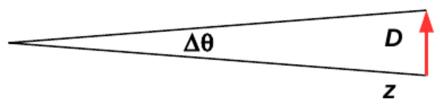
Лекция 5

Тест углового размера. Термодинамика Вселенной и степени свободы СМ. Фазовые переходы в горячей Вселенной.

Тест углового размера



Стандартные линейки $\Rightarrow$ $\Delta\theta(z) \to \Omega_M, \Omega_\Lambda, \Omega_{curv}$. Стандартные линейки существуют – акустические пики.

1. Плоское пространство

$$ds^2 = a^2(t)(d\eta^2 - dx^2) \tag{5.1}$$

В конформных координатах все как в плоской статике:

$$\Delta\theta = \frac{D_{conf}}{x(z)} \tag{5.2}$$

$$D = D_{conf}a(t) \Rightarrow D_{conf} = \frac{D}{a(t)} \tag{5.3}$$

$$\Delta\theta = \frac{D}{a(t)x(z)} = \frac{a_0}{a(t)}\frac{D}{a_0 x(z)} = \frac{z+1}{x(z)}\frac{D}{a_0} = \Big\backslash x(z) = \frac{r(z)}{a_0}, (4.73) \Big\backslash = DH_0 \frac{z+1}{\int_0^z [\Omega_M(z+1)^3 + \Omega_\Lambda]^{-1/2} dz} \tag{5.4}$$

$$\boxed{\Delta\theta(z) = DH_0 \frac{z+1}{\int_0^z [\Omega_M(z+1)^3 + \Omega_\Lambda]^{-1/2} dz}} \tag{5.5}$$

Как себя ведет $\Delta\theta(z)$?

- $z \ll 1$

$$\Delta\theta(z) \cong DH_0\sqrt{\Omega_M + \Omega_\Lambda}\frac{1}{z} = DH_0\frac{1}{rH_0} = \frac{D}{r} \tag{5.6}$$

– убывает, как и ожидается.

- $z \gg 1$

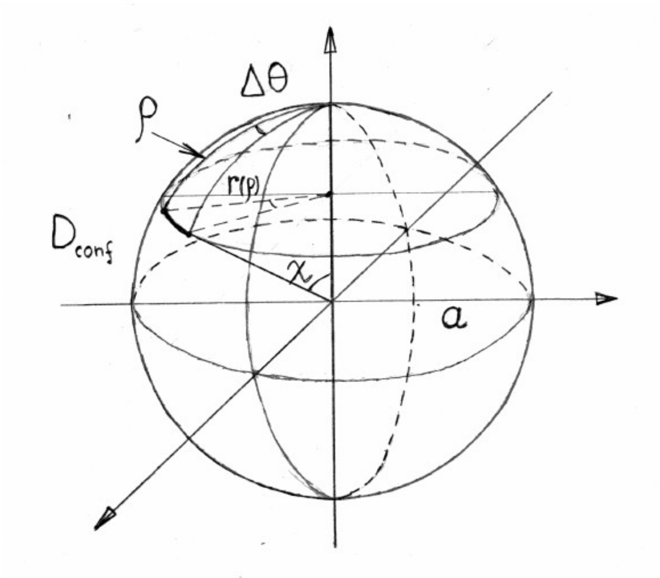
$$\int_0^z [\Omega_M(z+1)^3 + \Omega_\Lambda]^{-1/2} dz \cong \int_0^z [\Omega_M(z+1)^3]^{-1/2} dz = \\ = \frac{1}{2\sqrt{\Omega_M}}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{z+1}}\right) \Rightarrow \tag{5.7}$$

$$\Delta\theta(z) \cong 2DH_0\sqrt{\Omega_M}\frac{z+1}{1 - \frac{1}{\sqrt{z+1}}} \approx 2DH_0\sqrt{\Omega_M}(z+1) \tag{5.8}$$

– угловой размер растет с ростом расстояния!

- При $z \sim 2$ угловой размер достигает минимума (ищется численно).

2. 3-сфера



$$D_{conf} = \sin\chi \Delta\theta \tag{5.9}$$

$$D = a(t) D_{conf} \tag{5.10}$$

$$\Delta\theta = \frac{D_{conf}}{\sin\chi} = \frac{D}{a(t)\sin\chi} = \frac{a_0}{a(t)}\frac{D}{a_0\sin\chi} = \frac{D(z+1)}{a_0\sin\chi} = \\ = \frac{D}{a_0}\frac{z+1}{\sin\left[\int_0^z \frac{dz}{a_0 H_0\sqrt{\Omega_M(1+z)^3+\Omega_\Lambda+\Omega_{curv}(1+z)^2}}\right]} \tag{5.11}$$

3. 3-псевдосфера

$$\Delta\theta = \frac{D}{a_0}\frac{z+1}{\mathrm{sh}\left[\int_0^z \frac{dz}{a_0 H_0\sqrt{\Omega_M(1+z)^3+\Omega_\Lambda+\Omega_{curv}(1+z)^2}}\right]} \tag{5.12}$$

Термодинамика Вселенной

Химический потенциал в равновесии

$$dE = -PdV + TdS + \sum_i \mu_i dN_i = 0 \tag{5.13}$$

Термидинамическое **И** химическое равновесие: Превращение частиц много быстрее расширения Вселенной:

$$dV = dS = 0 \;\Rightarrow\; \sum_i \mu_i dN_i = 0 \tag{5.14}$$

Пример реакции в равновесии:

$$A_1 + A_2 \leftrightarrow B_1 + B_2 \tag{5.15}$$

$$\mu_{A_1}dN + \mu_{A_2}dN - \mu_{B_1}dN - \mu_{B_1}dN = 0 \;\Rightarrow \\ \Rightarrow\; \mu_{A_1} + \mu_{A_2} = \mu_{B_1} + \mu_{B_2} \tag{5.16}$$

В общем случае:

$$A_1 + \cdots + A_n \leftrightarrow B_1 + \cdots + B_m \;\Rightarrow \\ \Rightarrow\; \mu_{A_1} + \cdots + \mu_{A_n} = \mu_{B_1} + \cdots + \mu_{B_n} \tag{5.17}$$

Полезные следствия:

$$e + e \leftrightarrow e + e + \gamma + \cdots + \gamma \Rightarrow \mu_\gamma = 0 \tag{5.18}$$

$$b + \bar{b} = 2\gamma \;\Rightarrow\; \mu_b = -\mu_{\bar{b}} \tag{5.19}$$

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

Обычная запись распределений ФД и БЭ идеального газа:

$$N_i = \frac{g_i}{e^{(E_i-\mu)/T} \pm 1}; \qquad \begin{matrix} +\text{ФД} \\ -\text{БЭ} \end{matrix} \tag{5.20}$$

• 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 однордным газом частиц. Энергетический ящик $d\Gamma = d^3\mathbf{r}d^3\mathbf{p}$ вблизи энергии E.

Тогда

$$g_i = \frac{d\Gamma}{a} g \tag{5.21}$$

• a – объем минимальной ячейки фазового пространства частицы

• g – статистический вес внутрениих состояний частицы (спин, спиральность)

$$dN = \frac{g}{a}\,\frac{d\Gamma}{e^{(E-\mu)/T} \pm 1} \tag{5.22}$$

Из кв.мех.:

$$a = h^3 = (2\pi)^3\hbar^3 \equiv (2\pi)^3 \tag{5.23}$$

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

$$d\Gamma = V d^3\mathbf{p} \;\Rightarrow \tag{5.24}$$

$$dN = \frac{1}{(2\pi)^3}\, g\, \frac{V d^3\mathbf{p}}{e^{[E(\mathbf{p})-\mu]/T} \pm 1} \tag{5.25}$$

Можно переписать как плотность распределения импульса:

$$\boxed{\frac{1}{V}\,\frac{dN}{d^3\mathbf{p}} \equiv f(\mathbf{p}) = \frac{g}{(2\pi)^3}\,\frac{1}{e^{[E(\mathbf{p})-\mu]/T} \pm 1}} \tag{5.26}$$

Нормировка:

$$\int f(d\mathbf{p}) d^3\mathbf{p} = n - \text{число частиц в 1 объема} \tag{5.27}$$

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

$$E_i(\mathbf{p}) = \sqrt{p^2 + m_i^2} \;\Rightarrow\; EdE = pdp \tag{5.28}$$

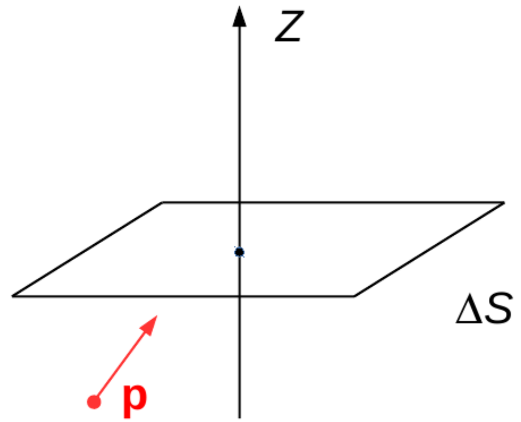
Интегрируя по углам – плотность числа частиц через распределение по энергии:

$$n_i = \int f_i(\mathbf{p}) d^3\mathbf{p} = \int f_i(p)\, 4\pi p^2\, dp = \\ = 4\pi \int f_i(E)\sqrt{E^2 - m_i^2}\, EdE \tag{5.29}$$

Плотность энергии

$$\rho_i = \int f_i(\mathbf{p}) E(\mathbf{p}) d^3\mathbf{p} = 4\pi \int f_i(E)\sqrt{E^2 - m_i^2}\, E^2 dE \tag{5.30}$$

Давление



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

$$\Delta n_i = v_z f_i(\mathbf{p}) d^3\mathbf{p}\,\Delta S \Delta t \tag{5.31}$$

$$p_z = \frac{mv_z}{\sqrt{1-v^2}};\; E = \frac{m}{\sqrt{1-v^2}}; \Rightarrow v_z = \frac{p_z}{E} \tag{5.32}$$

От одной частицы площадка получает получает импульс $\Delta p_z = 2p_z \Rightarrow$
Давление есть переданный импульс через единицу площади в единицу времени:

$$p_i = \int_{p_z>0} 2p_z \frac{p_z}{E} f_i(\mathbf{p}) d^3\mathbf{p} = \Big\backslash\, p_z^2 = \frac{1}{3}p^2, 2 \to 1 \,\Big\backslash = \\ = \frac{4\pi}{3}\int_0^\infty \frac{p^4 dp}{E(p)} f_i(p) = \frac{4\pi}{3}\int_0^\infty f_i(E)(E^2 - m_i)^{3/2} dE \tag{5.33}$$

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

Из (5.30):

$$\rho_i = 4\pi \int_0^\infty \frac{g_i}{(2\pi)^3}\frac{1}{e^{E/T}\pm 1} E^3 dE = \\ = \frac{g_i}{2\pi^2} T^4 \int_0^\infty \frac{z^3}{e^z \pm 1} dz \tag{5.34}$$

Табличные интегралы:

$$\int_0^\infty \frac{z^{2n-1}}{e^z+1} dz = \frac{2^{2n-1}-1}{2n}\pi^{2n} B_n \tag{5.35}$$

$$\int_0^\infty \frac{z^{2n-1}}{e^z-1} dz = \frac{(2\pi)^{2n}}{4n} B_n \tag{5.36}$$

$$B_1 = \frac{1}{6},\; B_2 = \frac{1}{30},\; B_3 = \frac{1}{42} \tag{5.37}$$

$n = 2 \Rightarrow$

$$\int_0^\infty \frac{z^3}{e^z+1} = \frac{7}{4}\pi^4 \frac{1}{30} \tag{5.38}$$

$$\int_0^\infty \frac{z^3}{e^z-1} = 2\pi^4 \frac{1}{30} \tag{5.39}$$

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

$$\rho_i = \begin{cases} \frac{7}{8} g_i \frac{\pi^2}{30} T^4 & \text{– Ферми-Дирак} \\ g_i \frac{\pi^2}{30} T^4 & \text{– Бозе-Эйнштейн} \end{cases} \tag{5.40}$$

Если все УР частицы имеют температуру T, то

$$\rho = g_* \frac{\pi^2}{30} T^4 \tag{5.41}$$

$$g_* = \sum_{\text{бозоны}} g_i + \frac{7}{8} \sum_{\text{фермионы}} g_i \tag{5.42}$$

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

Давление

Из (5.33):

$$p_i = \frac{4\pi}{3} \int_0^\infty \frac{g_i}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{E/T} \pm 1} E^3 dE = \frac{\rho_i}{3} \text{ (см. (5.34))} \tag{5.43}$$

Для УР вещества всегда $p = \rho/3$.

Плотность

$$n_i = 4\pi \int \frac{g_i}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{E/T} \pm 1} E^2 dE = \frac{g_i}{2\pi^2} T^3 \int_0^\infty \frac{z^2}{e^z \pm 1} dz \tag{5.44}$$

Табличные интегралы:

$$\int_0^\infty \frac{z^{x-1}}{e^z + 1} = (1 - 2^{1-x}) \Gamma(x) \zeta(x) \tag{5.45}$$

$$\int_0^\infty \frac{z^{x-1}}{e^z - 1} = \Gamma(x) \zeta(x) \tag{5.46}$$

(5.47)

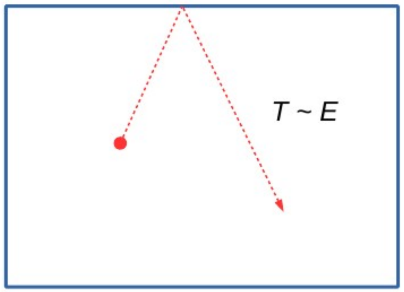
x	$\zeta(x)$
3	1.202
5	1.037
3/2	2.612
5/2	1.341

$$\begin{aligned} &\Gamma(n) = (n-1)! \\ &\Gamma(1/2) = \sqrt{\pi} \\ &\Gamma(x+1) = x\Gamma(x) \end{aligned} \tag{5.48}$$

$x = 3 \Rightarrow$

$$n_i = \begin{cases} g_i \dfrac{3}{4} \dfrac{\zeta(3)}{\pi^2} T^3 & \text{–Ферми-Дирак} \\ g_i \dfrac{\zeta(3)}{\pi^2} T^3 & \text{–Бозе-Эйнштейн} \end{cases} \tag{5.49}$$

Частица в ящике:



А есть ли тепловое (химическое) равновесие?

Характерное время расширения:

$$1/t_H \sim H(t) \tag{5.50}$$

Электромагнитное взаимодействие:

$$\sigma \propto 1/\alpha^2 \Rightarrow 1/t_{em} \sim \alpha^2 T \tag{5.51}$$

Из (4.111):

$$H(T) = \frac{T^2}{M_{Pl}^*};\ M_{Pl}^* = M_{Pl}\sqrt{\frac{90}{8\pi^3 g_*}} = \frac{1}{1.66\sqrt{g_*}}M_{Pl} \tag{5.52}$$

Нужно:

$$1/t_{em} \gg 1/H(t) \quad [t_{em} \ll t_H] \tag{5.53}$$

$$\alpha^2 T \gg \frac{T^2}{M_{Pl}^*} \Rightarrow T \ll \alpha^2 M_{Pl}^* \sim 10^{14}\,\text{ГэВ} \tag{5.54}$$

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

Нерелятивистский газ (распределение Больцмана)

$$m_i \gg T,\ m_i - \mu_i \gg T \ \Rightarrow\ e^{(E-\mu_i)/T} \gg 1 \tag{5.55}$$

$$f_B(p) = g_i \frac{1}{(2\pi)^3} e^{-[E(p)-\mu_i]/T} \tag{5.56}$$

$$f_B(p) = g_i \frac{1}{(2\pi)^3} e^{(\mu_i - m_i)/T} e^{-p^2/(2m_i T)} \tag{5.57}$$

$$\begin{aligned} n_i &= \int f_B(\mathbf{p}) d^3\mathbf{p} = \int_0^\infty f_B(p)\, 4\pi p^2\, dp = \\ &= 4\pi \frac{g_i}{(2\pi)^3} e^{(\mu_i - m_i)/T} \int_0^\infty p^2 e^{-p^2/(2m_i T)}\, dp = \\ &= \Big\backslash \int_0^\infty x^2 e^{-x^2} dx = \sqrt{\pi}/4 \Big\backslash = \\ &= g_i e^{(\mu_i - m_i)/T} \left(\frac{m_i T}{2\pi}\right)^{3/2} \end{aligned} \tag{5.58}$$

Больцмановский газ:

$$\boxed{n_i = g_i e^{(\mu_i - m_i)/T} \left(\frac{m_i T}{2\pi}\right)^{3/2}} \tag{5.59}$$

$$\rho_i = m_i n_i + \frac{3}{2} n_i T \tag{5.60}$$

$$p = \frac{1}{3} n \langle \mathbf{v}\mathbf{p} \rangle \Rightarrow p_i = n_i T \ll \rho_i \tag{5.61}$$

Энтропия во Вселенной

$$dE = TdS - pdV + \sum_i \mu_i dN_i \tag{5.62}$$

Будем считать dE в расчете на 1 тип частиц.
Для парциальных величин:

$$\rho = \frac{E}{V},\ n = \frac{N}{V},\ s = \frac{S}{V} \tag{5.63}$$

$$dE = \rho\, dV + V d\rho \tag{5.64}$$
$$dN = n\, dN + V dn \tag{5.65}$$
$$dS = s\, dV + V ds \tag{5.66}$$

Из (5.62):

$$(Ts - p - \rho + \mu n)dV + (Tds - d\rho + \mu dn)V = 0 \tag{5.67}$$

Применяем (5.67) к области постоянного объема V внутри системы:

$$Tds = d\rho - \mu dn \tag{5.68}$$

Это соотношение между локальными величинами выполняется всегда (в равновесии).
Подставляем (5.68) в (5.67) и применяем к произвольной системе переменного объема:

$$s = \frac{p + \rho - \mu n}{T} \tag{5.69}$$

УР газ, μ мало

$$s_i = \frac{p_i + \rho_i}{T} \tag{5.70}$$

$$\rho_i = \begin{cases} \frac{7}{8} g_i \frac{\pi^2}{30} T^4 & - \text{ФД} \\ g_i \frac{\pi^2}{30} T^4 & - \text{БЭ} \end{cases};\quad p_i = \frac{1}{3}\rho_i \tag{5.71}$$

$$\boxed{s_i = \frac{4}{3}\frac{\rho_i}{T} = \begin{cases} \frac{7}{8} g_i \frac{4\pi^2}{90} T^3 & - \text{ФД} \\ g_i \frac{4\pi^2}{90} T^3 & - \text{БЭ} \end{cases}} \tag{5.72}$$

$$n_i = \begin{cases} g_i \frac{3}{4} \frac{\zeta(3)}{\pi^2} T^3 & - \text{Ферми-Дирак} \\ g_i \frac{\zeta(3)}{\pi^2} T^3 & - \text{Бозе-Эйнштейн} \end{cases} \tag{5.73}$$

$$\boxed{s_i \sim n_i} \tag{5.74}$$

Полная плотность энтропии УР газа

$$s = g_* \frac{4\pi^2}{90} T^3 \tag{5.75}$$

Нерелятивистский газ

$$\rho_i = m_i n_i + \frac{3}{2} n_i T \tag{5.76}$$

$$p_i = n_i T \tag{5.77}$$

$$s_i = \frac{p_i + \rho_i - \mu_i n}{T} \Rightarrow \tag{5.78}$$

$$s_i = \left(\frac{5}{2} + \frac{m_i - \mu_i}{T}\right) n_i \tag{5.79}$$

Из

$$\boxed{n_i = g_i e^{(\mu_i - m_i)/T} \left(\frac{m_i T}{2\pi}\right)^{3/2}} \tag{5.80}$$

получаем

$$\frac{m_i - \mu_i}{T} = \ln\left[\frac{g_i}{n_i}\left(\frac{m_i T}{2\pi}\right)^{3/2}\right] \Rightarrow \tag{5.81}$$

$$s_i = n_i \left(\frac{5}{2} + \ln\left[\frac{g_i}{n_i}\left(\frac{m_i T}{2\pi}\right)^{3/2}\right]\right) \tag{5.82}$$

При $T \lesssim 0.5\,$МэВ электроны и адроны – нерелятивистсткие.
Сейчас $n_e \sim n_B \sim 10^{-9} n_\gamma$.
ln в (5.82) $\approx 60 \Rightarrow s_B \ll s_\gamma$ и

$$\boxed{s \sim s_\gamma \sim n_\gamma} \tag{5.83}$$

Из (5.79) и (5.82) $\Rightarrow \mu_i \sim m_i$.

Сохранение энтропии при сохранении разности числа частиц и античастиц

В сопутствующем объеме, с учетом всех типов частиц:

$$dE = TdS - pdV + \sum \mu(dN - d\bar{N}) = TdS - pdV \tag{5.84}$$

$$\begin{aligned} TdS &= dE + pdV = d(\rho V) + pdV = \\ &= Vd\rho + \rho dV + pdV = (p+\rho)dV + Vd\rho \end{aligned} \tag{5.85}$$

$$T\frac{dS}{dt} = (p+\rho)\frac{dV}{dt} + V\frac{d\rho}{dt} \tag{5.86}$$

$$\text{Сопутствующий объем: } V = ka^3 \Rightarrow \tag{5.87}$$

$$\frac{dV}{dt} = k3a^2\dot{a} \Rightarrow \tag{5.88}$$

$$T\frac{dS}{dt} = ka^3\left[(p+\rho)3\frac{\dot{a}}{a} + \dot{\rho}\right] \tag{5.89}$$

Закон сохранения ЭИ:

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(p+\rho) = 0 \Rightarrow \frac{dS}{dt} = 0 \tag{5.90}$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d}{dt}(ka^3 s) \Rightarrow \frac{d}{dt}(a^3 s) = 0 \tag{5.91}$$

Закон сохранения энтропии в локальной форме

$$\boxed{3\dot{a}s + \dot{s} = 0} \tag{5.92}$$

Барион-фотонное отношение

$$(n_B - n_{\bar{B}})a^3 = \text{const} \quad (5.93)$$

$$sa^3 = \text{const} \Rightarrow \quad (5.94)$$

$$\Delta_B = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{s} = \text{const} \quad (5.95)$$

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

Барион-фотонное отношение:

$$\eta_B = \frac{n_B}{n_\gamma} \quad (5.96)$$

При температуре $T \lesssim 1\,\text{МэВ}$

$$s = g_* \frac{4\pi^2}{90} T^3 = \left(2 + \frac{7}{8} \cdot 2 \cdot 3 \cdot \frac{4}{11}\right) \frac{4\pi^2}{90} T^3 \quad (5.97)$$

$$\Delta_B = \frac{n_B}{s} = \frac{n_B}{n_\gamma}\frac{n_\gamma}{s} = \eta_B \frac{n_\gamma}{s} =$$

$$= \frac{2\frac{\zeta(3)}{\pi^2} T^3}{\left(2 + \frac{7}{8} \cdot 2 \cdot 3 \cdot \frac{4}{11}\right) \frac{4\pi^2}{90} T^3} \eta_B = 0.14 \eta_B \quad (5.98)$$

$$\boxed{\Delta_B = 0.14 \eta_B} \quad (5.99)$$

$$\eta_B = (6.10 \pm 0.20) \cdot 10^{-10} \quad (5.100)$$

$$\Delta_B = 0.87 \cdot 10^{-10} \quad (5.101)$$

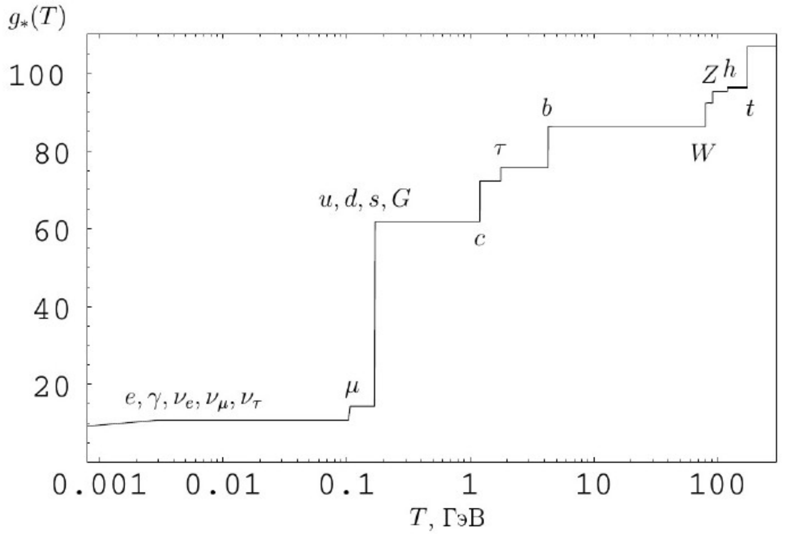
Частицы стандартной модели и $g_*(T)$

$$\rho = g_* \frac{\pi^2}{30} T^4 \quad (5.102)$$

$$g_* = \sum_{\text{бозоны}} g_i + \frac{7}{8} \sum_{\text{фермионы}} g_i \quad (5.103)$$

Лептоны		Кварки	
$\nu_e(?)$	$e(0.511\,\text{МэВ})$	u(1.5–3.0 МэВ)	d(3.0–7.0 МэВ)
$\nu_\mu(?)$	$\mu(105.7\,\text{МэВ})$	c(1.15–1.35 ГэВ)	s(0.07-0.12 ГэВ)
$\nu_\tau(?)$	$\tau(1.78\,\text{ГэВ})$	t(169.3–173.5 ГэВ)	b(4.1–4.3 ГэВ))
Калибровочные бозоны			
$\gamma(0)$	$G(0)$	$Z(91.2\,\text{ГэВ})$	$W(80.4\,\text{ГэВ})$
Бозон Хиггса $h(125\,\text{ГэВ})$			

$$X - \text{бозон: } m_X \sim 10^{15} \div 10^{16}\,\text{ГэВ}\ (?) \quad (5.104)$$



Очень ранняя Вселенная, фазовые переходы

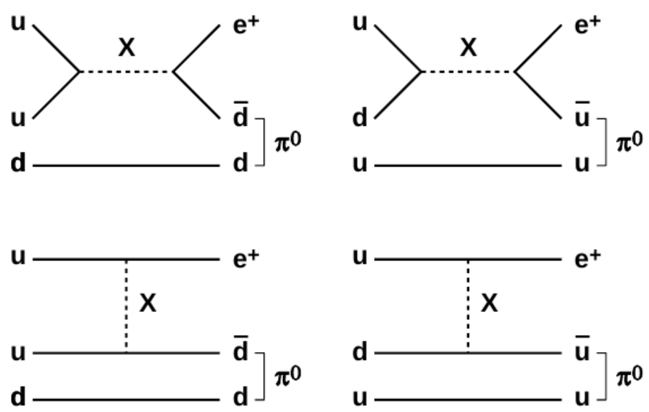
Очень высокие температуры, РД-стадия

$$H(T) = \frac{T^2}{M_{Pl}^*}; \; M_{Pl}^* = \frac{M_{Pl}}{1.66\sqrt{g_*}}; \; t = \frac{1}{2H} \qquad (5.105)$$

1. Фазовый переход GUT

ТВО приводят к нестабильнисти протона

$$p \to e^+ + \pi^0 \qquad (5.106)$$



Ширина распада протона:

$$\tau_p > 10^{32}\,\text{лет}; \quad \Gamma_p = \frac{1}{\tau_p} \sim \frac{\alpha_X^2}{M_X^4} m_P^5, \; \alpha_X = \frac{g_X^2}{4\pi} \qquad (5.107)$$

g_X – константа связи, в амлитуде в каждой вершине
$1/M_X^2$ – в амплитуде пропагатора X
m_p^5 – по размерности

$$M_X \sim (\alpha_X^2 m_p^5 \tau_p)^{1/4} \Rightarrow M_X \gtrsim 10^{16}\,\text{ГэВ} \qquad (5.108)$$

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

$$S(GUT) \to SU(3)_c \times SU(2)_W \times U(1) \qquad (5.109)$$

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

2. Электрослабый фазовый переход

$$M_W \approx 80\,\text{ГэВ}\; M_Z \approx 91\,\text{ГэВ} \Rightarrow T_W \approx 100\,\text{ГэВ} \qquad (5.110)$$

$$T > T_W \Rightarrow g_* \sim 100 \Rightarrow t_W = 10^{-11} \div 10^{-10}\,\text{сек} \qquad (5.111)$$

$$SU(3)_c \times SU(2)_W \times U(1) \to SU(3)_c \times U(1)_{em} \qquad (5.112)$$

3. Конфайнмент кварков и образование кваркового конденсата. Адронизация

$$T_{QCD} \approx 170\,\text{МэВ} \qquad (5.113)$$

$$g_* \approx 60 \Rightarrow t_{QCD} \sim 10^{-5}\,\text{сек} \qquad (5.114)$$

Два события:

1. Конфайнмент кварков, «адронизация»
2. Нарушение киральной симметрии кварков – кварки обретают массы (кварковый конденсат)

Порядок следования неизвестен.