по всем направлениям, не хуже десятых или даже сотых долей процента. Иными словами, если какие-то отклонения от изотропии (кроме тех, что не связаны с ним самим — см. ниже) и имеются, относительная величина соответствующих вариаций потока не превышает значения  $3 \cdot 10^{-3}$  или даже  $3 \cdot 10^{-4}$ .

Для сравнения нужно сказать, что изотропия хаббловского разбегания галактик установлена с погрешностью лишь до 20—30%.

Реликтовое излучение, равномерно заполняющее всю Вселенную, служит как бы мировым эфиром — идеальной всепроникающей системой отсчета, охватывающей всю Вселенную.

Эфир старой физики был придуман в XVIII веке, чтобы избежать относительности движения и покоя: абсолютный покой — это покой по отношению к эфиру, а абсолютное движение — это движение по отношению к эфиру, сквозь него. Эфиру приписывались свойства полной про-



нищаемости и вместе с тем упругости, чтобы, например, электромагнитные волны можно было понимать как упругие колебания эфира. Такого эфира в природе не существует: покой и равномерное прямолинейное движение всегда относительны, а электромагнитные волны могут распространяться и в полном вакууме.

Реликтовое излучение не отменяет относительности движения и покоя; ему не нужно приписывать и никаких особых, специально для него придумываемых свойств. Это совокупность давно известных самих по себе электромагнитных волн, распространяющихся равномерно во всех направлениях. Но свойство универсальности у этого нового эфира есть: он пронизывает всю Вселенную. Конечно, таким же свойством универсальности обладает и общее распределение галактик, оно тоже может служить мировой системой отсчета. Разница, однако, в том, что точность измерений в системе реликтового фона гораздо выше, и это реально позволяет использовать его для тонких наблюдений, которые прежде не были возможны.

Одно из таких наблюдений — наблюдение собственного движения Земли. Если Земля движется относительно реликтового излучения, то по эффекту Доплера это должно увеличивать частоту реликтовых квантов (и уменьшать длину волны) навстречу такому движению и уменьшать частоту (и увеличивать длину волны) в обратном направлении. В этом случае применима общая формула для эффекта Доплера:

$$1 + z = \frac{1 - (v/c) \cos \vartheta}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

в которой красное смещение,  $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$ , выражается через длину волны в системе реликтового фона  $\lambda_0$  и принимаемую длину волны  $\lambda$ . Под скоростью  $v$  нужно понимать теперь скорость нашего движения относительно реликтового фона. Угол  $\vartheta$  — угол между направлением движения и осью антенны радиотелескопа. Когда скорость мала по сравнению со скоростью света  $(v/c)^2 \ll 1$ , можно пользоваться приближенным соотношением

$$z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 = (\omega_0 - \omega)/\omega \approx (v/c) \cos \vartheta.$$

Красному смещению подвергаются волны всех частот; в частности, изменяется частота, на которую приходится максимум в спектре излучения

$$\omega_m = \omega_{0m} \frac{1}{1 + (v/c) \cos \vartheta} \approx \omega_0 [1 - (v/c) \cos \vartheta].$$

(Считая, что  $(v/c)^2 \ll 1$ ,  $z \ll 1$ ,  $(v/c) \cos \theta \ll 1$ , мы применили здесь одну из известных формул приближенного вычисления.) Частота  $\omega_m$  связана с температурой реликтового излучения общей формулой:  $\omega_m = 2,8 kT_0/\hbar$ . Здесь  $T_0$  — температура в системе отсчета реликтового фона. В системе отсчета, связанной с Землей, имеем тогда

$$\omega_m = 2,8 \frac{k}{\hbar} T_0 [1 - (v/c) \cos \theta].$$

Частоте  $\omega_m$  тоже можно сопоставить определенную температуру, связанную с ней общей формулой  $\omega_m = 2,8 kT/\hbar$ . Но в таком случае температура  $T$  принимаемого излучения зависит от угла  $\theta$ , т. е. от направления движения Земли:

$$T = T_0 [1 - (v/c) \cos \theta].$$

Можно сказать, что встречные кванты немного горячее, а догоняющие — немного холоднее. Относительное изменение температуры,

$$\Delta T/T = (T - T_0)/T_0 = - (v/c) \cos \theta,$$

максимально по амплитуде, когда ось антенны совпадает по направлению со скоростью Земли, оно равно нулю при поперечной к скорости ориентации антенны и меняется между этими значениями по закону косинуса.

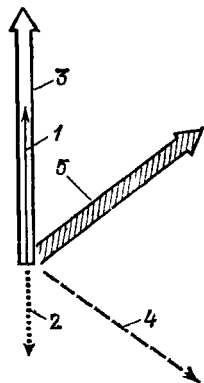
В ряде экспериментов, проделанных недавно — на высотных самолетах и баллонах, «косинусоидальная анизотропия» реликтового фона была действительно найдена. В направлении на созвездие Льва температура фона оказалась на 0,13% выше, чем в поперечном к нему направлении; в противоположном направлении она на столько же ниже. Такой амплитуде отвечает скорость 390 км/с. С учетом сообщаемых наблюдателями погрешностей измерений, нужно написать  $v = 390 \pm 60$  км/с. Это и есть скорость движения Земли относительно реликтового фона.

Она близка к скорости обращения Солнца вокруг центра Галактики,  $v_0 = 220 - 250$  км/с (скорость движения Земли вокруг Солнца, 30 км/с, много ниже ее). Но по направлению скорости  $v$  и  $v_0$  почти в точности противоположны. Значит, центр Галактики (и Галактика как целое) имеет относительно реликтового излучения скорость около 600 км/с. С другой стороны, известно, что скорость Галактики относительно всей совокупности галактик, заключенных в объеме радиусом 100 Мпк вокруг нас, оценивается в 400—500 км/с. Однако — как это ни

удивительно — направление этой скорости составляет угол  $\approx 120^\circ$  к направлению движения Земли относительно реликтового фона (рис. 39).

Выходит, что из измерений движения Земли относительно реликтового фона следует вывод о движении большой совокупности галактик со скоростью 500—600 км/с относительно нового эфира. То, что такая большая масса имсет столь быстрое движение, оказалось неожиданностью. Прежде считалось, что центр этой массы должен

Рис. 39. Движение Земли, Галактики и группы окружающих нас галактик. 1 — скорость Земли относительно реликтового фона; 2 — скорость Земли (и Солнца) относительно центра Галактики; 3 — скорость центра Галактики относительно реликтового фона; 4 — скорость центра Галактики относительно группы близких галактик; 5 — скорость центра масс группы галактик относительно реликтового фона. Рисунок упрощен: в действительности векторы скоростей не находятся в одной плоскости, а векторы 1 и 2 не лежат строго вдоль одной прямой.



скорее почти покоиться относительно всего распределения галактик во Вселенной, а следовательно, и относительно реликтового фона.

Нужно заметить, что скорости хаббловского движения дальних галактик в объеме с размером  $\approx 100$  Мпк составляют от 3500 до 6500 км/с, так что движение центра масс объема со скоростью  $\approx 500$ —600 км/с не изменяет вывод об изотропном разбегании галактик — по крайней мере с той погрешностью (20—30%), с какой его вообще удастся установить.

### Эффект Зельдовича — Сюняева

Фотоны реликтового фона достигают антенн земных радиотелескопов, преодолев большие расстояния, и на их пути может встретиться такое препятствие, как горячий межгалактический газ в скоплениях галактик. В некоторых богатых скоплениях масса газа сравнима с массой звезд, а его температура достигает ста миллионов градусов.

Горячий газ скоплений ионизован, и фотоны взаимодействуют с ним, рассеиваясь на электронах. Темпера-

тура реликтового излучения много ниже температуры газа, и потому в результате рассеяния холодные фотоны будут разогреваться, забирая часть энергии у горячих электронов\*). Фотоны, прошедшие сквозь скопления, окажутся теплее и все их распределение сдвинется в область более высоких частот. На частоте наблюдения — например, в метровом и сантиметровом радиодиапазоне — это вызовет снижение потока реликтовых квантов. Так в направлении на крупное скопление галактик может возникнуть «темное пятно» в реликтовом фоне.

В 1978—1984 гг. этот эффект наблюдался в очень крупных скоплениях, богатых горячим газом. Его предсказали теоретически за несколько лет до того Я. Б. Зельдович и Р. А. Сюняев; согласно их оценкам, подтвержденным наблюдениями, относительное ослабление потока реликтовых квантов от «темных пятен» составляет около одной десятой процента.

Не будь горячий межгалактический газ открыт раньше по рентгеновскому излучению, его заметили бы по «темным пятнам» в реликтовом фоне.

### Большие числа

Согласно теории горячей Вселенной, отношение числа реликтовых фотонов к числу барионов,  $n_\gamma/n \approx 10^9$  есть величина, не менявшаяся в течение всего времени космологического расширения (за исключением только самых первых мгновений). Это большое число представляет собою (безразмерную) константу, характеризующую Вселенную в целом. Почему это число именно такое, а не иное?

Ответа на этот вопрос сейчас нет. Но физика горячей Вселенной позволяет установить, что в очень ранние моменты космологического расширения температура вещества и фотонов была столь велика, что тепловая энергия частицы или кванта превышала энергию покоя бариона:  $kT \gg mc^2$ . При таких условиях в среде должны были существовать пары барионов и антибарионов. Число таких пар в единице объема, по общим термодинамическим законам, приблизительно равно числу фотонов в единице объема.

---

\*) Это уже упоминавшийся нами «обратный» эффект Комптона.

Это означает, что Вселенная на самых ранних стадиях своего расширения содержала вещество и антивещество. По мере расширения, которое сопровождалось охлаждением среды, пары барионов и антибарионов аннигилировали и уже больше не рождались, когда температура стала ниже значения  $mc^2/k$ . Но эти частицы не исчезли вовсе: на каждые миллиард или десять миллиардов барион-антибарионных пар выживал один барион. Отсюда и возникло большое космологическое число  $n_r/\bar{n}$ .

Существовал ли очень малый избыток барионов над антибарионами «с самого начала», так что оставшиеся барионы просто не нашли себе компаньонов-античастиц, чтобы аннигилировать? А может быть, Вселенная начала свою эволюцию из состояния, в котором число барионов строго равно числу антибарионов? В последнем случае сохранение части (хотя и очень малой) барионов означало бы, что барионы — в силу своих внутренних свойств — обладают каким-то преимуществом над антибарионами, которое и позволило им выжить.

Теория не может пока сделать выбор между этими возможностями. Но объяснение большого космологического числа  $n_r/\bar{n}$  нужно несомненно искать в пограничной области физики между космологией и физикой элементарных частиц. Вернее, в новой области науки, в которой физика элементарных частиц и физика ранней Вселенной с разных сторон приближаются к пониманию фундаментальных свойств природы. Процессы в сверхплотном и сверхгорячем веществе в первые мгновения космологического «Большого Взрыва» — это узел, который связывает самые малые объекты физики — элементарные частицы — и самый крупный ее объект — Вселенную — как целое.

Связь между астрофизикой и физикой микромира так или иначе возникала почти во всех главах этой книги. От свойств взаимодействия нейтронов зависит предельная масса нейтронных звезд. Решение вопроса о массе покоя нейтрино — если оно будет положительным — должно пролить свет на состав корон галактик и среднюю плотность Вселенной.

О роли фундаментальных физических констант, таких как гравитационная постоянная  $G$ , скорость света  $c$ , постоянная Планка  $\hbar$  и др., стоит сказать особо. Оказывается, что некоторые астрофизические величины могут быть выражены через комбинации фундаментальных констант. Так, типичная светимость звезд главной последовательно-

сти близка к выражению

$$L = \frac{m_e c^2}{\hbar} \left( \frac{Gm_p}{\hbar c} \right)^{-1/2} \approx 10^{27} \text{ Вт.}$$

(Здесь  $m_e$ ,  $m_p$  — массы электрона и протона.)

Диаметр галактик, таких, например, как наша Галактика, близок к величине

$$D = \frac{e^2}{Gm_p^2} \cdot \frac{e^2}{\hbar c} \cdot \frac{e^2}{m_e c^2} \left( \frac{m_p}{m_e} \right)^2 \approx 10^{21} \text{ м.}$$

( $e$  — заряд электрона.)

Масса скоплений галактик, таких, например, как скопление Кома, не слишком отличается от величины

$$M = m_p \left( \frac{e^2}{Gm_p^2} \right)^2 \approx 10^{16} M_{\odot}.$$

Примеров такого рода можно привести немало. Чаще всего эти соотношения получаются не просто подбором и подгонкой тех или иных комбинаций констант, а следуют из определенных физических соображений.

Но этим «игра констант» (выражение А. Эддингтона) еще отнюдь не ограничивается. И. Л. Розенталь в нашей стране, Б. Картер в США, другие физики и астрономы обнаружили, что важны не только приближенные соотношения, устанавливающие связи между микроскопическими и астрофизическими величинами, но и точные значения самих фундаментальных констант, к которым исключительно чувствительны некоторые очень важные характеристики атомов, звезд, галактик. Расчеты показывают, что изменение одной из констант  $\hbar$ ,  $c$ ,  $e$ , образующих безразмерное число  $e^2/\hbar c = 1/137$  (так называемая постоянная тонкой структуры) приблизительно на один процент в одну сторону привело бы к тому, что все звезды стали бы красными, а такое же изменение в другую сторону сделало бы все звезды голубыми. В обоих случаях существование Солнца исключено.

Очень сильно зависят от числовых значений физических констант скорости ядерных реакций, играющих ключевую роль в ряде астрофизических явлений. И даже само устойчивое существование сложных ядер и атомов возможно, как оказывается, лишь при не слишком больших вариациях констант. Почему физические константы имеют именно эти, а не другие числовые значения? На этот вопрос пока нет ответа. Но будь их значения хотя бы

немного другими, физический мир оказался бы катастрофически иным.

Универсальные физические законы действуют в пространственных масштабах от размера элементарной частицы,  $r \approx 10^{-15}$  м, до радиуса наблюдаемой Вселенной,  $R \approx 10^{25}$  м. Временная шкала физических процессов простирается от минимального времени жизни элементарных частиц, называемых резонансами,  $\tau \approx 10^{-23}$  с, до возраста Вселенной  $t \approx 10^{17}$  с. Безразмерные отношения  $R/r \approx 10^{40}$ ,  $t/\tau \approx 10^{40}$  представляют собою большие числа, совпадающие по порядку величины.

На совпадения больших чисел обращал внимание еще в 30-е годы П. Дирак, один из классиков физической науки XX века. Он заметил, что большим числом измеряется также отношение электрической силы, действующей между электроном и протоном, к гравитационной силе между ними:

$$\frac{e^2}{Gm_e m_p} \approx 10^{40}.$$

(Обе силы одинаково зависят от расстояния, поэтому их отношение расстояния не содержит.)

Дирак предположил, что большие числа имеют одинаковый порядок не случайно и их совпадение отражает глубинные связи мира элементарных частиц со Вселенной в целом. Но каковы в действительности эти связи, что за ними скрывается, откуда они происходят, — об этом будет, пожалуй, очень нелегко узнать. Возможно, в этом состоит самая грандиозная задача физики будущего.