

этой полосе выше главной последовательности. Полоса неустойчивости пересекает главную последовательность в районе звезд с массой несколько выше солнечной (короткопериодические пульсирующие звезды типа δ Цита).

В заключение отметим, что многие вопросы пульсационной неустойчивости звезд еще далеки от решения, и в этом направлении ведутся интенсивные исследования, как теоретические, так и наблюдательные, поскольку калибровка зависимости период–светимость для цефеид остается краеугольным камнем при установлении шкалы расстояний во Вселенной.

6.8. Процессы образования тяжелых элементов в природе

Нуклеосинтез в ранней Вселенной останавливается на образовании ядер H , 4He , 3He , небольшого количества D , T , 7Li и ничтожной примеси более тяжелых элементов (т. к. в природе нет устойчивых элементов с атомными номерами 5 и 8, а реакции синтеза элементов с $Z > 2$ требуют преодоления значительного кулоновского барьера). Все химические элементы, начиная с углерода, образуются при термоядерном горении вещества в звездах и при взрывах сверхновых путем захватов протонов и, главным образом, нейтронов ядрами атомов. Изотопы 7Li , 9Be , ${}^{10}B$, ${}^{11}B$ при термоядерном горении в звездах не образуются, а их наблюдаемые концентрации связаны с реакциями скола (англ. *spallation*) при взаимодействии быстрых частиц космических лучей с тяжелыми элементами на поверхности звезд, оболочках сверхновых в межзвездной среде. При вспышках сверхновых температуры столь высоки (до ~ 10 МэВ в центре), что устанавливается термодинамическое равновесие по ядерным реакциям и образуются элементы группы железа (Co , Ni , Fe), ядра которых состоят из примерно равного четного числа протонов и нейтронов.

Основным механизмом образования элементов тяжелее железа является захват нейтронов (s - и r -процессы). Эти процессы различаются по соотношению характерного времени захвата нейтрона τ_n и времени β -распада в перегруженном нейтронами ядре τ_β . В s -процессах $\tau_n \gg \tau_\beta$ (медленный захват), нуклеосинтез происходит через относительно устойчивые ядра, находящиеся в «долине устойчивости» на диаграмме $Z - A$. Быстрый захват нейтронов с $\tau_n \ll \tau_\beta$ (r -процесс) реализуется в среде, сильно переобогащенной нейтрона-

ми, и приводит к образованию неустойчивых ядер, перегруженных нейтронами. В расчетах r -процессов существует большая неопределенность, по-видимому, они активно происходят в условиях интенсивного нейтринного облучения. Описанный синтез тяжелых ядер происходит при гелиевых вспышках, а также в звездах умеренных масс на стадии асимптотической ветви гигантов, при вспышках новых звезд и наиболее активно — при вспышках сверхновых (в основном типа Ia — термоядерном взрыве белых карликов с массой, близкой к предельно возможной M_{Ch}). Еще раз подчеркнем, что астрофизические явления, в которых происходят r -процессы, окончательно не установлены; например, не исключено, что наиболее тяжелые элементы образуются в основном при слиянии двух нейтронных звезд в релятивистских двойных системах.

Отметим, что по относительному обилию тяжелых r -элементов можно оценить возраст звезды. Обычно для этого используют тяжелые долгоживущие радиоактивные изотопы, такие как ^{232}Th ($\tau_{1/2} = 1.4 \cdot 10^{10}$ лет) и ^{238}U ($\tau_{1/2} = 4.5 \cdot 10^9$ лет). По линиям поглощения в спектрах звезд определяют отношение радиоактивного тория, который может образоваться только при r -процессах, и стабильного r -элемента европия (Eu). Это отношение уменьшается со временем (торий распадается), откуда, зная теоретическое начальное значение отношения концентраций этих изотопов, которое определяется только кинетикой r -процессов, оценивают возраст звезды. Дополнительно рассматривают отношение r -элементов Ir, Os, Pt, Au и тория, а также отношение U/Th, из которого получают нижний предел возраста звезды. Этим методом определен возраст самых старых звезд с малым содержанием металлов (звезды гало Галактики и входящие в шаровые скопления) 15 ± 4 млрд. лет. Это важнейшее наблюдательное ограничение на время жизни Вселенной. Подробнее см. в сб. «Ядерная астрофизика», под ред. Фаулера, М.: Мир, 1986.