انرژی های پایین‌تر از 1 GeV بررسی می‌کنیم.

$m_{e^-} \sim 0.5$ MeV نسبیتی

$m_{e^+} \sim 0.5$ MeV نسبیتی

$\gamma \sim 1$ GeV

$p \sim 1$ GeV غیرنسبیتی

$m_{\nu_e} \sim 13$ eV

$m_{\nu_\mu} \sim 0.15$ MeV

$m_{\nu_\tau} \sim 35$ MeV

برهم‌کنش ضعیف: برهم‌کنش بین نوترینوها، الکترون و پوزیترون

اگر دما از 1 GeV کمتر باشد

از زمان واجفتیدگی به بعد، دما ذره جدا شده، بسته به این‌که نسبیتی یا غیرنسبیتی باشند دمای آنها کاهش می‌یابد.

1 GeV

↓

واجفتیدگی نوترینوها

↓

$T \sim 1$ MeV نابودی پوزیترون‌ها

$T_{Rel} \sim \frac{1}{a}$

$T_{NR} \sim \frac{1}{a^2}$

فوتون‌ها رابط انتقال انرژی بین ذرات است. (پراکندگی تامسون - کامپتون (انرژی بالا))

↓

$T \sim$ eV → فوتون‌ها از سیال باریونی واجفتیده می‌شوند. (تابش زمینه کیهان)

سطح مقطع نوترینوها تابعی از دماست

$\sigma_{EW} = \frac{\alpha^2 E^2}{m_X^4}$

نوترینوهای ایجاد شده در خورشید دارای انرژی MeV است در نتیجه آشکارسازی آن از نوترینوهای کیهانی ساده‌تر است.

$\alpha = 2.8 \times 10^{-2}$

$m_X = 50$ GeV

$E_{\text{نوترینو}} \propto \frac{1}{a}$

$\sigma_{E.W} \propto \frac{1}{a^2}$

$\lambda = (n\sigma)^{-1}$, $\lambda > H^{-1}$ زمان واجفتیدگی

$\lambda_{\text{پویش آزاد}}$

2)

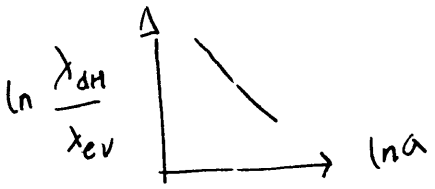
$$\lambda_{ev} = n_e^{-1} \frac{m_x^4}{\alpha^2 E^2} = \frac{1}{n_e} \cdot \frac{m_x^4}{\alpha^2 E^2} = \frac{m_e m_p}{m_e m_p n_e} \frac{m_x^4}{\alpha^2 E^2}$$

$$\lambda_{ev} = \frac{m_p}{\rho_B} \frac{m_x^4}{E^2 \alpha^2} \quad \to \quad \lambda_{ev} \sim a^5$$

$\rho_B \downarrow a^{-3}$, $E^2 \downarrow a^{-2}$

$$H^2 \sim \rho \sim a^{-4} \quad \to \quad H^{-1} \sim a^2 \quad \to \quad \frac{d_H}{\lambda_{ev}} = a^{-3}$$

تابش غالب



$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_r$$

$$\rho = \int E f(p) \frac{d^3 p}{(2\pi\hbar)^3}$$

$$\rho = \left(\frac{7}{8} g_F + g_B \right) \frac{\pi^2}{30} T^4 \frac{K^4}{\hbar^3 c^3} \quad \text{SI-unit}$$

$$f(p) = \frac{1}{e^{(E-\mu)/KT} \pm 1} \quad ; \quad H^2 = \frac{8\pi G}{3} \left(g_B + \frac{7}{8} g_F \right) \frac{\pi^2}{30} \left(\frac{KT}{} \right.$$

$g_r = 2$, $g_t = 2 + 10 \times \frac{7}{8}$ بیش از انواع ذرات بسیه $\longrightarrow$ $\left(\frac{T}{1.4 MeV} \right)^3 = 1$

$g_{e^-} = 4$, $H^{-1} = \lambda$

$g_\nu = 6$

تمرین: فرایند عبارت بالا را برای بسیه کنید.

$\lambda \sim a^5 \sim T^{-5}$

زمان واخفتگی نوترینو $T \simeq 1.4 MeV$

$H^{-1} \sim T^{-2}$

نکته جالب: اگر توانایی انرژی E_γ ... بازمان تغیر کند نتایج متفاوتی بدست می آید.

بعد از واجفتیدگی نوترینو: اگر $E_\gamma < 1\,MeV$ فوتون نمی تواند زوج پوزیترون - الکترون درست کند.

فقط نابودی زوج رخ می دهد.

سئوال: چرا در زمان حال فقط الکترون داریم و پوزیترون نداریم

وجود عدم تقارن بین ماده و ضدماده باعث شده است کیهان فعلی ماده غالب باشد.

* مکانیزم عدم تقارن چیست؟ (بین ماده و ضدماده)

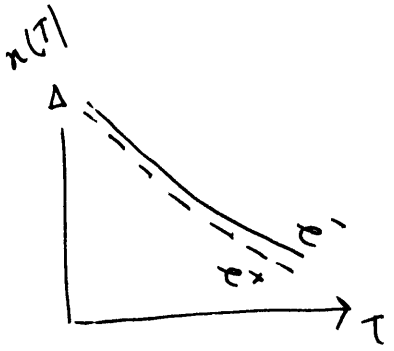
$$n(T) = \int f(p)\, d^3p = \int \frac{d^3p}{e^{(E-\mu)/KT} + 1}$$

حضور یا عدم پتانسیل شیمیایی

$\mu \neq 0$ { μ^+ ذره
μ^- پادذره

ایجاد اختلاف:

در دمای پایین تر از 1Mev



تولید فوتون $e^+ + e^- \longrightarrow 2\gamma$

در کیهان زمان حال $n_{e^-} = n_b$ چون کیهان خنثی است

در حالی که قبل از زمان نابودی $n_{e^-} - n_{e^+} = n_p$

* سئوال: اگر مقداری بار اضافی در کیهان باشد، چه اتفاقی می افتد؟ چه تاثیری بر روی دینامیک دارد؟

بار کل کیهان ضوابط، اصل بقاء

پوزیترون های مشاهده شده، انرژی هستند و جزو پوزیترون های کیهانی نیستند.

قبل از نابودی

$$n = \left(g_B T^3 + \frac{7}{8} g_F T^3 \right)\Big|_b = g_b T_a^3$$

before + after.

4. Reheating: $T_a = T_b \left(\frac{g_{B_b} + \frac{7}{8} g_{F_b}}{g_{B_a}} \right)^{1/3}$

$$= T_b \left(1 + \frac{7}{8} \times \frac{g_F = 4}{g_B = 2} \right)^{1/3}$$

$$T_a = \left(\frac{11}{4}\right)^{1/3} T_b$$

T_a ↓

$$\frac{T_a}{T_b} = 1.4$$

دمای فوتون پس از واجفتگی و نابود الکترون پوزیترون باعث گرم شدن تنها فوتون‌های شود چون نوترینوها قبلاً از شارش جدا شده باشند.

اگر دوشاره را نیستی در نظر بگیریم این نسبت در زمان حال نیز برقرار است.

$$\frac{T_\gamma}{T_\nu} = 1.4$$