

Химическая эволюция домена антивещества в ранней барион-асимметричной Вселенной

Отчет о научно-исследовательской работе

Студент: Дембицкая А.И

Научный руководитель: д. ф. - м. н., проф. Хлопов М.Ю

Параметры домена

$$10^3 M_{\odot} \leq M \leq 10^5 M_{\odot}$$

$$3 \times 10^{-12} \leq \eta \leq 1 \times 10^{-6}$$

$$R \sim \left(\frac{M}{m_p \eta T^3} \right)^{\frac{1}{3}}$$

В радиационную эпоху размер горизонта
превысит размер домена

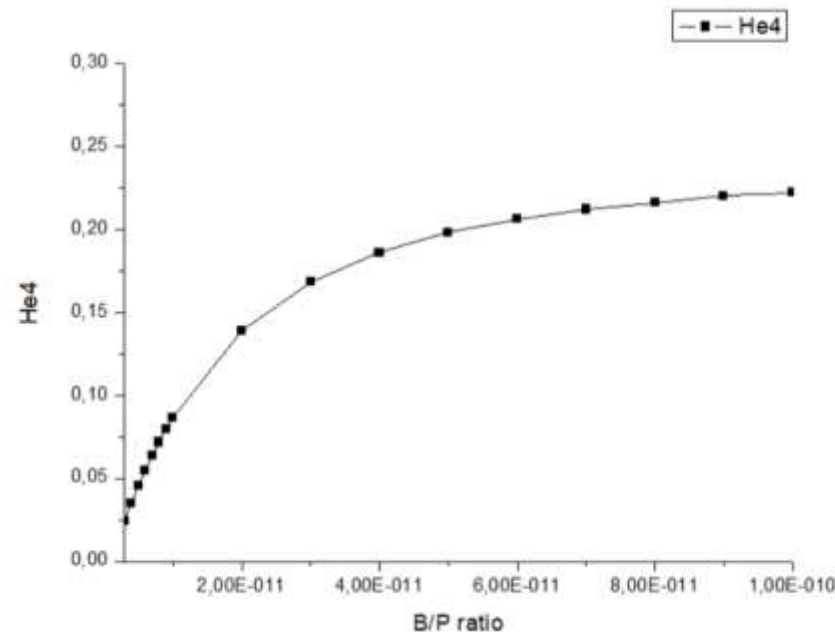


Рисунок 1 — График зависимости
массовой доли ${}^4\text{He}$
от барион-фотонного отношения.

Процессы внутри домена

Образование электрон-позитронных пар

$$T \in [5, 65 \times 10^8, 10^7] \text{К}$$

Формула Брейта-Уилера:

$$\sigma \approx \pi r_e^2 \left(\frac{m_e^2}{s} \right) \ln \left(\frac{s}{m_e^2} \right)$$

Полученное значение:

$$\sigma_{eff} = 8.4 \times 10^{-22} \text{ см}^2$$

Комптоновское рассеяние

$$T \leq 10^7 \text{К}$$

Формула Клейна-Нишины:

$$\sigma = \sigma_\tau f(x),$$
$$f(x) = \frac{3}{8x} \left(\ln 2x + \frac{1}{2} \right)$$

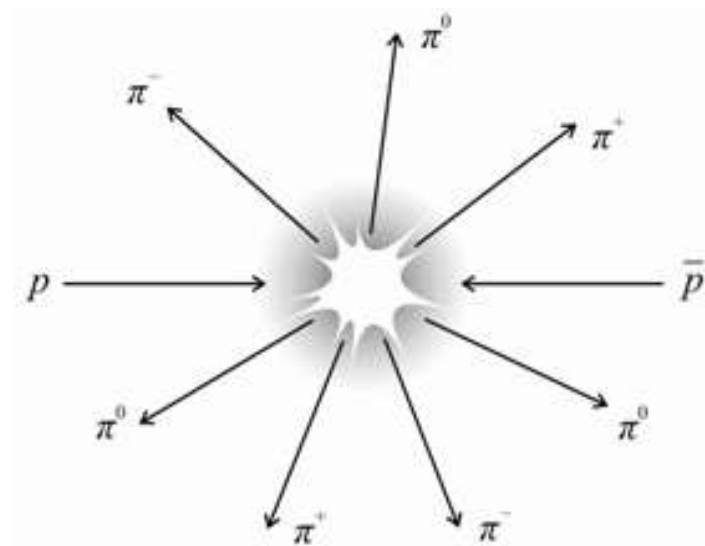
Полученное значение:

$$\sigma_k = 10^{-26} \text{ см}^2.$$

Протон-антипротонная аннигиляция

Основные каналы:

- образование фотонов при распаде нейтрального пиона
- образование электронов и позитронов при распаде заряженных пионов с промежуточным образованием мюонов



Характер процесса зависит от диффузии антипротонов
вблизи границы домена

Диффузия

Уравнение Фика:

$$\frac{\partial n_b}{\partial t} = D(t) \frac{\partial^2 n_b}{\partial x^2} - \alpha n_b$$



$$D(t) = \frac{1}{3} \lambda v$$

Антипротоны в домене диффундируют к его границе

Основные параметры, влияющие на диффузию:

- Скорость частиц
- Характер процесса (сечение реакции)
- Концентрация частиц

Коэффициент диффузии
зависит от
рассматриваемой эпохи
эволюции Вселенной

Радиационная эпоха

Доминирующий
процесс:
комптоновское
рассеяние фотонов на
позитронах

$$D_{RD}(t) \propto \frac{c}{\sigma_{\tau} f(x) T^3} = \frac{ct^{\frac{3}{2}}}{\sigma_{\tau} f(x) 10^{30}}$$

$$\sigma_{eff} = N < \sigma >$$

Основные зависимости:

$$v = c$$

$$a(t) = \text{const} \times t^{\frac{1}{2}}$$

$$n_e \propto a(t)^{-3}$$

$$f(x) = \frac{3}{8 \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2}} \left(\ln 2 \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} + \frac{1}{2} \right)$$

Полученный коэффициент
диффузии:

$$D_{RD}(t) \propto \frac{t^{\frac{3}{2}}}{\sigma_{eff}} \propto t^{\frac{3}{2}}$$

Эпоха доминирования вещества

До рекомбинации

Доминирующий процесс:
томпсоновское рассеяние фотонов
на свободных позитронах

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

Коэффициент диффузии:

$$D_{DM}(t) \propto \frac{t^{\frac{5}{3}}}{\sigma_{\tau}} \propto t^{\frac{5}{3}}$$

После рекомбинации

Доминирующий процесс: рассеяние
фотонов на позитронах атома
антиводорода

$$T_{rec} = 3 \times 10^3 \text{K} \approx 0,3 \text{эВ}$$

$$a(t) \propto t^{\frac{2}{3}}$$

Коэффициент диффузии:

$$D_{MD}(t) = \frac{45}{4\pi^2 \sigma_{\tau} T^3} \propto \frac{1}{\sigma T_{\gamma}^3} \propto \frac{t^2}{\sigma_{\tau}}$$

Ионизация внутри домена

Поток фотонов ионизирует антивещество

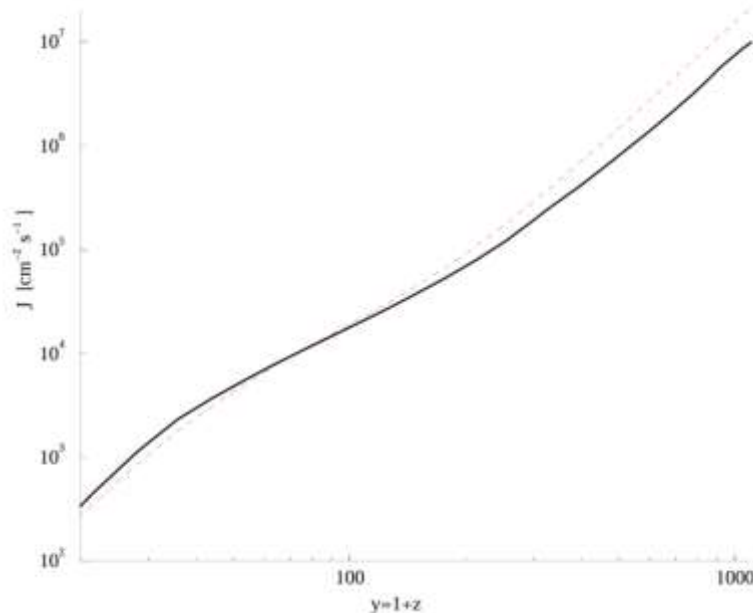


Рис 2-График зависимости скорости аннигиляции от красного смещения

Скорость аннигиляции:

$$R_{ann} = \frac{J}{l_{diff}} \exp\left(-\frac{x}{l_{diff}}\right)$$

Полученная формула:

$$\langle x_e \rangle_{src} = \frac{\int_0^\lambda \sqrt{\frac{NR_{ann}}{\alpha_B(T) \langle n_p \rangle^2}} R_{ann} dx}{\int_0^\lambda R_{ann} dx}$$

Полностью ионизированная плазма
при любой температуре

Результаты

Получена оценка коэффициента диффузии для различных эпох эволюции Вселенной

Получена формула для оценки степени ионизации в эпоху доминирования вещества

Оценена степень ионизации приграничной области домена

Перспективы:

Исследование эволюции домена с учетом области, содержащей полностью ионизированную плазму

Учет расширения Вселенной при описании процессов внутри домена

Спасибо за внимание