

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

УДК 539.165.2

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗВЕЗДАХ

Научный руководитель
(проф., д.ф.-м.н., доц.)

_____ А. Л. Барабанов

Студент

_____ У. М. Шокир

Москва 2025

СОДЕРЖАНИЕ

1	I. Синтез элементов в звёздах	3
1.1	Распространенность элементов и структура ядра	3
1.2	Четыре теории происхождения элементов	6
1.3	Общие черты звездного синтеза	7
2	ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, УЧАСТВУЮЩИЕ В ЗВЕЗДНОМ СИНТЕЗЕ, МЕСТА ИХ ПРОТЕКАНИЯ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ВРЕМЕННЫЕ ШКАЛЫ	8
2.1	Режимы синтеза элементов	8
2.1.1	Водородное горение (Hydrogen Burning)	8
2.1.2	Гелиевое горение (Helium Burning)	9
2.1.3	α -Процесс (α Process)	9
2.1.4	e-Процесс (e Process)	9
2.1.5	s-Процесс (s Process)	9
2.1.6	r-Процесс (r Process)	11
2.1.7	p-Процесс (p Process)	11
2.1.8	x-Процесс (x Process)	11
3	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	12

1. I. СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗВЁЗДАХ

1.1 Распространенность элементов и структура ядра

Человек обитает во Вселенной, состоящей из великого множества элементов и их изотопов. В таблице I.1¹ приведен подсчет стабильных и радиоактивных элементов и изотопов. На Земле обнаружено девяносто элементов, и еще один, технеций, найден в звездах; только прометий не был обнаружен в природе. На Земле встречаются около 272 стабильных и 55 естественно-радиоактивных изотопов. Кроме того, человек смог искусственно получить нейтрон, технеций, прометий и десять трансурановых элементов. Количество радиоактивных изотопов, созданных им, в настоящее время составляет 871, и это число постепенно растет.

Каждая изотопная форма элемента содержит ядро со своими собственными характеристическими ядерными свойствами, которые отличаются от свойств всех других ядер. Таким образом, общее количество известных ядерных видов приближается к 1200, причем около 327 из них, как известно, встречаются в природе. Несмотря на это, ситуация не так сложна, как могла бы показаться. Исследования в области «классической» ядерной физики с 1932 года показали, что все ядра состоят из двух фундаментальных строительных блоков. Это протон и нейтрон, которые в данном контексте называются нуклонами. Пока не превышаются энергии порога образования мезонов, все «быстрые» ядерные процессы можно описать как перегруппировку протонов и нейтронов в различные нуклонные пачки, называемые ядрами. Только в медленных процессах бета-распада при низких энергиях происходит какое-либо взаимопревращение протонов и нейтронов, но и там, как и в быстрых реакциях, число нуклонов остается постоянным. Только при очень высоких энергиях нуклоны могут рождаться или аннигилировать. Быстрые ядерные процессы вместе с медленными бета-реакциями делают возможным в принципе превратить любой ядерный материал в любой другой даже при низких энергиях взаимодействия.

Таблица 1 — Таблица элементов и изотопов (1956)

Элементы		Изотопы	
Стабильные	81	Стабильные	272
Радиоактивные:		Радиоактивные:	
Естественные ($Z \leq 83$)	1 ^a	Естественные ($A < 206$)	11 ^d
($Z > 83$)	9 ^b	($A \geq 206$)	44
Естественные: стабильные и радиоактивные	91	Естественные: стабильные и радиоактивные	327
Радиоактивные:		Радиоактивные:	
Искусственные ($Z \leq 83$)	1 ^c	Искусственные ($A < 206$)	702
($Z > 83$)	10	($A \geq 206$)	169
Итого	102	Итого	1198
Нейтрон	1	Нейтрон	1
Всего	103	Всего	1199

^a Tc, наблюдается в звёздах S-типа.

^b Включая At и Fg из слабых ветвей естественной радиоактивности.

^c Pm, не наблюдается в природе.

^d Включая ³H, ¹⁴C и ⁹⁹Tc.

Учитывая эту относительно простую картину структуры и взаимодействий ядер элементов, естественно попытаться объяснить их происхождение синтезом или накоплением, начиная с одного или обоих фундаментальных строительных блоков. Можно задать следующий вопрос: какова была история вещества, которое мы можем наблюдать, кото-

рая привела к образованию элементов и изотопов этого вещества в том распределении содержания, которое дают наблюдения? Эта история скрыта в распределении содержания элементов. Чтобы попытаться понять последовательность событий, приведших к образованию элементов, необходимо изучить так называемую универсальную или космическую кривую содержания.

Является ли эта кривая содержания универсальной или нет — не предмет обсуждения здесь. Это распределение для того вещества, которое нам удалось наблюдать. Мы можем спросить об истории именно этого вещества. Мы также можем искать историю необычных и аномальных содержаний, наблюдаемых в некоторых звездах. В конечном итоге мы можем подойти к проблеме универсальных или космических содержаний. Чтобы избежать какого-либо подразумевания, что кривая содержания универсальна, когда такое подразумевание неуместно, мы обычно называем распределение числа атомных видов как функцию атомного веса просто распределением атомных содержаний. В графической форме мы называем это кривой атомных содержаний.

Первая попытка построить такую кривую содержания была предпринята Гольдшмидтом (Go37). Улучшенная кривая была дана Брауном (Br49), а совсем недавно Зюсс и Юри (Su56) использовали последние доступные данные, чтобы представить самую полную кривую из доступных на сегодняшний день. Эти кривые получены главным образом из наземных, метеоритных и солнечных данных, а в некоторых случаях из других астрономических источников. Определения содержания для Солнца были впервые получены Расселом (Ru29), а самая последняя работа принадлежит Голдбергу, Аллеру и Мюллеру (Go57). Точные относительные содержания изотопов доступны из масс-спектроскопических данных, и Зюсс и Юри эффективно использовали их при составлении своей таблицы содержания. Эта таблица вместе с некоторыми солнечными значениями, данными Голдбергом и др., составляет основу для данной статьи.

Кажется вероятным, что все элементы произошли из водорода, поскольку протон стабилен, а нейтрон — нет. Более того, водород — самый распространенный элемент, а гелий, который является непосредственным продуктом водородного горения в протон-протонной цепи и CNO-цикле, — следующий по распространенности элемент. Кривая упаковочных коэффициентов показывает, что наибольшая стабильность достигается у железа и никеля. Однако вероятно, что железо и никель составляют менее 1% от общей массы галактики. Ясно, что хотя ядра и стремятся эволюционировать к конфигурациям наибольшей стабильности, они все еще далеки от достижения этого состояния.

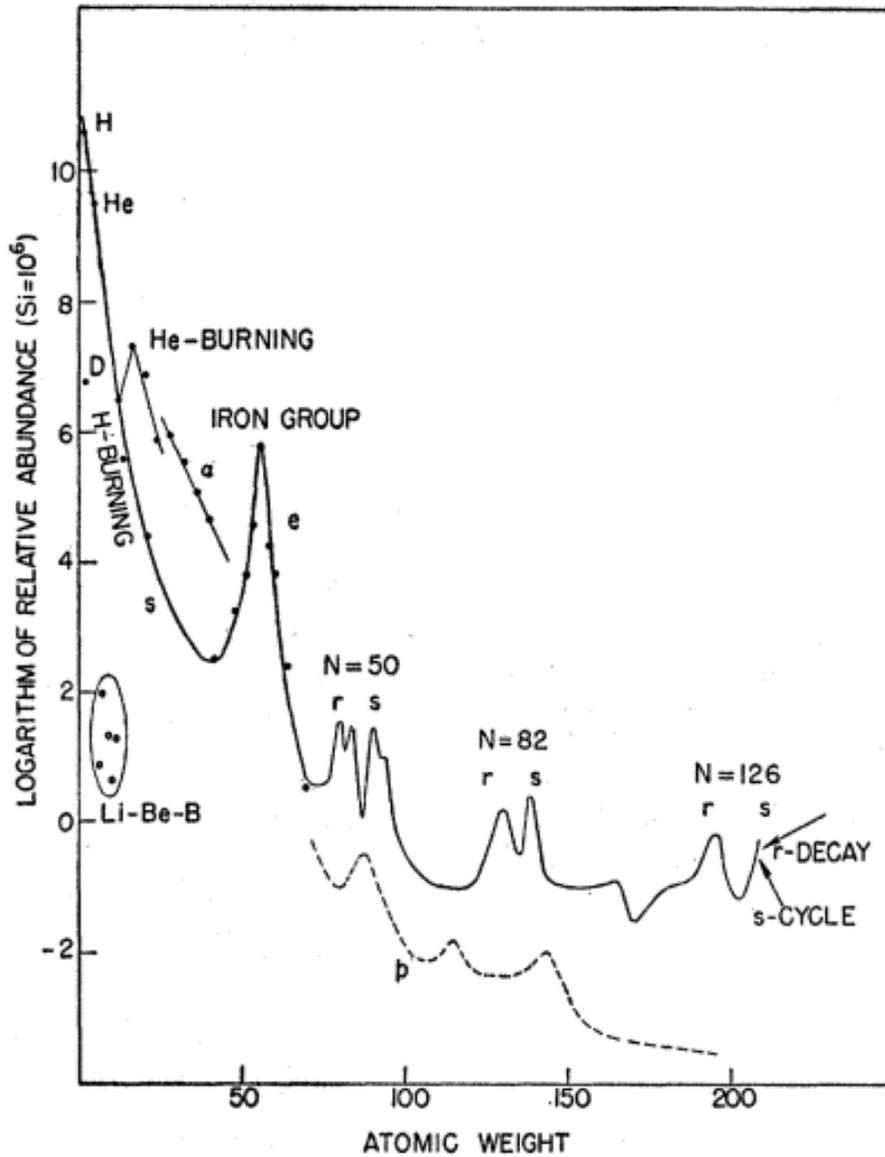


Рис. I,1. Схематическая кривая распространенности атомов как функция атомного веса, основанная на данных Сьюсса и Юри (Su56). Сьюсс и Юри использовали относительную распространенность изотопов для определения наклона и общего хода кривой. Индивидуальные значения все еще демонстрируют значительный разброс относительно изображенной кривой, однако основные показанные особенности теперь установлены достаточно надежно. Эти особенности перечислены в Табл. I,2. Обратите внимание на избыток, по сравнению с соседними элементами, альфа-частичных ядер с $A = 16, 20, \dots, 40$, пик в области ядер группы железа и двойные пики при $A = 80$ и 90 , при 130 и 138 , а также при 194 и 208 .

Таблица 2 — Особенности кривой распространённости

Признак	Причина
Экспоненциальное уменьшение от водорода до $A \sim 100$	Возрастающая редкость синтеза при увеличении A ; это отражает, что звёздная эволюция до поздних стадий, необходимых для образования больших A , встречается редко.
Довольно резкое изменение к малому наклону при $A > 100$	Почти постоянные сечения (n, γ) в s-процессе. Циклирование в r-процессе.
Редкость D, Li, Be, B по сравнению с соседними H, He, C, N, O	Неэффективное образование; дополнительно разрушаются во внутренних областях звёзд даже при относительно низких температурах.
Высокие распространённости α -частичных ядер (O^{16} , Ne^{20} , Ca^{40} , Ti^{48}) относительно соседних	Горение He и α -процесс более продуктивны, чем горение H и s-процесс в этой области.
Сильно выраженный пик кривой распространённости, центрированный на Fe^{56}	e-процесс; звёздная эволюция до стадии, где выделяется максимальная энергия (Fe^{56} близок к минимуму кривой упаковочной доли).
Двойные пики: $A = 80, 130, 196$ и $A = 90, 138, 208$	Захват нейтронов в r-процессе (магические $N = 50, 82, 126$ для ядер-предшественников) и захват нейтронов в s-процессе (магические $N = 50, 82, 126$ для стабильных ядер).
Редкость тяжёлых протонно-богатых ядер	Не образуются в основном в r- или s-процессах; возникают в редком p-процессе.

Принято считать, что кривая атомных содержаний экспоненциально спадает до значений $A \sim 100$, а после этого остается приблизительно постоянной. Хотя это грубо соответствует действительности, такое представление упускает из виду многие детали, которые служат важными ключами к пониманию синтеза элементов. Эти детали схематически показаны на Рис. I,1 и перечислены в левой колонке Табл. I,2. Объяснение содержания правой колонки будет дано в Разделе II.

Также необходимо дать объяснение происхождению естественных радиоактивных элементов. Кроме того, существование защищенных изобар представляет собой особую проблему.

1.2 Четыре теории происхождения элементов

Любая полностью удовлетворительная теория образования элементов должна количественно объяснять во всех деталях все особенности кривой распространённости атомов. Из теорий, разработанных к настоящему времени, три предполагают, что элементы образовались в первичном состоянии вселенной. Это неравновесная теория Гамова, Альфера и Хермана [см. (Al50)] вместе с недавними модификациями Хаяши и Нисиды (Ha56), полинейтронная теория Майера и Теллера (Ma49) и теория равновесия, разработанная Клейном, Бесковым и Треффенбергом (Kl47). Подробный обзор истории и развития этих теорий был дан Альфером и Херманом (Al53). [2]

Каждая из этих теорий обладает некоторыми привлекательными чертами, но ни одна не удовлетворяет всем требованиям. Мы полагаем, что эти требования в основном

выполняются четвертой теорией, в которой предполагается, что звезды являются местом происхождения элементов. В отличие от других теорий, требующих существования материи в особом первичном состоянии, для которого у нас нет доказательств, эта последняя теория тесно связана с известным фактом, что ядерные превращения в настоящее время происходят внутри звезд. Это сильный аргумент, поскольку первичные теории зависят от очень специфических начальных условий вселенной. Другой общий аргумент в пользу звездной теории заключается в следующем.

Необходимо, чтобы элементы, как бы они ни образовались, были распределены в космическом масштабе. Звезды делают это, выбрасывая вещество; наиболее эффективными механизмами являются, вероятно, взрывной выброс вещества при вспышках сверхновых, менее энергичные, но более частые новые, а также менее быстрое и менее сильное выброс вещества из звезд на гигантских стадиях эволюции и из планетарных туманностей. Первичные теории, безусловно, распределяют вещество в космическом масштабе, но трудность заключается в том, что распределение должно было бы быть пространственно однородным и независимым от времени после прохождения начальных фаз вселенной. Это противоречит наблюдениям. Определенно существуют различия в составе между звездами разного возраста, а также звезды на определенных эволюционных стадиях имеют аномалии, такие как присутствие технеция в звездах типа S и Cf^{254} в сверхновых. Подробное обсуждение этих и других особенностей дано в разделах XI и XII.

В настоящее время достоверно неизвестно, все ли атомные виды тяжелее водорода были произведены в звездах без необходимости синтеза элементов на первичной взрывной стадии вселенной. Не пытаясь дать определенный ответ на эту проблему, мы намерены в этой статье ограничиться синтезом элементов в звездах и заложить основу для будущих экспериментальных, наблюдательных и теоретических работ, которые в конечном итоге могут предоставить неопровержимые доказательства происхождения элементов в звездах. Однако с точки зрения только ядерной физики ясно, что наши выводы будут в равной степени справедливы и для первичного синтеза, в котором начальные и последующие эволюционные условия температуры и плотности подобны тем, что наблюдаются в недрах звезд.

1.3 Общие черты звездного синтеза

За исключением катастрофических фаз, звезда обладает саморегулирующимся механизмом, в котором температура устанавливается таким образом, что отток энергии через звезду уравнивается генерацией ядерной энергии. Температура, необходимая для такой настройки, зависит от конкретного доступного ядерного топлива. Водород требует более низкой температуры, чем гелий; гелий требует более низкой температуры, чем углерод, и так далее. Последовательность повышения температуры заканчивается на железе, поскольку генерация энергии путем реакций синтеза на нем прекращается. Если присутствует водород, температура устанавливается на уровне, соответствующем водороду как топливу, и является сравнительно низкой. Но если водород истощается по мере звездной эволюции, температура повышается до тех пор, пока гелий не становится эффективным топливом. Когда гелий истощается, температура поднимается еще выше, пока не вступает в действие следующее ядерное топливо, и так далее. Автоматическое повышение температуры в каждом случае вызывается преобразованием гравитационной энергии в тепловую.

Таким образом, одна за другой вступают в действие различные группы реакций, и эта последовательность всегда сопровождается повышением температуры. Поскольку

проникновение через кулоновские барьеры происходит легче по мере повышения температуры, можно ожидать, что последовательность будет такой, в которой реакции протекают между ядрами со все большими и большими атомными номерами. По мере того как становится возможным преодолевать все большие барьеры, ядра будут эволюционировать к конфигурациям со все большей и большей стабильностью, так что будут синтезироваться все более тяжелые ядра, пока не будет достигнуто железо. Таким образом, по мере повышения температуры должно происходить прогрессивное превращение легких ядер в более тяжелые.

Существует ряд усложняющих факторов, которые накладываются на эти общие тенденции. К ним относятся следующие.

Необходимо учитывать детали повышения температуры и эффекты барьеров для ядерных реакций при низких температурах.

Температура не везде одинакова внутри звезды, поэтому ядерная эволюция наиболее продвинута в центральных областях и наименее (или совсем не продвинута) вблизи поверхности. Таким образом, нельзя ожидать, что состав звезды будет однородным повсюду. Соответственно, звездный взрыв приводит не к выбросу вещества одного определенного состава, а можно ожидать целого спектра составов.

Перемешивание внутри звезды, при котором центральное вещество перемешивается наружу, а внешнее вещество внутрь, создает особые эффекты. Вещество, выброшенное из одной звезды, может впоследствии конденсироваться в другой звезде. Это, в свою очередь, создает особые ядерные эффекты.

Все эти усложняющие факторы показывают, что звездная теория не может быть простой, и это может быть аргументом в пользу теории, поскольку кривая распространенности, которую мы пытаемся объяснить, также не является простой. Мы полагаем, что элементы эволюционировали и продолжают эволюционировать в ходе целого ряда процессов. Они отмечены на схематической кривой распространенности, Рис. I,1, как водородное горение (H burning), гелиевое горение (He burning), α , e, r, s и p процессы. Природа этих процессов подробно показана на Рис. I,2; детали этой диаграммы объясняются в следующих разделах.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, УЧАСТВУЮЩИЕ В ЗВЕЗДНОМ СИНТЕЗЕ, МЕСТА ИХ ПРОТЕКАНИЯ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ВРЕМЕННЫЕ ШКАЛЫ

2.1 Режимы синтеза элементов

Как было описано ранее во вводной статье по этому вопросу Хойлом, Фаулером, Бербиджем и Бербидж (Ho56), по-видимому, для объяснения всех особенностей кривой распространенности требуется по крайней мере восемь различных типов процессов синтеза, если мы полагаем, что первичным был только водород. Чтобы прояснить последующее обсуждение, мы приводим краткое описание этих процессов здесь (см. также Ho54, Fo56).

2.1.1 Водородное горение (Hydrogen Burning)

Водородное горение ответственно за большую часть производства энергии в звездах. Под водородным горением в синтезе элементов мы будем понимать циклы, которые синтезируют-

ют гелий из водорода и которые синтезируют изотопы углерода, азота, кислорода, фтора, неона и натрия, не производимые процессами (ii) и (iii). Подробное обсуждение водородного горения дано в Разделе III.

2.1.2 Гелиевое горение (Helium Burning)

Эти процессы ответственны за синтез углерода из гелия и, путем дальнейшего присоединения α -частиц, за производство O^{16} , Ne^{20} и, возможно, Mg^{24} . Они подробно описаны в Разделе III.

2.1.3 α -Процесс (α Process)

Эти процессы включают реакции, в которых α -частицы последовательно присоединяются к Ne^{20} для синтеза ядер с четырехкратной структурой Mg^{24} , Si^{28} , S^{32} , A^{36} , Ca^{40} и, вероятно, Ca^{44} и Ti^{48} . Это также обсуждается в Разделе III. Источник α -частиц в α -процессе отличается от такового при гелиевом горении.

2.1.4 e-Процесс (e Process)

Это так называемый равновесный процесс, ранее обсуждавшийся Хойлом (Ho46, Ho54), в котором в условиях очень высокой температуры и плотности синтезируются элементы, составляющие пик железа на кривой распространенности (ванадий, хром, марганец, железо, кобальт и никель). Это подробно рассматривается в Разделе IV.

2.1.5 s-Процесс (s Process)

Это процесс захвата нейтронов с испусканием гамма-излучения (n, γ), который протекает в длительной временной шкале, составляющей от ~ 100 лет до $\sim 10^5$ лет на каждый захват нейтрона. Захваты нейтронов происходят с медленной (s) скоростью по сравнению с промежуточными бета-распадами. Этот режим синтеза ответственен за производство большинства изотопов в диапазоне $23 \leq A \leq 46$ (исключая те, которые синтезируются преимущественно α -процессом), и значительной доли изотопов в диапазоне $63 \leq A \leq 209$. Оценки временных шкал в различных областях цепочки захвата нейтронов в s -процессе будут рассмотрены далее в этом разделе, в то время как детали ядерной физики процесса обсуждаются в Разделах V и VI вместе с результатами. s -процесс создает пики распространенности при $A = 90, 138$ и 208 .

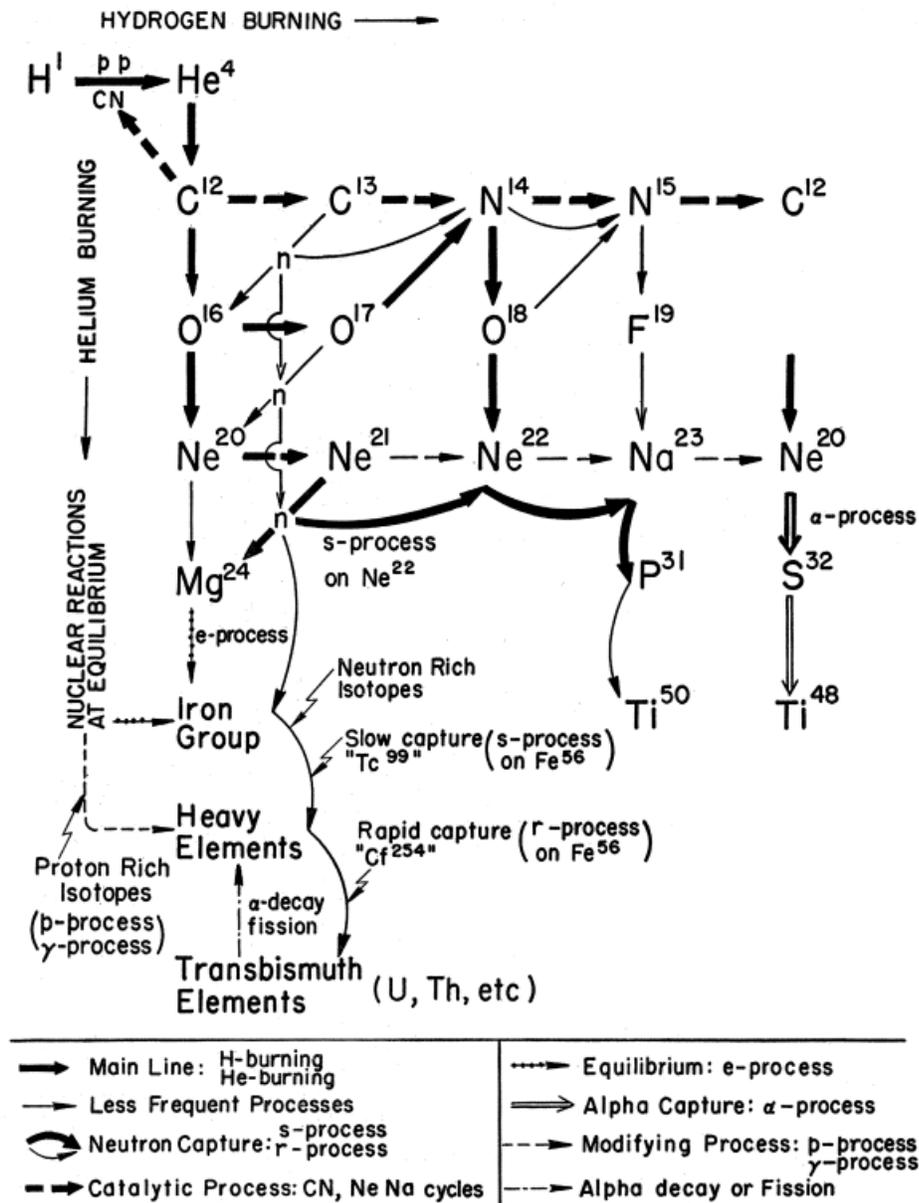


Рис. 1,2. Схематическая диаграмма ядерных процессов, посредством которых происходит синтез элементов в звездах. Элементы, синтезируемые в результате взаимодействий с протонами (водородное горение), перечислены горизонтально. Элементы, синтезируемые в результате взаимодействий с альфа-частицами (гелиевое горение) и посредством еще более сложных процессов, перечислены вертикально. Детали образования всех известных стабильных изотопов углерода, азота, кислорода, фтора, неона и натрия показаны полностью. Процессы захвата нейтронов, посредством которых синтезируются тяжелые элементы с высоким зарядом, обозначены изогнутыми стрелками. Образование радиоактивного Te^{39} указано как пример, для которого существуют астрофизические свидетельства захвата нейтронов с медленной скоростью в течение длительных периодов времени в звездах-красных гигантах. Аналогично, Cf^{254} , образующийся в сверхновых, является примером синтеза нейтронов с быстрой скоростью. Группа железа образуется в результате множества ядерных реакций в равновесных условиях на последней стабильной стадии эволюции звезды.

2.1.6 r-Процесс (r Process)

Это процесс захвата нейтронов в очень короткой временной шкале, составляющей $\sim 0.01 - 10$ сек для процессов бета-распада, происходящих между захватами нейтронов. Захваты нейтронов происходят с **быстрой** (r) скоростью по сравнению с бета-распадами. Этот режим синтеза ответственен за производство большого числа изотопов в диапазоне $70 \leq A \leq 209$, а также за синтез урана и тория. Этот процесс также может быть ответственен за некоторый синтез легких элементов, например, S^{36} , Ca^{46} , Ca^{48} и, возможно, Ti^{47} , Ti^{49} и Ti^{50} . Детали этого процесса и результаты расчетов обсуждаются в Разделах VII и VIII. r -процесс создает пики распространенности при $A = 80, 130$ и 194 .

2.1.7 p-Процесс (p Process)

Это процесс захвата протонов с испусканием гамма-излучения (p, γ), или испускание нейтрона после поглощения гамма-кванта (γ, n), который ответственен за синтез ряда протонно-богатых изотопов, имеющих низкую распространенность по сравнению с соседними нормальными и нейтронно-богатыми изотопами. Он обсуждается в Разделе IX.

2.1.8 x-Процесс (x Process)

Этот процесс ответственен за синтез дейтерия, лития, бериллия и бора. Здесь может требоваться более чем один тип процесса (описываемые совместно как x -процесс), но характерной особенностью всех этих элементов является то, что они очень нестабильны при температурах звездных недр, так что представляется вероятным, что они были произведены в областях с низкой плотностью и температурой. Однако существуют некоторые наблюдательные свидетельства против этого, которые обсуждаются в Разделе X вместе с деталями возможных синтезирующих процессов.

В верхней половине Таблицы II,1 суммарные распространенности различных естественных групп элементов, взятые из таблицы атомных распространенностей Сьюсса и Юри (Su56), суммированы и перечислены, во-первых, по количеству и доле от общего числа, и во-вторых, по весу и массовой доле от общего количества. В нижней половине Таблицы II,1 выполнено аналогичное перечисление, но в этом случае изотопы сгруппированы в соответствии с тем, какой режим синтеза ответственен за их производство. Наш метод отнесения к этим различным процессам описан в подразделе В. В некоторых случаях естественная группа включает в себя именно элементы, созданные одним процессом; например, группа элементов железа является также изотопами e -процесса в нижней половине таблицы, и, следовательно, одна и та же запись появляется в обеих половинах. В одном случае, а именно для изотопов r -процесса промежуточного атомного веса, приведенная оценка является расчетной, выполненной в Разделе VII.

Вспомогательным, но необходимым процессом, который также требуется в нашем описании синтеза элементов, является ядерный процесс, который обеспечит источник свободных нейтронов как для s -процесса, так и для r -процесса. Первое предложение в этом направлении было сделано Кэмероном (Ca54, Ca55) и Гринстейном (Gr54), которые предположили, что реакция $C^{13}(\alpha, n)O^{16}$ могла бы обеспечить такой источник. В дополнение к этому реакция $Ne^{21}(\alpha, n)Mg^{24}$ также была предложена Фаулером, Бербиджем и Бербидж (Fo55). Более детальная работа по скоростям этих реакций, выполненная Мэрионом и Фаулером, теперь доступна (Ma57), и некоторое обсуждение включено в Раздел III. [1]

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен всесторонний обзор процессов синтеза элементов в звездах, основанный на классической статье Бербиджа, Бербиджа, Фаулера и Хойла (B^2FH). Анализ кривой распространенности атомов показывает, что наблюдаемое распределение химических элементов не является простым и требует для своего объяснения множества различных ядерных процессов. Рассмотрены восемь основных механизмов синтеза: водородное горение, гелиевое горение, α -процесс, e -процесс (равновесный процесс для элементов группы железа), s -процесс (медленный захват нейтронов), r -процесс (быстрый захват нейтронов), p -процесс (образование протонно-богатых изотопов) и x -процесс (синтез легких элементов D, Li, Be, B).

В отличие от теорий первичного синтеза элементов в ранней Вселенной, звездная теория имеет преимущество, поскольку опирается на наблюдаемый факт протекания ядерных реакций в недрах звезд в настоящее время. Звезды не только производят энергию посредством термоядерных реакций, но и являются "фабриками" по производству химических элементов, обогащая межзвездную среду через взрывы сверхновых, новые и потерю вещества на поздних стадиях эволюции. Автоматический рост температуры по мере истощения ядерного топлива обеспечивает последовательное вовлечение все более тяжелых ядер в реакции синтеза, culminating в образовании элементов вплоть до железа и никеля.

Особое внимание уделено нейтронным процессам (s и r), ответственным за синтез основной массы ядер тяжелее железа, включая уран и торий. Обсуждены также источники нейтронов, такие как реакции $C^{13}(\alpha, n)O^{16}$ и $Ne^{21}(\alpha, n)Mg^{24}$, необходимые для протекания этих процессов.

Несмотря на то, что вопрос о том, происходят ли все элементы исключительно в звездах или же требуется первичный синтез, остается открытым, звездная теория синтеза элементов дает наиболее полное и согласованное с наблюдениями объяснение особенностей кривой распространенности, включая пики, соответствующие магическим числам нейтронов, и существование радиоактивных изотопов. Дальнейшие экспериментальные, наблюдательные и теоретические исследования, основанные на заложенном в данной работе фундаменте, позволят окончательно подтвердить происхождение элементов в звездах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] W. A. S. Lamb и R. E. Hester. В: *Phys. Rev.* 107 (1957), с. 550.
- [2] L. Spitzer. В: *Astrophys. J.* 109 (1949), с. 548.