



Проблемы и загадки физики Солнца

Богачёв С.А.



Общая информация о Солнце

Солнце – звезда спектрального класса **G2** со следующими основными характеристиками:

Температура поверхности – 5780 К (~ 6000 К)

Размер – 1.4 млн. км (радиус – 700 тыс. км)

Масса – 2×10^{33} г (более 99 % массы солнечной системы)

Возраст – 4.8 млрд. лет (~ 50 % времени жизни)

Светимость – 3.8×10^{33} эрг/с



Общая информация о Солнце

Солнце – звезда спектрального класса G2 со следующими основными характеристиками:

Температура поверхности – 5780 К (~ 6000 К)

Размер – 1.4 млн. км (радиус – 700 тыс. км)

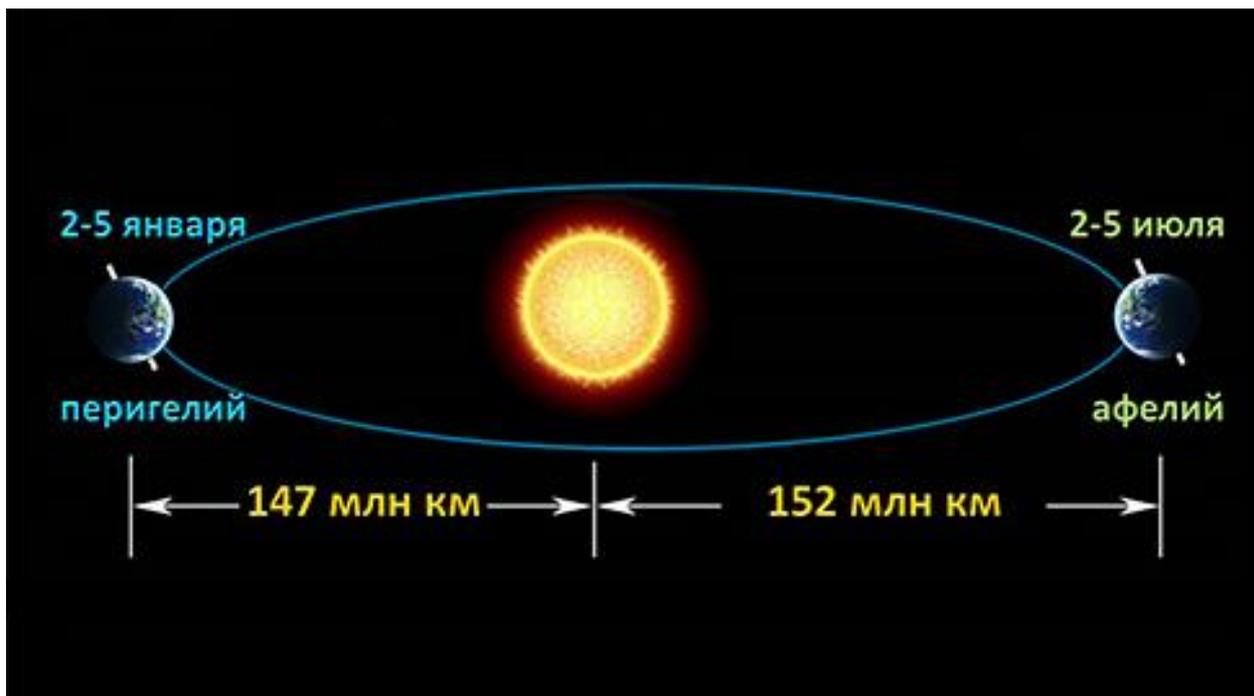
Масса – 2×10^{33} г (более 99 % массы солнечной системы)

Возраст – 4.8 млрд. лет (~ 50 % времени жизни)

Светимость – 3.8×10^{33} эрг/с



Орбита Земли

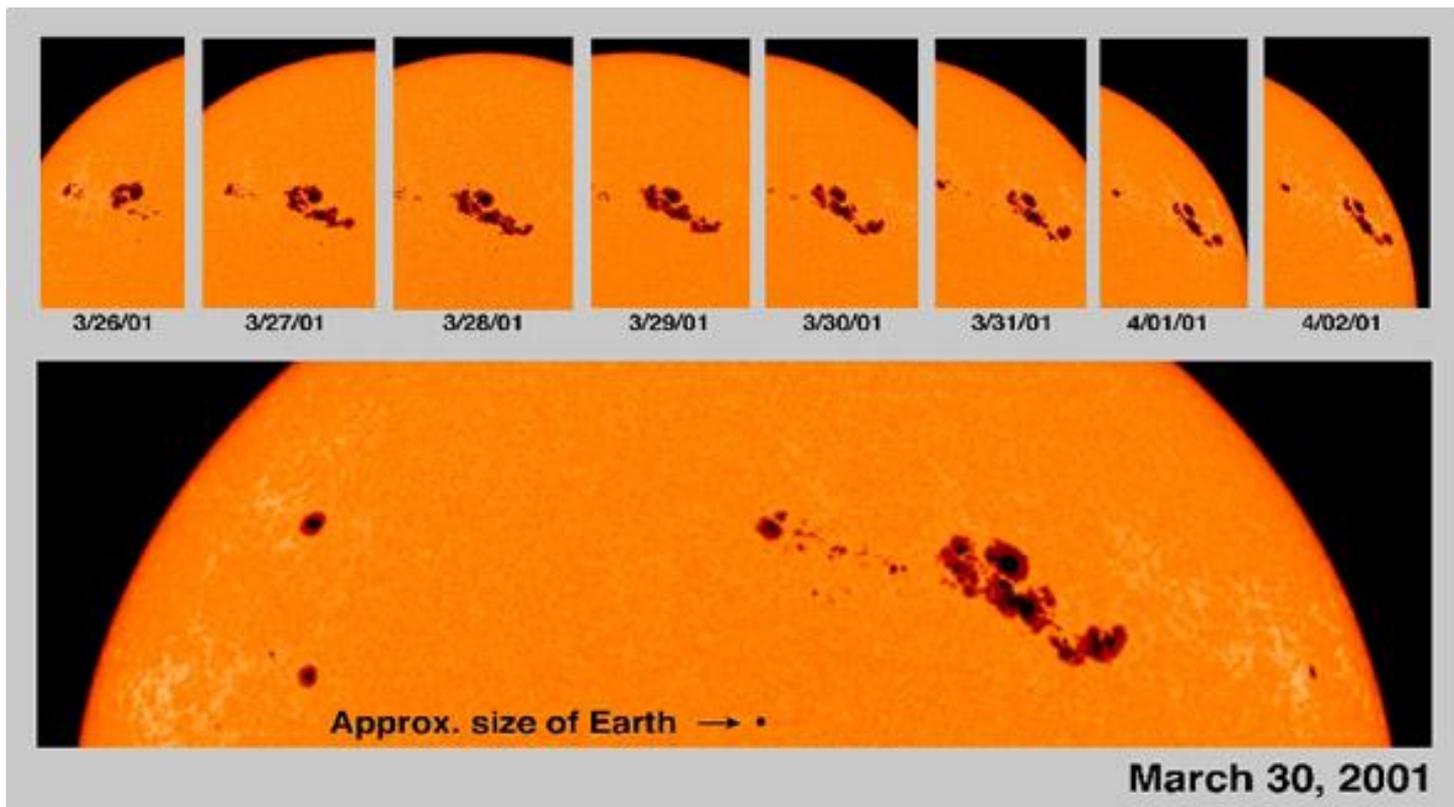


Расстояние до Солнца ~ 150 млн. км. Орбита – эллипс с эксцентриситетом $\sim 1/60$. Расстояние меняется на ± 2.5 млн. км.

Средняя температура в течение года меняется примерно на ± 2 градуса.



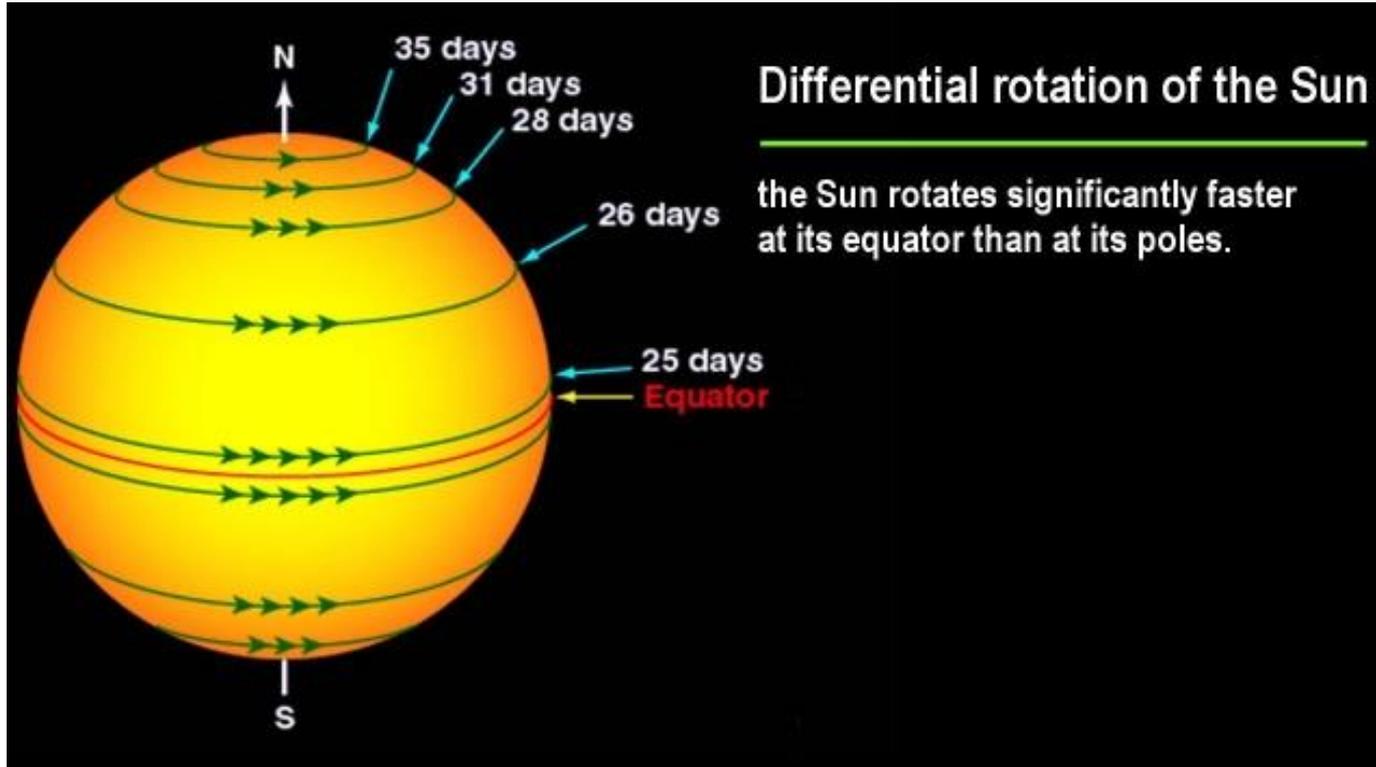
Вращение Солнца



Вращение Солнца – наблюдается по движению солнечных пятен. Появляются слева (восток) и исчезают справа (запад). На Земле – наоборот.



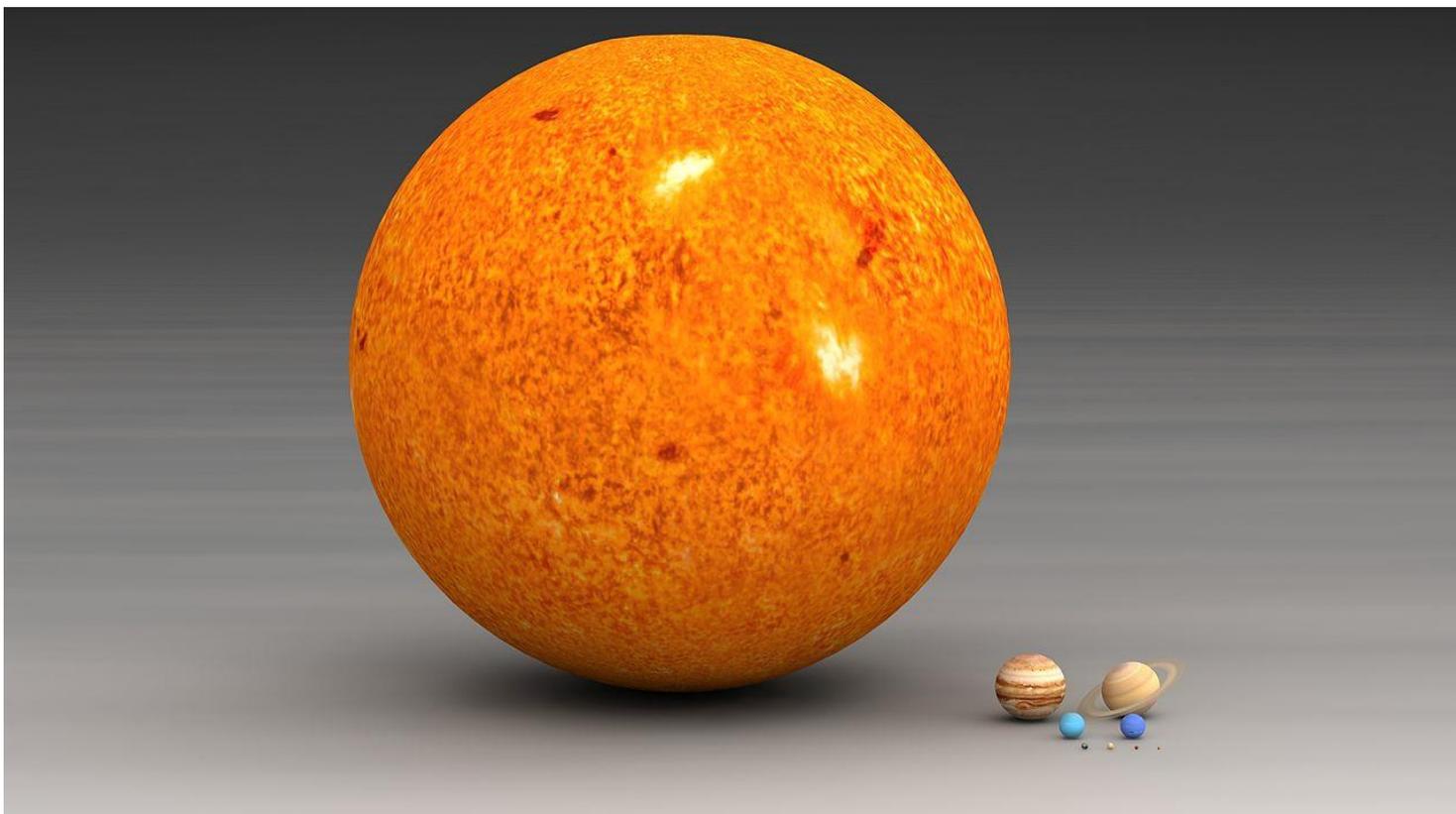
Вращение Солнца



Дифференциальное вращение. Для Земли – вращение Солнца происходит с периодом ~ 27 дней – вращение на широте солнечных пятен. Наклон оси – 7 градусов. В сентябре виден N-полюс, в марте S-полюс.



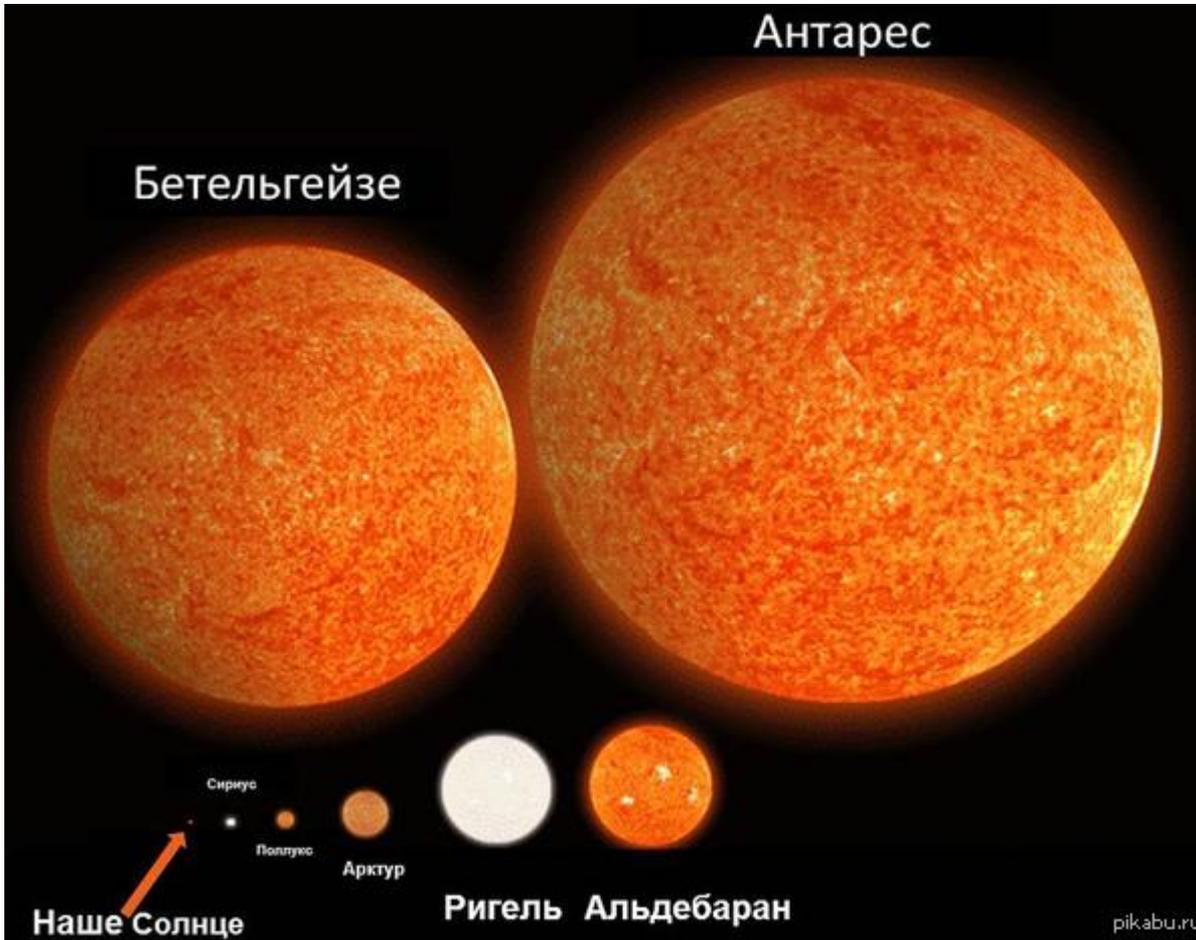
Размер Солнца



Солнце – доминирующий объект в солнечной системе. Содержит более 99 % её массы.



Размер Солнца



Альдебаран (α Тельца)
– 43 солн. радиусов.

Антарес (α Скорпиона)
– 400 солн. радиусов.

Бетельгейзе (α
Ориона) – 1000 солн.
радиусов.



Солнечная постоянная



Солнечная постоянная
– 1.4 Вт/м^2 .

Светимость
поверхности – 60
 МВт/м^2 .

Всё
энергопотребление
Земли – 100 ГВт .

Светимость в пересчёте на объём – 0.2 Вт/м^3 или 0.2 Вт на тонну вещества.

Максимум светимости приходится на 500 нм – стык зелёной и голубой частей спектра.



Влияние на климат

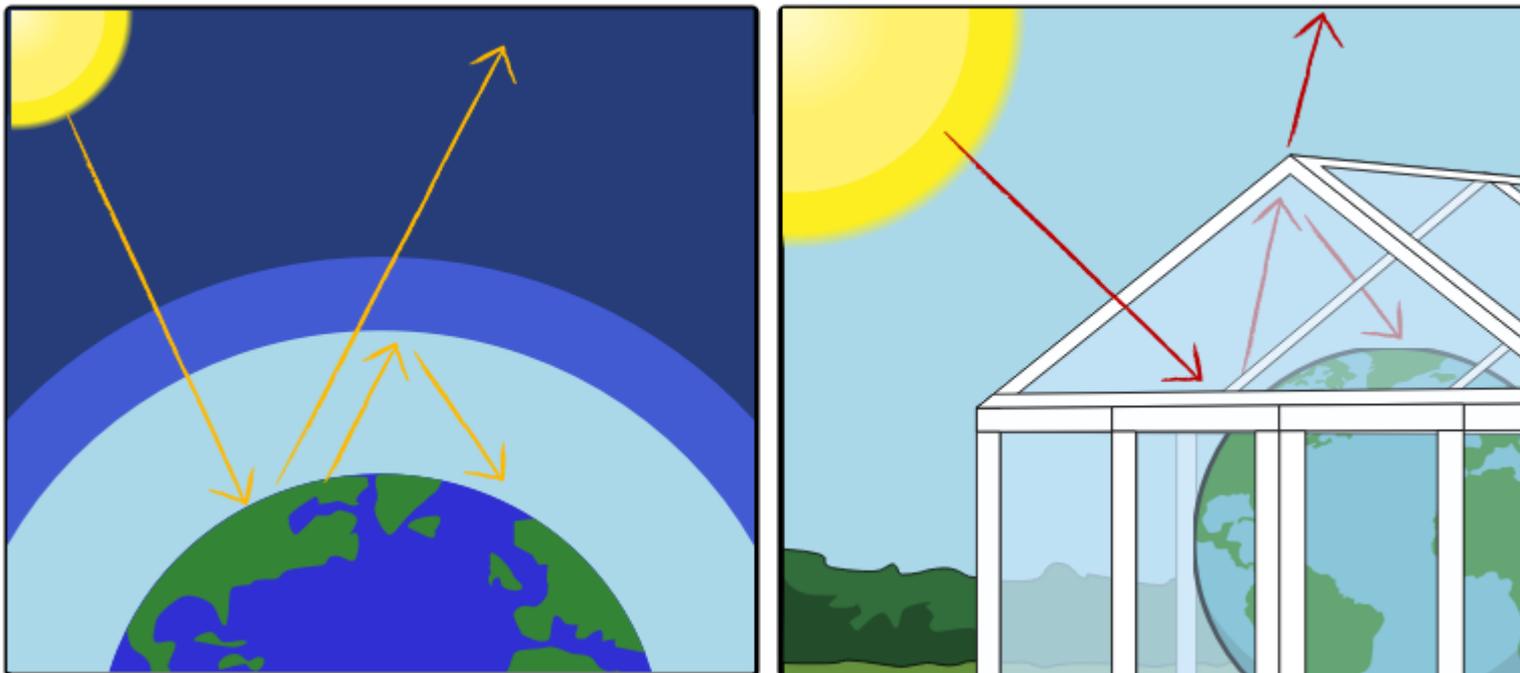


Теоретически изменение светимости Солнца на 1% изменяет температуру на Земле примерно на 1 градус.

Практически быстрые изменения светимости не наблюдаются и, по-видимому, невозможны (запас тепловой энергии на примерно 10 млн. лет).



Влияние на климат



Возможно влияние через парниковые газы: CO_2 , H_2O , O_3 .

Средняя температура Земли без влияния парникового эффекта ~ минус 25 градусов.

Концентрация газов может регулироваться солнечной активностью.



Источники энергии Солнца

XIX век

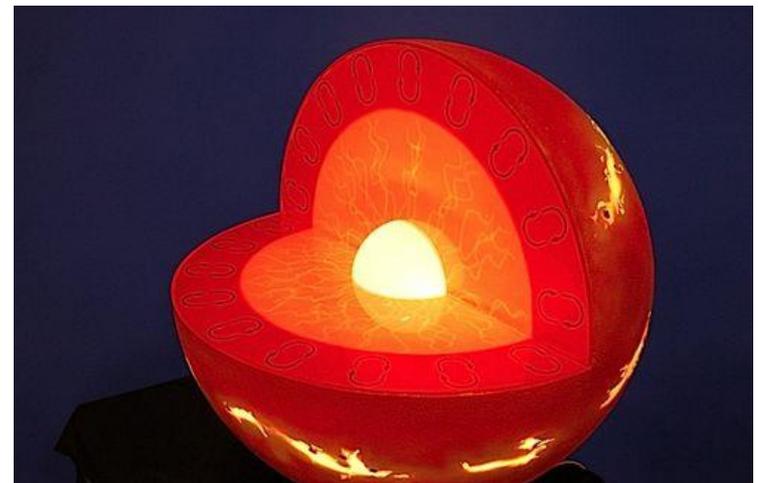
Теория о падении вещества на Солнце.

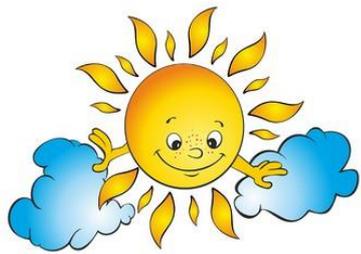
Гравитационное сжатие Солнца (20 млн. лет; ~ 70 метров/год).

XX век

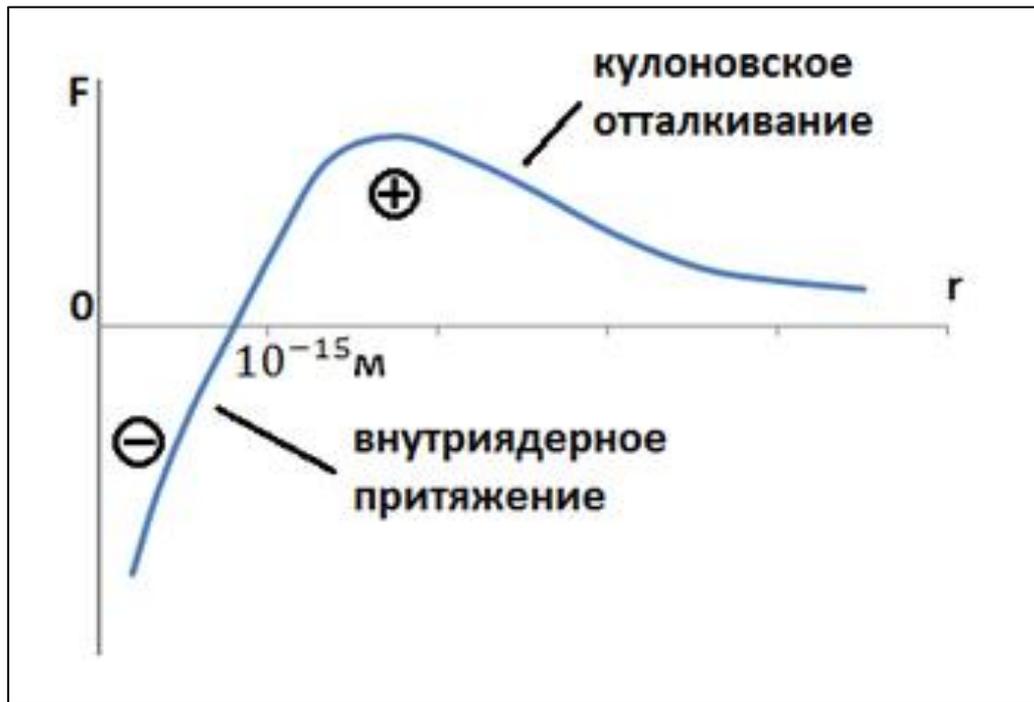
Резерфорд – открытие энергии атомного ядра

Эддингтон – горячие недра звёзд (давление в ядре уравнивает гравитацию)





Источники энергии Солнца



Для больших ядер –
реакции распада.

Для малых ядер –
реакции синтеза.

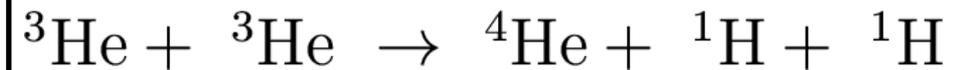
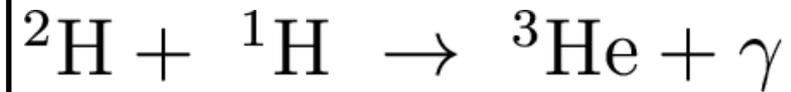
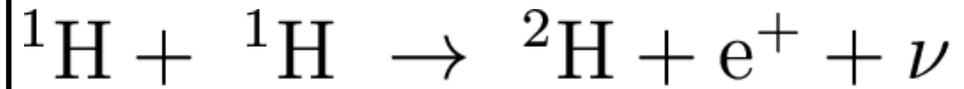
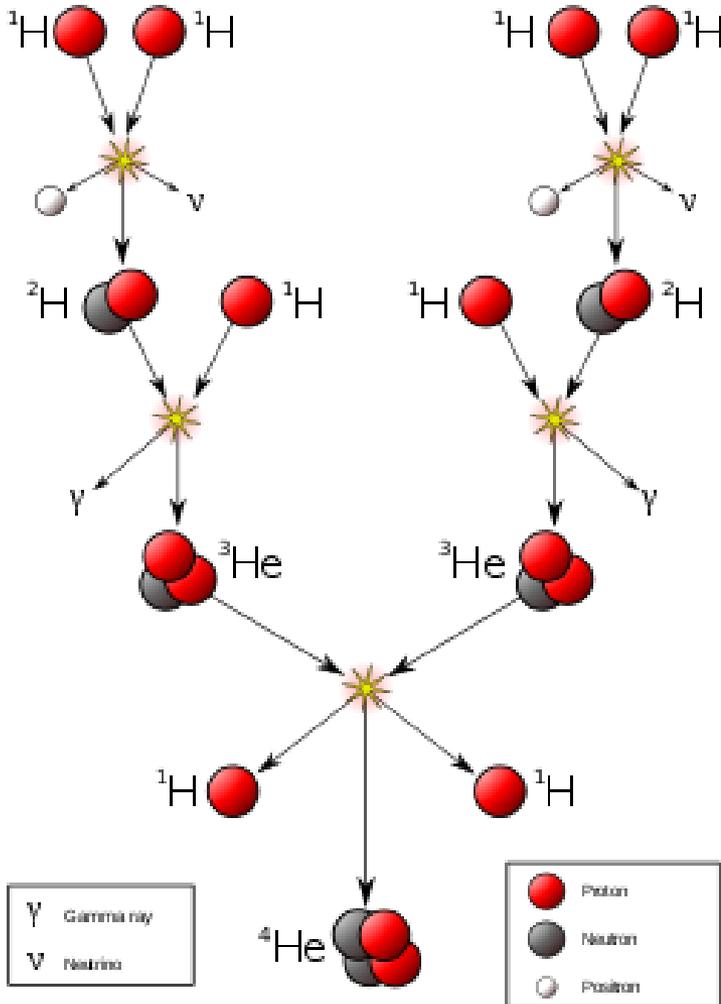
Потенциальный барьер
– 200 кэВ

(температура около 2
млрд. К)

Реальная температура в
ядре – 15 млн. К.



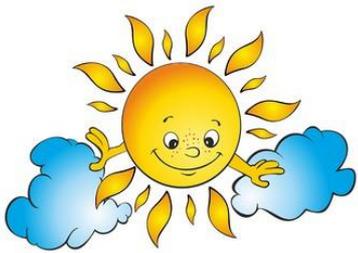
Протон-протонный цикл



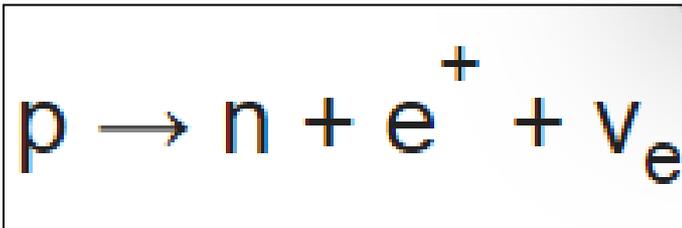
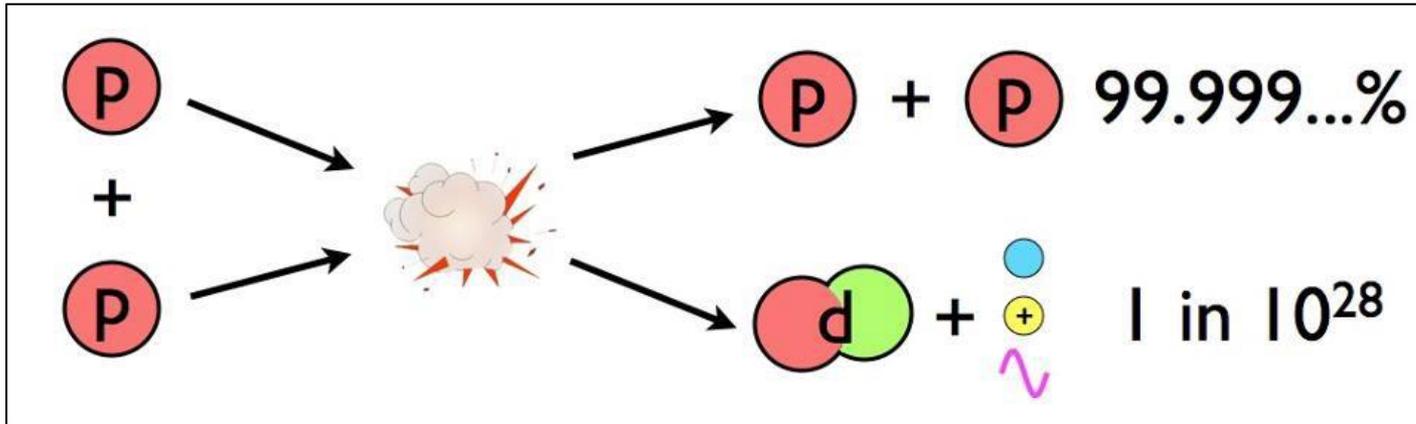
4 протона превращаются в ядро гелия (2 протона + 2 нейтрона).

Разница масс выделяется в виде энергии.

Число нуклонов не меняется.



Протон-протонный цикл



Скорость цикла и время жизни Солнца/звезды определяется первым шагом.

Протон (более лёгкая частица) распадается на нейтрон (более тяжёлую), позитрон и электронное нейтрино.

Вероятность реакции – 1 на 10 млрд. лет.

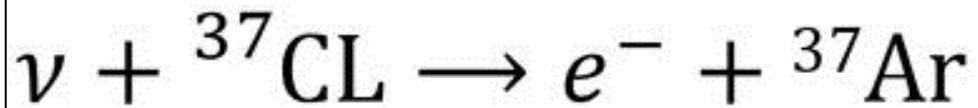


Солнечные нейтрино

В каждой реакции пр цикла рождается 2 электронных нейтрино с энергией ~ 100 кэВ. Полный поток нейтрино на орбите Земли порядка 10^{11} /см² с .



Девис Раймонд – первый человек, обнаруживший солнечные нейтрино (1970 год).

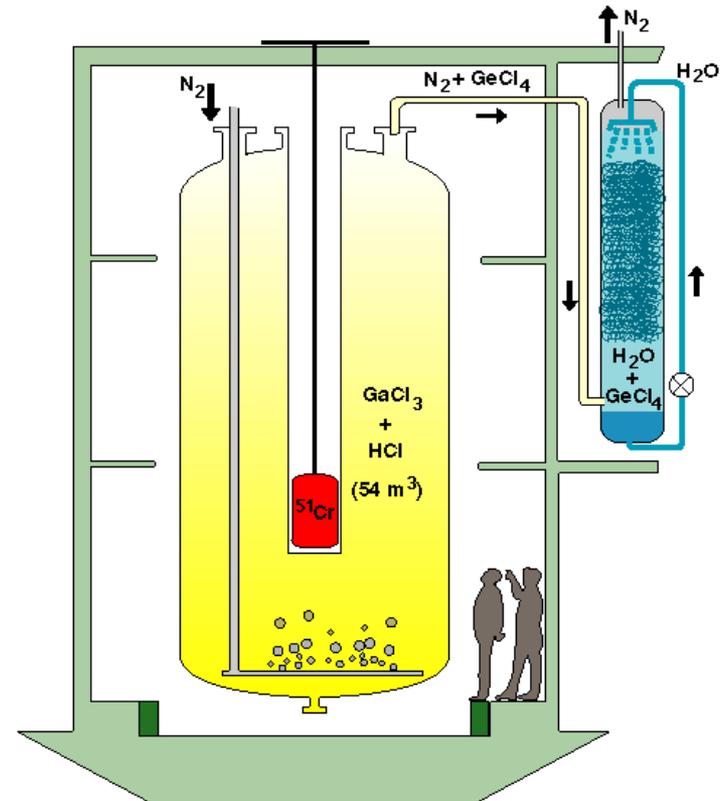




Солнечные нейтрино

Эксперимент Gallex – с 1991 по 1997 год. Италия – под горой Гран-Сассо.

Масса – около 100 тонн реагента. Примерно 1 событие в сутки. Показан дефицит нейтрино - около 1/3 от ожидаемого потока.

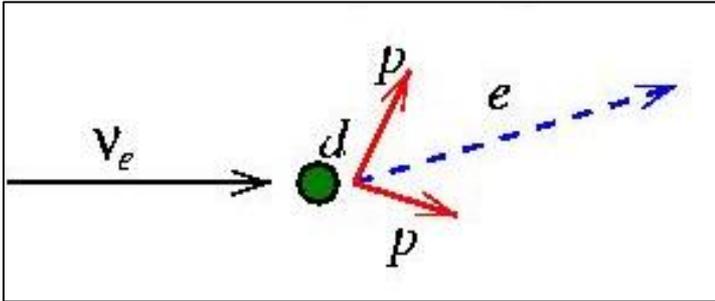




Солнечные нейтрино

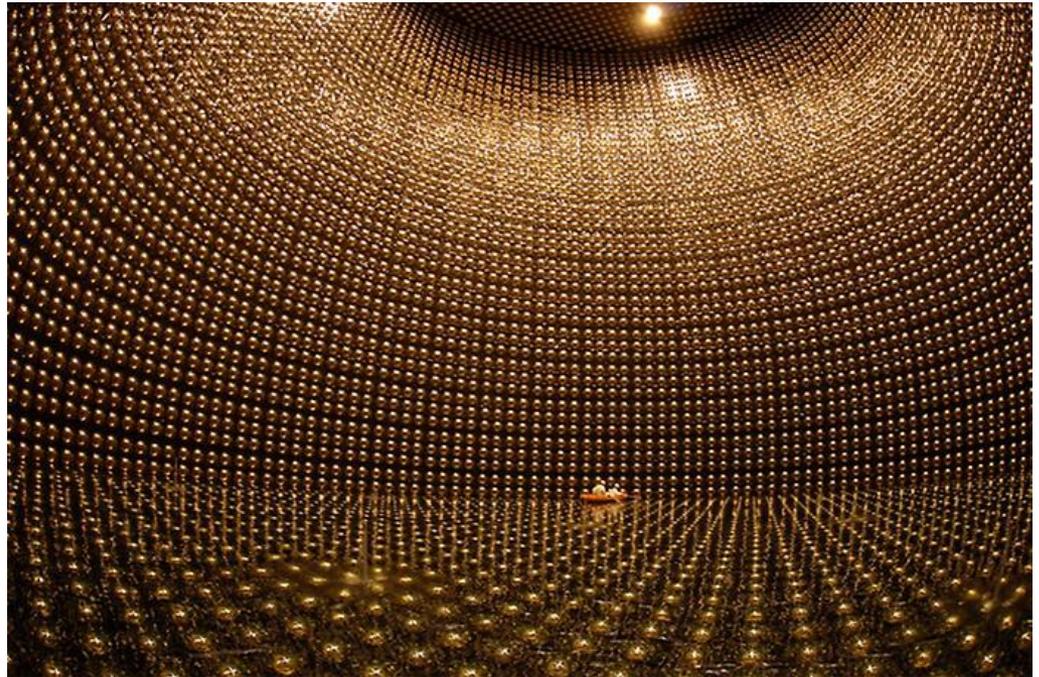
Sudbury Neutrino Observatory – с 1999 по 2006 год. Канада.

Масса – около 1000 тонн тяжёлой воды. Первое в мире прямое доказательство осцилляций нейтрино.



Супер-Камиоканде (Япония)

50 тысяч тонн чистой тяжёлой воды



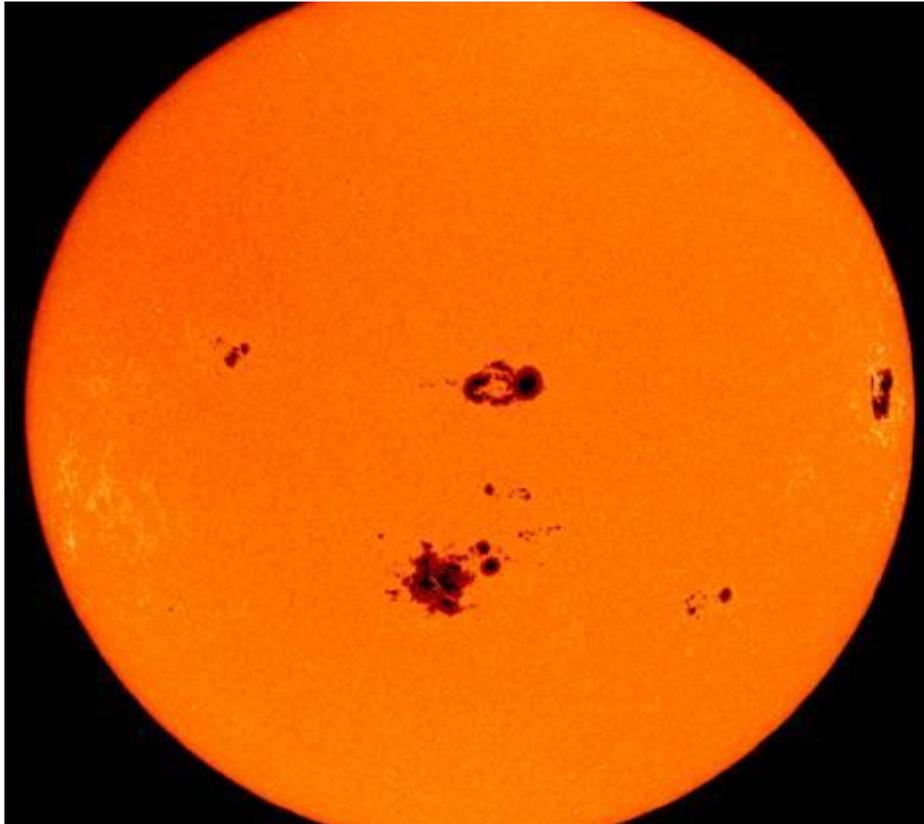
Стерильные
нейтрино - ?



Вид Солнца с Земли - пятна

Солнечные пятна – основная деталь, видимая с Земли.

Галилей, Штейнер – начало XVII века (~ 1610)



Размеры пятен – до 1 угловой минуты.

Максимальная площадь – не более 1 % площади диска.

В 80 % случаев – пятна есть.

В 20 % случаев – нет.



Солнечный цикл

Самуэль Генрих Швабе

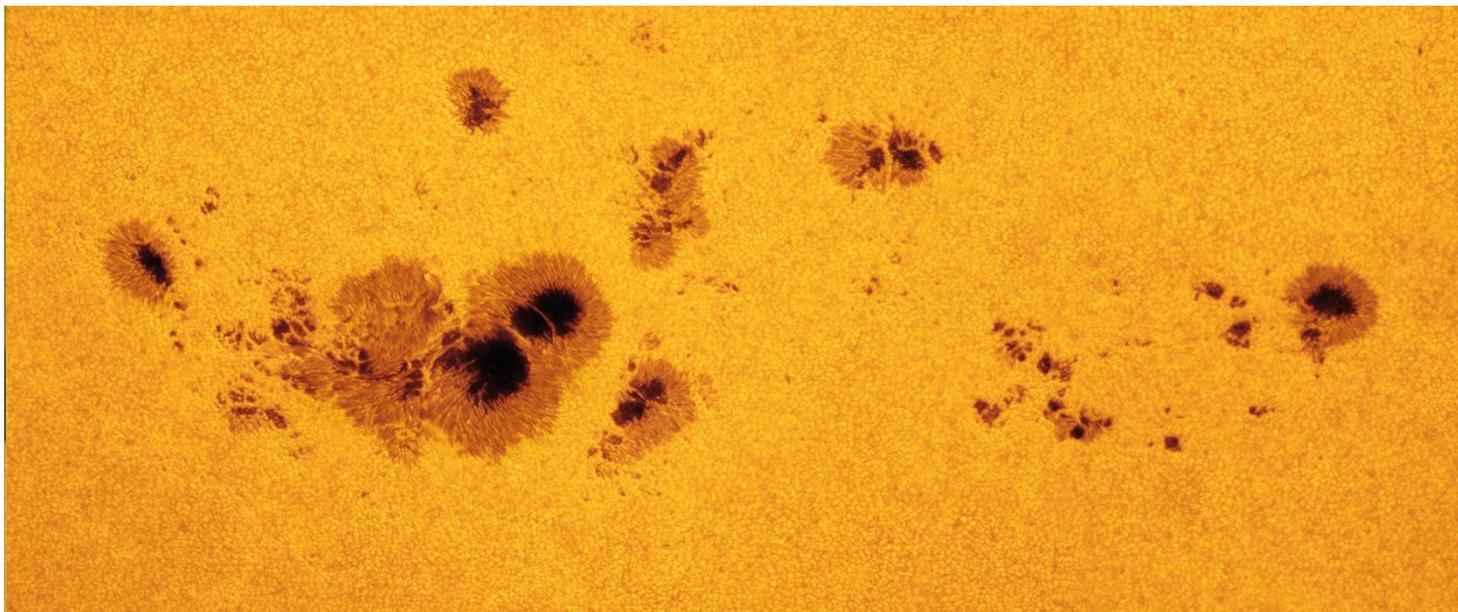
Наблюдал Солнце с 1826 по 1843 год.

Рудольф Вольф

Директор обсерватории в г. Берн.

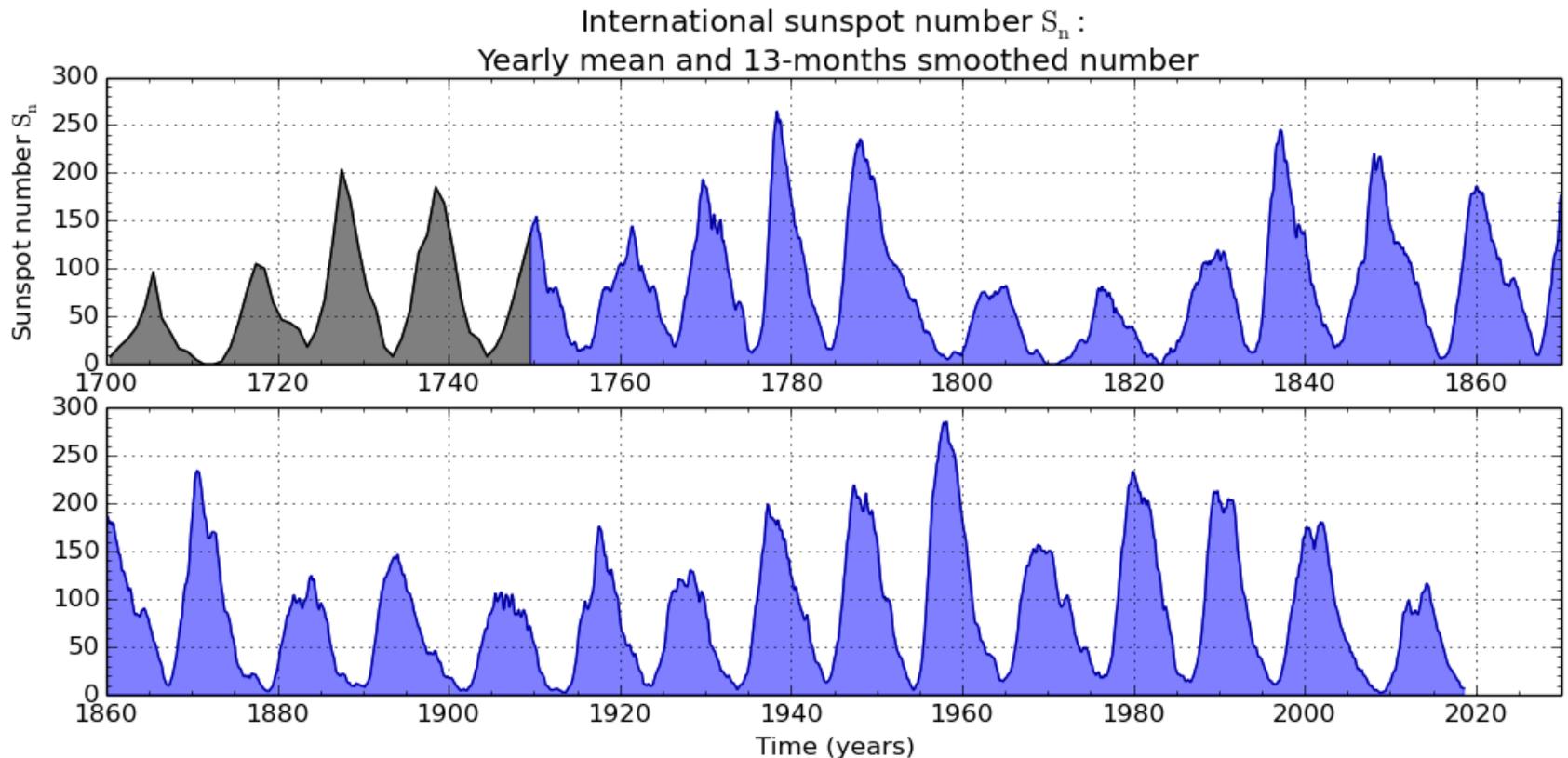
Число Вольфа.

$$W = 10 \times G + N$$





Солнечный цикл



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2019 March 1

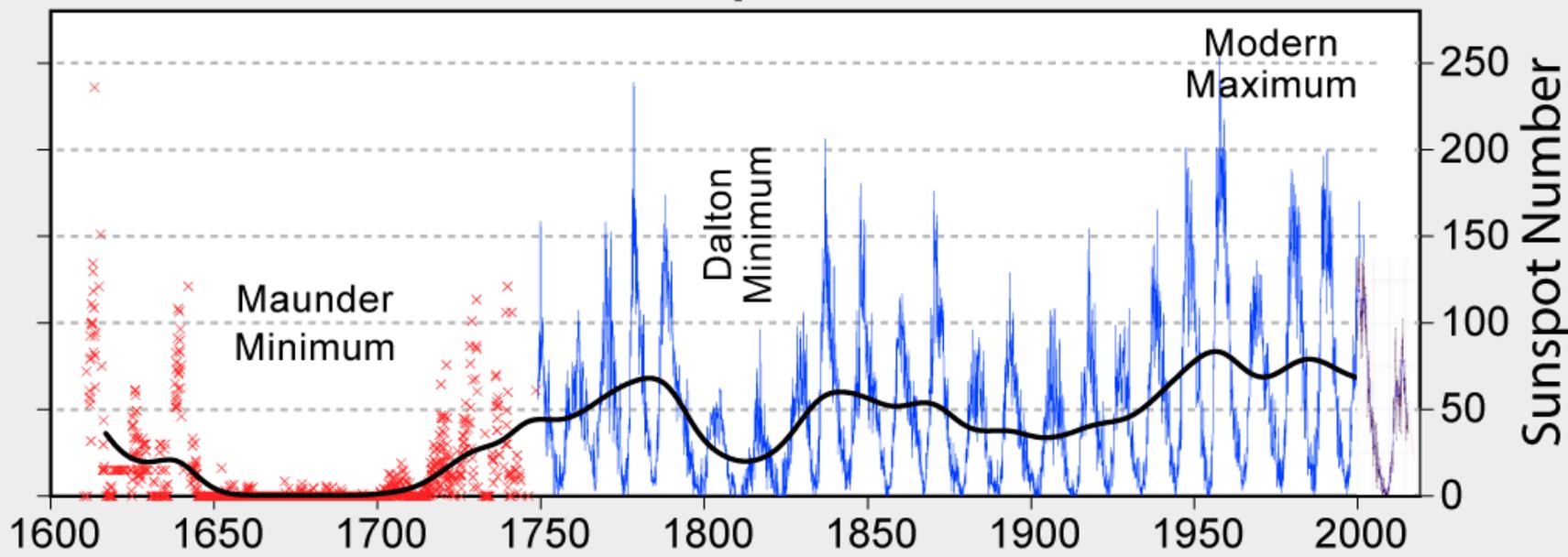
Канонический ряд солнечной активности

С 1749 года – данные обсерватории Цюрих. Сейчас окончился цикл № 24.



Солнечный цикл

400 Years of Sunspot Observations



Данные по солнечной активности – прямые измерения.

Основной период ~ 11 лет.

Огибающая – вековой цикл (~ 87 лет).

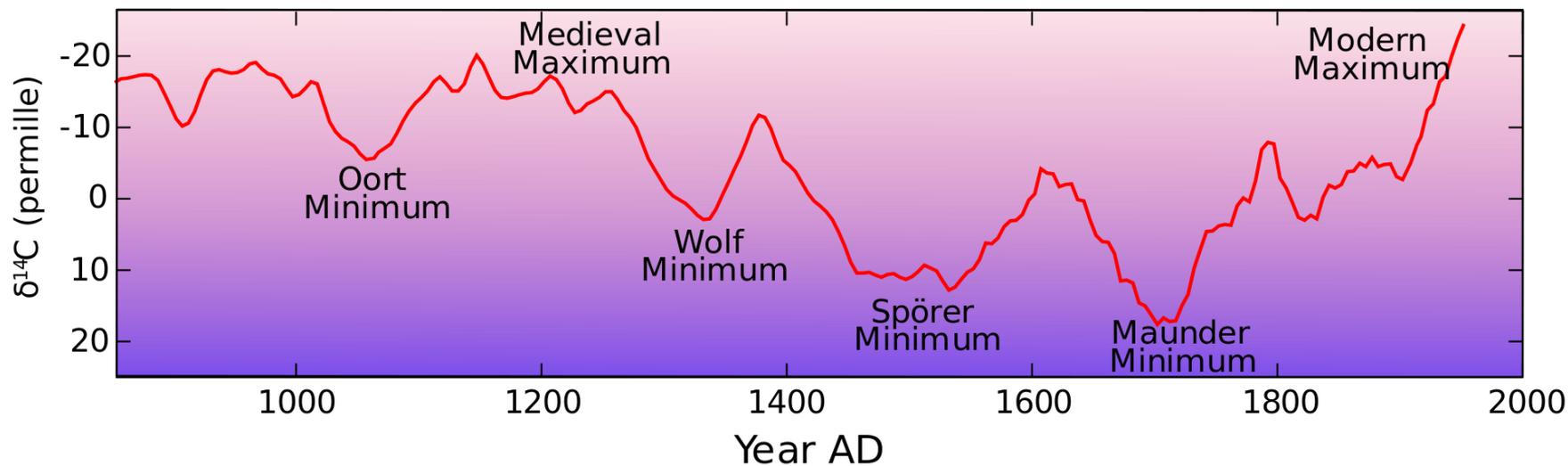


Солнечный цикл

Измерения по радиоактивному углероду



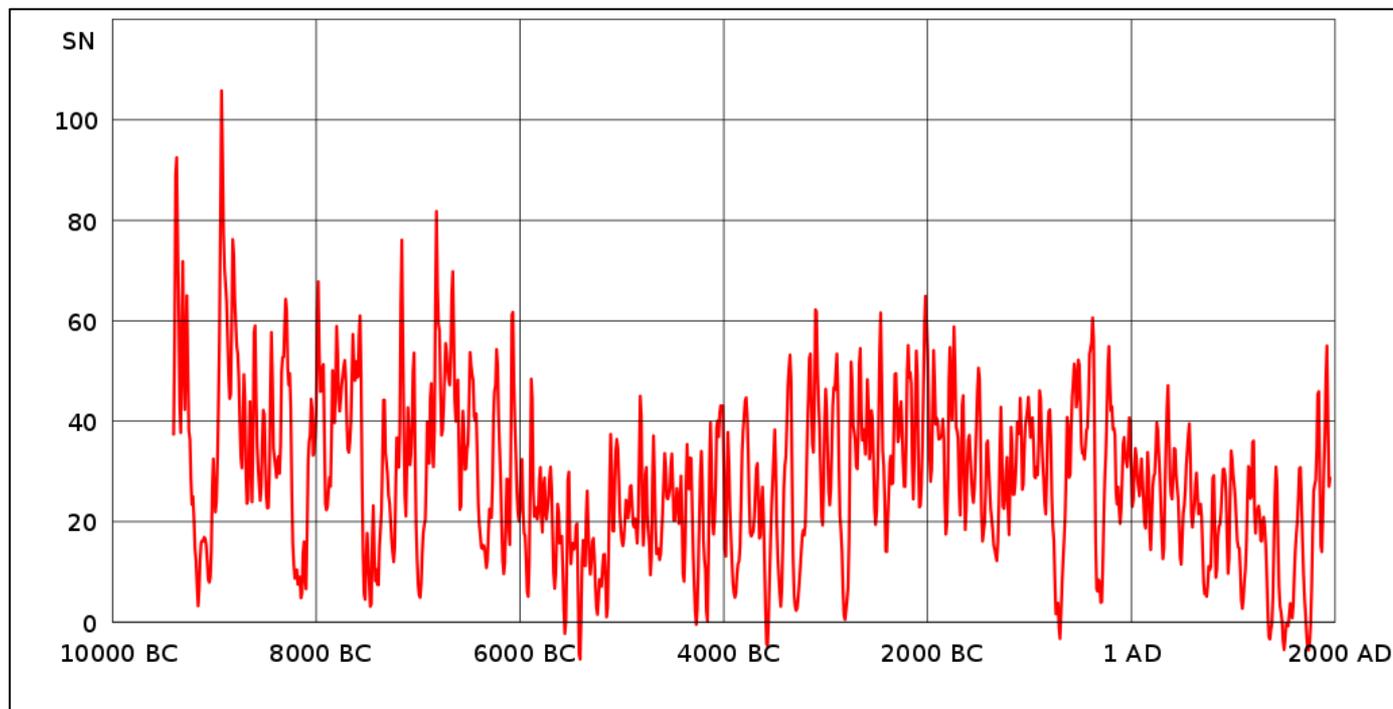
Solar Activity Events in ${}^{14}\text{C}$





Солнечный цикл

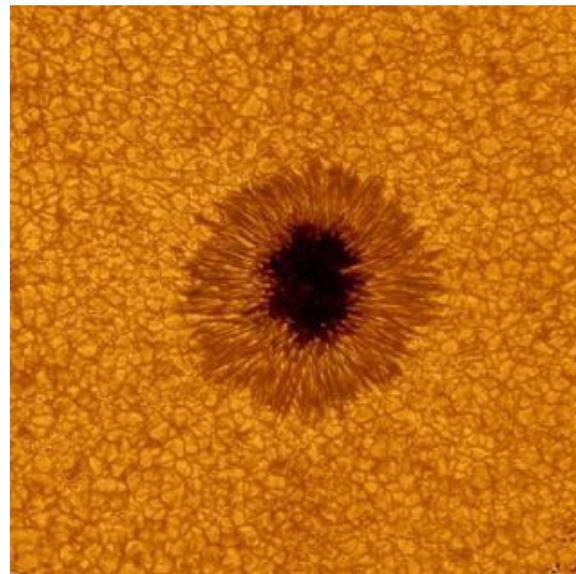
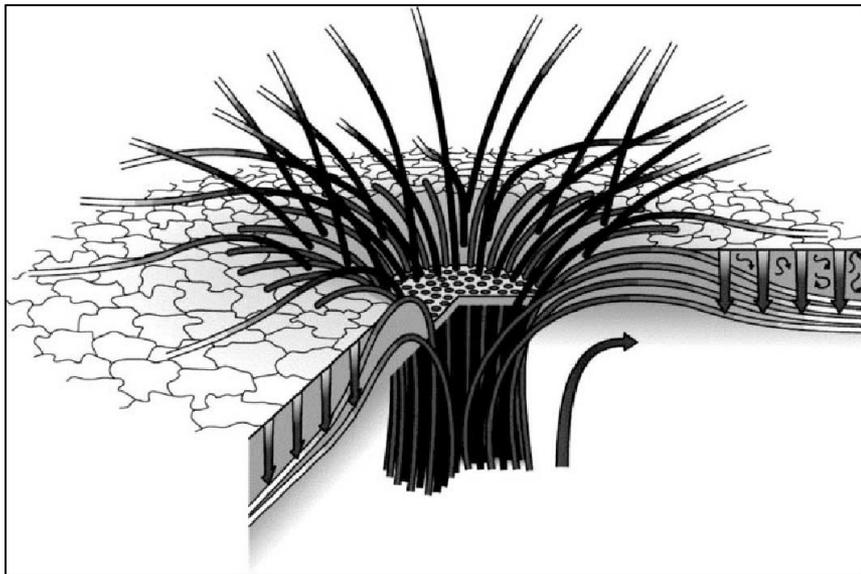
Измерения по радиоактивному углероду



Данные по солнечной активности – косвенные измерения.
Следующие моды – 210 лет, 2300 лет, возможно ~ 10 000 лет.



Солнечный цикл

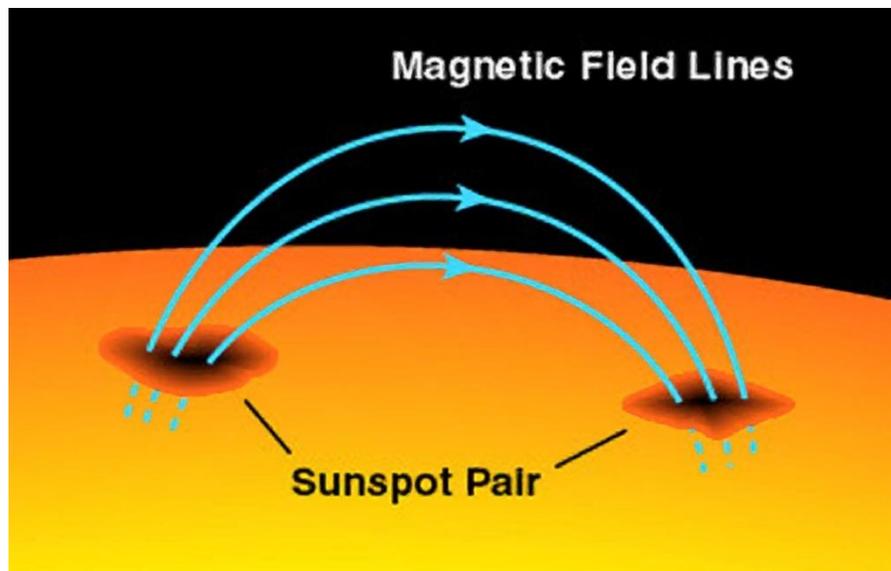


Природа пятен

Более холодный участок (4500 vs 6000 K). Образуется в месте усиления магнитного поля – подавление конвекции.



Солнечный цикл

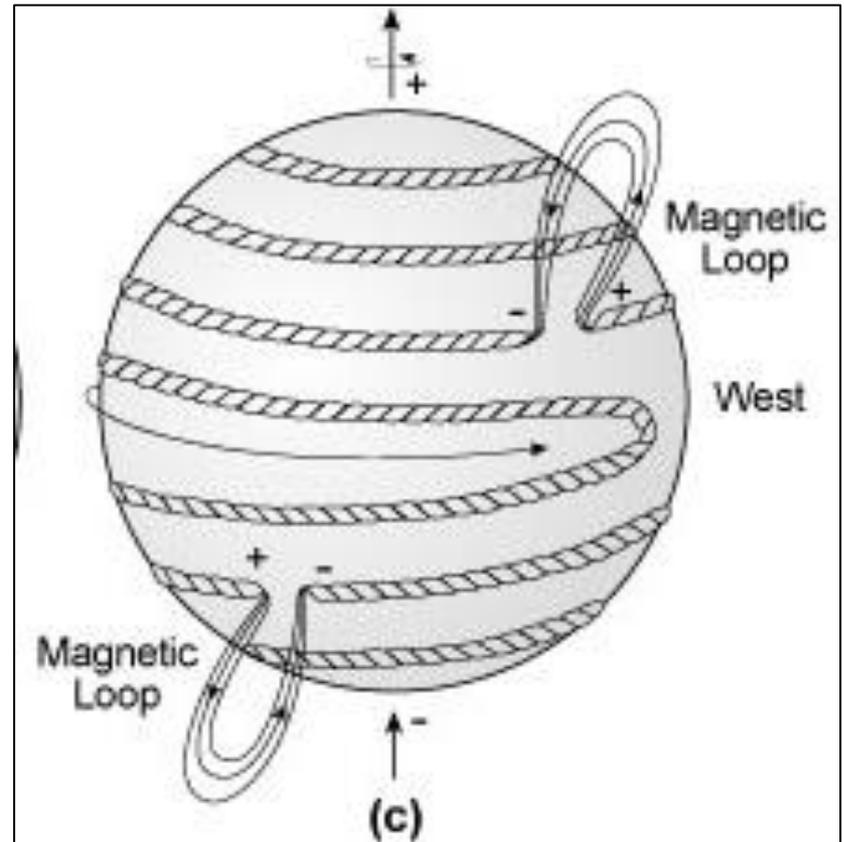
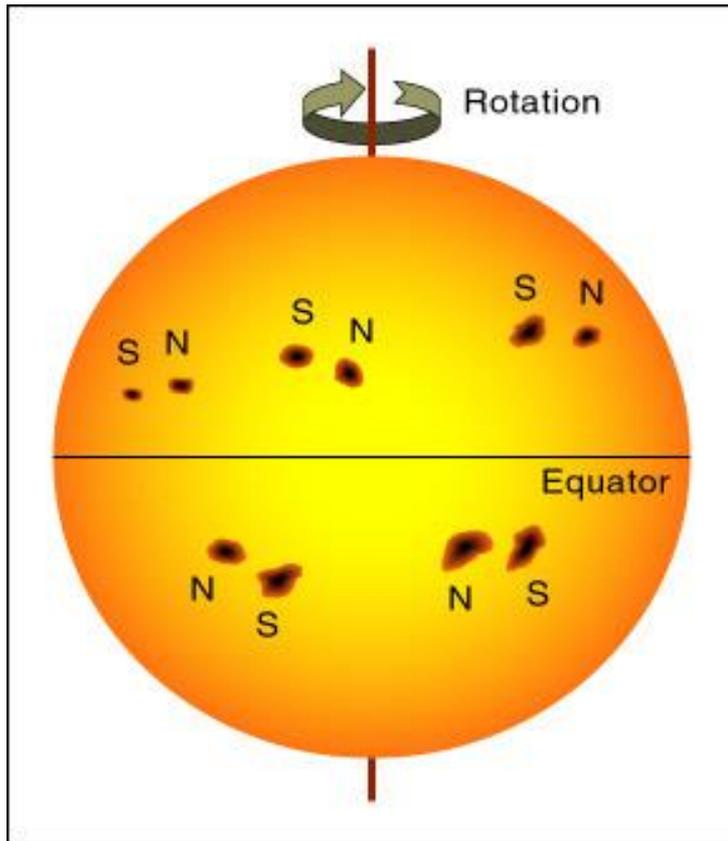


Природа пятен

Более холодный участок (4500 vs 6000 К). Образуется в месте усиления магнитного поля – подавление конвекции.



Солнечный цикл

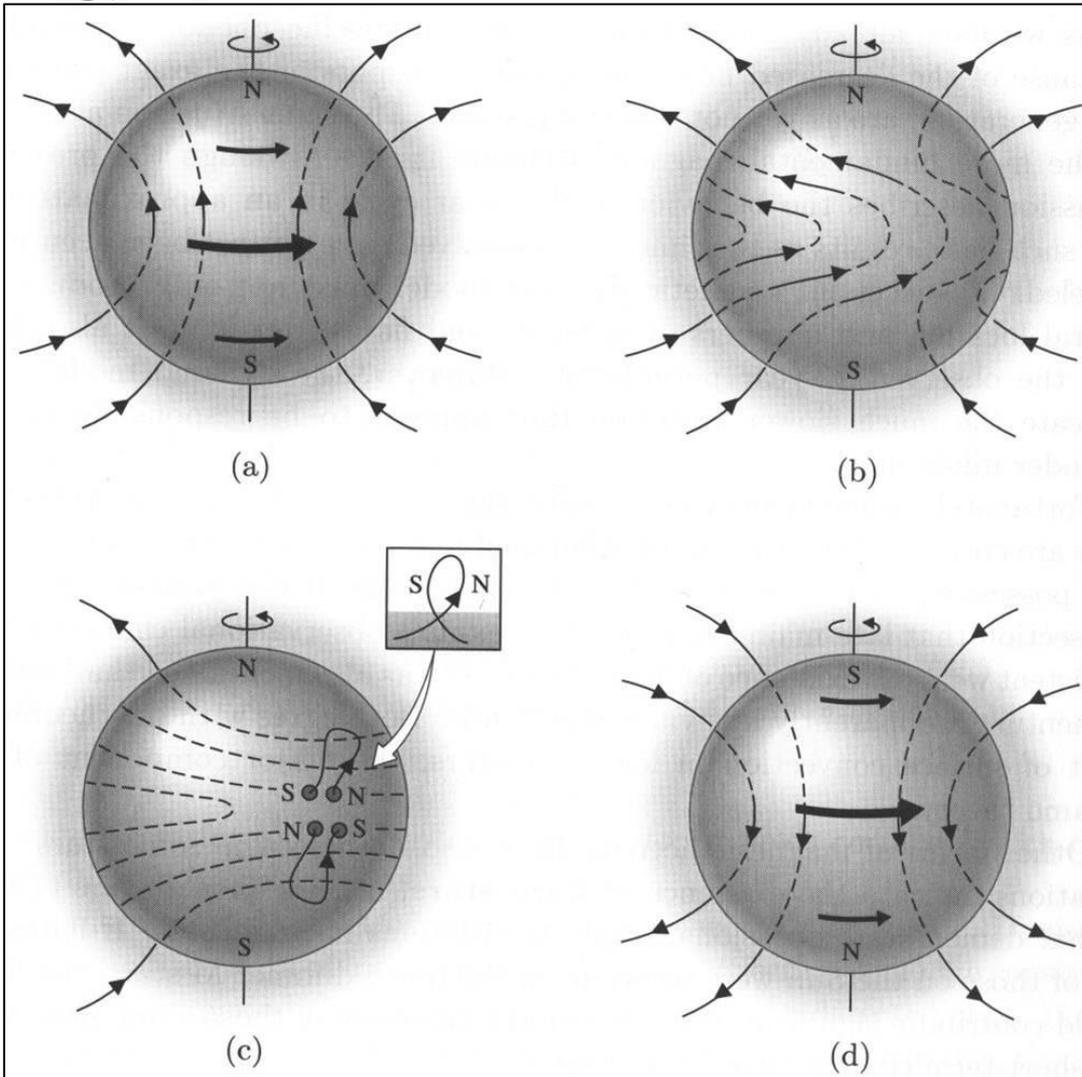


Природа солнечного цикла

Формирование и распад с шагом 11 лет тороидального магнитного поля Солнца.



Солнечное динамо

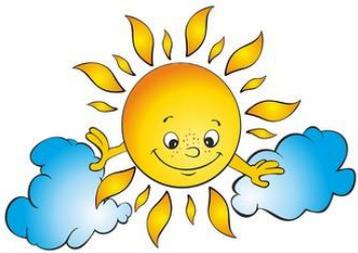


Преобразование с шагом 11 лет слабого дипольного (полоидального) поля Солнца в сильное тороидальное и его распад.

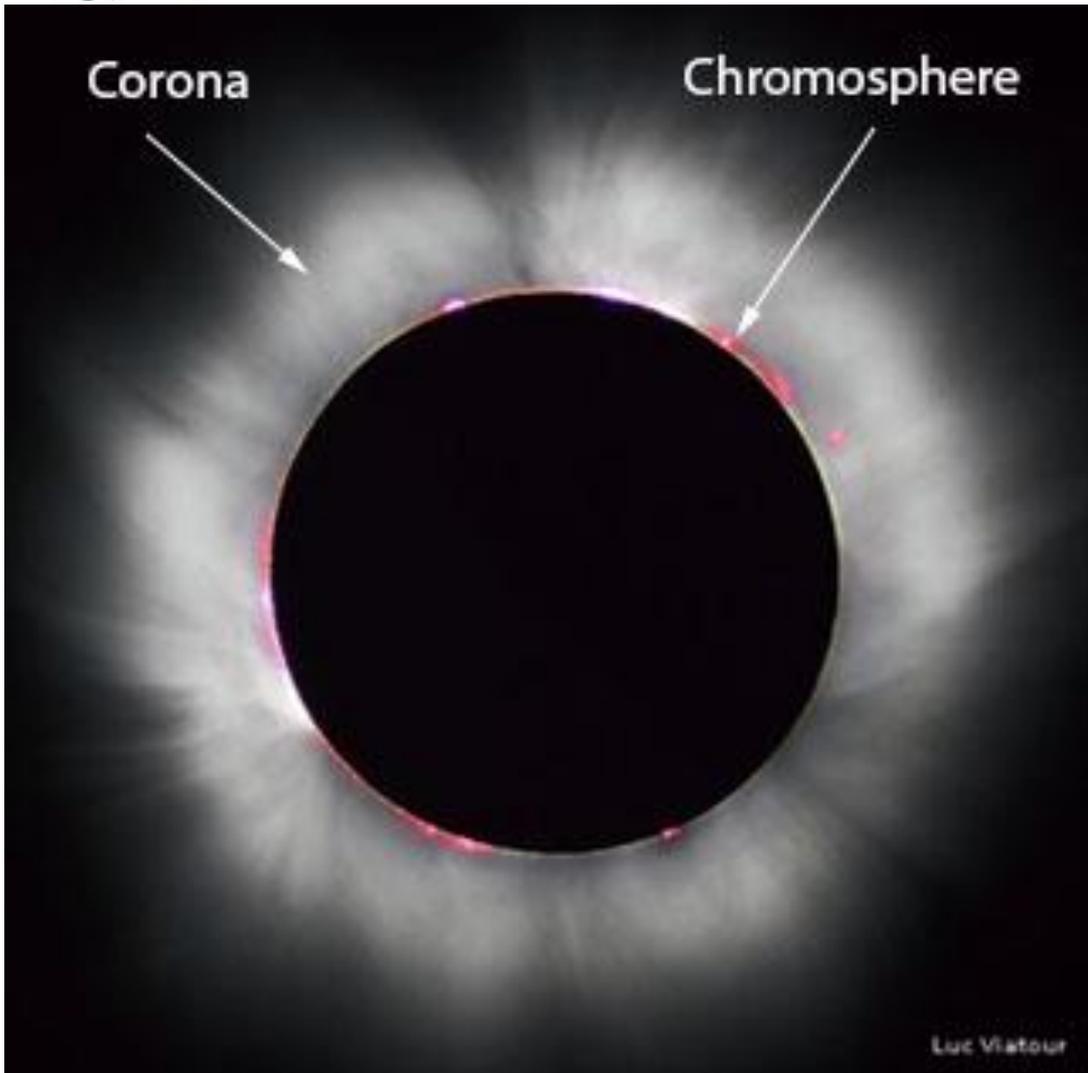
Синхронизовано 2 процесса:

- 1) Переполюсовка с шагом 11 лет
- 2) Меридиональное течение с периодом 11 лет.

Механизм – дифференциальное вращение.



Солнечная атмосфера



Хромосфера

Красное кольцо вокруг диска. Общая светимость $\sim 0.5\%$. Место формирования линий излучения Солнца:

$H\alpha = 6563 \text{ \AA}$ – красная.

жёлтые

$\text{NaI D1} = 5896 \text{ \AA}$

$\text{NaI D2} = 5890 \text{ \AA}$

$\text{HeI D3} = 5875 \text{ \AA}$

фиолетовые

$\text{CaII H} = 3968 \text{ \AA}$

$\text{CaII K} = 3934 \text{ \AA}$



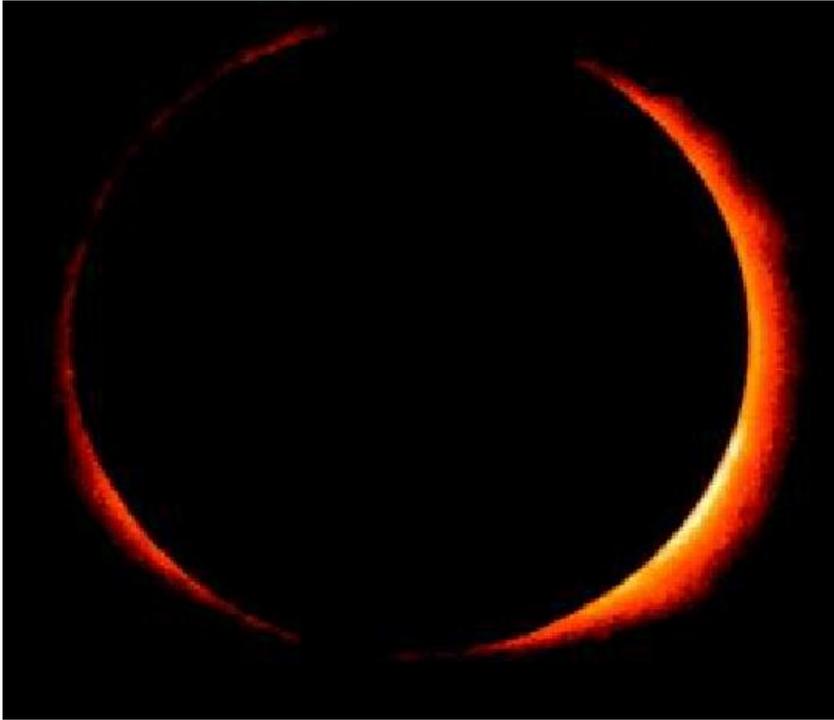
Солнечная атмосфера



Корона. Содержит 10^{-6} от видимого света. Полностью тонет в рассеянном свете неба. Электроны, подсвечиваемые оптическим излучением – томсоновское рассеивание. Сильно поляризована. Плотность от 10^6 до 10^9 см^{-3} . Масса – меньше массы атмосферы Земли.



Солнечная атмосфера



Короний.

Красная линия – 6374 А

Зелёная линия – 5303 А

Соответствуют запрещённым
линиям сильно ионизированных
атомов железа:

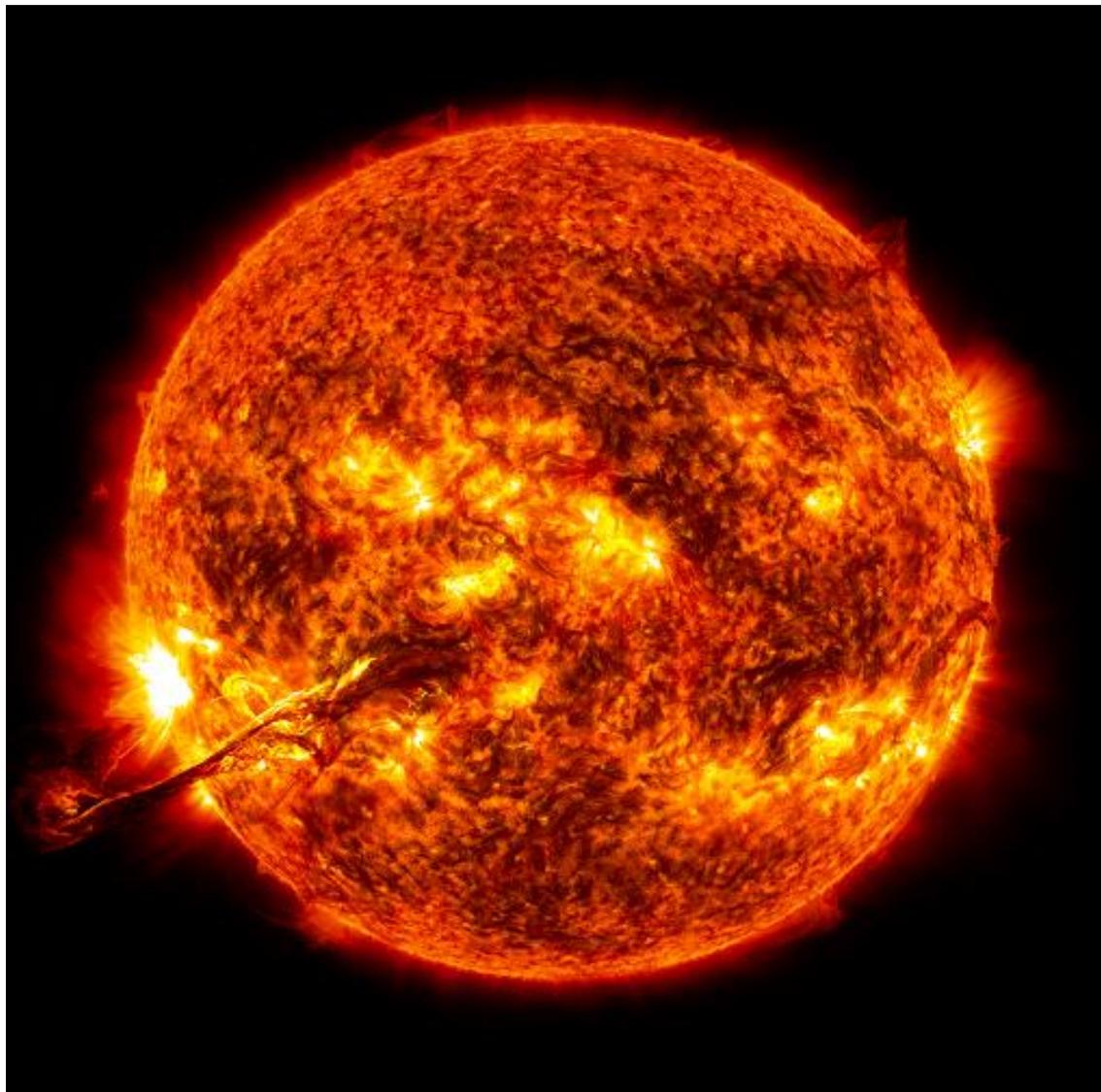
FeX – красная

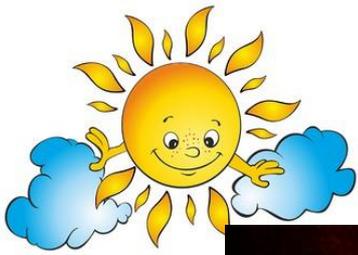
Fe XIV – зелёная.

Позволяют наблюдать корону с Земли – внеатомные коронографы.



Солнечная атмосфера



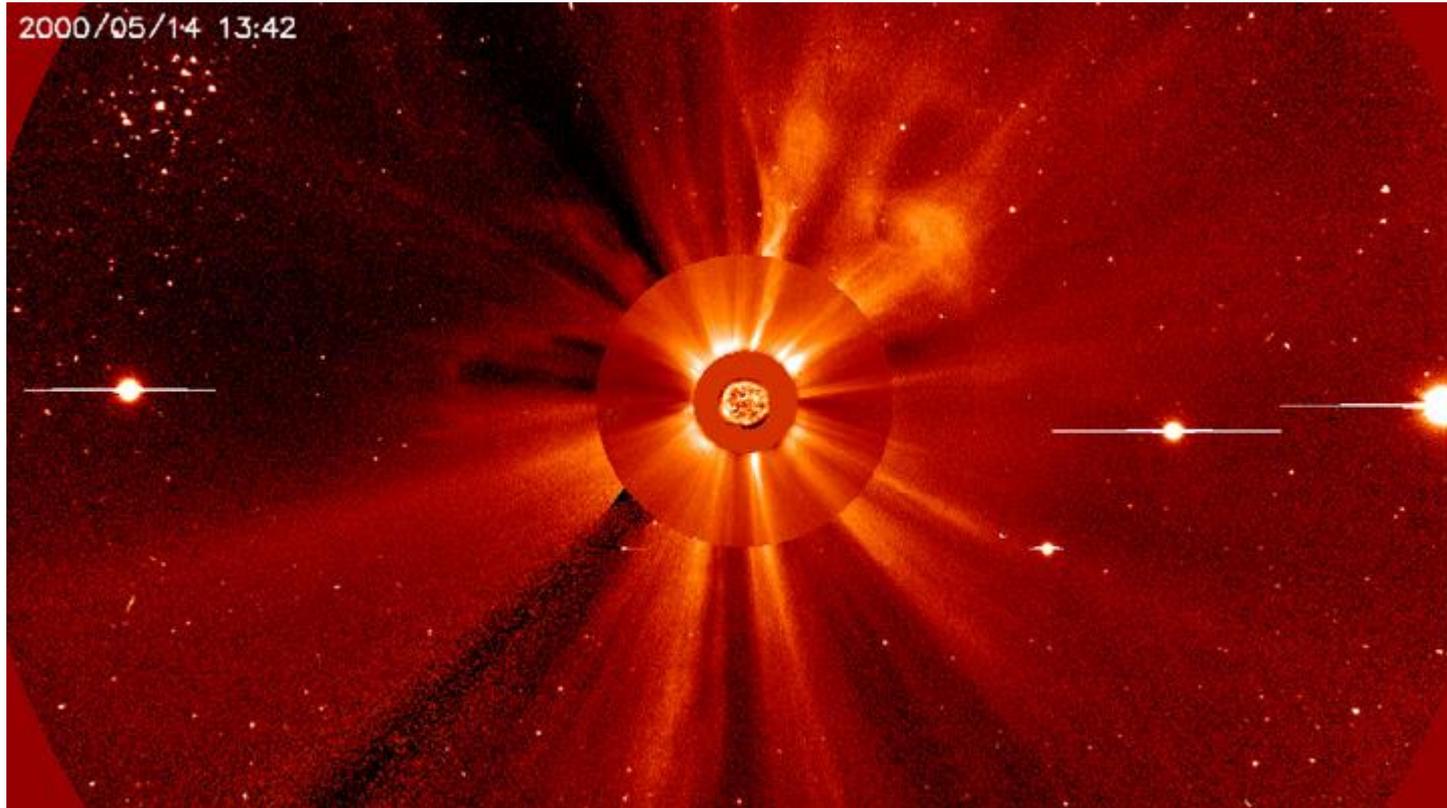


Солнечная атмосфера





Внешние слои Солнца



Внешняя атмосфера Солнца прослеживается в оптике до 20-30 солнечных радиусов, а радиозондированием до 100 солнечных радиусов.



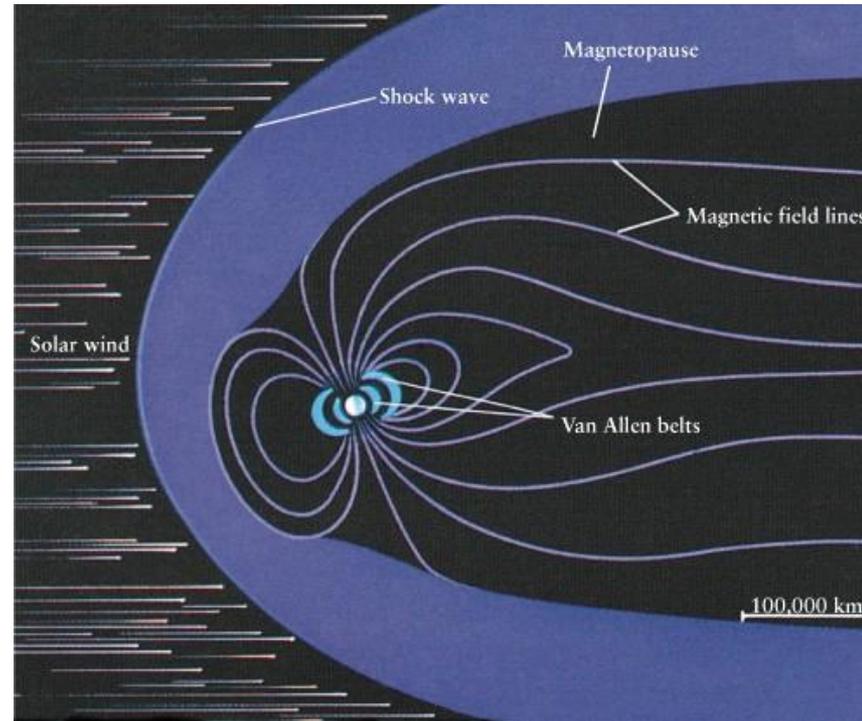
Солнечный ветер



Первые модели – статичные. Не сшивались с межзвёздной средой.
Модель Паркера (1958 год) – сверхзвуковое течение.



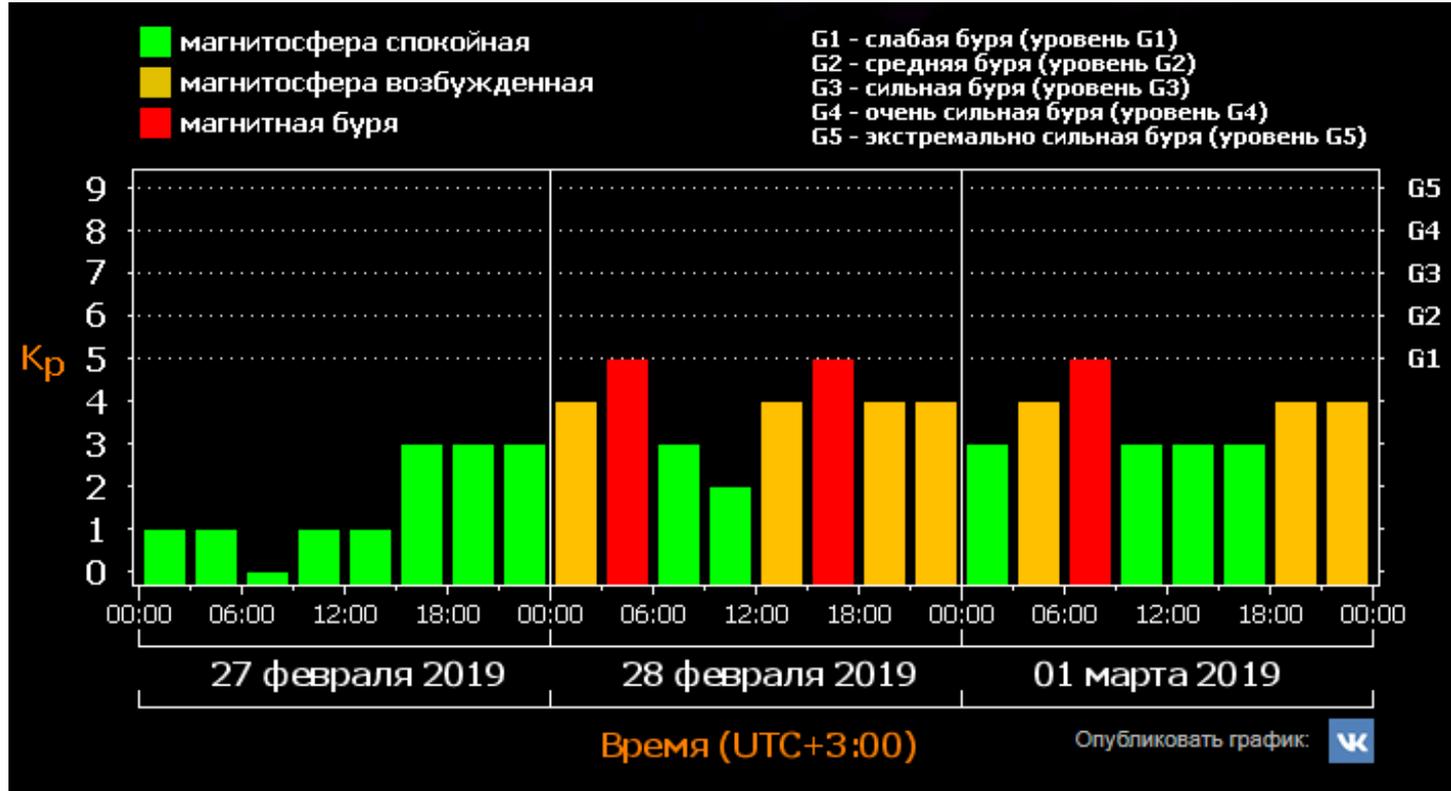
Солнечный ветер и магнитосфера



Солнечный ветер оказывает давление на магнитосферу Земли. Так как ветер может иметь разные скорости (из-за неоднородности Солнца) то это давление меняется – геомагнитные возмущения.



Солнечный ветер и магнитосфера

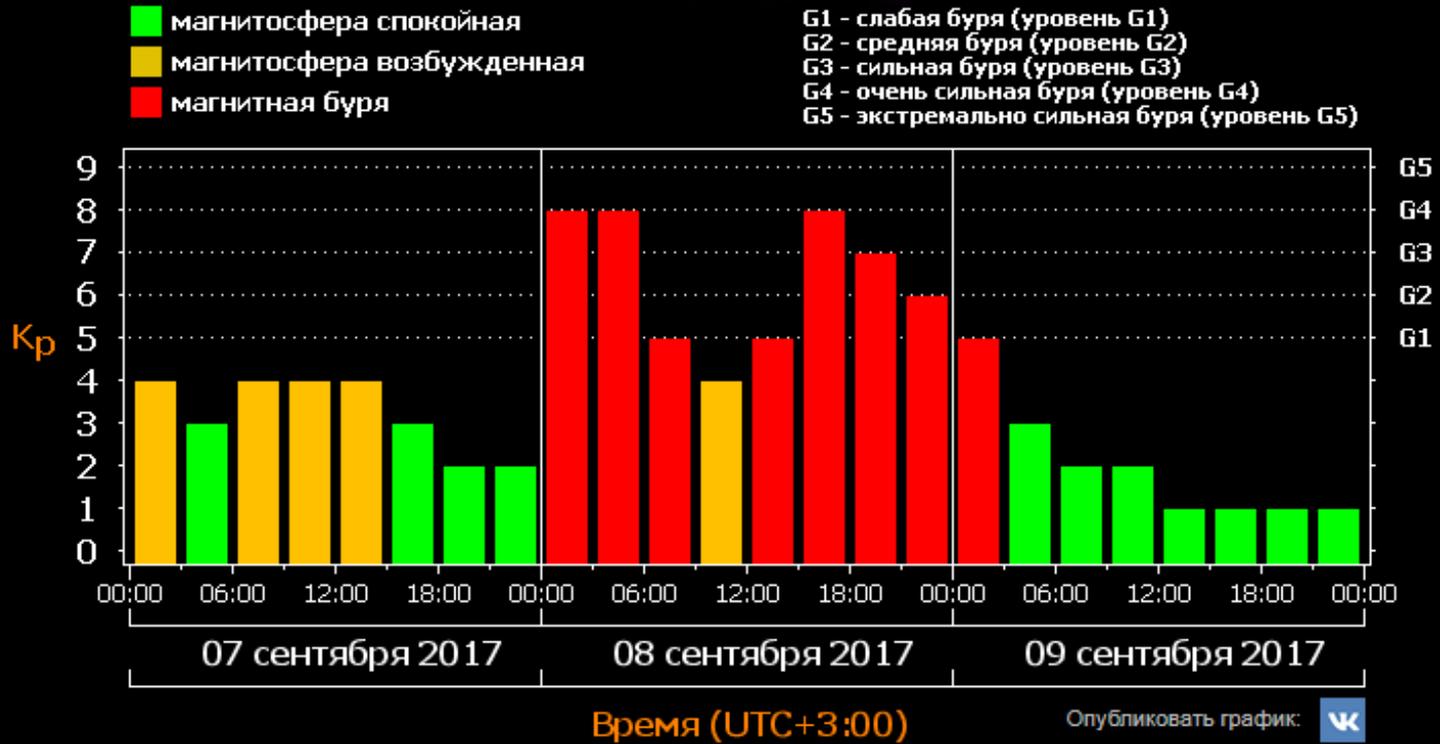


Существует достаточно тесная связь солнечной активности с состоянием магнитосферы. Пример реакции магнитного поля на прохождение через поток быстрого ветра в начале марта этого года.

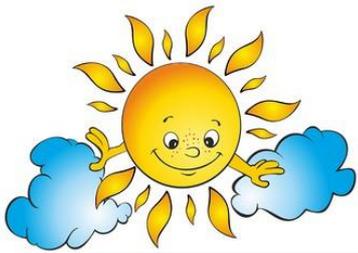


Вспышки и магнитосфера

Магнитные бури с 7 по 9 сентября 2017 года



Другие факторы воздействия – солнечные вспышки. Наиболее сильные бури.



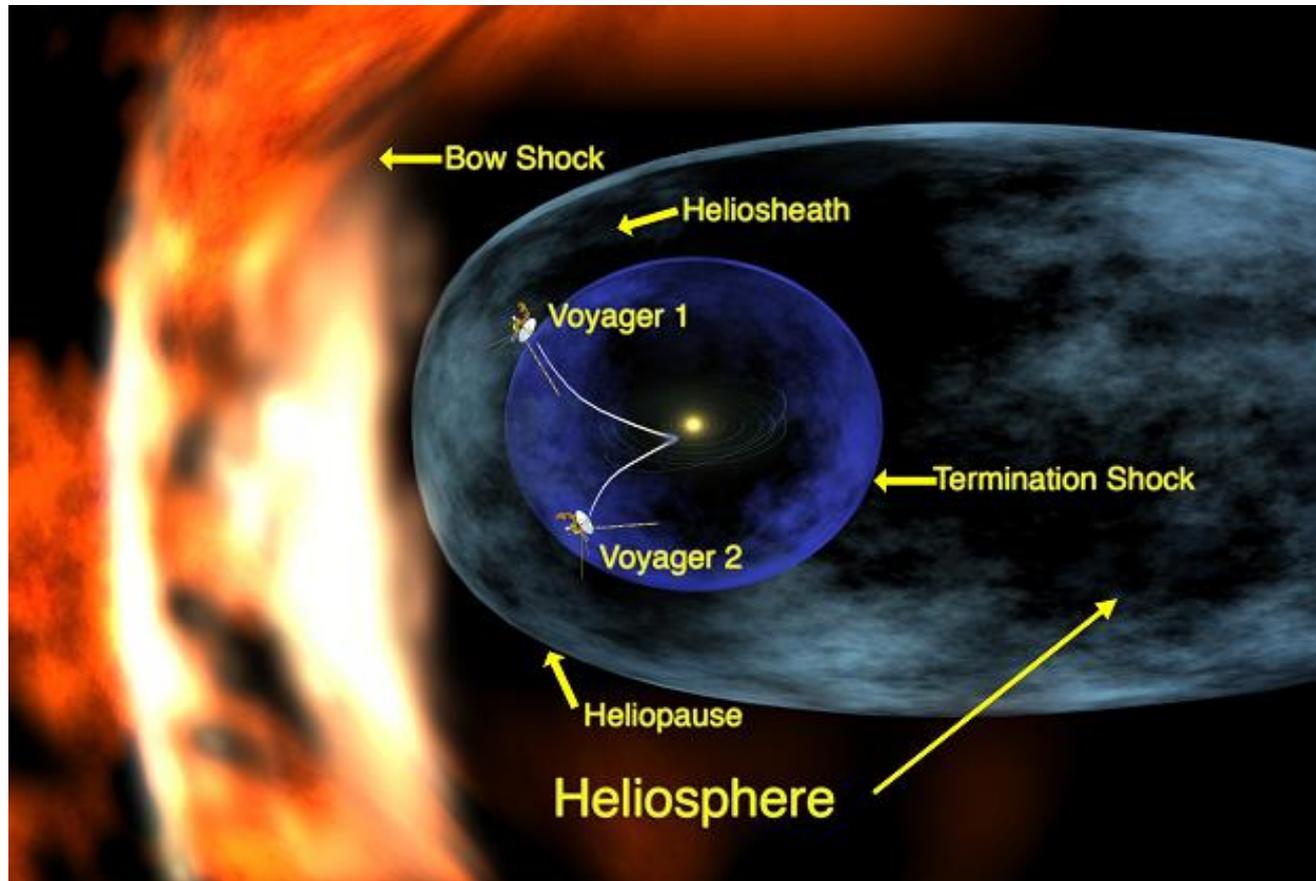
Вспышки и магнитосфера



Полярные сияния – ещё одно проявление солнечной активности.



Гелиосфера



Гелиопауза

Солнечная атмосфера заканчивается там, где останавливается солнечный ветер.

«Вояджер-1» стал первым зондом, передавшим информацию об условиях, царящих в межзвёздной среде. Вышел в 2013 году. Запущен в 1977 году.