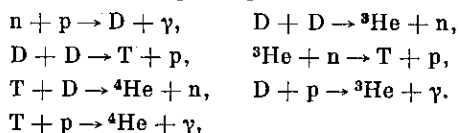


ной. Согласно *горячей Вселенной теории*, атомные ядра, более сложные и тяжёлые, чем протон, стали образовываться через  $\approx 100$  с после начала расширения Вселенной, когда в достаточно горячем веществе, содержащем протоны и нейтроны, при темп-ре  $T \sim 10^9$  К начали протекать *термоядерные реакции* синтеза самых лёгких элементов — дейтерия, трития и гелия:

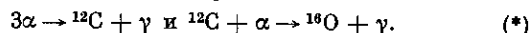


Стандартная горячая модель хорошо объясняет наблюдаемое обилие (относит. содержание) первичного (т. е. возникшего на этом этапе эволюции Вселенной)  ${}^4\text{He}$  в астрофиз. объектах ( $\approx 22\%$  по массе). Однако образование более тяжёлых ядер на ранней стадии расширяющейся Вселенной становится невозможным, т. к. уменьшение темп-ры и плотности вещества ограничивает реакции синтеза и не позволяет преодолеть т. н. щели в спектре масс атомных ядер при массовых числах  $A = 5$  и  $8$ , обусловленные отсутствием в природе стабильных нуклидов  ${}^5\text{He}$ ,  ${}^5\text{Li}$ ,  ${}^8\text{Be}$ . Образование следующих за гелием элементов связано с более поздними этапами эволюции Вселенной.

Большинство известных хим. элементов возникло через миллиарды лет после начала расширения Вселенной — в эпоху существования звёзд, галактик и космич. лучей. Происхождение лития, бериллия, бора в общей проблеме Н. представляет самостоят. интерес, т. к. эти элементы легко разрушаются в термоядерных реакциях (их равновесные концентрации малы) и поэтому их эфф. «производство» возможно лишь в неравновесных процессах. Такие неравновесные процессы предполагаются в рамках нек-рых моделей космологич. Н., напр. образование дейтерия в реакции  ${}^4\text{He}$  с антипротонами:  $\bar{p} + {}^4\text{He} \rightarrow D + p$ . Однако наиб. распространённым является представление о динамичном образовании лёгких элементов с помощью реакций скалывания при взаимодействии галактич. *космических лучей* с межзвёздной средой: быстрые протоны и альфа-частицы в составе космич. лучей бомбардируют ядра тяжёлых элементов межзвёздной среды и Солнечной системы, вызывая их расщепление на лёгкие ядра; быстрые ядра углерода, азота, кислорода в составе космич. лучей, взаимодействуя с межзвёздными ядрами водорода и гелия, также могут расщепиться на ядра лёгких элементов. Расчёты показывают, что эти ядерные реакции могут производить наблюдаемые обилия  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ . Трудности возникают лишь при объяснении необычного изотопного состава Li и B (резко выраженное преобладание чётных изотопов), а также при объяснении «производства» D и  ${}^3\text{He}$ , к-рые в указанных выше механизмах разрушаются явно быстрее, чем создаются. Эффективным дополнит. источником синтеза лёгких элементов, кроме космич. лучей, могут служить взрывы *сверхновых звёзд*. Распространение ударной волны во внеш. оболочках сверхновой и последующее охлаждение могут привести к реакциям синтеза  $n + p \rightarrow D + \gamma$ ,  $p + D \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ , а реакции скалывания на ядрах углерода, азота и кислорода, инициированные ударной волной, производят ядра Li, Be, B.

Происхождение подавляющего большинства изотопов тяжёлых хим. элементов, начиная с углерода и кончая долгоживущими трансактиновыми нуклидами (а возможно, и сверхтяжёлыми), обязано синтезу ядер в звёздах и во взрывах звёзд. Ядра элементов от углерода до никеля образуются в недрах звёзд в условиях высокой темп-ры в реакциях термоядерного синтеза. Ядра более тяжёлых элементов образуются, скорее всего, в массивных звёздах и во взрывах звёзд в результате последоват. реакций захвата нейтронов. Ядерный

синтез в звёздах можно разделить на «статистический» Н. (синтез ядер на равновесной гидростатич. стадии эволюции звёзд) и *взрывной нуклеосинтез* (синтез ядер при взрывах звёзд). К механизмам статич. Н. прежде всего следует отнести *водородный цикл* и *углеродно-азотный цикл* в звёздах гл. последовательности (см. *Герципрунга — Расселла диаграмма*), к-рые обеспечивают превращение водорода в гелий, создавая нек-рый избыток гелия и азота по отношению к их первичному содержанию. Образование углерода и кислорода происходит на той стадии эволюции звёзд-гигантов (см. *Эволюция звёзд*), когда в их недрах полностью выгорает водород и начинается горение гелия. При темп-рах, соответствующих этому процессу ( $T \sim 10^8$  К), эффективно протекают ядерные реакции синтеза:



При более высоких темп-рах ( $T \sim 10^9$  К) становятся возможными реакции горения углерода и кислорода с образованием изотопов элементов от неона до кремния. Во взрывном Н. сеть ядерных реакций (рис. 1), протекающих при  $T \sim 3 \cdot 10^9 - 10^{10}$  К в условиях термодинамич. равновесия (т. н. *e-процесс*), приводит к образованию железа и соседних с ним элементов в области

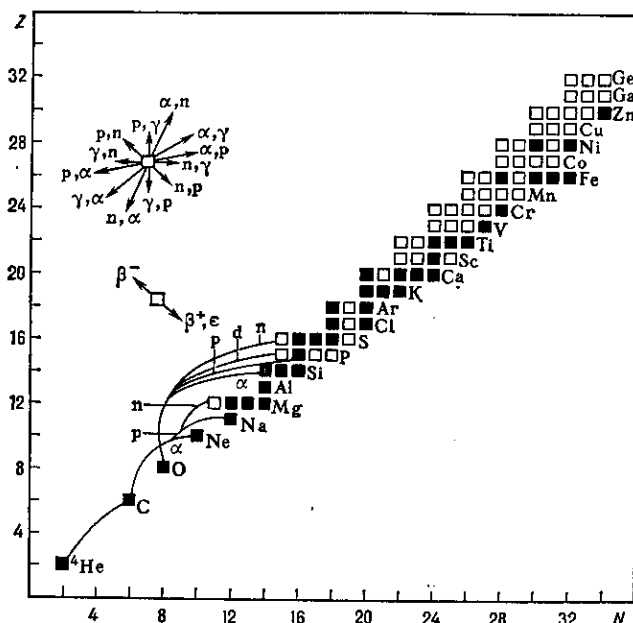


Рис. 1. Сеть реакций нуклеосинтеза, приводящая к образованию стабильных (■) и радиоактивных (□) ядер с числом протонов (Z) от 2 до 34.

«железного пика» (максимум на кривой распространённости нуклидов вблизи  $A = 56$ ). В верх. половине рис. (слева) стрелками показаны ядерные превращения, происходящие в результате взаимодействия ядер с гамма-квантами, нейтронами, протонами и альфа-частицами (направления стрелок соответствуют перемещению ядер по диаграмме в результате указанных реакций). Стрелки с символами  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ ,  $\epsilon$  соответствуют перемещению по диаграмме в результате  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ -распадов и электронного захвата  $\epsilon$ . Кривыми показаны пути («каналы») реакций «горения» гелия (\*), углерода и кислорода ( ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{12}\text{C} + {}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O}$ ) с испусканием протонов (p), нейтронов (n), дейтронов (d) и альфа-частиц ( $\alpha$ ).

Ядра железа характеризуются макс. энергией связи на нуклон, поэтому образование элементов тяжелее железа объясняют процессами, существенно отличными от реакций термоядерного синтеза, — процессами захвата нейтронов. Различают два вида реакций захвата яд-