

Р.А. Уперчук

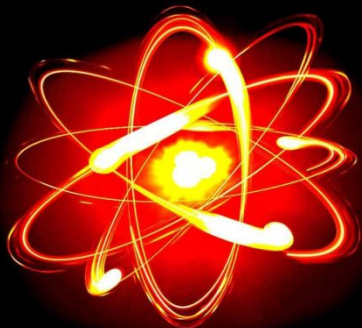
Звёздный нуклеосинтез

Вместо предисловия

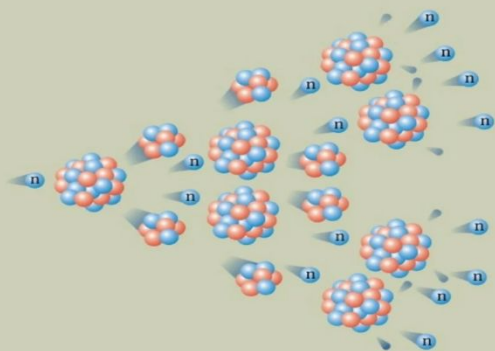
- В стандартных школьных учебниках термоядерным реакциям отводится довольно мало информации, хотя они заслуживают, по меньшей мере, более детального раскрытия. Как минимум, всё вещество, из которого состоит мироздание, образовалось в результате термоядерных реакций, протекавших миллиарды лет назад в недрах звёзд. Помимо этого, термоядерная энергетика в настоящее время видится как потенциальная возможность преодоления мирового энергетического кризиса.
- В данном материале мы рассмотрим понятия, связанные с тематикой термоядерных реакций, разберём, как во «внутренностях» звёзд рождается вещество, а также ответим на каверзные и неоднозначные вопросы. Обратите внимание, что термоядерные реакции будут раскрываться исключительно в контексте астрономии, то есть, схем термоядерных реакторов вы здесь не найдёте.

Приятного прочтения!

Термоядерные реакции. Основные понятия



- Термоядерная реакция – разновидность ядерной реакции, при которой атомные ядра объединяются (термоядерный синтез) за счёт больших значений собственной кинетической энергии.
- Ядерная реакция – реакция, сопровождающаяся изменением состава атомных ядер реагентов и образованием веществ с новым строением ядра.
- Химическая реакция – реакция образования новых веществ в ходе взаимодействия реагентов, без изменения состава атомных ядер.



Чем принципиально отличаются ядерные и химические реакции?

- *При химической реакции изменяются только МОЛЕКУЛЫ, а САМИ АТОМЫ химических элементов остаются теми же как у продуктов, так и у реагентов. В ядерных же реакциях образуются совершенно ДРУГИЕ ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ.*
- Термоядерные реакции – сущность звёздного нуклеосинтеза.



Почему термоядерные реакции не могут протекать в «традиционных» условиях, искусственно создаваемых в промышленных ядерных реакторах?

- *Дело в том, что для таких реакций необходимо выделение огромного количества тепловой энергии (согласно молекулярно-кинетической теории, тепловая энергия есть средняя кинетическая энергия атомов, которая необходима для преодоления кулоновских сил электростатического отталкивания между ядрами атомов, вследствие чего закон сохранения энергии выполняется).*

ВЕЩЕСТВО РАСПАДАЕТСЯ?

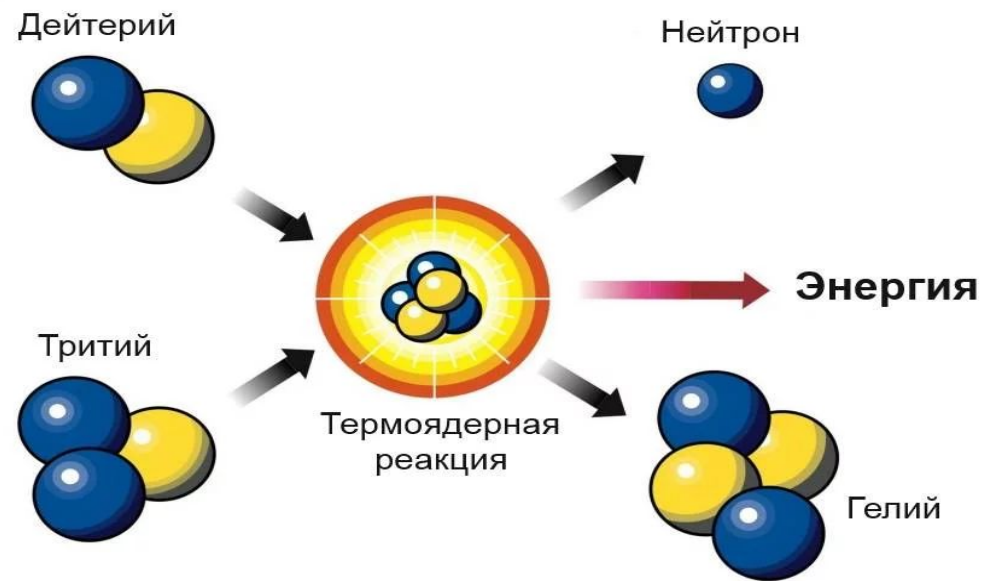
Это ядерная реакция.

ВЕЩЕСТВО СИНТЕЗИРУЕТСЯ?

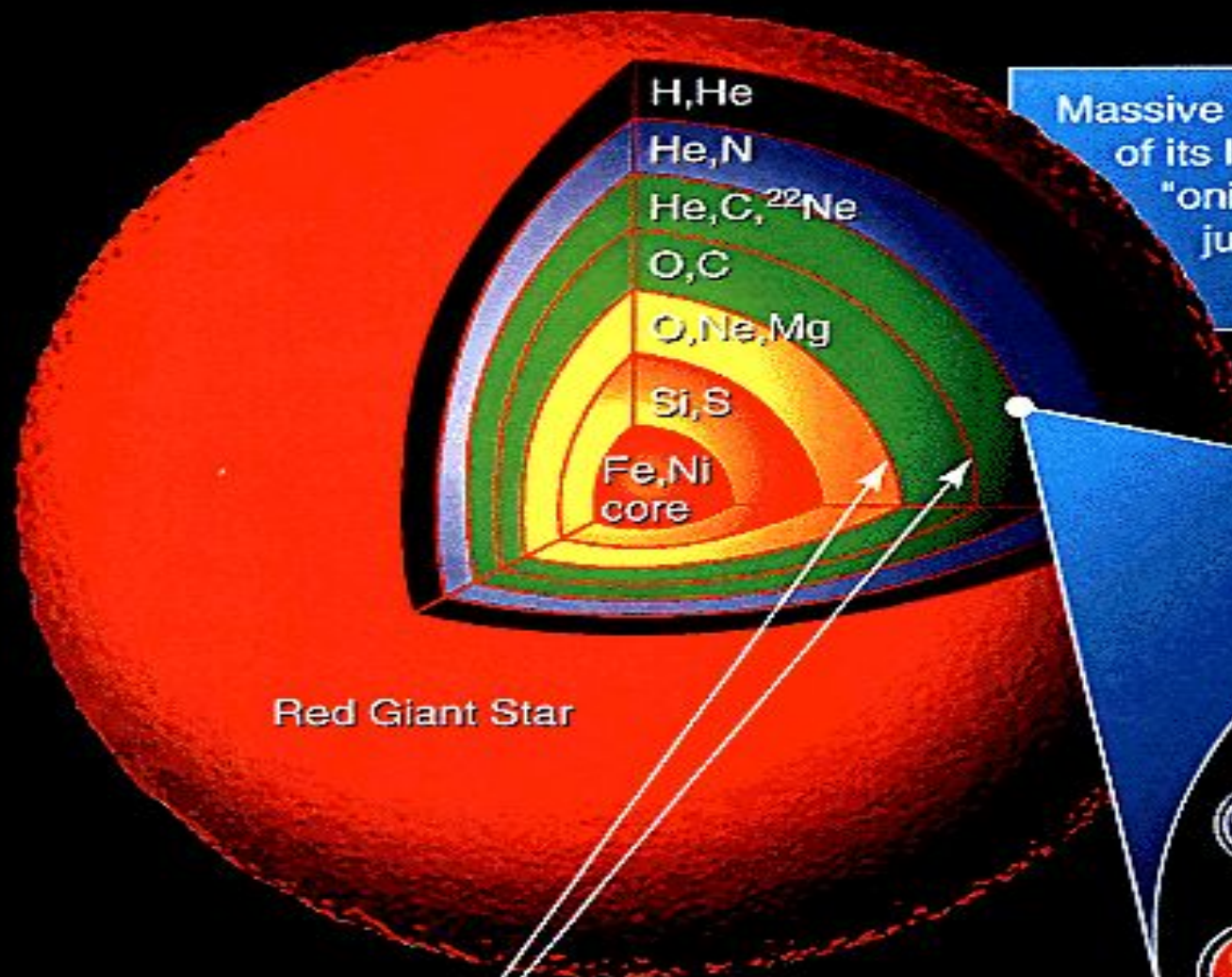
Это термоядерная реакция.

Советуем прочитать:

Балабанов, Е.М. Термоядерные реакции.

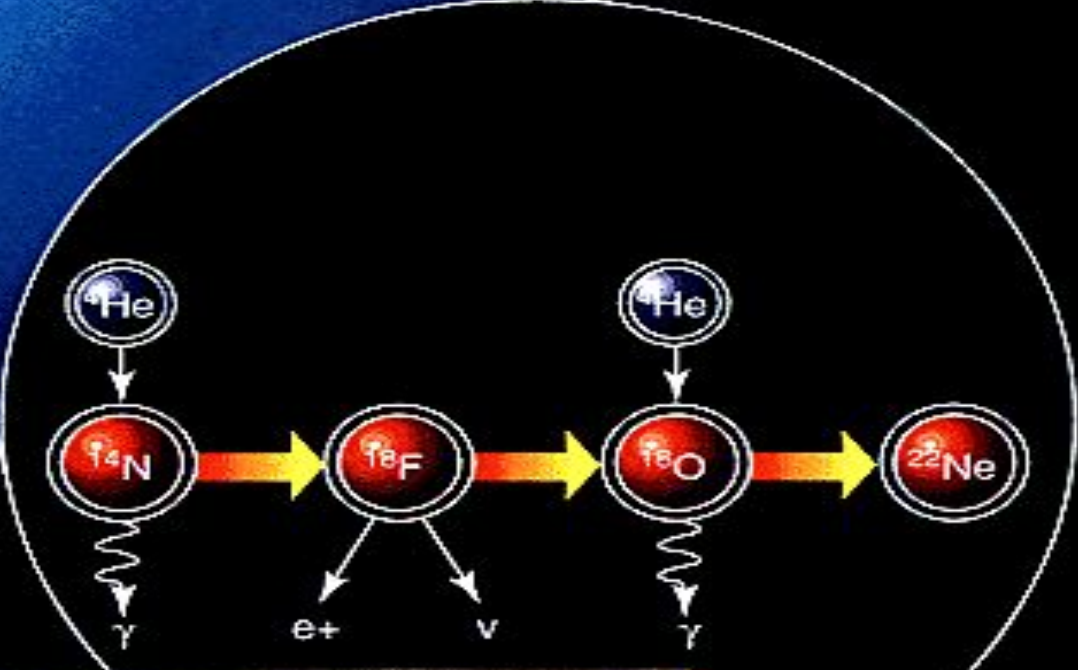


На следующем слайде будет показано внутреннее строение красного гиганта. Обратите внимание, что звёзды на разных стадиях своей жизни и в зависимости от исходных условий звездообразования имеют различное внутреннее строение, и, естественно, термоядерные реакции, протекающие в недрах разных звёзд, оказываются различными. Подробнее о том, как выглядят звёзды разных классов изнутри, можно прочитать в моём пособии «Звёздная астрономия».



Massive star near the end of its lifetime has an "onion-like" structure just prior to exploding as a supernova

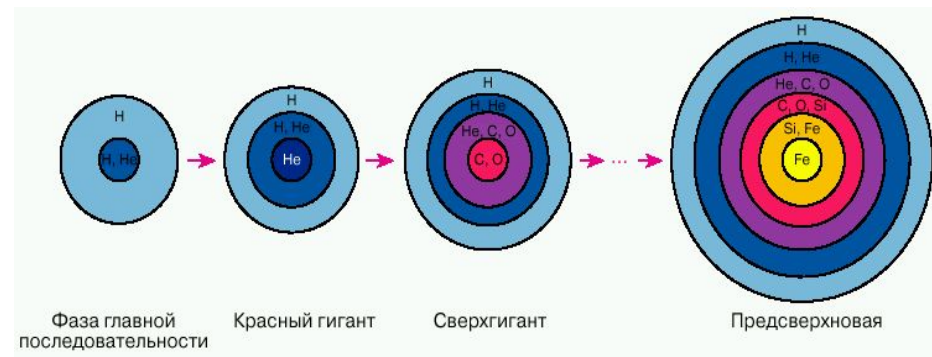
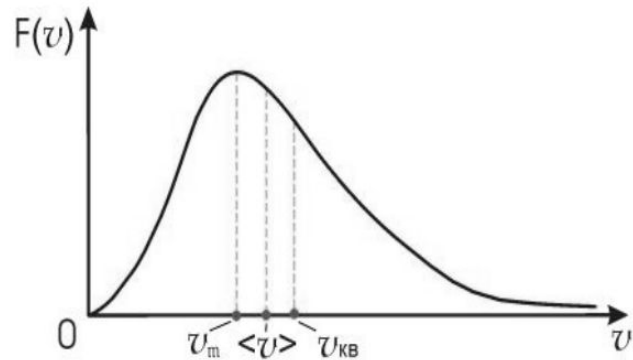
Nuclear burning occurs at the boundaries between zones



Example of nuclear reactions that build neutron-rich isotopes

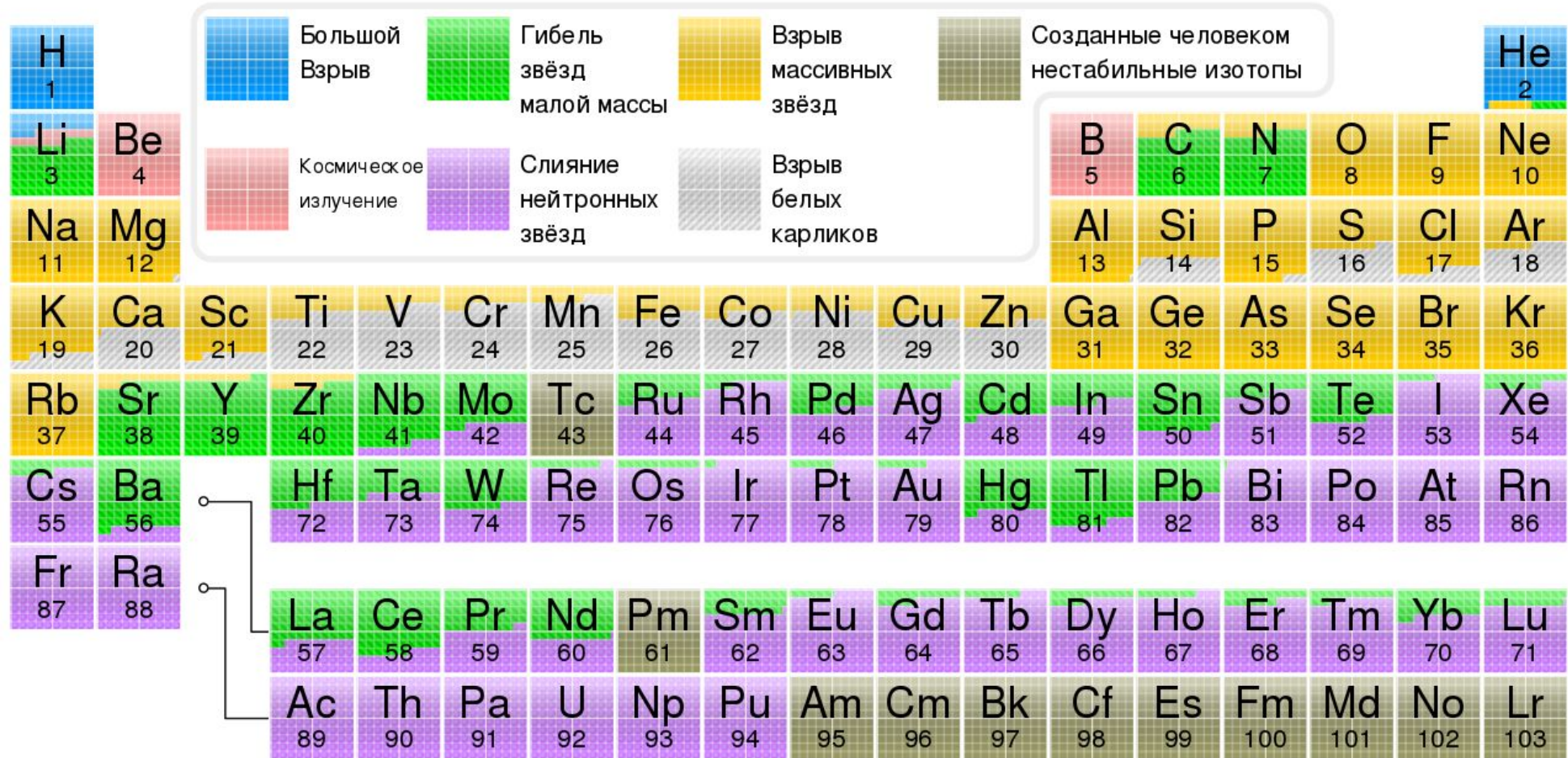
Механизм термоядерных реакций

- Как уже было сказано, вещества, чтобы вступить в термоядерную реакцию, должны быть разогреты до высокой температуры, чтобы ядра их атомов смогли сблизиться друг с другом на расстояние, находящееся в диапазоне сильного взаимодействия. Для каждой реакции существует свой энергетический порог, необходимую температуру же можно рассчитать приближённо по школьным формулам. При этом стоит принять во внимание, что в реальных условиях температура, до которой необходимо разогреть вещества, оказывается меньшей, и этому явлению есть две причины:
 - 1) Туннельный эффект, в результате которого ядра могут туннелировать сквозь потенциальный барьер.
 - 2) Распределение Максвелла атомных ядер по энергиям и скоростям, согласно которому, при любом термодинамическом состоянии есть отдельное количество частиц, чья температура превышает среднюю. Именно они и вступают в термоядерную реакцию.



Один из сценариев звёздной эволюции

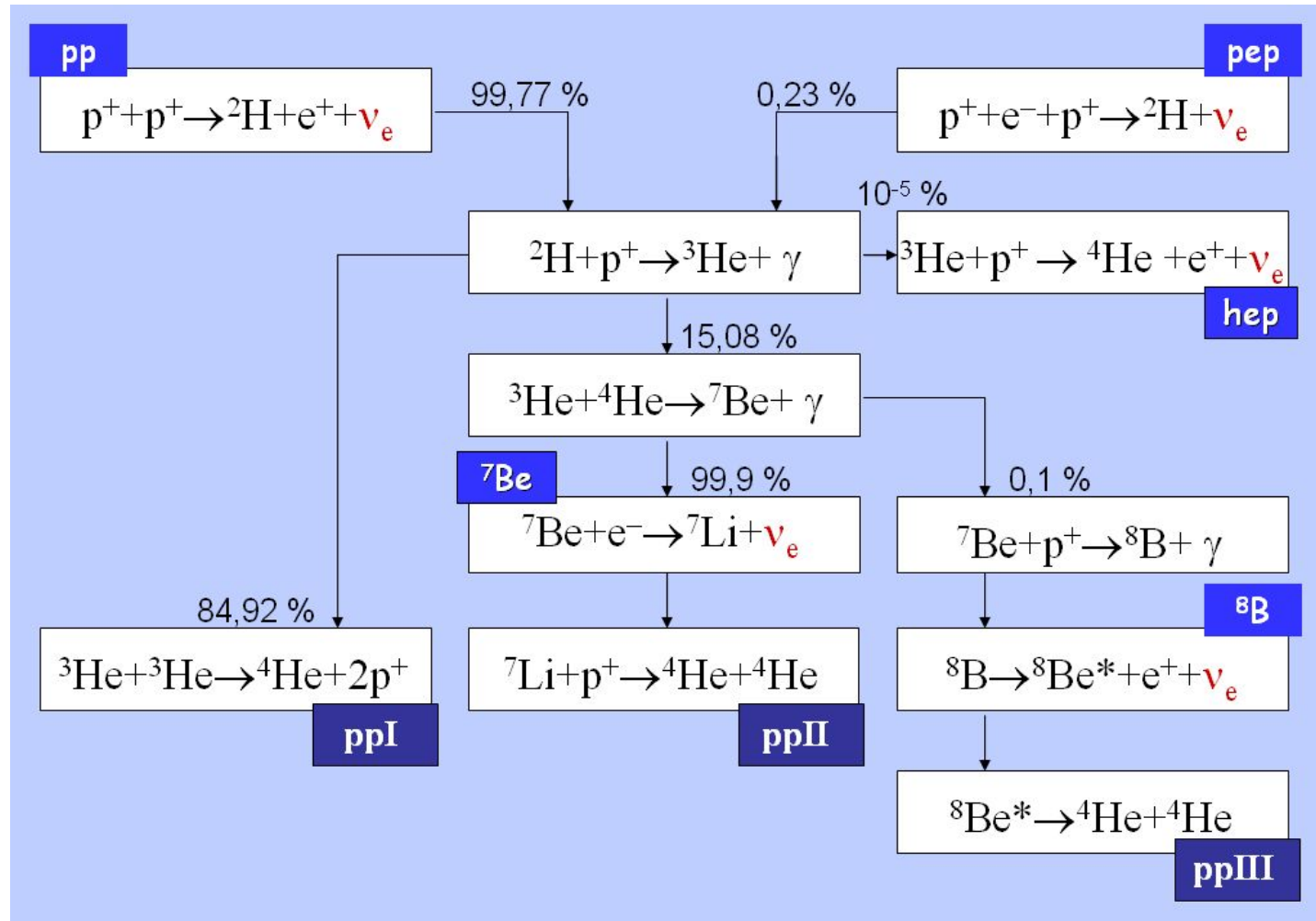
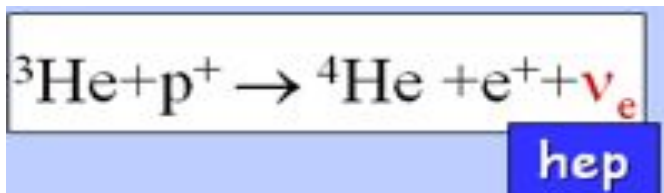
Как образовались химические элементы



- Продукты реакций звёздного нуклеосинтеза попадают в космическое пространство двумя путями: либо звёздным ветром, или космическим излучением, или в результате взрыва звёзд. Как видно из данной схемы, изначально, в ходе Большого Взрыва, образовалось некоторое количество водорода, которые в ходе реакций первичного нуклеосинтеза дали атомы гелия, а затем, в зоне дальнейших реакций, произошло образование лития.

Протон-протонный цикл

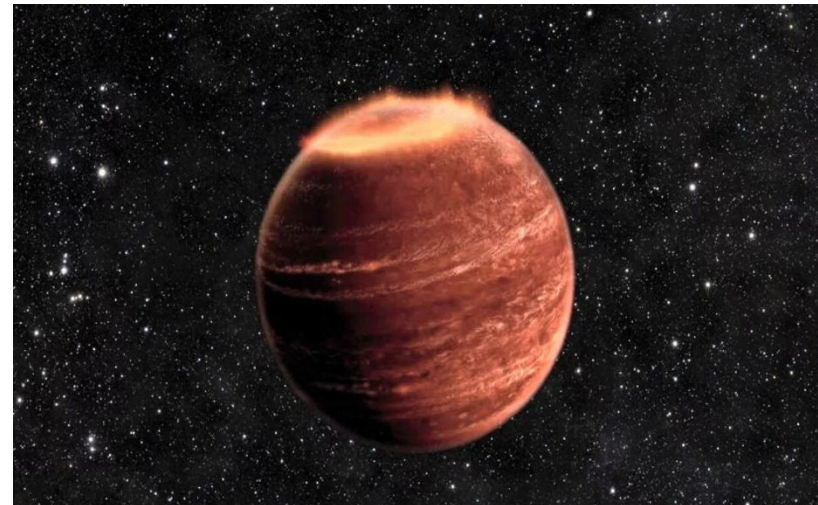
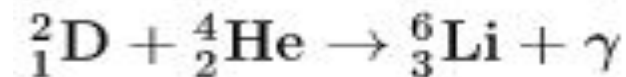
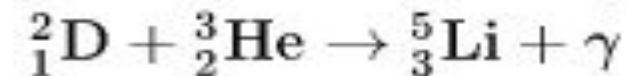
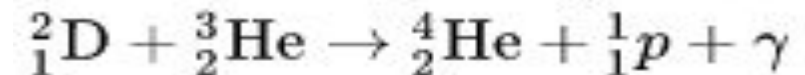
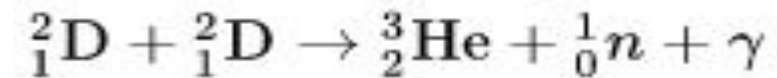
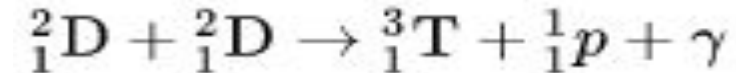
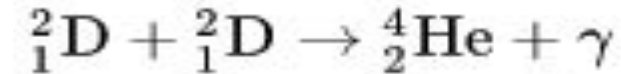
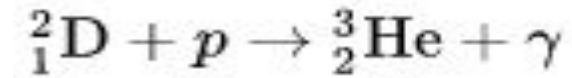
Протон-протонный цикл – цикл термоядерных реакций, протекающий в недрах звёзд главной последовательности. На приведённой схеме показаны цепочки с различными промежуточными продуктами, которые могут протекать в зависимости от сочетания внешних условий. Обратите внимание, как называются реакции. Например, pp – это слияние двух протонов в левой части соответствующего уравнения. Основная суть цикла – превращение водорода в гелий-4.



- Обратите внимание на *hep-реакцию*. Она представляет собой пример реакции, протекающей за счёт слабого взаимодействия (как известно, для него имеется довольно мало визуальных примеров).

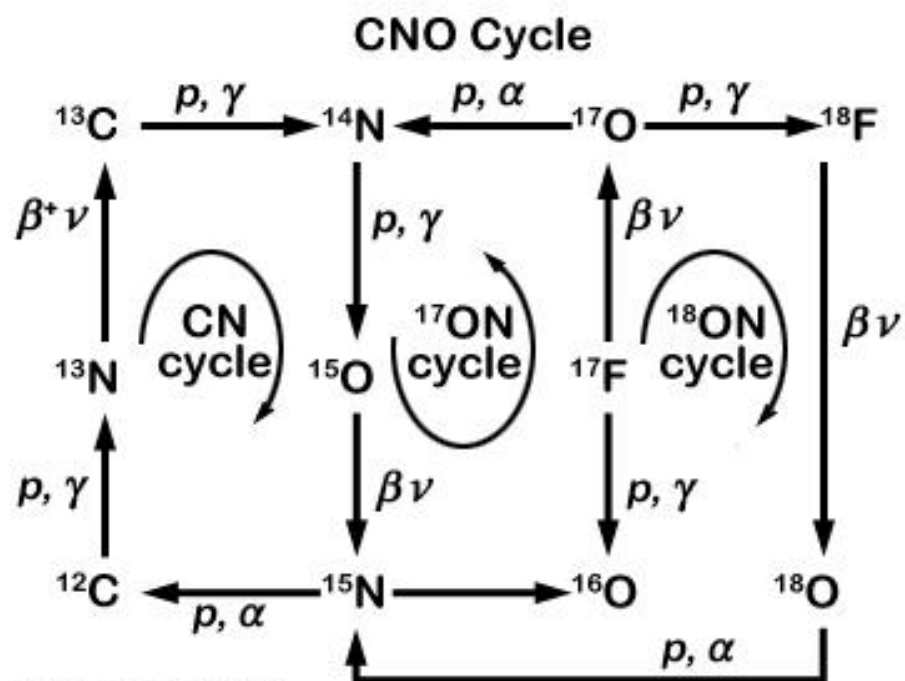
Ядерное горение дейтерия

- В ходе реакций ядерного горения дейтерия образуется гелий, однако не гелий-4, а гелий-3. Они могут протекать либо в ходе протон-протонного цикла, либо самостоятельно.
- Дейтерий аккрецирует на протозвезду из околозвёздного пространства, а в ядро попадает из-за того, что протозвезды конвективны до определённого момента времени. Когда конвекция прекращается, заканчивается и горение дейтерия, ядро звезды сжимается и нагревается, пока в нём не загорится водород. Стадия горения дейтерия длится всего несколько миллионов лет.
- Дейтерий может гореть, помимо протозвёзд, на протопланетах. Горение дейтерия – одна из основных реакций, протекающих в недрах коричневых карликов.



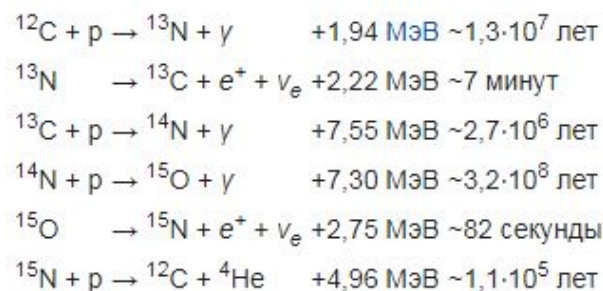
CNO-цикл (цикл Бете)

- CNO-цикл – цикл термоядерных реакций, при которых углерод, азот и кислород играют роль катализаторов. Такие реакции протекают в массивных звёздах главной последовательности. Данный цикл довольно сложен в описании, поэтому приведём цепочки реакций по отдельности.

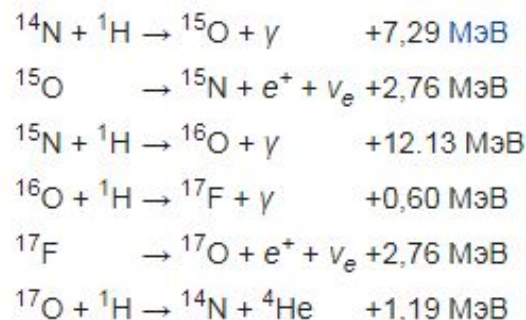


© 2003 Stuart J. Robbins

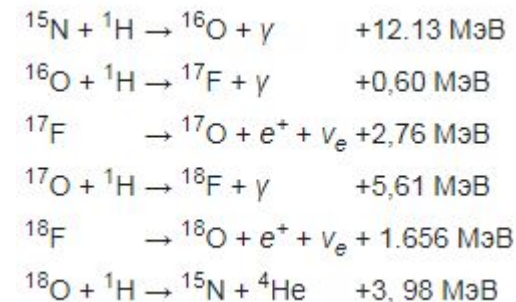
Основной путь



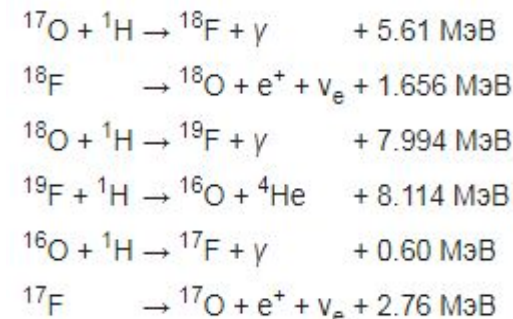
CN-цикл (NO I-цикл)



NO II-цикл



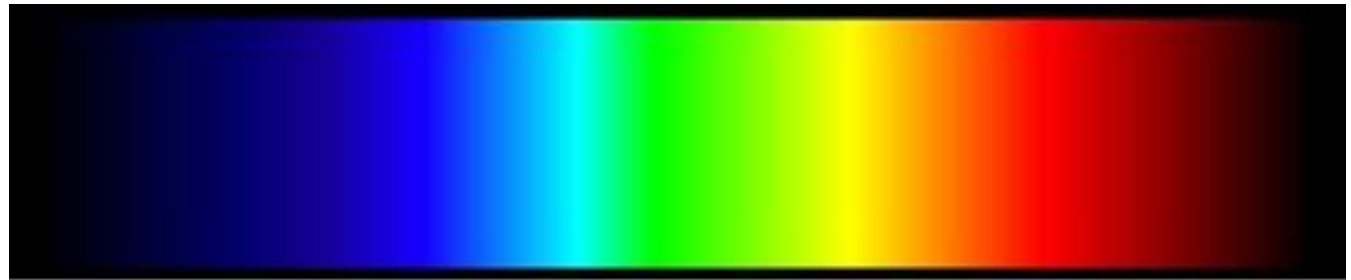
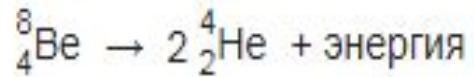
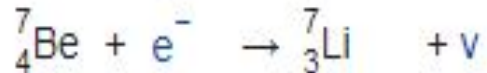
OF-цикл



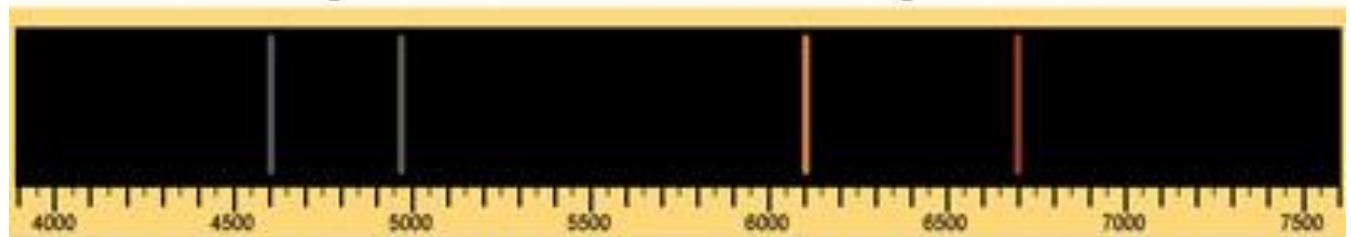
Бывает, что последовательность приведённых реакций может нарушаться при взрывном горении водорода (вспышки сверхновой и др.). Тогда CNO-цикл превращается в горячий CNO-цикл.

Ядерное горение лития

- В ходе данной реакции литий превращается в гелий-4. Она протекает в субзвёздных объектах (например, в недрах коричневых карликов). В астрофизике существует понятие «литиевого теста», когда по содержанию литиевых линий в спектре определяют, относится ли рассматриваемый объект к малым звёздам или же его следует отнести к коричневым карликам.



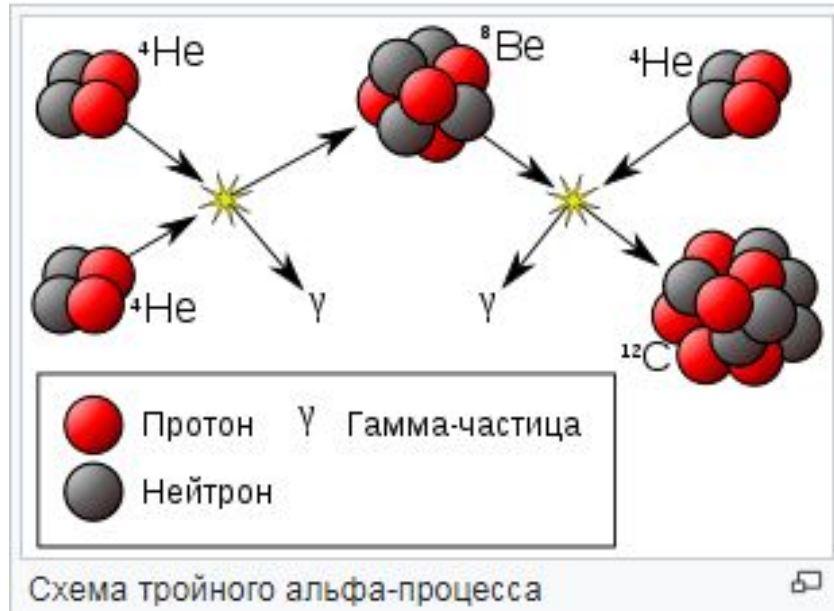
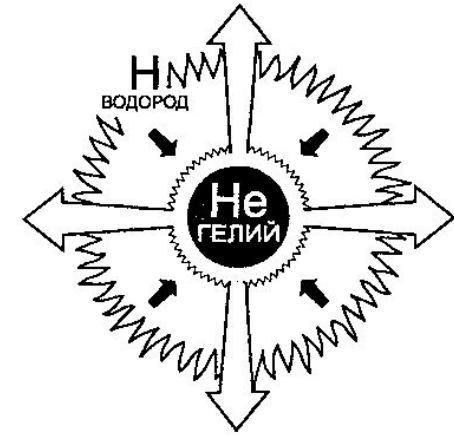
Complete Visible Spectrum



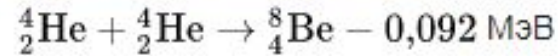
Emission Spectrum of Lithium

Тройная гелиевая реакция

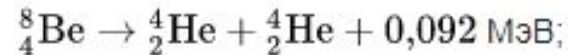
- В ходе данной цепочки реакций из трех ядер гелия-4 образуется ядро углерода-12. Обычно гелиевые реакции начинаются по мере накопления в центральной части звезды ядер гелия, вследствие чего происходит нагрев звезды и переход ее в область гигантов.



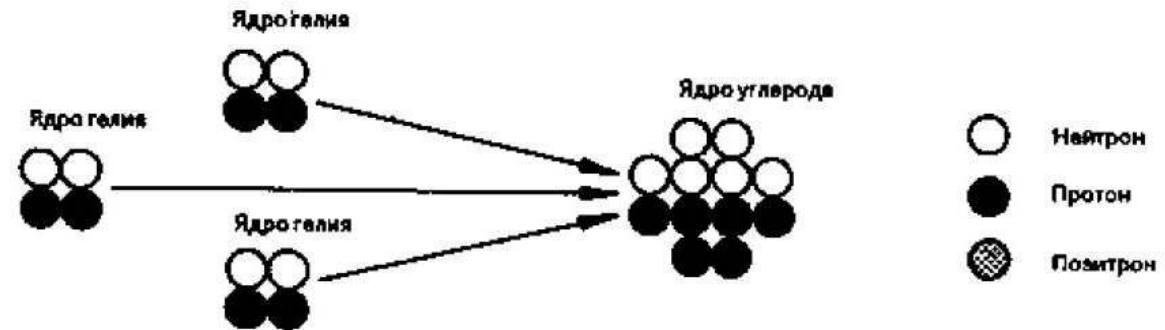
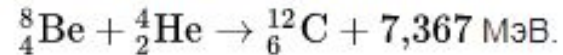
- Эндотермическая реакция образования нестабильного изотопа бериллия-8:



Ядра ${}^8_4\text{Be}$ с периодом полураспада $6,7 \cdot 10^{-17}$ с распадаются в ходе реакции:



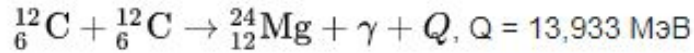
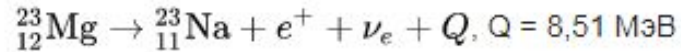
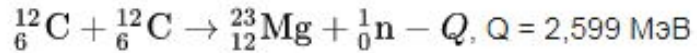
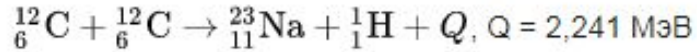
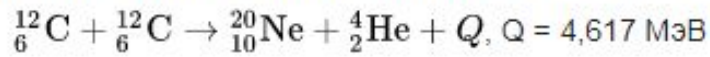
- Экзотермическая реакция образования возбуждённого ядра углерода-12:



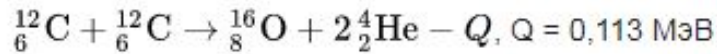
Общая схема реакции, без промежуточных процессов

Ядерное горение углерода

Реакции с двухчастичным конечным состоянием:

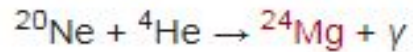


Реакции с трёхчастичным конечным состоянием:

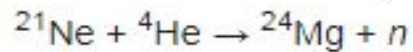


Эта цепочка термоядерных реакций имеет место в недрах звёзд с массой >5-6 солнечных масс.

Ядерное горение неона



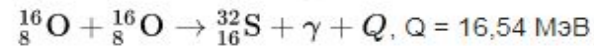
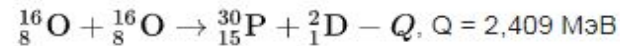
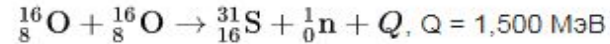
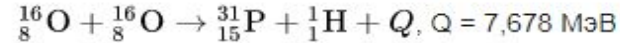
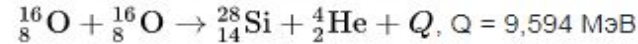
Или:



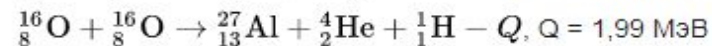
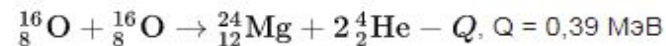
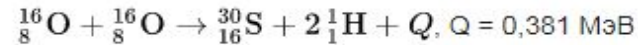
Эта цепочка термоядерных реакций имеет место в недрах звёзд с массой >8-25 солнечных масс.

Ядерное горение кислорода

Реакции с двухчастичным конечным состоянием:

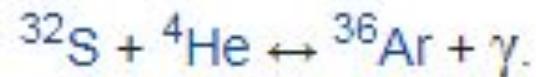
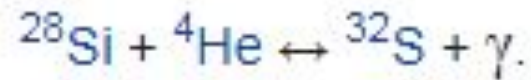


Реакции с трёхчастичным конечным состоянием:



Эта цепочка термоядерных реакций имеет место в недрах любых звёзд с массой больше солнечной.

Ядерное горение кремния



Эта цепочка термоядерных реакций имеет место в недрах звёзд с массой >8-11 солнечных масс.

А дальше? Альфа-распад...

- Мы рассмотрели все основные термоядерные реакции, входящие в совокупность реакций звёздного нуклеосинтеза. Строго говоря, нуклеосинтез происходит не только в ходе исключительно термоядерных реакций. Так, многие элементы были образованы в ходе цепочек альфа-распада:

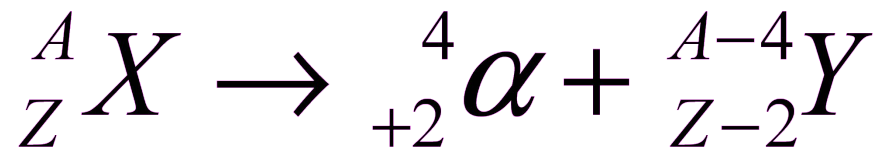
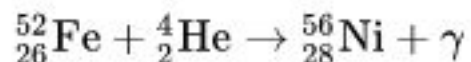
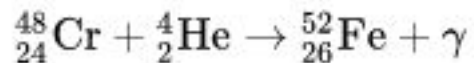
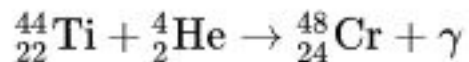
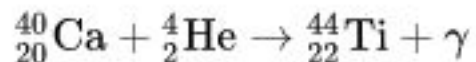
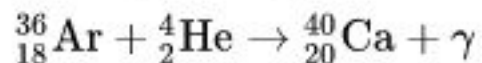
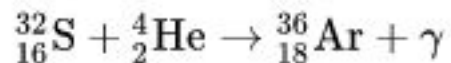
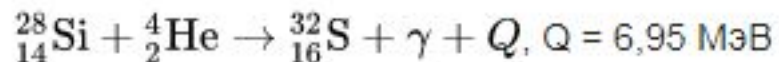
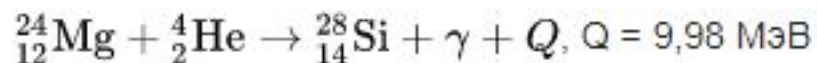
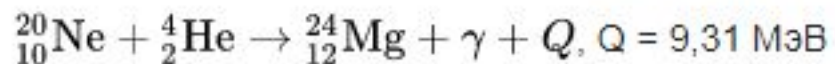
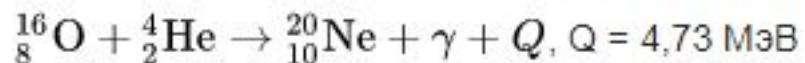
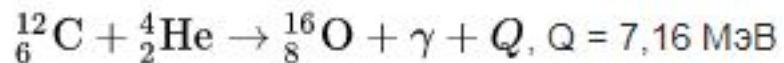
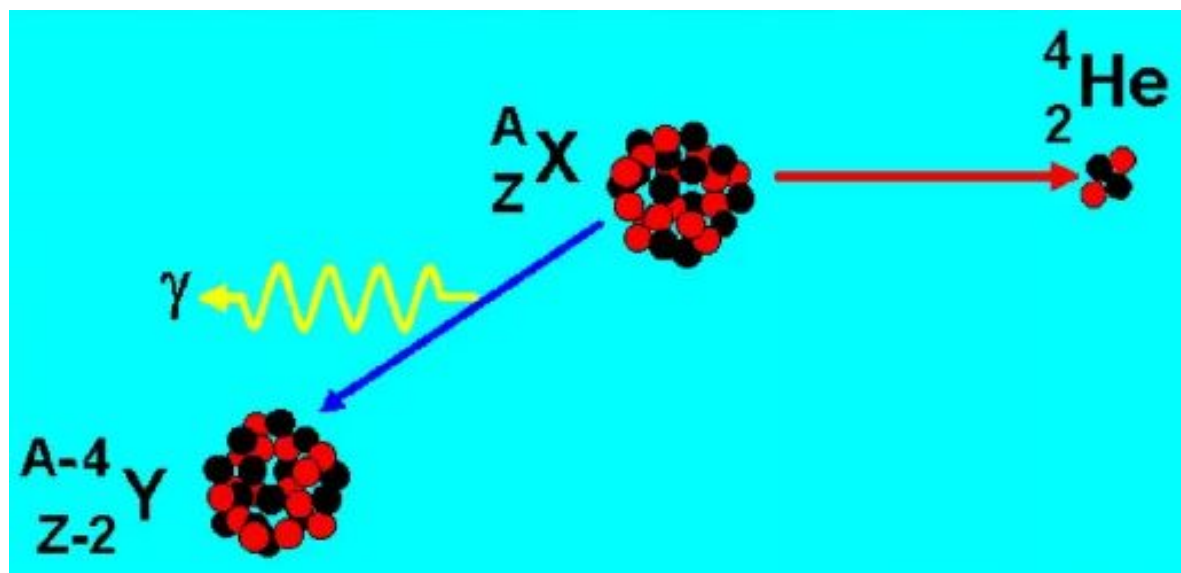
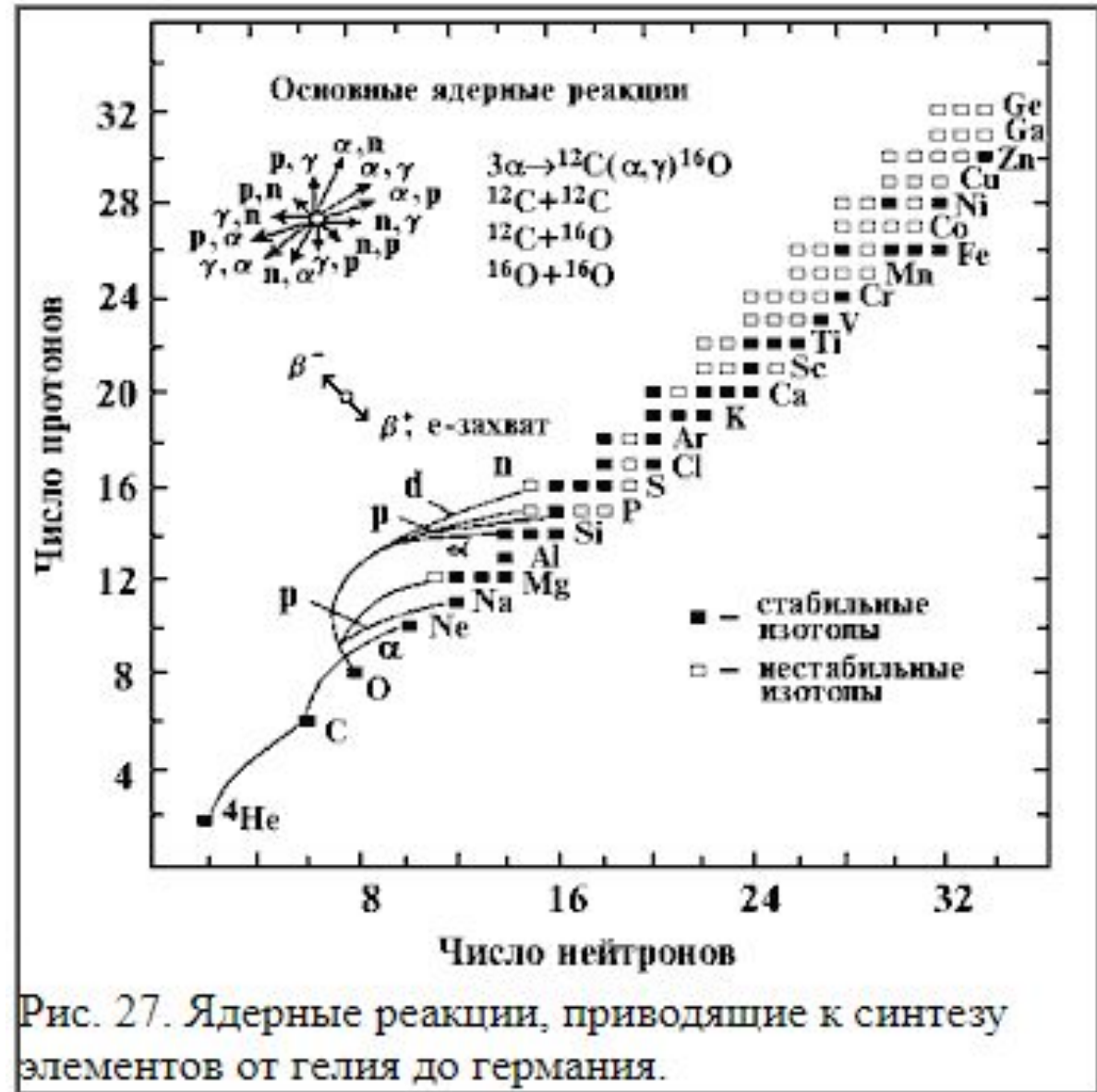


Схема альфа-распада



Нейтронный захват

- Сущность реакций нейтронного захвата проста и ясна из названия: атомное ядро захватывает нейтрон, в результате чего образуется более тяжелое ядро. Нейтронный захват может происходить как ядерная реакция, как упругое или неупругое столкновение, однако мы ограничимся лишь первой схемой, так как она имеет место в звёздном нуклеосинтезе и ответственна за синтез элементов с порядковым номером выше железа. Существует два основных типа нейтронного захвата, отличающихся соотношением скорости захвата нейтронов и скорости бета-распада: r-процесс (rapid – быстрый) и s-процесс (slow – медленный).
- При r-процесса скорость захвата нейтронов выше, чем скорость бета-распада. При s-процессе все с точностью наоборот.



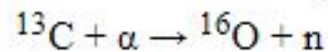
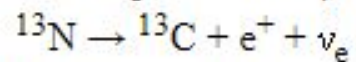
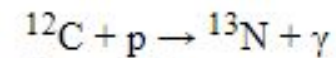
S-процесс

Для того, чтобы в звездах эффективно протекал s-процесс необходимы определенные условия.

1. Температура вещества T должна быть больше 10^8 К для того, чтобы могли происходить ядерные реакции с образованием нейтронов.
2. Плотность нейтронов должна превышать 10^{10} см⁻³.
3. Условия 1 и 2 должны существовать в звезде в течение достаточно продолжительного времени (больше 10^3 лет), чтобы путем последовательного захвата нейтронов могли образовываться тяжелые ядра.
4. Продукты s-процесса должны эффективно выноситься во внешнюю оболочку звезды и попадать в межзвездную среду без дальнейших ядерных реакций.

- S-процесс происходит в оболочках красных гигантов.

Образование нейтронов происходит в следующей цепочке реакций:



$$(Q = 1.94 \text{ МэВ}),$$

$$(Q = 1.20 \text{ МэВ}, T_{1/2} = 10 \text{ мин})$$

$$(Q = 2.22 \text{ МэВ}).$$

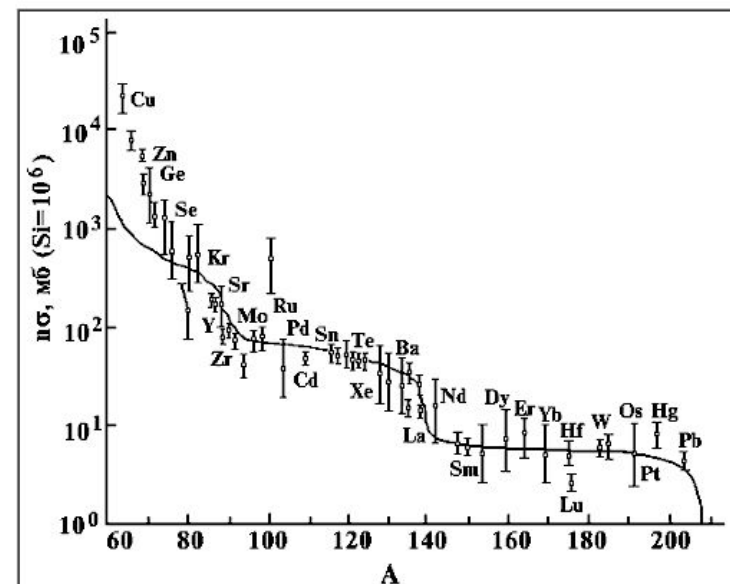
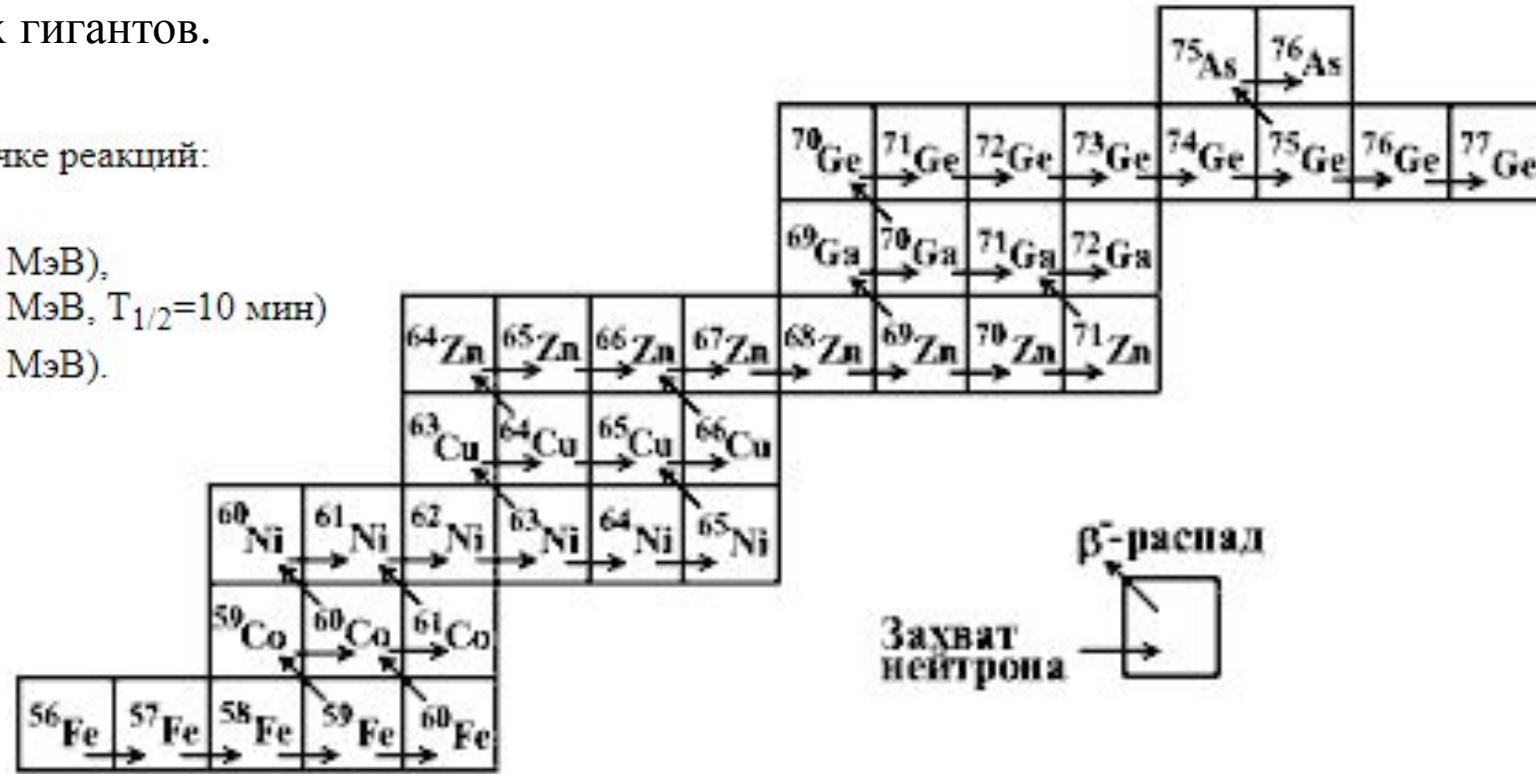
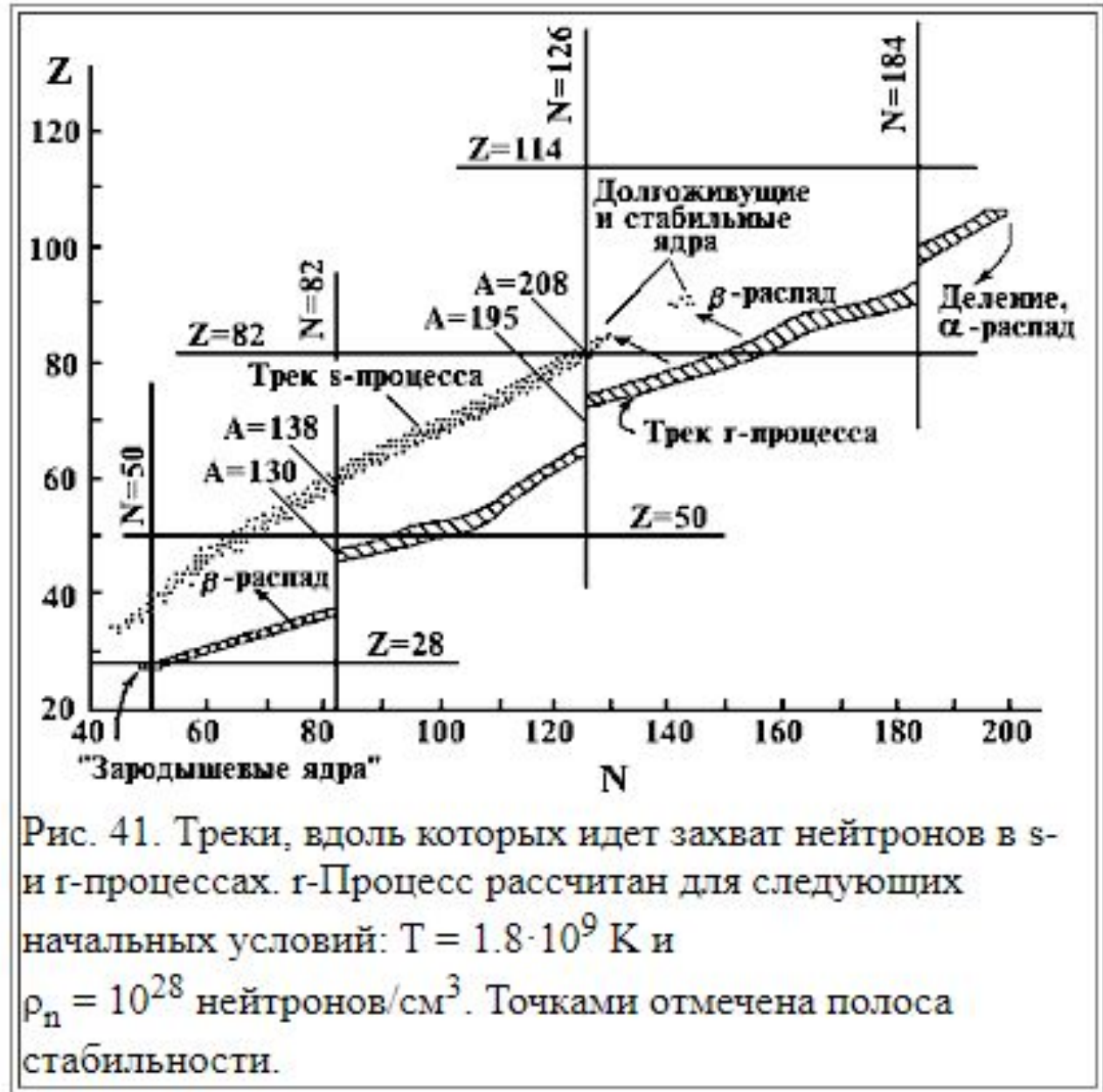


Рис. 30. Экспериментальная зависимость $n\sigma$ от массового числа A для элементов Солнечной системы.

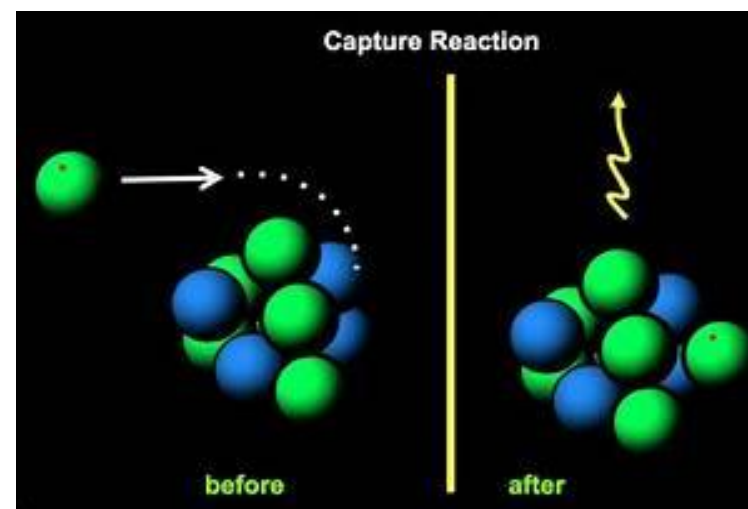
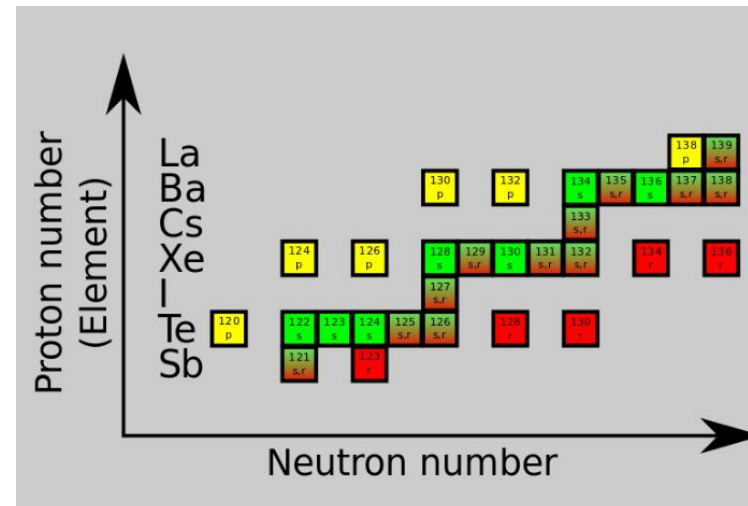
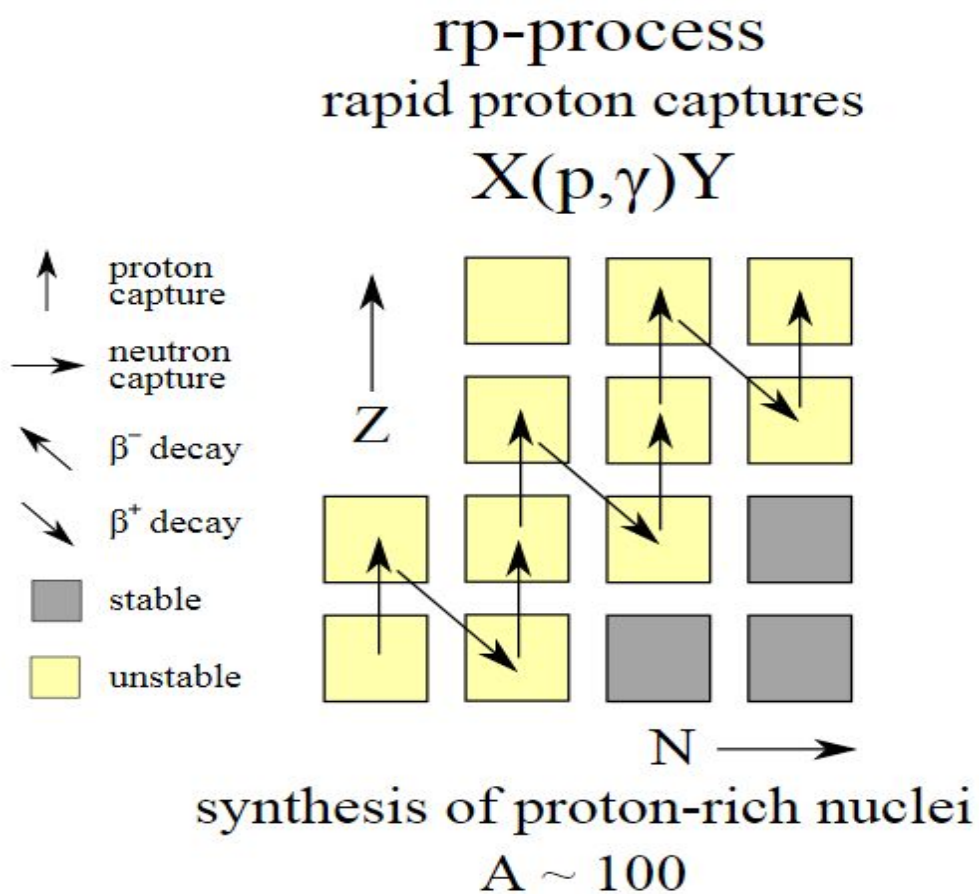
R-процесс

- Быстрый, или r-процесс захвата нейтронов ответственен за образование изотопов таких элементов, как германий, молибден, цирконий, платина, ксенон и др. Одно из мест, где протекает r-процесс – нейтронные звёзды.



Протонный захват

- Захватывать можно не только нейтроны, но и протоны. Есть также два вида захвата протонов: р-процесс (обыкновенный) и rp-процесс (захват быстрых протонов).



Нейтронизация

- Нейтронизация — захват тяжёлыми элементами электронов на поздних стадиях звёздной эволюции. Этот процесс лежит в основе образования нейтронных звёзд.

Пороговые параметры нейтронизации некоторых ядер

Первая реакция нейтронизации	Пороговая энергия ε_{c1} , МэВ	Пороговая плотность ρ_{c1} , г/см ³	Пороговое давление P_{c1} , Н/м ²	Вторая реакция нейтронизации	ε_{c2} , МэВ
${}^1\text{H} \rightarrow n$	0,783	$1,22 \cdot 10^7$	$3,05 \cdot 10^{23}$		
${}^3\text{He} \rightarrow T$	0,0186	$2,95 \cdot 10^4$	$1,41 \cdot 10^{19}$	$T \rightarrow 3n$	9,26
${}^4\text{He} \rightarrow T + n$	20,6	$1,37 \cdot 10^{11}$	$3,49 \cdot 10^{28}$	$T \rightarrow 3n$	9,26
${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B}$	13,4	$3,90 \cdot 10^{10}$	$6,51 \cdot 10^{27}$	${}^{12}\text{B} \rightarrow {}^{12}\text{Be}$	11,6
${}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{16}\text{N}$	10,4	$1,90 \cdot 10^{10}$	$2,50 \cdot 10^{27}$	${}^{16}\text{N} \rightarrow {}^{16}\text{C}$	8,01
${}^{20}\text{Ne} \rightarrow {}^{20}\text{F}$	7,03	$6,22 \cdot 10^9$	$5,61 \cdot 10^{26}$	${}^{20}\text{F} \rightarrow {}^{20}\text{O}$	3,82
${}^{24}\text{Mg} \rightarrow {}^{24}\text{Na}$	5,52	$3,17 \cdot 10^9$	$2,28 \cdot 10^{26}$	${}^{24}\text{Na} \rightarrow {}^{24}\text{Ne}$	2,47
${}^{28}\text{Si} \rightarrow {}^{28}\text{Al}$	4,64	$1,96 \cdot 10^9$	$1,20 \cdot 10^{26}$	${}^{28}\text{Al} \rightarrow {}^{28}\text{Mg}$	1,83
${}^{40}\text{Ca} \rightarrow {}^{40}\text{K}$	1,31	$7,79 \cdot 10^7$	$1,93 \cdot 10^{24}$	${}^{40}\text{K} \rightarrow {}^{40}\text{Ar}$	7,51
${}^{56}\text{Fe} \rightarrow {}^{56}\text{Mn}$	3,70	$1,15 \cdot 10^9$	$5,29 \cdot 10^{25}$	${}^{56}\text{Mn} \rightarrow {}^{56}\text{Cr}$	1,64

Вместо заключения хотелось бы отметить, что не стоит воспринимать все приведённые в данном материале механизмы исключительно строго. Так, несмотря на то, что в звёздах-гигантах происходят гелиевые реакции или горение более тяжелых элементов, протон-протонный цикл и CNO-цикл также имеют место, так как вероятность наличия водорода или катализаторов в достаточном для реакции количестве не равна нулю. Стоит учитывать и термо-барический градиент в недрах звёзд, приводящий к тому, что в разных частях одной и той же оболочки звезды развивается различная температура и давление, а также концентрации реагентов. Теория звёздного нуклеосинтеза не является законченной, с каждым годом проводятся новые и новые исследования и делаются открытия, которые вносят правки в актуальную картину мира. Советуем читать и перечитывать различные источники, чтобы быть в курсе научных событий.

И особенно хочется посоветовать изучать английский язык, если вы ещё не начали это делать, так как в русскоязычном Интернете и библиографии имеется заметный недостаток качественных источников по астрофизике и термоядерной энергетике, что отчётливо ощущалось во время создания данного пособия.

Спасибо за внимание!