

## Введение

Вопрос о том, из чего сделан материальный мир и откуда все это произошло, интересовал людей со времен античности. Левкипп (около 430 г. до н.э.) и Демокрит (около 420 г. до н.э.) первыми предложили атомную теорию, в которой вся материя состоит из неделимых частиц. В средние века, различные исследователи, известные как алхимики, добились прогресса в разработке экспериментальных методов исследования составляющих компонентов вещества. Однако, их исследования в основном состояли из тщетных попыток превратить обычные металлы (например, свинца) в благородные металлы (такие как золото), и не было достигнуто никакого прогресса в развитии теории о том, как может произойти такое преобразование. Только в конце 20-го века современные алхимики, обычно известные как ядерные физики, добились успеха в превращении висмута в золото (в небольших количествах и по коммерчески неосуществимым расходам). Дорога, ведущая к этому знаменательному достижению, включала работы химиков (Бойл, 1661, де Лавуазье, 1789), современную атомной теории (Dalton, 1808, Avogadro, 1811, Thomson, 1897) и достижения в ядерной физике (Резерфорд, 1911; Чадвик, 1932; Ферми, 1934; Юкава, 1935), которые обеспечили нам хорошее понимание строительных блоков, из которых состоит материя.

Хорошее понимание того, что составляет материю, является необходимым первым шагом в развитии теории о том, как эта материя была создана. Alpher et al. (1948) выдвинул теорию, что все элементы были синтезированы во время Большого взрыва. Однако, когда более точное сечение захвата нейтронов для ядер малой массы ( $A < 20$ ) стало доступным, также стало ясно, что нуклеосинтез во время ранней расширяющейся Вселенной не способен преодолеть  $A = 8$  (например, Alpher and Herman, 1950; Shaviv, 2012). Это легло в основу работы Burbidge et al. (1957), который предложил, что лишь самые легкие элементы (в основном водород и гелий)

возникли во время Большого взрыва, а более тяжелые элементы синтезируются в звездах. Хотя эта теория со временем была уточнена, оригинальная идея Бербиджа и др. (1957) выдержал испытание временем. Таково нынешнее понимание того, что различные ядерные процессы действительно ответственны за синтез всех элементов, более тяжелых, чем водород и гелий.

В данной работе я исследую процесс захвата быстрых нейтронов ( $r$ -процесс), который является одним из ядерных процессов, предположенных Burbidge et al. (1957) в результате которого возникают элементы тяжелее железа. Мое внимание сосредоточено на вычислении нуклеосинтеза  $r$ -процесса при слиянии звезд при помощи нового инструмента для расчета ядерных реакций, SkyNeu, который я разработал. В оставшейся части этого введения я кратко опишу текущее представление о происхождении элементов, сущность  $r$ -процесса, условия его возникновения и ожидаемые наблюдательные сигнатуры. В главе II я представляю физику, которая реализована в SkyNet для эволюции тысяч видов ядер под влиянием десятков тысяч ядерных реакций. Я использую SkyNet в главе III, чтобы систематически исследовать  $r$ -процесс и его возможные оптические аналоги для различные параметров. В главе IV обсуждается нуклеосинтез  $r$ -процесса при слияниях черных дыр и нейтронных звезд (BHNS), а в главе V я рассматриваю  $r$ -process в оттоке диска (in the disk outflow following) после слияния нейтронных звезд. В главе VI я кратко подведу итог другой работы, которую я проделал во время моей докторской диссертации, которая не является непосредственно частью этой работы. Наконец, я предоставляю резюме и дальнейшие перспективы в главе VII.

## **0.1. Распространенность в солнечной системе**

Стоит проверить теории и модели, которые предсказывают как создаются элементы и в каких отношениях, подробный перечень этих элемен-

тов и их относительная распространенность в данной области вселенной. Крайне сложно получить образцы материи из мест, отличных от земной коры. Миссии Аполлона и Луны принесли образцы с луны, а позже такие космические аппараты, как Звездная пыль, Бытие и Hayabusa успешно доставили образцы из близлежащих астероидов и космической пыли на Землю. Однако подавляющее большинство внеземных материалов, доступных для химических анализов происходит от метеоритов, которые падают на поверхность Земли. Поэтому, чтобы определить состав звезд и других астрофизических объектов, мы ограничимся изучением линиями поглощения и излучения, формирующими эти объекты, а также распространенность элементарных частиц (например, Shaviv, 2012). Линии поглощения в солнечном спектре были впервые обнаружены в начале XIX век (Wollaston, 1802; Fraunhofer, 1817). Тем не менее, применение им нашли только 100 лет спустя, после развития квантовой механики, которая утверждает, что линии поглощения могут использоваться для количественного определения распространенности различных элементов на солнце. Пионерская работа была проведена Пейном (1925) в ее основной научной диссертации и Расселом (1934). Важная работа Суссе и Юри (1956) была одной из первых принимающих во внимание изотопные измерения распространенности из метеоритов. С этого момента был достигнут большой прогресс в измерении распространенности элементов и изотопов в нашей солнечной системе (например, Cameron, 1973; Anders and Grevesse, 1989; Grevesse and Sauval, 1998; Lodders, 2003).

На рис. 1 показаны наблюдаемые распространенности в нашей солнечной системе в зависимости от массового числа  $A$  (данные от Lodders 2003). Нуклиды с четным массовым числом как правило более многочисленными, чем нуклиды с нечетным массовым числом, поскольку даже массовые нуклиды более связаны. (!!!!!even mass nuclides are more bound) Из-за спинного спаривания нуклонов нуклид с четным числом нейтронов и протонов

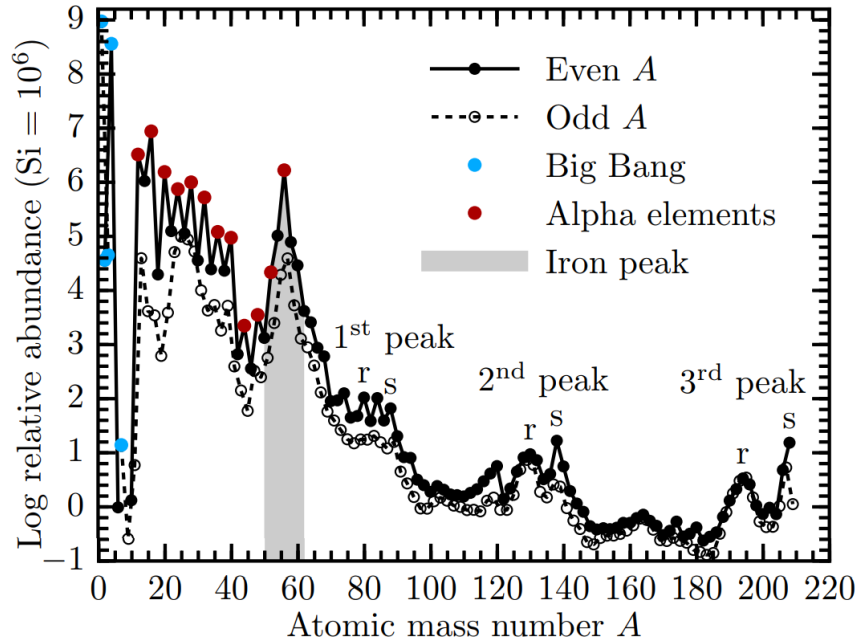


Рис. 1. Наблюдаемая распространенность в нашей солнечной системе в зависимости от массового числа  $A$ . Самые легкие элементы были созданы в «Большом взрыве». Слияние в звездах преимущественно создает альфа-элементы. Пик железа выполнен в коллапсе ядра и типе Ia сверхновых. Элементы за железным пиком синтезируются медленными (s) и быстрыми (r) процессами захвата нейтронов. Эти процессы производят три пары пиков (см. раздел 1.3). Данные о изобилии от Lodders (2003).

(следовательно, четное  $A$ ) является более связанным, чем нуклид с нечетным числом нейтронов или протонов (следовательно, нечетное  $A$ , см., например, Weizsäcker, 1935; Майерс и Свитецки, 1966; Möller et al., 1995). Нуклиды с нечетное число и нейтронов и протонов (отсюда и четное  $A$ ), имеют еще более слабую связь поскольку ни все нейтроны, ни все протоны не могут быть спин-парными. Поэтому неудивительно, что существует только несколько нечетных-нечетных нуклидов, которые являются стабильными или долгоживущими:  $2\text{H}$ ,  $6\text{Li}$ ,  $10\text{B}$  и  $14\text{N}$  стабильны, а  $40\text{K}$ ,  $50\text{V}$ ,  $138\text{La}$  и  $176\text{Lu}$  являются только нечетные-нечетные нуклиды с периодом полураспада не менее 1 Гр(!!!!Gyr). Существует ряд различных процессов нуклеосинтеза, которые доминируют в различных диапазонах масс. Очень легкие нуклиды ( $A < 8$ ) были получены сразу после Большого взрыва. Некоторые  $^4\text{He}$ , а также большинство нуклидов в диапазоне  $12 \leq A \leq 56$  являются результатом гидростатического ядерного горения в звездах, значительная часть пика железа ( $50 \leq A \leq 62$ ) производится материалом, поступающим в

(!!!!nuclear statistical equilibrium) ядерную статистическую (NSE), а затем охлаждающимся (например, во время сверхновой звезды Ia или взрывчатое сильное сжигание в ядрах с коллапсом сверхновых (explosive silicon burning in core-collapse supernovae) (CCSNe)) и, наконец, почти все нуклиды, более тяжелые, чем железо, образуются путем захвата нейтронов на более легкие семенные ядра (!!!!onto lighter seed nuclei) (например, Burbidge et al., 1957). Мы рассмотрим эти процессы далее.