

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 smaller, grey sphere in the upper right. The background is a dark black space filled with many small white stars.

# §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.

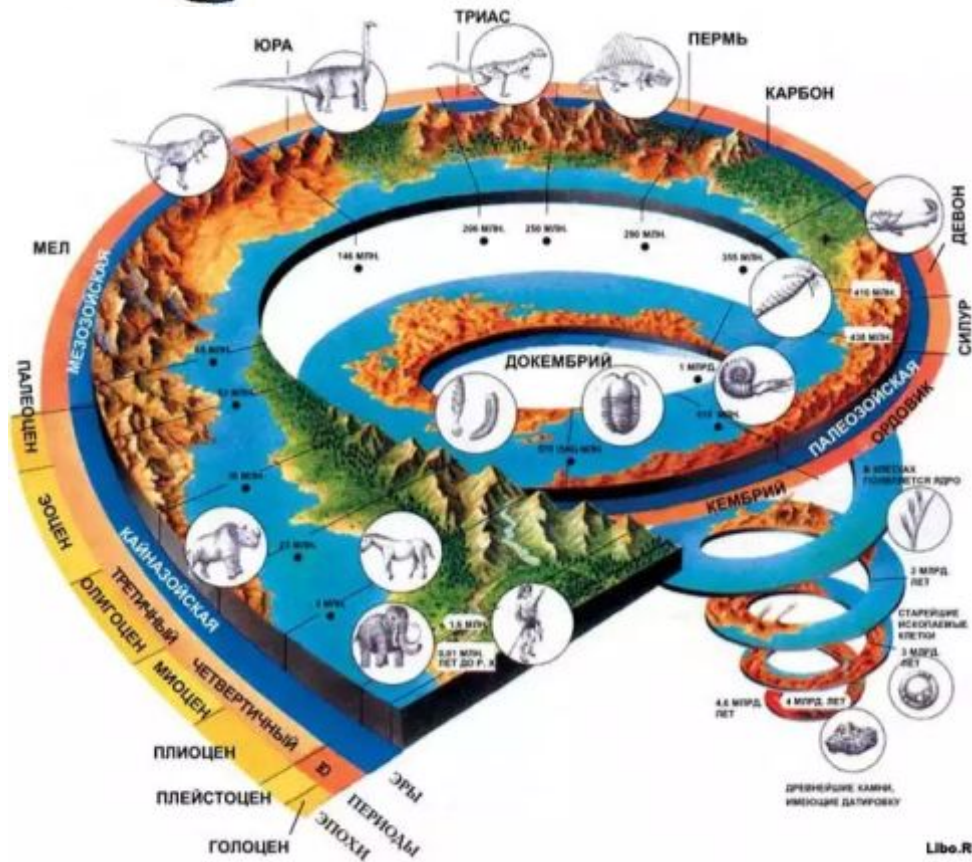
Земля получает всего лишь **одну двухмиллиардную долю** солнечного излучения. Однако и этого достаточно, чтобы приводить в движение огромные массы воздуха в земной атмосфере, управлять погодой и климатом на земном шаре.





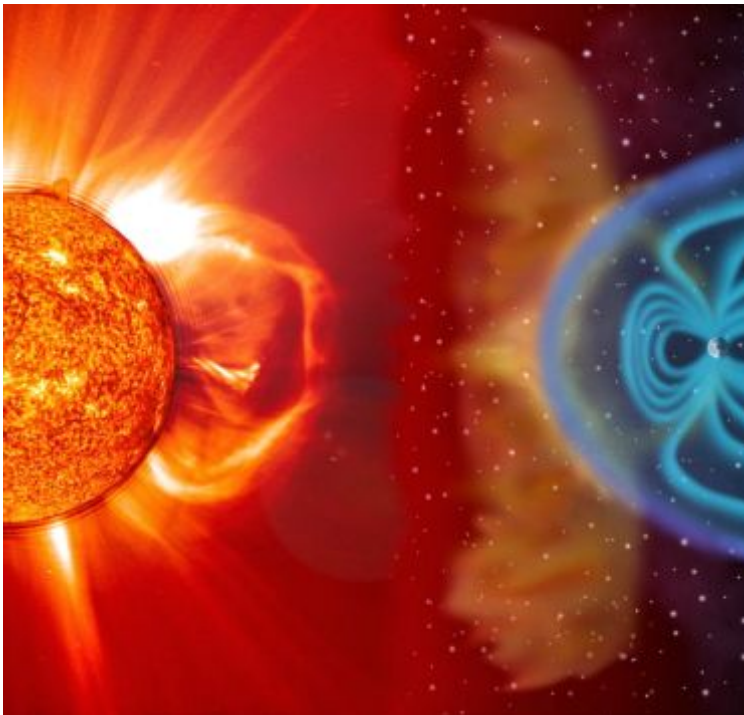
Большинство источников энергии, которые использует человечество, связаны с Солнцем.

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  $1 \text{ м}^2$ , 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

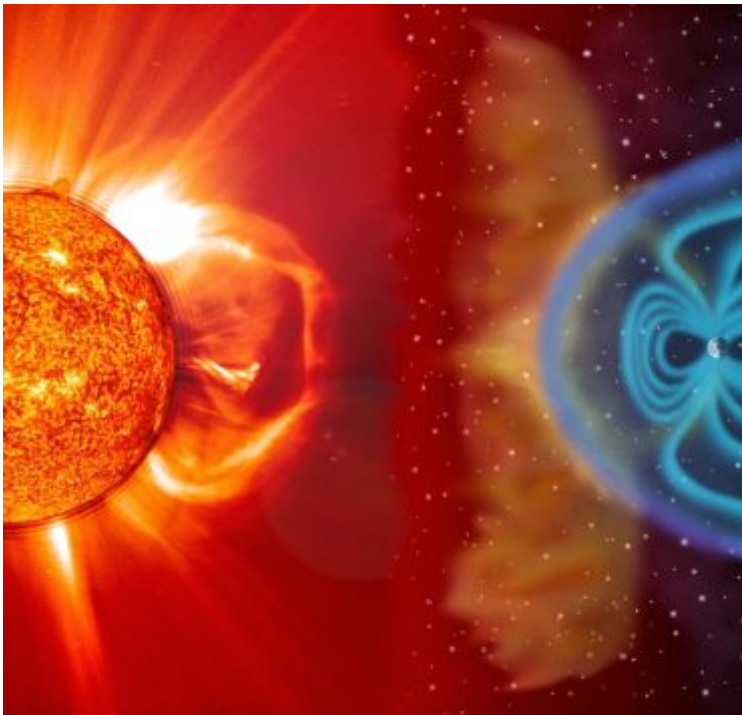
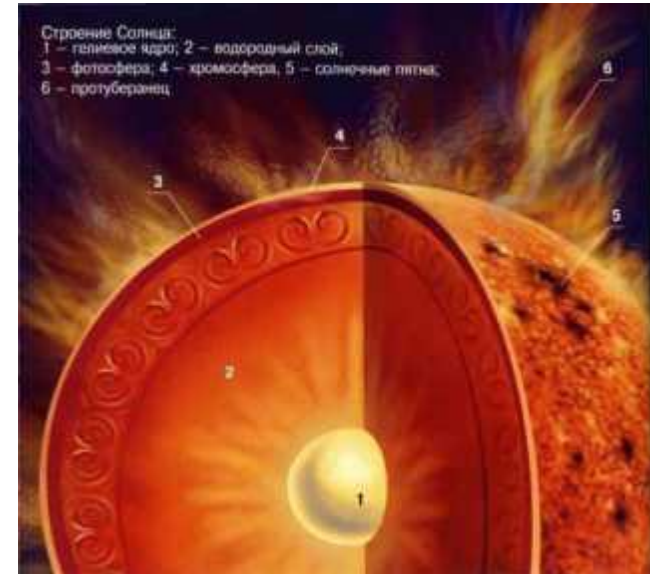
$$T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}}$$

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.

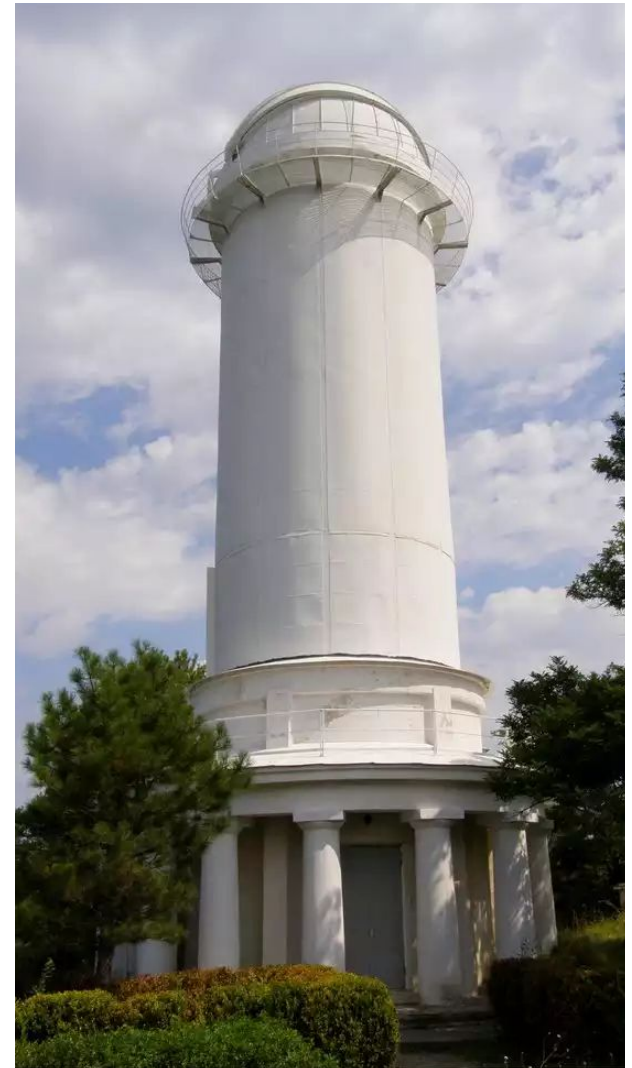




# Состав и строение Солнца

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.



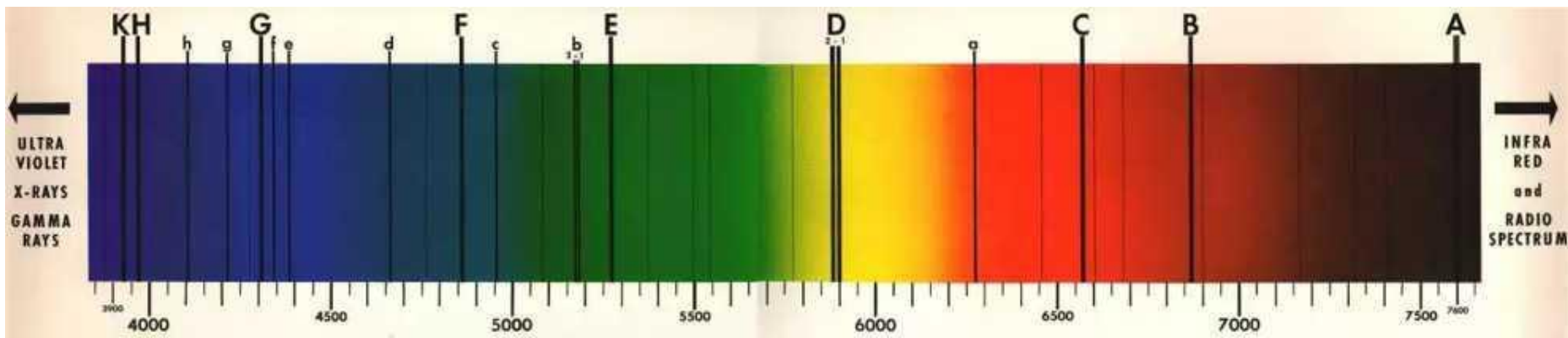
Солнце в ультрафиолетовых лучах



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.

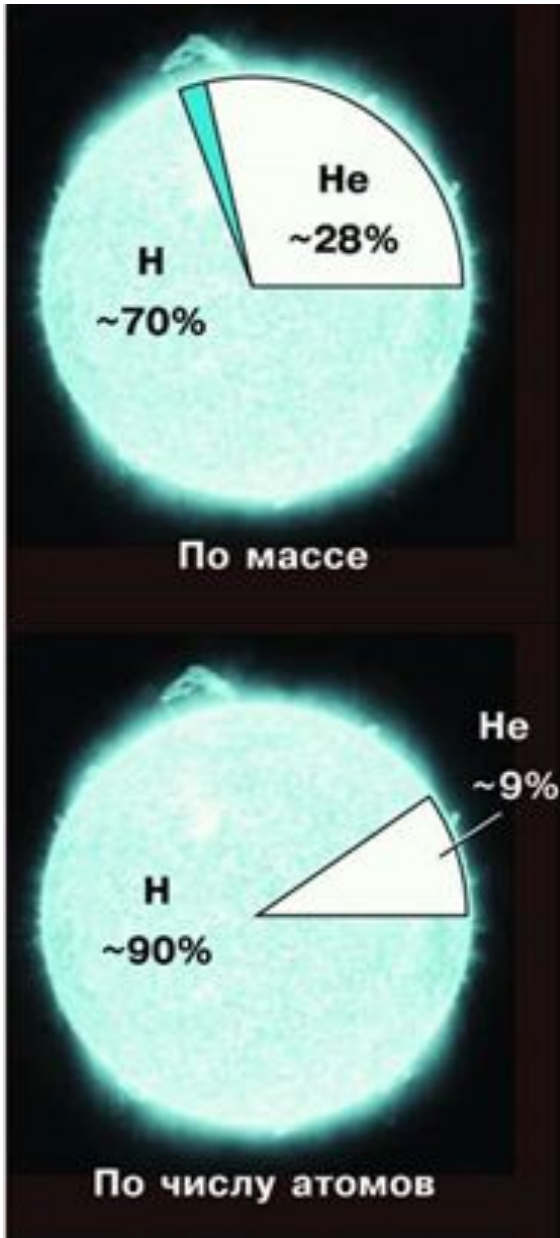


Диаграмма химического состава Солнца

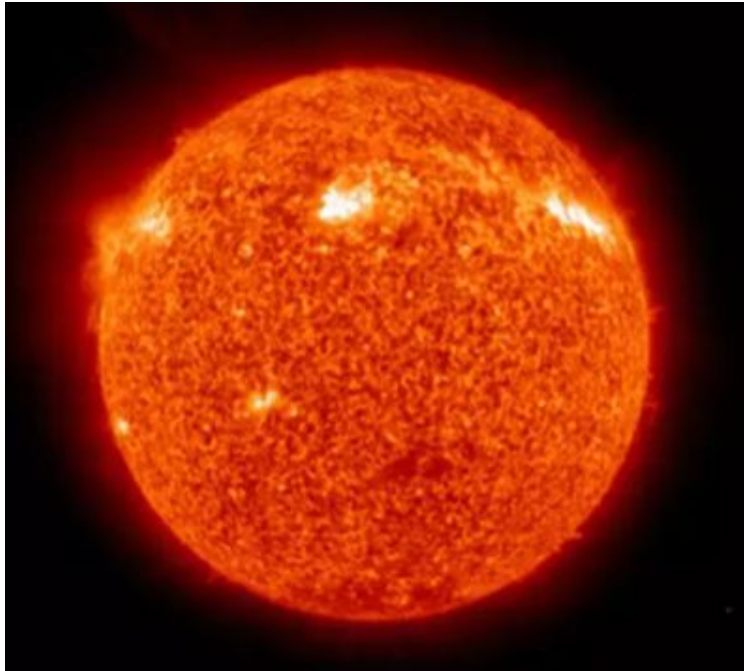
## Химический состав Солнца:

- **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**.



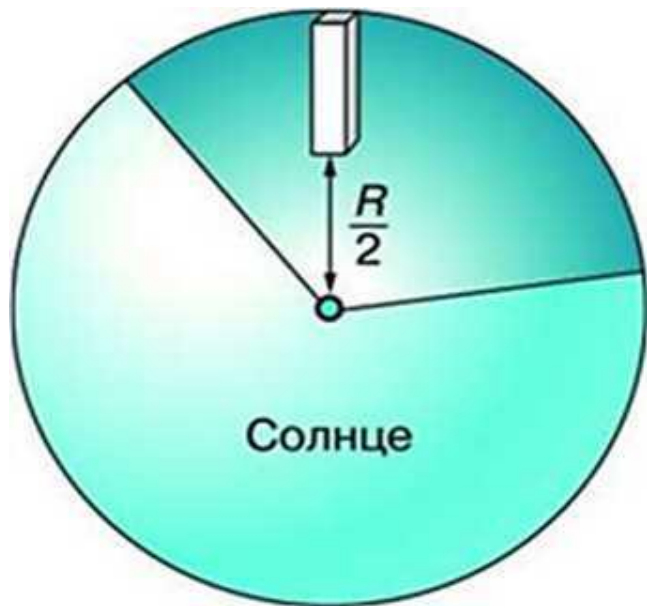
**Средняя плотность** солнечного вещества примерно  $1400 \text{ кг/м}^3$ . Она соизмерима с плотностью воды и в 1000 раз больше плотности воздуха у поверхности Земли.



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.

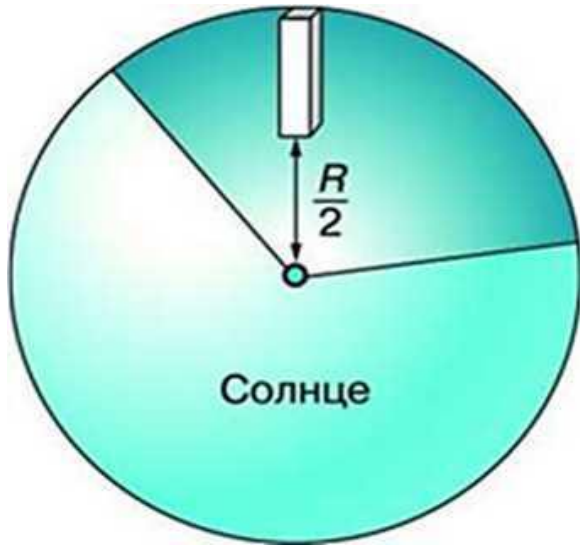
При этом будем считать, что плотность вещества внутри Солнца всюду равна средней.

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:

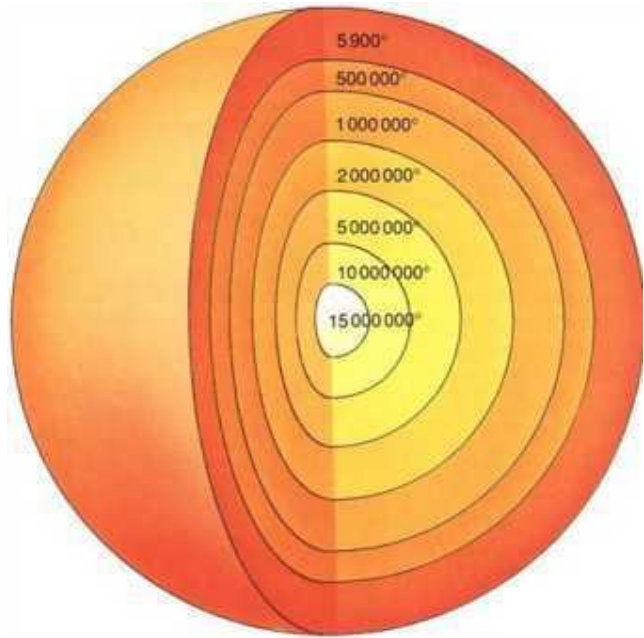
$$g = G \frac{M/8}{(R/2)^2}$$

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

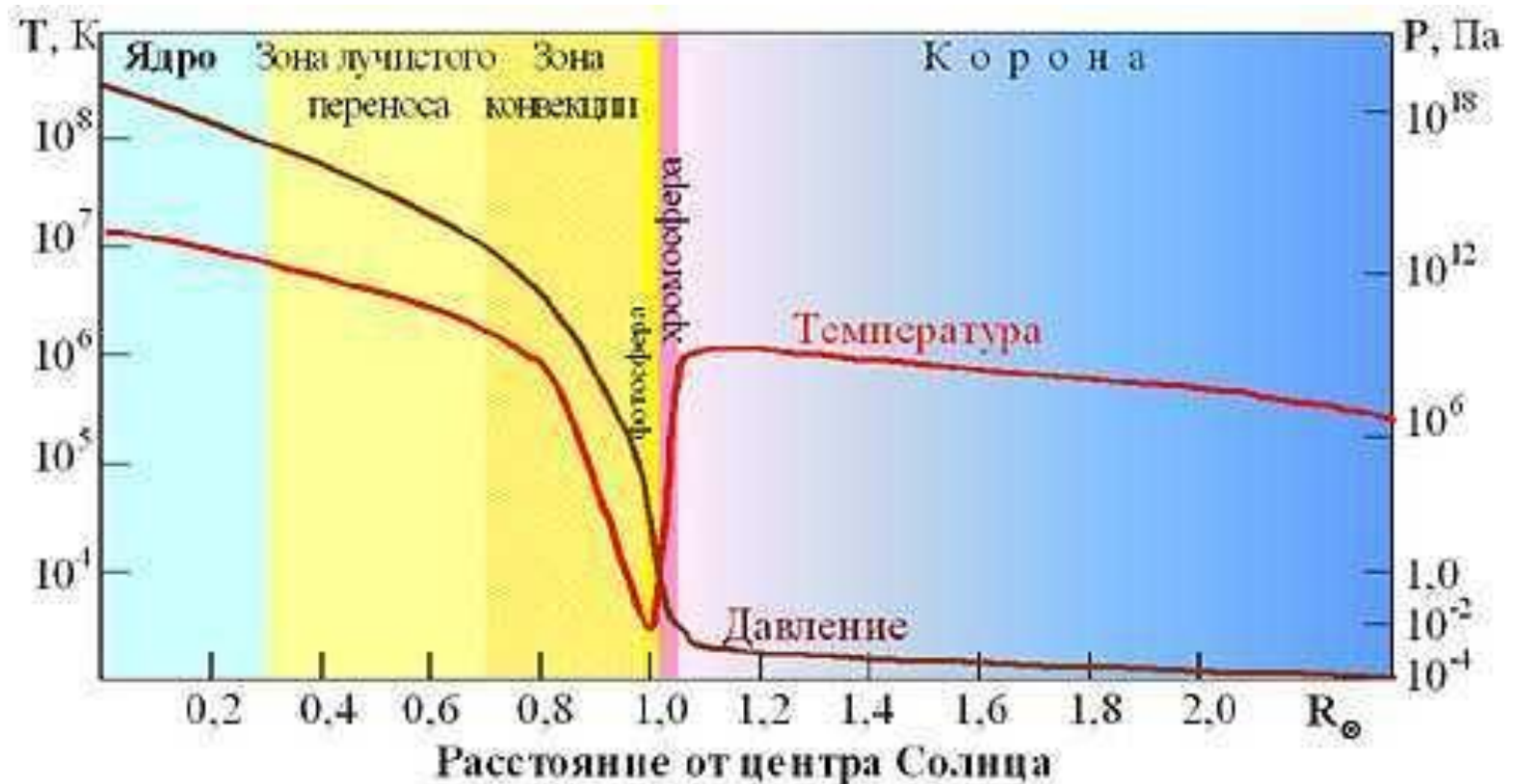
где  $R$  – универсальная газовая постоянная, а  $M$  – молярная масса водородной плазмы.

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.

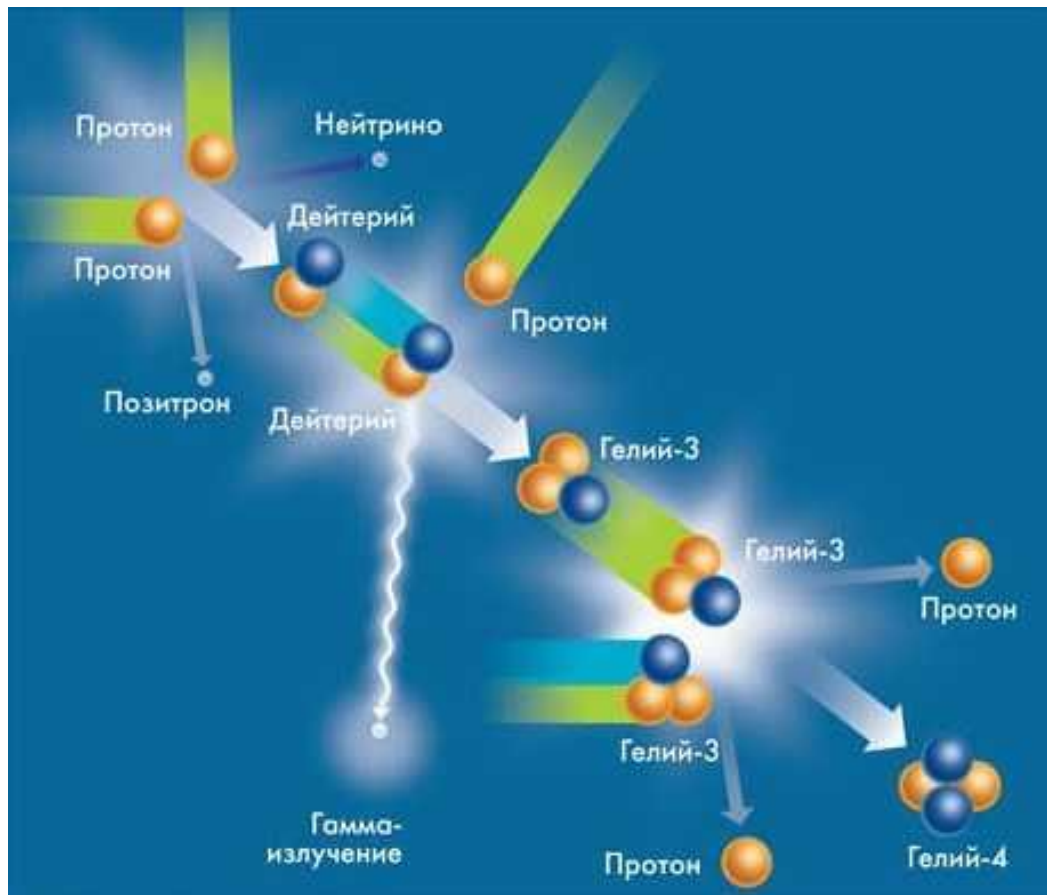
Более точные расчеты, проведенные с учетом изменения плотности с глубиной, дают результаты, лишь незначительно отличающиеся от полученных выше:  $p = 6,1 \cdot 10^{13}$  Па,  $T = 3,4 \cdot 10^6$  К.

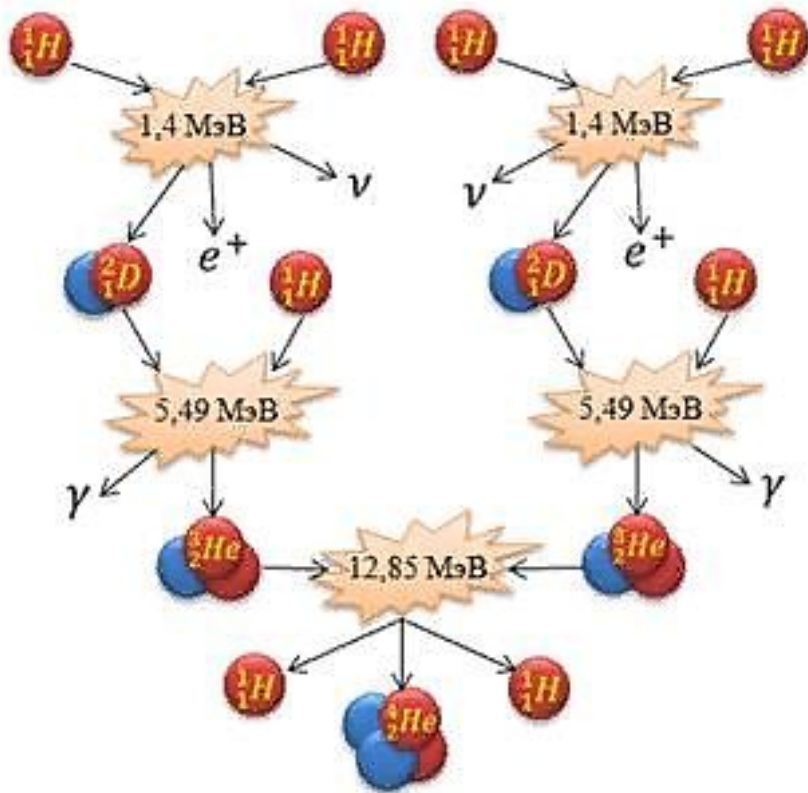
Согласно современным данным, в центре Солнца температура достигает 15 млн К, давление  $2 \cdot 10^{18}$  Па, а плотность вещества значительно превышает плотность твердых тел в земных условиях:  $1,5 \cdot 10^5$  кг/м<sup>3</sup>, т. е. в 13 раз больше плотности свинца.



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).



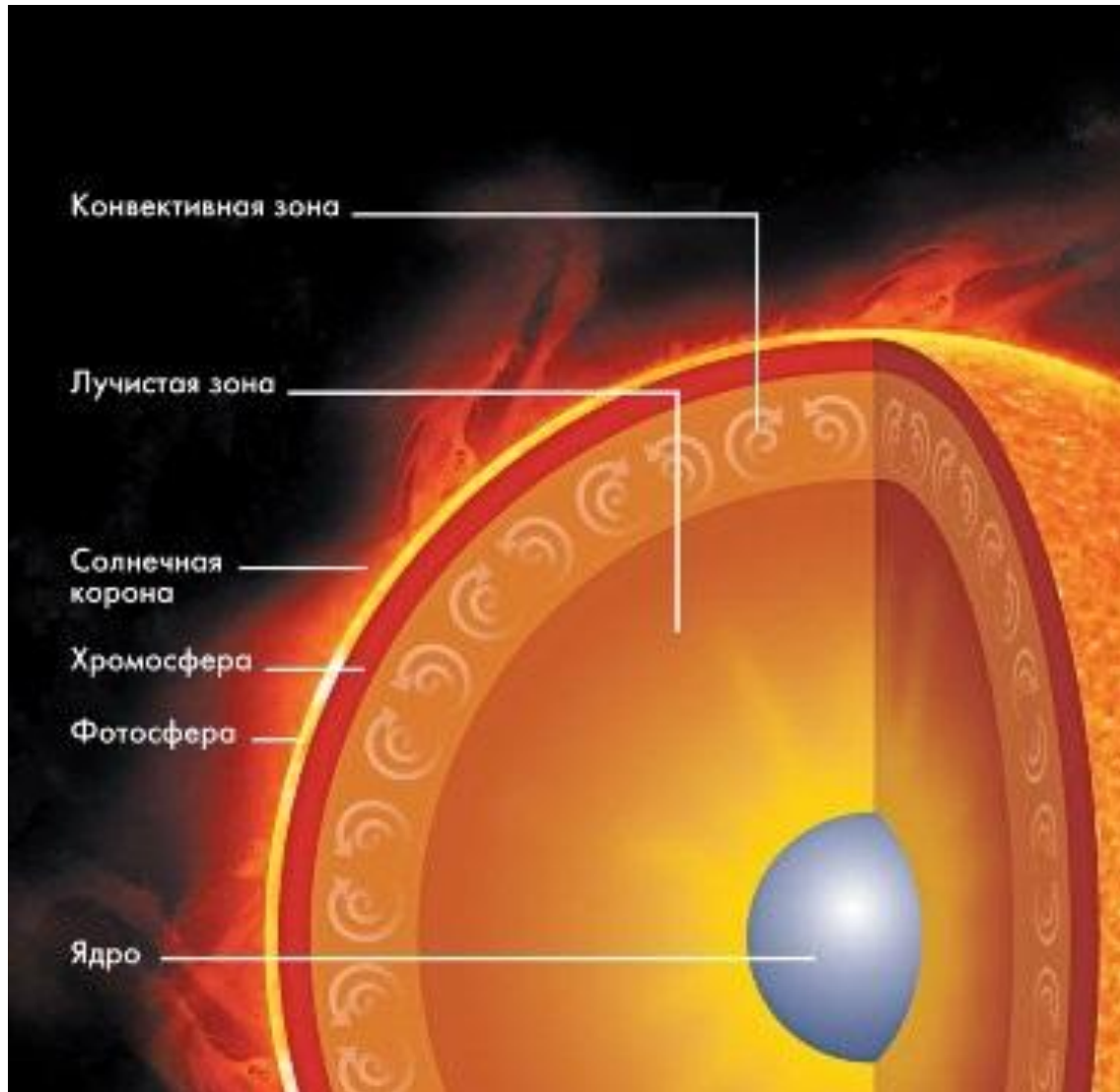


Все три типа нейтрино (электронное, мюонное и таонное) столь слабо взаимодействуют с веществом, что свободно проходят сквозь Солнце и Землю.

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.

