

A composite image of the Sun, Earth, and the Moon in space. The Sun is a large, bright yellow-orange sphere on the left. The Earth is a blue and white sphere on the right. The Moon is a small, grey sphere in the upper right. The background is a dark, starry space.

§17. 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.

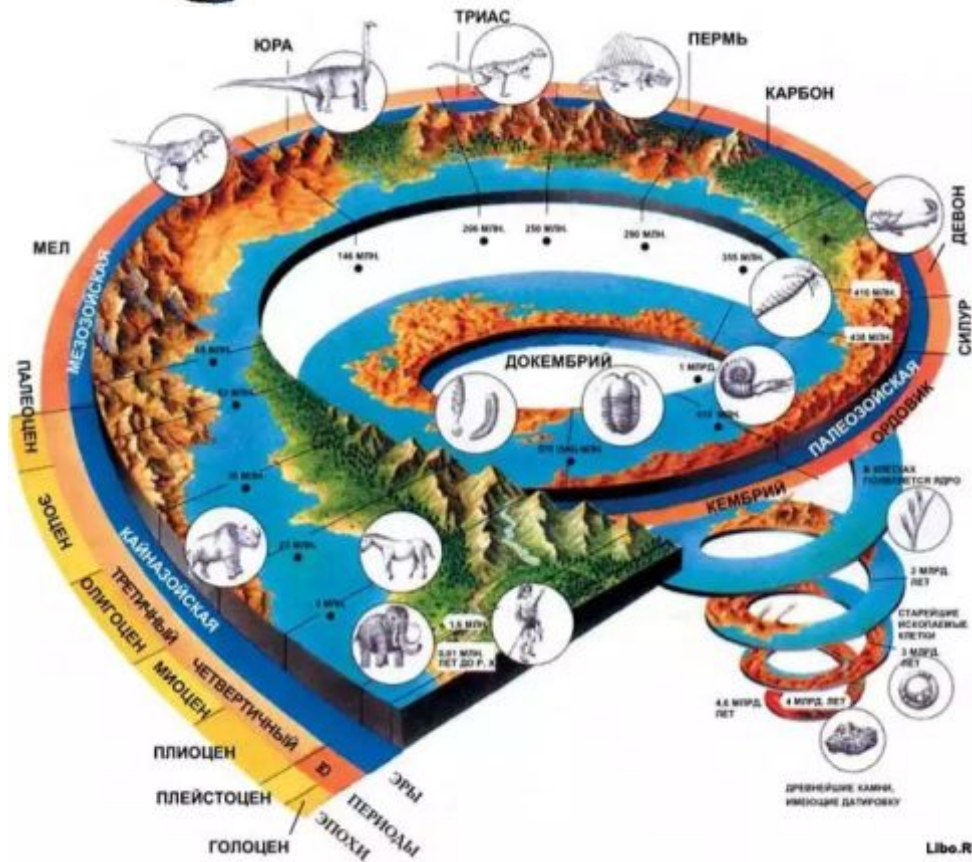
Земля получает всего лишь **одну двухмиллиардную долю** солнечного излучения. Однако и этого достаточно, чтобы приводить в движение огромные массы воздуха в земной атмосфере, управлять погодой и климатом на земном шаре.





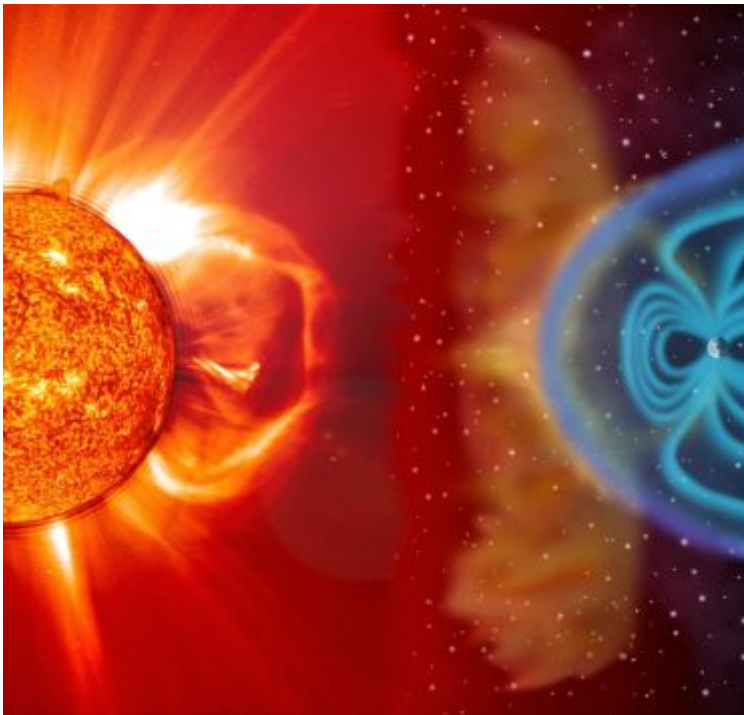
Большинство источников энергии, которые использует человечество, связаны с Солнцем.

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 $1,37 \text{ кВт/м}^2$.

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 $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

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

или $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$.

Отсюда

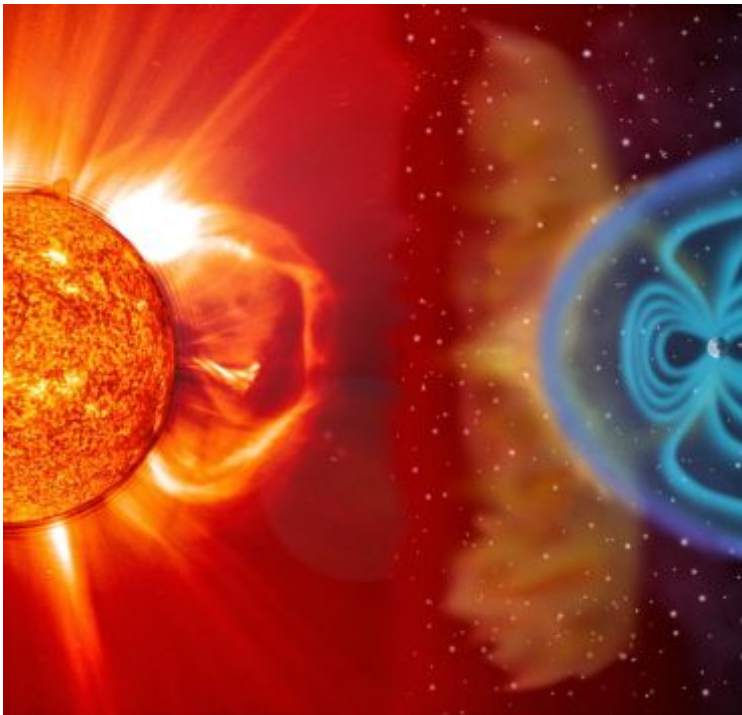
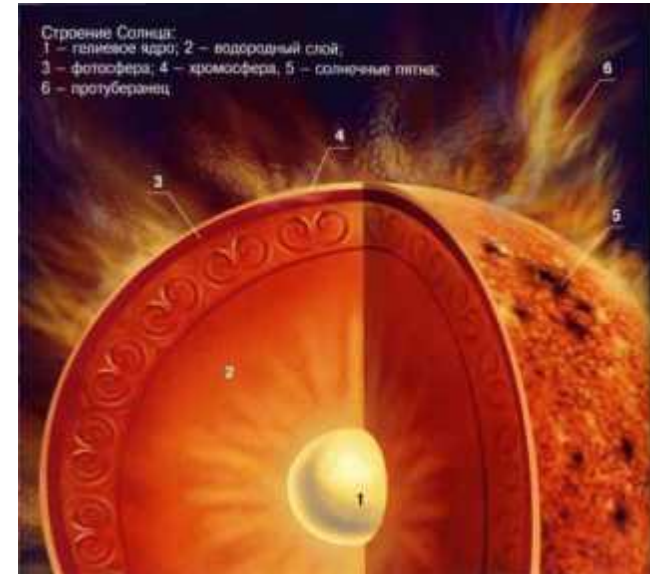
$$T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}}$$

Зная расстояние до Солнца (150 000 000 км) и угловой диаметр солнечного диска ($\approx 30'$) нетрудно вычислить его линейные размеры и площадь поверхности.

Радиус Солнца равен $\approx 700\,000$ км.

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

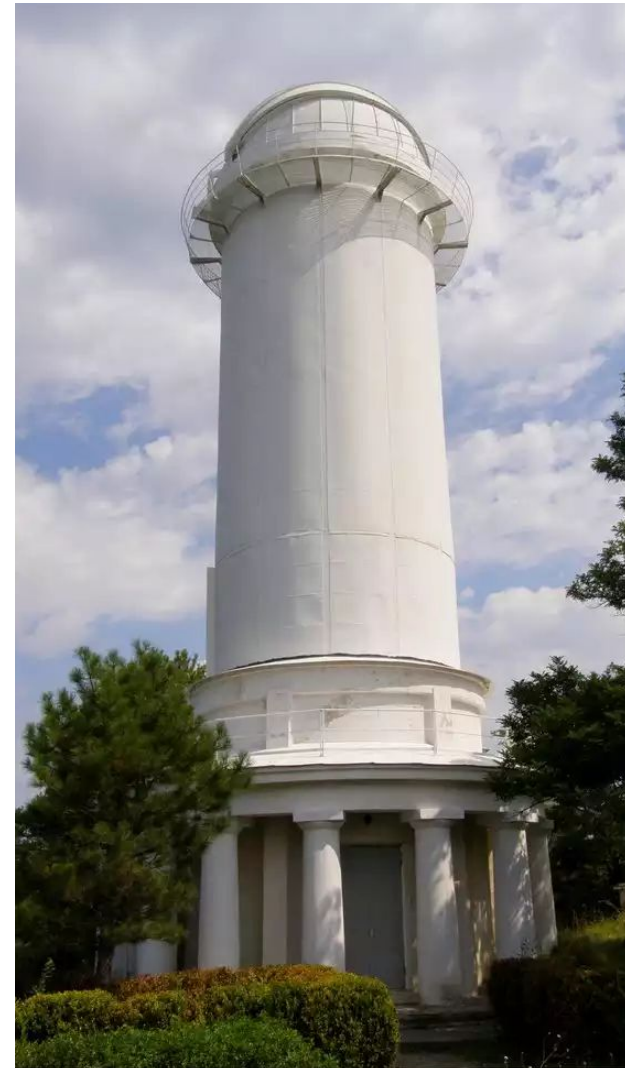
Такая температура может поддерживаться лишь за счет постоянного притока энергии из недр Солнца.



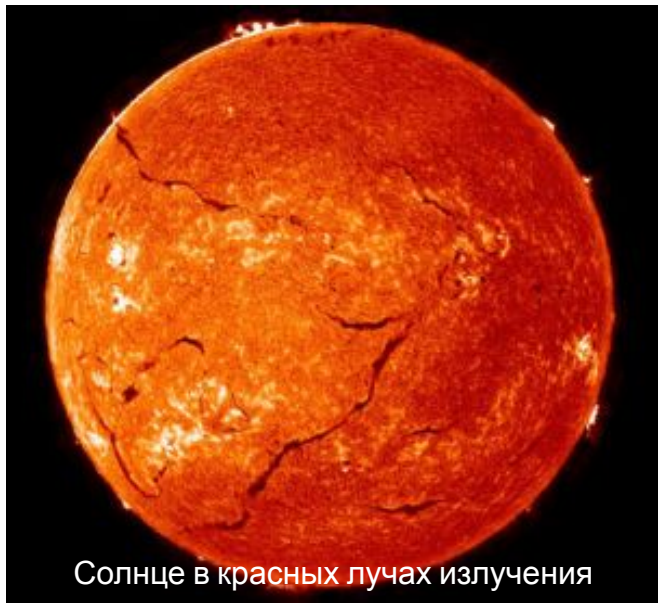
Состав и строение Солнца

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.



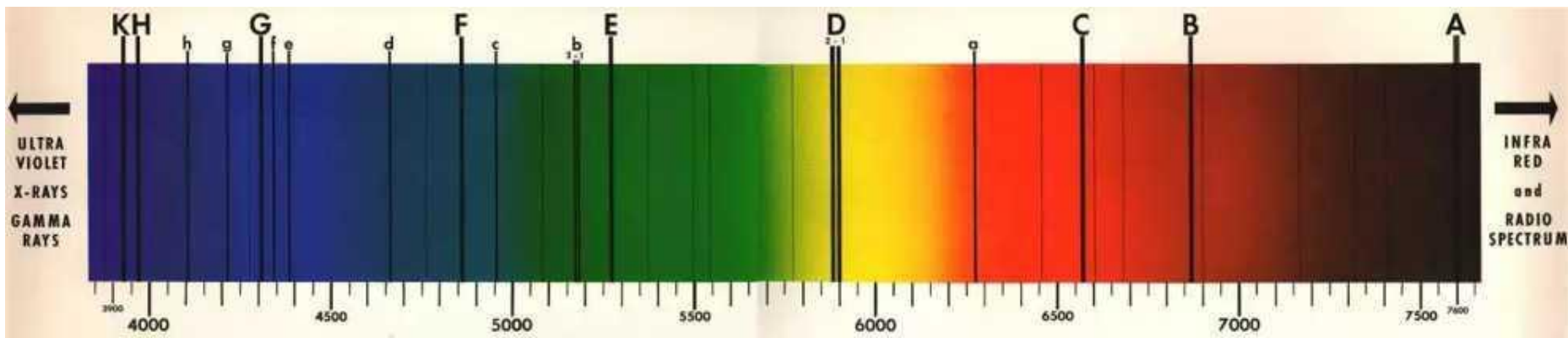
Солнце в ультрафиолетовых лучах



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.

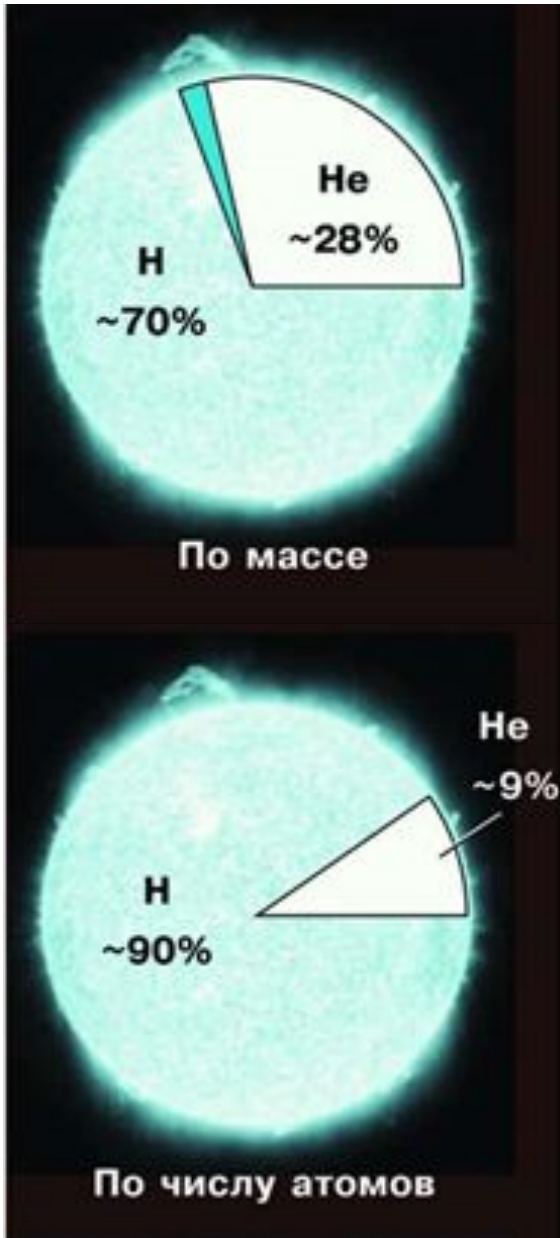


Диаграмма химического состава Солнца

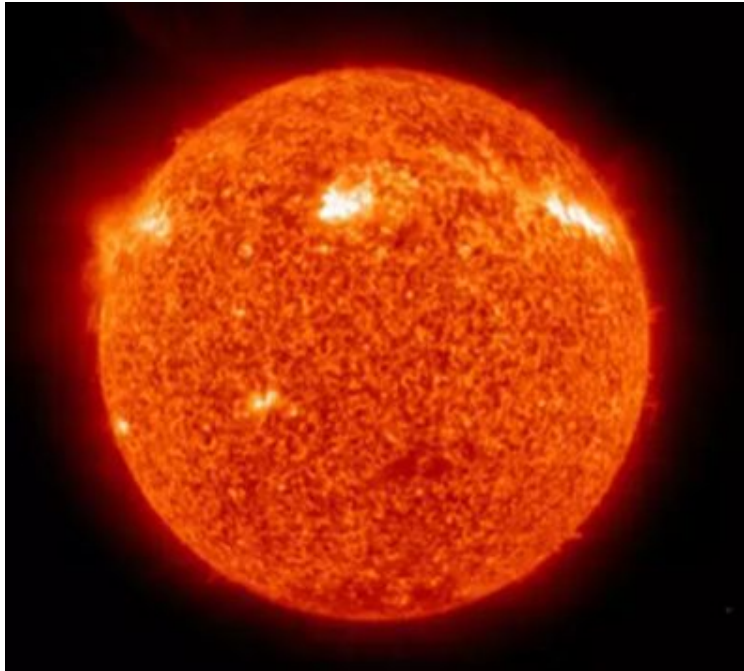
Химический состав Солнца:

- **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**.



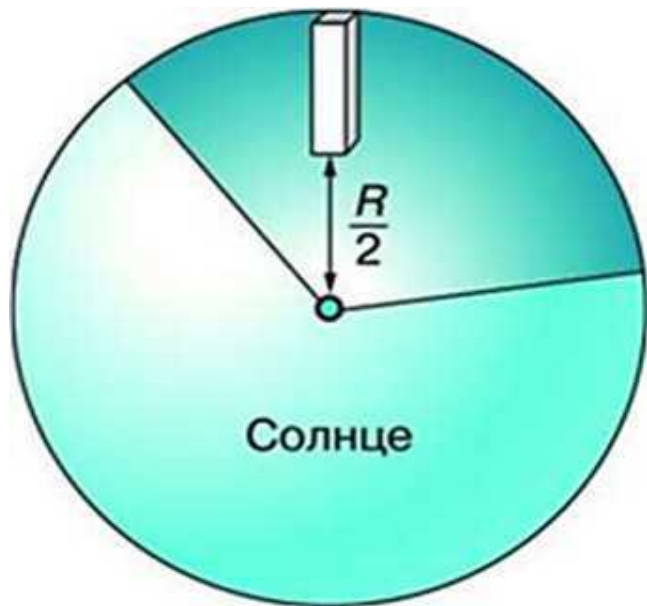
Средняя плотность солнечного вещества примерно 1400 кг/м^3 . Она соизмерима с плотностью воды и в 1000 раз больше плотности воздуха у поверхности Земли.



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, уравнивается 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.

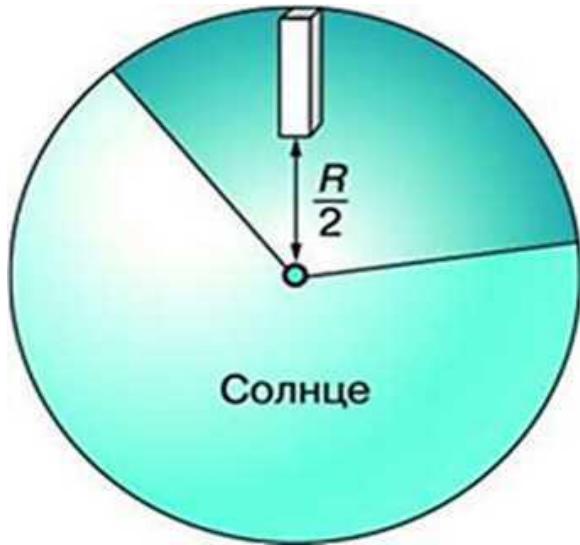
При этом будем считать, что плотность вещества внутри Солнца всюду равна средней.

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:

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

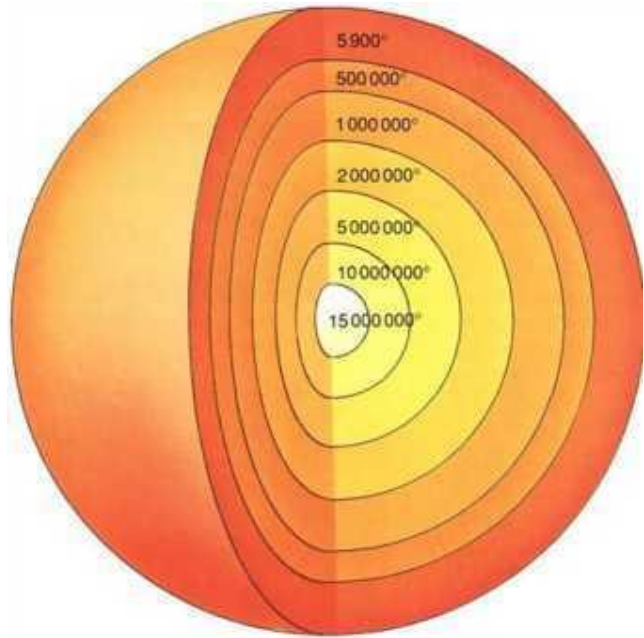
а ускорение на расстоянии $R/2$ (согласно закону всемирного тяготения) выражается так:

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

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

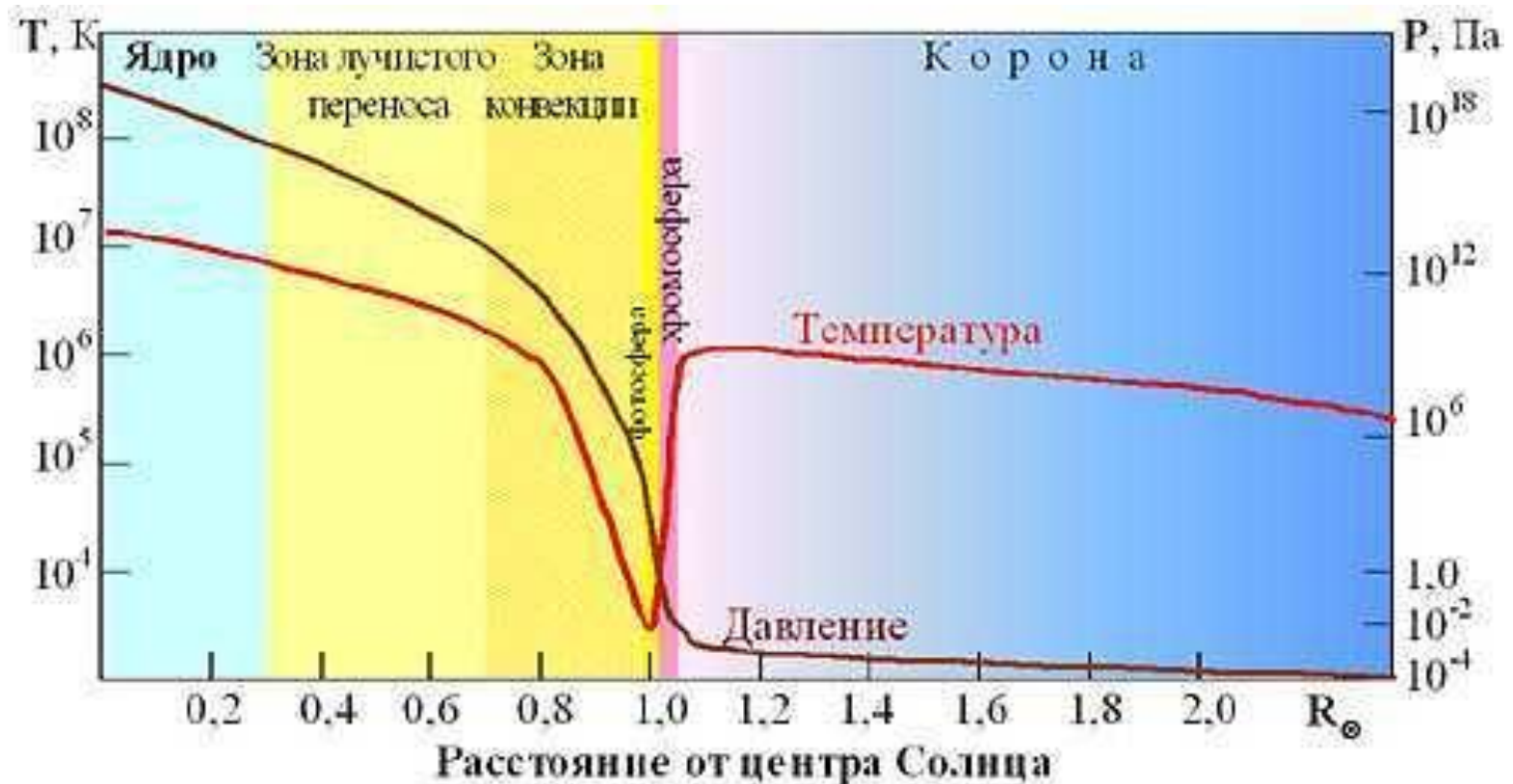
где R – универсальная газовая постоянная, а M – молярная масса водородной плазмы.

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.

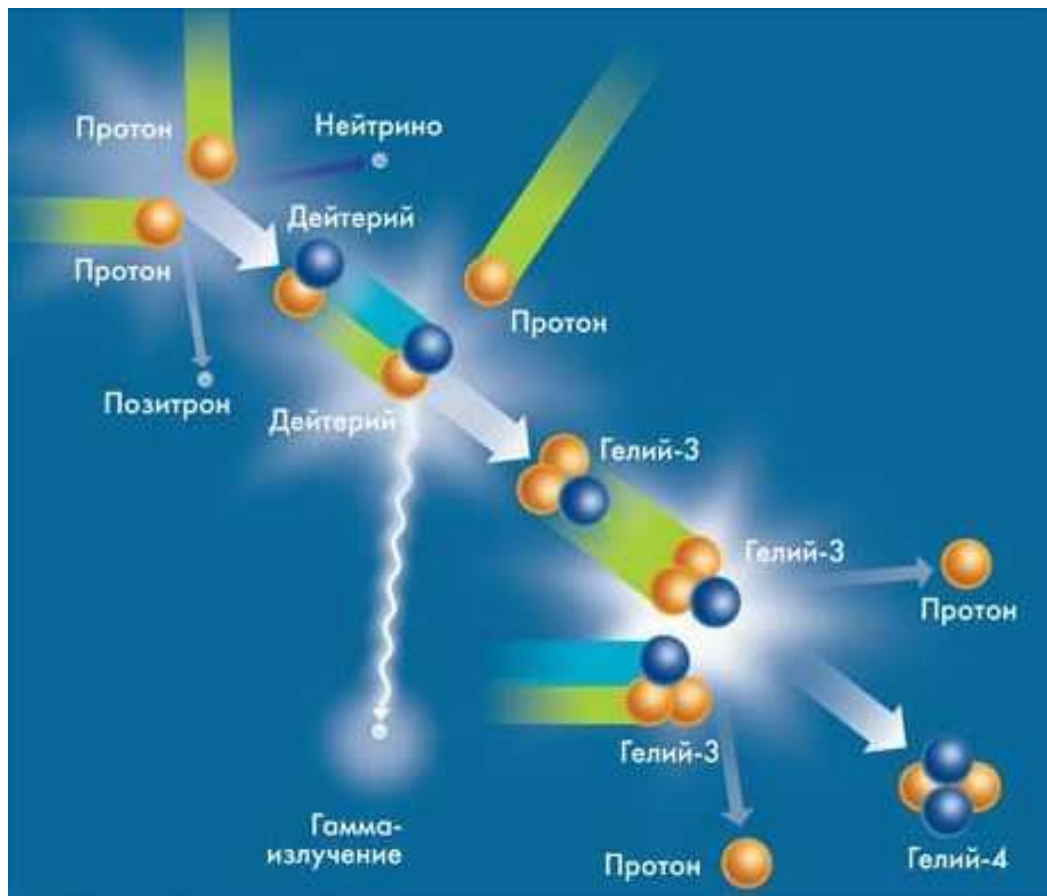
Более точные расчеты, проведенные с учетом изменения плотности с глубиной, дают результаты, лишь незначительно отличающиеся от полученных выше: $p = 6,1 \cdot 10^{13}$ Па, $T = 3,4 \cdot 10^6$ К.

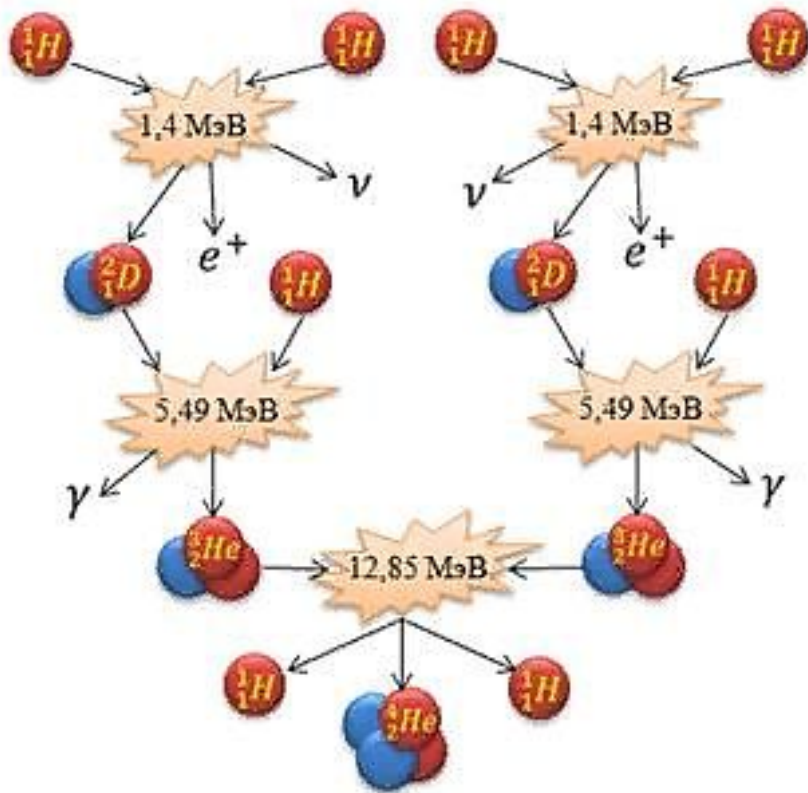
Согласно современным данным, в центре Солнца температура достигает 15 млн К, давление $2 \cdot 10^{18}$ Па, а плотность вещества значительно превышает плотность твердых тел в земных условиях: $1,5 \cdot 10^5$ кг/м³, т. е. в 13 раз больше плотности свинца.



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).



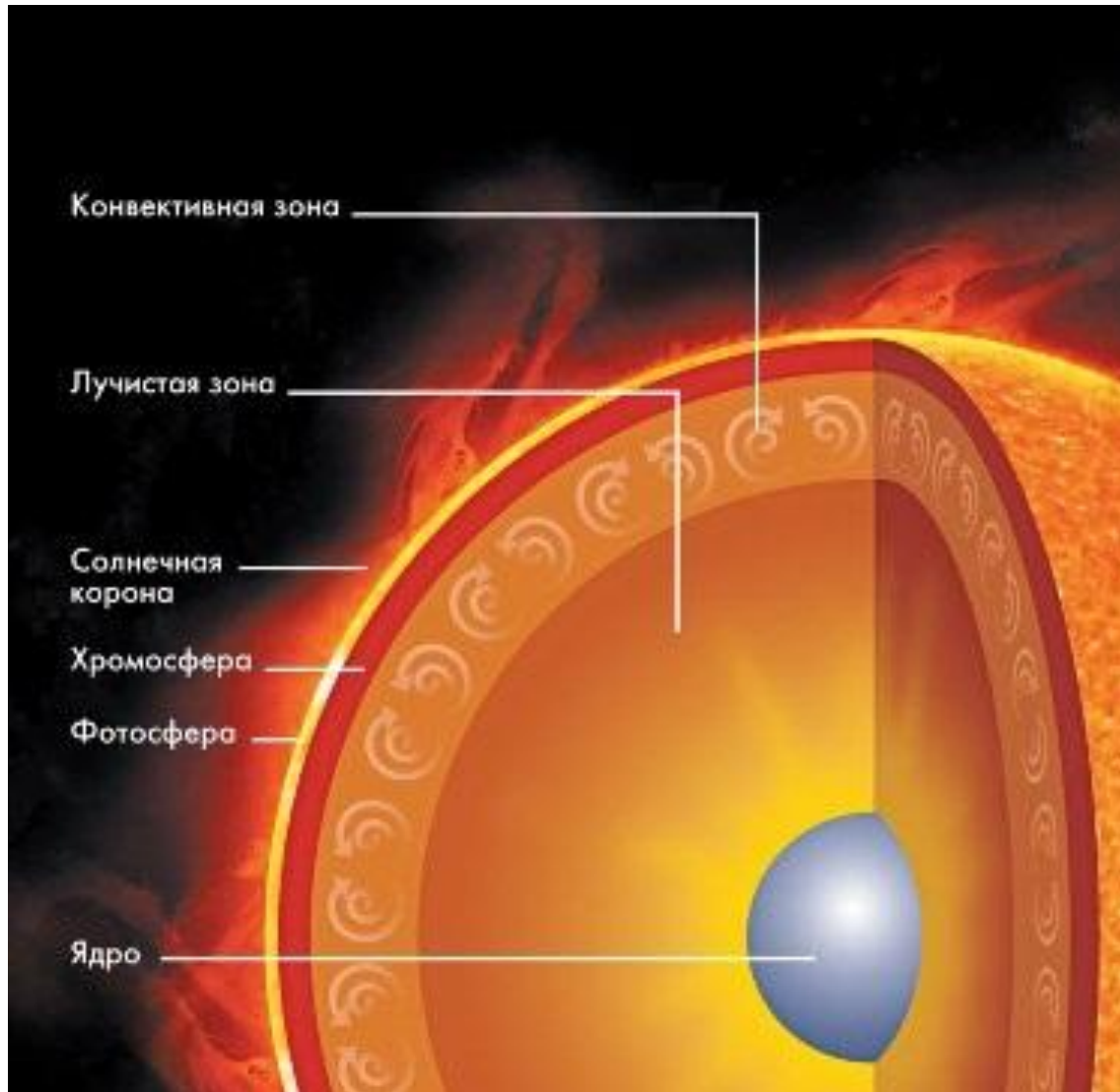


Все три типа нейтрино (электронное, мюонное и таонное) столь слабо взаимодействуют с веществом, что свободно проходят сквозь Солнце и Землю.

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.



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.

