

Химическая эволюция домена антивещества в ранней барион-асимметричной Вселенной

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Выполнила: Дембицкая А.И.

Группа: Б22-102

Научный руководитель: Хлопов М.Ю.

Проблема барионной асимметрии

Одной из наиболее фундаментальных загадок современной космологии и физики элементарных частиц является **барионная асимметрия Вселенной**— наблюдаемое преобладание материи над антиматерией

При определенных сценариях, включающих в себя неоднородность бариосинтеза на малых масштабах, возможно образование локальных областей, состоящий из антивещества-**доменов**

Ограничения на массу домена антивещества

■ Чтобы домен дожил до современной эпохи, он должен быть достаточно массивным

■ Гамма-фон, возникающий в результате процессов аннигиляции, должен соответствовать наблюдаемому

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



AMS-02 первый большой магнитный спектрометр, работающим в космосе, предназначен для сбора информации о космических лучах, в том числе о частицах антиматерии

Цель:

Исследование эволюции домена антивещества в ранней барион-асимметричной Вселенной

Задачи:

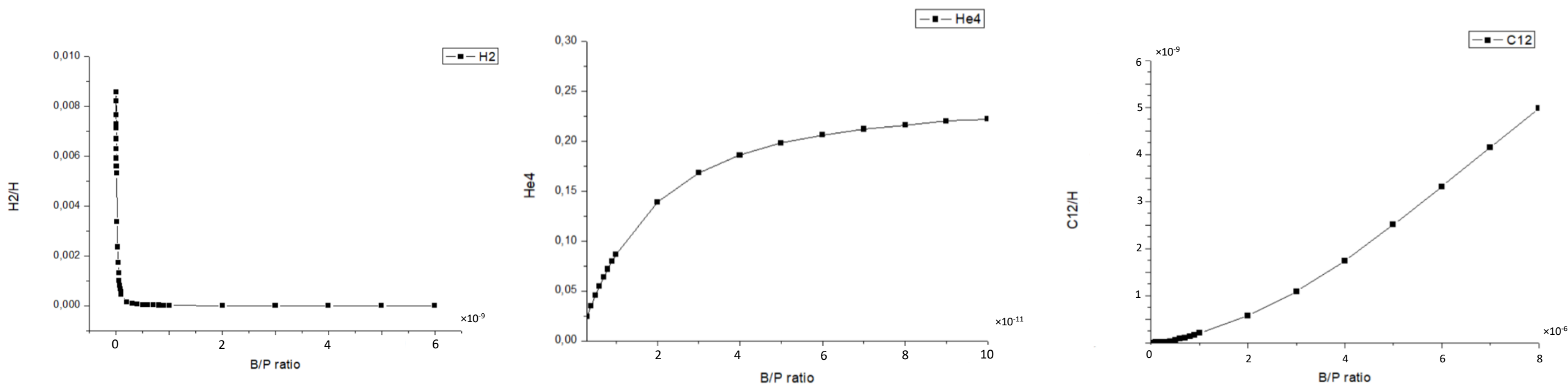
- Определить допустимый диапазон антибарион-фотонного отношения для домена антивещества на основе нуклеосинтеза Большого Взрыва. Исходя из полученных ограничений оценить размер домена;
- Вычислить глубину проникновения продуктов аннигиляции барионов с антибарионами внутрь домена, выделить доминирующий процесс в различных температурных диапазонах;
- Сравнить полученные длины пробега с размером домена для различных эпох;
- Построить модель диффузии антибарионов к границе домена в сферическом приближении;
- Оценить степень ионизации домена после эпохи рекомбинации;
- Рассмотреть случай неоднородного распределения антивещества внутри домена с учетом возможности образования внутренних барионных включений;
- Исследовать вопрос энерговыделения от невыживших доменов.

Плотность домена

Продукты звездного нуклеосинтеза не могут попадать внутрь домена. Таким образом, домен должен обладать **нулевой металличностью**

Для анализа зависимости массовых долей химических элементов от барион-фотонного отношения была использована программа **AlterBBN** - общедоступная программа на C, вычисляющая содержание элементов, формирующихся в процессе Большого взрыва

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



Графики зависимости массовой доли различных элементов от барион-фотонного отношения.

Процессы на границе

Размер сферически симметричного домена:

$$R = \left(\frac{Mt^{\frac{3}{2}}}{0,24m_p\eta 10^{30}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Момент времени входа домена под горизонт:

$$t_{\text{form}} = \frac{1}{4c^2} \left(\frac{M}{0.24 m_p \eta T_0^3} \right)^{2/3} \cdot \frac{1}{t_0}$$

В радиационную эпоху размер горизонта превышает размер домена

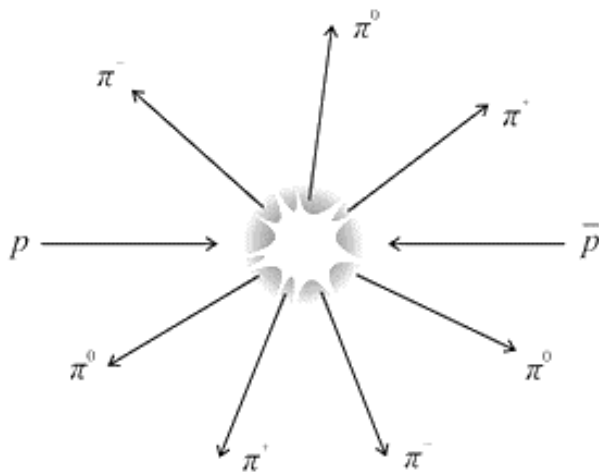


Протон-антипротонная аннигиляция

Основные каналы реакции:

■ Образование фотонов в результате распада нейтральных пионов

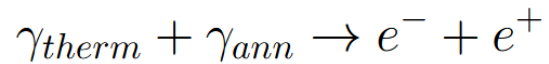
■ Образование электронов и позитронов в результате распада заряженного пиона



Процессы внутри домена

$$T > 10^7$$

Доминирующий процесс:
образование электрон-позитронных пар



Концентрация высокоэнергетичных фотонов:

$$n_{\gamma_high} \approx n_{\gamma} \left(\frac{E_{min}}{kT} \right)^2 e^{-\frac{E_{min}}{kT}}$$

Формула Брейта-Уилера: $\sigma_{pp} \approx \frac{\pi\alpha^2}{s} \left[2 \ln \left(\frac{s}{m_e^2} \right) - 1 \right]$

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

$$\lambda_{pp} = \frac{1}{0,24T^3\sigma_{pp}}$$

$$T \leq 10^7$$

Доминирующий процесс:
многократное комптоновское рассеяние

$$N > 2,5 \times 10^3$$

Формула Клейна-Нишины:

$$\sigma_{KN} = \sigma_{\tau} f(x)$$

$\sigma_{\tau} = \frac{8\pi r_e^2}{3}$ - томпсоновское сечение рассеяния,
 $f(x)$ -поправочный фактор, учитывающий релятивистские эффекты,
 x -безразмерная энергия фотона

В момент вхождения под горизонт:

$$\sigma_k = 10^{-26} \text{ см}^2$$

$$\lambda_k = \frac{1}{0,24T^3\eta Z\sigma_{eff}}$$

Глубина проникновения продуктов аннигиляции значительно меньше размера домена, что свидетельствует о наличии области однородности

Диффузия

Процесс диффузии в домене в сферическом приближении описывается модифицированным **уравнением Фика**:

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

Коэффициент диффузии:

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

Аннигиляционное слагаемое

Слагаемое, учитывающее расширение Вселенной

Радиационно-доминированная эпоха

Доминирующий процесс:
Комптоновское рассеяние

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

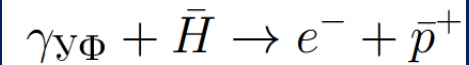
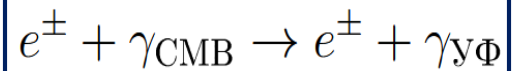
Эпоха доминирования вещества

Доминирующий процесс:
Радиационное трение

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

Ионизация

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



Поток УФ-фотонов

$$F_{\text{UV}}(r) \approx \frac{J\bar{g}\kappa_{\text{UV}}L_e}{4} \cdot \frac{R^2}{r^2} \exp\left(-\frac{R-r}{L_e}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{L_e}{\lambda_{\text{UV}}}\right)\right]$$

Средняя степень ионизации по объему:

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

Уравнение ионизации:

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

Степень ионизации:

На границе: 1

В ионизованном слое: 0,22

В основном объеме: экспоненциально спадает до нуля

В среднем по объему домен
можно считать нейтральным

Энерговыведение

Если масса домена недостаточно велика (менее $10^3 M_{\odot}$), аннигиляция приведет к его уничтожению

Динамика энерговыведения:

$$\frac{dQ}{dt} = 4\pi(0.24)^{1/3} \left(\frac{M}{m_p}\right)^{2/3} \eta^{1/3} v_{\text{ann}} \epsilon_{\text{ann}} T \Phi(T)$$

Основные процессы:

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

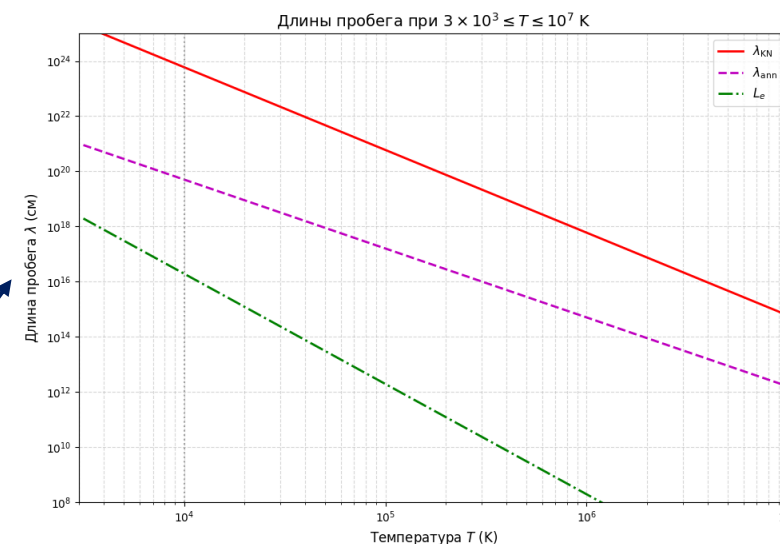
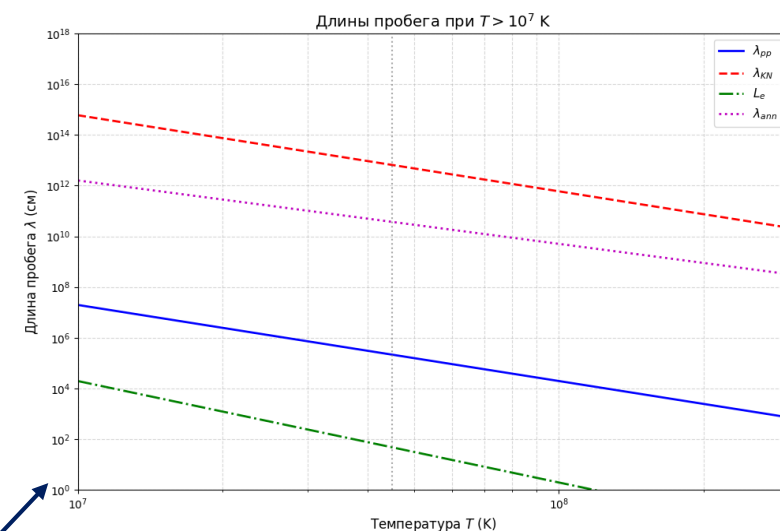
Длина пробега продуктов определяет размер области свечения

Доминирует при $T > 10^7$

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

Доминирует при $T \leq 10^7$

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



Заключение

■ Определен допустимый диапазон антибарион-фотонного отношения для домена антивещества, получена формула для оценки его размера:

$$3 \times 10^{-12} \leq \eta \leq 1 \times 10^{-6} \quad R = \left(\frac{Mt^{\frac{3}{2}}}{0,24m_p\eta 10^{30}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

■ Вычислена глубина проникновения продуктов аннигиляции барионов с антибарионами внутрь домена с учетом доминирующего процесса при различных температурах, проверено наличие области однородности;

■ Построена модель диффузии антибарионов к границе раздела домена с горизонтом в сферическом приближении: $D_{RD}(t) \propto \frac{t^{\frac{3}{2}}}{\sigma_{eff}} \propto t^{\frac{3}{2}} \quad D(t) \propto \frac{t^2}{\sigma_{\tau}} \propto t^2$

■ Построена модель ионизации домена после эпохи рекомбинации: $\langle x_e \rangle \approx \frac{6\lambda_{y\Phi}}{R} x_e(R) \approx \frac{6\lambda_{y\Phi}}{R} \propto \eta^{-\frac{2}{3}} M^{-\frac{1}{3}} T^{-2}$

■ Рассмотрен случай неоднородного распределения антивещества внутри домена с учетом возможности образования внутренних барионных включений;

■ Исследован вопрос энерговыделения от невыживших доменов, получены размеры области свечения:

$$R \leq 10^{16} \text{ см}$$

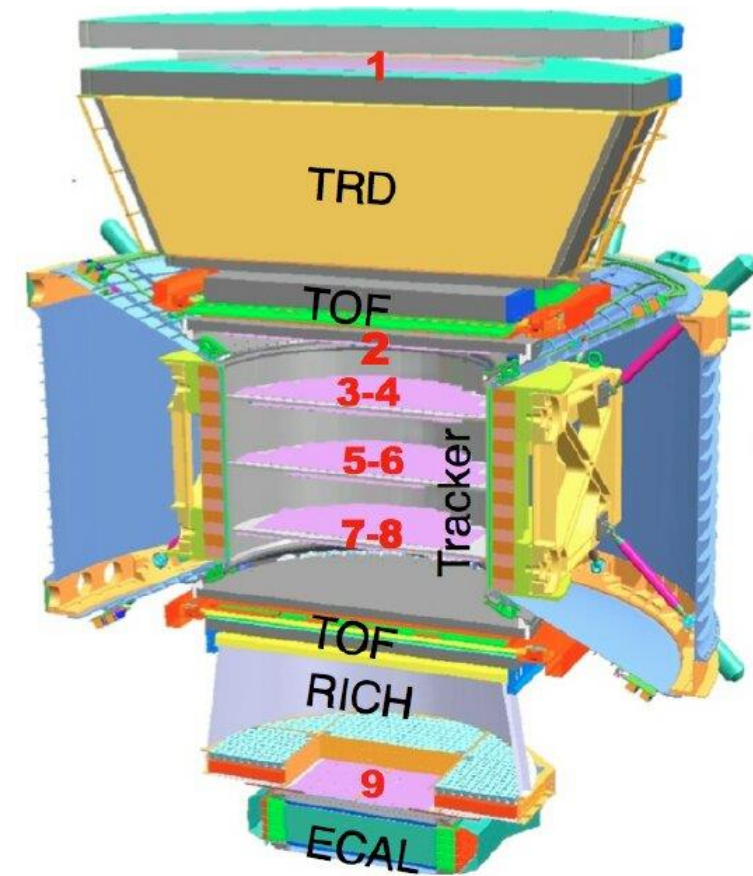
Апробация:

Результаты работы были представлены на трех международных конференциях: 28th workshop "What Comes Beyond the Standard Models", July 6–16, 2025, Bled; Conference on High Energy Physics "CHEP-YEREVAN 2025", September 29 – October 3, 2025, Yerevan, Armenia; 23th International Seminar on High-Energy Physics "QUARKS-2026", May 18–23, 2026, Petrozavodsk, Russia; а также на научной школе Moscow International School of Physics 2026, February 25 – March 4, 2026, HSE Study Center "Voronovo".

Спасибо за внимание

Поиск антигелия на AMS-02

1. **TRD** (Детектор переходного излучения): Проверяет ионизационные потери энергии, подтверждает абсолютную величину заряда частиц и отсекает фон
2. **TOF** (Верхние слои сцинтилляторов): Регистрирует точное время входа частицы в детектор, измеряя направление движения сверху вниз.
3. **Магнитная система**: Создает постоянное поле 0.14 Тесла для искривления траектории; отклоняет ядра обычного гелия в одну сторону, а ядра антигелия-в противоположную.
4. **Silicon Tracker** (Кремниевый трекер): Измеряет точную геометрию траектории для определения знака заряда и импульса, а также независимо замеряет амплитуду сигнала на каждом слое для подтверждения заряда $|Z| = 2$.
5. **ACC** (Система антисовпадений): Выдает сигнал вето, если обычное ядро гелия влетает сбоку или ударяется о стенки детектора, создавая ложные вторичные треки.
6. **TOF** (Нижние слои сцинтилляторов): Фиксирует время выхода частицы, вычисляет точную скорость (β) по общему времени пролета и дублирует замер величины заряда для исключения ошибок электроники.
7. **RICH** (Черенковский детектор): Регистрирует радиус черенковского светового кольца в аэрогеле, что позволяет вычислить точную массу ядра и разделить изотопы (антигелий-3 и антигелий-4).
8. **ECAL** (Электромагнитный калориметр): Измеряет полное энергосодержание в свинцово-сцинтилляционных слоях



Применимость модели ионизации

Основные ограничения:

- Скорость аннигиляции уменьшается, начиная с $T=100\text{K}$
- Средняя длина пробега электронов увеличивается с ростом температуры
- Модель применима только для описания слабой ионизации

Скорость аннигиляции:

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

Ограничения на температуру:

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

Границы применимости модели определяются плотностью домена

Модель не применима для доменов высокой плотности

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

Внутренние включения

Механизм неоднородного бариосинтеза не запрещает формирования внутри домена включений, состоящих из 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:

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