

# 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

# Объект исследований-домен антивещества

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

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

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

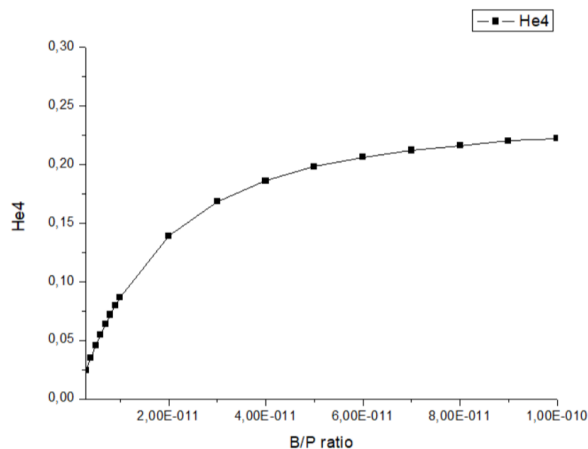


Рисунок 1 — График зависимости массовой доли  $4\text{He}$  от барион-фотонного отношения.

В радиационную эпоху размер горизонта  
превысит размер домена



## Протон-антипротонная аннигиляция

$$T \in [4, 5 \times 10^8, 10^7] \text{ К}$$

$$T \leq 10^7 \text{ К}$$

Образование  
электрон-позитронных  
пар

Комптоновское  
рассеяние

$$\sigma = \sigma_{\tau} f(x),$$

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

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

$$\sigma_{pp} \approx 2,1 \times 10^{-28} \text{ см}^2$$

$$\sigma_k \approx 8,4 \times 10^{-22} \text{ см}^2$$

# Диффузия

*Антипротоны в домене диффундируют к его границе*

Модифицированное уравнение Фика:

$$\frac{\partial n_b}{\partial t} = \frac{D(t)}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial n_b}{\partial r} \right) - \Gamma_{\text{ann}}(r) n_b - \beta n_b$$



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

Радиационно-доминированная эпоха

Доминирующий процесс:  
комптоновское рассеяние

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

Эпоха доминирования вещества

Доминирующий процесс:  
радиационное трение

$$D(t) \propto \frac{t^2}{\sigma_{\tau}} \propto t^2$$

# Ионизация внутри домена

УФ-фотоны, рождающиеся при обратном комптоновском рассеянии релятивистских электронов, ионизуют нейтральный антиводород в тонком приграничном слое домена

Длина пробега  
УФ-фотонов:

$$\lambda_{\text{УФ}} = \frac{1}{n_H \sigma_{\text{ion}}}$$

Поток  
УФ-фотонов:

$$F_{\text{UV}}(r) \approx \frac{J\bar{g}}{40} \cdot \frac{R^2}{r^2} \exp\left(-\frac{R-r}{L_e}\right)$$

Длина пробега  
электронов:

$$L_e(z) \approx \frac{m_e c^2}{K_\gamma(z)} \arcsin \beta_0$$

Степень ионизации:

На границе:  $\approx 1$

В ионизованном слое:  $\approx 0,22$

В основном объеме:

экспоненциально спадает  
до 0

Средняя степень ионизации по объему:

$$\langle x_e \rangle \approx \frac{6\lambda_{\text{УФ}}}{R} x_e(R) \approx \frac{6\lambda_{\text{УФ}}}{R} \propto \eta^{-\frac{2}{3}} M^{-\frac{1}{3}} T^{-2}$$

$$\frac{\partial x_e}{\partial t} = \bar{\sigma}_{\text{ion}} F_{\text{UV}}(r, t) n_H (1 - x_e) - \alpha_B(T) n_H x_e^2$$

# Применимость модели

## Основные ограничения:

- Скорость аннигиляции  
-замедляется, начиная с  $T=100\text{K}$
- Средняя длина свободного пробега электронов  
-увеличивается с ростом температуры
- Слабая ионизация

## Полученные критерии:

$$J(T) = J_0 \left( \frac{T}{10^4 \text{ K}} \right) \cdot f_{\text{IGM}}(T)$$

$$T \geq \left( \frac{m_p}{\sigma_{ion}^3} \right)^{\frac{1}{6}} \left( \frac{1}{0,24\eta^2 M} \right)^{\frac{1}{6}}$$

Границы применимости модели определяются плотность домена

Модель применима только для доменов с низкой плотностью антибарионов

$$\eta \lesssim 10^{-9}$$

# Внутренние включения вещества

## Различные сценарии

Один домен вещества в центре

$$x_e(r) \approx \sqrt{\frac{\xi_{\text{ion}} Q_{\text{ann}}(r)}{\alpha_B \Delta E_{\text{ion}} n_H^2}}$$

Много доменов по всему объему

$$x_e^{(\text{int})} = \sqrt{\frac{\xi_{\text{ion}} \bar{f}_m \langle \sigma v \rangle_{\text{int}} n_b^{(\text{inc})} \bar{n}_b \varepsilon_{\text{ann}}}{\alpha_B \Delta E_{\text{ion}} n_H^2}}$$

Дополнительный источник ионизации:

$$\frac{\partial x_e}{\partial t} = \bar{\sigma}_{\text{ion}} F_{\text{UV}}(r, t) n_H (1 - x_e) - \alpha_B(T) n_H x_e^2 + \xi_{\text{ion}} \frac{Q_{\text{ann}}(r, t)}{\Delta E_{\text{ion}} n_H}$$

Критерий выживания домена антивещества:

$$\int_{t_i}^{t_{\text{now}}} \bar{f}_m(t) \langle \sigma v \rangle_{\text{int}}(t) \bar{n}_b^{(\text{inc})}(t) dt \lesssim 1$$

# Размер области выхода излучения

$$T > 10^7 \text{ К}$$

Основные процессы:

1. Образование электрон-позитронных пар
2. Комptonовское аннигиляционное рассеяние фотона на электроны
3. Торможение аннигиляционного электрона/позитрона на тепловом фотоне (обратное рассеяние)
4. Аннигиляция позитронов с электронами

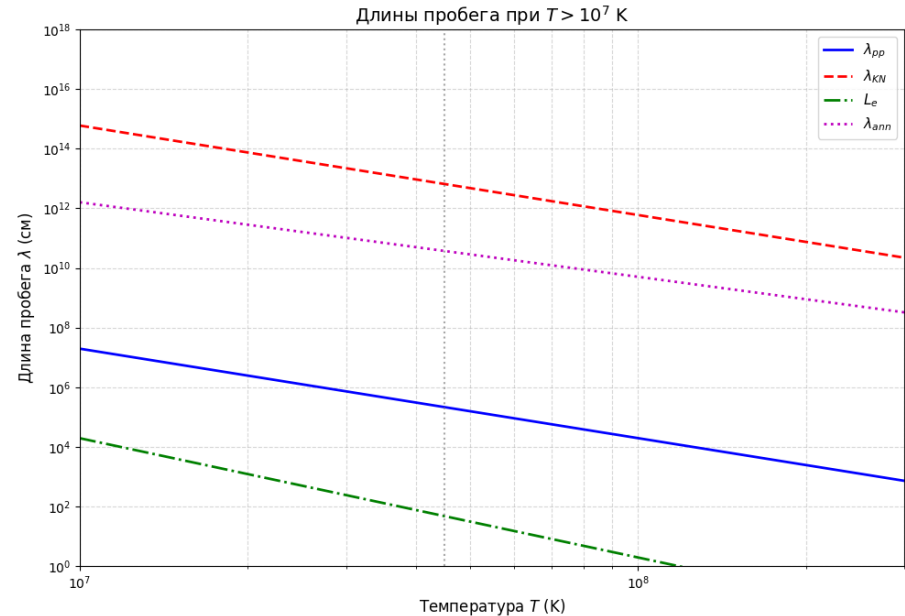


Рисунок 2 — График зависимости размера области от температуры для различных процессов

$$R_{glow} \leq 2 \times 10^4 \text{ см}$$

# Размер области выхода излучения

$$T \in [10^7, 3 \times 10^3] K$$

Основные процессы:

1. Комptonовское рассеяние аннигиляционного фотона на электроне
2. Торможение аннигиляционного электрона/позитрона на тепловом фотоне (обратное рассеяние)
3. Аннигиляция позитронов с электронами

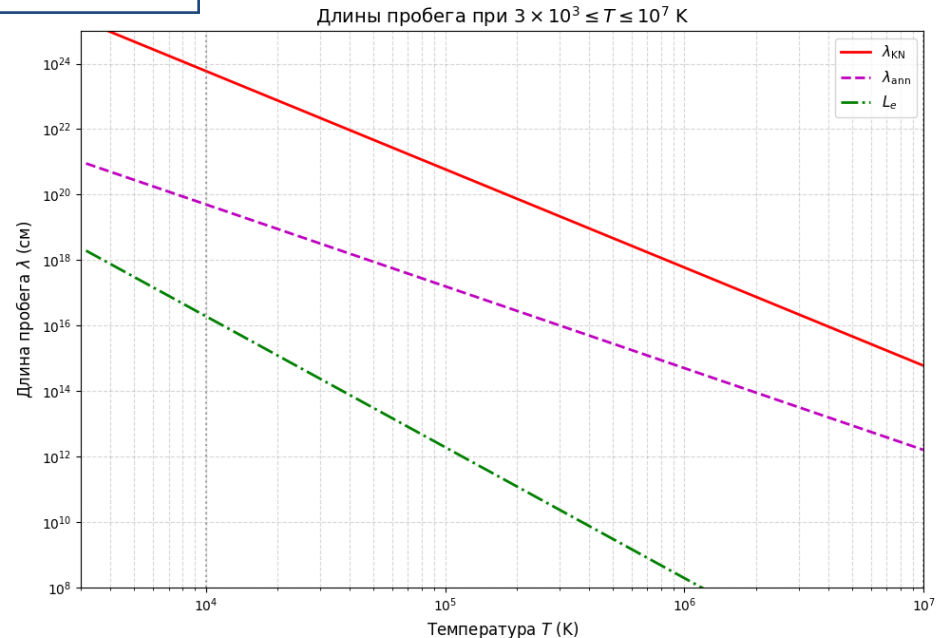


Рисунок 3 — График зависимости размера области от температуры для различных процессов

$$R \in [2 \times 10^4, 6 \times 10^{16}] \text{ см}$$

# Размер области выхода излучения

$$T < 3 \times 10^3 \text{ К}$$

## Основные процессы:

1. Комptonовское рассеяние аннигиляционного фотона на электроны
2. Торможение аннигиляционного электрона/позитрона на тепловом фотоне (обратное рассеяние)
3. Аннигиляция позитронов с электронами
4. **Рассеяние на атомах водорода**

$$R \geq 2 \times 10^{14} \text{ см}$$

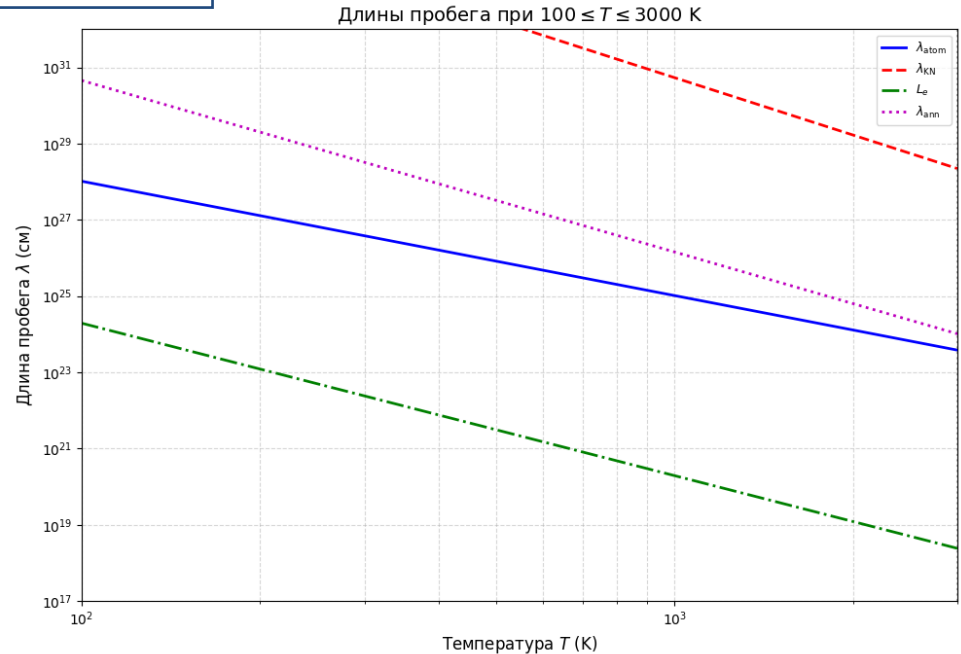


Рисунок 4 — График зависимости размера области от температуры для различных процессов

# Результаты

- Исследован процесс ионизации в приграничной области домена
- Определены границы применимости модели
- Рассмотрены сценарии существования внутренних включений вещества
- Оценены размеры области излучения при различных температурах

## Перспективы:

- Учет внутренних включений при описании эволюции домена
- Исследование энерговыделения от невыживших доменов
- Исследование эволюции размера области излучения со временем
- Оценка возможности наблюдения невыживших доменов

**Спасибо за внимание**