

## Лекция 6. Солнце: его состав и внутреннее строение. Солнечная активность.

**Солнце** – центральное тело Солнечной системы, ближайшая и наиболее подробно исследованная звезда. От свойств Солнца зависит существование и развитие жизни на Земле.

### • Основные физические характеристики Солнца:

Масса Солнца  $1,989 \cdot 10^{30}$  кг, в 333434 раз превышает массу Земли и в 750 раз – всех планетных тел Солнечной системы. Радиус Солнца 695990 км, в 109 раз больше земного. Средняя плотность солнечного вещества  $1409 \text{ кг/м}^3$ , в 3,9 раза ниже плотности Земли. Ускорение силы тяжести на экваторе  $279,98 \text{ м/с}^2$  ( $28 g$ ). Экватор Солнца наклонен под углом  $7,2^\circ$  к плоскости эклиптики. Сидерический период вращения на экваторе равен 25,38 суток и увеличивается по направлению к полюсам (до 32 суток на широте  $60^\circ$ ). Внешним слоям Солнца присуще дифференцированное вращение, свойственное жидким и газообразным телам. Солнце обладает магнитным полем со сложной структурой средней напряженностью 1-2 Гс.

Возраст Солнца около 5 млрд. лет.

Видимая звездная величина (блеск) Солнца  $-26,6^m$ . Мощность общего излучения Солнца  $374 \cdot 10^{21}$  кВт, среднее значение солнечной постоянной  $1366 \text{ Дж/с} \cdot \text{м}^2$ . Светимость Солнца  $4 \cdot 10^{20}$  Вт. Земля получает  $1/20000000000$  часть солнечной энергии: на площадку в  $1 \text{ м}^2$ , перпендикулярную солнечным лучам за пределами земной атмосферы приходится  $1,36$  кВт лучистой энергии.

Температура видимой поверхности (фотосферы) Солнца  $5770 \text{ К}$ . Спектральный класс Солнца G2, абсолютная звездная величина  $+4,96^m$ .

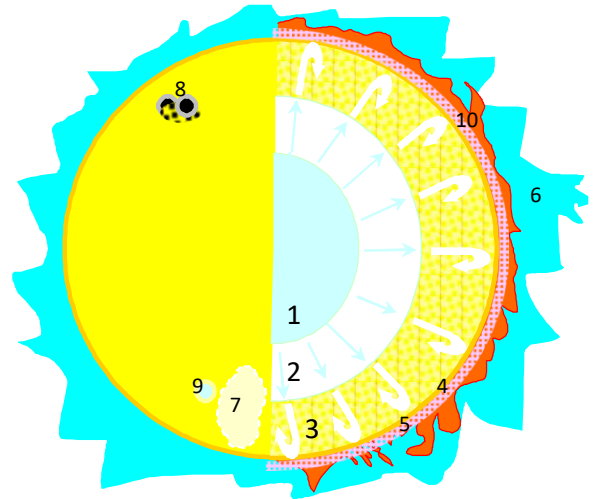
Химический состав Солнца: водород – 71 %, гелий – 26,5 %, остальные элементы 2,5 %. В составе Солнца нет неизвестных на Земле химических элементов.

Агрегатное состояние солнечного вещества – ионизированный атомарный газ (плазма). Вглубь Солнца, с увеличением температуры и давления, степень ионизации растет вплоть до полного разрушения атомов в ядре Солнца.

### Внутреннее строение Солнца:

1. **Ядро** (зона термоядерных реакций)

– центральная область, простирающаяся на  $1/3$  радиуса Солнца от его центра, вблизи которого при давлении до  $2 \cdot 10^{18}$  Па, температуре  $1,5 \cdot 10^7$  К и плотности плазмы до  $16 \text{ г/см}^3$  протекают термоядерные реакции превращения ядер атомов водорода в ядра атомов гелия, сопровождающиеся выделением колоссальной энергии. Ядро вращается как единое твердое тело с периодом 22-23 суток.



2. **Зона лучистого переноса** (рас- Рис. 78. **Внутреннее строение Солнца** стояния от  $1/3$  до  $2/3 R_{\odot}$ ) – область, в кото-

рой выделяющаяся в солнечном ядре энергия передается наружу, от слоя к слою, в результате последовательного поглощения и переизлучения электромагнитных волн. Плавно распределяясь по возрастающему объему вещества, энергия (и, в

соответствии с законом Вина, длина) электромагнитных волн постепенно уменьшаются от

$10^{-11}$ - $10^{-12}$  Дж ( $\gamma$ - и жесткое рентгеновское излучение) на границе с ядром до  $10^{-16}$  Дж (жесткий ультрафиолет) на границе с конвективной зоной, где плотность плазмы составляет около  $0,16 \text{ г/см}^3$  при давлении до  $10^{13}$  Па и температуре до  $10^6$  К.

3. **Зона конвекции** ( $0,29 R_{\odot}$ ) простирается почти до самой видимой поверхности Солнца. В ней происходит непрерывное перемешивание (конвекция) солнечного вещества.

В глубинах Солнца плотность солнечного вещества настолько велика, что до границы с зоной конвекции оно вращается как твердое тело. Выше плотность вещества уменьшается настолько, что в зоне конвекции вращение Солнца приобретает дифференцированный характер (как у жидкого или газообразного объекта): быстрее всего на экваторе, медленнее – по направлению к полюсам. Взаимодействие движущихся потоков солнечной плазмы дает эффект динамо-механизма, порождающего магнитное поле Солнца. В энергию магнитного поля преобразуется до 0,1 % от всей поступающей в конвективную зону тепловой энергии Солнца. На дне конвективной зоны с 22-летней

периодичностью накапливается намагниченная плазма, образующая мощный магнитный слой. У границы с фотосферой формируются гигантские *ячейки супергрануляции*; в области интенсивного перемешивания вещества генерируются мощные акустические (звуковые) колебания. На глубине 0,8-0,9  $R_{\odot}$  появляются первые нейтральные атомы – сначала гелия, затем водорода, выше их концентрация увеличивается.

Выше простирается **атмосфера** Солнца, в которой выделяется ряд следующих областей:

Фотосфера (4) – слой газов толщиной 350-700 км. В нижнем слое фотосферы, обладающем температурой 8000 К при давлении солнечного вещества до  $10^6$  Па наблюдаются *гранулы* – ячейки верхнего яруса конвективной зоны размерами около 700 км – восходящие потоки раскаленных газов.

Фотосфера условно считается «видимой поверхностью» Солнца (хотя на самом деле это тонкий слой раскаленного ионизированного газа) потому, что в вышележащих слоях солнечной атмосферы плотность вещества уменьшается настолько, что мы видим фотосферу Солнца сквозь эти слои, которые можем наблюдать лишь в особых обстоятельствах или при помощи специальных приборов.

В ней при температуре 5770 К формируется все приходящее к Земле солнечное электромагнитное излучение в интервале длин волн от  $10^{-13}$  до  $5 \cdot 10^{-2}$  м с максимумом энергетической светимости в области  $\lambda = 5,55 \cdot 10^{-7}$  м (желтая часть спектра). На фоне непрерывного спектра излучения глубин Солнца наблюдаются черные линии поглощения атомарных газов солнечной фотосферы, называемых *фраунгоферовыми* линиями. Уменьшение температуры в верхних слоях фотосферы порождает потемнение солнечного диска к краям светила.

Хромосфера (5) толщиной около  $10^4$  км наблюдается во время полных солнечных затмений как красноватое кольцо вокруг Солнца. Представляет собой совокупность сравнительно плотных и горячих (6000-15000 К) газовых струй и волокон. На высоту 4000-5000 км со скоростью 20 км/с поднимаются редкие изолированные столбы солнечного вещества – хромосферные *спикулы* диаметром 500-3000 км, занимающие до 0,5 % солнечной поверхности.

В узком переходном слое между хромосферой и короной температура солнечного вещества быстро возрастает до  $10^6$  К.

Корона (10) – внешняя, наиболее разреженная часть солнечной атмосферы, обладает очень сложной и постоянно изменяющейся структурой. Корона разделяется на *внутреннюю* ( $T < 1,5 \cdot 10^6$  К) и *внешнюю* ( $T < 3 \cdot 10^6$  К), образующую на расстоянии в несколько радиусов Солнца поток солнечного вещества – заряженных частиц ( $e^-$ ,  $p$ ) и электромагнитного излучения – **солнечный ветер**, «дующий» со скоростью от 350-400 км/с на экваторе до 700 км/с на полюсах Солнца.

В атмосфере Солнца наблюдаются проявления *солнечной активности*:

Факельные поля (флоккулы) (6) – светлые «горячие» участки фотосферы размерами от 5000 до 50000 км. Наблюдаются там, где на поверхность Солнца множеством *факелов-фонтанов* высотой до 400 км «прорывается» раскаленное до 10000 К солнечное вещество: в вершинах гранул и на их боковых гранях.

Солнечные пятна (7) – «холодные» участки солнечной фотосферы размерами от 1 до 35000 км с температурой, понизившейся до 4000 К. Кажутся черными по контрасту с окружающей поверхностью, нагретой до 6000 К.

Протуберанцы (8) – выброшенные в хромосферу на высоту около  $10^4$  км сравнительно холодные плотные облака солнечного вещества ( $T \sim 10^4$  К).

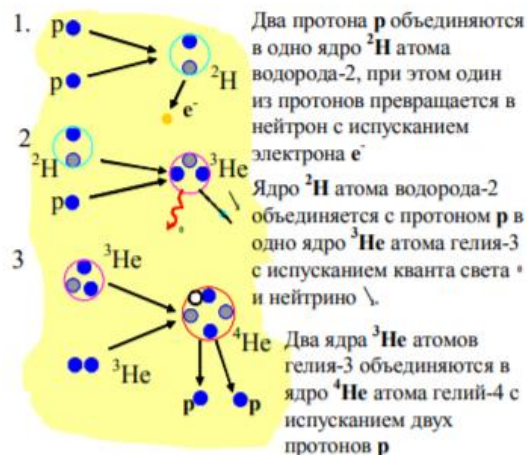
В области хромосферных вспышек (9) размерами до 1000 км выделяется до  $10^{22}$ - $10^{25}$  Дж/с энергии (как при одновременном взрыве миллиардов термоядерных бомб). При вспышке образуется большое коронарное облако с температурой  $2$ - $3 \cdot 10^7$  К (до  $10^8$  К). Порождают выброс заряженных частиц со скоростью до 30000 км/с и мощное ультрафиолетовое, рентгеновское и радиоизлучение.

## • Энергетика Солнца и звезд

Энергетика Солнца и звезд основана на **термоядерных реакциях** – процессах превращения одних элементарных частиц в другие, сопровождающихся синтезом более тяжелых атомных ядер из более легких, протекающих при высоких ( $T > 10^7$  К) температурах и давлениях, с выделением огромного количества энергии.

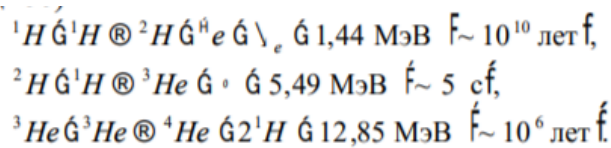
В недрах нормальных звезд происходят термоядерные реакции превращения ядер атомов водорода в ядра атомов гелия. Общее значение выделившейся энергии, уносимой возникшими в ходе

взаимодействия атомных ядер элементарными частицами ( $\gamma$ -квантами, нейтрино и т.д.), эквивалентно разности между суммой масс вступающих в реакцию ядер атомов водорода и массой образующегося ядра атома



Основными типами реакций, происходящих в недрах звезд, являются:

1. Протон-протонный цикл, протекающий при температуре  $7 \text{ T} \approx 1,8 \times 10^7 \text{ K}$  (ниже при описании хода термоядерных реакций сообщаются значения энергии, выделяющейся в ходе каждой отдельной реакции ( $1 \text{ МэВ} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ Дж}$ ) и продолжительность реакции – время, за которое



число частиц уменьшается

2. Азотно-углеродный цикл (CNO), в котором ядра атомов азота и углерода играют роль катализаторов реакции, протекающей при температурах выше  $1,8 \times 10^7 \text{ K}$  с установлением равновесных концентраций изотопов  ${}^{14}\text{N}$  (95%),  ${}^{12}\text{C}$  (4%), и  ${}^{13}\text{C}$  (1 %) по массе.

Для звезд с массой  $M \sim M_{\odot}$  основным являются протон-протонный цикл, для массивных звезд ( $M > M_{\odot}$ ) основным являются азотно-углеродный цикл, протекающий с большей скоростью и большим выделением энергии.

Чем меньше масса звезды, тем ниже давление и температура в ее недрах, тем слабее, с меньшим выделением энергии идут термоядерные реакции, тем дольше «сгорает», превращаясь в гелий, водород в ядре звезды и тем дольше она живет. У красных тусклых звезд-карликов долгий век – десятки миллиардов лет.

Чем больше масса звезды, тем выше давление и температура в ее недрах, тем сильнее, с мощным выделением энергии идут термоядерные реакции, тем скорее «сгорает», превращаясь в гелий, водород в ядре

звезды и тем меньше она живет. У голубых звезд-сверхгигантов недолгий век – они живут всего лишь десятки миллионов лет. Наше Солнце – желтая, средняя по своим характеристикам звезда класса G живет уже 5 миллиардов лет, и будет светить еще почти 8 миллиардов лет.

Одной из загадок солнечной энергетики 80-х годов XX в. было несоответствие между теоретически вычисленным и экспериментально зарегистрированным потоком солнечных нейтрино: их было меньше почти на 1/3 от расчетной величины. В настоящее время установлено, что в недрах Солнца и, вероятно, других звезд происходит процесс осцилляции (преобразования) электронных нейтрино  $\pm n_e$  в таонные нейтрино  $\pm n_\tau$  и мезонные нейтрино  $\pm n_\mu$ , а общий поток солнечных нейтрино всех классов соответствует расчетному.

**Солнце и звезды – естественные термоядерные реакторы с гравитационным удержанием плазмы.** Термоядерные реакции в недрах Солнца и звезд «саморегулируются»: рост температуры в центре звезды за счет усиления мощности термоядерных реакций ведет к возрастанию газового (лучевого) давления и расширению звезды в пространстве. Увеличение размеров звезды снижает давление вышележащих слоев вещества на нижележащие под действием силы тяжести, что, в свою очередь, уменьшает температуру и интенсивность термоядерных реакций в центре звезды.

#### • Солнечная активность

**Солнечная активность** – комплекс явлений, охватывающих всю атмосферу Солнца в областях размерами  $10-10^5$  км за время  $1-10^6$  с. По масштабам и времени проявления солнечной активности разделяются на медленноменяющиеся – коронарные дыры, факельные поля, пятна, фотосферные волокна, и быстроменяющиеся – протуберанцы, хромосферные вспышки и т.д.

Все проявления солнечной активности возникают в результате усиления и (или) взаимодействия местных (локальных) магнитных полей в верхней части конвективной зоны и в атмосфере. Взаимодействие плазмы с магнитными полями описывается известными вам законами электромагнитной индукции.

Активные области порождаются всплыванием мощной трубки магнитного потока из магнитного слоя у основания конвективной зоны. Вместе с плазмой поднимаются «вмороженные» в нее магнитные поля с индукцией 0,2-0,3 Тл. Они возникают вследствие неоднородности

вращения Солнца и обладают сложной структурой, которая в ходе движения приобретает петлеобразную форму. Гигантские устойчивые биполярные магнитные области обладают двумя полюсами противоположной полярности, соединяющимися системой арок протяженностью до 30000 км и высотой до 5000 км. Вершины арок медленно поднимаются; у полюсов арок солнечное вещество медленно стекает вниз. В фотосфере активные области расщепляются на множество тонких трубок с напряженностью магнитного поля до 2000 Э, образующих *факельные поля*. Области пересечения тонких магнитных трубок с фотосферой наблюдаются в форме групп *солнечных пятен*.

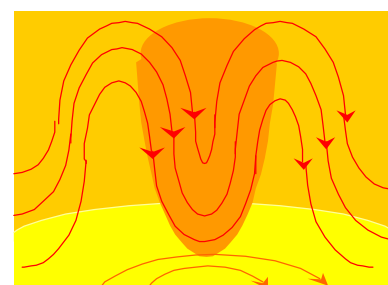
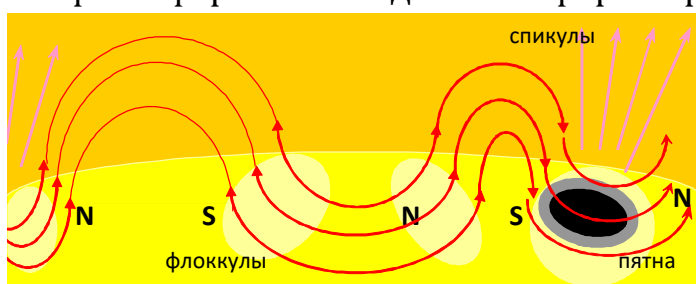


Рис. 80. Движение вещества в солнечной и атмосфере. Рис. 81.

## Образование протуберанцев

### Арки биполярных магнитных областей

Солнечная плазма как смесь заряженных частиц (ионов, электронов и протонов) обладает очень низким электрическим сопротивлением. По правилу Ленца, ослабление (уменьшение индукции) магнитного поля порождает поддерживающий его электрический ток (поток магнитной индукции через площадь, ограниченную произвольным контуром, со временем не изменяется). Плазма может беспрепятственно перемещаться («течь») вдоль силовых линий магнитного поля. При движении плазмы поперек поля в силу условия постоянства потока магнитной индукции плазма увлекает за собой «вмороженные» в поле линии индукции и замедляет свое движение с выделением энергии.

Обычно магнитное поле на участке солнечной поверхности обладает индукцией  $10^{-4}$  Тл при напряженности 1 Э. Оно не может управлять движением плазмы, свободно участвующей в конвекции, поскольку плотность кинетической энергии участвующей в конвективном движении плазмы ( $W = 125$  Дж/м<sup>3</sup>) выше плотности энергии магнитного поля ( $4 \cdot 10^{-3}$  Дж/м<sup>3</sup>). Магнитное поле биполярной магнитной области подавляет конвекцию, если его индукция достигает 0,2 Тл: плотность энергии магнитного поля биполярных областей

( $1,6 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>) оказывается существенно выше плотности кинетической энергии участвующей в конвективном движении плазмы, а магнитное поле не может двигаться поперек линий индукции.

Количественная характеристика солнечной активности – числа Вольфа определяется по формуле:  $W = 10g + f$ , где  $g$  – количество групп пятен,  $f$  – количество всех наблюдаемых пятен. Другими, более точными индикаторами солнечной активности являются суммарная площадь пятен и интенсивность солнечного радиоизлучения ( $\lambda = 0,107$  м).

**Солнечный цикл** – периодический процесс появления и развития на всей поверхности Солнца активных областей, обусловленных «всплыванием» в атмосферу сильных магнитных полей. Средний промежуток между двумя максимумами солнечной активности равен 11,1 года.

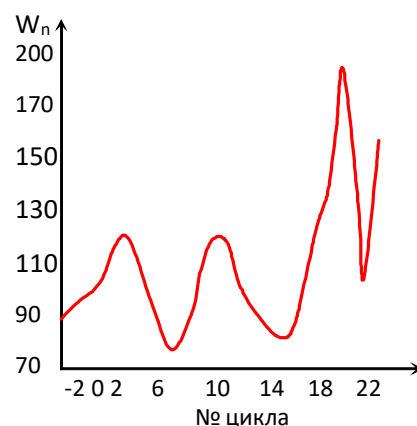
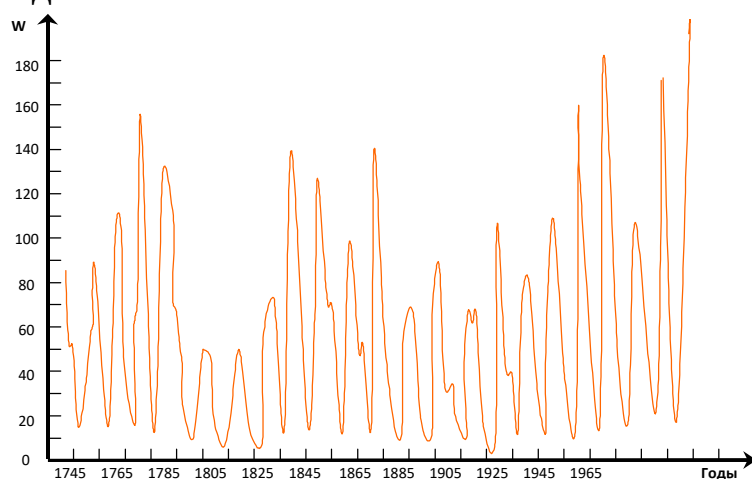


Рис. 83. "Вековой" цикл

Рис. 82. 11-летний цикл солнечной активности

Во время минимума солнечной активности для внешнего наблюдателя корона «сжимается» у полюсов; иногда в течение недель в минимуме солнечной активности в фотосфере не наблюдается ни единого пятна.

В максимуме активности число Вольфа превышает 150-200 единиц. Но возрастает количество и площадь не только солнечных пятен, но и, в большей степени, раскаленных факельных полей. Это ведет к чуть заметному увеличению температуры и, следовательно, светимости Солнца. Солнечная постоянная возрастает на 0,1-0,15 %, а концентрация рентгеновского и коротковолнового излучения в 3-4 раза. Солнечная корона приобретает «растрепанную» сферическую форму.

Обычно комплекс явлений солнечной активности протекает в следующей последовательности: с усилением магнитного поля при



всплывании трубки магнитного потока в фотосфере появляется расширяющееся, увеличивающее свою яркость факельное поле. Сутки спустя в нем возникают и развиваются крохотные **поры**, постепенно разрастающиеся в черные пятна и группы пятен: через 10 суток их размеры возрастают до 10000 км. В хромосфере и короне происходят бурные процессы. Затем активность области постепенно уменьшается: через 2-3 месяца исчезают пятна; но месяцами над этим местом будет висеть огромный протуберанец, и лишь через год активная область исчезает полностью.

Соседние циклы тесно связаны между собой. Относительная интенсивность 11-летних циклов меняется с 80–90-летним («вековым») циклом солнечной активности. Установлено существование 1800-летнего цикла; возможно существование более продолжительных циклов.