

Несмотря на быстрое расширение Вселенной на ранних стадиях, взаимодействие и взаимопревращение релятивистских частиц носит квазиравновесный характер. Равновесие процесса, характеризуемого сечением σ , при концентрации взаимодействующих частиц n на фоне расширения с характерным временем $a/\dot{a} = 1/H(t)$ определяется выполнением условия (Г. А. Гамов)

$$n\sigma c > H(t). \quad (12.47)$$

Когда в ходе расширения характерное время взаимодействия частиц из-за понижения концентрации превысит характерное время расширения, $\tau \sim 1/(n\sigma c) > t$, частицы становятся свободными, невзаимодействующими. Например, для нейтрино это условие начинает выполняться уже при $t \sim 0.2$ с. Для гравитонов равновесие с веществом вообще не успевает наступить, поэтому реликтовый фон гравитационных волн определяется исключительно условиями в начале расширения.

Заметим, что для любых тяжелых частиц с массой покоя m_x можно найти эпоху расширения, когда они были релятивистскими, $kT > m_x c^2$.

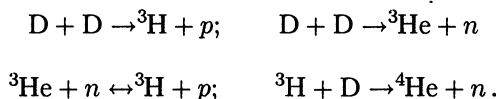
12.10. Первичный нуклеосинтез («первые три минуты»)

При температурах $T > 1$ МэВ сложные атомные ядра существовать не могли, т. к. они эффективно разрушались при столкновениях с фотонами, электронами и позитронами. Вместо них существовали лишь свободные протоны и нейтроны (а еще раньше — кварки и антикварки, из которых и образовались устойчивые барионы). По мере расширения Вселенной и снижения температуры ($T \sim t^{-1/2}$) концентрация нейтронов уменьшалась в соответствии с распределением Больцмана в равновесном газе:

$$n_n/n_p \sim \exp(-\Delta mc^2/kT), \quad (12.48)$$

где разность масс покоя нейтрона и протона $\Delta mc^2 = 1.293$ МэВ. Равновесие обуславливалось реакциями слабого взаимодействия. Если бы термодинамическое равновесие поддерживалось по мере остывания и дальше, то, очевидно, концентрация нейтронов экспоненциально стремилась бы к нулю, и ни о каком нуклеосинтезе не

могло быть и речи. Однако остывание приводит к нарушению равновесия при такой температуре ($T_f \simeq 0.7$ МэВ), при которой отношение концентраций протонов и нейтронов «застывает» (англ. *freeze*) на значении 0.19. Нейтроны соединяются с протонами с образованием ядер дейтерия $n + p \rightarrow D + \gamma$, а энергии и концентрации фотонов уже недостаточно для разрушения образовавшихся ядер дейтерия. Происходит накопление ядер и идут дальнейшие реакции:



Дальше реакции не идут, т. к. в природе нет устойчивых химических элементов с атомным номером 5, а концентрация ядер He еще слишком низка, чтобы могли эффективно идти реакции ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be}$, ${}^3\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$. Из-за расширения Вселенной эпоха первичного нуклеосинтеза завершается к моменту $t \sim 200$ с. Важнейший параметр расчетов относительного содержания первичных элементов — удельная энтропия $1/\eta$ (определяемая как n_γ/n_b — отношение концентраций фотонов и барионов), которая не меняется в ходе расширения. Эта величина также может быть выражена через относительную плотность барионов Ω_b и современное значение параметра Хаббла h_{100} (12.44). Для этих параметров, полученных из современных наблюдений, первичный химический состав дозвездного вещества предсказывается в теории горячей Вселенной состоящим из H(75%), ${}^4\text{He}$ (25%) — по массе и D($3 \cdot 10^{-5}$), ${}^3\text{He}$ ($2 \cdot 10^{-5}$), ${}^7\text{Li}$ (10^{-9}) — по числу атомов относительно водорода (см. рис. 12.9). Эти цифры хорошо согласуются с существующими определениями химсостава вещества на больших красных смещениях по линиям поглощения в спектрах квазаров и в галактиках, где еще не произошла эволюция газовой среды.

Замечательно, что измерения первичного химсостава (особенно первичного дейтерия по УФ линии $\lambda = 972.272 \text{ \AA}$)⁵, налагают независимые ограничения на плотность барионного вещества во Вселенной:

$$0.01 < \Omega_b < 0.04 \quad (12.49)$$

⁵Обилие первичного дейтерия наиболее чувствительно к плотности барионов: чем больше плотность, тем быстрее дейтерий вступит в дальнейшие реакции и тем меньше его относительное содержание; в звездах дейтерий быстро превращается в более тяжелые элементы.

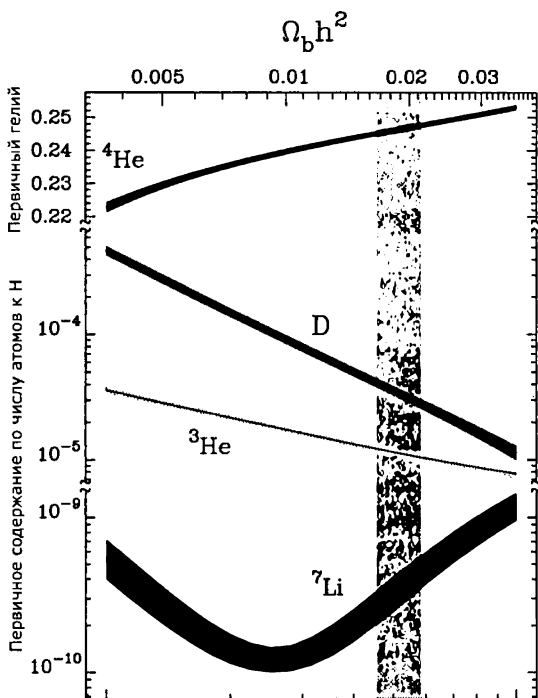


Рис. 12.9. Расчет химического содержания ядер легких элементов, образовавшихся в результате первичного нуклеосинтеза (для ^4He — процент массы по отношению к массе водорода, для других элементов — число ядер по отношению к числу протонов), как функция плотности барionного вещества $\Omega_b h^2$. Вертикальная полоса соответствует наблюдениям содержания легких элементов по спектрам далеких квазаров.

(сюда включена неопределенность в современном значении постоянной Хаббла). Вклад светящегося вещества (звезды, газ) по результатам наблюдений составляет $\Omega_b \simeq 0.005$. Отсюда следует важный вывод: во Вселенной должно существовать невидимое барионное вещество, масса которого существенно превышает массу непосредственно наблюдаемого вещества. Большая часть барионного вещества, по-видимому, сосредоточена в межгалактическом газе. Напомним, что из независимых соображений (рост первичных возмущений, формирование крупномасштабной структуры Вселенной) делается вывод о необходимости присутствия еще и *небарионной скрытой массы*.