

Физика Солнца



Осенний семестр 2017-2018

Хромосфера
14000

Фотосфера
300 км

Зона
конвекции

Зона
переноса
лучистой
энергии

Протуберанец

Зона ядерных
реакций



This is the house that Jack built.

This is the malt that lay in the house that Jack built.

This is the rat that ate the malt that lay in the house that Jack built.

This is the cat that killed the rat that ate the malt that lay in the house that Jack built.

This is the dog that worried the cat that killed the rat that ate the malt that lay in the house that Jack built.

This is the cow with the crumpled horn that tossed the dog that worried the cat that killed the rat that ate the malt that lay in the house that Jack built.

This is the maiden all forlorn that milked the cow with the crumpled horn that tossed the dog that worried the cat that killed the rat that ate the malt that lay in the house that Jack built.

This is the man all tattered and torn that kissed the maiden all forlorn that milked the cow with the crumpled horn that tossed the dog that worried the cat that killed the rat that ate the malt that lay in the house that Jack built.

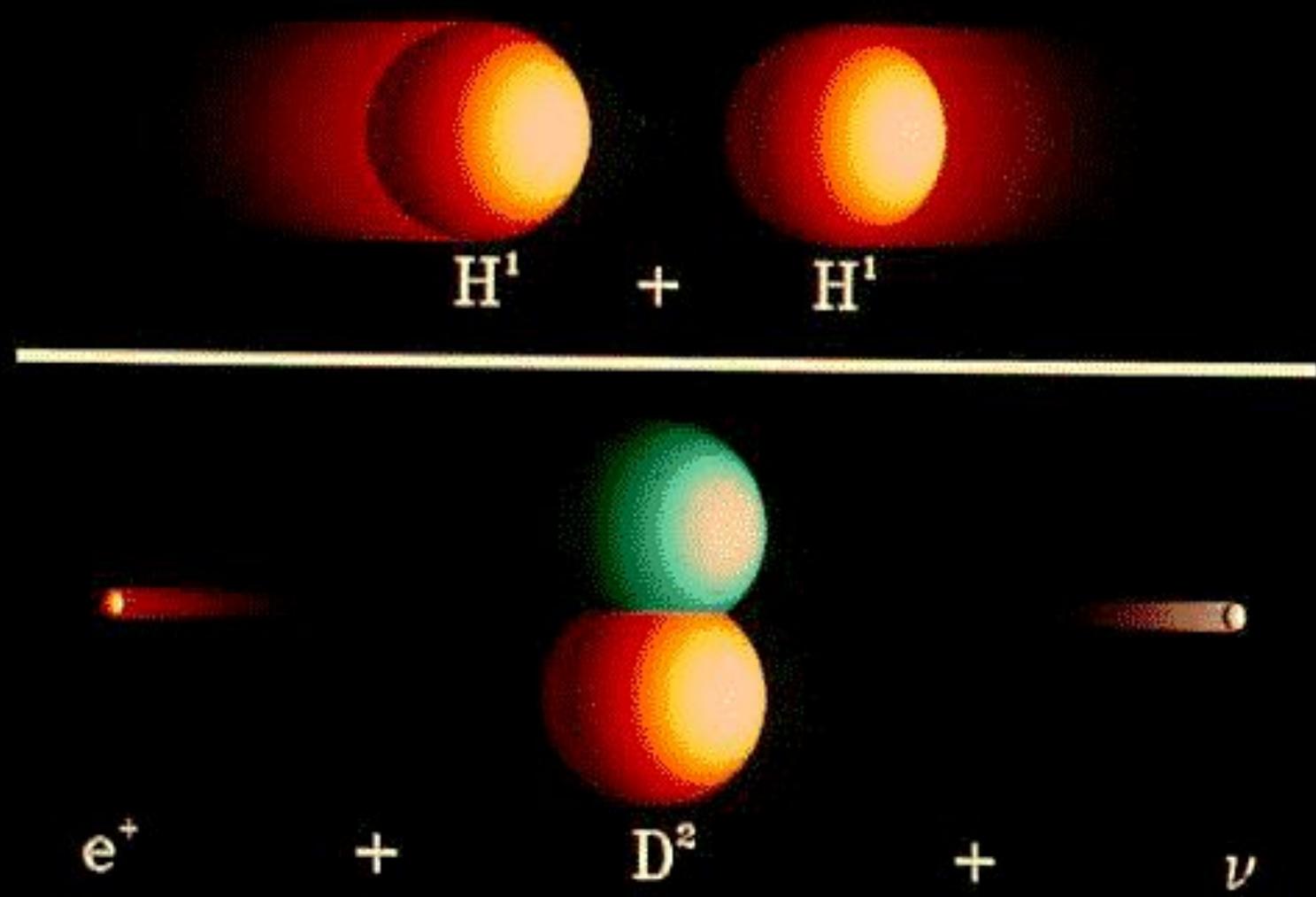
This is the priest all shaven and shorn that married the man all tattered and torn that kissed the maiden all forlorn that milked the cow with the crumpled horn that tossed the dog that worried the cat that killed the rat that ate the malt that lay in the house that Jack built.

This is the cock that crowed in the morn that waked the priest all shaven and shorn that married the man all tattered and torn that kissed the maiden all forlorn that milked the cow with the crumpled horn that tossed the dog that worried the cat that killed the rat that ate the malt that lay in the house that Jack built.

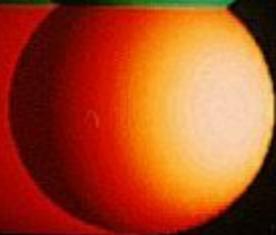
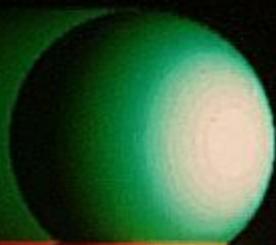
This is the farmer sowing his corn that kept the cock that crowed in the morn that waked the priest all shaven and shorn that married the man all tattered and torn that kissed the maiden all forlorn that milked the cow with the crumpled horn that tossed the dog that worried the cat that killed the rat that ate the malt that lay in the house that Jack built.

This is the horse and the hound and the horn that belonged to the farmer sowing his corn that kept the cock that crowed in the morn that woke the priest all shaven and shorn that married the man all tattered and torn that kissed the maiden all forlorn that milked the cow with the crumpled horn that tossed the dog that worried the cat that killed the rat that ate the malt that lay in the house that Jack built.

STEP 1



STEP 2



D^2

+

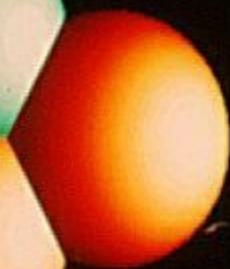
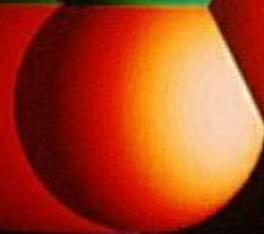
H^1



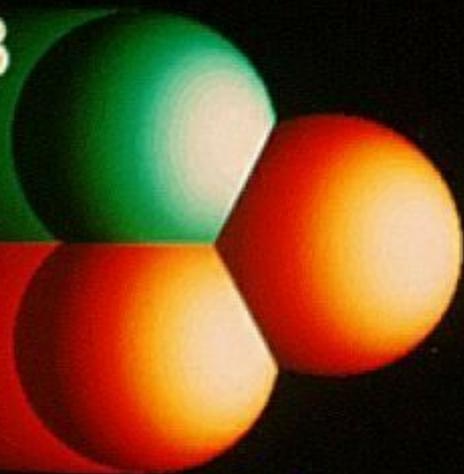
γ

+

He^3

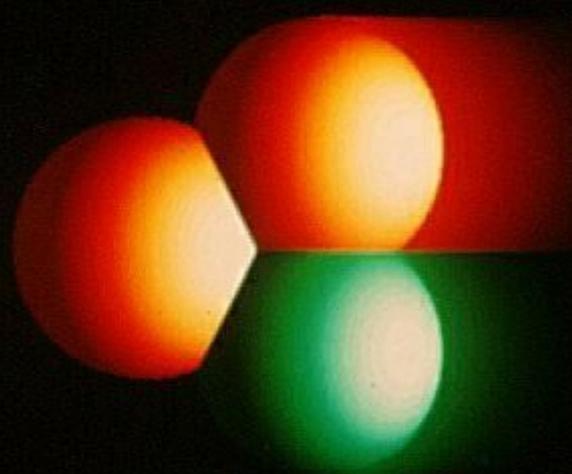


STEP 3

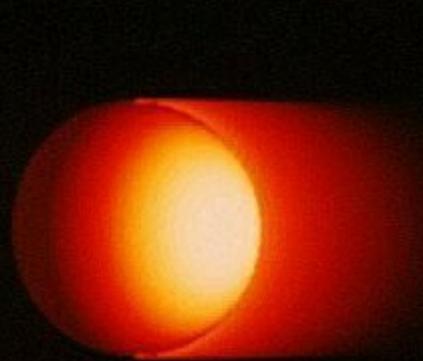


He^3

+

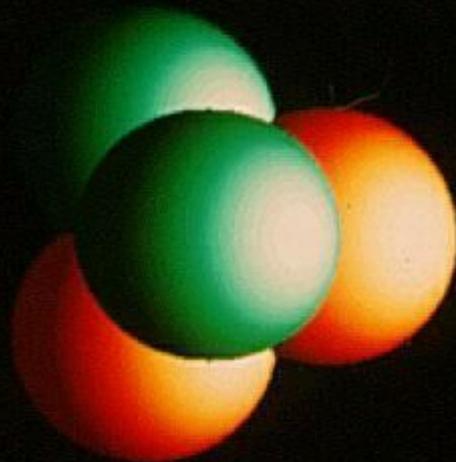


He^3



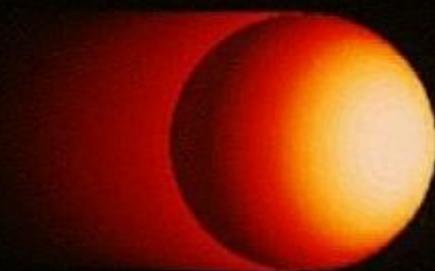
H^1

+



He^4

+

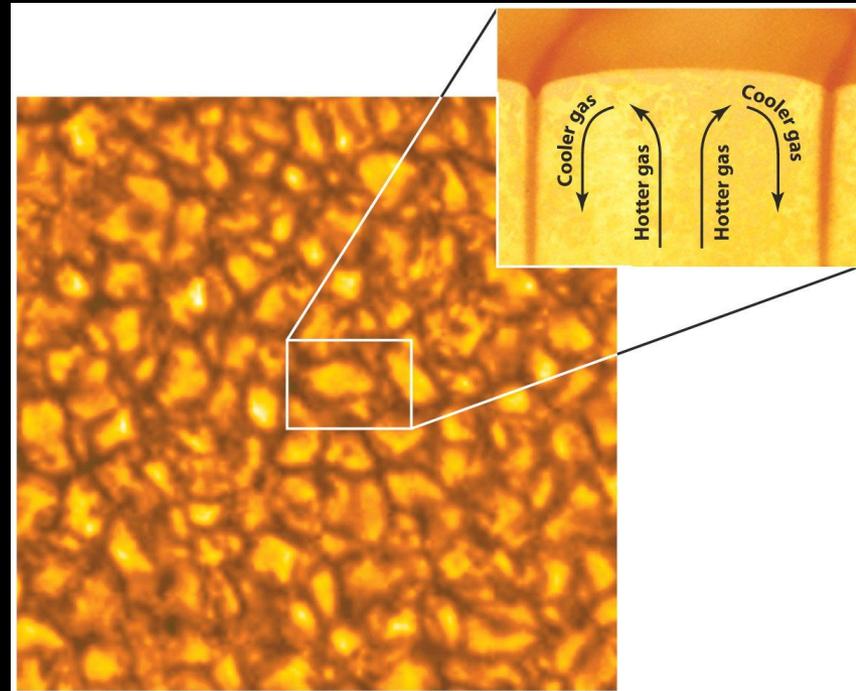


H^1

Перенос излучения в звездах

- Перенос энергии из недр звезды к ее поверхности может осуществляться различными механизмами: излучением, электронной теплопроводностью, конвекцией. Для нормальных звезд в большинстве случаев этот перенос обусловлен лучистой теплопроводностью.
- Лучистый перенос представляет собой диффузионный процесс. Фотоны многократно рассеиваются, поглощаются и переизлучаются (за счет томсоновского рассеяния и тормозного механизма излучения). Коэффициент диффузии равен $D = cl/3$, где l – средняя длина свободного пробега фотонов, $l \sim 1/\kappa\rho$ (κ – «непрозрачность», $\kappa = \alpha/\rho$). Время диффузии $t_D \sim R^2/D$. Для Солнца время диффузии фотонов составляет около миллиона лет.
- При некоторых условиях (градиент температуры выше адиабатического) радиальное распределение плотности оказывается неустойчивым и возникает конвекция. Внешняя конвективная зона имеется на Солнце.

В конвективной зоне температура уже невелика по сравнению с температурой ядра. Отсюда вытекают два важных следствия. Во-первых, в газе становится много свободных электронов, движущихся достаточно медленно для того, чтобы ядра водорода или других элементов могли захватить их в связанные состояния, образовав атомы. Во-вторых, возрастание числа атомов увеличивает поглощательную способность газа (он становится менее прозрачным для излучения) и в результате возрастает градиент температуры.



По мере приближения к фотосфере изнутри коэффициент поглощения χ продолжает увеличиваться. Однако плотность газа резко убывает, и величина $1/\rho\chi$ - среднее расстояние, проходимое фотоном без рассеяния или перепоглощения (средняя длина свободного пробега фотона), - быстро растёт и достигает величины того же порядка, что и шкала высот атмосферы H . Если $1/\rho\chi \ll H$, то испущенные фотоны рассеиваются или перепоглощаются много раз, прежде чем пройдут расстояние, равное шкале высот. Если $1/\rho\chi \gg H$, то испущенные фотоны беспрепятственно пройдут расстояние H и оставшуюся часть атмосферы, плотность которой непрерывно уменьшается с высотой, и уйдут из Солнца. Слой, где $1/\rho\chi \approx H$, - это именно та область, из которой уходит прямо во внешнее пространство большая часть излучения.

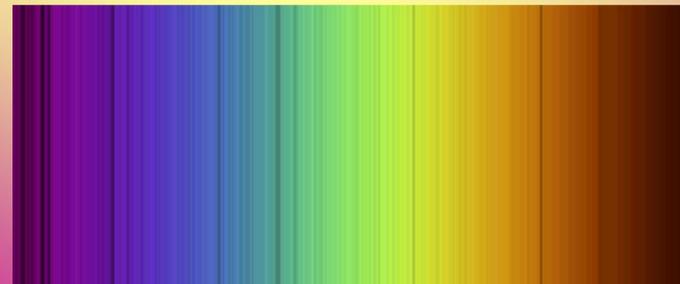
До сих пор мы рассматривали только непрерывное излучение, испускаемое фотосферой. Единственными негладкими участками на кривой зависимости интенсивности от длины волны были пределы спектральных серий. Однако в наблюдаемом спектре содержится, кроме того, множество линий поглощения, называемых фраунгоферовыми линиями, которые на графике интенсивности имеют вид крутых узких углублений. Фраунгоферовы линии дают множество детальных сведений об атмосфере Солнца, включая температуру, давление, динамику, химический состав и локальные значения напряжённости магнитного поля.

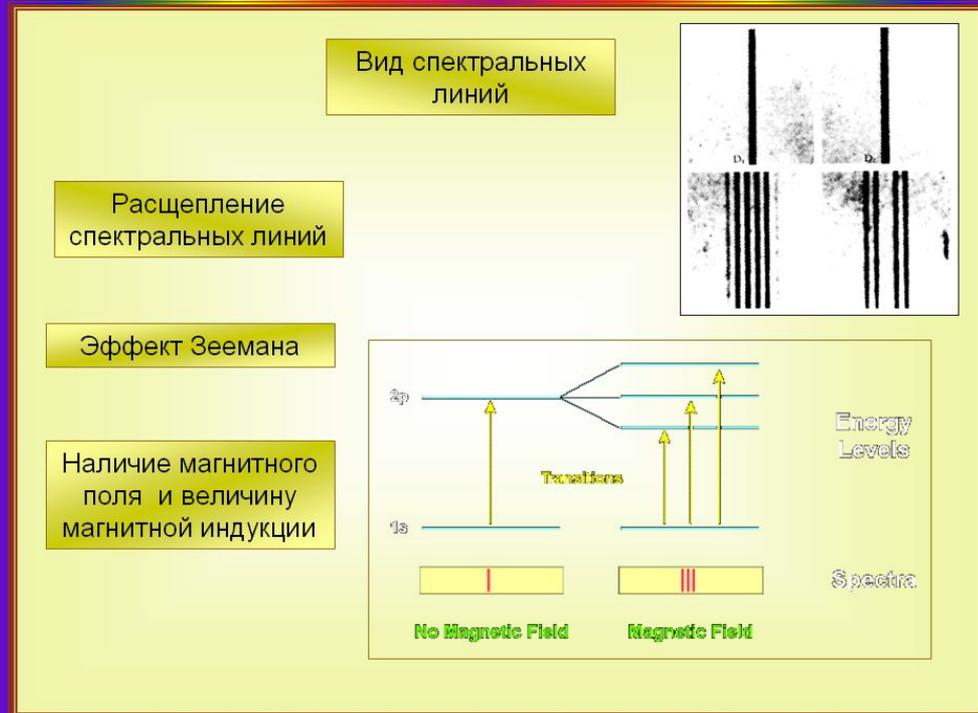


Йозеф Фраунгофер

06.03.1787-07.06.1826

- Немецкий физик, оптик
- [Краткая биография](#)



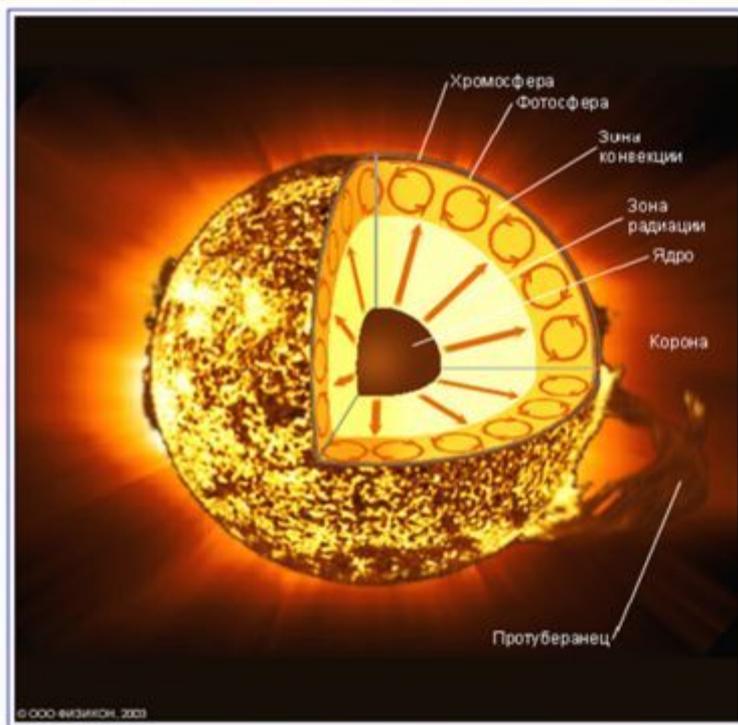


4. Хромосфера

Плотность в хромосфере падает с увеличением расстояния от центра Солнца. Число атомов в одном куб. сантиметре изменяется от 10^{15} вблизи фотосферы до 10^9 в верхней части хромосферы. Исследование спектров хромосферы привело к выводу, что в слое, где происходит переход от фотосферы к хромосфере, температура переходит через минимум и по мере увеличения высоты над основанием хромосферы становится равной 8-10 тысяч Кельвинов, а на высоте в несколько тысяч километров достигает 15-20 тысяч Кельвинов. Установлено, что в хромосфере имеет место хаотическое движение газовых масс со скоростями до 15×10^3 м/с. В хромосфере факелы в активных областях видны как светлые образования, называемые обычно флоккулами. В красной линии спектра водорода хорошо видны тёмные образования, называемые волокнами.



Температура Солнца

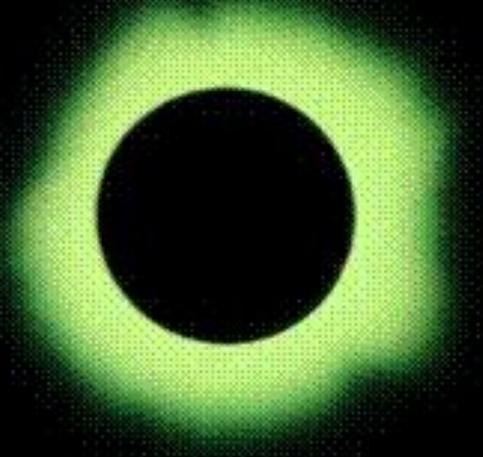


**15,5 млн градусов
– в центре.**

**5500градусов – в
фотосфере**

**100 тыс градусов
– хромосфера**

**1-2 млн градусов –
Солнечная корона.**



a

6



Чудесное серебристо-жемчужное лучистое сияющее кольцо (рис.1), которое можно увидеть, когда чёрный диск Луны закрывает собой ослепительно яркую поверхность Солнца - это солнечная корона. В обычное время наблюдать её мешает яркий солнечный свет: интенсивность излучения солнечной короны в видимом свете – белой короны - по крайней мере в миллион раз меньше интенсивности излучения солнечного диска.

В излучении белой короны различают три составляющих. Первая– это К-корона (от немецкого слова *kontinuierlich* – непрерывный), т.е. солнечный свет, рассеянный по направлению к наблюдателю на свободных электронах короны. Вторая – это F-корона, т.е. солнечной свет, рассеянный на относительно тяжёлых твёрдых частицах межпланетной пыли, медленно движущихся между Землёй и Солнцем большей частью в плоскости эклиптики - так называемый «внутренний зодиакальный свет». Третья – это E-корона, т.е. излучение в спектральных линиях видимого света, испускаемое ионами коронального газа.

В 1942 году шведский исследователь Бенгт Эдлен обнаружил, что температура солнечной короны составляет примерно миллион градусов. Он отождествил несколько эмиссионных линий оптического спектра E-короны – зелёную (5303А), красную (6374А) и некоторые другие с линиями высокоионизованных атомов железа, никеля и кальция, лишённых от 9 до 14 электронов. Поскольку ионизация происходит при столкновении тяжёлого (а, значит, малоподвижного) иона с налетающими на него свободными электронами, то для успешной ионизации необходимо, чтобы температура налетающих электронов была не менее миллиона градусов.

Когда электромагнитная волна встречает на своём пути электрон, последний ускоряется электрическим полем волны. Согласно законам электродинамики, всякая заряженная частица, движущаяся ускоренно, должна испускать излучение.

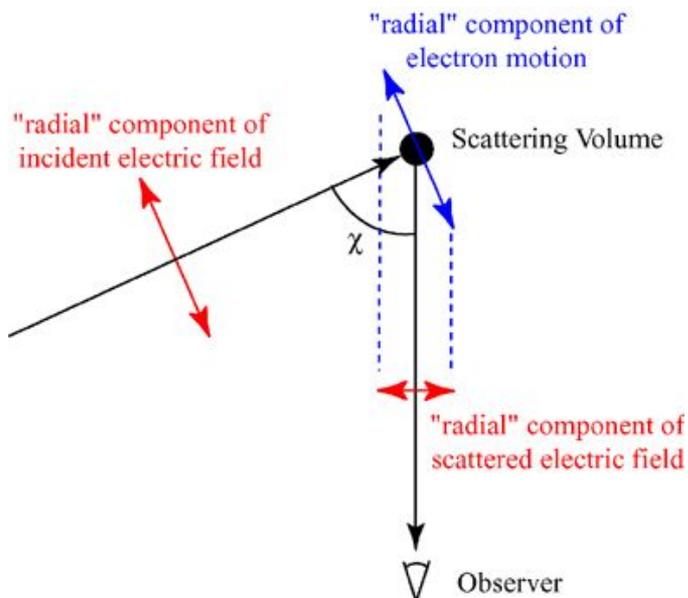
Рис. поясняет геометрическую картину рассеяния электромагнитной волны на электронах солнечной короны. На рис. направление распространения падающей волны, параллельное $\mathbf{E}_i \times \mathbf{B}_i$, и электрического поля падающей волны \mathbf{E}_i лежат в плоскости чертежа. На рис. наблюдатель находится в точке O, а векторы \mathbf{a} и $\boldsymbol{\rho}$ лежат в плоскости чертежа.

Напряженность электрического поля рассеянной волны равна

$$\vec{E}_s = \frac{e[\vec{\rho} \times [\vec{a} \times \vec{\rho}]]}{4\pi\epsilon_0 c^2 \rho^3}$$

где $\boldsymbol{\rho}$ - радиус-вектор точки, в которой находится наблюдатель, а \mathbf{a} – ускорение, сообщённое электрону в момент $t-\rho/c$. Так как ускорение, сообщённое электрону, равно $-eE_i/m_e$, можно переписать в виде:

$$\vec{E}_s = \frac{e^2 [[\vec{E}_i \times \vec{\rho}] \times \vec{\rho}]}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2 \rho^3} \quad (1)$$



Напряжённость соответствующего магнитного поля определяется выражением

$$\vec{B}_s = \frac{\mu_0 e^2 [\vec{E}_i \times \vec{\rho}]}{4\pi m_e c \rho^2}$$

Рассеянное излучение распространяется вдоль $\vec{\rho}$, а его мощность в одном стерадиане составляет

$$\psi(\alpha) = \rho^2 \left| \frac{\vec{E}_s \times \vec{B}_s}{\mu_0} \right| = \frac{e^4 E_i^4 \sin^2 \alpha}{16\pi \epsilon_0 m_e^2 c^3}$$

где α - угол между \vec{E}_i и $\vec{\rho}$. Следовательно, в направлении, параллельном \vec{E}_i , энергия не рассеивается совсем, а на направление, перпендикулярное к \vec{E}_i , приходится максимальное количество рассеянной энергии. Поскольку энергия электромагнитной волны пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля, $\psi \sim E^2$, то отношение рассеянной энергии к падающей легко подсчитывается с помощью выражения (1):

$$\left(\frac{E_s}{E_i} \right)^2 = \left(\frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 m_e c^2} \right)^2 \left(\frac{\sin \alpha}{\rho} \right)^2$$

Проинтегрировав это выражение по поверхности сферы с радиусом ρ , мы получим отношение всей энергии, рассеянной электроном, к энергии, упавшей на единицу площади:

$$\sigma_T \equiv 2\pi\rho^2 \int_{-\pi}^{+\pi} \left(\frac{E_s}{E_i} \right) \sin \alpha d\alpha = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{e^2}{\varepsilon_0 m_e c^2} \right)^2 = 6,6 \times 10^{-25} \text{ см}^2$$

Полученное значение томсоновского эффективного сечения для рассеяния является мерой рассеивающей способности электрона. Оно имеет размерность площади и зависит только от фундаментальных постоянных. С классической точки зрения его можно представлять себе как поперечник электрона, видимый с направления падающей волны. Следовательно, вероятность рассеяния света фотосферы, проходящего через корону, составляет всего лишь $1/10^{24}$ от числа электронов, содержащихся в столбе единичного сечения. Наибольшая интенсивность излучения внутренней короны в 10^5 раз меньше интенсивности фотосферного излучения; следовательно, в столбе единичного сечения, касательном к верхней границе хромосферы (~ 12000 км), содержится $\sim 10^{19}$ электронов. Такое число частиц содержится в 1 см^3 земной атмосферы на уровне моря, а в крайне разреженной короне оно распределено по всему лучу зрения. Большая часть рассеянного света, излучаемого внутренней короной, возникает в объеме, имеющем высоту, примерно равную H - шкале высот атмосферы, и длину $(2HR)^{1/2}$ при $H \ll R$. При температуре 10^6 К шкала высот $H = 5 \cdot 10^9$ см, и длина рассеивающего объема составляет, грубо говоря, 10^{10} см. Следовательно, электронная концентрация у основания короны должна быть несколько меньше 10^9 см^{-3} .

При температурах порядка миллиона градусов основной газ солнечной атмосферы - водород почти полностью ионизован, поэтому следует ожидать, что корона представляет собой протонно-электронный газ с небольшой примесью ионов других химических элементов. Теплопроводность k протонно-электронного газа определяется, в основном, более подвижными электронами. Её можно записать в виде [Spitzer, 1957]:

$$k = k_0 T_e^{5/2}$$

где T_e – электронная температура, а слабая функция электронной концентрации и температуры k_0 примерно равна 8×10^{-7} эрг/(см сек $^\circ\text{K}^{7/2}$) для типичных условий в короне (при температуре порядка миллиона градусов и известном томсоновском сечении рассеяния фотонов на свободных электронах $6,6 \times 10^{-25}$ см² по наблюдаемой интенсивности и спаду свечения короны при удалении от лимба электронная концентрация в основании короны оценивается величиной $\sim 3 \times 10^8$ см⁻³ со шкалой высот $\sim 0,1 R$, где R – радиус Солнца).

Предположим, что солнечная корона неподвижна. Для сферически симметричной статичной короны уравнение теплопроводности в отсутствие любых источников и стоков тепла имеет вид [Chapman, 1957]:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 k_0 T_e^{5/2} \frac{dT_e}{dr} \right) = 0$$

где r – гелиоцентрическое расстояние. Решение этого уравнения, удовлетворяющее условию $T \rightarrow 0$ при $r \rightarrow \infty$, имеет вид:

$$T_e = T_{e0} \left(\frac{r_0}{r} \right)^{2/7} \quad (2)$$

где $T_{e0} = 10^6$ °К для $r_0 = 1,0575 R$.

В состоянии гидростатического равновесия гравитация уравновешивается градиентом давления коронального газа.

$$\frac{dP}{dr} = - \frac{GM_s \rho}{r^2} \quad (3)$$

где P – давление и ρ – массовая плотность коронального газа, G – гравитационная постоянная, M_s – масса Солнца. Электронейтральность корональной плазмы подразумевает равенство электронной и протонной концентраций на масштабах больших дебаевского радиуса, поэтому

$$\rho = n(m_e + m_p) \cong n m_p$$

где n – электронная концентрация, m_e и m_p – массы электрона и протона соответственно. Если считать протонную температуру равной электронной, то давление запишется в виде:

$$P = 2n\kappa T \quad (4)$$

где κ - постоянная Больцмана. Подставляя решение (2) для температуры в уравнение гидростатического равновесия (3), получим уравнение на концентрацию:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{n}{r^{2/7}} \right) = - \frac{GM_s m_p}{2\kappa T_0 r_0^{2/7}} \frac{n}{r^2}$$

решение которого имеет вид:

$$n(r) = n_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{2/7} \exp \left\{ \frac{7}{5} \frac{GM_s m_p}{2\kappa T_0 r_0} \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{5/7} - 1 \right] \right\} \quad (5)$$

где $n_0 = n(r_0)$.

Зависимость давления от гелиоцентрического расстояния получается комбинацией формул (2), (4) и (5):

$$P(r) = P_0 \exp \left\{ \frac{7}{5} \frac{GM_s m_p}{2\kappa T_0 r_0} \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{5/7} - 1 \right] \right\} \quad (6)$$

где $P_0 = 2n_0kT_0$. Из (6) видно, что с ростом гелиоцентрического расстояния давление монотонно падает и при $r \rightarrow \infty$ приближается к своему асимптотическому значению:

$$P_\infty = P_0 \exp\left(-\frac{7}{5} \frac{GM_s m_p}{2kT_0 r_0}\right)$$

Для наблюдаемых корональных температур и плотностей модель Чепмена даёт давление P_∞ около 10^{-5} дин/см² на больших гелиоцентрических расстояниях в межзвёздной среде. Физические условия там известны плохо, но принято считать, что суммарное давление галактического магнитного поля, межзвёздного газа и космических лучей составляет от 10^{-12} до 10^{-13} дин/см². Поскольку расхождение давлений достигает семи-восьми порядков величины, предположение о статичной неподвижной короне оказывается необоснованным.

В области длин волн меньше 200 А становится существенным свободно-свободное, или тепловое тормозное излучение – один из основных механизмов отвода тепла от короны. Энергия, теряемая единицей объёма короны в виде теплового тормозного излучения за единицу времени в единичном интервале длин волн в единичный телесный угол, составляет

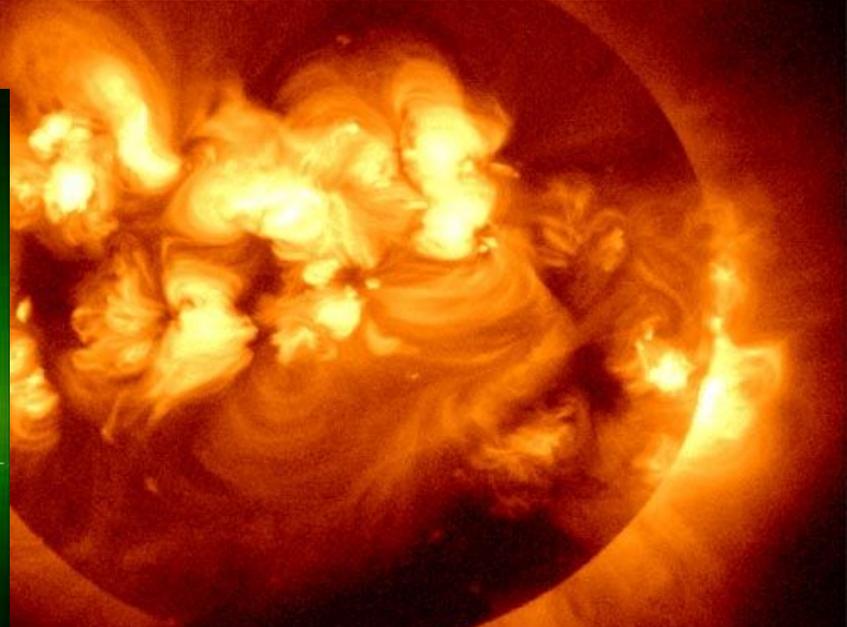
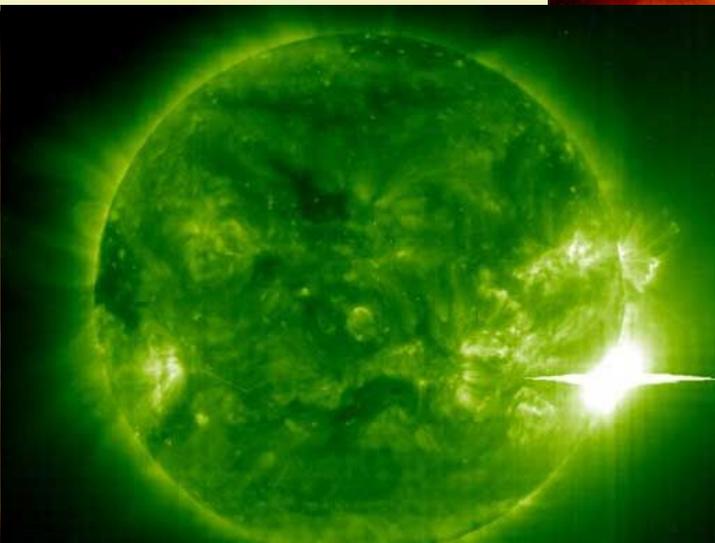
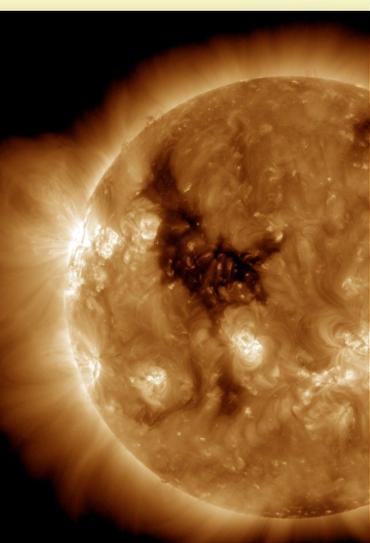
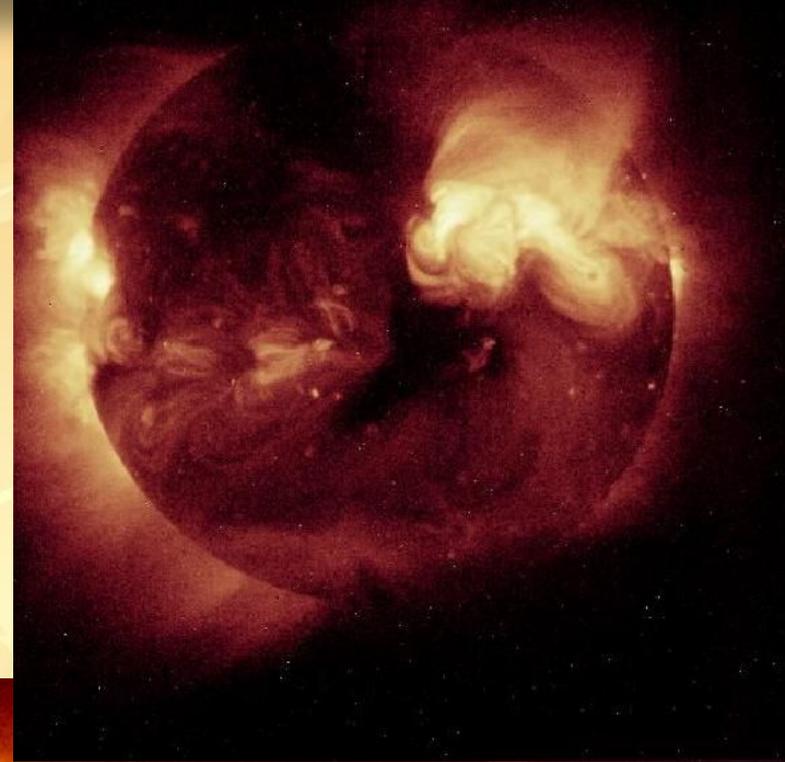
$$j_\lambda = 1,7 \times 10^{-23} \left(\frac{10^6}{T_e}\right)^{1/2} \left(\frac{GF}{\lambda^2}\right) N_e N_i \exp\left\{-\frac{hc}{\lambda k T_e}\right\}$$

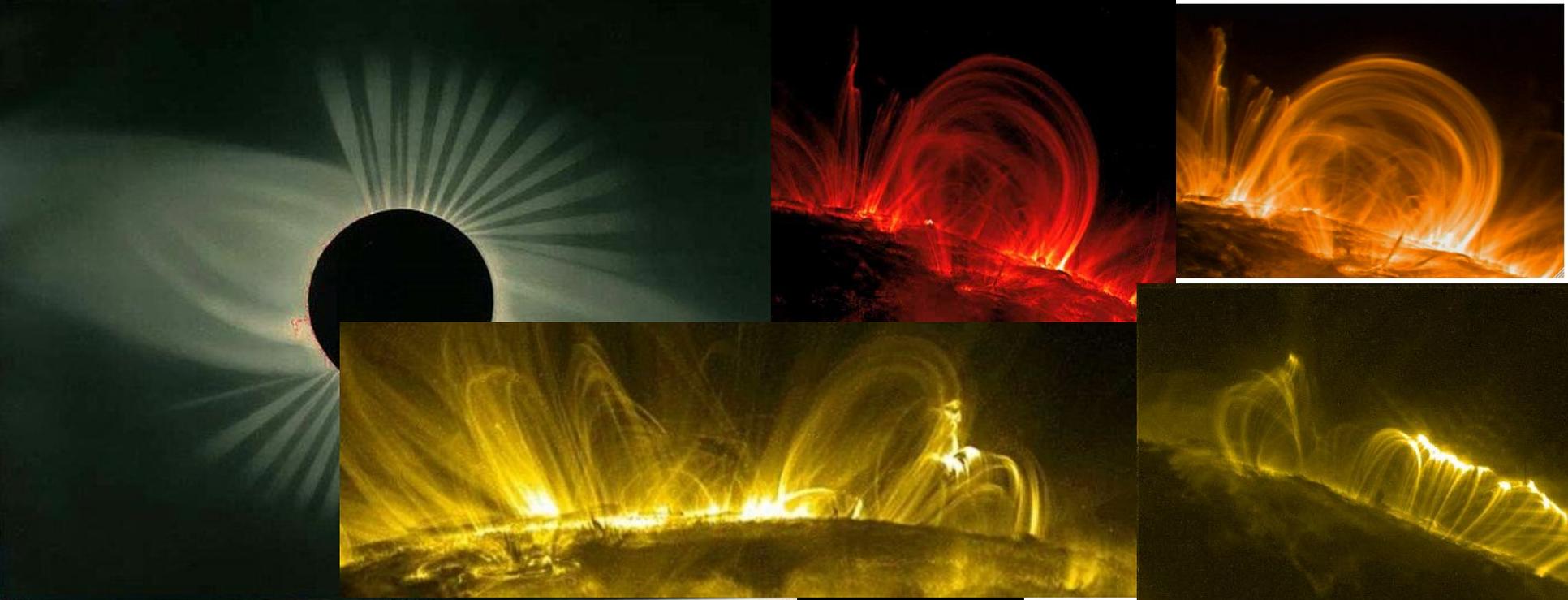
где $j\lambda$ имеет размерность эрг/см³ сек А стерад, N_e и N_i рассчитаны на 1 см³, T_e измеряется в К, λ - в А, а GF – множитель Гаунта, который обычно близок к единице. Таким образом, тепловое тормозное излучение пропорционально функции $\exp(-hc/\lambda kT_e)/\lambda^2$, имеющей максимум при $\lambda=hc/2kT_e$, т.е. $\lambda=72$ А для $T_e=10^6$ К.

Излучение короны в видимой области спектра намного слабее, чем излучение фотосферы, из-за крайне низкой плотности вещества. Белый свет короны, который мы видим во время полных солнечных затмений, - это главным образом излучение фотосферы, рассеянное корональным веществом по направлению к Земле. Кроме рассеянного непрерывного излучения, видимая область спектра короны содержит также редко расположенные эмиссионные линии, но суммарная энергия, излучаемая в этих линиях, мала по сравнению с энергией рассеянного излучения. Трёхмерная структура корональных образований не может быть установлена полностью по одной последовательности снимков, полученных во время затмения, так как невозможно найти распределение рассеивающих частиц вдоль луча зрения. Поэтому при интерпретации результатов наблюдений обычно полагают, что структура зависит только от радиуса, т.е. угла между лучом зрения и направлением на центр Солнца. Белая корона складывается из двух слагающих. Свет фотосферы, рассеянный на электронах, который называют короной К, преобладает на расстояниях, меньших приблизительно 2,3 R. Вне этой области преобладает составляющая F, создаваемая рассеянием излучения фотосферы на мелких пылевых частицах. Интенсивность рассеянного света короны К не превосходит 10^{-5} интенсивности излучения фотосферы. Следовательно, та небольшая доля излучения фотосферы, которая уже была рассеяна, имеет очень мало шансов быть рассеянной во второй раз. Так как каждый электрон короны рассеивает определённую долю от того количества света, которое он получает от фотосферы, яркость короны К пропорциональна числу электронов, находящихся на луче зрения.

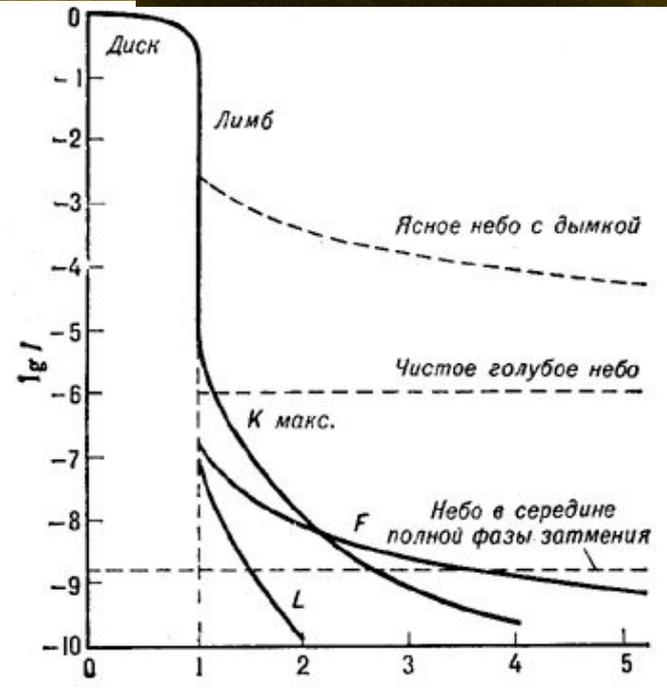
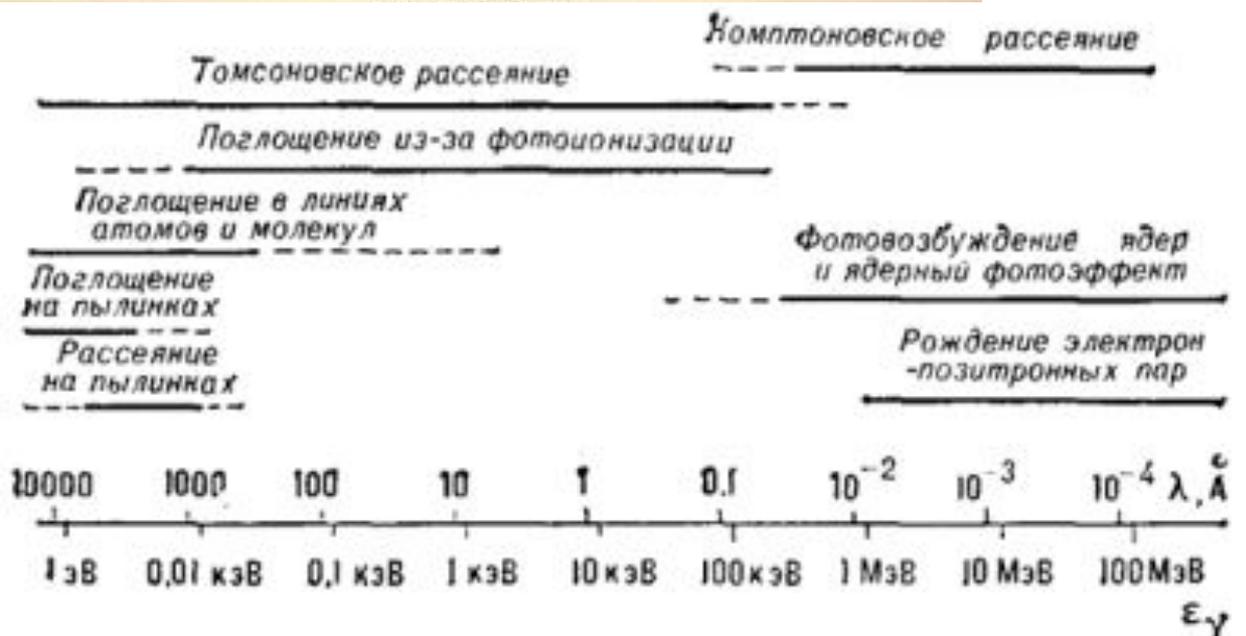
Естественные источники рентгеновских лучей

В природе есть естественные источники рентгеновских лучей – это солнечная корона и некоторые другие небесные тела...





TOTAL ECLIPSE of the SUN.



6. Солнечная корона



Внутренние области короны, удаленные от фотосферы на расстояние до одного радиуса Солнца. Форма короны не остается постоянной. В годы, когда на поверхности Солнца много пятен, корона почти круглая. Когда же пятен мало, корона сильно вытянута в плоскости экватора Солнца. Корона не однородна: в ней наблюдаются струи, дуги, отдельные ступенчатые вещества, полярные сияния. Дуги короны перерывно связаны с петлями и филами, а также с вихревыми, происходящими в хромосфере. Все эти и другие особенности с той же скоростью, что и в разволевающие под ним участки фотосферы.

Солнечная корона - самая внешняя и наиболее разреженная часть солнечной атмосферы, простирающаяся на несколько (более 10) солнечных радиусов. До 1931 года корону можно было наблюдать только во время полных солнечных затмений в виде серебристо-жемчужного сияния вокруг закрытого Луной диска Солнца. В короне хорошо выделяются детали её структуры: шлемы, опахала, корональные лучи и полярные щёточки. После изобретения коронографа солнечную корону стали наблюдать и вне затмений. Общая форма короны меняется с фазой цикла солнечной активности: в годы минимума корона сильно вытянута вдоль экватора, в годы максимума она почти сферична. В белом свете поверхностная яркость солнечной короны в миллион раз меньше яркости центра диска Солнца. Свечение её образуется в основном в результате рассеяния фотосферного излучения свободными электронами. Практически все атомы в короне ионизированы. Концентрация ионов и свободных электронов у основания короны составляет 10^9 частиц в 1 см^3 . Нагрев короны осуществляется аналогично нагреву хромосферы. Наибольшее выделение энергии происходит в нижней части короны, но благодаря высокой теплопроводности корона почти изотермична - температура понижается наружу очень медленно. Отток энергии в короне происходит несколькими путями. В нижней части короны основную роль играет перенос энергии вниз благодаря теплопроводности. К потере энергии приводит уход из короны наиболее быстрых частиц.

