С незапамятных времен люди хотели знать, за счет чего поддерживается свечение Солнца. Первая попытка научного объяснения была предпринята Гельмгольцем около ста лет назад. Она была основана на использовании самых известных в то время сил — сил всемирного тяготения. Согласно этой модели, звезды разогреваются и излучают вследствие постоянного гравитационного сжатия. Энергия, выделившаяся при сжатии Солнца от первичного газопылевого облака до сегодняшнего размера, равна гравитационному потенциалу. Так как светимость Солнца - величина достаточно постоянная (что утверждают геология и палеонтология), из Vгр и L можно определить “гравитационный” возраст Солнца: tгр=Vгр / L = 30 млн лет, что намного меньше истинного времени существования светила (и всей Солнечной системы) Т = 4,5 млрд лет, определенного методом радиоактивного анализа метеоритов и лунных пород. Значит, одного гравитационного источника недостаточно. Несомненно его участие на начальной стадии жизни звезды, когда сжатие облака разогревает газ до высокой температуры. Оценим температуру в центре Солнца (**показать**). Этого достаточно, чтобы в недрах звезды начался синтез тяжелых ядер из менее легких.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Все ядра в нормальной звезде заряжены положительно. Для того чтобы начались реакции между ними, они должны проникать друг в друга. Квантовая механика учит, что при отсутствии резонанса сечение реакций имеет вид (**показать**)

Очевидно, что при заданной температуре и при прочих равных условиях наиболее быстро пойдут те реакции, которые обладают наименьшим возможным значением *W* (14а). Это означает, что по крайней мере одним из взаимодействующих ядер должен быть протон: *Ао* = *Ζο* = 1. Поэтому следует обратить внимание на реакции, идущие с участием протонов. Протон-протонная реакция (21) дает правильную величину выделяемой на Солнце энергии, но относительно слабо зависит от температуры. Согласно (19) и (20) зависимость от температуры, грубо говоря, имеет вид Т^4.

Так как температура в центрах звезд меняется весьма незначительно при переходе от Солнца к более массивным звездам, выделение энергии в результате реакции (21) также меняется незначительно. Однако, как мы уже убедились с помощью рис. 2(**ПОКАЗАТЬ),** наблюдаемое выделение энергии самым «драматическим» образом растет с возрастанием массы звезды. Таким образом, должны играть роль ядерные реакции, которые сильнее зависят от температуры, но эти реакции должны включать в себя уже более тяжелые ядра.

Тогда давайте рассмотрим реакциии между протонами и другими ядрами, поднимаясь все выше и выше по периодической системе. Реакции между Η и Не4 ни к чему не вели: нет устойчивого ядра с массой 5. Реакции Η с Li, Be, В, а также с дейтронами при температурах, господствующих в центре Солнца, происходили чрезвычайно быстро, и столь быстрый темп реакции приводил к исчезновению этих ядер; партнер водорода по реакции очень быстро расходовался в таких процессах. Фактически именно по этой причине все перечисленные элементы от дейтерия до бора чрезвычайно редко встречаются на Земле и в звездах и поэтому не могут являться существенным источником энергии.

Следующий за ними в периодической системе элемент — углерод ведет себя совсем иначе. Прежде всего, это — довольно распространенный элемент, составляющий около одного процента массы любой вновь обра- зующейся звезды. Во-вторых, в газе при звездных температурах он может участвовать в нижеследующем цикле реакций:

**(показать)**

Последняя реакция наиболее интересна во всей цепи превращений — она замыкает весь цикл; в ней снова воспроизводится ядро С12, с которого начался цикл. Другими словами, углерод служит только катализатором.

Сделав разумные предположения о силе реакции *S (Е)* на основе общих принципов ядерной физики, было обнаружено в 1938 г., что углеродно-азотный цикл может обеспечить необходимое выделение энергии на Солнце. Так как в этот цикл входят ядра с относительно большими зарядами, цикл достаточно сильно зависит от температуры, как это и должно быть **(ПОКАЗАТЬ НА РИС 2 И ТАУ УГЛЕРОД)**. Реакция с участием Ν14 — самая медленная в цикле, и ее скорость определяет скорость выделения энергии; она зависит от температуры как *Т^24* вблизи солнечной температуры. Этого вполне достаточно, чтобы объяснить большую скорость выделения энергии в массивных звездах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Но чтобы поставить теорию на надежное основание, очень важно определить фактор силы реакции S (Е) для каждой реакции экспериментальным путем. Эта задача была осуществлена под руководством У. Фаулера (Калифорнийский технологический институт) в серии фундаментальных работ, появлявшихся на протяжении чуть ли не четверти века. Удалось не только наблюдать все реакции, для всех этих реакций был очень точно определен фактор S(E).

Была составлена таблица и по ней рисунок (**ПОКАЗАТЬ**). Из рисунка видно, что при низких температурах доминирует реакция Η + Н , а при высоких температурах (С, N); точка пересечения лежит п р и *Т в —* 1,3 ; соответствующий этой точке выход энергии равен 7 *эрг/г·сек.* Среднее значение, взятое по всему Солнцу, очевидно меньше, и результат этот сопоставим со средним значением, равным 2 *эрг/г·сек.*

Таким образом, возникновение энергии в главной звездной последовательности можно считать в достаточной степени понятым.

Следует упомянуть еще одно обстоятельство. При высоких температурах, когда (С, N)-цикл играет главную роль, с заметной вероятностью происходит еще одна цепь реакций.

Эта цепь не является замкнутой, однако она составляет часть (С, N)-цикла. Обычно обо всей совокупности реакций говорят как о (С, N, О)-цикле. Результативно влияние реакций (новых) сведется к тому, что первоначально присутствующий элемент О 1 8 будет вносить свой вклад в концентрацию исходных продуктов реакции и тем самым увеличит скорость реакции всего (С, N)-цикла. Это обстоятельство учтено при составлении рис. 5.

Когда в (С, N, О)-бицикле достигается равновесие, в конечном счете большинство ядер, участвующих в реакциях, окончат свои превращения на ядре N1 4 , потому что это ядро обладает значительно большим временем жизни относительно ядерных реакций. Но никакие данные наблюдений не говорят об этом; фактически везде, где можно наблюдать распростра- ненность элементов, С и О находятся по крайней мере в том же коли- честве, что и N. Не исключено, однако, что это обстоятельство связано с тем, что внутренняя часть звезд остается все время хорошо изолирован- ной от их поверхности; перемешивание звездного вещества очень незна- чительно.

В настоящее время получены веские свидетельства в пользу термоядерного источника.

Есть два вида таких экспериментальных доказательств.

1) Химический и изотопный состав звезд, определяемый по спектральному анализу их оптического излучения. Это несколько поверхностное (даже в прямом смысле) свидетельство. Видимые, инфракрасные, ультрафиолетовые лучи испускаются фотосферами и хромосферами звезд и совершенно не доходят от их внутренних областей. Поэтому принимать во внимание

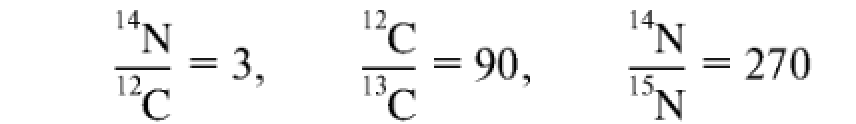
оптические спектры можно только для звезд с сильным перемешиванием вещества (чтобы продукты реакций выходили на поверхность), то есть звезд с глубокой

конвективной зоной. К таким относится Солнце, конвективная зона занимает треть его радиуса. Анализ показал, что дейтерия на Солнце очень мало, в тысячи раз меньше, чем на Земле. Это качественный аргумент в пользу термоядерных реакций: дейтерий образуется в

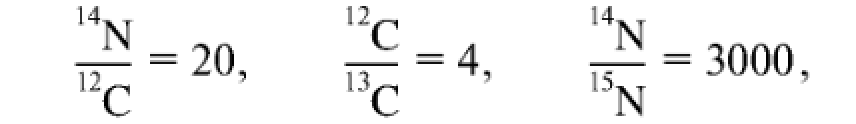
центральной зоне Солнца крайне медленно, а исчезает за 10 секунд. За столь малое время он, конечно, не может выйти на поверхность, а первичный дейтерий газо-пылевого облака, который сохранился на Земле, на Солнце давно сгорел.

Также наблюдается различие земного и солнечного изотопных составов ядер углерода и азота. Было проведено компьютерное моделирование СN-цикла в условиях

солнечной центральной зоны для первичного изотопного состава (считается, что он совпадает с земным):



(указаны весовые отношения изотопов). Включив реакции СN-цикла на условные 100 млн лет, получили совсем другой состав:



и он хорошо совпал с солнечным составом. Термоядерный источник проявил себя.

(optional)

Термоядерный источник нашел примение (и, следовательно, подтверждение) в многочисленных расчетах звездных моделей. Используя условия гидростатической и тепловой устойчивости звезд, а также уравнения переноса энергии, оказалось возможным заглянуть в звездные недра и создать модели всех типов звезд – от молодых, как Солнце, живущих за счет сжигания водорода, до старых, перешедших на гелиевое, углеродное и иное ядерное горючее (красные гиганты)

и даже исчерпавших все топливные запасы (белые карлики, нейтронные звезды). Модели показывают, как эволюционируют звезды, как они переходят из одного

типа в другой. Они предсказали, что при определенных условиях (невыполнимых, к счастью, на Солнце) такой переход имеет вид грандиозного взрыва, когда звезда ярко вспыхивает и некоторое время наблюдается как сверхновая. Успехи звездных моделей, несомненно, служат подтверждением термоядерного источника, но оно сугубо теоретическое.

