

# СИНТЕЗ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗВЁЗДАХ

Нуклеосинтез во Вселенной

Студент: У.М. Шокир

Научный руководитель: А.Л. Барабанов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

2026

# Постановка проблемы

- Во Вселенной присутствует более 90 химических элементов
- Первичный нуклеосинтез дал только H, He и следы Li
- Вопрос: каков механизм образования элементов от C до U?

Гипотеза: звёздный нуклеосинтез

# Кривая распространённости элементов

- Экспоненциальный спад при  $A < 100$
- Локальный максимум в области железа ( $A \approx 56$ )
- Двойные пики при  $A = 80, 130, 196$

## Особенность

Сложная структура кривой указывает на множество различных процессов синтеза

# Теория звёздного нуклеосинтеза (В<sup>2</sup>ФН, 1957)

Альтернативные теории	Звёздная теория
Элементы образовались в ранней Вселенной	Нуклеосинтез происходит в звёздах
Требуют экзотических начальных условий	Ядерные реакции наблюдаются
Не объясняют вариации состава	Звёзды выбрасывают вещество в МЗС

⇒ Звёзды — основной источник тяжёлых элементов

# Термодинамика звёздного нуклеосинтеза

- 1 Истощение ядерного топлива в центре звезды
- 2 Гравитационное сжатие  $\Rightarrow$  рост температуры
- 3 Загорание следующего типа топлива

## Принцип

Рост температуры ведёт к синтезу всё более тяжёлых ядер вплоть до Fe

# Классификация процессов нуклеосинтеза

- H-горение (pp, CNO)
- He-горение ( $3\alpha$ ,  $(\alpha, \gamma)$ )
- $\alpha$ -процесс
- e-процесс  
(равновесный)
- s-процесс (медленный  
n-захват)
- r-процесс (быстрый  
n-захват)
- p-процесс
- x-процесс (лёгкие  
элементы)

H  $\rightarrow$  He  $\rightarrow$  C,O  $\rightarrow$  Ne,Mg  $\rightarrow$  Si  $\rightarrow$  Fe  $\rightarrow$  ...  $\rightarrow$  U

# Первые стадии: H и He горение

## Водородное горение

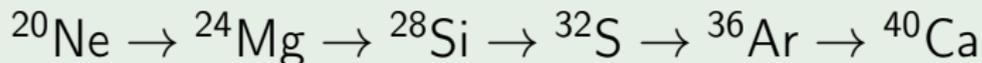


## Гелиевое горение



# $\alpha$ -процесс и e-процесс

## $\alpha$ -процесс



## e-процесс

При  $T \sim 5 \cdot 10^9$  К равновесие: максимум на  $^{56}\text{Fe}$  — min массы на нуклон

# s-процесс (медленный захват нейтронов)

- Локализация: красные гиганты (AGB-звёзды)
- Шкала: годы между захватами
- Пики:  $A = 90$  (Sr), 138 (Ba), 208 (Pb)

## Пример

Технеций ( $Z = 43$ ) в звёздах типа S — свежий синтез

# r-процесс (быстрый захват нейтронов)

- Локализация: сверхновые, слияния нейтронных звёзд
- Шкала: секунды
- Пики:  $A = 80, 130, 196$

## Космохронометры

$^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  — только r-процесс

# Второстепенные процессы

## p-процесс

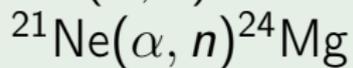
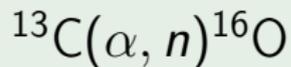
Протонно-избыточные  
изотопы, редкие

## x-процесс

D, Li, Be, B — космические  
лучи

# Источники нейтронов

## Основные реакции



Идут при  $T \approx 3 \cdot 10^8$  К на поздних стадиях

# Основные выводы (1/2)

- 1 Состав Вселенной сформирован звёздной эволюцией, а не первичным нуклеосинтезом
- 2 Кривая распространённости объясняется 8 процессами нуклеосинтеза
- 3 Элементы до Fe — горение и  $\alpha$ -процесс; тяжелее Fe — захват нейтронов

# Основные выводы (2/2)

- 4 Технеций в звёздах S и  $^{254}\text{Cf}$  в сверхновых — подтверждение синтеза
- 5 Теория  $\text{B}^2\text{FH}$  (1957) — основа современной астрофизики
- 6 Новые методы уточняют детали нуклеосинтеза

## Заключение

Звёзды — главные поставщики химических элементов во Вселенной

# Литература

-  Burbidge et al. Synthesis of the Elements in Stars. Rev. Mod. Phys., 1957.
-  Suess, Urey. Abundances of the Elements. Rev. Mod. Phys., 1956.
-  Отчёт о НИРС. НИЯУ МИФИ, 2026.