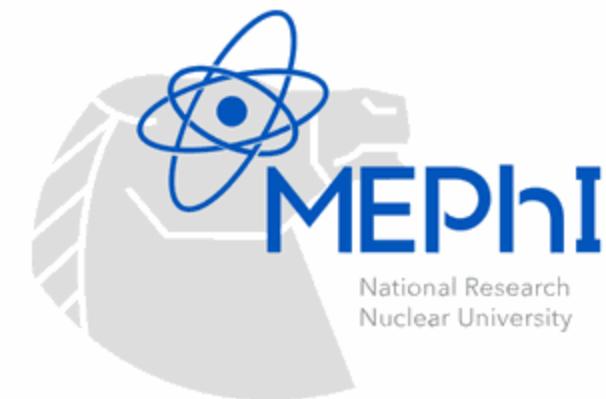


ЭВОЛЮЦИЯ АНОМАЛЬНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА В ПЕРВИЧНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОБЛАСТЯХ С ДОМЕННЫМИ СТЕНКАМИ

Студент: Ичако Перес Л. А.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Кириллов А. А.

НИЯУ МИФИ, Москва 2025

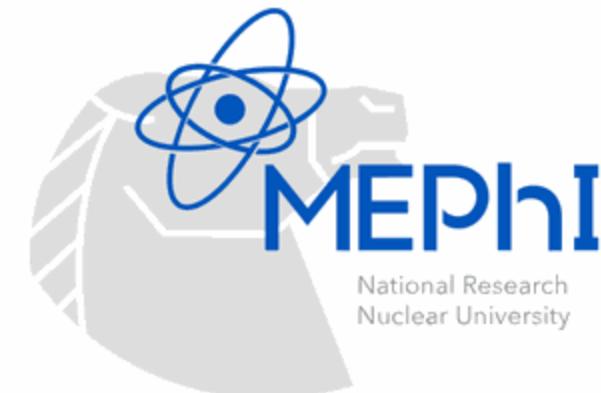


Введение и цель

- Гипотеза о существовании стабильных горячих областей в ранней Вселенной была выдвинута на основании анализа данных наблюдений космического рентгеновского и инфракрасного фона.[Kashlinsky et al., 2019]
- Одна из причин возникновения таких регионов может быть наличие кластеров первичных черных дыр (ПЧД).

Цель и задачи:

- Моделирование нуклеосинтеза в таких областях.
- Сравнение с уже полученными результатами.
- Анализ случая с непроницаемыми стенками.



Модель области с доменными стенками

Мы рассматриваем фрагменты первичной плазмы, заключенные внутри доменных стенок. Основные допущения модели:

Изоляция

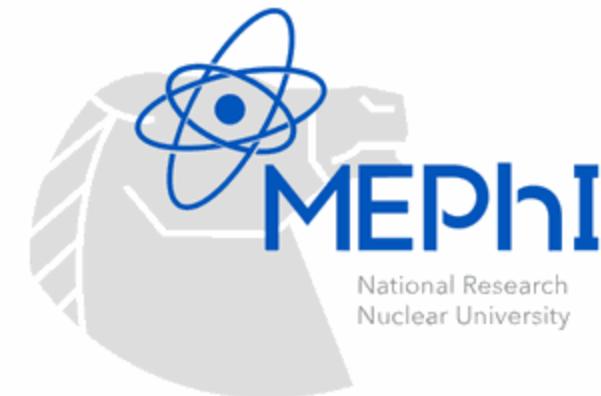
- Материя и энергия (включая нейтрино при высоких T) не покидают область.

Постоянная температура

- Температура внутри домена остается неизменной в ходе процесса.

Равномерность

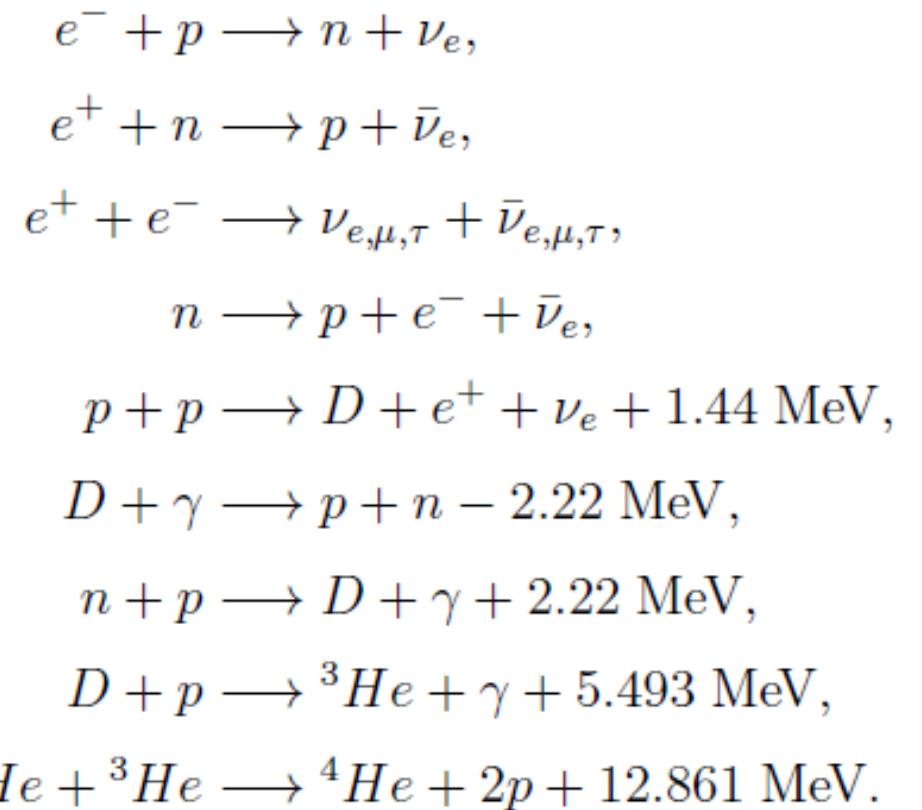
- Плотности внутри области не зависят от пространственных координат.



Ядерные реакции и нуклеосинтез

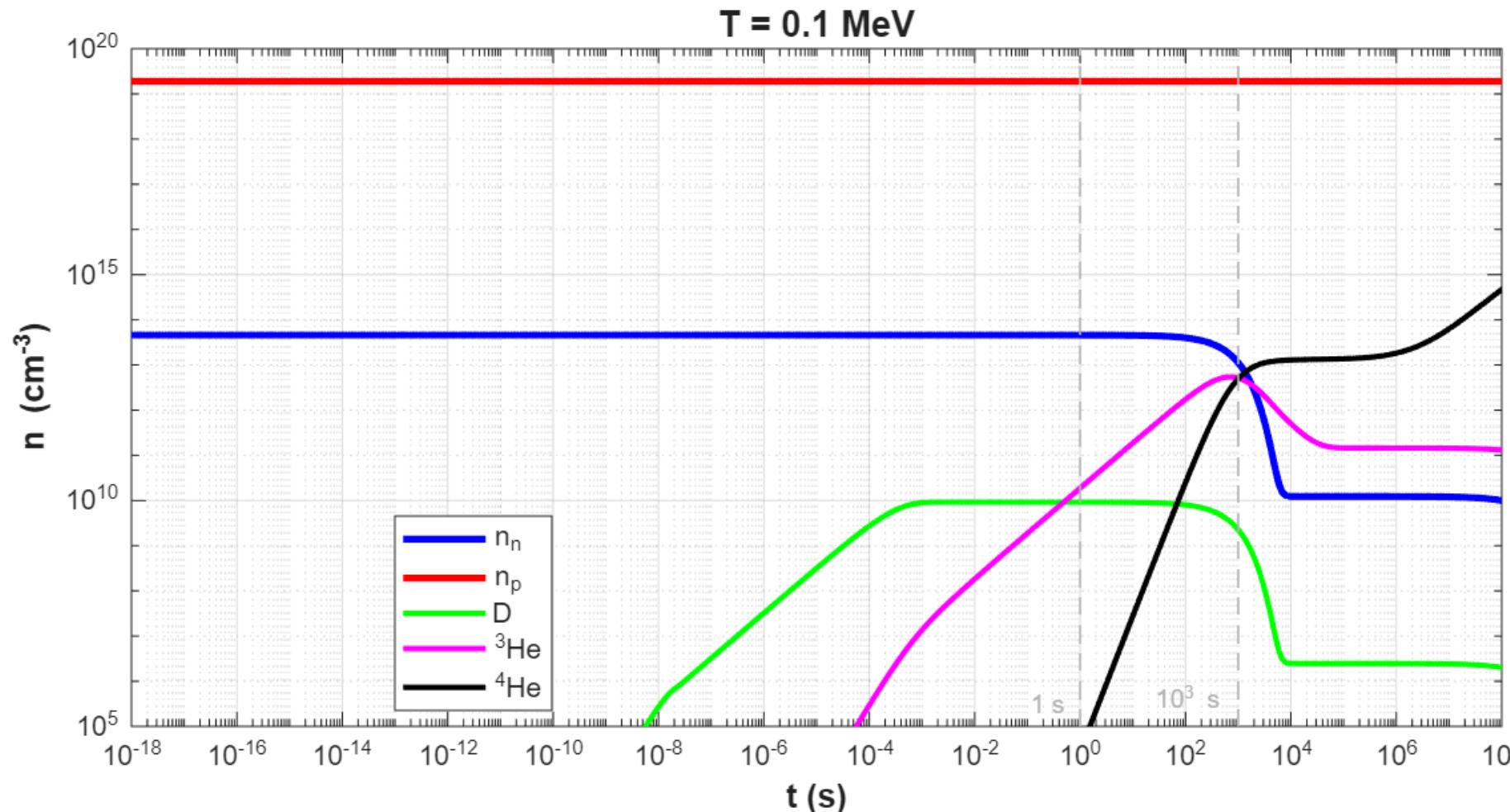
Динамика концентраций элементов определяется системой дифференциальных уравнений на основе скоростей реакций:

$$\left(\frac{dn_1}{dt} \right)_2 = -n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle_{12}.$$



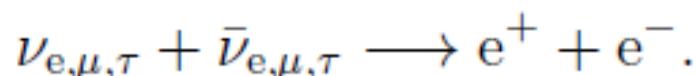
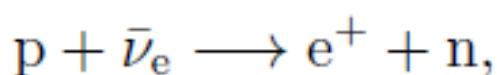
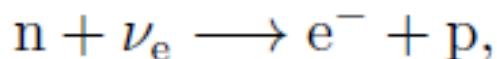
Верификация модели ($T = 0.1$ МэВ)

Для подтверждения точности численных методов проведено сравнение с результатами предыдущих исследований [Belotsky et al. (2022)].



Высокотемпературный режим ($T > 2$ МэВ)

При сверхвысоких температурах модель требует учета обратимости слабых взаимодействий из-за удержания нейтрино.



$$\langle \sigma v \rangle_{inv} = F e^{-Q/T} \langle \sigma v \rangle_{dir}.$$

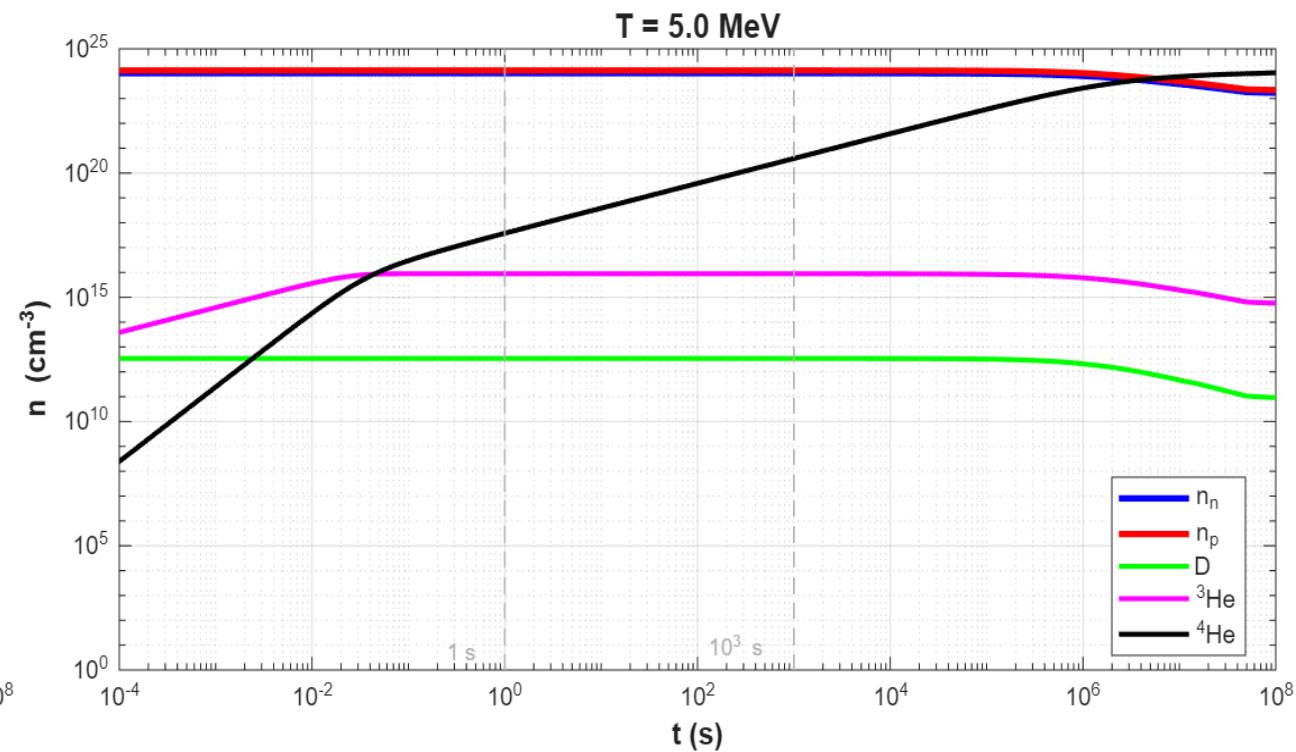
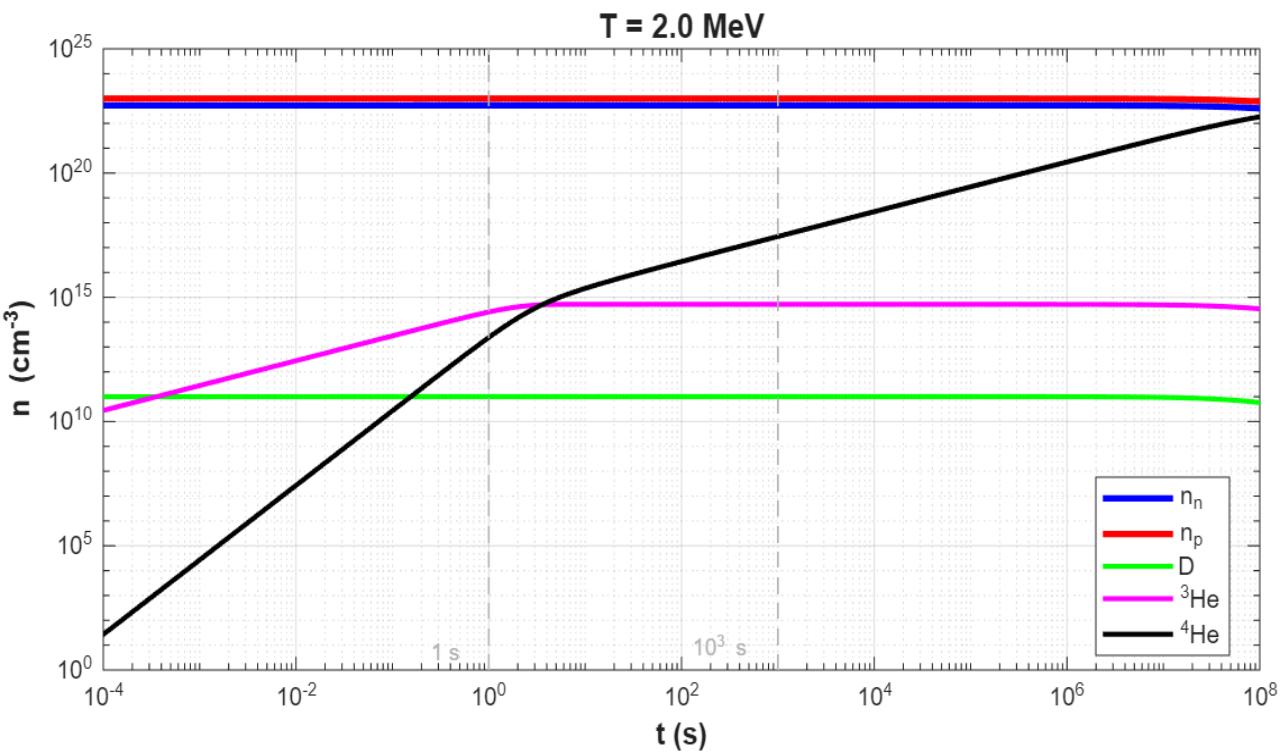
Обратимость:

- Нейтрино не улетают, обратные реакции включаются.

Связь скоростей:

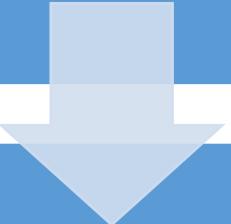
- Скорость обратных реакций связана с прямыми через статистический вес и энергию Q .

Результаты ($T = 2\text{-}5 \text{ МэВ}$)



Результаты ($T = 2\text{-}5 \text{ МэВ}$)

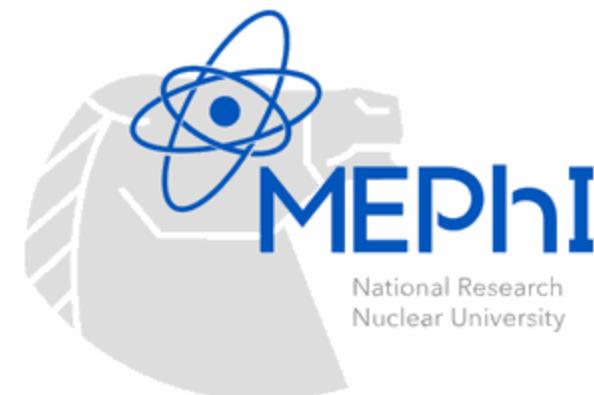
Эволюция концентраций при различных температурах показывает стремление системы к термодинамическому равновесию.



Быстрое равновесие: при $T=2 \text{ МэВ}$ равновесие достигается за 10 секунд; с ростом T это время уменьшается.



Почти все барионы превращаются в гелий-4, что делает возможным образование более тяжёлых элементов.



Заключение

- Согласованность моделей.** Наши результаты совпадают с выводами других работ, при совпадении начальных условий.
- Стабилизация n/p отношения.** Удержание нейтрино при $T > 2$ МэВ выравнивает скорости слабых взаимодействий.
- Численная точность.** Введение обратных реакций устранило «жёсткость» системы уравнений и повысило стабильность модели.
- Аномальный химический состав.** Результаты моделирования показывают, что в данных условиях практически все свободные барионы превращаются в ядра гелия-4 (${}^4\text{He}$). Это создает основу для прохождения За-реакции.

