

# Исследование химической эволюции доменов 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

# Размер домена антивещества

Главные параметры:

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

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

Основная формула:

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

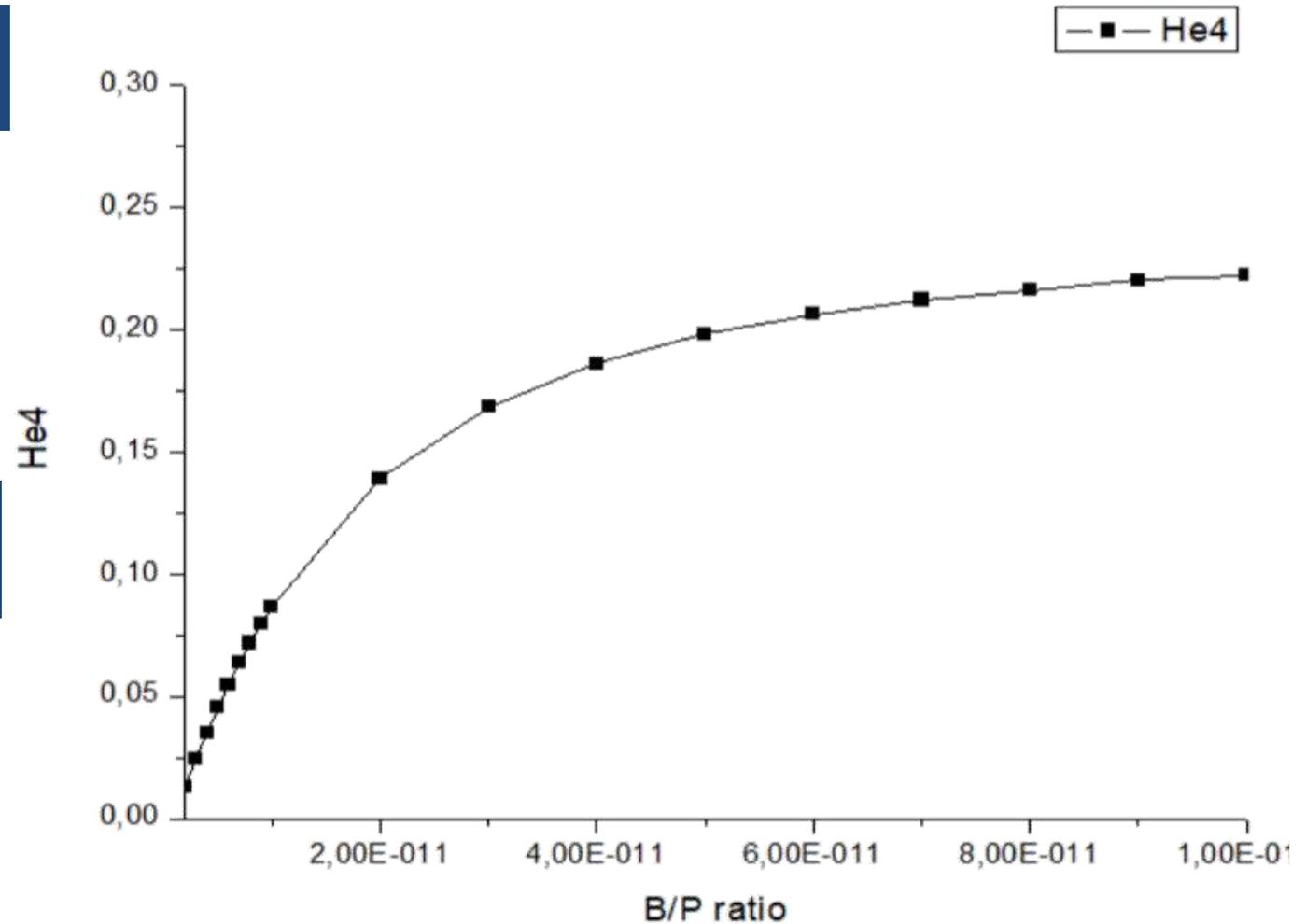


Рисунок 1 — График зависимости массовой доли  ${}^4\text{He}$  от барион-фотонного отношения.

# Процессы на границе домена

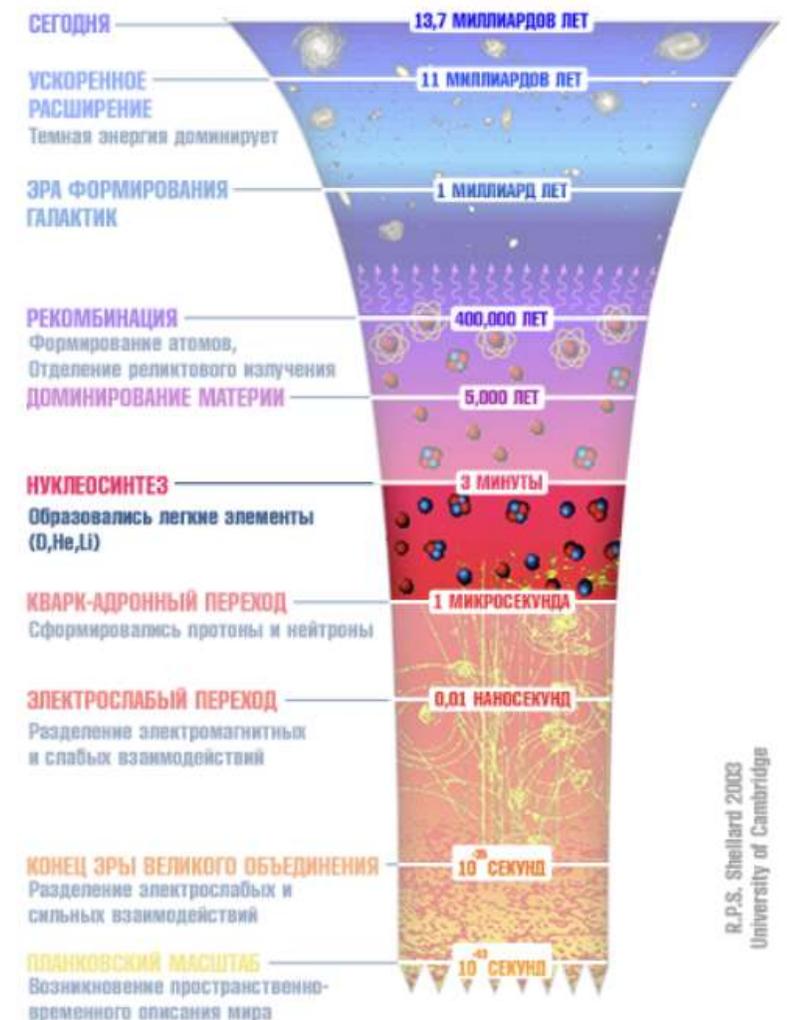
На границе домена с горизонтом будет происходить аннигиляция

Условие:  $ct \geq R$

$$t \geq \left( \frac{M}{c^3 m_p \eta 10^{30}} \right)^{2/3}$$

$$t_{min} = 1,25 \times 10^3 \text{c}$$

Продукты аннигиляции проникают внутрь домена



# Протон-антипротонная аннигиляция

## Основные каналы:

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

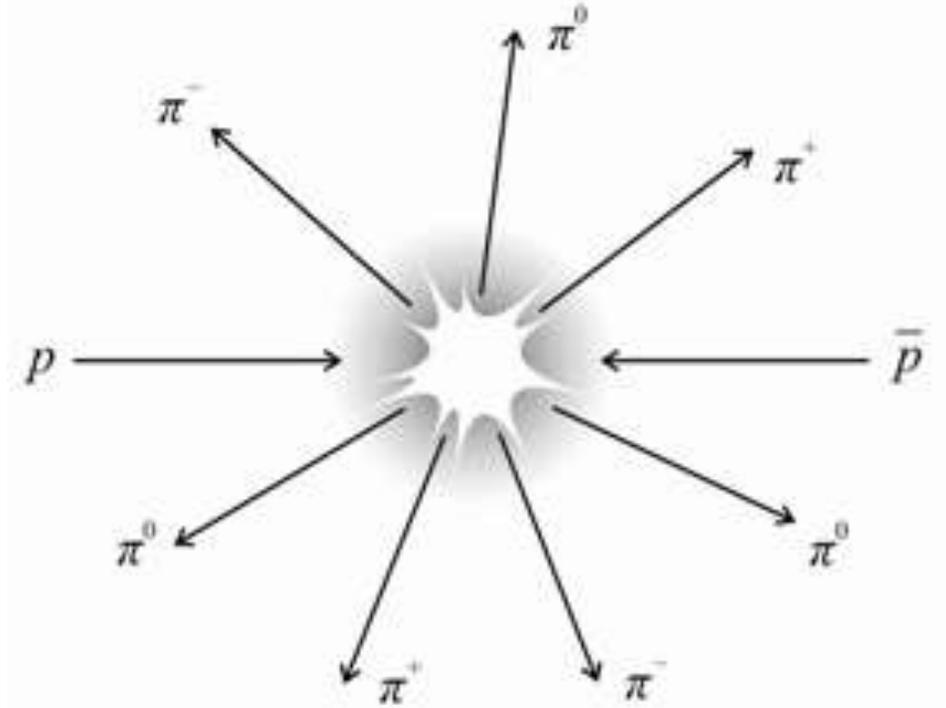
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

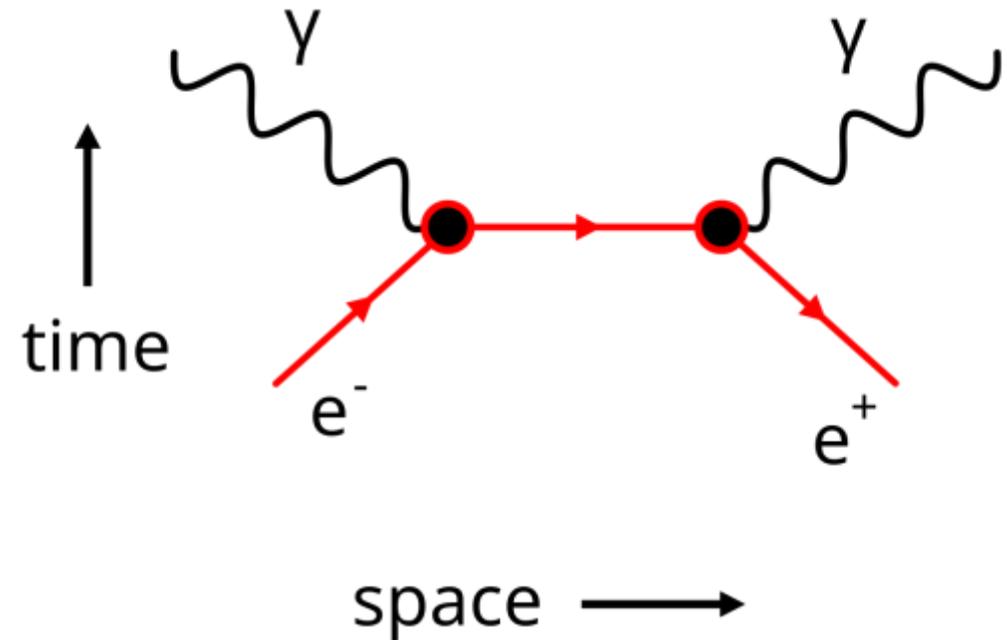


# Электрон-позитронная аннигиляция

*Внутри домена возможна аннигиляция  
позитрона с электроном*

## Источники электронов:

- образование электрон-позитронных пар при взаимодействии аннигиляционного фотона с тепловым
- образование электрона при распаде отрицательно заряженного мюона



# Процессы внутри домена

## Образование электрон-позитронных пар

$$T = 2,83 \times 10^8 \div 10^7 \text{K}$$

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:

$$\sigma_{pp} \approx 10^{-26} \text{cm}^2$$

## Комптовское рассеяние

$$T \leq 10^7 \text{K}$$

Формула Клейна-Нишины:

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

Полученное значение:

$$\sigma_k = 10^{-26} \text{cm}^2.$$

# Длина пробега фотонов

## Образование электрон-позитронных пар

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma},$$

$$n_\gamma \sim T^3$$

$$\lambda_{pp} = \frac{1}{T^3 \sigma_{pp}}$$

$$10\text{см} \leq \lambda_{pp} \leq 10^5\text{см}$$

## Комптоновское рассеяние

$$n_p = \frac{\rho Z}{m_p},$$

$$\rho = n_\gamma \eta m_p = T^3 \eta m_p$$

$$\lambda_k = \frac{1}{T^3 \eta Z \sigma_k}$$

$$\lambda \geq 10^{11}\text{см}$$

Как это соотносится с размером домена?

# Глубина проникновения фотонов

## Образование электрон-позитронных пар

$$10\text{см} \leq \lambda_{pp} \leq 10^5\text{см}$$

Сравним с размером домена:

$$R_{min} \approx 10^{13}\text{см};$$

$$R_{max} \approx 10^{17}\text{см}.$$

Глубина проникновения фотонов  
значительно меньше радиуса  
домена

## Комптоновское рассеяние

$$t < \frac{Z 10^{20} \sigma_k \eta^{\frac{2}{3}} M^{\frac{1}{3}}}{m_p^{\frac{1}{3}}}$$

С учетом ограничений  
на температуру:

$$\begin{cases} t > 10^6\text{с} \\ t < \eta^{\frac{2}{3}} M^{\frac{1}{3}} \times 10^2\text{с} \end{cases}$$

# Результаты

- Исследованы процессы на границе домена антивещества с горизонтом
- Определена длина пробега фотонов, образующихся в результате протон-антипротонной аннигиляции
- Проведено сравнение глубины проникновения фотонов внутрь домена антивещества с его размером

## Перспективы:

В дальнейшем планируется более точное и подробное описание процессов, происходящих как на границе, так и внутри домена с учетом различных факторов, а также исследование эволюции домена во времени

**Спасибо за внимание**