СОЛНЦЕ, СОСТАВ И ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ

Энергия и температура Солнца

Солнце – центральное тело Солнечной системы – является типичным представителем звезд, наиболее распространенных во Вселенной тел.

Масса Солнца составляет $2 \cdot 10^{30}$ кг.

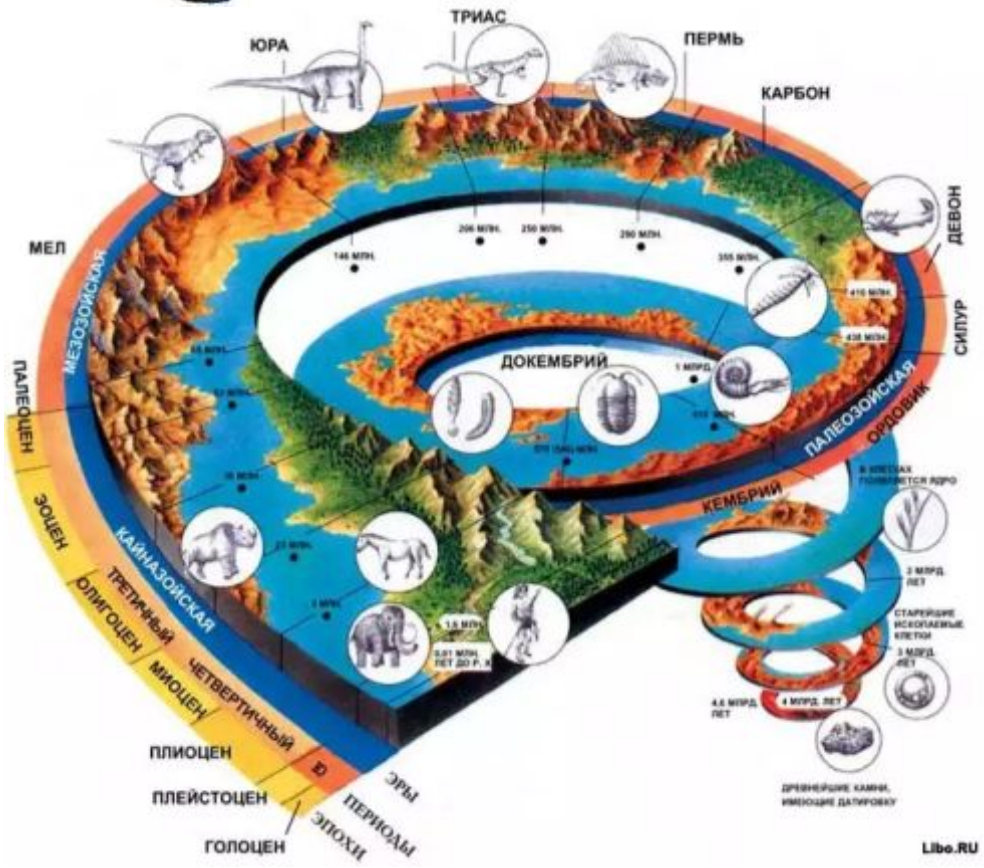
Как и многие другие звезды, Солнце представляет собою огромный шар, который состоит из водородно-гелиевой плазмы и находится в равновесии в поле собственного тяготения.

Солнце излучает в космическое пространство колоссальный по мощности поток излучения, который в значительной мере определяет физические условия на Земле и других планетах, а также в межпланетном пространстве.

Земля получает всего лишь одну двухмиллиардную долю солнечного излучения. Однако и этого достаточно, чтобы приводить в движение огромные массы воздуха в земной атмосфере, управлять погодой и климатом на земном шаре.

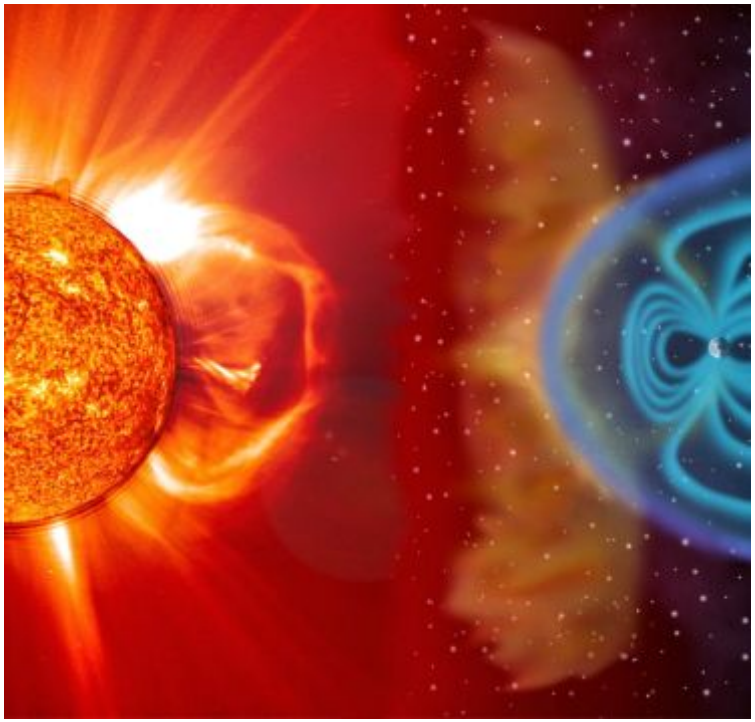
Большинство источников энергии, которые использует человечество, связаны с Солнцем.

Тепло и свет Солнца обеспечили развитие жизни на Земле, формирование месторождений угля, нефти и газа.



Количество приходящей от Солнца на Землю энергии принято характеризовать солнечной постоянной.

Солнечная постоянная – поток солнечного излучения, который приходит на поверхность площадью 1 м^2, расположенную за пределами атмосферы перпендикулярно солнечным лучам на среднем расстоянии Земли от Солнца (1 а.е.).

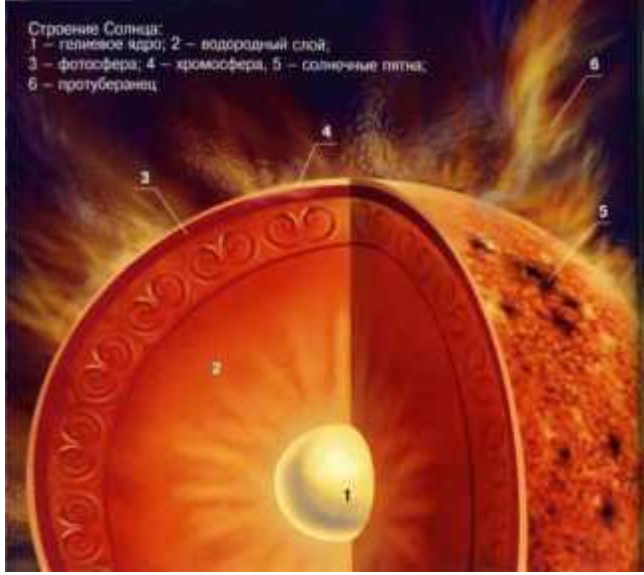


Солнечная постоянная равна 1,37 кВт/м^2 .

Умножив солнечную постоянную на площадь поверхности шара, радиус которого 1 а.е., определим полную мощность излучения Солнца, его светимость, которая составляет

$$L = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт.}$$

Определим температуру фотосферы Солнца.



Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом Стефана–Больцмана: $E = \sigma \cdot T^4$,

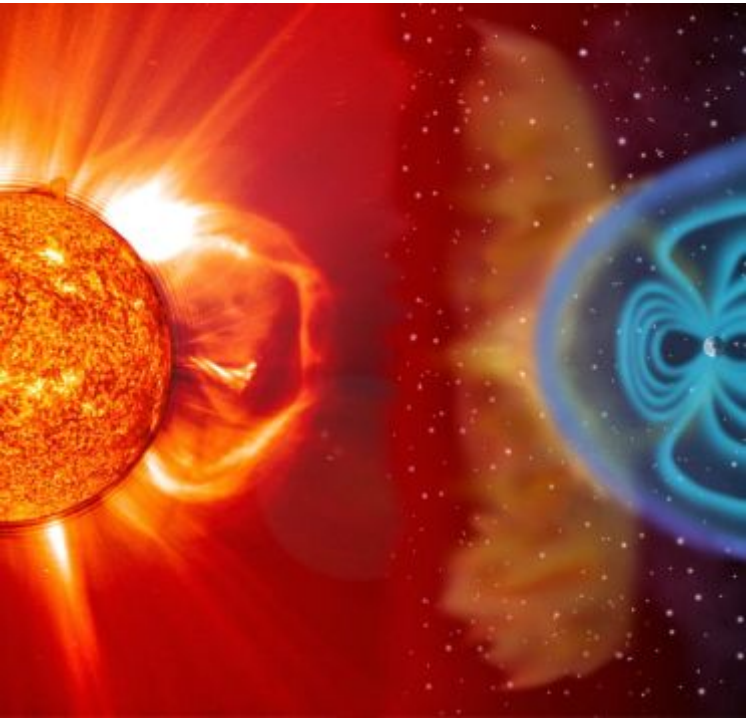
где $\boldsymbol{\sigma} = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2 \cdot$ К^4) – постоянная Стефана-Больцмана.

Светимость Солнца: $L = 4\pi R^2 \cdot E$

или $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$.

Отсюда

$$\boldsymbol{T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}}}$$



Зная расстояние до Солнца (150 000000 км) и угловой диаметр солнечного диска (≈ 30‘) нетрудно вычислить его линейные размеры и площадь поверхности.

Радиус Солнца равен ≈ 700 000 км.

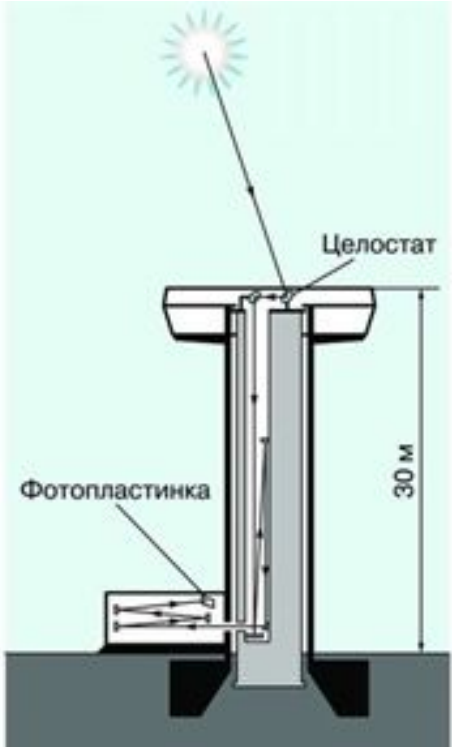
Подставив в формулу численные значения входящих в нее величин, получим $T = 6000$ К.

Такая температура может поддерживаться лишь за счет постоянного притока энергии из недр Солнца.

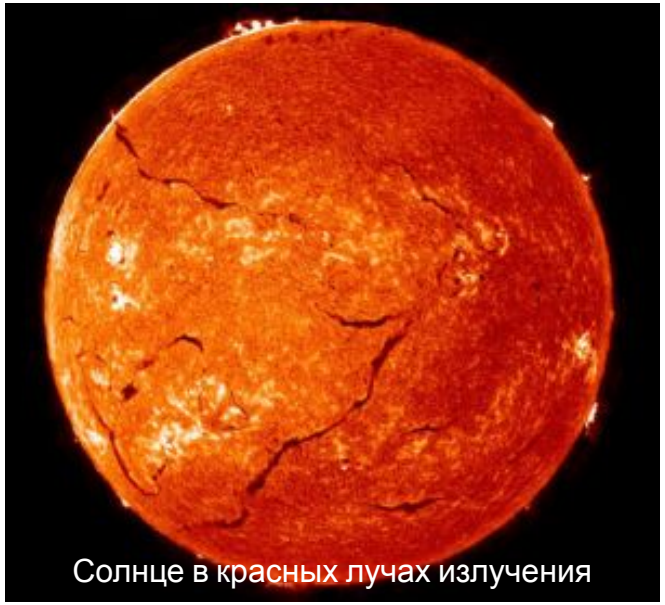
Состав и строение Солнца

Для изучения Солнца используются телескопы особой конструкции – башенные солнечные телескопы.

Система зеркал непрерывно поворачивается вслед за Солнцем и направляет его лучи вниз на главное зеркало, а затем они попадают в спектрографы или другие приборы, с помощью которых проводятся исследования Солнца.



Башенный солнечный телескоп Крымской астрофизической обсерватории БСТ-1 (1957 г.)


Солнце в красных лучах излучения

Благодаря большому фокусному расстоянию солнечных телескопов (до 90 м) можно получить изображение Солнца диаметром до 80 см и детально изучать происходящие на нем явления.

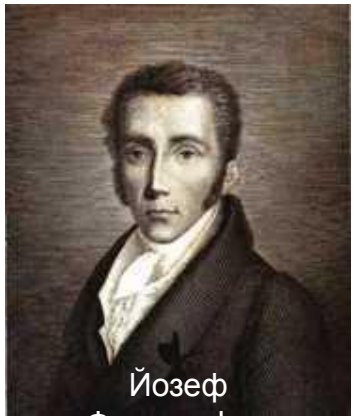
Они лучше видны на спектрогелиограммах – снимках Солнца, которые сделаны в лучах, соответствующих спектральным линиям водорода, кальция и некоторых других элементов.

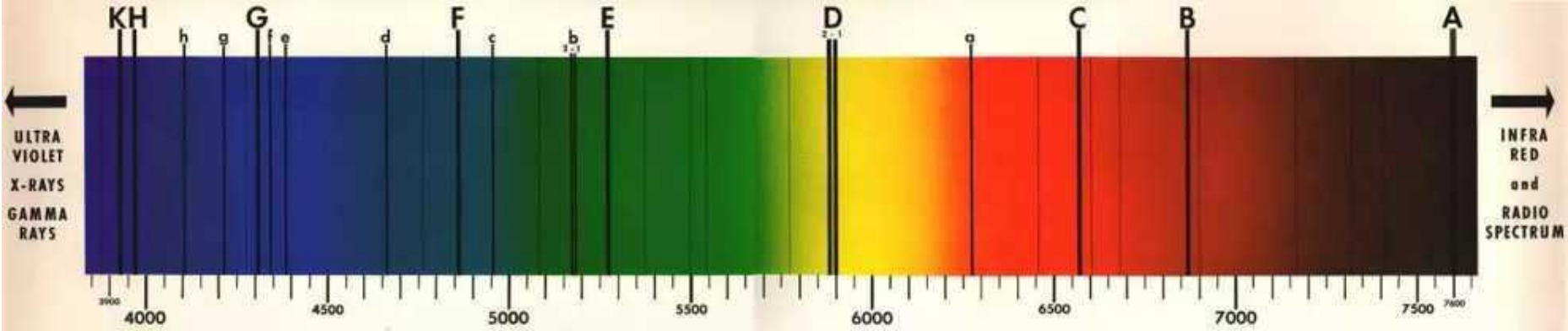
Солнце в ультрафиолетовых лучах

Солнце в рентгеновских лучах

Важнейшую информацию о физических процессах на Солнце дает спектральный анализ.

В спектре Солнца **Йозеф Фраунгофер** в 1814 г. обнаружил и описал линии поглощения, по которым, как стало ясно почти полвека спустя, можно узнать состав его атмосферы.





Солнечный спектр

В настоящее время в солнечном спектре зарегистрировано более 30000 линий, принадлежащих 72 химическим элементам.

Спектральными методами гелий *(от греческого «гелиос» – солнечный)* был сначала открыт на Солнце и лишь затем обнаружен на Земле.

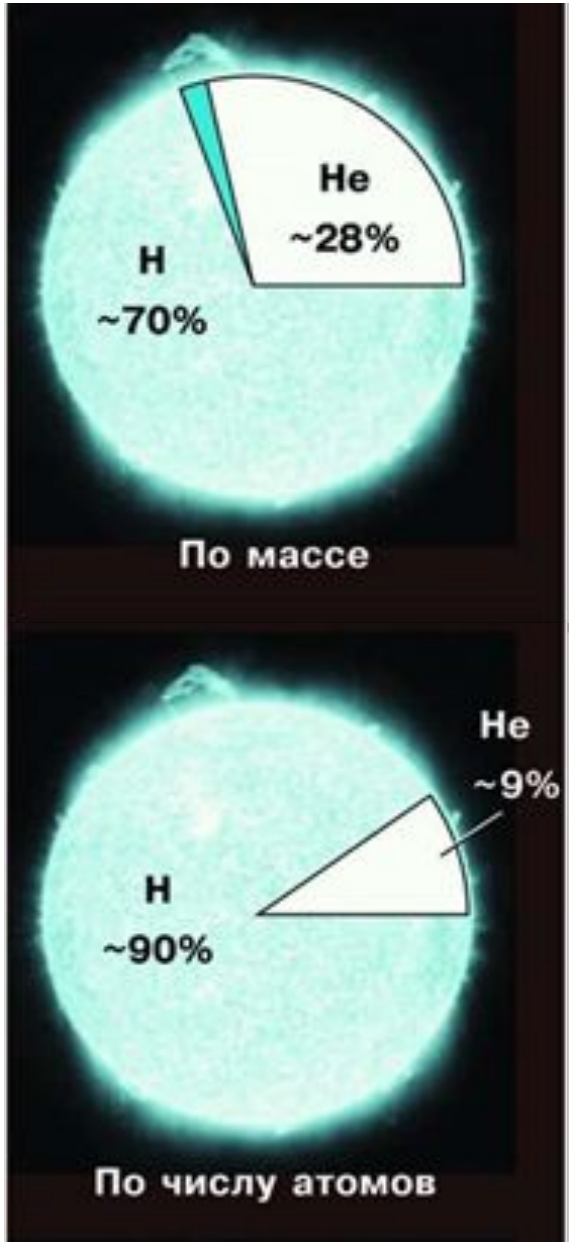


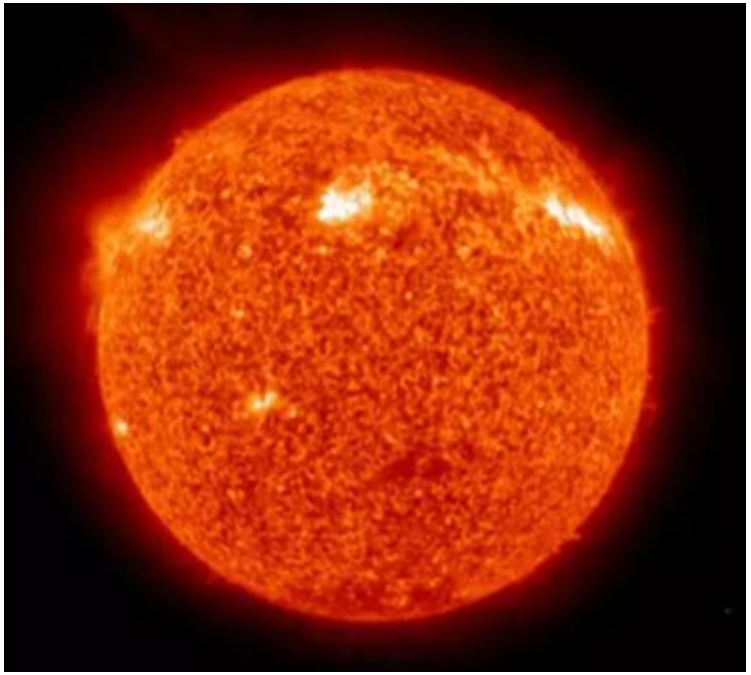
Диаграмма химического состава Солнца

Химический состав Солнца:

- водород составляет около 70% солнечной массы,
- гелий – более 28%,
- остальные элементы – менее 2%. Количество атомов этих элементов в 1000 раз меньше, чем атомов водорода и гелия.

Вещество Солнца сильно ионизовано: атомы, потерявшие электроны своих внешних оболочек и ставшие ионами, вместе со свободными электронами образуют плазму.

Средняя плотность солнечного вещества примерно 1400 кг/м^3. Она соизмерима с плотностью воды и в 1000 раз больше плотности воздуха у поверхности Земли.



Используя закон всемирного тяготения и газовые законы, можно рассчитать условия внутри Солнца, построить модель «спокойного» Солнца.

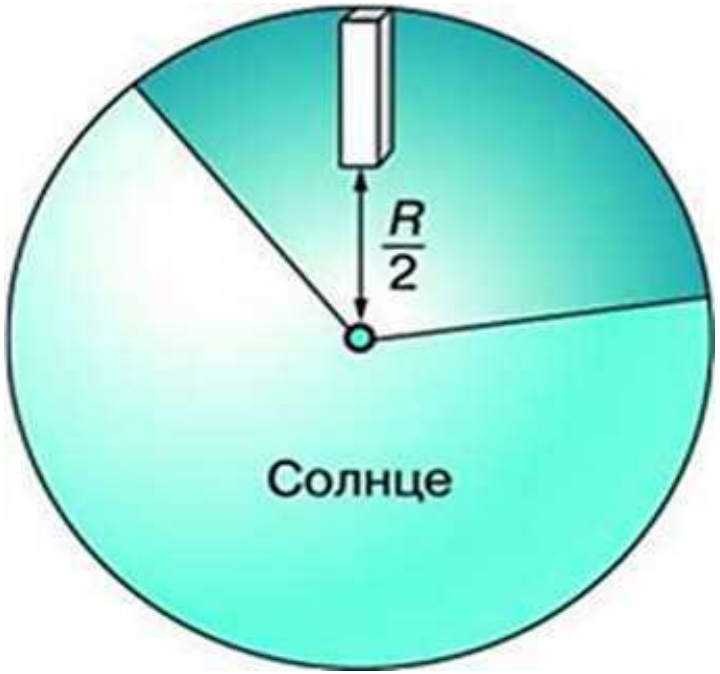
Оно находится в равновесии, поскольку в каждом его слое действие сил тяготения, которые стремятся сжать Солнце, уравновешивается действием сил внутреннего давления газа.

Действием гравитационных сил в недрах Солнца создается огромное давление.

Сделаем приближенный расчет величины давления для слоя, лежащего на расстоянии R/2 от центра Солнца.

При этом будем считать, что плотность вещества внутри Солнца всюду равна средней.

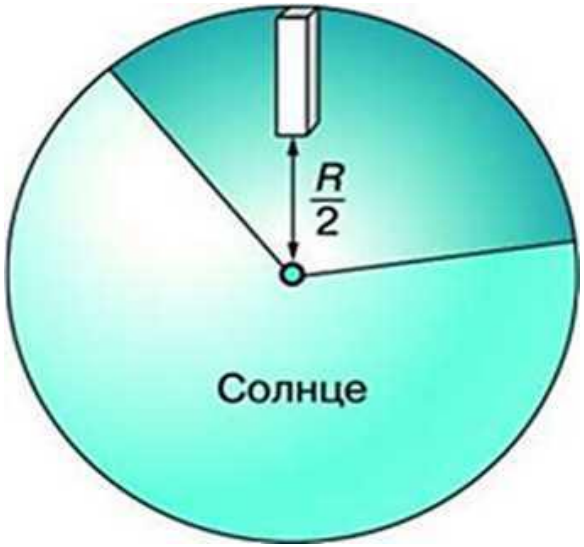
Сила тяжести на этой глубине определяется массой вещества, заключенной в радиальном столбике, высота которого R/2, площадь S, а также ускорением свободного падения на поверхности сферы радиусом R/2.



Сделаем приближенный расчет величины давления для слоя, лежащего на расстоянии R/2 от центра Солнца.

При этом будем считать, что плотность вещества внутри Солнца всюду равна средней.

Сила тяжести на этой глубине определяется массой вещества, заключенной в радиальном столбике, высота которого R/2, площадь S, а также ускорением свободного падения на поверхности сферы радиусом R/2.



Масса вещества в этом столбике равна:

$$m = \bar{\rho}\,\frac{R}{2}S,$$

а ускорение на расстоянии R/2 (согласно закону всемирного тяготения) выражается так:

$$g = G\,\frac{M/8}{(R/2)^2}$$

так как объем этой сферы составляет 1/8 от объема всего Солнца.

Подставив необходимые данные в формулу $p = mg/S$, получим, что давление равно примерно $6{,}6 \cdot 10^{13}$ Па, т. е. в 1 млрд раз превосходит нормальное атмосферное давление.

Для вычисления температуры воспользуемся уравнением Клапейрона–Менделеева:

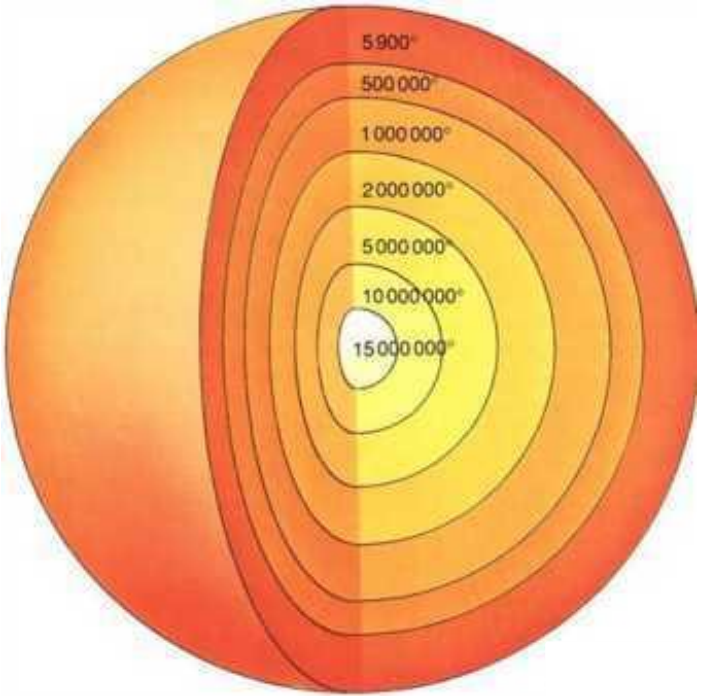
$$pV = \frac{m}{M}RT.$$

Поскольку $\frac{m}{V} = \bar{\rho}$, $T = \frac{Mp}{R\bar{\rho}}$,

где R – универсальная газовая постоянная, а М – молярная масса водородной плазмы.

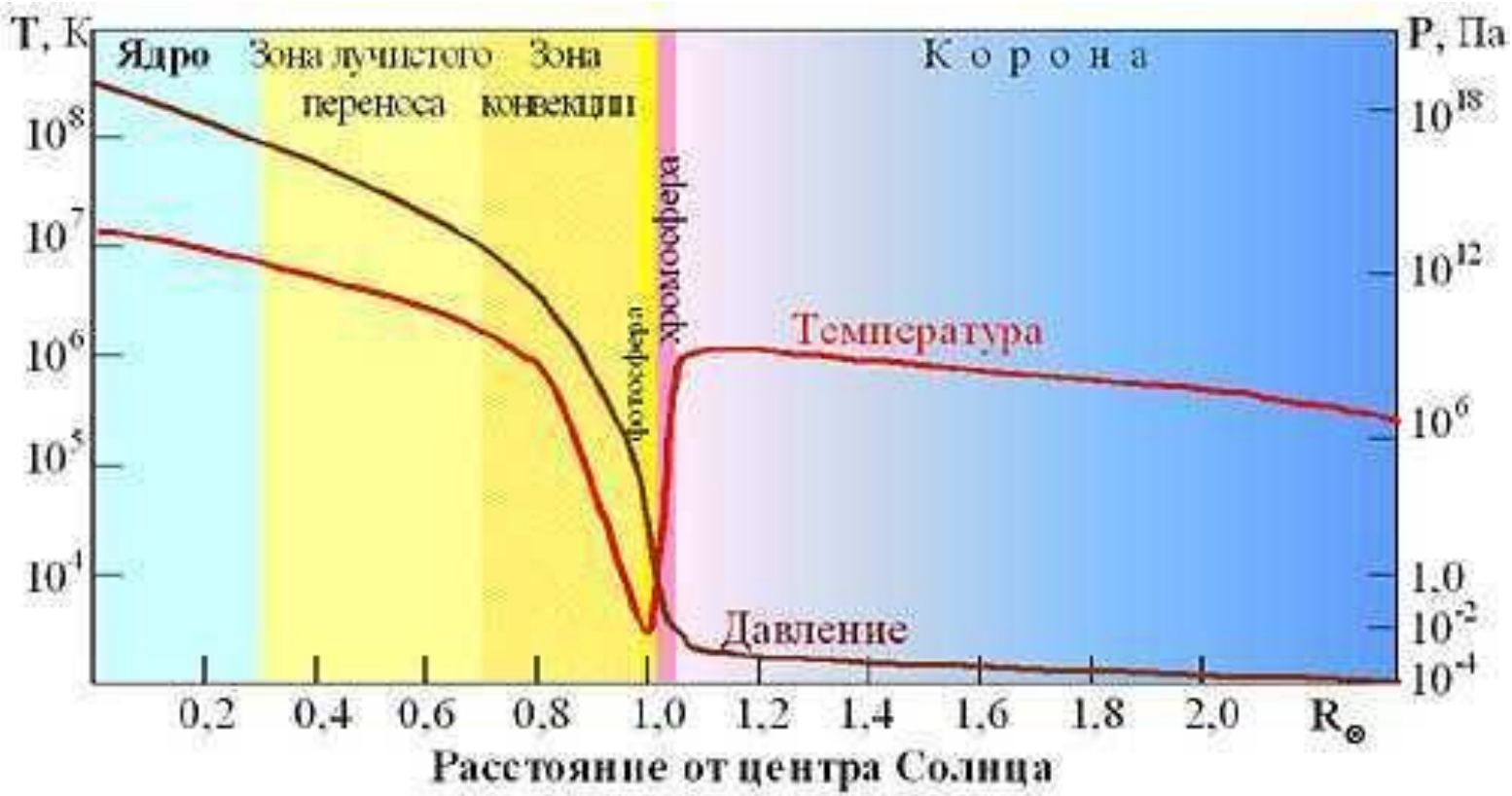
Если считать, что в состав вещества входят в равном количестве протоны и электроны, то она примерно равна $0{,}5 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Тогда $T = 2{,}8 \cdot 10^{6}$ К.



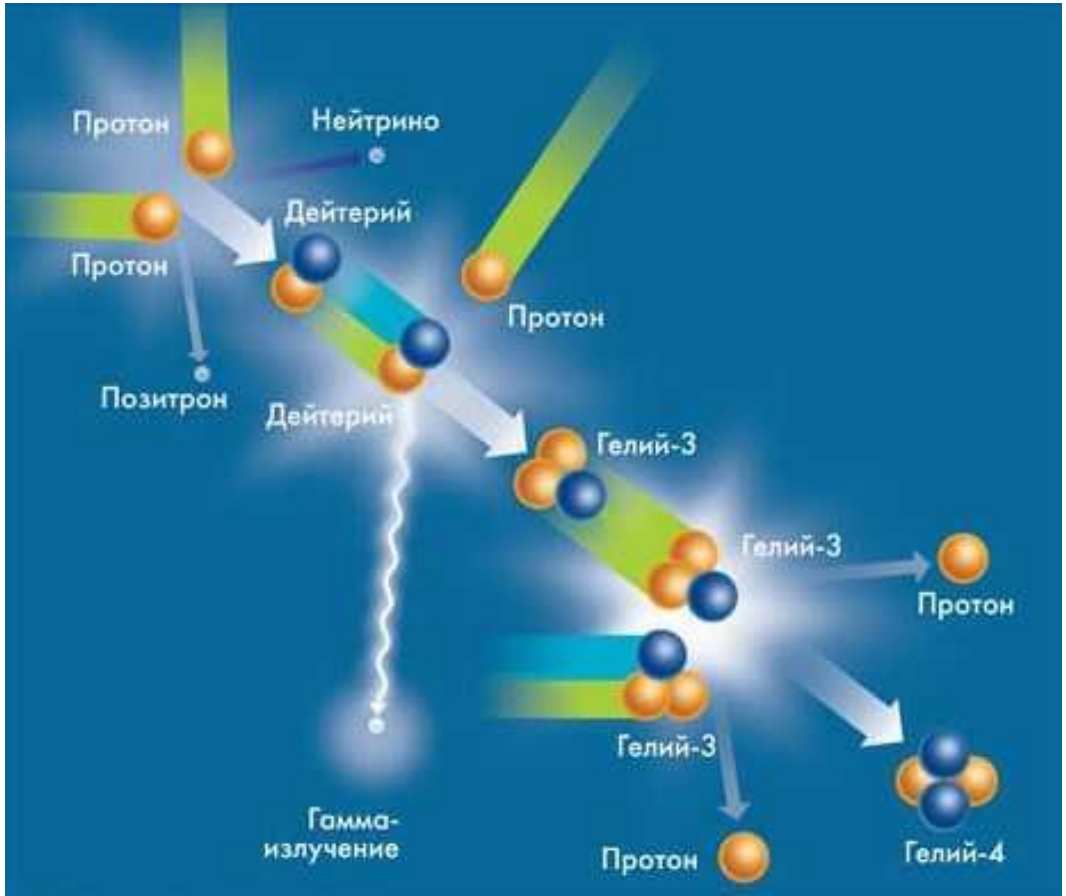
Более точные расчеты, проведенные с учетом изменения плотности с глубиной, дают результаты, лишь незначительно отличающиеся от полученных выше: $p = 6{,}1 \cdot 10^{13}$ Па, $T = 3{,}4 \cdot 10^{6}$ К.

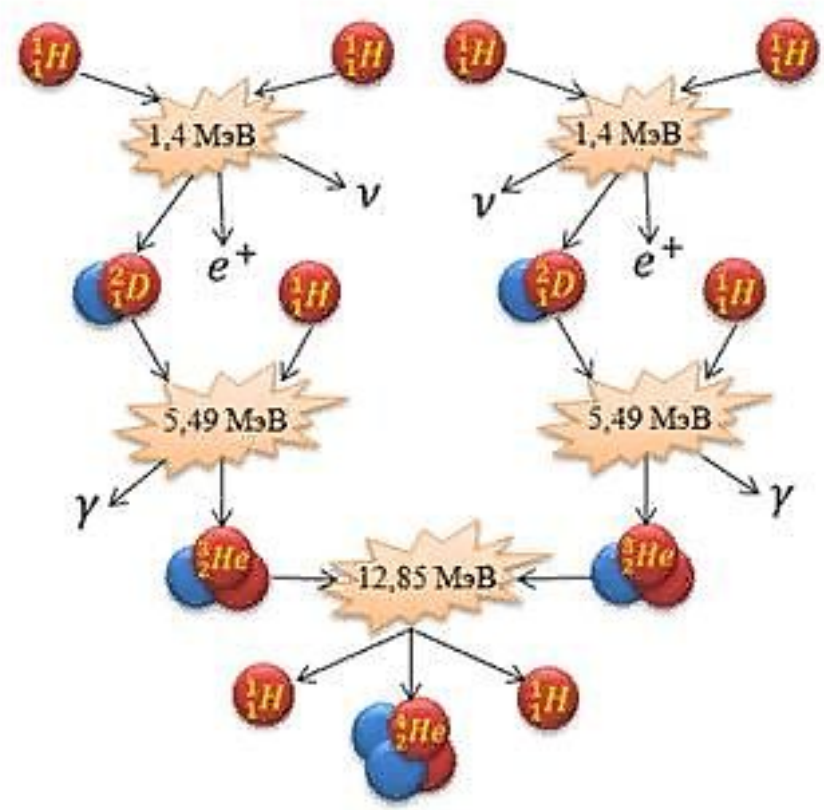
Согласно современным данным, в центре Солнца температура достигает 15 млн К, давление $2 \cdot 10^{18}$ Па, а плотность вещества значительно превышает плотность твердых тел в земных условиях: $1{,}5 \cdot 10^{5}$ кг/м^3 , т. е. в 13 раз больше плотности свинца.



При высокой температуре в центральной части Солнца протоны, которые преобладают в составе солнечной плазмы, имеют столь большие скорости, что могут преодолеть электростатические силы отталкивания и взаимодействовать между собой.

В результате такого взаимодействия происходит термоядерная реакция: четыре протона образуют альфа-частицу (ядро гелия) (стр. 135, записать этапы термоядерной реакции).



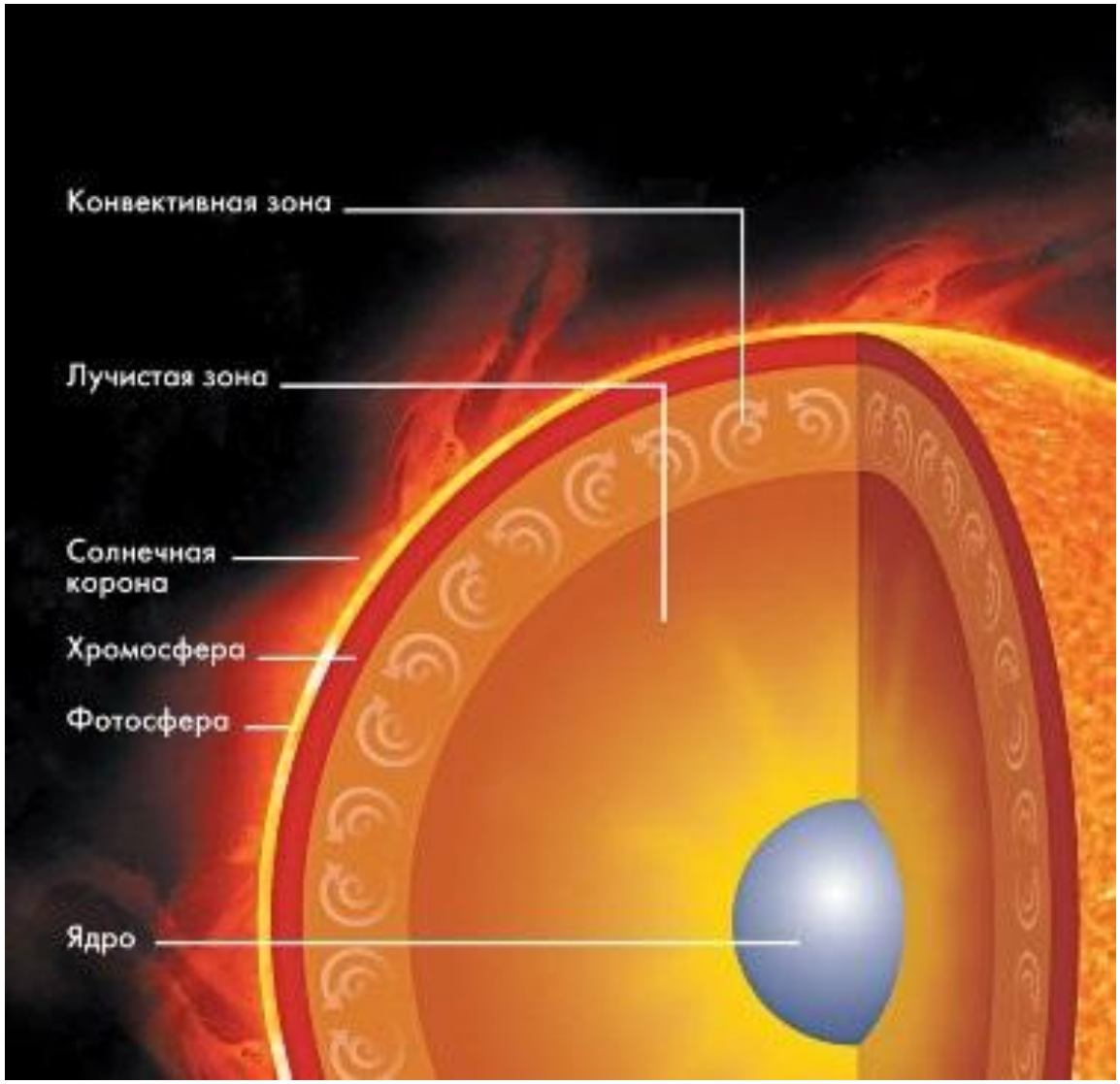


Все три типа нейтрино (электронное, мюонное и таонное) столь слабо взаимодействуют с веществом, что свободно проходят сквозь Солнце и Землю.

Кинетическая энергия, которую приобретают образующиеся в ходе реакции частицы, поддерживает высокую температуру плазмы, и тем самым создаются условия для продолжения термоядерного синтеза.

Энергия гамма-квантов обеспечивает излучение Солнца.

Из недр Солнца наружу энергия передается двумя способами: излучением, т. е. самими квантами, и конвекцией, т. е. веществом.



Выделение энергии и ее перенос определяют внутреннее строение Солнца:

ядро – центральная зона, где при высоком давлении и температуре происходят термоядерные реакции;

«лучистая» зона, где энергия передается наружу от слоя к слою в результате последовательного поглощения и излучения квантов;

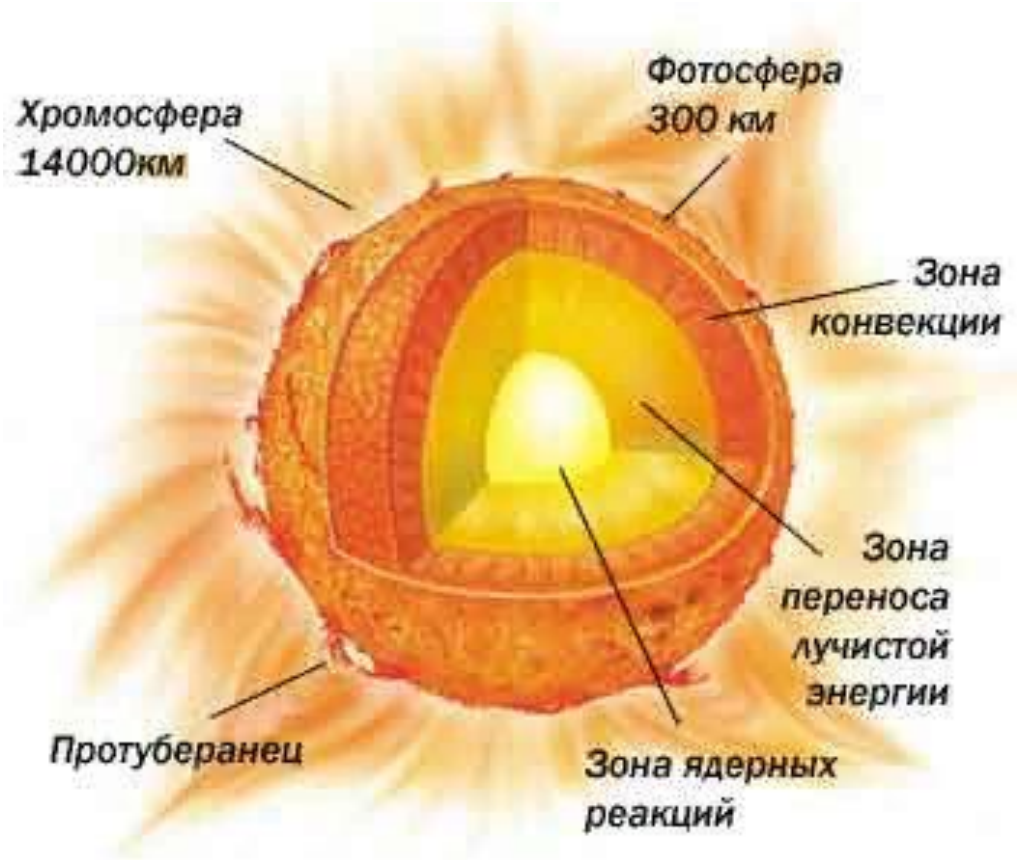
наружная конвективная зона, где энергия от слоя к слою переносится самим веществом в результате перемешивания (конвекции).

Каждая из этих зон занимает примерно 1/3 солнечного радиуса.

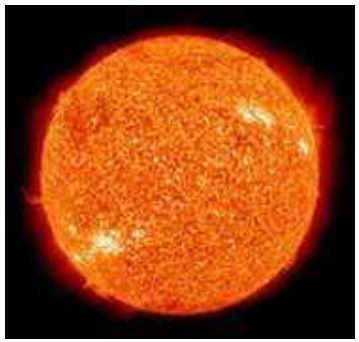
Атмосфера Солнца

Сразу за конвективной зоной начинается атмосфера, которая простирается далеко за пределы видимого диска Солнца.

Ее нижний слой – фотосфера – воспринимается как поверхность Солнца.



Верхние слои атмосферы непосредственно не видны и могут наблюдаться либо во время полных солнечных затмений, либо из космического пространства, либо при помощи специальных приборов с поверхности Земли.



Солнечная активность

Вопросы

1. Из каких химических элементов состоит Солнце и каково их соотношение?
2. Каков источник энергии излучения Солнца? Какие изменения с его веществом происходят при этом?
3. Какой слой Солнца является основным источником видимого излучения?
4. Каково внутреннее строение Солнца? Назовите основные слои его атмосферы.
5. В каких пределах изменяется температура на Солнце от его центра до фотосферы?
6. Какими способами осуществляется перенос энергии из недр Солнца наружу?