



Ядерные процессы в астрофизике

Ененко К.М.

Б23-102

Научный руководитель: Барабанов А.Л.

Москва, 2025



Цели работы

1. Перевод статьи:

- V. Luccardo 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:

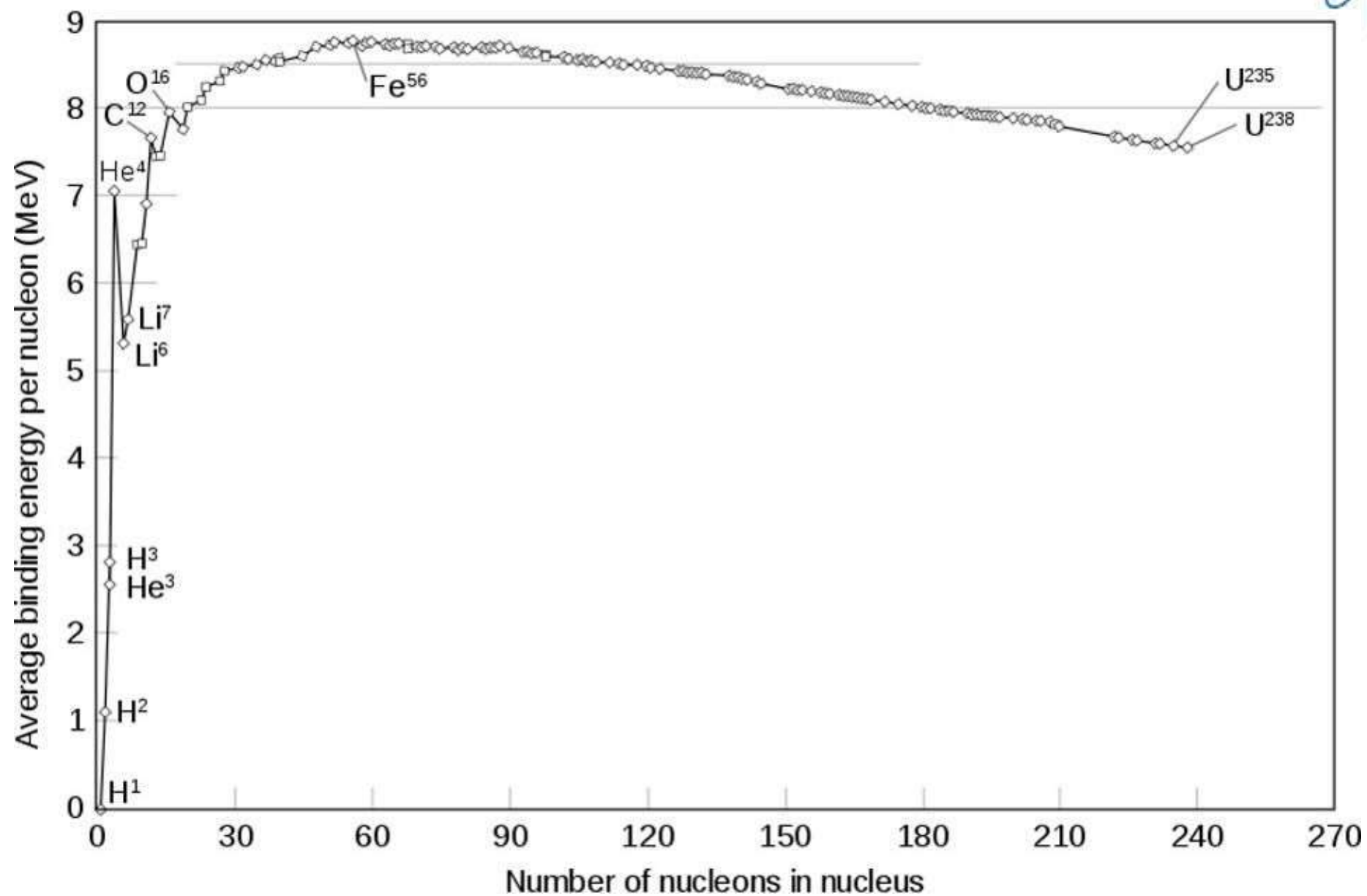
$$E = \sum_i (m_i c^2 + T_i) + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} U_{ij}$$

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

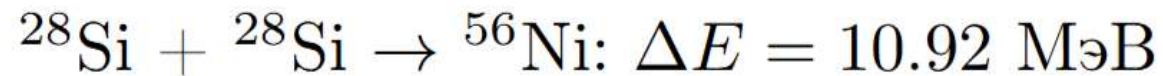
Энергетический выход реакции:

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

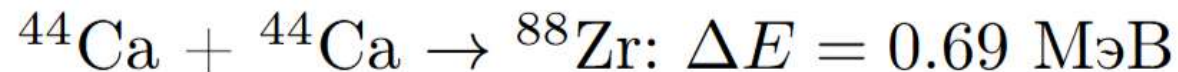
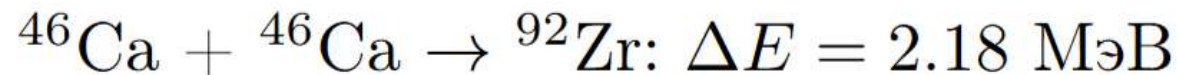


Синтез из двух одинаковых ядер

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



...

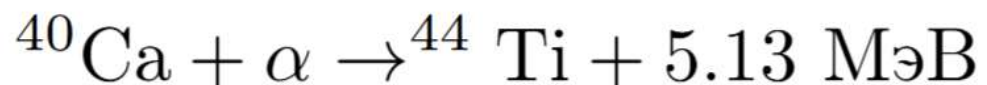


Вывод: синтез возможен для циркония

Альфа-захват



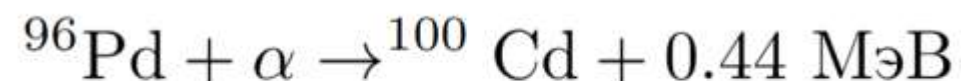
Цепочка от Si:



Продолжение цепочки:



\vdots



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!

