

ВВЕДЕНИЕ В КОСМОЛОГИЮ

лекция 4

Очень ранняя Вселенная ($t < 20$ мин)

- Что мы знаем о происхождении материи из наблюдений
- Барионная асимметрия и бариогенез
- Нуклеосинтез как подтверждение теории горячей Вселенной

Наблюдательные факты о материи

- Отсутствие антивещества в макроскопических масштабах
- Отношение числа фотонов к числу барионов $\sim 10^9$
- Распространённость лёгких элементов:
H – 75%; ^4He – 25%; D, ^3He $\sim 0.01\%$, ^7Li – 10^{-10}

Условия генерации избытка вещества над антивеществом:

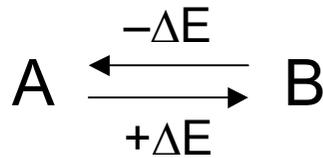
(Сахаров, 1967)

- Нарушение барионного числа B
- Нарушение CP-симметрии
- Отсутствие термодинамического равновесия
- В Стандартной модели – непертурбативным образом; также в суперсимметричных теориях
Эксперимент: распад протона
- Наблюдается в эксперименте (слабое взаимодействие) – распад нейтрального каона и B -мезонов
- Расширение и охлаждение Вселенной происходит быстрее, чем установление равновесия

ЛИБО дисбаланс присутствовал изначально

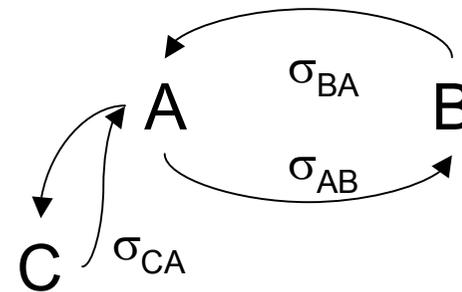
Равновесные и неравновесные процессы

Термодинамика



$$\frac{n_B}{n_A} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

Кинетика



$$\frac{dn_A}{dt} = -\sigma_{AB}n_A + \sigma_{BA}n_B + \sigma_{CA}n_C + \dots$$

$\sigma(T)$ – сечение реакции

когда все $\sigma \rightarrow 0$, A выпадает из термодинамического равновесия (decouple, freeze; «закалка»)

Горячая Вселенная



10^{-43} с	– Большой Взрыв		T
10^{-33} с	– эпоха холодной инфляции		
		рождение частиц	10^{19} эВ
	кварк-глюонная плазма		
10^{-6} с		фазовый переход	1 ГэВ
	адронная эпоха: $p \leftrightarrow n, \gamma + \text{лептоны}$		
1 с			1 МэВ
	лептонная эпоха: $p, n \rightarrow D, He, \dots$ (нуклеосинтез)		
100 с	– синтез дейтерия, затем гелия;		$T \sim 10^9$ К
	радиационно-доминированная эпоха		
380 000 лет	– рекомбинация,		$T=3000$ К

$$T \approx \frac{1.3 \text{ МэВ}}{\xi^{1/4} (t/1 \text{ с})^{1/2}}$$

ξ – число сортов частиц

Адронная эпоха: 10^{-6} — 1 с

$$T \geq 10^{13} \text{ К} = 1 \text{ ГэВ}$$

свободные кварки (кварк-глюонная плазма) \Rightarrow нуклоны (n + p)

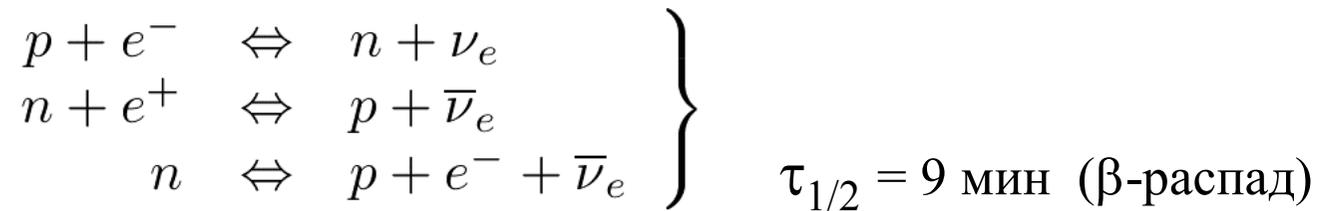
аннигиляция антинуклонов: $n + \tilde{n} \Rightarrow 2\gamma$, $p + \tilde{p} \Rightarrow 2\gamma$

$$n_{n+p} = 10^{-9} n_\gamma$$

это отношение в дальнейшем сохраняется

$n_{e^+,e^-} \sim n_\nu \sim n_\gamma$ во время всей адронной эпохи

Лептонная эпоха: 1 с — 3 мин



$$m_n - m_p = 1.3 \text{ МэВ}; \quad m_e = 0.5 \text{ МэВ}.$$

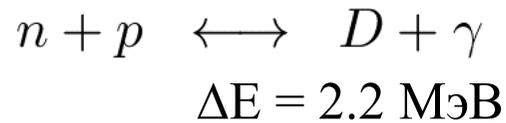
$T \sim 3 \cdot 10^{10}$ К – выход нейтрино из ТД равновесия;
сдвиг $p - n$ равновесия в сторону протонов.

$T \sim 6 \cdot 10^9$ К (0.5 МэВ) – аннигиляция $e^+ - e^-$; $T_\gamma > T_\nu$;

$T \sim 3 \cdot 10^9$ К (зависит от n_p/n_γ) – «замораживание» n_n/n_p .

$$\frac{n_n}{n_n + n_p} \approx 0.16$$

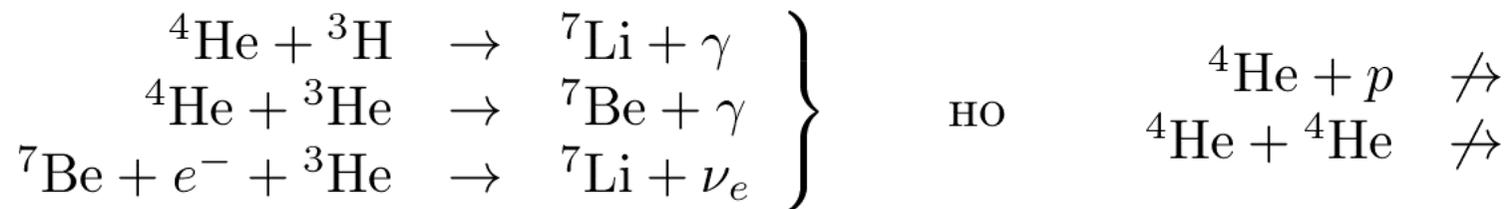
Нуклеосинтез: 3 — 20 мин



$$t \sim 100 \text{ с}; \quad n_n / (n_n + n_p) = 0.13$$



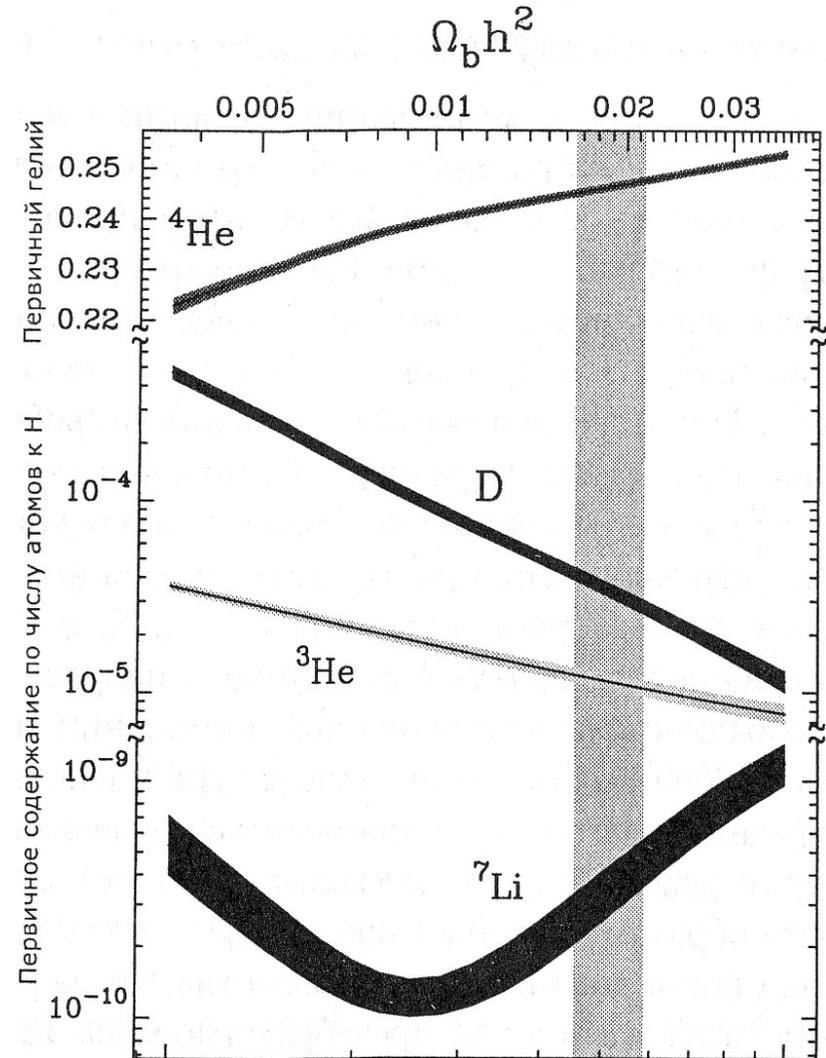
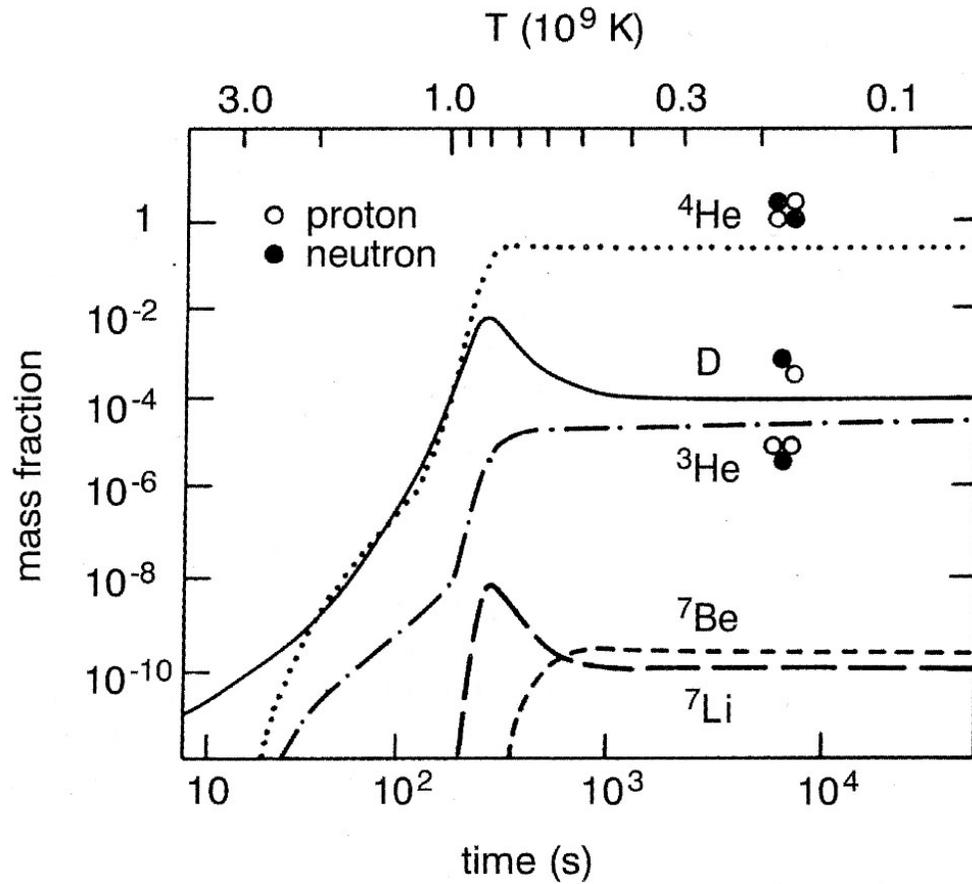
Более тяжёлые элементы:



H — 74%; ${}^4\text{He}$ — 26%; D, ${}^3\text{He}$ ~ 0.01%; ~~${}^3\text{H}$ — 10^{-7} ; ${}^7\text{Li}$ — 10^{-10}~~

$\tau_{1/2} = 12 \text{ лет}$

Нуклеосинтез: 3 — 20 мин



Зависимость обилия элементов от Ω_b

Table 12.2. Overview of the material evolution of the universe

age (s)	temperatur (K)	size (S / S ₀)	composition ^a		
			baryons	lepton	gauge bosons
$< 10^{-7}$	$> 10^{13}$	$< 2 \times 10^{-13}$	$q \bar{q}$	$\ell \bar{\ell}$	$\gamma, g, W^{\pm}, \dots$
10^{-6}	5×10^{12}	5×10^{-13}	$p \bar{p}, n \bar{n}, \dots$	$\ell \bar{\ell}$	γ, g
10^{-4}	10^{12}	3×10^{-12}	p, n	$e^- e^+, \nu \bar{\nu}$	γ, g
10^2	10^9	3×10^{-9}	p, n	$e^-, \nu \bar{\nu}$	γ, g
10^3	3×10^8	10^{-8}	${}^1H, {}^4He$	$e^-, \nu \bar{\nu}$	γ, g
$> 10^{13}$	< 3000	$> 10^{-3}$	H, He atoms	$\nu \bar{\nu}$	γ, g
4×10^{17}	3	1	galaxies	neutrino, microwave and graviton background	

^a Boldface printed particles have approximately the same density, which is about 10^9 times larger than the other particles on the same line.