

ПРИРОДА И ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ЗВЕЗД

Б. И. ЛУЧКОВ

Московский государственный инженерно-физический институт (технический университет)

NATURE AND SOURCES OF STAR ENERGY

B. I. LUCHKOV

Search of star energy sources took more than a century and drew attention of many outstanding physicists. H. Bete developed the theory of stellar thermonuclear cycles that is supported by the observation data. Solar neutrino experiments have proved that stars receive the necessary energy through thermonuclear fusion reactions, which occur in the central sections of stars. The methods to solve the problem, important consequences thereof and a number of yet unanswered questions – all this makes one to address the subject once again.

Поиск источников энергии звезд занял более ста лет и привлек внимание многих выдающихся физиков. Х. Бете разработал теорию звездных термоядерных циклов, согласующуюся с данными наблюдений. Эксперименты с солнечными нейтрино доказали, что необходимую энергию звезды получают в результате термоядерных реакций синтеза, протекающих в их центральных зонах. Методы решения проблемы, важнейшие следствия и другие нерешенные вопросы вновь заставляют обращаться к этой теме.

www.issep.rssi.ru

Послушайте!

Ведь если звезды зажигают – значит, это кому-нибудь нужно?
В. Маяковский. Послушайте!

Применительно к нашей теме правильнее было бы спросить:

...Если звезды зажигают, значит, где-то достают для них энергию?

Подобный вопрос (возможно, не в столь поэтической форме) возник в середине прошлого века после открытия врачом Юлиусом Майером и физиками Джеймсом Джоулем и Германом Гельмгольцем закона сохранения энергии. Они первыми осознали, что физические явления не могут происходить “задаром”. Для каждого требуется свой источник энергии, и понять природу явления – значит найти его энергетический источник.

ПОИСКИ ИСТОЧНИКА ЗВЕЗДНОЙ ЭНЕРГИИ

Кто “финансирует” звезды? Откуда они черпают энергию для того, чтобы поддерживать высокую температуру недр и излучать огромные световые потоки? На этот счет было высказано немало гипотез [1].

1. Кометная (Ю. Майер). Как считал автор, звезды, например наше Солнце, разогреваются в результате постоянного падения на них комет. В середине прошлого века такое предположение имело право на существование, но когда стали известны частота столкновений комет с Солнцем и выделяющаяся кинетическая энергия, оказалось, что этого источника недостаточно для объяснения солнечной светимости.

2. Гравитационная (Г. Гельмгольц, У. Томсон). Согласно этой модели, звезды разогреваются и излучают вследствие постоянного гравитационного сжатия. Эта вполне разумная, даже очевидная гипотеза встречается, однако, с серьезной трудностью, которую проще всего понять на примере Солнца. Энергия, выделившаяся при сжатии Солнца от первичного газопылевого облака до сегодняшнего размера, очевидно, равна гравитационному потенциалу $V_{\text{гп}} = GM^2/R$, где G – константа гравитации, $M = 2 \cdot 10^{33}$ г и $R = 7 \cdot 10^{10}$ см – соответственно

масса и радиус Солнца. Так как светимость Солнца $L = 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с – величина достаточно постоянная (что утверждают геология и палеонтология), из $V_{\text{гр}}$ и L можно определить “гравитационный” возраст Солнца: $t_{\text{гр}} = V_{\text{гр}}/L = 30$ млн лет, что намного меньше истинного времени существования светила (и всей Солнечной системы) $T = 4,5$ млрд лет, определенного методом радиоактивного анализа метеоритов и лунных пород [2]. Значит, одного гравитационного источника недостаточно.

Несомненно его участие на начальной стадии жизни звезды, когда сжатие облака разогревает газ до высокой температуры. Используя теорему вириала для изолированной системы

$$E_{\text{пот}} + 2E_{\text{кин}} = 0, \quad (1)$$

где $E_{\text{пот}}$, $E_{\text{кин}}$ – потенциальная и кинетическая энергии звезды, можно определить среднюю температуру Солнца. Полагая для простоты, что звезда состоит из водородной плазмы, получаем $E_{\text{кин}} = (3/2)kT \cdot 2 \cdot N$, $N = M/m_p$ (k – константа Больцмана, m_p – масса протона), $E_{\text{пот}} = -GM^2/R$ и из (1) находим $T = 4 \cdot 10^6$ К, что близко к средней температуре Солнца (температура в центре $T_{\text{ц}} = 13 \cdot 10^6$ К, а температура поверхности (фотосферы) $T_{\text{п}} = 6 \cdot 10^3$ К).

Из теоремы вириала следует и другой любопытный факт: излучая звезда обязана сжаться и еще больше нагреться, что соответствует ожидаемой эволюции звезд. И все же к разумному гравитационному источнику надо добавить какой-то дополнительный источник, включающийся при высокой температуре, который обеспечил бы свечение звезд в течение миллиардов лет.

3. Аннигиляционная (А. Эддингтон). Дополнительный источник мог бы появиться в результате процесса аннигиляции вещества, при котором, как тогда предполагали, масса превращается в энергию (в соответствии с эйнштейновским соотношением $E = mc^2$). Такой источник, проявляющийся при высокой температуре (миллионы градусов), позволил бы звезде излучать в тысячи раз больше, чем гравитационный источник, сняв, таким образом, противоречие с возрастом Солнца. Однако реакции аннигиляции, которые позднее действительно были открыты, происходят между частицами и античастицами, а солнечная водородная плазма, состоящая только из частиц (протоны и электроны), аннигилировать “не имеет права”. Этому препятствуют законы сохранения барионного (для протонов) и лептонного (для электронов) зарядов.

И все же надо отметить огромное эвристическое значение идеи Эддингтона о температурной зависимости источника звездной энергии, высказанной еще в 1920 году, задолго до окончательного решения проблемы. Именно он по праву считается идейным отцом звездного термояда.

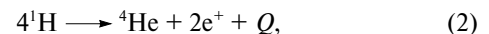
4. Распадная (Д. Джинс). В споре с Эддингтоном Джинс указал на возможность объяснения звездной энергии явлением распада, хорошо известным к тому времени. Но и он оказался неправ: радиоактивный распад, хотя и выделяет энергию, – явление редкое среди легких ядер, определяющих состав звезд. Энергии, выделяемой в распадах, хватает на то, чтобы нагреть внутренние части планет до тысяч градусов (расплавленное железное ядро Земли), но она явно незвездного масштаба с их миллионградусными центральными “топками”.

5. Аккреционная (Л.Д. Ландау). В статье 1937 года Ландау предположил, что в центре каждой звезды имеется плотная нейтронная сердцевина, как бы персональная нейтронная звезда, падение (аккреция) вещества на которую является эффективной тепловой машиной, преобразующей в энергию до 30% падающего вещества. Статья была опубликована в “Nature” и вызвала огромный интерес. Аккреционный источник снимал все трудности звездной энергетики, но все же оказался экзотическим и в конце концов уступил место более простому термоядерному источнику. И все же он оказался полезным и сыграл в судьбе Льва Давыдовича решающую роль. Вскоре Ландау был арестован и провел год в тюрьме. Неизвестно, чем бы кончилось дело, если бы не было этой статьи и самоотверженного заступничества академика П.Л. Капицы (письма Сталину и Молотову). Внимание мировой общественности к судьбе ученого стало важным фактором в борьбе за его жизнь [3].

Итак, ни одна из предложенных гипотез не справилась с загадкой происхождения звездной энергии. Но верная идея термоядерного источника, сначала робко высказанная в 1929 году Р. Аткинсоном и Ф. Хоутермансом, подхваченная Г. Гамовым, Э. Теллером, К. Вейцзеккером и многими другими, завершилась через 10 лет блестящими работами Ханса Бете по звездным термоядерным циклам.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В ЗВЕЗДАХ

Вначале было обращено внимание на то, что масса четырех ядер водорода (протонов) больше, чем сумма масс ядра ${}^4\text{He}$ и двух позитронов, так что возможен процесс



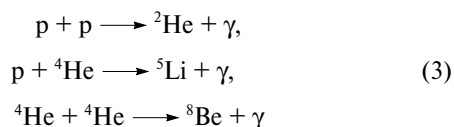
где Q – выделяющаяся энергия; $Q = 4m_p - m_{\text{He}} - 2m_e = 26,8$ МэВ (m_p , m_{He} , m_e – массы протона, гелия и позитрона). Удельное энерговыделение (калорийность) процесса достаточно высокое – в 8 раз больше, чем в реакциях деления урана в атомном реакторе. Энергия выделяется за счет перестройки ядер: вместо свободных протонов образуются ядра гелия, связанные ядерными силами, и часть массы протонов (около 1%)

освобождается в виде кинетической энергии продуктов реакции.

Однако процесс (2) лишь голая идея, так как непонятно, как он может осуществиться. Радиус действия ядерных сил очень мал (порядка двух ферми, или $2 \cdot 10^{-13}$ см), и вероятность нахождения четырех протонов в столь малом объеме ничтожна даже для центральных областей звезд с плотностью 10^2 – 10^3 г/см³. К тому же сближению протонов препятствует электрический заряд, отталкивающий их друг от друга. Эту трудность, впрочем, сравнительно легко обойти в звездах, центральные температуры которых достаточно высоки ($13 \cdot 10^6$ К на Солнце, $20 \cdot 10^6$ К в гиганте Сириусе), и протоны обладают достаточной кинетической энергией, чтобы преодолеть отталкивание. Становится понятным, почему дополнительный источник включается при высоких температурах, а при низких “работает” только гравитационный.

Но все-таки как его реально осуществить?

На первый взгляд это невозможно. Химический состав Солнца и большинства звезд ничего не объясняет: 73% водорода, 25% гелия и около 2% легких элементов (С, N, O). Совсем нет дейтерия и трития (до 0,001%), которые так охотно вступают в реакции термоядерного синтеза в земных научных лабораториях. Что можно сделать с таким составом? Возможные ядерные реакции



не идут из-за неустойчивости ядер ${}^2\text{He}$, ${}^5\text{Li}$ и ${}^8\text{Be}$ (время жизни порядка 10^{-16} с). Тупик.

И все же Х. Бете нашел выход. В классических работах 1938–1939 годов он (вместе с Ч. Кричфилдом, У. Фаулером, К. Вейцеккером) детально разработал два термоядерных звездных цикла — протон-протонный (pp) и углеродно-азотный (CN), — и проблема звездного источника была решена.

ПРОТОН-ПРОТОННЫЙ (pp) ЦИКЛ

Основная ветвь pp-цикла состоит из трех последовательных реакций (схема на рис. 1). Первая реакция — индуцированный бета-распад протона с образованием дейтона — главное и самое трудное звено всего цикла, идущее с малой вероятностью и потому очень медленное: в условиях центра Солнца каждый протон вступает в эту реакцию за среднее время 10^{10} лет. Столь медленные реакции неосуществимы в лабораторных условиях, их расчет проводится чисто теоретически. Но как только дейтон образован, вторая и третья реакции идут без особых затруднений (средние времена соответ-

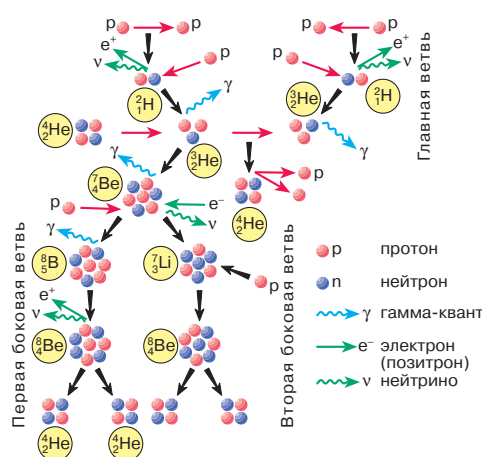
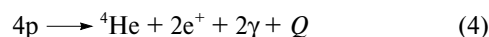


Рис. 1. Схема протон-протонного звездного цикла

венно 10 секунд и 10^6 лет). Подводя итог всему циклу, для чего надо избавиться от промежуточных частиц (${}^2\text{H}$, ${}^3\text{He}$), получаем,



(гамма-кванты входят в энергию реакции). Процесс (4) — это тот же процесс (2), но исправленный на закон сохранения лептонного заряда: лептоны всегда рождаются парами (электрон—антинейтрино, позитрон—нейтрино). Так как масса нейтрино крайне мала (< 5 эВ/ c^2), добавление двух нейтрино не изменяет энергию реакции. В физическом плане это добавление очень важно — звезды должны испускать не только световые, но и нейтринные потоки.

Кроме главной ветви pp-цикла есть две побочные, вероятность которых в сотни раз меньше (см. рис. 1). В этих реакциях образуются изотопы ${}^7\text{Li}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$. Нейтрино, возникающие в распадах, имеют большую энергию, чем нейтрино pp-реакции (особенно от распада ${}^8\text{B}$, спектр которых тянется до 14 МэВ). Поскольку нейтрино практически не взаимодействуют с веществом и уносят свою энергию нетронутой, это приводит к меньшему реальному выделению энергии в побочных ветвях.

УГЛЕРОДНО-АЗОТНЫЙ (CN) ЦИКЛ

Процесс (4) можно реализовать также на ядрах С, N, O посредством реакций синтеза и радиоактивного распада (рис. 2). Ядро ${}^{12}\text{C}$, с которого начинается и которым заканчивается цикл, служит катализатором. Ту же роль могло бы играть ядро ${}^{14}\text{N}$ (азотно-кислородный цикл), но из-за больших электрических зарядов ядер требуются более высокие температуры, что возможно только в очень массивных звездах.

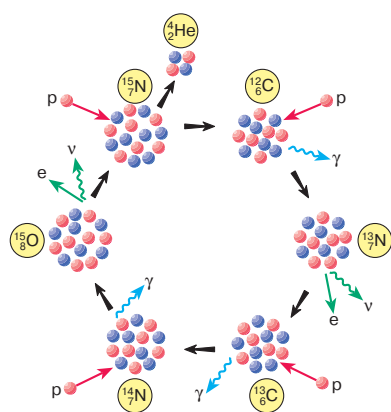


Рис. 2. Схема углеродно-азотного звездного цикла

Итог CN-цикла – тот же процесс (4), но с другими энергетическими спектрами испускаемых нейтрино. Реакции CN-цикла происходят при более высоких температурах, чем pp-цикла. Поэтому разные звезды “выбирают” наиболее удобный для них цикл. Так, по расчету на Солнце 95% энергии вырабатывается pp-циклом и 5% – CN-циклом. В более массивном и горячем Сириусе CN-цикл дает все 100% звездной энергии.

В 1967 году Х. Бете получил Нобелевскую премию за, как сказано в решении Нобелевского комитета, “его вклад в теорию ядерных реакций, особенно за открытия, относящиеся к источникам энергии звезд”.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА

В настоящее время получены веские свидетельства в пользу термоядерного источника. Он нашел применение (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 (невыполняемых, 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.

Обратимся к эксперименту. 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 до 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 газопылевого облака, который сохранился на Земле, на Солнце давно сгорел.

Наблюдается различие земного и солнечного изотопных составов ядер углерода и азота. Было проведено компьютерное моделирование CN-цикла в условиях солнечной центральной зоны для первичного изотопного состава (считается, что он совпадает с земным):

$$\frac{^{14}\text{N}}{^{12}\text{C}} = 3, \quad \frac{^{12}\text{C}}{^{13}\text{C}} = 90, \quad \frac{^{14}\text{N}}{^{15}\text{N}} = 270 \quad (5)$$

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

$$\frac{^{14}\text{N}}{^{12}\text{C}} = 20, \quad \frac{^{12}\text{C}}{^{13}\text{C}} = 4, \quad \frac{^{14}\text{N}}{^{15}\text{N}} = 3000,$$

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

2) Солнечные нейтрино [4]. Нейтрино образуются только в термоядерных реакциях и поэтому могут служить прямой проверкой термоядерного источника. Солнце находится на расстоянии $R_{\odot} = 150$ млн км, являясь единственной звездой, стационарный поток нейтрино которой может быть измерен (потоки от других звезд убывают в $(R_{\odot}/r)^2$ раз и даже для самых близких звезд ($r = 1$ пк) на десять порядков меньше солнечного). Поток солнечных нейтрино легко оценить на основании процесса (4): на каждые $Q = 26,8$ МэВ солнечного излучения, выражаемого светимостью L , приходится два нейтрино. Их поток на Земле составляет $I_{\nu} = 2L/(4\pi R_{\odot}^2 Q) = 6 \cdot 10^{10} \nu/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Точный расчет выполнен в рамках стандартной модели Солнца (СМС),

дающей зависимость температуры от радиуса внутри Солнца, для всех типов нейтрино, возникающих в pp- и CN-циклах. Впервые расчеты стали проводить в 70-х годах XX века в связи с экспериментом по солнечным нейтрино. Они дают парциальные потоки нейтрино от разных реакций и их энергетические спектры [4]. Последние очень важны, так как детекторы нейтрино пороговые, в результате чего эффективнее регистрируются нейтрино высоких энергий (>10 МэВ), чем низкоэнергичные (<1 МэВ).

Сейчас, после 30 лет измерений, можно с определенностью сказать, что солнечный нейтринный поток обнаружен и термоядерная природа звездной энергии доказана. Но, как бывает в каждой крупной проблеме, измерения дали еще и нечто большее.

ПРОБЛЕМА СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

К настоящему времени выполнено четыре эксперимента по регистрации солнечных нейтрино: пионерский эксперимент Homestake (Р. Дэвис, США), а также Kamiokande (Япония), SAGE (Россия–США), Gallex (Италия–Германия). Новые эксперименты проводятся еще на двух уникальных детекторах: Superkamiokande (Япония) и Sudbury (Канада–США). Для регистрации нейтрино используют радиохимический метод (Homestake, SAGE, Gallex) и метод черенковских вспышек в воде, вызываемых продуктами нейтринных реакций (Kamiokande, Superkamiokande, Sudbury). Черенковские детекторы, обладая высоким энергетическим разрешением и способностью измерять направление прихода нейтрино, оказались наиболее продуктивными. Со своей стороны радиохимические детекторы (особенно SAGE и Gallex, использующие галлий-германиевую реакцию регистрации) позволили значительно расширить энергетический диапазон регистрируемых нейтрино вплоть до самых малоэнергичных, возникающих в реакции pp-цикла.

Данные всех экспериментов, давая веские доказательства существования нейтринного потока от Солнца, вместе с тем указывают на его несоответствие с ожидаемым потоком, рассчитанным по СМС. Экспериментальные потоки оказались меньше расчетных в 1,5–3 раза (в разных экспериментах). Этот дефицит, который может быть вызван рядом причин – от недостаточного знания вероятностей ядерных реакций до неизвестных свойств нейтрино (осцилляции “нейтринных ароматов”, магнитный момент нейтрино), – и вызвал проблему солнечных нейтрино, широко обсуждаемую последние 30 лет [4]. Оставляя в стороне, возможно, самый интересный для физики аспект проблемы (новые свойства нейтрино), укажем ту часть, которая напрямую связана с условиями протекания термоядерных реакций в звездах.

НЕЙТРИННЫЙ ПОТОК И ВЕЛИКИЕ ОЛЕДЕНЕНИЯ

Самый простой способ “зажать” производство нейтрино на Солнце – понизить температуру центральной области примерно на 1 млн К (около 7%). Термоядерные реакции так сильно зависят от температуры, что даже малое похолодание снимет проблему нейтринного дефицита. Однако СМС не допускает такого произвола. Это правильно, если речь идет о постоянном во все эпохи уменьшении центральной температуры Солнца. Но если это изменение кратковременное с последующим возвратом на прежний высокий уровень, задаваемый СМС, то особых изменений в солнечной светимости за сотни миллионов лет не произойдет. Просто был локальный временной инцидент, который интегрируется во времени. Гипотеза о сбоях в работе центрального термоядерного реактора была высказана при анализе результатов эксперимента Дэвиса [5].

Нашлась и причина сбоя. Как следствие реакций синтеза в центре Солнца скапливается гелий, зола, забивающая топку и снижающая темп термоядерного горения. Звезда – саморегулирующаяся система: когда доля гелия превысит критическую, она автоматически изменит процесс теплопередачи, произойдет резкое конвективное перемешивание центральной зоны, гелий будет вынесен за ее пределы и заменен на свежие порции водорода. Произойдет временное охлаждение центра (рис. 3). Расчет показал, что нейтринный поток упадет в несколько раз и выйдет на прежний уровень только через 10 млн лет. Был определен и средний временной интервал между сбоями – около 250 млн лет. Согласно этой гипотезе мы живем как раз в то время после сбоя, когда нейтринный поток ослаблен и еще не вернулся на постоянный уровень.

Что может подтвердить предложенный сценарий? Понижение центральной температуры вызовет также

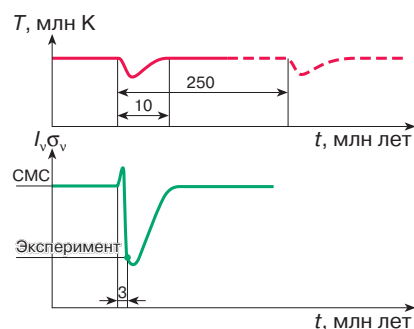


Рис. 3. Зависимость от времени температуры в центре Солнца и потока нейтрино в модели нестационарного термоядерного реактора

временное охлаждение самого Солнца, правда с некоторым временным опозданием, связанным с дрейфом тепла от центра к поверхности. Солнечная светимость должна уменьшиться (в максимальной фазе на 20%), что вызовет падение среднегодовой температуры Земли примерно на 5%. На планете произойдет глобальное оледенение.

Согласно геофизическим данным, оледенения происходили на Земле в среднем с интервалом 200–300 млн лет и последнее из них, четвертичное, случилось 3 млн лет назад! Мы, оказывается, живем в эпоху великого оледенения, но в то его время, когда в результате выбросов в атмосферу CO₂ (извержениями вулканов и также индустриальной деятельностью) парниковый эффект заставил ледники отступить. Вот так неожиданно проблема термоядерных реакций в Солнце переплелись с нашей земной жизнью.

Однако надо сказать, что не все результаты проведенных измерений находятся в согласии друг с другом и далеко не все специалисты согласны с приведенным выше объяснением дефицита солнечных нейтрино. Не весь клубок проблем удалось сегодня распутать. Вот почему проводятся все новые эксперименты, которые должны в конечном счете дать полную, непротиворечивую картину термоядерных реакций в Солнце, распространения и трансформации нейтринного потока на пути от солнечного центра до Земли.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В ДРУГИХ ЗВЕЗДАХ

Звездные модели и теория эволюции звезд могут все же быть спокойны – их основания, подвергавшиеся сомнению после первых результатов по солнечным нейтрино, остались незабываемыми. Термоядерные реакции, главный источник энергии звезд, разнообразны и многочисленны. Вслед за горением водорода и образованием гелиевой золы в звездах солнечного типа (звезды главной последовательности) при более высоких температурах (>200 млн К в ядрах красных гигантов) происходит гелиевая вспышка, во время которой синтезируются углерод и кислород. При еще более высокой температуре красного гиганта (а она всегда повышается, когда бывает исчерпан очередной вид термоядерного топлива, газовое давление в топке падает, и внешние слои звезды сжимают центральную зону) происходят углеродная и кислородная вспышки. Возникают магний, фосфор, сера и другие элементы средней части Периодической системы. Наконец, при температуре $T > 4$ млрд К идут все энергетически выгодные процессы термоядерного синтеза – образуются элементы вплоть до железной группы (Fe, Ni, Co), представляющей самые устойчивые ядра.

Подводя итог, надо сказать следующее. Термоядерная природа и источник звездной энергии прочно вошли в современную астрофизику, став ее классической основой. Термоядерные реакции не только объяснили энергетику всех наблюдаемых стационарных типов звезд, но и дали ключ к разгадке многих ярких нестационарных процессов, таких, как вспышки новых и сверхновых звезд. Они позволили понять, какие процессы происходили на начальном этапе жизни Вселенной, отпечатки которых (тепловое реликтовое излучение, первичный состав по дейтерию и гелию) дошли до наших дней. Звездный термояд замечателен еще и тем, что инициировал работы по земному термояду – неиссякаемому источнику энергии для будущих поколений. Но неправильно было бы думать, что термоядерный источник – это прошлые заслуги астрофизики. Он продолжает привлекать внимание и в настоящее время. Нерешенные вопросы физики нейтронных звезд и еще более загадочных черных дыр не могут получить ответ без привлечения этого источника. Огромные плотности энергии квазаров и активных ядер галактик, возможно, связаны с какими-то особенностями термоядерного источника в этих объектах. Таинственные космические гамма-всплески, как многие думают, отголоски самых мощных процессов во Вселенной – слияния нейтронных звезд и черных дыр, тоже вызывают к термоядерному источнику.

Термоядерные реакции остаются актуальной темой и в наше время, распространившись на большое разнообразие астрофизических объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Источники энергии и эволюция звезд // Ядерная физика. М.: Наука, 1980. С. 599.
2. Крамаровский Я.М., Чечев В.П. Ядерная стабильность во Вселенной // Знание. М., 1976. (Сер. “Физика”; № 10).
3. Торн К.С. // Природа. 1994. № 2. С. 78.
4. Кочаров Г.Е. Термоядерный котел в недрах Солнца и проблема солнечных нейтрино // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 10. С. 99–105.
5. Dilk F., Gough D. // Nature. 1972. Vol. 240, № 5379.

Рецензент статьи А.М. Черепашук

* * *

Борис Иванович Лучков, доктор физико-математических наук, профессор Московского государственного инженерно-физического института. Лауреат Ленинской премии по физике. Область научных интересов – экспериментальная физика, атомное ядро и элементарные частицы, физика высоких энергий, астрофизика. Автор более 200 научных и научно-популярных статей, пяти учебных пособий.