

Солнце

Солнце – ближайшая к нам звезда. Расстояние до него по астрономическим меркам невелико: лишь 8 минут идет свет от Солнца до Земли. Это звезда, которая образовалась после взрывов сверхновых, она богата железом и другими элементами. Около которой смогла сформироваться такая планетная система, на третьей планете которой – Земле – возникла жизнь. Пять миллиардов лет – возраст нашего Солнца. Солнце – звезда, вокруг которой обращается наша планета. Среднее расстояние от Земли до Солнца, т.е. большая полуось орбиты Земли, составляет 149,6 млн. км = 1 а.е. (астрономическая единица). Солнце является центром нашей планетной системы, в которую кроме него входят 9 больших планет, несколько десятков спутников планет, несколько тысяч астероидов (малых планет), кометы, метеорные тела, межпланетная пыль и газ. Солнце – звезда, которая светит достаточно равномерно на протяжении миллионов лет, что доказано современными биологическими исследованиями остатков сине-зеленых водорослей. Если бы температура поверхности Солнца изменилась всего на 10 %, жизнь на Земле, вероятно, была бы уничтожена. Наша звезда ровно и спокойно излучает энергию, столь необходимую для поддержания жизни на Земле. Размеры Солнца очень велики. Так, радиус Солнца в 109 раз, а масса – в 330 000 раз больше радиуса и массы Земли. средняя плотность невелика – всего в 1,4 раза больше плотности воды. Солнце вращается не как твердое тело, скорость вращения точек на поверхности Солнца уменьшается от экватора к полюсам.

- **Масса:** $2 \cdot 10^{30}$ кг.;
- **Радиус:** 696 000 км.;
- **Плотность:** 1,4 г/см³;
- **Температура поверхности:** 5780 К;
- **Период вращения относительно звёзд:** 25,38 земных суток;
- **Расстояние от Земли (среднее):** 149,6 млн. км.;
- **Возраст:** около 5 млрд. лет;
- **Спектральный класс:** G2 V;
- **Светимость:** $3,86 \cdot 10^{26}$ Вт.

Солнечный спектр

На 1 квадратный метр обращенной к Солнцу поверхности площадки в окрестностях Земли каждую секунду поступает 1400 Дж энергии, переносимой солнечным электромагнитным излучением (солнечная постоянная). Спектр Солнца непрерывный, в нем наблюдается множество темных фраунгоферовых линий. Эти линии в спектре Солнца образуются в результате поглощения квантов света в более холодных слоях солнечной атмосферы. Наибольшую интенсивность непрерывный спектр имеет в области длин волн 430–500 нм. В видимой и инфракрасной областях спектр электромагнитного излучения

Солнца близок к спектру излучения абсолютно черного тела с температурой 6000 К. Эта температура соответствует температуре видимой поверхности Солнца – фотосферы. В видимой области спектра Солнца наиболее интенсивны линии H и K ионизованного кальция. Около 9 % энергии в солнечном спектре приходится на ультрафиолетовое излучение с длинами волн от 100 до 400 нм. Остальная энергия разделена приблизительно поровну между видимой (400–760 нм) и инфракрасной (760–5000 нм) областями спектра. Солнце – мощный источник радиоизлучения. В межпланетное пространство проникают радиоволны, которые излучает хромосфера (сантиметровые волны) и корона (дециметровые и метровые волны). Радиоизлучение Солнца имеет две составляющие – постоянную и переменную. Постоянная составляющая характеризует радиоизлучение спокойного Солнца. Солнечная корона излучает радиоволны как абсолютно черное тело с температурой $T = 10^6$ К. Переменная составляющая радиоизлучения Солнца проявляется в виде всплесков, шумовых бурь. Шумовые бури длятся от нескольких часов до нескольких дней. Через 10 минут после сильной солнечной вспышки радиоизлучение Солнца возрастает в тысячи и даже миллионы раз по сравнению с радиоизлучением спокойного Солнца; это состояние длится от нескольких минут до нескольких часов. Это радиоизлучение имеет нетепловую природу.

Положение Солнца в нашей Галактике

Солнце расположено в плоскости Галактики и удалено от ее центра на 8 кпк и от плоскости Галактики примерно на 25 пк. В области Галактики, где расположено наше Солнце, звездная плотность составляет 0,12 звезд на пк³. Солнце (и Солнечная система) движется со скоростью 20 км/с в направлении к границе созвездий Лиры и Геркулеса. Это объясняется местным движением внутри ближайших звезд. Эта точка называется апексом движения Солнца, Точка на небесной сфере, противоположная апексу, называется антиапекс. В этой точке пересекаются направления собственных скоростей ближайших к Солнцу звезд. Движения ближайших к Солнцу звезд происходят с небольшой скоростью, это не мешает им участвовать в обращении вокруг галактического центра. Солнечная система участвует во вращении вокруг центра Галактики со скоростью около 220 км/с. Это движение происходит в направлении созвездия Лебедя. Период обращения Солнца вокруг галактического центра около 220 млн. лет.

Внутреннее строение Солнца

Солнце – раскаленный газовый шар, температура в центре которого очень высока, настолько, что там могут происходить ядерные реакции. В центре Солнца температура достигает 15 миллионов градусов, а давление в 200

миллиардов раз выше, чем у поверхности Земли. Солнце – сферически симметричное тело, находящееся в равновесии. Плотность и давление быстро нарастают вглубь; рост давления объясняется весом всех вышележащих слоев. В каждой внутренней точке Солнца выполняется условие гидростатического равновесия. Давление на любом расстоянии от центра уравнивается гравитационным притяжением. Радиус Солнца приблизительно равен 696 000 км. В центральной области с радиусом примерно в треть солнечного ядра происходят ядерные реакции. Затем через зону лучистого переноса энергия излучением переносится из внутренних областей Солнца к поверхности. И фотоны, и нейтрино рождаются в зоне ядерных реакций в центре Солнца. Но если нейтрино очень слабо взаимодействуют с веществом и мгновенно свободно покидают Солнце, то фотоны многократно поглощаются и рассеиваются до тех пор, пока не достигнут внешних, более прозрачных слоев атмосферы Солнца, которую называют фотосферой. Пока температура высока – больше 2 миллионов градусов, – энергия переносится лучистой теплопроводностью, то есть фотонами. Зона непрозрачности, обусловленная рассеянием фотонов на электронах, простирается примерно до расстояния $2/3R$ радиуса Солнца. При понижении температуры непрозрачность сильно возрастает, и диффузия фотонов длится около миллиона лет. Примерно с расстояния $2/3R$ находится конвективная зона. В этих слоях непрозрачность вещества становится настолько большой, что возникают крупномасштабные конвективные движения. Здесь начинается конвекция, то есть перемешивание горячих и холодных слоев вещества. Время подъема конвективной ячейки сравнительно невелико – несколько десятков лет. В солнечной атмосфере распространяются акустические волны, подобные звуковым волнам в воздухе. В верхних слоях солнечной атмосферы волны, возникшие в конвективной зоне и в фотосфере, передают солнечному веществу часть механической энергии конвективных движений и производят нагревание газов последующих слоев атмосферы – хромосферы и короны. В результате верхние слои фотосферы с температурой около 4500 К оказываются самыми «холодными» на Солнце. Как вглубь, так и вверх от них температура газов быстро растет. Всякая солнечная атмосфера постоянно колеблется. В ней распространяются как вертикальные, так и горизонтальные волны с длинами в несколько тысяч километров. Колебания носят резонансный характер и происходят с периодом около 5 минут. Внутренние части Солнца вращаются быстрее; особенно быстро вращается ядро. Именно особенности такого вращения могут приводить к возникновению магнитного поля Солнца.

Термоядерные реакции на Солнце

В 1935 году Ханс Бете выдвинул гипотезу, что источником солнечной энергии может быть термоядерная реакция превращения водорода в гелий. Именно за это Бете получил Нобелевскую премию в 1967 году. Химический

состав Солнца примерно такой же, как и у большинства других звезд. Примерно 75 % – это водород, 25 % – гелий и менее 1 % – все другие химические элементы (в основном, углерод, кислород, азот и т.д.). Сразу после рождения Вселенной «тяжелых» элементов не было совсем. Все они, т.е. элементы тяжелее гелия и даже многие альфа-частицы, образовались в ходе «горения» водорода в звездах при термоядерном синтезе. Характерное время жизни звезды типа Солнца десять миллиардов лет. Основным источником энергии – протон-протонный цикл – очень медленная реакция (характерное время $7,9 \cdot 10^9$ лет), так как обусловлена слабым взаимодействием. Каждую секунду Солнце перерабатывает около 600 миллионов тонн водорода. Запасов ядерного топлива хватит еще на пять миллиардов лет, после чего оно постепенно превратится в белый карлик.

Фотосфера Солнца

Наблюдаемое излучение Солнца возникает в его тонком внешнем слое, который называется фотосферой. Толщина этого слоя $0,001R = 700$ км. В фотосфере образуется видимое излучение Солнца, имеющее непрерывный спектр. «Видимая» поверхность Солнца определяется той глубиной в атмосфере, ниже которой она практически непрозрачна. Солнце – газовый шар, не имеющий четких границ. Однако мы видим его резко очерченным потому, что практически все излучение Солнца исходит из фотосферы. Видимый нами свет излучается отрицательными ионами водорода. Они же его и поглощают, поэтому с глубиной фотосфера быстро теряет прозрачность. На поверхности Солнца можно разглядеть много деталей. Вся фотосфера Солнца состоит из светлых зернышек, пузырьков. Эти зернышки называются гранулами. Размеры гранул невелики, 1000–2000 км (около 1" дуги), расстояние между ними – 300–600 км. На Солнце наблюдается одновременно около миллиона гранул. Каждая гранула существует несколько минут. Гранулы окружены темными промежутками, как бы сотами. В гранулах вещество поднимается, а вокруг них – опускается. Грануляция – проявление конвекции в более глубоких слоях Солнца. Гранулы создают общий фон, на котором можно наблюдать несравненно более масштабные образования, такие, как протуберанцы, факелы, солнечные пятна и др.

Хромосфера Солнца

Хромосфера Солнца видна только в моменты полных солнечных затмений. Луна полностью закрывает фотосферу, и хромосфера вспыхивает, как небольшое кольцо ярко-красного цвета, окруженное жемчужно-белой короной. Размеры хромосферы 10–15 тысяч километров, а плотность вещества в сотни тысяч раз меньше, чем в фотосфере. Температура в хромосфере быстро растет, достигая в верхних ее слоях десятков тысяч градусов. Рост температуры объясняется воздействием магнитных полей и волн, проникающих в хромосферу из зоны конвективных движений. На краю

хромосферы наблюдаются выступающие язычки пламени – хромосферные спикулы, представляющие собою вытянутые столбики из уплотненного газа. Температура этих струй выше, чем температура фотосферы. Во время полного солнечного затмения можно получить спектр хромосферы, который называется спектр вспышки. Он состоит из ярких эмиссионных линий водорода бальмеровской серии, гелия, ионизированного кальция и других элементов, которые внезапно вспыхивают во время полной фазы затмения.

Солнечная корона

Самая внешняя, самая разреженная и самая горячая часть солнечной атмосферы – корона. Она прослеживается от солнечного лимба до расстояний в десятки солнечных радиусов. Несмотря на сильное гравитационное поле Солнца, это возможно благодаря огромным скоростям движения частиц, составляющих корону. Корона имеет температуру около миллиона градусов и состоит из высокоионизированного газа. Возможно, причиной такой высокой температуры являются поверхностные выбросы солнечного вещества в виде петель и арок. Миллионы колоссальных фонтанов переносят в корону вещество, нагретое в глубинных слоях Солнца. Яркость короны в миллионы раз меньше, чем фотосферы, поэтому корону можно видеть только во время полного солнечного затмения, либо с помощью коронографа. Наиболее яркую ее часть принято называть внутренней короной. Она удалена от поверхности Солнца на расстояние не более одного радиуса. Внешняя корона Солнца имеет протяженные границы. Важной особенностью короны является ее лучистая структура. Корональные лучи имеют самую разнообразную форму. С одиннадцатилетним циклом Солнца меняется общий вид солнечной короны. В эпоху минимума корона имеет округлую форму, она как бы «причесана». В эпоху максимума корональные лучи раскинуты во все стороны.

Вспышки, протуберанцы и корональные арки

Часто, особенно когда на Солнце имеются большие группы пятен, в хромосфере возникают вспышки. Причины вспышек пока еще плохо изучены; по-видимому, они вызываются резким изменением магнитного поля в хромосфере. Энергия вспышки выделяется в вершине корональной петли, затем распространяется в сторону фотосферы, вызывая нагрев и испарение более холодных слоев. При этом излучение резко возрастает не только в видимой области спектра, но и в ультрафиолете, и в рентгеновской области спектра, увеличивается поток космических лучей. Вспышки вызывают изменения в магнитном поле Земли и могут даже повредить системы электроснабжения. Другим проявлением солнечной активности является появление плазменных образований в магнитном поле солнечной атмосферы – волокон. Если эти волокна видны на краю Солнца, то они наблюдаются как протуберанцы. Протуберанцами называются огромные образования в короне Солнца. Плотность и температура протуберанцев такая же, как и вещества

хромосферы, но на фоне горячей короны протуберанцы – холодные и плотные образования. Температура протуберанцев около 20 000 К. Некоторые из них существуют в короне несколько месяцев, другие, появляющиеся рядом с пятнами, быстро движутся со скоростями около 100 км/с и существуют несколько недель. Отдельные протуберанцы движутся с еще большими скоростями и внезапно взрываются; они называются эруптивными.

Солнечные пятна

Пятна на Солнце – очевидный признак его активности. Это более холодные области фотосферы. Температура пятен около 3500 К, поэтому на ярком фоне фотосферы (с температурой около 6000 К) они кажутся темнее. Солнечные пятна имеют внутреннюю структуру: более темную центральную часть – ядро – и окружающую ее полутень. Солнечные пятна часто образуют группы, которые могут занимать значительную площадь на солнечном диске. Установлено, что пятна – места выхода в атмосферу сильных магнитных полей. Поля уменьшают поток энергии, исходящий из ядра, поэтому в месте их выхода на поверхность температура падает. Пятна обычно возникают группами. Пятна на Солнце часто бывают окружены светлыми зонами, называемыми факелами. Они горячее атмосферы примерно на 2000 К и имеют ячеистую структуру (величина каждой ячейки – около 30 тысяч километров). Часто встречаются факельные поля, внутри которых пятен нет. Факелы образуются в результате конвекции из глубоких слоев Солнца. Они существуют недели и месяцы. В некоторых факельных полях между гранулами появляется черная точка, она начинает быстро расти и на следующий день превращается в пятно с резкой границей. Через 3–4 дня вокруг пятна образуется полутень. К десятому дню площадь пятна достигает максимума, после этого оно начинает уменьшаться и, наконец, исчезает. В группе пятен сначала исчезают самые мелкие пятна. Недалеко от пятен протягиваются темные нити длиной вплоть до сотен тысяч километров. Они представляют собой зоны нулевого магнитного поля и отделяют регионы с противоположной полярностью. В период минимума солнечной активности пятна появляются в средних широтах, в периоды максимума – около экватора. Около полюсов пятна практически не наблюдаются. Цикл активности солнечных пятен имеет прямое отношение к земному климату.

Солнечный ветер

Солнце является источником постоянного потока частиц. Нейтрино, электроны, протоны, альфа-частицы, а также более тяжелые атомные ядра все вместе составляют корпускулярное излучение Солнца. Значительная часть этого излучения представляет собой более или менее непрерывное истечение плазмы, так называемый солнечный ветер, являющийся продолжением

внешних слоев солнечной атмосферы – солнечной короны. Вблизи Земли его скорость составляет обычно 400–500 км/с. Поток заряженных частиц выбрасывается из Солнца через корональные дыры – области в атмосфере Солнца с открытым в межпланетное пространство магнитным полем. Солнце вращается с периодом 27 суток. Траектории движения частиц солнечного ветра, движущихся вдоль линий индукции магнитного поля, имеют спиральную структуру, обусловленную вращением Солнца. В результате вращения Солнца геометрической формой потока солнечного ветра будет архимедова спираль. В дни солнечных бурь солнечный ветер резко усиливается. Он вызывает полярные сияния и магнитные бури на Земле, а космонавтам не следует в это время выходить в открытый космос. Под воздействием солнечного ветра хвосты комет всегда направлены в сторону от Солнца. Солнце – мощный источник радиоизлучения. В межпланетное пространство проникают сантиметровые радиоволны, которые излучает хромосфера, и более длинные волны, излучаемые короной.