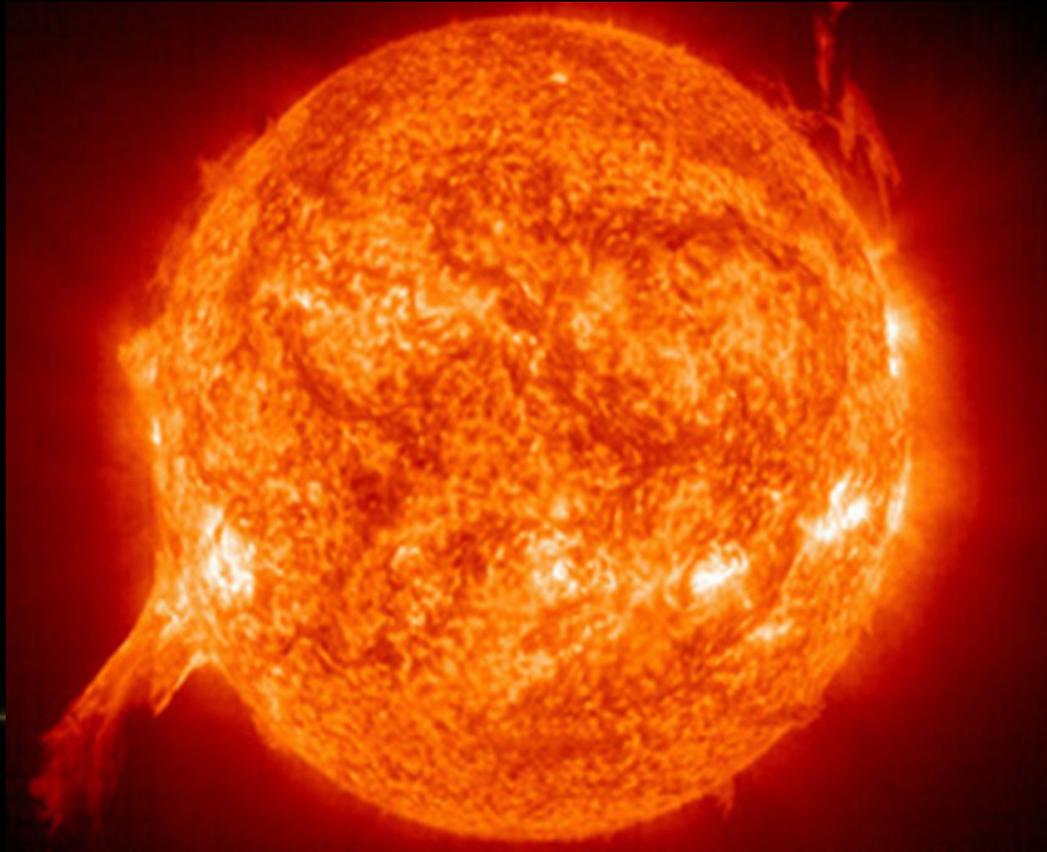


МРКО  
АСТРОНОМИЯ  
10 КЛАСС

---

Термоядерный синтез на Солнце.  
Строение Солнца. Вспышки на  
Солнце. Солнечный ветер.



Чтобы понимать процесс рождения и развития представлений о термоядерном синтезе на Солнце, необходимо знать историю человеческих представлений о понимании этого процесса. Есть много неразрешимых теоретических и технологических проблем по созданию управляемого термоядерного реактора, в котором происходит процесс управления термоядерным синтезом. Многие учёные, а тем более чиновники от науки, не знакомы с историей этого вопроса.

Все жители Земли долгое время понимали факт, что Солнце греет Землю, но для всех непонятными оставались источники солнечной энергии. В 1848 г. Роберт Майер выдвинул метеоритную гипотезу, согласно которой Солнце нагревается благодаря бомбардировке метеоритами. Однако при таком необходимом количестве метеоритов сильно нагревалась бы и Земля; кроме того, земные геологические напластования состояли бы в основном из метеоритов; наконец, масса Солнца должна была расти, и это сказалось бы на движении планет.

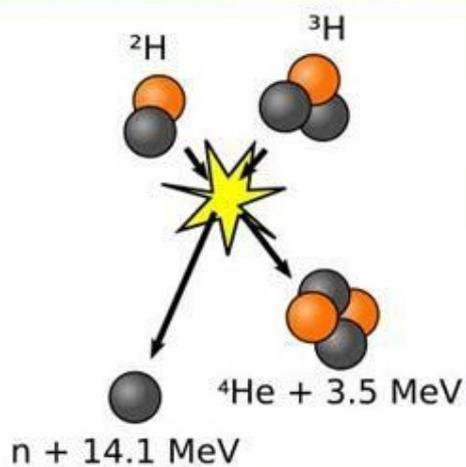
Поэтому во второй половине XIX века многими исследователями наиболее правдоподобной считалась теория, развитая Гельмгольцем (1853) и лордом Кельвином, которые предположили, что Солнце нагревается за счёт медленного гравитационного сжатия («механизм Кельвина – Гельмгольца»). Основанные на этом механизме расчёты оценивали максимальный возраст Солнца в 20 млн лет, а время, через которое Солнце потухнет – не более чем в 15 млн. Однако эта гипотеза противоречила геологическим данным о возрасте горных пород, которые указывали на намного бо́льшие цифры. Так, например, Чарльз Дарвин отметил, что эрозия вендских отложений продолжалась не менее 300 млн лет. Тем не менее, энциклопедия Брокгауза и Ефрона считает гравитационную модель единственно допустимой.

Только в XX веке было найдено «правильное» решение этой проблемы. Первоначально Резерфорд выдвинул гипотезу, что источником внутренней энергии Солнца является радиоактивный распад. В 1920 г. Артур Эддингтон предположил, что давление и температура в недрах Солнца настолько высоки, что там могут идти термоядерные реакции, при которой ядра водорода (протоны) сливаются в ядро гелия-4. Так как масса последнего меньше, чем сумма масс четырёх свободных протонов, то часть массы в этой реакции, согласно формуле Эйнштейна  $E = mc^2$ , переходит в энергию. То, что водород преобладает в составе Солнца, подтвердила в 1925 г. Сесиллия Пейн.

Теория термоядерного синтеза была развита в 1930-х годах астрофизиками Чандрасекаром и Хансом Бете. Бете детально рассчитал две главные термоядерные реакции, которые являются источниками энергии Солнца. Наконец, в 1957 г. появилась работа Маргарет Бёрбридж «Синтез элементов в звёздах», в которой было показано, высказано предположение, что большинство элементов во Вселенной возникло в результате нуклеосинтеза, идущего в звёздах.

# ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

- ✘ В конце 30 – х годов 20 – го века американский физик Ханс Бете догадался , что источником энергии Солнца и других звезд являются реакции термоядерного синтеза, протекающие в недрах Солнца. Там при температуре, исчисляемой миллионами градусов, идет термоядерный синтез ядер гелия из ядер водорода : в результате трех последовательных реакций четыре ядра водорода превращаются в одно ядро гелия.



Основные характеристики Солнца:

Эффективная температура

поверхности  $5515\text{ }^{\circ}\text{C}$

Температура короны  $\approx 1\ 500\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$

Температура ядра  $\approx 13\ 500\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$

# Состав фотосферы:

Водород 73,46%

Гелий 24,85%

Кислород 0,77%

Углерод 0,29%

Железо 0,16%

Сера 0,12%

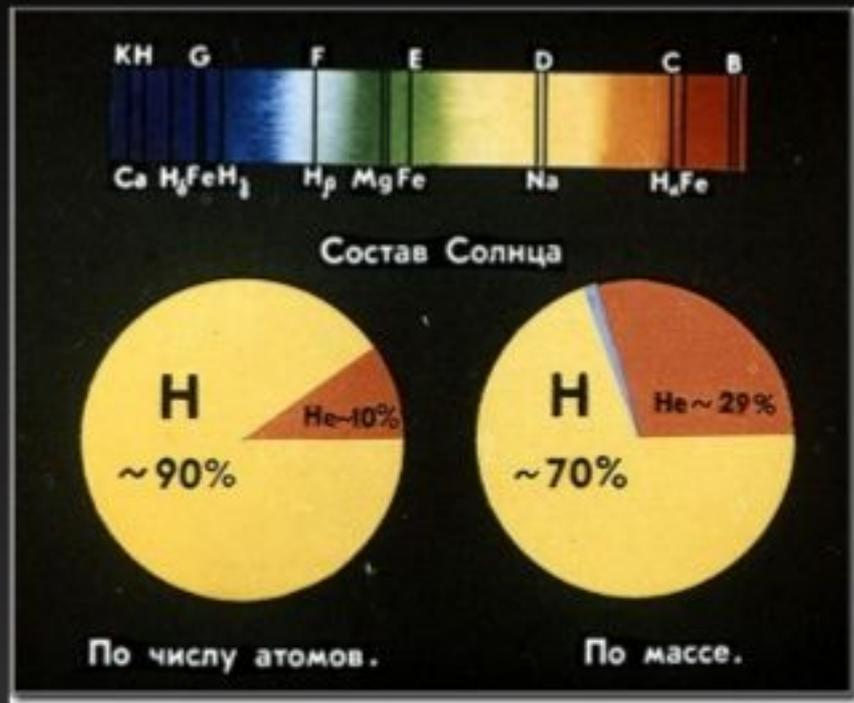
Неон 0,12%

Азот 0,09%

Кремний 0,07%

Магний 0,05%

# ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СОЛНЦА



92 % водорода

7 % гелия

1% - остальные газы

Солнце – центральная и единственная звезда нашей Солнечной системы, вокруг которой обращаются другие объекты этой системы: планеты и их спутники, карликовые планеты и их спутники, астероиды, метеороиды, кометы и космическая пыль. Масса Солнца (теоретически) составляет 99,8% от суммарной массы всей Солнечной системы. Солнечное излучение поддерживает жизнь на Земле (фотоны необходимы для начальных стадий процесса фотосинтеза), определяет климат.

По спектральной классификации Солнце относится к типу G2V («жёлтый карлик»). Температура поверхности Солнца достигает 6000 К, поэтому Солнце светит почти белым светом, но из-за более сильного рассеяния и поглощения коротковолновой части спектра атмосферой Земли прямой свет Солнца у поверхности нашей планеты приобретает некоторый жёлтый оттенок.



Солнечный спектр содержит линии ионизированных и нейтральных металлов, а также ионизированного водорода. В нашей галактике Млечный Путь насчитывается примерно 100 млн звёзд класса G2. При этом 85% звёзд нашей галактики – это звёзды, менее яркие, чем Солнце (в большинстве своём это красные карлики, находящиеся в конце своего цикла эволюции). Как и все звёзды главной последовательности, Солнце вырабатывает энергию путём термоядерного синтеза.

Излучение Солнца – основной источник энергии на Земле. Его мощность характеризуется солнечной постоянной – количеством энергии, проходящей через площадку единичной площади, перпендикулярную солнечным лучам. На расстоянии в одну астрономическую единицу (то есть на орбите Земли) эта постоянная равна приблизительно  $1370 \text{ Вт/м}^2$ .

Проходя сквозь атмосферу Земли, солнечное излучение теряет в энергии примерно  $370 \text{ Вт/м}^2$ , и до земной поверхности доходит только  $1000 \text{ Вт/м}^2$  (при ясной погоде и когда Солнце находится в зените). Эта энергия может использоваться в различных естественных и искусственных процессах. Так, растения с помощью фотосинтеза перерабатывают её в химическую форму (кислород и органические соединения). Прямое нагревание солнечными лучами или преобразование энергии с помощью фотоэлементов может быть использовано для производства электроэнергии (солнечными электростанциями) или выполнения другой полезной работы. Путём фотосинтеза была в далёком прошлом получена и энергия, запасённая в нефти и других видах ископаемого топлива.

Солнце – магнитно активная звезда. Она обладает сильным магнитным полем, напряжённость которого меняется со временем, и которое меняет направление приблизительно каждые 11 лет, во время солнечного максимума. Вариации магнитного поля Солнца вызывают разнообразные эффекты, совокупность которых называется солнечной активностью и включает в себя такие явления как солнечные пятна, солнечные вспышки, вариации солнечного ветра и т.д., а на Земле вызывает полярные сияния в высоких и средних широтах и геомагнитные бури, которые негативно сказываются на работе средств связи, средств передачи электроэнергии, а также негативно воздействует на живые организмы, вызывая у людей головную боль и плохое самочувствие (у людей, чувствительных к магнитным бурям). Солнце является молодой звездой третьего поколения (популяции I) с высоким содержанием металлов, то есть оно образовалось из останков звёзд первого и второго поколений, (соответственно популяций III и II).

Текущий возраст Солнца  
(точнее – время его  
существования на главной  
последовательности),  
оценённый с помощью  
компьютерных моделей  
звёздной эволюции, равен  
приблизительно 4,57 млрд лет.



Хромосфера

Спикулы

Зона  
излучения

Зона  
конвекции

Ядро

Корона

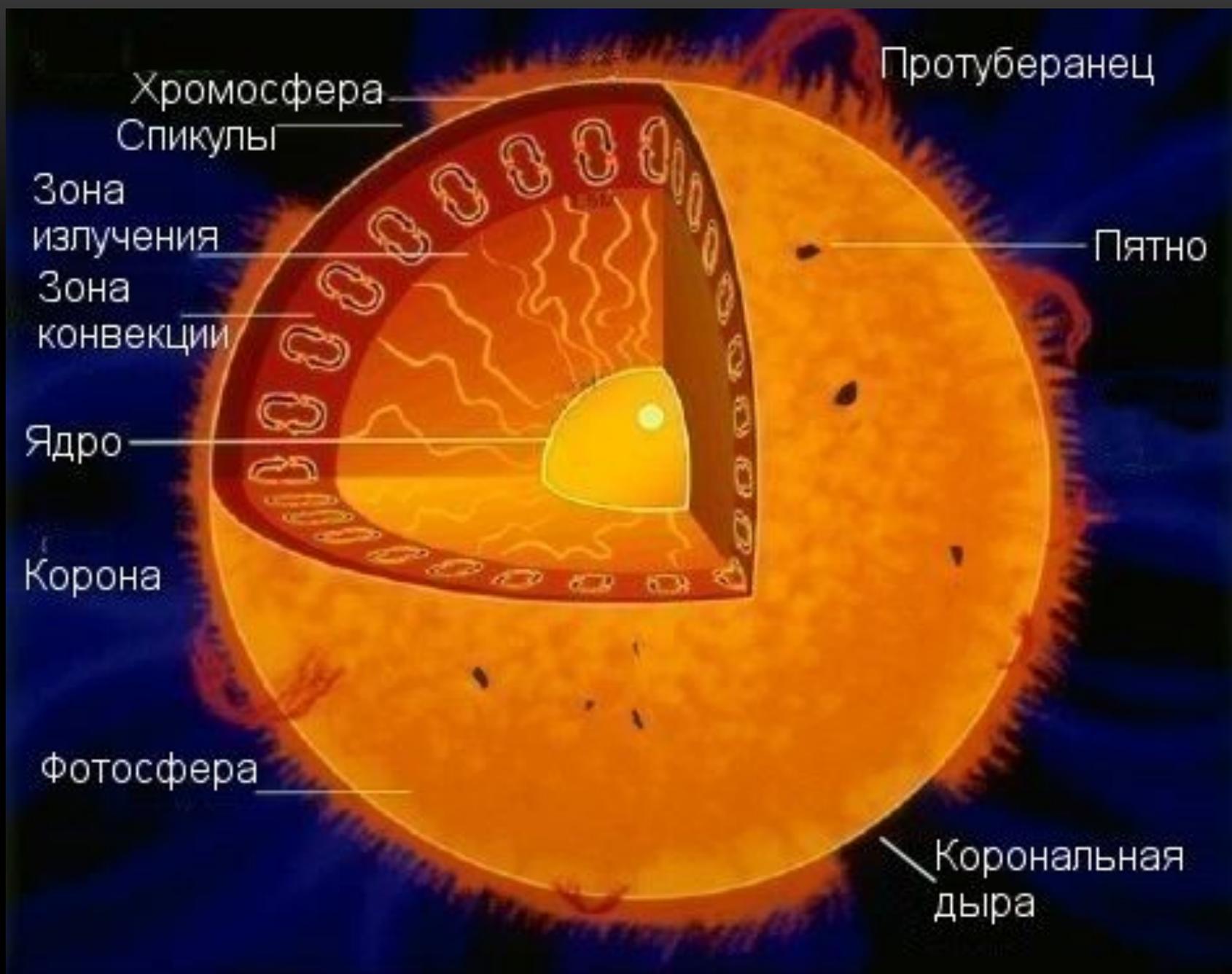
Фотосфера

Протуберанец

Пятно

Корональная  
дыра

В центре Солнца находится солнечное ядро. Фотосфера – это видимая поверхность Солнца, которая и является основным источником излучения. Солнце окружает солнечная корона, которая имеет очень высокую температуру, однако она крайне разрежена, поэтому видима невооружённым глазом только в периоды полного солнечного затмения.



Центральная часть Солнца с радиусом примерно 150 000 километров, в которой идут термоядерные реакции, называется солнечным ядром. Плотность вещества в ядре составляет примерно 150 000 кг/м<sup>3</sup> (в 150 раз выше плотности воды и в  $\approx 6,6$  раз выше плотности самого тяжёлого металла на Земле – осмия), а температура в центре ядра – более 14 млн градусов. Теоретический анализ данных, проведённый миссией SOHO, показал, что в ядре скорость вращения Солнца вокруг своей оси значительно выше, чем на поверхности. В ядре осуществляется протон-протонная термоядерная реакция, в результате которой из четырёх протонов образуется гелий-4. При этом каждую секунду в энергию превращаются 4,26 млн тонн вещества, однако эта величина ничтожна по сравнению с массой Солнца –  $2 \cdot 10^{27}$  тонн.

Над ядром, на расстояниях около 0,2...0,7 радиуса Солнца от его центра, находится зона лучистого переноса, в которой отсутствуют макроскопические движения, энергия переносится с помощью «переизлучения» фотонов.



Конвективная зона Солнца. Ближе к поверхности Солнца возникает вихревое перемешивание плазмы, и перенос энергии к поверхности совершается преимущественно движениями самого вещества. Такой способ передачи энергии называется конвекцией, а подповерхностный слой Солнца, толщиной примерно 200 000 км, где она происходит — конвективной зоной. По современным данным, её роль в физике солнечных процессов исключительно велика, так как именно в ней зарождаются разнообразные движения солнечного вещества и магнитные поля.

Атмосфера Солнца Фотосфера (слой, излучающий свет) достигает толщины  $\approx 320$  км и образует видимую поверхность Солнца. Из фотосферы исходит основная часть оптического (видимого) излучения Солнца, излучение же из более глубоких слоёв до неё уже не доходит. Температура в фотосфере достигает в среднем 5800 К. Здесь средняя плотность газа составляет менее 1/1000 плотности земного воздуха, а температура по мере приближения к внешнему краю фотосферы уменьшается до 4800 К. Водород при таких условиях сохраняется почти полностью в нейтральном состоянии. Фотосфера образует видимую поверхность Солнца, от которой определяются размеры Солнца, расстояние от поверхности Солнца и т.д.

Хромосфера – внешняя оболочка Солнца толщиной около 10 000 км, окружающая фотосферу.

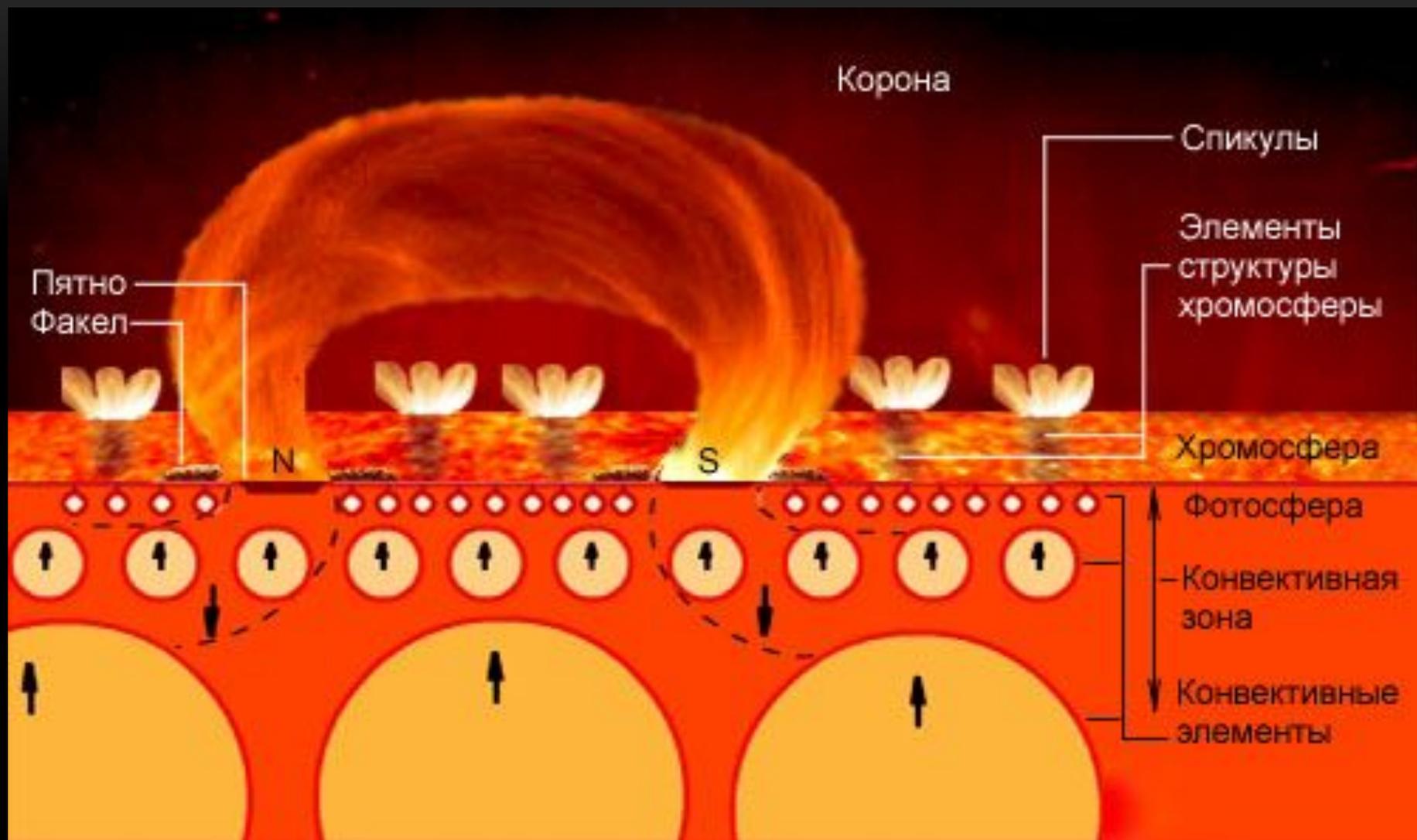
Происхождение названия этой части солнечной атмосферы связано с её красноватым цветом, вызванным тем, что в её видимом спектре доминирует красная H-альфа линия излучения водорода. Верхняя граница хромосферы не имеет выраженной гладкой поверхности, из неё постоянно происходят горячие выбросы, называемые спикулами (из-за этого в конце XIX века итальянский астроном Секки, наблюдая хромосферу в телескоп, сравнил её с горящими прериями).

Температура хромосферы увеличивается с высотой от 4000 до 15 000 градусов.

Плотность хромосферы невелика, поэтому яркость её недостаточна, чтобы наблюдать её в обычных условиях. Но при полном солнечном затмении, когда Луна закрывает яркую фотосферу, расположенная над ней хромосфера становится видимой и светится красным цветом. Её можно также наблюдать в любое время с помощью специальных узкополосных оптических фильтров.

---

Корона – последняя внешняя оболочка Солнца. Несмотря на её очень высокую температуру, от 600 000 до 2 000 000 градусов, она видна невооружённым глазом только во время полного солнечного затмения, так как плотность вещества в короне мала, а потому невелика и её яркость. Необычайно интенсивный нагрев этого слоя вызван, по-видимому, магнитным эффектом и воздействием ударных волн. Форма короны меняется в зависимости от фазы цикла солнечной активности: в периоды максимальной активности она имеет округлую форму, а в минимуме – вытянута вдоль солнечного экватора. Поскольку температура короны очень велика, она интенсивно излучает в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Эти излучения не проходят сквозь земную атмосферу, но в последнее время появилась возможность изучать их с помощью космических аппаратов. Излучение в разных областях короны происходит неравномерно.



Существуют горячие активные и спокойные области, а также корональные дыры с относительно невысокой температурой в 600 000 градусов, из которых в пространство выходят магнитные силовые линии. Такая («открытая») магнитная конфигурация позволяет частицам беспрепятственно покидать Солнце, поэтому солнечный ветер испускается «в основном» из корональных дыр.

Из внешней части солнечной короны истекает солнечный ветер – поток ионизированных частиц (в основном протонов, электронов и  $\alpha$ -частиц), имеющий скорость 300...1200 км/с и распространяющийся, с постепенным уменьшением своей плотности, до границ гелиосферы.

Так как солнечная плазма имеет достаточно высокую электропроводность, в ней могут возникать электрические токи и, как следствие, магнитные поля.

# Что происходит на поверхности Солнца?

- **Вспышки** – извержения, во время которых всего за несколько минут локально выделяется энергия, соответствующая взрыву сразу нескольких бомб, мощностью 2 млрд т тротилового эквивалента каждая
- **Протуберанцы** – крупные плазменные образования, имеющие размеры порядка

