

B.4*. Нуклеосинтез (для студентов астрономического отделения и факультета космических исследований)

Долгоживущие изотопы, сохранившиеся на Земле, образовались в ядерных реакциях на разных этапах эволюции массивных звёзд. Элементы до железа рождаются при температурах выше $3 \cdot 10^9$ К во время горения кремния (термоядерная эпоха №4) в α -процессе (последовательном захвате α -частиц) или E-процессе (E от equilibrium - в условиях термодинамического равновесия в потоках n, p и α -частиц) [1].

Тяжелые элементы, по современным представлениям, образуются в реакциях захвата нейтронов и протонов:

Таблица. Процессы нуклеосинтеза элементов за железным пиком

типа нуклеосинтеза	условие протекания	условия в звезде	примечание
s-процесс (slow)	медленный захват нейтронов: образовавшиеся неустойчивые ядра распадаются раньше, чем успеет присоединиться следующий нейtron	концентрация нейтронов $n_n \geq 10^{10} \text{ см}^{-3}$	длительность $\geq 10^3$ лет (каждое ядро железного пика захватывает ≤ 100 нейтронов)
r-процесс (rapid)	быстрый последовательный захват большого количества нейтронов, опережающий β -распад	концентрация нейтронов $n_n \geq 10^{19} \text{ см}^{-3}$	длительность в разных моделях $0,1 \div 100$ с пример наблюдения спектров [3]
p-процесс	реакции захвата протона $(p,n)^1$, (p,γ) ; реакции фоторасщепления (γ,n) , $(\gamma,2n)$; реакции слабого взаимодействия: $e^+ + (A,Z) \rightarrow (A,Z+1) + \tilde{\nu}_e$ $\nu_e + (A+1,Z-1) \rightarrow (A,Z) + e^-$; реакции скальвания (p,n) , $(p,2n)$, (α,n) , $(\alpha,2n)$; тройное деление тяжелых ядер; (?) бинарное деление трансурановых (?)	достаточно большое число s- и r- нуклидов $T \sim (1 \div 3,5) \cdot 10^9$ К скорости протонов и α -частиц для скальвания несколько МэВ	Обычно к p-нуклидам относят 35 изотопов Проблема происхождения обойденных ядер еще не решена

Для примера, на фрагменте NZ-диаграммы рассмотрим образование десяти стабильных изотопов олова (рис.8).

Изотопы олово-122 и олово-124 с большим содержанием нейтронов «прикрыты» слева нестабильными изотопами, и, следовательно, могут образоваться только при последовательном β -распаде изотопов, образованных в r-процессе (голубые диагональные стрелки).

Изотоп Sn-116 «прикрыт» от r-процесса стабильным изотопом кадмия-116 и, таким образом, может появиться только в s-процессе² (розовые стрелки).

Изотопы олова с массовыми числами от 117 до 120 могут образовываться и в s- и в r-процессе.

1 (x_1, x_2) – краткая запись реакции, где налетает частица x_1 , а испускается частица x_2

2 Мы разбираем простой случай неразветвлённого s-процесса. В случае, если у изотопа есть долгоживущие возбуждённые состояния (ядерные изомеры), ситуация осложняется.

Обратите внимание на малую концентрацию в природном олове изотопов Sn-112, Sn-114, Sn-115. Такие изотопы называют «обойденными». Они образуются в р-процессе (см. Табл. Процессы нуклеосинтеза и рис.9).

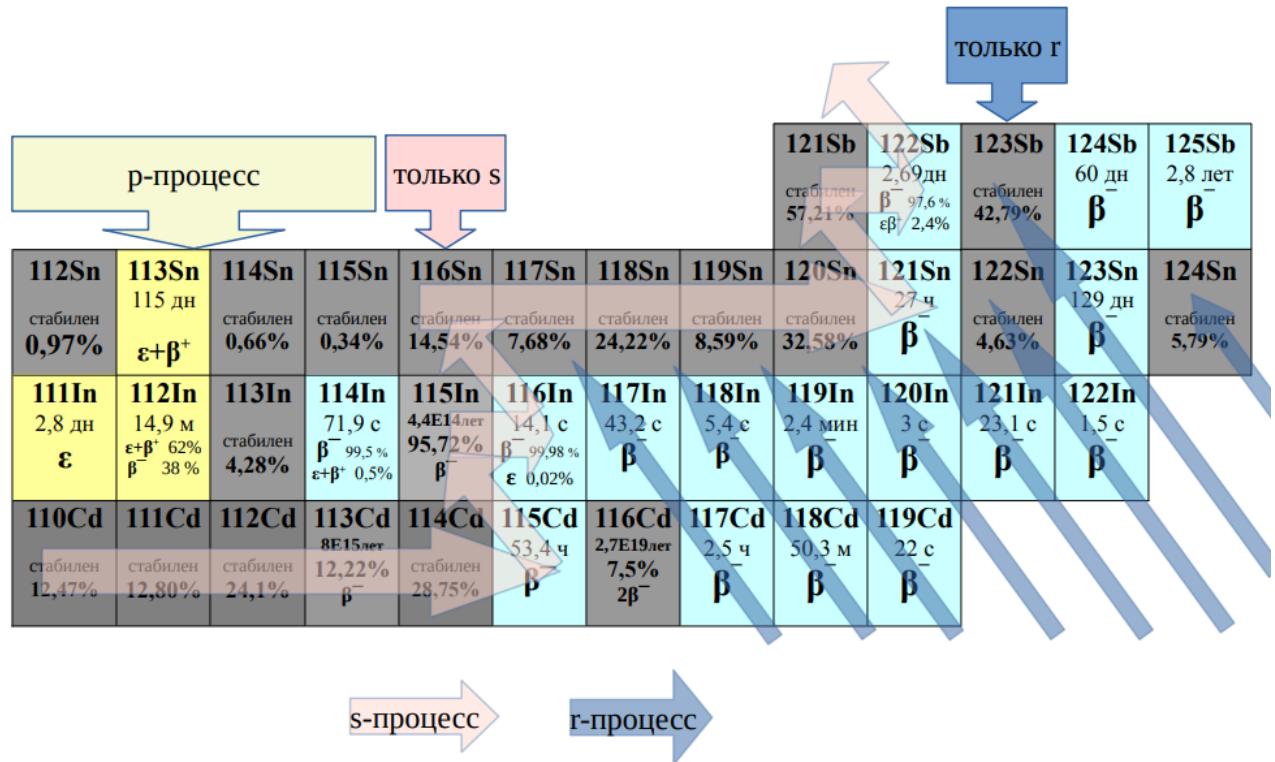


Рис.8. Фрагмент NZ-диаграммы, поясняющий образование изотопов олова в звезде

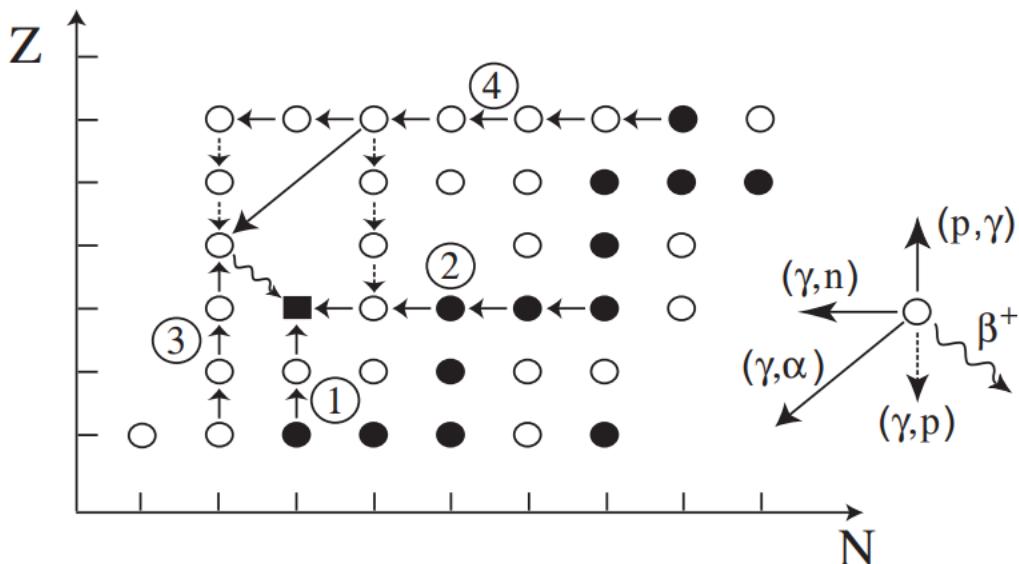


рис.9. Схематичное изображение некоторых вероятных ядерных реакций посредством которых s- и r-нуклиды (чёрные кружки) могут превращаться в р-нуклиды (чёрный квадратик). Окружности - нестабильные ядра. «Пути» (1) и (2) прямо ведут к образованию р-нуклида. Более сложные цепочки превращений включают (p, γ) реакции с последующими β -распадами («путь»(3)). «Путь» (4) — комбинация (γ, n) и (γ, p) или (γ, α) и β -распадов. Реакции разрушения р-нуклида не представлены. [4]

В лаборатории для задачи «Статистика» есть следующие элементы (см. Табл.). При подготовке к задаче заполните её, используя базы данных³.

Таблица Некоторые элементы, в состав которых входят долгоживущие изотопы:

элемент	p/a изотоп	% содер жание	период полу-распада, лет	γ кэВ %	β кэВ %	α МэВ %	есть в лаборатории	какой детектор рекомендуется
калий							калийные удобрения	
лютеций							лютециевая фольга	
рубидий							рубидий хлористый 10 г	
лантан							оксид лантана около 400г	
самарий							слитки, 50 г	
индий							пластина, 100 г	

Долгоживущие изотопы в своей нобелевской лекции Уильям Фаулер⁴ поэтично назвал «песочными часами вечности», поскольку измерения концентраций материнского и дочернего изотопов используются в датировке вещества метеоритов, геохронологии и космохронологии (возраст Солнечной системы, Галактики).

Один из этих изотопов будет использоваться Вами при измерении слаборадиоактивного материала. При сдаче задачи требуется объяснить его образование, причину нестабильности и представить схему заполнения n- и p-оболочек в одночастичной модели.

Литература

1. Крамаровский Я.М., Чечев В.П. Синтез элементов во Вселенной. — М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит., 1987. -160 с.
2. Фаулер У.А. Экспериментальная и теоретическая ядерная астрофизика, поиски происхождения элементов // УФН, 145, 1985, сс. 441-488.
3. I. U. Roederer, J. E. Lawler, E. A. Den Hartog, V. M. Placco, R. Surman, et al. The R-process Alliance: A nearly complete r-process abundance template derived from ultraviolet spectroscopy of the r-process-enhanced metal-poor Star HD 222925. The Astrophysical Journal Supplement Series 260, 27 (2022).
4. M. Arnould, S. Goriely The p-process of stellar nucleosynthesis: astrophysics and nuclear physics status // Physics Reports, Volume 384, Issues 1–2, 2003, pp. 1-84.

3 Например, база данных МАГАТЭ: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> . Название изотопа набираете в окошке слева (40k). В закладке Ground State записываете процентное содержание изотопа в естественной смеси. В закладке Decay Radiation – данные по излучениям, бета-спектры, схемы распада

4 Уильям Алфред Фаулер - лауреат Нобелевской премии по физике 1983 года — «за теоретическое и экспериментальное исследование ядерных реакций, имеющих важное значение для образования химических элементов Вселенной»