

существующую распространённость всех элементов их синтезом в самом начале расширения Вселенной были несостоятельными. Если строго следовать Г. В. т., то в результате ядерных реакций в начале расширения образуется только водород и гелий, примесь др. лёгких элементов незначительна, а тяжёлые элементы практически совсем не образуются. Однако с открытием, что время расширения Вселенной превышает 10 млрд. лет, стало возможным объяснить распространённость тяжёлых элементов их *нуклеосинтезом* в звёздах.

В начале расширения Вселенной при большой темп-ре в термодинамич. равновесии с веществом должно было находиться эл.-магн. излучение. В ходе расширения вещество и излучение остывают, и к настоящему времени во Вселенной должно существовать низкотемпературное излучение (его наз. *микроволновым фооновым излучением* или реликтовым излучением), для к-рого вещество сегодняшней Вселенной практически прозрачно. Существование во Вселенной такого излучения, имеющего темп-ру всего неск. кельвинов, было предсказано Г. Гамовым (1956).

В 1964 А. Г. Дорошкевич и И. Д. Новиков впервые рассчитали широкий спектр плотности эл.-магн. излучения от всех источников в эволюционирующей Вселенной (включая радиогалактики и звёзды) и показали, что в области сантиметровых и миллиметровых волн интенсивность реликтового излучения с темп-рой ок. 1 К и выше будет на много порядков превосходить излучение отдельных источников, и оно может быть обнаружено. Реликтовое излучение (РИ) было открыто А. Пензиасом (A. Penzias) и Р. Вильсоном (R. Wilson) в 1965 на длине волны 7,3 см. Обнаружение РИ стало решающим тестом, подтвердившим справедливость гипотезы о высокой изначальной темп-ре Вселенной. Тщательные последующие наблюдения показали, что РИ действительно является равновесным, как предсказывает теория, и имеет темп-ру  $T \approx 2,7$  К. Совр. количество фотонов РИ в ед. объёма  $N_\gamma = 500 \text{ см}^{-3}$ , а тяжёлых частиц (*барионов*, гл. обр. протонов)  $N_b$  примерно  $10^{-8} \text{ см}^{-3}$ . Отношение  $s = N_\gamma/N_b \approx 10^9$  почти не меняется с расширением Вселенной и характеризует уд. *энтропию Вселенной*, к-рая оказывается весьма большой. Плотность массы реликтового излучения сегодня  $\rho_\gamma = e_\gamma c^{-2} N_\gamma \approx 5 \cdot 10^{-34} \text{ г/см}^3$  ( $e_\gamma \approx 10^{-13}$  эрг — ср. энергия одного фотона) много меньше плотности массы обычного в-ва  $\rho_b = m_b N_b \approx 10^{-30} \text{ г/см}^3$  ( $m_b \approx 10^{-24}$  г — масса протона):  $\rho_\gamma/\rho_b \approx 5 \cdot 10^{-4}$ . В прошлом РИ преобладало над веществом не только по числу частиц, но и по массе. Действительно, с расширением Вселенной энергия каждого кванта убывает пропорционально его частоте из-за *красного смещения*, т. е. пропорционально увеличению пространств. масштабов. Отсюда следует, что в прошлом при плотности вещества  $\rho_b \approx 10^{-20} \text{ г/см}^3$  плотность излучения равнялась плотности вещества ( $\rho_\gamma = \rho_b \approx 10^{-20} \text{ г/см}^3$ ), а частота излучения соответствовала диапазону видимого света. Для более раннего периода  $\rho_\gamma > \rho_b$ . Поэтому при анализе динамики расширения Вселенной в ранние эпохи можно пренебречь «примесью» обычного вещества, входящего в наше время в состав галактик, звёзд, планет.

Закон падения темп-ры во Вселенной для ранней эпохи её расширения (в пределах неск. лет или сотен лет после начала расширения) записывается в виде  $T = 10^{10} t^{-1/2}$ . Здесь время  $t$  (в секундах) отсчитывается от того момента, когда плотность материи равна (формально) бесконечности (т. н. сингулярное состояние и е). Физ. процессы при  $T > 10^{13}$  К и плотностях  $\rho > 10^{18} \text{ г/см}^3$  ещё недостаточно хорошо изучены совр. физикой и выводы о процессах в этих условиях не могут считаться надёжными. Однако процессы при  $T < 10^{13}$  К можно рассматривать с полной уверенностью.

При очень больших плотностях и темп-рах все процессы взаимодействия частиц происходят чрезвычайно

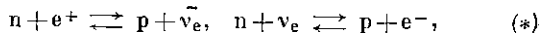
быстро, гораздо быстрее изменения физ. условий вследствие расширения Вселенной, и поэтому имеется полное термодинамич. равновесие между всеми сортами частиц (и их античастиц), к-рые могут рождаться при энергиях, соответствующих данной темп-ре.

При  $T \approx 10^{13}$  К в равновесии находятся барионы и антибарионы, разные сорта *мезонов* и их античастиц, *мюоны* электроны ( $e^-$ ) и их античастицы, все сорта *нейтрино* и антинейтрино, фотоны.

Быстрые превращения одних частиц в другие поддерживают равновесие, количество частиц разных сортов примерно одинаково. С уменьшением темп-ры при расширении у взаимодействующих частиц уже не хватает энергии для рождения новых тяжёлых частиц, и эти частицы, сталкиваясь со своими античастицами, аннигилируют («вымирают»). При  $t \approx 10^{-6}$  с начинают вымирать барионы, затем мезоны и мюоны. После вымирания барионов и антибарионов остаётся небольшое количество барионов ( $\sim 10^{-6}$  от исходного числа), т. к. с самого начала, согласно теории, их было несколько больше, чем антибарионов. Из этих барионов и образовались позднее все небесные тела. Иная судьба у частиц с нулевой (или очень малой) массой покоя. Такими частицами являются все сорта нейтрино и антинейтрино. При охлаждении и уменьшении скорости реакций наступает момент, когда реакции с соответствующими частицами перестают протекать и частицы становятся свободными, т. е. Вселенная для них оказывается практически прозрачной. Так, при  $t \approx 0,01$  с свободными становятся мюонные нейтрино  $\nu_\mu$ , при  $t \approx 0,3$  с — электронные нейтрино  $\nu_e$ . Важно подчеркнуть, что и после освобождения частицы продолжают «остывать», уменьшать свою энергию вследствие расширения Вселенной. Это происходит потому, что свободно летящая частица переходит из одного объёма вещества в другой, удаляющейся от первого. Поэтому частица имеет относительно второго объёма меньшую энергию, чем была её энергия относительно первого объёма, и т. д. При  $t \approx 10$  с вымирают электронно-позитронные пары (они превращаются в фотоны). После этого во Вселенной остаются нейтрино и антинейтрино всех сортов, фотоны и небольшая примесь обычного вещества (одна миллиардная доля по числу частиц) в виде *плазмы* (смеси барионов и электронов).

К сегодняшнему моменту реликтовые фотоны остыли и имеют, согласно наблюдениям, темп-ру  $T \approx 2,7$  К. Помимо реликтовых фотонов сегодня должны существовать реликтовые нейтрино с темп-рой несколько ниже, чем у фотонов ( $T \approx 2$  К). Более высокая темп-ра фотонов по сравнению с нейтрино объясняется тем, что пары ( $e^-$ ,  $e^+$ ), превратившись в фотоны, добавили свою энергию к энергии фотонов. Прямое наблюдение реликтовых нейтрино пока невозможно.

Для дальнейшей эволюции Вселенной важны физ. процессы, протекающие в веществе, из к-рого впоследствии образуются галактики, звёзды, планеты. При  $T \approx 2 \cdot 10^{10}$  К барионы существуют в виде протонов  $p$  и нейтронов  $n$ . Эти частицы быстро превращаются друг в друга под влиянием окружающих энергичных частиц ( $e^-$ ,  $e^+$  и  $\nu_e$ ,  $\bar{\nu}_e$ ):



и устанавливается термодинамич. равновесие между количеством нейтронов и протонов. Отношение числа нейтронов к числу протонов в ед. объёма в равновесии

$$N_n/N_p = \exp(-\Delta mc^2/kT),$$

где  $\Delta m$  — разность масс нейтрона и протона. При  $t$  порядка неск. секунд реакции (\*) практически прекращаются, и отношение числа нейтронов к общему числу барионов ( $N_p + N_n$ ) в ед. объёма «застывает» на значении  $N_n/(N_p + N_n) \approx 0,15$ . С дальнейшим понижением  $T$ , через неск. минут после начала расширения, начинают интенсивно протекать ядерные реакции объединения