

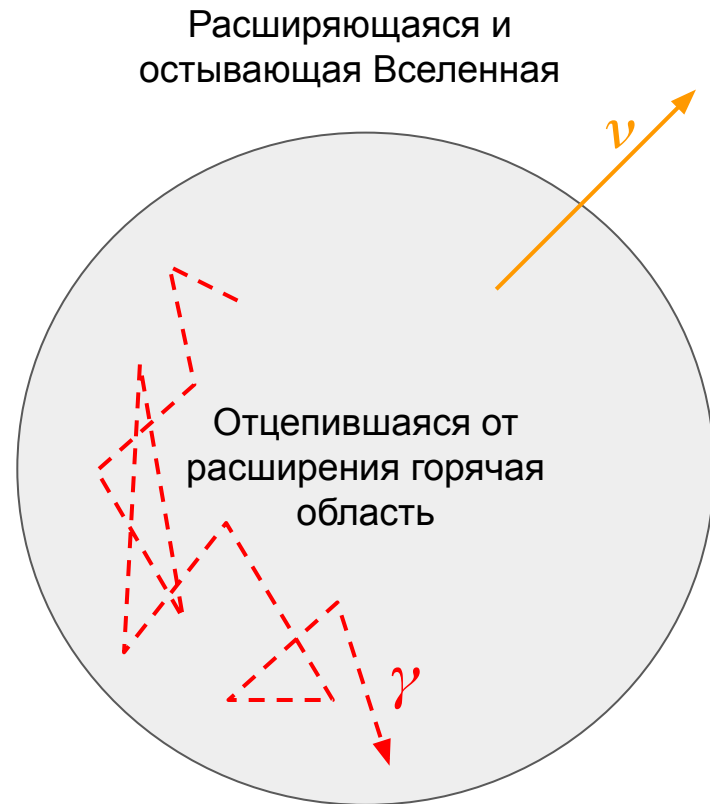
Эволюция химического состава гипотетических первородных горячих областей

Выполнил: Соловьев М.Л. А19-111

Руководитель: Белоцкий К.М.

Горячие области

- Предполагается, что в ранней Вселенной могут образовываться стабильные отцепившиеся от расширения горячие области (например, вокруг кластера ПЧД). Есть косвенные свидетельства возможности существования таких областей
- По оценкам, такие области могут долго оставаться горячими (время, необходимое для покидания области фотоном, больше возраста Вселенной, остывание за счет нейтрино)
- Предполагается, что такие области могут приобретать аномальный по меркам остальной Вселенной химический состав
- Температура областей 0.1 - 10 МэВ, размер ~ 1 пк, масса $\sim 10^4 M_{\odot}$



Начальные предположения

1) Протоны, нейтроны, электроны, позитроны - в термодинамическом равновесии

$$n_p = \frac{n_B}{1 + \exp\left(-\frac{\Delta m}{T}\right)},$$

$$n_n = n_p(T_0) \exp\left(-\frac{\Delta m}{T}\right),$$

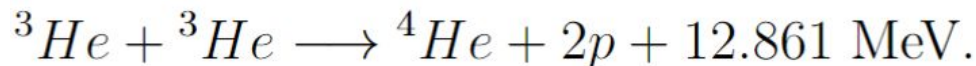
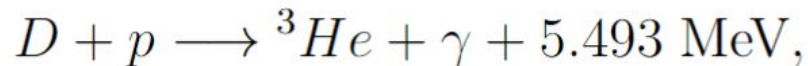
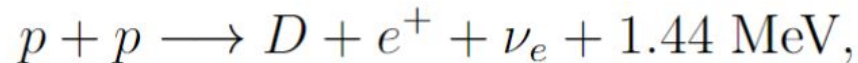
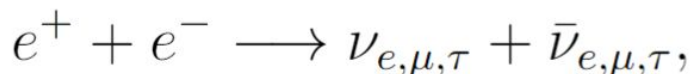
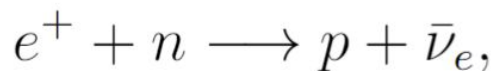
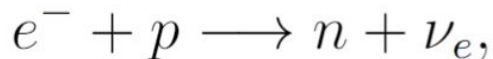
$$n_{e^-} = \frac{3\zeta(3)}{2\pi^2} T^3 \exp\left(-\frac{m_e}{T}\right) + \Delta n_e,$$

$$n_{e^+} = \frac{3\zeta(3)}{2\pi^2} T^3 \exp\left(-\frac{m_e}{T}\right),$$

$$n_B \equiv n_p + n_n = g_B \eta n_\gamma(T_0),$$

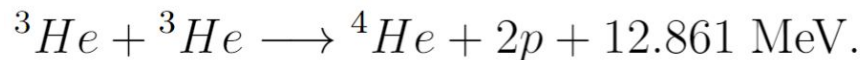
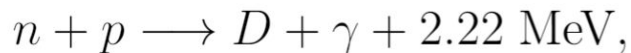
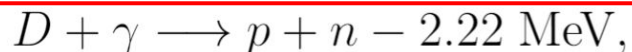
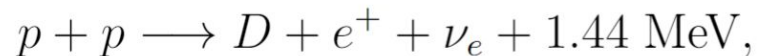
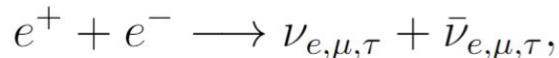
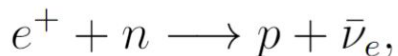
$$\Delta n_e \equiv n_{e^-} - n_{e^+} = n_p.$$

2) Реакции нейтринного охлаждения и цепочки ppI



Проблемы постановки

- 1) Приближение о термодинамическом равновесии протонов и нейтронов не учитывает их убыль за счет реакций синтеза \Rightarrow несохранение барионного числа
- 2) В ppI цепочке не учитываются важные для условий горячей области реакции образования и разрушения дейтерия



$$\frac{d(n_n)}{dt} = n_e n_p \langle \sigma v \rangle_{e-p} + n_\gamma n_d \langle \sigma v \rangle_{\gamma d} - \frac{n_n}{\tau_n} - n_n n_p \langle \sigma v \rangle_{np} - n_{e+n} \langle \sigma v \rangle_{e+n}$$

$$\begin{aligned} \frac{d(n_p)}{dt} &= n_{e+n} \langle \sigma v \rangle_{e+n} + \frac{n_n}{\tau_n} + n_\gamma n_d \langle \sigma v \rangle_{\gamma d} + (n_{^3\text{He}})^2 \langle \sigma v \rangle_{^3\text{He}^3\text{He}} \\ &\quad - n_e n_p \langle \sigma v \rangle_{e-p} - n_p^2 \langle \sigma v \rangle_{pp} - n_d n_p \langle \sigma v \rangle_{dp} \end{aligned}$$

$$\frac{d(n_d)}{dt} = \frac{n_p^2}{2} \langle \sigma v \rangle_{pp} + n_n n_p \langle \sigma v \rangle_{np} - n_d n_p \langle \sigma v \rangle_{dp} - n_\gamma n_d \langle \sigma v \rangle_{\gamma d}$$

$$\frac{d(n_{^3\text{He}})}{dt} = n_d n_p \langle \sigma v \rangle_{dp} - (n_{^3\text{He}})^2 \langle \sigma v \rangle_{^3\text{He}^3\text{He}}$$

$$\frac{d(n_{^4\text{He}})}{dt} = \frac{(n_{^3\text{He}})^2}{2} \langle \sigma v \rangle_{^3\text{He}^3\text{He}}$$

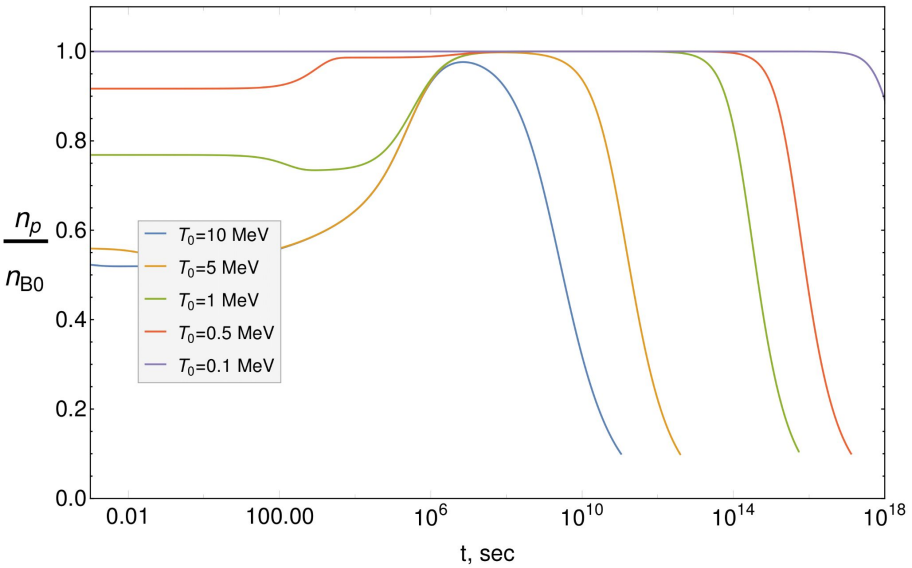
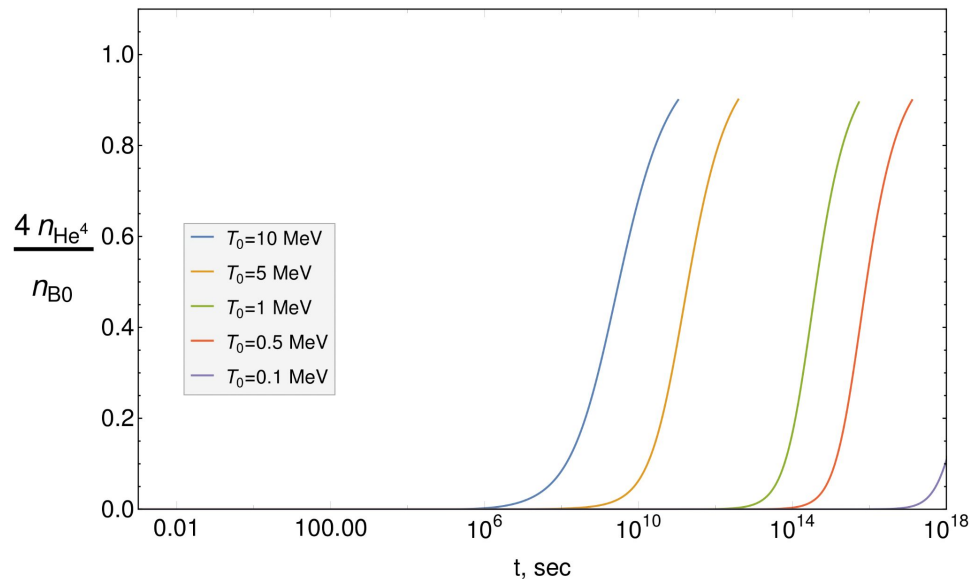
$$\begin{aligned} \frac{d(T)}{dt} &= [(\gamma_{pp} \cdot Q_1 - \gamma_{\gamma d} \cdot Q_2 + \gamma_{np} \cdot Q_3 + \gamma_{dp} \cdot Q_4 + \gamma_{^3\text{He}^3\text{He}} \cdot Q_5) \\ &\quad - (\gamma_{en} + \gamma_{ep} + 2\gamma_{ee} + \gamma_n + \gamma_{pp}) E_\nu] / 4bT^3 \end{aligned}$$

$$n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle_{12} = \left(\frac{8}{\pi m_{12}} \right)^{1/2} \frac{n_1 n_2}{(T)^{3/2}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{2\pi}{\hbar} \sqrt{\frac{m_{12}}{2E}} Z_1 Z_2 e^2 \right) S(E) e^{-E/T} dE$$

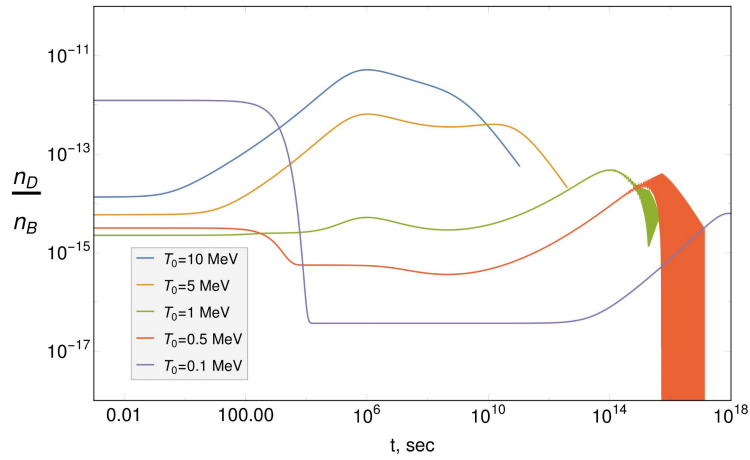
Алгоритм расчетов

- 1) Явная оценка температуры: $T_{i+1}^{(1)} - T_i = F_T(T_i, n_i, t)dt_i$
- 2) Неявная оценка концентраций $n_{i+1}^{(1)} - n_i = F_n(T_{i+1}^{(1)}, n_{i+1}^{(1)}, t)dt_i$
- 3) Пересчет температуры $T_{i+1} - T_i = F_T(T_{i+1}^{(1)}, n_{i+1}^{(1)}, t)dt_i$
- 4) Пересчет концентраций $n_{i+1} - n_i = F_n(T_{i+1}, n_{i+1}, t)dt_i$
- 5) Расчет концентраций электронов и позитронов
- 6) Выбор размера следующего шага по времени (минимальное из времен, необходимых для падения концентрации в 2 или роста в 10 раз или падения температуры на 10%)

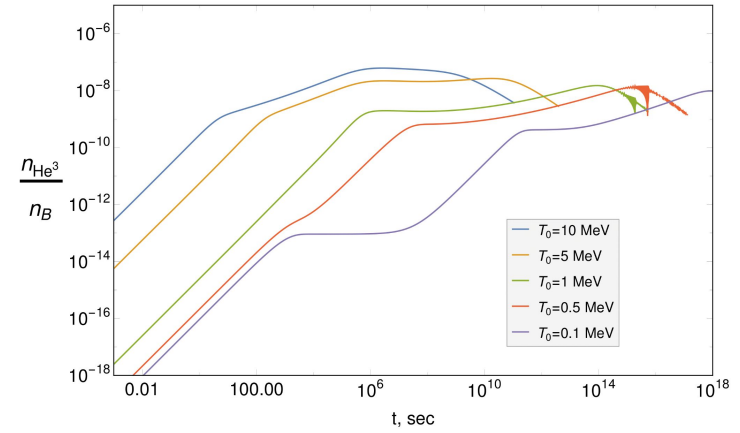
Protons

He⁴ ratio

Deuterium



Helium-3



Заключение

В рамках предположения о возможности формирования в ранней Вселенной стабильных горячих областей, отцепившихся от расширения, рассмотрен процесс формирования их химического состава. Разработана методика расчета этого процесса и получены первые оценки концентраций элементов, согласно которым большая часть начальных барионов преобразуется в гелий-4 и более тяжелые элементы для большинства рассмотренных начальных температур

Запасные слайды

$$n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle_{12} = \left(\frac{8}{\pi m_{12}} \right)^{1/2} \frac{n_1 n_2}{(T)^{3/2}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{2\pi}{\hbar} \sqrt{\frac{m_{12}}{2E}} Z_1 Z_2 e^2 \right) S(E) e^{-E/T} dE$$

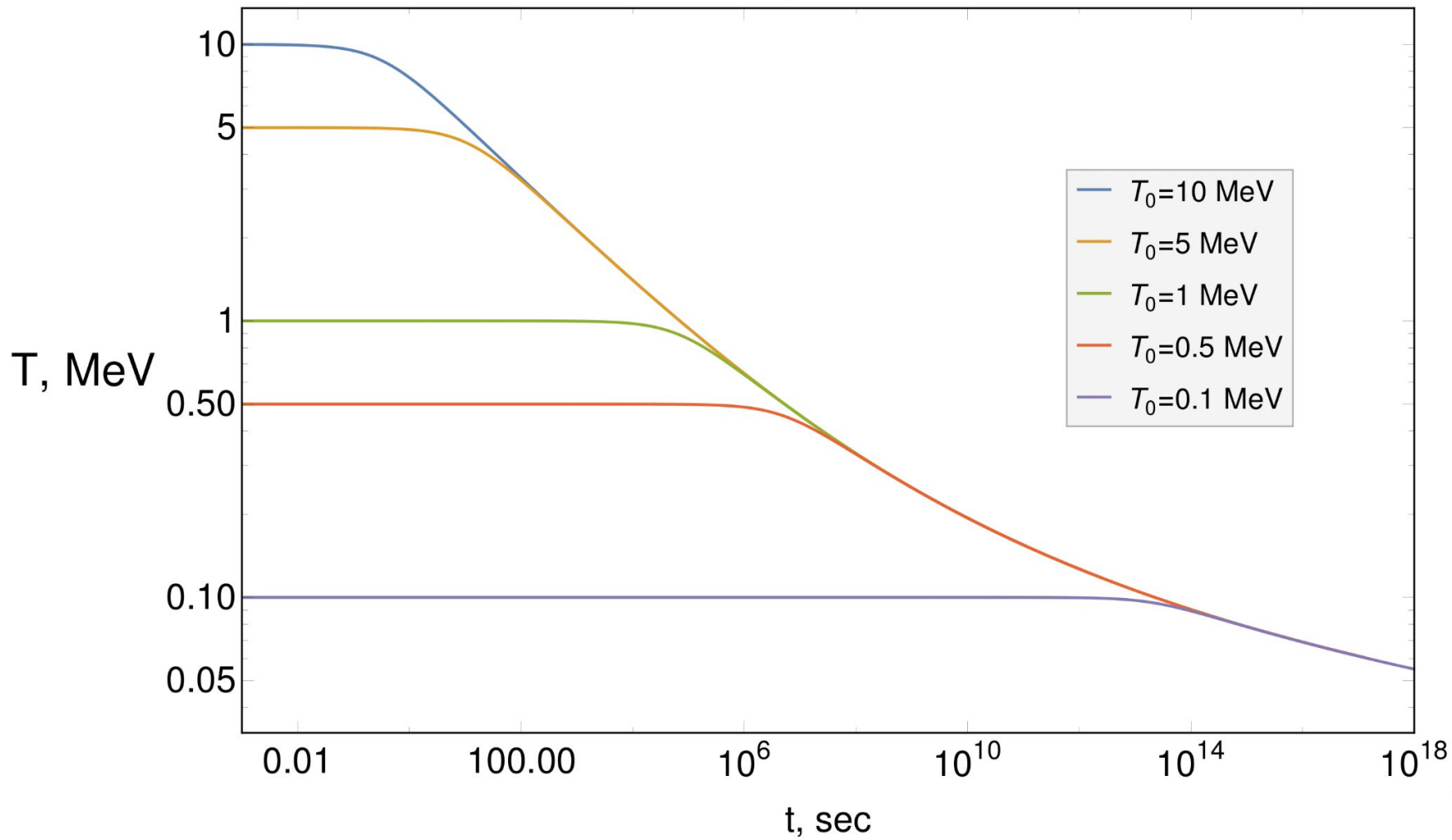
$$S(E) \approx S(0) + S'(0)E + \frac{1}{2}S''(0)E^2$$

Reaction	$S(0)$ MeV b	$S'(0)$ b	$S''(0)$ MeV ⁻¹ b
p(p, e ⁺ ν)d	3.94×10^{-25}	4.61×10^{-24}	2.96×10^{-23}
p(n, γ)d	7.30×10^{-20}	-1.89×10^{-19}	2.42×10^{-19}
d(p, γ) ³ He	0.20×10^{-6}	5.60×10^{-6}	3.10×10^{-6}
³ He(³ He, 2p)α	5.18	- 2.22	0.80

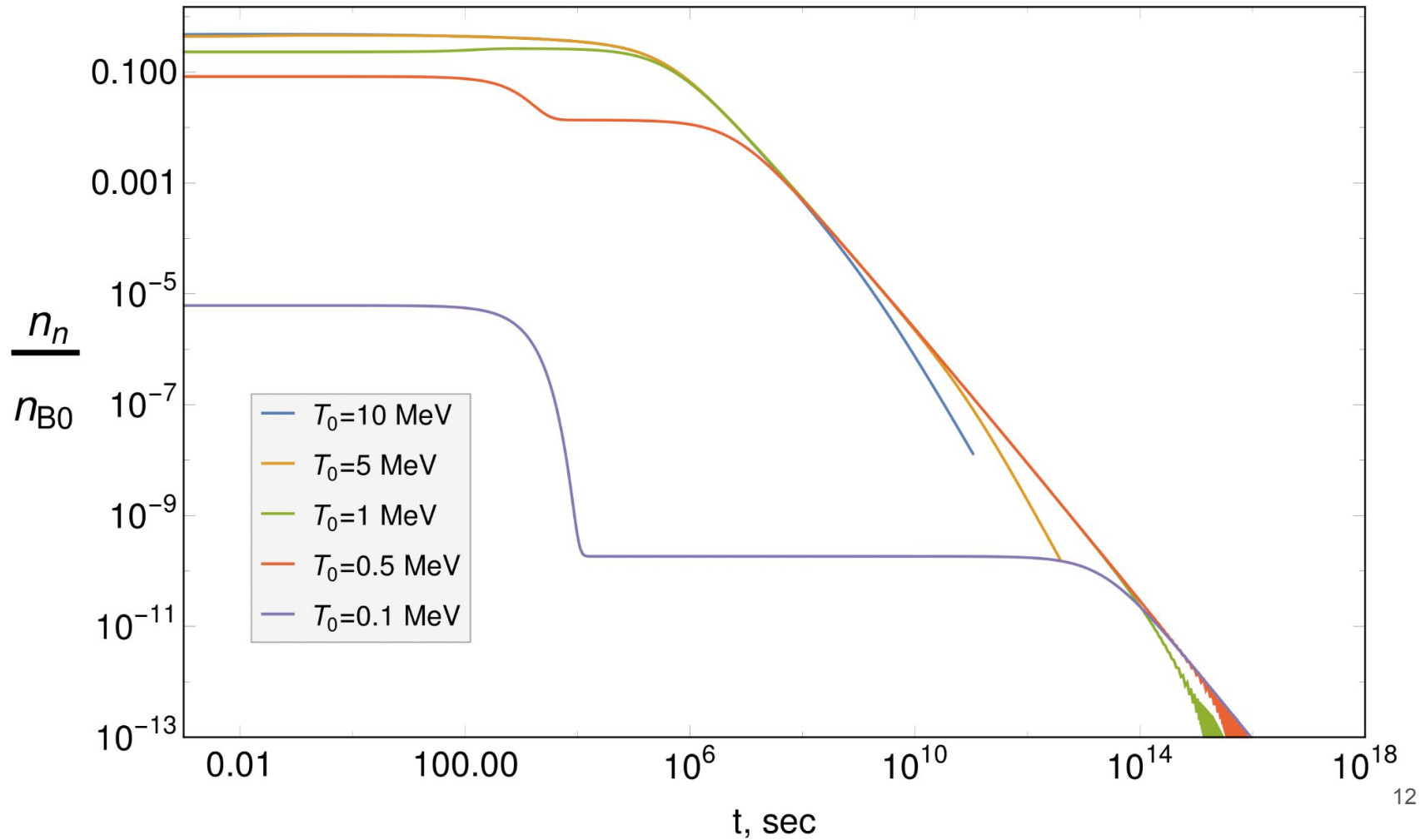
$$\sigma_{en} = \sigma_{ee} = \sigma_w, \quad \sigma_{ep} = \sigma_w \exp\left(-\frac{Q}{T}\right),$$

$$\sigma_w \sim G_F^2 T^2, \quad Q = m_n - (m_e + m_p) = 0.77 \text{ MeV.}$$

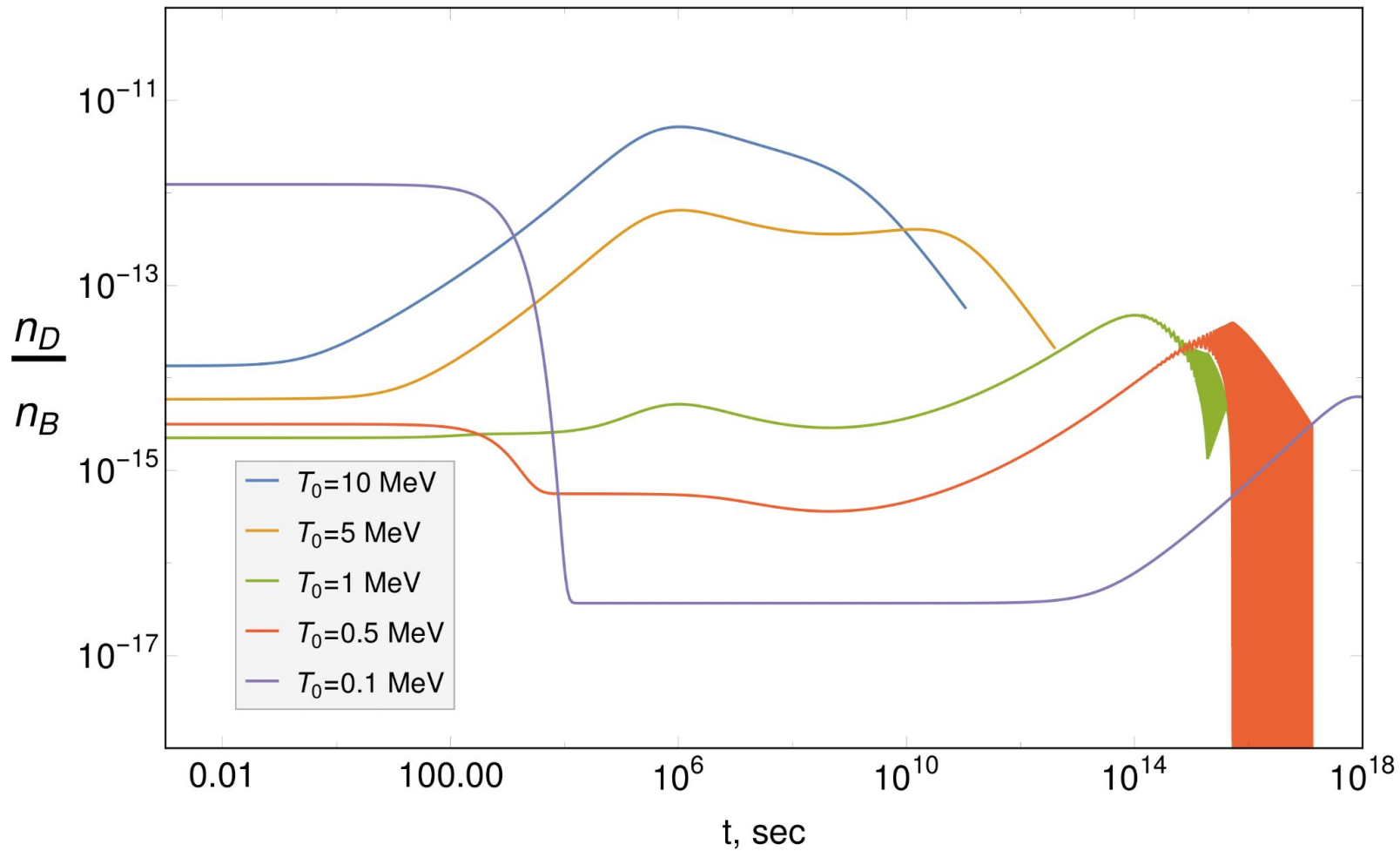
Temperature



Neutrons



Deuterium



Helium-3

