

2. Образование протона

В настоящее время известно 118 химических элементов, которые образовывались на различных этапах эволюции Вселенной. На рис. 2.1 показана распространенность химических элементов во Вселенной, полученные на основе анализа химического состава Земли, Луны, метеоритов, межзвездной пыли и газа, спектров излучения звезд. Наиболее распространенным химическим элементом является водород. Он составляет $\approx 90\%$ всех атомных ядер во Вселенной (по количеству ядер). На втором месте — гелий. Его процентное содержание $\approx 10\%$. Все остальные атомные ядра ($Z \geq 3$) в сумме составляют $\approx 1\%$.

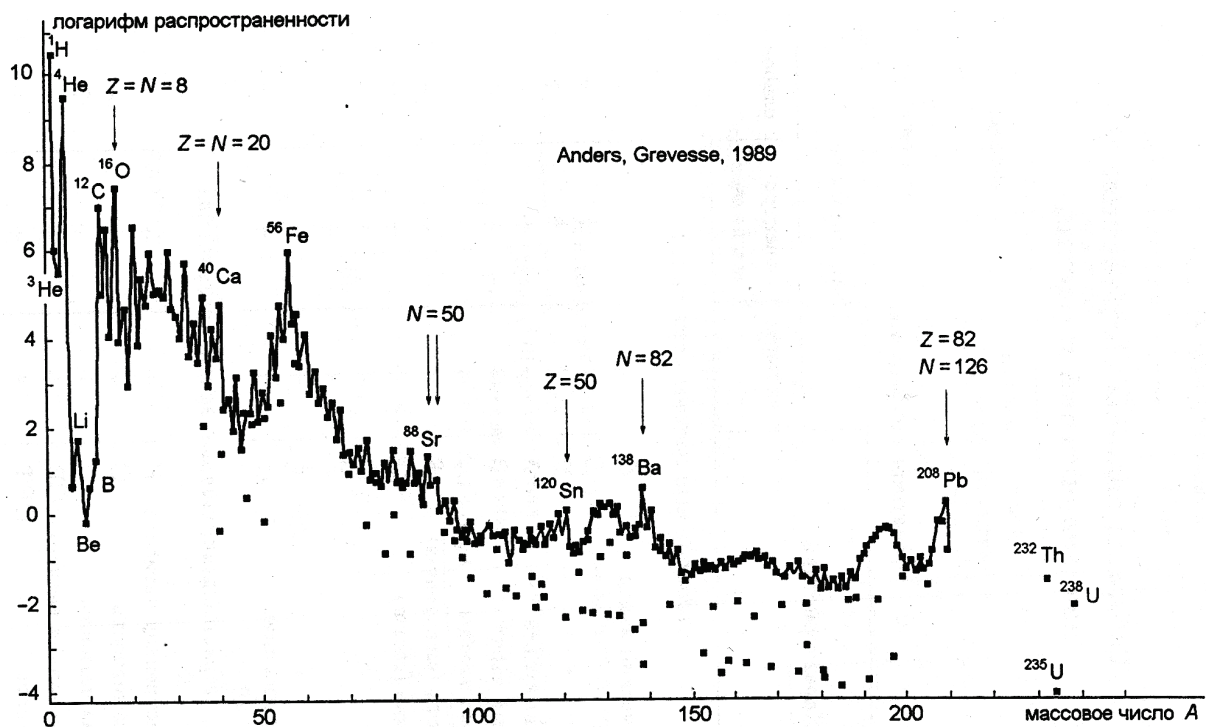


Рис. 2.1. Распространенность химических элементов.

Как образовался водород и почему его так много во Вселенной?

В настоящее время основной космологической моделью, описывающей рождение и эволюцию Вселенной, является модель Большого взрыва. Согласно этой модели Вселенная родилась $\approx 13,7$ млрд лет назад. При рождении Вселенной вещество было сконцентрировано в очень малом объеме и имело огромную плотность, температуру и давление. По мере расширения Вселенной происходило уменьшение плотности вещества Вселенной и уменьшение ее температуры. Если за начальный момент времени взять момент Большого взрыва, то изменение плотности вещества ρ и температуры T описывается соотношениями

$$\rho\left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right) \approx \frac{5 \cdot 10^5}{t^2(\text{с})}, \quad T(\text{К}) \approx \frac{10^{10}}{\sqrt{t(\text{с})}}.$$

Средняя энергия частиц E и расстояние между ними r описываются соотношениями

$$E (\text{ГэВ}) = 10^{-13} T (\text{К}), \quad r (\text{см}) = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{E (\text{ГэВ})}.$$

Догалактические этапы эволюции Вселенной приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Догалактические этапы эволюции Вселенной

Время после Большого взрыва	Характерные температуры, К	Характерные расстояния, см	Этап/Событие
10^{-43} с	10^{32}	10^{-33}	Планковский момент. Отделение гравитационного взаимодействия
$10^{-43} - 10^{-36}$ с	$10^{32} - 10^{28}$	$10^{-33} - 10^{-29}$	Великое объединение электро-слабого и сильного взаимодействий
10^{-36} с	10^{28}	10^{-29}	Конец Великого объединения. Разделение сильного и электро-слабого взаимодействий
10^{-10} с	10^{15}	10^{-16}	Конец электрослабого объединения
10^{-6} с	10^{13}	10^{-14}	Кварк-адронный фазовый переход
$10^{-10} - 10^{-4}$ с	$10^{15} - 10^{12}$	$10^{-16} - 10^{-13}$	Адронная эра. Рождение и аннигиляция адронов и лептонов
$10^{-4} - 10$ с	$10^{12} - 10^{10}$	$10^{-13} - 10^{-10}$	Лептонная эра. Рождение и аннигиляция лептонов
$10^2 - 10^3$ с	$\approx 10^9$	$10^{-10} - 10^{-9}$	Дозвёздный синтез гелия
10 с - - $40\,000$ лет	$10^{10} - 10^4$	$10^{-10} - 10^{-5}$	Радиационная эра. Доминирование излучения над веществом
$40\,000$ лет	10^4	10^{-5}	Начало эры вещества. Вещество начинает доминировать над излучением
$400\,000$ лет	$3 \cdot 10^3$	10^{-4}	Образование атомов. Разделение вещества и излучения (Вселенная прозрачна для излучения)

Современные космологические теории рассматривают эволюцию Вселенной, начиная с *планковского момента* t_{Pl} после Большого взрыва:

$$t_{Pl} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} = 5.4 \cdot 10^{-44} \text{ с.} \quad (2.1)$$

Планковский момент отвечает «планковским условиям» – *планковским энергиям* частиц

$$E_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} = 1,2 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ,}$$

планковской температуре (10^{32} К), характерным расстояниям между частицами, равным *планковской длине*

$$r_{Pl} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} = 10^{-33} \text{ см,}$$

и *планковской плотности*

$$\rho_{Pl} \approx 10^{94} \text{ г/см}^3.$$

Диаметр Вселенной в этот момент был всего несколько микрон. Квантовые флуктуации при $t < 10^{-43}$ с могли стать причиной возникновения крупномасштабной структуры Вселенной.

Сразу после планковского момента ($t > t_{Pl}$) единое поле распалось и от него отделилось гравитационное взаимодействие. Интервал 10^{-43} – 10^{-36} с соответствует эпохе *Великого объединения* трёх взаимодействий – слабого, электромагнитного и сильного. Момент 10^{-36} с отвечает концу Великого объединения. При этом отделяется сильное взаимодействие. Конец Великого объединения наступает при $T \approx 10^{28}$ К, характерных энергиях частиц 10^{15} ГэВ и масштабах расстояний 10^{-29} см.

Составляющими Вселенной в рассматриваемый период времени (10^{-43} – 10^{-36} с) были все известные фундаментальные частицы, включая их гипотетических суперпартнёров. В конце Великого объединения переносчиками сил Великого объединения были X - и Y -бозоны. При $t = 10^{-10}$ с нарушается электрослабая симметрия и происходит разделение электромагнитного и слабого взаимодействий. Концу электрослабого объединения соответствует $T = 10^{15}$ К, энергии частиц ≈ 100 ГэВ, масштабы расстояний 10^{-16} см. За счёт аннигиляции и распада X - и Y -бозоны и их античастицы при $t > 10^{-36}$ с исчезают.

Вначале вещество имело столь высокую температуру, что кварки не могли объединиться в адроны, так как высокая тепловая энергия вновь разрушала их. К 10^{-6} с Вселенная охладилась настолько ($T = 10^{13}$ К), что

стало возможным слияние кварков в адроны. Произошёл *кварк-адронный фазовый переход* с образованием адронов и антиадронов, интенсивно взаимодействующих между собой.

Помимо распадов частиц основными процессами, идущими на самых ранних этапах горячей Вселенной, являются рождение γ -квантами пар частица-античастица и аннигиляция этих пар, вновь приводящая к образованию γ -квантов. В состоянии термодинамического равновесия плотность частиц и античастиц близка к плотности γ -квантов.

$$\text{частицы} + \text{античастицы} \Leftrightarrow \gamma\text{-кванты.}$$

В этот период Вселенная была непрозрачна для γ -квантов и реакции образования пар частица-античастица шли с высокой скоростью.

С началом образования из кварков адронов энергии γ -квантов были достаточны для рождения адронов (антиадронов). Этот период эволюции Вселенной — *эра адронов*. Она начинается примерно при $t = 10^{-10}$ с и заканчивается к 10^{-4} с. Конец адронной эры наступает тогда, когда энергия излучения становится меньше энергии покоя самого лёгкого адрона — π -мезона.

В таблицах 2.2 и 2.3 приведены некоторые барионы и мезоны, из которых состояло вещество во Вселенной.

По мере охлаждения Вселенной происходит распад и аннигиляция барионов и антибарионов, мезонов. В конечном итоге образуются две стабильные частицы протон и нейтрон, т.к. среднее время жизни нейтрона ≈ 886 сек гораздо больше описываемого интервала времени $\ll 1$ сек.

В условиях дальнейшего падения температуры и давления, когда рождение пар адрон-антиадрон уже невозможно, а их аннигиляция и распад продолжались, происходило быстрое уменьшение числа адронов. Уменьшение числа адронов (антиадронов) привело к повышению числа лёгких частиц — лептонов, являющихся продуктами распада адронов. На этом этапе энергия фотонов была ещё достаточна для рождения пар лептон-антилептон. Этот период называют *лептонной эрой*:

$$\text{адроны} + \text{антиадроны} \rightarrow \gamma\text{-кванты} \Leftrightarrow \text{лептоны} + \text{антилептоны.}$$

Вселенная в этот период, помимо фотонов, состояла из лептонов (антилептонов) — в основном электронов (позитронов), нейтрино (антинейтрино) и небольшого количества легчайших барионов — протонов и нейтронов, оставшихся после адронной эры. Лептонная эра завершается примерно к десятой секунде, когда температура падает до 10^{10} К и энергии фотонов становятся недостаточными для рождения пары самых лёгких заряженных лептонов — e^-e^+ .

Некоторые барионы

Частица	Кварковая структура	Масса mc^2 , МэВ	Время жизни τ (сек) или ширина Γ	Спин-четность, изоспин $J^P(I)$	Основные моды распада
p	uud	938.27	$>10^{32}$ лет	$1/2^+(1/2)$	$p\bar{e}\bar{\nu}$ $p\pi^-, n\pi^0$ $p\pi^0, n\pi^+$ $\Lambda\gamma$ $n\pi^-$ $\Lambda\pi^0$ $\Lambda\pi^-$
n	udd	939.57	885.7 ± 0.8	$1/2^+(1/2)$	
Λ	uds	1116	$2.6\cdot 10^{-10}$	$1/2^+(0)$	
Σ^+	uus	1189	$0.80\cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	
Σ^0	uds	1193	$7.4\cdot 10^{-20}$	$1/2^+(1)$	
Σ^-	dds	1197	$1.5\cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	
Ξ^0	uss	1315	$2.9\cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	
Ξ^-	dss	1321	$1.6\cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	
Δ^{++} Δ^+ Δ^0 Δ^-	uuu uud udd ddd	1230-1234	115-125 МэВ	$3/2^+(3/2)$	$(n \text{ или } p) + \pi$
$\Sigma(1385)^+$ $\Sigma(1385)^0$ $\Sigma(1385)^-$	uus uds dds	1383 1384 1387	36 МэВ 36 МэВ 39 МэВ	$3/2^+(1)$	$\Lambda\pi, \Sigma\pi$
$\Xi(1530)^0$ $\Xi(1530)^-$	uss dss	1532 1535	9.1 МэВ 9.9 МэВ	$3/2^+(1/2)$	$\Xi\pi$
Ω^-	sss	1672	$0.82\cdot 10^{-10}$	$3/2^+(0)$	$\Lambda K^-, \Xi^0 \pi^-$
$N(1440)^+$ $N(1440)^0$	uud udd	1430-1470	250-450 МэВ	$1/2^+(1/2)$	$n(p)+\pi(2\pi),$ $\Delta\pi$
$N(1520)^+$ $N(1520)^0$	uud udd	1515-1530	110-135 МэВ	$3/2^-(1/2)$	$n(p)+\pi(2\pi),$ $\Delta\pi$
Λ_c^+	udc	2285	$2.0\cdot 10^{-13}$	$1/2^+(0)$	$(n \text{ или } p)+др.$
$\Sigma_c(2455)^{++}$ $\Sigma_c(2455)^+$ $\Sigma_c(2455)^0$	uuc udc ddc	2453 2451 2452	2.2 МэВ < 4.6 МэВ 2.2 МэВ	$1/2^+(1)$	$\Lambda_c^+ \pi$

Таблица 2.3

Некоторые мезоны

Частица	Кварковая структура	Масса, mc^2 , МэВ	Время жизни τ (сек) или ширина Γ	Спин-четность, изоспин $J^P (I)$	Основные моды распада
π^+	$u\bar{d}$	139.57	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1)$	$\nu\mu^+$
π^-	$d\bar{u}$	139.57	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1)$	$\bar{\nu}\mu^-$
π^0	$u\bar{u} - d\bar{d}$	134.98	$8.4 \cdot 10^{-17}$	$0^-(1)$	2γ
K^+	$u\bar{s}$	494	$1.2 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1/2)$	$\nu\mu^+, \pi^0 \pi^+$
K^-	$s\bar{u}$	494	$1.2 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1/2)$	$\bar{\nu}\mu^-, \pi^0 \pi^-$
K^0	$d\bar{s}$	498	$\left\{ \begin{array}{l} 8.9 \cdot 10^{-11} K_S^0 \\ 5.2 \cdot 10^{-8} K_L^0 \end{array} \right.$	$0^-(1/2)$	$\pi^+ \pi^-, \pi^0 \pi^0$
\bar{K}^0	$s\bar{d}$	498		$0^-(1/2)$	$\pi e \nu, \pi \mu \nu, 3\pi$
η	$u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}$	548	1.29 кэВ	$0^-(0)$	$2\gamma, 3\pi$
η'		958	0.20 МэВ	$0^-(0)$	$\eta 2\pi, \rho^0 \gamma$
ρ^+	$u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}$	776	150 МэВ	$1^-(1)$	$\pi\pi$
ρ^-	$u\bar{d}$	776	150 МэВ	$1^-(1)$	$\pi\pi$
ρ^0	$d\bar{u}$	776	150 МэВ	$1^-(1)$	$\pi\pi$
ω	$u\bar{u} - d\bar{d}$	783	8.5 МэВ	$1^-(0)$	3π
ϕ	$u\bar{u} + d\bar{d}$	1019	4.3 МэВ	$1^-(0)$	$K^+ K^-, K_L^0 K_S^0$
D^+	$s\bar{s}$	1869	$1.0 \cdot 10^{-12}$	$0^-(1/2)$	$K+\text{др.}, e+\text{др.}, \mu+\text{др.}$
D^-	$c\bar{d}$	1869	$1.0 \cdot 10^{-12}$	$0^-(1/2)$	$K+\text{др.}, e+\text{др.}, \mu+\text{др.}$
D^0	$d\bar{c}$	1865	$4.1 \cdot 10^{-13}$	$0^-(1/2)$	$K+\text{др.}, e+\text{др.}, \mu+\text{др.}$
\bar{D}^0	$c\bar{u}$	1865	$4.1 \cdot 10^{-13}$	$0^-(1/2)$	$K+\text{др.}, e+\text{др.}, \mu+\text{др.}$
D_S^+	$u\bar{c}$	1968	$4.9 \cdot 10^{-13}$	$0^-(0)$	$K+\text{др.}$
D_S^-	$c\bar{s}$	1968	$4.9 \cdot 10^{-13}$	$0^-(0)$	$K+\text{др.}$
B^+	$s\bar{c}$	5279	$1.7 \cdot 10^{-12}$	$0^-(1/2)$	$D+\text{др.}, D^*+\text{др.}, \nu+\text{др.}$
B^-	$u\bar{b}$	5279	$1.7 \cdot 10^{-12}$	$0^-(1/2)$	$D+\text{др.}, D^*+\text{др.}, \nu+\text{др.}$
B^0	$b\bar{u}$	5279	$1.5 \cdot 10^{-12}$	$0^-(1/2)$	$D+\text{др.}, D^*+\text{др.}, \nu+\text{др.}$
\bar{B}^0	$d\bar{b}$	5279	$1.5 \cdot 10^{-12}$	$0^-(1/2)$	$D+\text{др.}, D^*+\text{др.}, \nu+\text{др.}$
J/ψ	$b\bar{d}$	3097	91 кэВ	$1^-(0)$	адроны, $2e, 2\mu$
Υ	$c\bar{c}$	9460	53 кэВ	$1^-(0)$	$\tau^+ \tau^-, \mu^+ \mu^-, e^+ e^-$
	$b\bar{b}$				

Основные характеристики лептонов (электронов, мюонов, таонов) и трех типов нейтрино (электронного, мюонного, таонного) приведены в таблицах 2.4–2.9.

Таблица 2.4

Основные характеристики электрона

<i>Характеристика</i>	<i>Численное значение</i>
Спин J, \hbar	1/2
Масса $m_e c^2$, МэВ	0.51099892±0.00000004
Электрический заряд, Кулон	$-(1.60217653 \pm 0.00000014) \cdot 10^{-19}$
Магнитный момент, $e\hbar/2m_e c$	1.001159652187±0.000000000004
Время жизни τ , лет	$> 4.6 \cdot 10^{26}$
Лептонное число L_e	+1
Лептонные числа L_μ, L_τ	0

Таблица 2.5

Основные характеристики мюона

<i>Характеристика</i>	<i>Численное значение</i>
Спин J, \hbar	1/2
Масса $m_\mu c^2$, МэВ	105.658369±0.000009
Электрический заряд	Равен заряду электрона
Магнитный момент, $e\hbar/2m_\mu c$	1.0011659160±0.0000000006
Время жизни, сек	$(2.19703 \pm 0.00004) \cdot 10^{-6}$
Лептонное число L_μ	+1
Лептонные числа L_e, L_τ	0

Таблица 2.6

Основные характеристики тау-лептона

<i>Характеристика</i>	<i>Численное значение</i>
Спин J, \hbar	1/2
Масса $m_\tau c^2$, МэВ	1776.99±0.28
Электрический заряд	Равен заряду электрона
Магнитный момент, $e\hbar/2m_\tau c$	1±0.06
Время жизни, сек	$(2.906 \pm 0.011) \cdot 10^{-13}$
Лептонное число L_τ	+1
Лептонные числа L_e, L_μ	0

Таблица 2.7

Основные характеристики электронного антинейтрино

<i>Характеристика</i>	<i>Численное значение</i>
Спин J, \hbar	1/2
Масса $m_{\bar{\nu}}c^2$, эВ	< 3
Электрический заряд, Кулон	0
Магнитный момент, $e\hbar/2m_e c$	< 10^{-10}
Время жизни / Масса, сек/эВ	> $7 \cdot 10^9$ (солнечные нейтрино) > 300 (реакторные нейтрино)
Лептонное число L_e	-1
Лептонные числа L_μ, L_τ	0

Таблица 2.8

Основные характеристики мюонного нейтрино

<i>Характеристика</i>	<i>Численное значение</i>
Спин J, \hbar	1/2
Масса $m_{\nu_\mu}c^2$, МэВ	< 0.19
Электрический заряд	0
Магнитный момент, $e\hbar/2m_e c$	< $6.8 \cdot 10^{-10}$
Время жизни/Масса, сек/эВ	> 15.4
Лептонное число L_μ	+1
Лептонные числа L_e, L_τ	0

Таблица 2.9

Основные характеристики тау-нейтрино

<i>Характеристика</i>	<i>Численное значение</i>
Спин J, \hbar	1/2
Масса $m_{\nu_\tau}c^2$, МэВ	< 18.2
Электрический заряд	0
Магнитный момент, $e\hbar/2m_e c$	< $3.9 \cdot 10^{-7}$
Время жизни	не измерено
Лептонное число L_τ	+1
Лептонные числа L_e, L_μ	0

Условия для космологического нуклеосинтеза возникли во Вселенной примерно через минуту после Большого взрыва. К этому моменту Вселенная «остыла» до температуры $T \approx 10^9$ К. Она состояла в основном из фотонов, электронов (позитронов), нейтрино (антинейтрино) и сравнительно небольшого количества легчайших барионов – протонов и нейтронов, оставшихся после объединения кварков в адроны. Более тяжёлые и короткоживущие адроны к моменту начала космологического нуклеосинтеза распались, и их доля по массе в барионной материи упала до 10^{-3} . Во Вселенной практически не осталось и антибарионов (соотношение антивещества и вещества не превышало 10^{-4}).

Протоны и нейтроны ранней Вселенной явились тем материалом, из которого в дальнейшем возникли атомные ядра различных химических элементов. Доля этих протонов и нейтронов в общей массе Вселенной составляет 4–5%. При температурах $T \gg 10^{10}$ К (и кинетических энергиях $\gg 1$ МэВ) нейтроны и протоны благодаря реакциям слабого взаимодействия



переходили друг в друга и находились в состоянии термодинамического равновесия. В этом состоянии вероятность образования нейтрона или протона с энергией E описывается распределением Гиббса:

$$W = Ae^{-E/kT}.$$

В условиях термодинамического равновесия соотношение между числом нейтронов и протонов будет определяться разностью масс нейтрона и протона:

$$\frac{n_n}{n_p} = \frac{e^{-E_n/kT}}{e^{-E_p/kT}} = e^{-(m_n - m_p)c^2/kT} = e^{-1.29 \text{ МэВ}/kT} \text{ (МэВ)}.$$

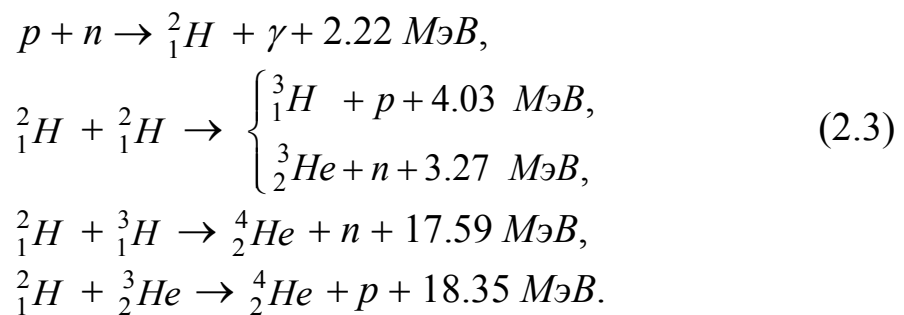
Во Вселенной в этот период существовали только протоны и нейтроны.

Скорость протекания реакций слабого взаимодействия (2.2) зависит от температуры и плотности. По мере расширения и остывания Вселенной она достигает такого состояния, когда снижающаяся скорость реакций (2.2) уже не в состоянии поддерживать равновесие

между нейтронами и протонами (скорость слабых процессов становится меньше скорости расширения Вселенной). Этот момент наступает примерно через 2 с после Большого взрыва при $T \approx 10^{10}$ К, когда средние кинетические энергии частиц уменьшились до 1 МэВ. Равновесное отношение концентраций нейтронов и протонов n_n/n_p уменьшилось к этому моменту до $\approx 1/6$ и до начала первичного нуклеосинтеза это отношение снижалось в основном за счёт распада нейтронов.

Стартовой реакцией первичного нуклеосинтеза является реакция образования дейтерия $p + n \rightarrow {}^2_1H + \gamma + 2.22 \text{ МэВ}$. Накоплению дейтерия за счёт этой реакции препятствует интенсивное разрушение дейтерия фотонами в процессе фотодиссоциации. Энергия связи дейтерия 2.22 МэВ и, хотя средняя энергия фотонов упала ниже этой величины, в высокоэнергичном участке их спектра ещё содержится достаточное число фотонов способных разрушить дейтерий, т.к. отношение числа фотонов к числу нуклонов $n_\gamma/n_n \approx 10^9$). Начало синтеза дейтерия (и всей цепочки первичного нуклеосинтеза) задерживается примерно до 100-й секунды после Большого взрыва, когда средняя кинетическая энергия частиц падает до 0.1 МэВ. Вселенная к этому моменту остывает до 10^9 К.

Условия для синтеза более сложных легчайших ядер возникли во Вселенной примерно через минуту после Большого взрыва. При ещё достаточно высокой плотности температура снизилась настолько (10^9 К), что при столкновении протонов с нейтронами стали эффективно образовываться ядра дейтерия. Соударение двух ядер дейтерия открыло путь к возникновению гелия.



Для каждой реакции указана выделяющаяся энергия Q .

За 1–3 мин практически все нейтроны в результате цепочки реакций (2.3) оказались связанными в 4_2He . Таким образом, основное количество протонов во Вселенной образовалось в первые секунды космологического нуклеосинтеза. Небольшое изменение числа протонов во Вселенной (порядка нескольких процентов) происходило в результате

ядерных реакций в звёздах. Последовавшее вслед за этим снижение температуры и плотности Вселенной остановило реакции синтеза более тяжелых химических элементов.

По отношению к протонам ${}^4\text{He}$ образуется в 10 раз меньше, дейтерий образуется в количестве 10^{-4} – 10^{-5} , ${}^3\text{He}$ – в количестве $\approx 10^{-5}$, а ${}^7\text{Li}$ – в количестве $\approx 10^{-10}$. Изменение выхода легчайших ядер и барионной плотности на этапе космологического нуклеосинтеза показано на рис. 2.2.

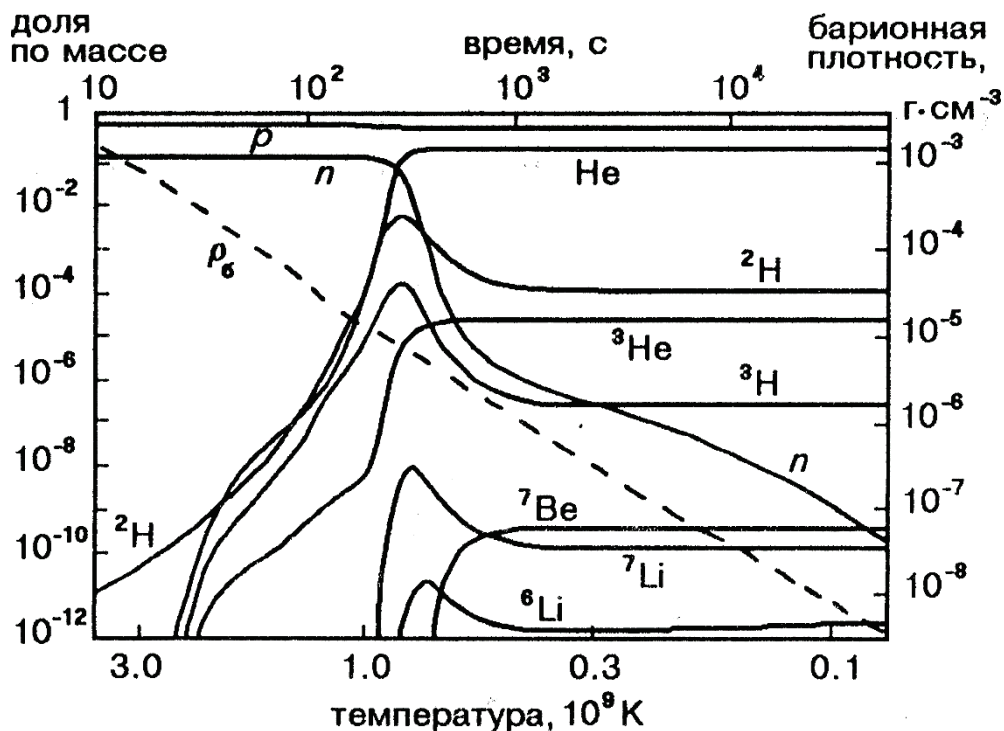


Рис. 2.2. Изменение выхода легчайших ядер и барионной плотности (штриховая линия) на этапе космологического нуклеосинтеза.