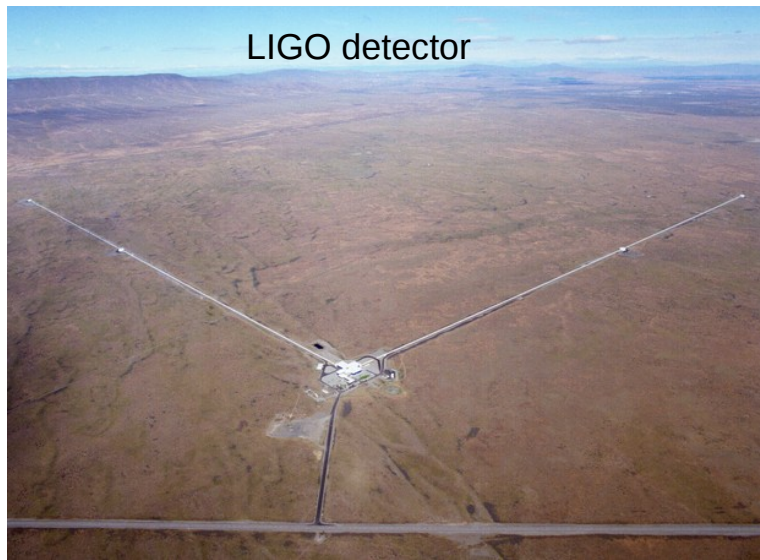
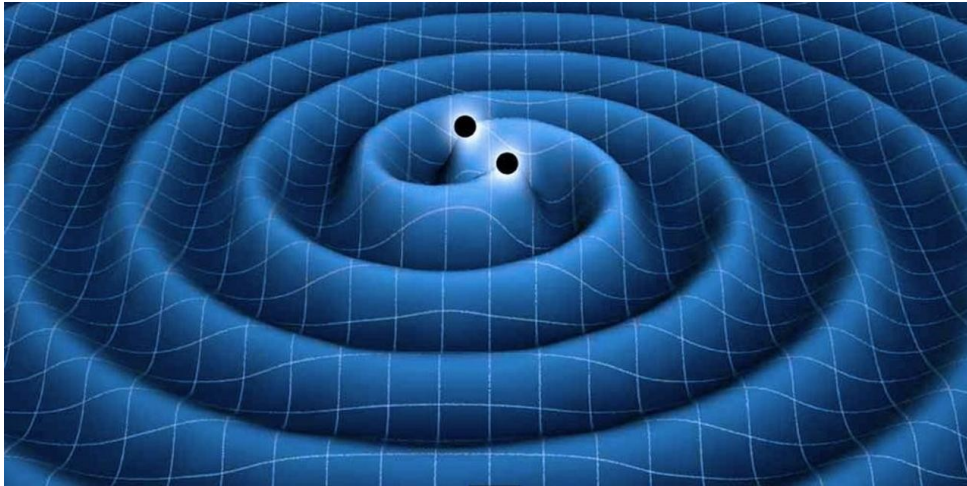


## Лекция 6

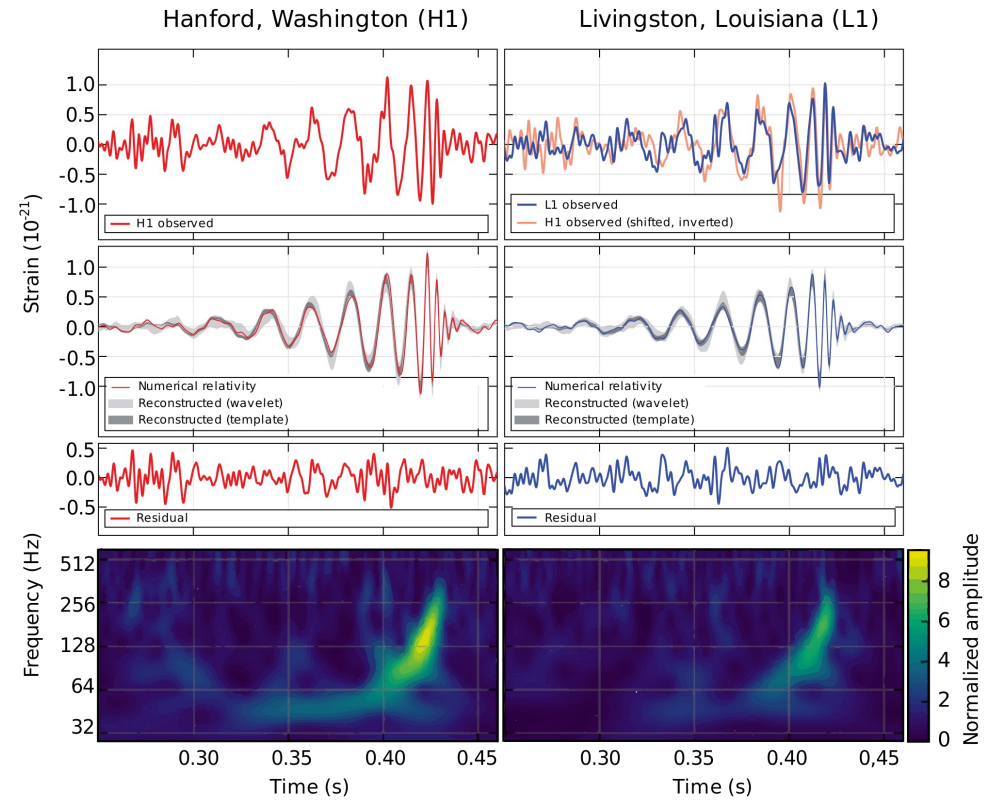
Стандартные сирены. Термодинамика Вселенной. Сохранение энтропии. Барион-фотонное отношение. Частицы стандартной модели и эффективный стат. вес. Фазовые переходы в ранней Вселенной.

«Стандартные сирены» - гравитационные сигналы от слияния черных дыр и нейтронных звезд  
(gravitational wave standard sirens)



Регистрируются наземными детекторами гравитационных волн преимущественно с расстояний  $z \sim 0.1$ , но уже до расстояний  $z \approx 0.8$ .

Wave forms



По профилю гравитационного всплеска с хорошей точностью восстанавливаются массы черных дыр и их моменты  $\Rightarrow$  абсолютная энергетика всплеска.

По замедлению колебаний восстанавливается  $z$ .

Абсолютная энергетика всплеска +  $z$  + наблюдаемая амплитуда = «стандартная сирена».

# Термодинамика (горячей) Вселенной

## Химический потенциал в равновесии

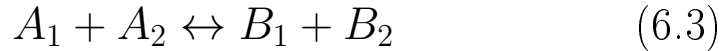
$$dE = -PdV + TdS + \sum_i \mu_i dN_i = 0 \quad (6.1)$$

Термодинамическое **И** химическое равновесие: превращение частиц много быстрее расширения Вселенной.

Равновесие и статика:

$$dV = dS = 0 \Rightarrow \sum_i \mu_i dN_i = 0 \quad (6.2)$$

Пример реакции в равновесии:



Предположим малый выход из химического равновесия,  $dN \neq 0$ :

$$\begin{aligned} \mu_{A_1} dN + \mu_{A_2} dN - \mu_{B_1} dN - \mu_{B_2} dN = 0 &\Rightarrow \\ \Rightarrow \mu_{A_1} + \mu_{A_2} = \mu_{B_1} + \mu_{B_2} &\quad (6.4) \end{aligned}$$

В общем случае:

$$\begin{aligned} A_1 + \dots + A_n \leftrightarrow B_1 + \dots + B_m &\Rightarrow \\ \Rightarrow \mu_{A_1} + \dots + \mu_{A_n} = \mu_{B_1} + \dots + \mu_{B_m} &\quad (6.5) \end{aligned}$$

Полезные следствия:

$$e + e \leftrightarrow e + e + \gamma + \dots + \gamma \Rightarrow \mu_\gamma = 0 \quad (6.6)$$

$$b + \bar{b} = 2\gamma \Rightarrow \mu_b = -\mu_{\bar{b}} \quad (6.7)$$

## Распределения Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна в импульсном представлении (идеальные газы)

Обычная запись распределений ФД и БЭ идеального газа:

$$N_i = \frac{g_i}{e^{(E_i - \mu)/T} \pm 1}; \quad \begin{array}{l} +\text{ФД} \\ -\text{БЭ} \end{array} \quad (6.8)$$

- $N_i$  – число частиц в энергетическом ящике номер  $i$  с энергией  $E_i$
- $g_i$  – число минимальных ячеек фазового пространства одной частицы в этом ящике (стат. вес ящика).

Рассматриваем объем  $V$  с однородным газом частиц. Энергетический ящик  $d\Gamma = d^3\mathbf{r}d^3\mathbf{p}$  вблизи энергии  $E$ .

Тогда

$$g_i = \frac{d\Gamma}{a} g \quad (6.9)$$

- $a$  – объем минимальной ячейки фазового пространства частицы
- $g$  – статистический вес (количество) внутренних состояний частицы (спин, спиральность)

$$dN = \frac{g}{a} \frac{d\Gamma}{e^{(E - \mu)/T} \pm 1} \quad (6.10)$$

Из кв.мех.:

$$a = h^3 = (2\pi)^3 \hbar^3 \equiv (2\pi)^3 \quad (6.11)$$

Распределение однородно внутри  $V \Rightarrow$  нет зависимости от координат и в  $d\Gamma$  можно включить весь  $V$ :

$$d\Gamma = V d^3\mathbf{p} \Rightarrow \quad (6.12)$$

$$dN = \frac{1}{(2\pi)^3} g \frac{V d^3 \mathbf{p}}{e^{[E(\mathbf{p}) - \mu]/T} \pm 1} \quad (6.13)$$

Можно переписать как плотность распределения импульса:

$$\frac{1}{V} \frac{dN}{d^3 \mathbf{p}} \equiv f(\mathbf{p}) = \frac{g}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{[E(\mathbf{p}) - \mu]/T} \pm 1} = f(E(\mathbf{p})) \quad (6.14)$$

Нормировка:

$$\int f(\mathbf{p}) d^3 \mathbf{p} = n - \text{число частиц в 1 объеме} \quad (6.15)$$

Как выражаются  $n, \rho, p$  через  $f(E)$ ?

Для частиц типа  $i \rightarrow f_i(\mathbf{p})$

$$E_i(\mathbf{p}) = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \Rightarrow E_i dE_i = p_i dp_i \quad (6.16)$$

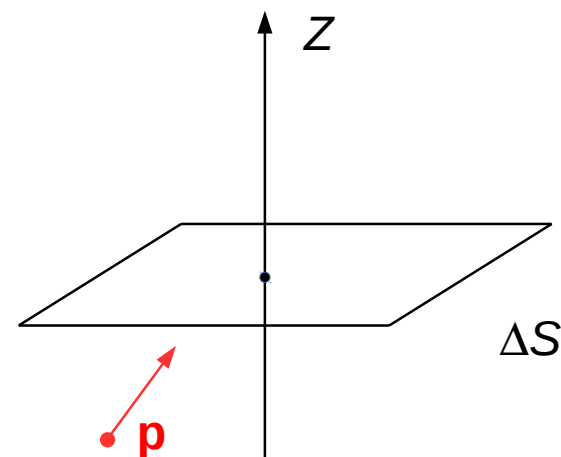
Интегрируя по углам – плотность числа частиц через распределение по энергии:

$$\begin{aligned} n_i &= \int f_i(\mathbf{p}) d^3 \mathbf{p} = \int f_i(p) 4\pi p^2 dp = \\ &= 4\pi \int f_i(E) \sqrt{E^2 - m_i^2} E dE \quad (6.17) \end{aligned}$$

Плотность энергии

$$\rho_i = \int f_i(\mathbf{p}) E(\mathbf{p}) d^3 \mathbf{p} = 4\pi \int f_i(E) \sqrt{E^2 - m_i^2} E^2 dE \quad (6.18)$$

Давление частиц типа  $i$



Количество частиц с импульсом в  $d^3 \mathbf{p}$  около  $\mathbf{p}$ , налетающих с одной стороны за  $\Delta t$ :

$$\Delta n_i = v_z f_i(\mathbf{p}) d^3 \mathbf{p} \Delta S \Delta t \quad (6.19)$$

$$p_z = \frac{mv_z}{\sqrt{1-v^2}}; \quad E = \frac{m}{\sqrt{1-v^2}}; \Rightarrow v_z = \frac{p_z}{E} \quad (6.20)$$

От одной частицы площадка получает импульс  $\Delta p_z = 2p_z \Rightarrow$

Давление есть переданный импульс через единицу площади в единицу времени ( $p_i$  слева - давление!):

$$\begin{aligned} p_i &= \int_{p_z > 0} 2p_z \frac{p_z}{E} f_i(\mathbf{p}) d^3 \mathbf{p} = \left\langle p_z^2 = \frac{1}{3} p^2, 2 \rightarrow 1 \right\rangle = \\ &= \frac{4\pi}{3} \int_0^\infty \frac{p^4 dp}{E(p)} f_i(p) = \frac{4\pi}{3} \int_0^\infty f_i(E) (E^2 - m_i^2)^{3/2} dE \quad (6.21) \end{aligned}$$

## Основные формулы:

$$f(E) = \frac{g}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{(E-\mu)/T} \pm 1} \quad (6.22)$$

$$n_i = 4\pi \int_0^\infty f_i(E) \sqrt{E^2 - m_i^2} E dE \quad (6.23)$$

$$\rho_i = 4\pi \int_0^\infty f_i(E) \sqrt{E^2 - m_i^2} E^2 dE \quad (6.24)$$

$$p_i = \frac{4\pi}{3} \int_0^\infty f_i(E) (E^2 - m_i^2)^{3/2} dE \quad (6.25)$$

## Ультрарелятивистские частицы: $T \gg m_i, \mu_i = 0$

Из (6.24):

$$\begin{aligned} \rho_i &= 4\pi \int_0^\infty \frac{g_i}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{E/T} \pm 1} E^3 dE = \\ &= \frac{g_i}{2\pi^2} T^4 \int_0^\infty \frac{z^3}{e^z \pm 1} dz \quad (6.26) \end{aligned}$$

Табличные интегралы:

$$\int_0^\infty \frac{z^{2n-1}}{e^z + 1} dz = \frac{2^{2n-1} - 1}{2n} \pi^{2n} B_n \quad (6.27)$$

$$\int_0^\infty \frac{z^{2n-1}}{e^z - 1} dz = \frac{(2\pi)^{2n}}{4n} B_n \quad (6.28)$$

$$B_1 = \frac{1}{6}, \quad B_2 = \frac{1}{30}, \quad B_3 = \frac{1}{42} \quad (6.29)$$

$n = 2 \Rightarrow$

$$\int_0^\infty \frac{z^3}{e^z + 1} dz = \frac{7}{4} \pi^4 \frac{1}{30} \quad (6.30)$$

$$\int_0^\infty \frac{z^3}{e^z - 1} dz = 2\pi^4 \frac{1}{30} \quad (6.31)$$

Объемная формула Стефана-Больцмана для УР-частиц типа  $i$ :

$$\rho_i = \begin{cases} \frac{7}{8} g_i \frac{\pi^2}{30} T^4 & \text{— Ферми-Дирак} \\ g_i \frac{\pi^2}{30} T^4 & \text{— Бозе-Эйнштейн} \end{cases} \quad (6.32)$$

Если все УР частицы имеют одинаковую температуру  $T$ , то

$$\rho = g_* \frac{\pi^2}{30} T^4 \quad (6.33)$$

$$g_* = \sum_{\text{бозоны}} g_i + \frac{7}{8} \sum_{\text{фермионы}} g_i \quad (6.34)$$

$g_*$  – эффективное число степеней свободы (стат.вес).

Давление

Из (6.25):

$$p_i = \frac{4\pi}{3} \int_0^\infty \frac{g_i}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{E/T} \pm 1} E^3 dE = \frac{\rho_i}{3} \quad (\text{см. (6.26)}) \quad (6.35)$$

Для УР вещества всегда  $p = \rho/3$ .

Плотность числа частиц

$$n_i = 4\pi \int \frac{g_i}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{E/T} \pm 1} E^2 dE = \frac{g_i}{2\pi^2} T^3 \int_0^\infty \frac{z^2}{e^z \pm 1} dz \quad (6.36)$$

Табличные интегралы:

$$\int_0^\infty \frac{z^{x-1}}{e^z + 1} = (1 - 2^{1-x}) \Gamma(x) \zeta(x) \quad (6.37)$$

$$\int_0^\infty \frac{z^{x-1}}{e^z - 1} = \Gamma(x) \zeta(x) \quad (6.38)$$

$$\zeta(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^x} \quad (6.39)$$

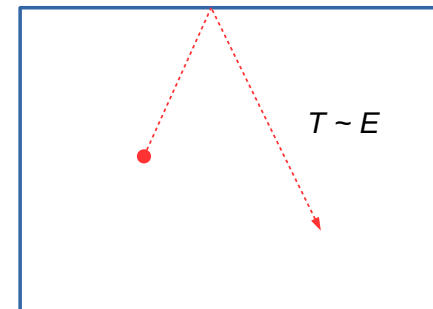
$x$	$\zeta(x)$
3	1.202
5	1.037
3/2	2.612
5/2	1.341

$$\begin{aligned} \Gamma(n) &= (n-1)! \\ \Gamma(1/2) &= \sqrt{\pi} \\ \Gamma(x+1) &= x\Gamma(x) \end{aligned} \quad (6.40)$$

$x = 3 \Rightarrow$

$$n_i = \begin{cases} g_i \frac{3\zeta(3)}{4\pi^2} T^3 & \text{– Ферми-Дирак} \\ g_i \frac{\zeta(3)}{\pi^2} T^3 & \text{– Бозе-Эйнштейн} \end{cases} \quad (6.41)$$

Частица в ящике: частица одна, а температура сколь угодно высокая? Где ошибка?



А есть ли тепловое (химическое) равновесие?

Характерное время расширения:

$$1/t_H \sim H(t) \quad (6.42)$$

Электромагнитное взаимодействие:

$$\sigma \propto \alpha^2 \Rightarrow 1/t_{em} \sim \alpha^2 T \quad (6.43)$$

Из (5.98):

$$H(T) = \frac{T^2}{M_{Pl}^*}; \quad M_{Pl}^* = M_{Pl} \sqrt{\frac{90}{8\pi^3 g_*}} = \frac{1}{1.66\sqrt{g_*}} M_{Pl} \quad (6.44)$$

Нужно:

$$t_{em} \ll t_H \Rightarrow 1/t_{em} \gg H(t) \quad (6.45)$$

$$\alpha^2 T \gg \frac{T^2}{M_{Pl}^*} \Rightarrow T \ll \alpha^2 M_{Pl}^* \sim 10^{14} \text{ ГэВ} \quad (6.46)$$

Тепловое равновесие для ЭМ взаимодействия хорошо работает для  $T \lesssim 10^{12} \text{ ГэВ}$

$$f(E) = \frac{g}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{(E-\mu)/T} \pm 1}$$

$$n_i = 4\pi \int_0^\infty f_i(E) \sqrt{E^2 - m_i^2} E dE$$

$$\rho_i = 4\pi \int_0^\infty f_i(E) \sqrt{E^2 - m_i^2} E^2 dE$$

$$p_i = \frac{4\pi}{3} \int_0^\infty f_i(E) (E^2 - m_i^2)^{3/2} dE$$

**Нерелятивистский газ**  
(распределение Больцмана)

$$m_i \gg T, \quad m_i - \mu_i \gg T \Rightarrow e^{(E-\mu_i)/T} \gg 1 \quad (6.47)$$

$$f_B(p) = g_i \frac{1}{(2\pi)^3} e^{-[E(p)-\mu_i]/T} \quad (6.48)$$

$$f_B(p) = g_i \frac{1}{(2\pi)^3} e^{(\mu_i - m_i)/T} e^{-p^2/(2m_i T)} \quad (6.49)$$

$$\begin{aligned} n_i &= \int f_B(\mathbf{p}) d^3\mathbf{p} = \int_0^\infty f_B(p) 4\pi p^2 dp = \\ &= 4\pi \frac{g_i}{(2\pi)^3} e^{(\mu_i - m_i)/T} \int_0^\infty p^2 e^{-p^2/(2m_i T)} dp = \\ &= \int_0^\infty x^2 e^{-x^2} dx = \sqrt{\pi}/4 \int_0^\infty = \\ &= g_i e^{(\mu_i - m_i)/T} \left( \frac{m_i T}{2\pi} \right)^{3/2} \end{aligned} \quad (6.50)$$

Больцмановский газ:

$$n_i = g_i e^{(\mu_i - m_i)/T} \left( \frac{m_i T}{2\pi} \right)^{3/2} \quad (6.51)$$

$$\rho_i = m_i n_i + \frac{3}{2} n_i T \quad \star \quad (6.52)$$

$$p = \frac{1}{3} n \langle \mathbf{v}\mathbf{p} \rangle \Rightarrow \left\langle E_k = \frac{3}{2} T \right\rangle \Rightarrow p_i = n_i T \ll \rho_i \quad (6.53)$$

## Энтропия во Вселенной

$$dE = TdS - pdV + \sum_i \mu_i dN_i \quad (6.54)$$

Будем считать  $dE$  в расчете на 1 тип частиц.  
Для плотностей:

$$\rho = \frac{E}{V}, \quad n = \frac{N}{V}, \quad s = \frac{S}{V} \quad (6.55)$$

$$dE = \rho dV + V d\rho \quad (6.56)$$

$$dN = n dV + V dn \quad (6.57)$$

$$dS = s dV + V ds \quad (6.58)$$

Из (6.54), (6.56)–(6.58):

$$(Ts - p - \rho + \mu n)dV + (Tds - d\rho + \mu dn)V = 0 \quad (6.59)$$

Применяем (6.59) к области постоянного (единичного) объема внутри системы.  $dV = 0 \Rightarrow$

$$d\rho = Tds + \mu dn \quad (6.60)$$

Это соотношение между локальными величинами выполняется всегда (в равновесии).

Подставляем (6.60) в (6.59) и применяем к произвольной системе переменного объема:

$$\boxed{s = \frac{p + \rho - \mu n}{T}} \quad (6.61)$$

УР газ,  $\mu$  мало

$$s_i = \frac{p_i + \rho_i}{T} \quad (6.62)$$

$$\rho_i = \begin{cases} \frac{7}{8} g_i \frac{\pi^2}{30} T^4 & - \text{ФД} \\ g_i \frac{\pi^2}{30} T^4 & - \text{БЭ} \end{cases}; \quad p_i = \frac{1}{3} \rho_i \quad (6.63)$$

$$\boxed{s_i = \frac{4\rho_i}{3T} = \begin{cases} \frac{7}{8} g_i \frac{4\pi^2}{90} T^3 & - \text{ФД} \\ g_i \frac{4\pi^2}{90} T^3 & - \text{БЭ} \end{cases}} \quad (6.64)$$

$$n_i = \begin{cases} g_i \frac{3\zeta(3)}{4\pi^2} T^3 & - \text{Ферми-Дирак} \\ g_i \frac{\zeta(3)}{\pi^2} T^3 & - \text{Бозе-Эйнштейн} \end{cases} \quad (6.65)$$

$$s_i = \begin{cases} \frac{7}{8} \frac{16\pi^4}{270\zeta(3)} n_i = 4.2 n_i & - \text{ФД} \\ \frac{4\pi^4}{90\zeta(3)} = 3.6 n_i & - \text{БЭ} \end{cases} \quad (6.66)$$

$$\boxed{s_i \sim n_i} \quad (6.67)$$

Полная плотность энтропии УР газа

$$s = g_* \frac{4\pi^2}{90} T^3, \quad g_* = \frac{7}{8} \sum_{ferm} g_i + \sum_{bos} g_i \quad (6.68)$$



$$\rho_i = m_i n_i + \frac{3}{2} n_i T \quad (6.69)$$

$$p_i = n_i T \quad (6.70)$$

$$s_i = \frac{p_i + \rho_i - \mu_i n_i}{T} \Rightarrow \quad (6.71)$$

$$s_i = \left( \frac{5}{2} + \frac{m_i - \mu_i}{T} \right) n_i \quad (6.72)$$

Из

$$n_i = g_i e^{(\mu_i - m_i)/T} \left( \frac{m_i T}{2\pi} \right)^{3/2} \quad (6.73)$$

получаем

$$\frac{m_i - \mu_i}{T} = \ln \left[ \frac{g_i}{n_i} \left( \frac{m_i T}{2\pi} \right)^{3/2} \right] \Rightarrow \quad (6.74)$$

$$s_i = n_i \left( \frac{5}{2} + \ln \left[ \frac{g_i}{n_i} \left( \frac{m_i T}{2\pi} \right)^{3/2} \right] \right) \quad (6.75)$$

При  $T \lesssim 0.5$  МэВ электроны и адроны – нерелятивистские.

Сейчас  $n_e \sim n_B \sim 10^{-9} n_\gamma$ .

$\ln$  в (6.75)  $\approx 60(\star) \Rightarrow s_B \ll s_\gamma$  и

$$\boxed{s \sim s_\gamma \sim n_\gamma} \quad (6.76)$$

Из (6.72) и (6.75)  $\Rightarrow \mu_i \sim m_i$ .

**Сохранение энтропии при сохранении разности числа частиц и античастиц:  $d(N - \bar{N}) = 0$**

В сопутствующем объеме, с учетом всех типов частиц:

$$\begin{aligned} dE &= TdS - pdV + \sum \mu(dN - d\bar{N}) = \\ &= TdS - pdV + \sum \mu d(N - \bar{N}) = \\ &= TdS - pdV \end{aligned} \quad (6.77)$$

$$\begin{aligned} TdS &= dE + pdV = d(\rho V) + pdV = \\ &= Vd\rho + \rho dV + pdV = (p + \rho)dV + Vd\rho \end{aligned} \quad (6.78)$$

$$T \frac{dS}{dt} = (p + \rho) \frac{dV}{dt} + V \frac{d\rho}{dt} \quad (6.79)$$

$$\text{Сопутствующий объем: } V = ka^3 \Rightarrow \quad (6.80)$$

$$\frac{dV}{dt} = k3a^2 \dot{a} \Rightarrow \quad (6.81)$$

$$T \frac{dS}{dt} = ka^3 \left[ (p + \rho) 3 \frac{\dot{a}}{a} + \dot{\rho} \right] \quad (6.82)$$

Закон сохранения ЭИ:

$$\dot{\rho} + 3 \frac{\dot{a}}{a} (p + \rho) = 0 \Rightarrow \frac{dS}{dt} = 0 \quad (6.83)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d}{dt} (ka^3 s) \Rightarrow \frac{d}{dt} (a^3 s) = 0 \quad (6.84)$$

Закон сохранения энтропии в локальной форме

$$\boxed{3\dot{a}s + a\dot{s} = 0} \quad (6.85)$$

## Барион-фотонное отношение

При температуре ниже по крайней мере  $\sim 100$  ГэВ барионное число сохраняется:

$$(n_B - n_{\bar{B}})a^3 = \text{const} \quad (6.86)$$

$$sa^3 = \text{const} \Rightarrow \quad (6.87)$$

$$\Delta_B = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{s} = \text{const} \quad (6.88)$$

– хорошая характеристика барионной асимметрии (сейчас  $\Delta_B = n_B/s$ )

*Барион-фотонное отношение:*

$$\eta_B = \frac{n_B}{n_\gamma} \quad (6.89)$$

При температуре  $T \lesssim 0.5$  МэВ (электроны и позитроны становятся нерелятивистскими и аннигилируют)

$$\left\langle T_\nu = \sqrt[3]{\frac{4}{11}} T_\gamma \right\rangle$$

$$s = g_* \frac{4\pi^2}{90} T^3 = \left( 2 + \frac{7}{8} \cdot 2 \cdot 3 \cdot \frac{4}{11} \right) \frac{4\pi^2}{90} T^3 \quad (6.90)$$

$$\Delta_B = \left\langle n_{\bar{B}} \approx 0 \right\rangle = \frac{n_B}{s} = \frac{n_B n_\gamma}{n_\gamma s} = \eta_B \frac{n_\gamma}{s} =$$

$$= \frac{2 \frac{\zeta(3)}{\pi^2} T^3}{\left( 2 + \frac{7}{8} \cdot 2 \cdot 3 \cdot \frac{4}{11} \right) \frac{4\pi^2}{90} T^3} \eta_B = 0.14 \eta_B \quad (6.91)$$

$$\boxed{\Delta_B = 0.14 \eta_B} \quad (6.92)$$

$$\eta_B = (6.10 \pm 0.20) \cdot 10^{-10} \quad (6.93)$$

$$\Delta_B = 0.87 \cdot 10^{-10} \quad (6.94)$$

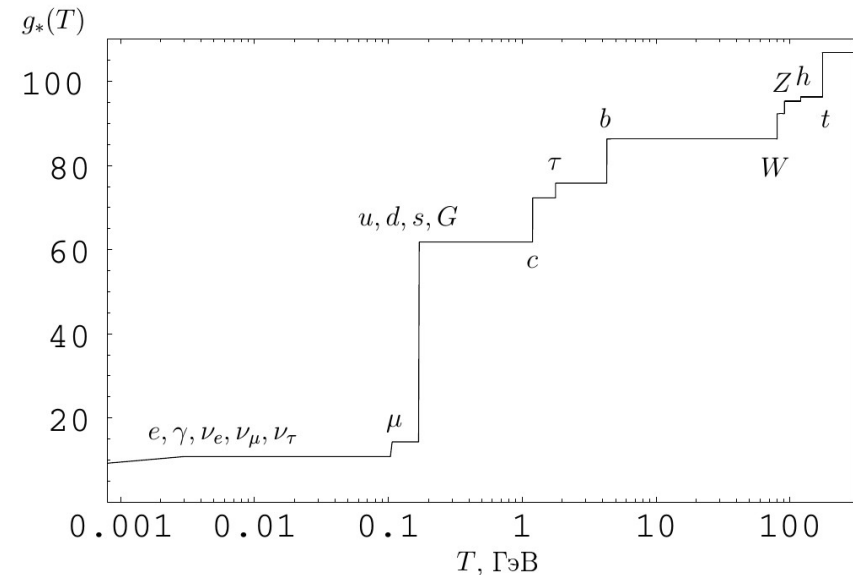
## Частицы стандартной модели и $g_*(T)$

$$\rho = g_* \frac{\pi^2}{30} T^4 \quad (6.95)$$

$$g_* = \sum_{\text{бозоны}} g_i + \frac{7}{8} \sum_{\text{фермионы}} g_i \quad (6.96)$$

Лептоны		Кварки	
$\nu_e(?)$	$e(0.511 \text{ МэВ})$	$u(1.5\text{--}3.0 \text{ МэВ})$	$d(3.0\text{--}7.0 \text{ МэВ})$
$\nu_\mu(?)$	$\mu(105.7 \text{ МэВ})$	$c(1.15\text{--}1.35 \text{ ГэВ})$	$s(0.07\text{--}0.12 \text{ ГэВ})$
$\nu_\tau(?)$	$\tau(1.78 \text{ ГэВ})$	$t(169.3\text{--}173.5 \text{ ГэВ})$	$b(4.1\text{--}4.3 \text{ ГэВ})$
Калибровочные бозоны			
$\gamma(0)$	$G(0)$	$Z(91.2 \text{ ГэВ})$	$W(80.4 \text{ ГэВ})$
Бозон Хиггса $h(125.26 \pm 0.21 \text{ ГэВ})$			

$$X \text{ — бозон: } m_X \sim 10^{15} \div 10^{16} \text{ ГэВ (?) } \quad (6.97)$$



## Фазовые переходы в ранней Вселенной

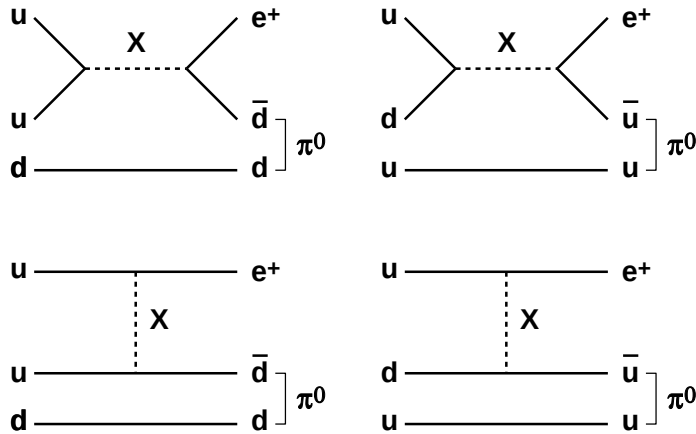
Очень высокие температуры, РД-стадия (см. (5.98))

$$H(T) = \frac{T^2}{M_{Pl}^*}; \quad M_{Pl}^* = \frac{M_{Pl}}{1.66\sqrt{g_*}}; \quad t = \frac{1}{2H} \quad (6.98)$$

### 1. Фазовый переход GUT

ТВО приводят к нестабильности протона

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0 \quad (6.99)$$



Какова масса  $X$ ?

Ширина распада протона:

$$\tau_p > 10^{32} \text{ лет}; \quad \Gamma_p = \frac{1}{\tau_p} \sim \frac{\alpha_X^2 m_p^5}{M_X^4}, \quad \alpha_X = \frac{g_X^2}{4\pi} \quad (6.100)$$

$g_X$  – константа связи, в амплитуде в каждой вершине

$\alpha_X \sim 1$

$1/M_X^2$  – в амплитуде пропагатора  $X$

$m_p^5$  – по размерности

$$M_X \sim (\alpha_X^2 m_p^5 \tau_p)^{1/4} \Rightarrow M_X \sim 10^{16} \text{ ГэВ} \star \quad (6.101)$$

Масса  $M_X$  возникает от спонтанного нарушения симметрии при  $T_{GUT} \sim 10^{16}$  ГэВ.

$g_* \sim 200$  при  $T > T_{GUT} \Rightarrow t_{GUT} \sim 10^{-39}$  сек  $\star$

$$S(GUT) \rightarrow SU(3)_c \times SU(2)_W \times U(1) \quad (6.102)$$

GUT-перехода могло и не быть, т.к. инфляция могла закончиться при более низкой температуре.

### 2. Электрослабый фазовый переход

$$M_W \approx 80 \text{ ГэВ}, \quad M_Z \approx 91 \text{ ГэВ} \Rightarrow T_W \approx 100 \text{ ГэВ} \quad (6.103)$$

$$T > T_W \Rightarrow g_* \sim 100 \Rightarrow t_W = 10^{-11} \div 10^{-10} \text{ сек} \quad (6.104)$$

$$SU(3)_c \times SU(2)_W \times U(1) \rightarrow SU(3)_c \times U(1)_{em} \quad (6.105)$$

### 3. Конфайнмент кварков и образование кваркового конденсата. Адронизация

$$T_{QCD} \approx 170 \text{ МэВ} \quad (6.106)$$

$$g_* \approx 60 \Rightarrow t_{QCD} \sim 10^{-5} \text{ сек} \quad (6.107)$$

Два события:

1. Конфайнмент кварков, «адронизация»

2. Нарушение киральной симметрии кварков – кварки u, d, s обретают массы (кварковый конденсат)

Порядок следования неизвестен.