

УДК 523.74

*И. В. ВАСИЛЬЕВ, И. Д. КОЗИН,  
В. А. ПРОЦЕНКО, И. Н. ФЕДУЛИНА*

## МОДЕЛЬ СОЛНЦА

Предложена новая модель строения Солнца. Она состоит из быстро вращающегося нейтронного ядра, водородной конвективной зоны переноса тепла к поверхности и уплотненной поверхности. Модель исключает из стандартной солнечной модели (ССМ) реакцию образования дейтерия из водорода. Образование атомов углеродно-азотной и железной групп объясняется процессами внедрения протонов в ядро и радиационным захватом нейтронов. Модель уплотненной поверхности Солнца объясняет существование гелиосейсмических волн с периодами 5 и 160 мин.

Многие проблемы физики Солнца и солнечно-земных связей, представляющие интерес как для фундаментальной астрофизики, так и для практических целей, до сих пор до конца не разрешены и требуют дальнейших научных исследований. Интерес к исследованиям внутреннего строения Солнца и физики излучения электромагнитной и корпускулярной радиации с момента предположения о термоядерном источнике энергии Солнца [1] не прекращается до сих пор.

**1. Стандартная солнечная модель.** Принятая сегодня модель Солнца, называемая стандартной солнечной моделью (ССМ), тесно связана с теорией термоядерных реакций выделения энергии при синтезе сложных атомов из более простых.

Основными физическими характеристиками Солнца, не подлежащими сомнению, являются: радиус  $R_{\odot} = 6,9599 \cdot 10^8$  м, объем  $V_{\odot} = 1,4122 \cdot 10^{27}$  м<sup>3</sup>, площадь поверхности  $S_{\odot} = 6,087 \cdot 10^{20}$  м<sup>2</sup>, масса  $M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{30}$  кг при средней плотности  $\rho_{\odot} = 1,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Наблюдаемое вращение приповерхностных слоев свидетельствует о том, что быстрее всего вращается вещество на солнечном экваторе с периодом около 25 дней, к высокоширотным областям вращение замедляется. Период вращения Солнца на широте  $60^{\circ}$  составляет 32 дня, или вращение Солнца на  $14,4^{\circ}$  за земные сутки (450 нГц) на экваторе и  $10^{\circ}$  на полюсе (360 нГц на широте  $60^{\circ}$ ). Вместе с тем считается, что Солнце вращается как твердое тело и угловые характеристики вращения одинаковы на всех глубинах.

В соответствии с ССМ в центре светила находится горячее водородно-гелиевое ядро радиусом 180 000 км, с температурой 15,6 млн градусов, давлением  $10^{16}$  Па и плотностью на два порядка выше, чем на поверхности,  $- 1,48 \cdot 10^5$  кг/м<sup>3</sup>.

В ядре сосредоточена половина солнечной массы и выделяется практически вся энергия, которая поддерживает свечение Солнца. Существуют различные способы передачи энергии от ядра к поверхности в зависимости от физических условий среды: лучистый перенос, конвекция и теплопроводность. Наиболее существенными из них на Солнце являются первые два.

Выше ядра расположена радиационная зона. Ее толщина составляет  $\sim 380$  000 км. В ней энергия передается путем возбуждения атомов солнечного вещества гамма-квантами, рожденными в термоядерных реакциях, и последующего переизлучения. Еще выше находится конвективная зона, через которую осуществляется передача тепловой энергии от радиационной зоны к поверхности Солнца в ее атмосферу и выше. Толщина конвективной зоны около 140 000 км.

Выше размещается солнечная атмосфера, состоящая из фотосферы, хромосферы и короны. Температура поверхности Солнца оценивается в 5760 К. Плотность солнечного вещества плавно падает от поверхности к центру. Между атмосферой Солнца и его короной существует резкий скачок температуры. В ней она достигает нескольких миллионов градусов.

Для исследований химического состава Солнца нам доступны лишь его приповерхностные слои и потоки излучаемого вещества (солнечного ветра), поэтому точные данные о составе, концентрациях и соотношениях элементов по всей толще Солнца пока не известны. Считается, что относительные концентрации химических элементов на Солнце таковы: в среднем 92,1% приходится на атомарный водород, концентрация гелия равна 7,8% и 0,01% общей концентрации составляют углерод, железо и другие элементы.

**Солнечная энергетика.** Солнце представляет собой высокотемпературный плазменный шар. Распределение излучаемой энергии по длинам волн и общее количество излучаемой энергии довольно близки к излучению абсолютно черного тела с температурой около 6000 К. Полная энергия, испускаемая черным телом, оценивается интеграцией уравнения Планка, известного как закон Стефана:

$$F = \sigma T^4,$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$  ( $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана).

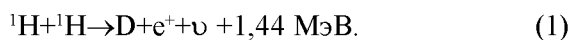
Таким образом, испускаемая энергия  $F$  пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры тела  $T$ . Длина волны максимальной эмиссии  $\lambda_{\text{max}}$  (закон Вина), изменяется обратно пропорционально абсолютной температуре излучающего тела:

$$\lambda_{\text{max}} = 2,897 \cdot 10^{-6} \text{ м} / T.$$

Почему же Солнце светит? Этот вопрос интересовал всегда, но только к середине прошлого века сложилась концепция, основанная на термоядерных процессах синтеза. Были разработаны схемы реакций синтеза гелия из водорода, углерода из гелия и далее атомов железной группы [1–5].

а) Протон-протонный цикл. Термоядерные реакции синтеза гелия из водорода согласно ССМ проходят несколькими направлениями, состоят из нескольких этапов.

На первом этапе этого цикла выработки термоядерной энергии из двух атомов водорода образуется дейтерий  $D = {}^2\text{H}$  с выделением позитрона  $e^+$  и нейтрино  $\nu$ :



Это главная реакция, задающая скорость выработки солнечной энергии. Для преодоления кулоновских сил отталкивания (кулоновский барьер) и слияния протонов в ядро дейтерия при давлении  $1,48 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3$  необходима температура около 5 млрд градусов, т. е. в 300 раз выше предлагаемой в ССМ.

Однако реакция (1) все-таки возможна при температуре среды около 15 млн градусов за счет введения в теорию синтеза эффекта туннельного перехода [3], предложенного Г.А. Гамовым и обнаруженного впоследствии Р. Генри и Э. Кондоном. При этом уменьшение температуры ядра Солнца всего на 7% приведет к прекра-

щению реакции (1). Образуется дейтерий  $D$  крайне медленно, каждый отдельный акт осуществляется раз в  $10^{10}$  лет.

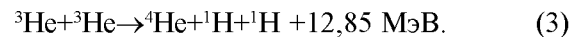
На втором этапе происходит соединение ядер водорода  ${}^1\text{H}$  и дейтерия  $D$ , которое приводит к образованию изотопа гелия  ${}^3\text{He}$  с выделением  $\gamma$ -кванта:



Эта реакция должна осуществиться не позднее 10 с после образования дейтерия.

На третьем этапе происходит непосредственное образование атома гелия, идущее по трем ветвям:

1. В первой ветви два изотопа гелия  ${}^3\text{He}$  образуют один стабильный изотоп гелия  ${}^4\text{He}$  с выделением основной части энергии в 12,85 МэВ и образованием двух атомов водорода:

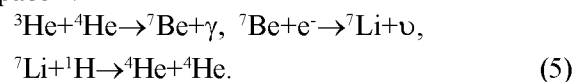


В итоге четыре атома водорода превращаются в один атом гелия  ${}^4\text{He}$  с общим выделением энергии 26,8 МэВ, при этом выделяются два  $\gamma$ -кванта, два позитрона и два нейтрино.

2. Выделяемая в реакциях синтеза энергия  $\Delta E$  рассчитывается по дефициту масс, т. е. разнице между массой образуемого ядра и суммой масс составляющих его элементов:

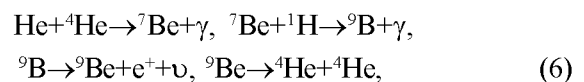
$$\Delta E = \Delta mc^2 = (4m_p - m_{\text{He}} - 2m_e) \cdot c^2 = 26,8 \text{ МэВ}. \quad (4)$$

Вторая ветвь образования гелия в протон-протонном цикле представляется следующим образом:



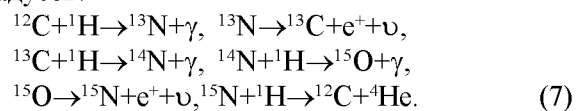
Этот термоядерный цикл происходит при температурах  $15 \cdot 10^6 < T < 25 \cdot 10^6 \text{ К}$ .

3. Для осуществления третьей ветви образования гелия:



требуется температура  $T > 25 \cdot 10^6 \text{ К}$  [4].

б) Углеродно-азотный цикл. После сгорания водорода в протон-протонном цикле происходит гелиевая вспышка с синтезацией углерода и кислорода. Термоядерные реакции этого типа происходят уже при температурах выше 200 млн градусов:



Далее при температурах, превышающих 4 млрд градусов, идут реакции термоядерного синтеза элементов железной группы, а именно самые устойчивые ядра железа, никеля и кобальта.

В ядре Солнца генерируется около 99 % солнечной энергии, причем в реакциях (1)-(3), называемых протон - протонным циклом, генерируется более 95 % солнечной энергии. В результате протон - протонного цикла 1,0078 г водорода переходит в 1,0000 г гелия, а оставшаяся масса превращается в кинетическую энергию частиц и энергию радиации. Скорость выделения энергии в ходе реакций протон-протонного цикла определяется выражением

$$\varepsilon_{pp} = 2,5 \cdot 10^6 \rho X^2 \left( \frac{10^6}{T} \right)^{2/3} \exp \left[ -33,8 \left( \frac{10^6}{T} \right)^{1/3} \right] \text{ эрг/(г} \cdot \text{с)} \quad (8)$$

где  $\rho$  – плотность солнечного вещества;  $X$  – относительное содержание в нем ядер водорода;  $T$  – температура.

Характерное время реакции превращения водорода в гелий хорошо согласуется с предполагаемым возрастом современного Солнца ~ 4,5 млрд лет.

Таковы гипотезы образования солнечной энергии, им подчиняются солнечная модель и ее внутреннее строение.

*Недостатки стандартной солнечной модели:*

для образования дейтерия из водорода по схеме (1) необходимо поддержание температуры в  $1,56 \cdot 10^7$  К, удержать которую в ограниченном объеме практически невозможно без создания радиационной зоны, предшествующей конвективной зоне;

реакция (1) имеет характерный вид положительной обратной связи: чем выше температура, тем легче идет туннельный переход, значит, тем чаще происходит синтез дейтерия, в конечном счете легко создаются условия для одновременного перехода всех атомов водорода в дейтерий, тогда вся энергия синтеза выделится одновременно, как при взрыве гигантской водородной бомбы;

регистрируемый поток нейтрино в 2–4 раза меньше ожидаемого в ССМ [4, 5];

модель не может объяснить наблюдаемые на Солнце концентрации атомов азота, углерода, образуемые в реакциях (7), а также железа, никеля и кобальта, поскольку необходимых для их

синтеза температур (см. выше) нет и никогда не наблюдалось;

рожденный в ядре Солнца в результате термоядерных реакций гелий из-за отсутствия переноса и конвекции в радиационной зоне не может появиться на поверхности светила, однако его концентрация там не менее 7%;

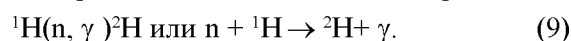
ССМ не может дать удовлетворительного объяснения колебаниям поверхности Солнца с периодами 5 и 160 мин.

Перечисленные недостатки ССМ заставляют искать новые модели внутреннего строения и схемы выделения энергии Солнца.

## 2. Внутреннее строение Солнца

В предлагаемой далее модели Солнце имеет нейтронное ядро, водородную конвективную зону, распространяющуюся до поверхности светила, и уплотненную поверхность. Водородная оболочка образована естественным распадом нейтронов, оторвавшихся от солнечного ядра, и последующим захватом электронов на орбиту вокруг протона.

Авторами ставилась задача создать такую модель Солнца, в которой возможна отмена или замена реакции (1). Была предложена следующая схема. В центральной части солнечного шара расположено ядро, состоящее из сгустка нейтронов. Идея нейтронного ядра не нова. В статье [5] упоминается гипотеза Л.Д. Ландау об аккреционной модели звезд. Ядром звезд в этой гипотезе являлась плотная нейтронная сердцевина. Давление в этой части Солнца выше порога, при котором происходит самопроизвольный распад нейтронов на протоны, электроны и антинейтрино. Тогда изотермическая реакция образования дейтерия может происходить по схеме радиационного захвата ядром водорода нейтрона  $n$ , оторвавшегося от солнечного ядра:



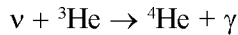
Такая реакция распространена в межзвездной среде [6], создающей отношение  $D/H=10^{-4}$ .

Скорость реакции (9) обратно пропорциональна энергии нейтрона  $\sim E^{-1/2}$  и должна совпадать со скоростью реакции (1), чтобы оправдать наблюдаемый поток электромагнитного излучения. Следовательно, налицо схема с отрицательной обратной связью, которая, как известно, стабилизирует скорости реакций.

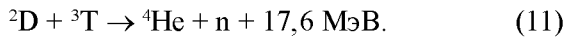
Радиационный захват нейтрона дейтерием приводит к образованию трития:



Теперь вместе с реакцией (3) гелий образуется в реакциях



и



Нейтроны успевают прореагировать с протонами (9) и дейтерием (10), образуя дейтерий и изотоп гелия  ${}^3\text{He}$  соответственно. В итоге предлагаемой схемы с учетом распада нейтрона и образования атома водорода четыре нейтрона образуют атом гелия.

Выделенная энергия в предложенной цепи термоядерных реакций с учетом разности масс нейтрона и протона лишь на 0,1 % будет выше принятой в ССМ, т. е. энергетика практически не изменилась. Замена исходной компоненты – водорода на нейтрон не приводит к заметному изменению массы, плотности и геометрических размеров Солнца.

Нетрудно убедиться, что при исключении реакции (1) скорость образования нейтрино в предложенной схеме термоядерных реакций будет меньше расчетной по классической схеме, что и наблюдается в действительности.

В предложенной модели Солнца термоядерные реакции происходят не во всем объеме нейтронного ядра, а только над его поверхностью. Именно здесь должна наблюдаться наибольшая температура.

Конечными элементами процессов синтеза ССМ являются высокостабильные атомы железа, никеля и кобальта. Правда, их образование возможно только при температурах до  $4 \cdot 10^9$  К, которых на Солнце никогда не было. Так что их наличие с позиций ССМ необъяснимо.

В предлагаемой модели образование последующих элементов таблицы Менделеева на Солнце происходит радиационным захватом атомными ядрами нейтронов, для чего не требуются сверхвысокие температуры, как это необходимо в классической схеме. Переход к модели нейтронного ядра позволяет объяснить существование тяжелых атомов, вплоть до атомов железа, никеля и кобальта.

Внешне все остается как прежде. Правда, нейтронное ядро вращается с большей угловой скоростью, чем скорость поверхности Солнца (в ССМ скорости вращения ядра и поверхности Солнца равны). Вращающееся центральное ядро пе-

редает часть кинетической энергии атомам, отбрасывая их поверхности, где скорость, естественно, будет гораздо меньше. На экваторе она будет выше, чем у полюсов, как и наблюдается в действительности. Высокая скорость вращения ядра Солнца может объяснить сдвиг тяжелых элементов к поверхности светила под действием центробежных сил.

Подтверждением возможности существования таких кинематических характеристик ядра являются нейтронные звезды – пульсары. Периоды обращения таких звезд вокруг своей оси составляют всего от 0,033 до 3 с.

Скорость вращения Солнца и распределение масс в нем можно оценить по степени сжимаемости светила  $\sigma$ . Экспериментальные измерения значения сжимаемости дают величину  $\sigma = 5,21 \cdot 10^{-5}$ . Как показано в работе [7], сжатие  $\sigma$  фигуры равновесия по задаче Клеро методом Ляпунова определяется равенством

$$\frac{\sigma}{4\pi M} - \frac{\sigma}{5R^2} \int_{r_1}^R \rho(r) r^4 dr = \frac{\omega^2 R^3}{8\pi G},$$

где  $R$  – радиус невозмущенного Солнца;  $r_1$  – радиус полости;  $\omega$  – угловая частота вращения Солнца.

Проводя интегрирование этого выражения при равномерном распределении плотности  $\rho(r) = \text{const}$ , получаем

$$\sigma = \frac{\omega^2 R^3}{2MG} \left[ 1 - \frac{3}{5} \frac{1 - (r_1/R)^5}{1 - (r_1/R)^3} \right]^{-1}.$$

Если  $r_1 = 0$ , т. е., масса равномерно распределена по объему Солнца, то

$$\sigma = \frac{5}{4} \frac{\omega^2 R^3}{MG} \quad 2,6 \cdot 10^{-5},$$

что соответствует классическому решению Ньютона.

Если масса сосредоточена в центре Солнца, тогда

$$\sigma = \frac{\omega^2 R^3}{2MG} \quad 1,04 \cdot 10^{-5}. \quad (12)$$

Обе эти модели не соответствуют экспериментально измеренному значению сжимаемости Солнца. Тогда из выражения (12) получаем, что для получения истинного значения сжимаемости эффективная угловая скорость вращения ядра Солнца  $\omega$  должна быть, по крайней мере, выше в 2,24 раза, чем на поверхности.

**3. Модель поверхности Солнца.** В стандартной солнечной модели ССМ полагается, что

плотность солнечного газа под действием сил гравитации постепенно и плавно возрастает от поверхности Солнца к его центру. Имеется достаточно оснований считать, что поверхность Солнца имеет плотную оболочку [7]. Такое уплотнение создается поверхностным натяжением, низкой температурой межзвездного газа и вращением самого Солнца. Подтверждением наличия плотной оболочки являются измерения спектральных линий излучения железа и магния на поверхности Солнца [8].

Толщина солнечной уплотненной оболочки рассчитывается через коэффициент тонких структур  $\alpha = 7,2975 \cdot 10^{-3}$  и равна  $5,08 \cdot 10^6$  м.

*Гелиосейсмоактивность.* Одними из трудно объяснимых явлений на Солнце являются периодичность общей солнечной активности, а также периодические колебания его поверхности, названные сейсмическими волнами, с периодичностью 5 и 160 мин. Модель Солнца, имеющего плотную поверхность, может объяснить образование в ней колебательных процессов. Эти колебания с периодом около 5 мин представляют собой синусоидальные волновые цуги длительностью в 4–5 циклов со средней продолжительностью 23 мин. Позднее были открыты пульсации солнечной фотосферы с периодом 160 мин и амплитудой 6 км.

Как указывается в работе [7], во внутренней оболочке Солнца возбуждаются колебательные волны, обнаруживаемые на поверхности Солнца и аналогичные сейсмическим на Земле. Время движения такой волны вдоль внутренней поверхности Солнца.

$$t_1 = 2\pi R_{\odot} (1 - \alpha^{2/3}) V_{\odot 1}^{-1} = 160,43 \text{ мин.}$$

Эта величина отличается от экспериментально зарегистрированных гелиосейсмических волн на поверхности Солнца длительностью 160,01 мин всего на 0,26 %. Поперек оболочки Солнца могут распространяться волны со скоростью  $V_n = (2n+1)^{-1}$ . Для второй моды  $n=2$  получаем время прохождения волны:

$$t_2 = 5\alpha^{2/3} R_{\odot} V_{\odot 1}^{-1} = 5,00 \text{ мин.}$$

Расчетные и экспериментальные данные, наблюдаемые на поверхности Солнца, не расходятся до последней экспериментально значащей цифры.

Институт ионосферы МОН РК, пожалуй, первым в мире обнаружил отклик этих колебаний в

околоземном космическом пространстве [9, 10]. Так, при приеме сигналов, приходящих от разнесенных на тысячи километров передатчиков и отраженных от ионосферы, обнаружено, что колебания их амплитуды имели одинаковый период в 5 мин, были синхронными и синфазными. В микровариациях нейтронной компоненты космических лучей обнаружена спектральная составляющая в 160 мин которая использовалась для прогноза солнечных вспышек.

Итак, предлагаемая модель Солнца представляет собой нейтронное ядро, окруженное конвективной оболочкой, состоящей в основном из водорода; на границе этих сред происходят термоядерные реакции. Угловая скорость вращения ядра Солнца должна быть в 2,24 раза выше, чем на поверхности. Поверхность Солнца представляет собой уплотненную оболочку, в которой распространяются продольные и поперечные волны с периодами в 160 и 5 мин соответственно.

*Работа выполнена по собственной инициативе в ходе реализации программ фундаментальных исследований (шифры Ф.0351; Ф.0264).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Bethe H., Critchfield C.* Generation the Energy in the Stars // Phys. Rev. 1938. V. 54. P. 248.
2. *Надёжин Д.К.* Водородный цикл // Физическая энциклопедия. М.: СЭ, 1988. Т. 1. С. 299-300.
3. *Кочаров Г.Е.* Термоядерный котел в недрах Солнца и проблема солнечных нейтрино. // Соросовский образовательный журнал. Физика. 1996. № 10. С. 99-105.
4. *Герштейн С.С.* Загадки солнечных нейтрино // Соросовский образовательный журнал. Физика. 1997. № 8. С. 79-85.
5. *Лучков Б.И.* Природа и источники энергии звезд // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7. № 5. С. 80-85.
6. *Бисноватый-Коган Г.С., Четкин В.М.* Неравновесные оболочки нейтронных звезд, их роль в поддержании рентгеновского излучения и нуклеосинтеза // Успехи физических наук. 1979. Т. 127, вып. 2. С. 263-295.
7. *Ильянок А.* Квантовая астрономия. Солнце // <http://www.ivanov-porttal.ru/astrom>.
8. <http://www.sao.ru/> <http://www.sao.ru/>
9. *Дин А.Б., Козин И.Д., Рубинштейн Б.М., Сайфутдинов М.А.* Синхронные колебания области D ионосферы в околополуденное время суток // XV Всес. конф. по распр. радиоволн. Алма-Ата; Москва: Наука, 1987.
10. *Козин И.Д., Николаевский Н.Ф., Жумабаев Б.Т.* Атмосферные эффекты в микровариациях космических лучей при внешних воздействиях // Модуляционные и геофизические эффекты в космических лучах. Алма-Ата: Наука КазССР, 1985. С. 55-64.

### **Резюме**

Күн құрылысының жаңа моделі ұсынылған. Ол тез айналатын нейтрондық ядродан, беткі қабатқа жылу жеткізетін сутекті конвективті зонадан және тығыздалған беттен тұрады. Бұл модель бойынша стандартты күн моделінен (СКМ) сутегі арқылы дейтерийдің түзілу реакциясы алынып тасталған. Көміртегі-азотты және темір тобы атомдарының түзілуі ядроға протондардың енуімен және нейтрондардың радиациялық қамтылуымен түсіндіріледі. Күннің беттік тығыздалған моделі 5 және 160 минуттық мерзімдері бар гелиосейсмикалық толқындардың орын алатындығын білдіреді.

### **Summary**

A new model of the Sun structure is suggested. It consists of fast-rotating neutron core, hydrogenous convective zone of heat transfer to the surface and condensed surface. The model excludes from standard solar model (SSM) a reaction of deuterium formation from hydrogen. A formation of atoms of carbonic-nitric and iron groups is explained by processes of proton penetration into nuclei and radiation capture of neutrons. A model of condensed solar surface explains existence of helioseismic waves with periods 5 and 160 minutes.

*Институт ионосферы МОН РК,  
г. Алматы*