



# Ядерные процессы в астрофизике

Ененко К.М.

Б23-102

Научный руководитель: Барабанов А.Л.

Москва, 2025

# Цели работы

## 1. Перевод статьи:

- V. Liccardo et al., “Nuclear processes in Astrophysics: Recent progress” (2018)
- Сохранение оригинальных рисунков и библиографии
- Правильность перевода

## 2. Расчётное задание:

- Расчёт возможности образования элементов тяжелее железа путем слияния двух ядер в звёздах

# Ключевые проблемы из обзора

## 1. Ядерный синтез Большого взрыва

- Космологическая проблема лития: теоретическое содержание лития-7 в 2.4-4.3 раза выше наблюдаемого в старых звездах

## 2. Звёздный нуклеосинтез

- Существующие теоретические модели не могут одновременно воспроизвести все наблюдаемые химические соотношения
- Решенная проблема солнечных нейтрино как инструмент создания согласованной модели Солнца

## 3. Нуклеосинтез тяжёлых элементов

- Расхождение в наблюдаемых и теоретических соотношениях для элементов s-, p-процессов
- i-процесс
- Поиск астрофизических объектов, в которых возможно образование элементов r- процесса

# Расчёт энерговыделения:

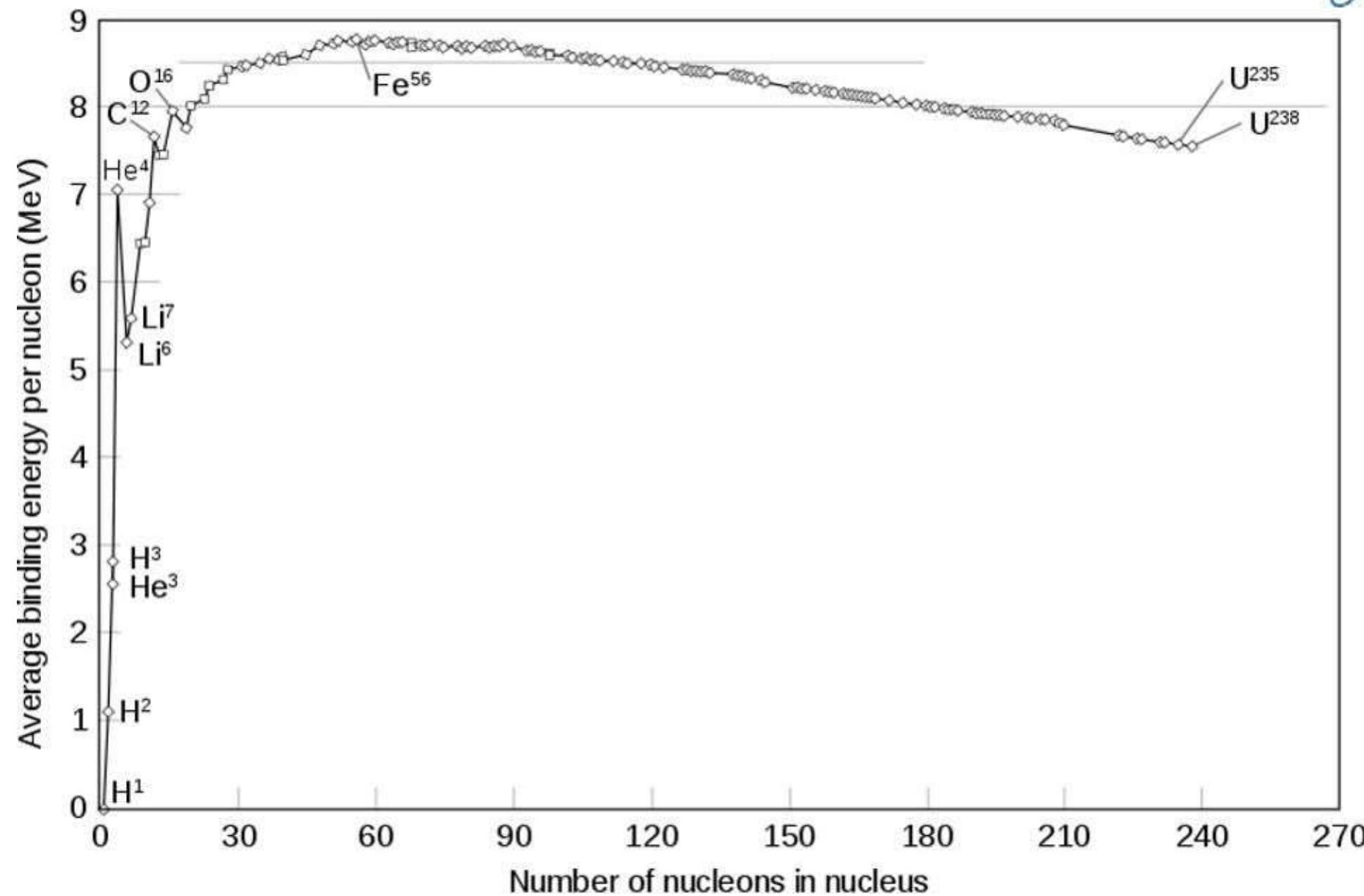
$$E = \sum_i (m_i c^2 + T_i) + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} U_{ij}$$

Дефект масс:  $\Delta m = \left( \sum_i T_i + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} U_{ij} \right) / c^2$

Удельная энергия связи на нуклон:  $\varepsilon = \left( \sum_i T_i + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} U_{ij} \right) / n$

Энергетический выход реакции:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = (m_1 + m_2 - M)c^2 = n\varepsilon - (n_1\varepsilon_1 + n_2\varepsilon_2)$$

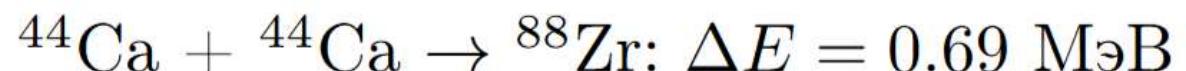
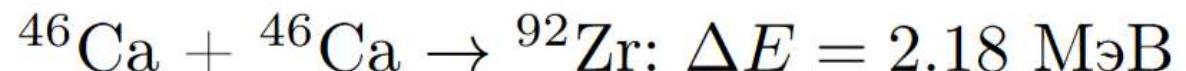


# Синтез из двух одинаковых ядер

Рассматривалось слияние ядер  $n_1 \approx n_2$  с образованием наиболее стабильного изотопа:



...



Вывод: синтез возможен для циркония

# Альфа-захват

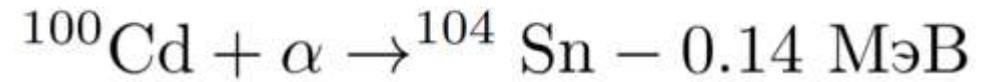
Цепочка от Si:



Продолжение цепочки:



⋮ ⋮



Итог: синтез происходит до кадмия

# Заключение

- Синтез путем слияния двух ядер не останавливается на железе мгновенно.
- Энерговыделение прекращается на элементах примерно в два раза тяжелее железа ( $Zr$ ,  $Cd$ )
- Ограничения:
  - Огромный кулоновский барьер для тяжелых ядер
  - Нестабильность промежуточных изотопов и дефицит времени на поздних стадиях горения звезды
- Основной вклад в создание тяжелых элементов вносят иные механизмы ( $s$ -,  $r$ -процессы), описанные в обзоре.



Спасибо за внимание!

