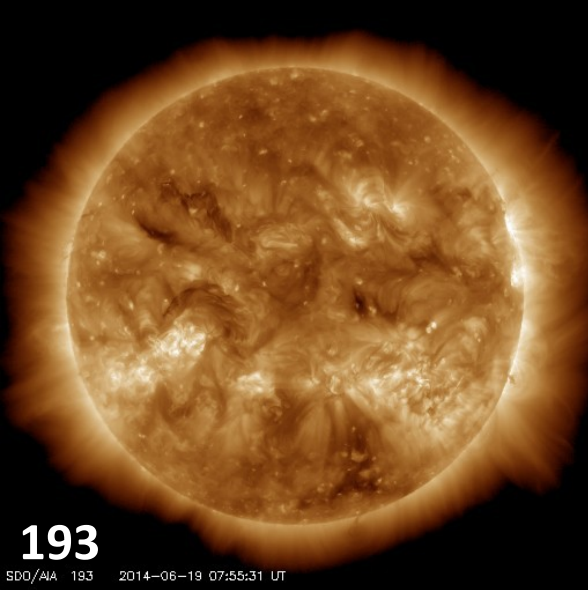
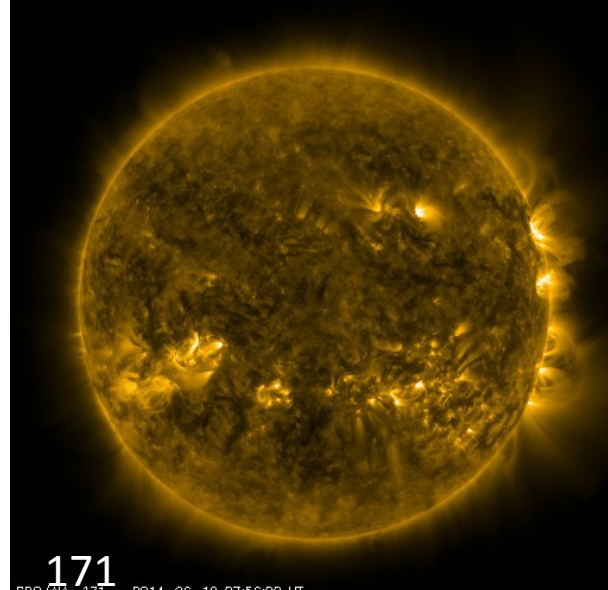


Физические процессы на Солнце

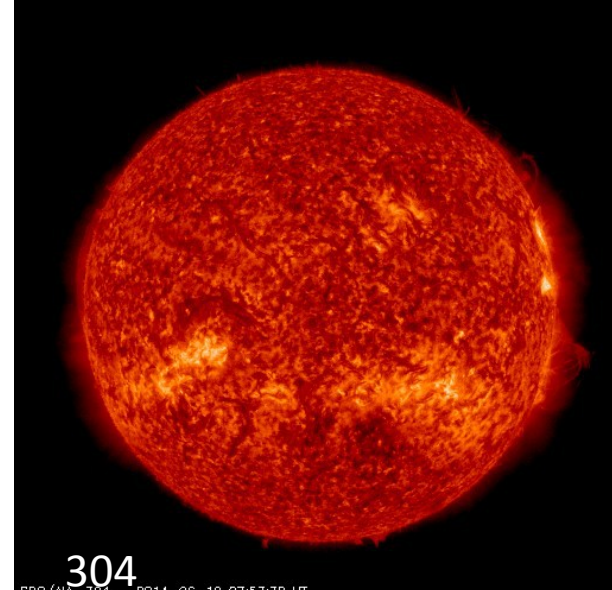
Лекция 25.06.2014 г. ГАИШ
Якунина Галина Валентиновна



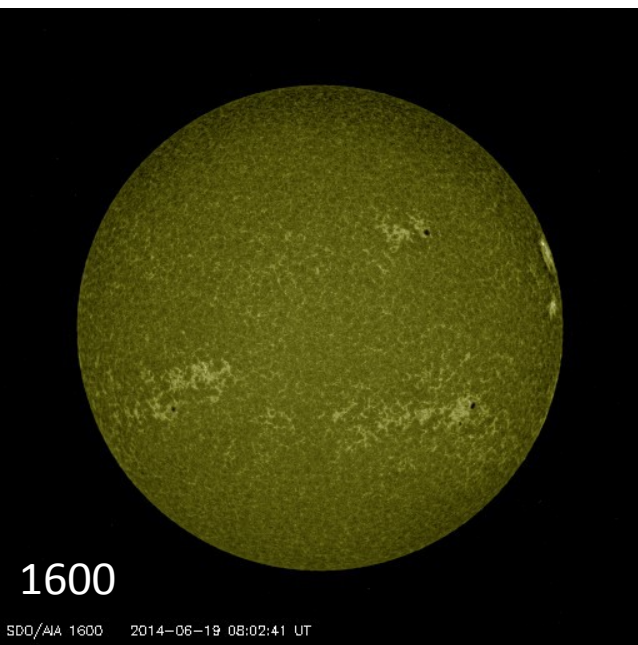
193
SDO/AIA 193 2014-06-19 07:55:31 UT



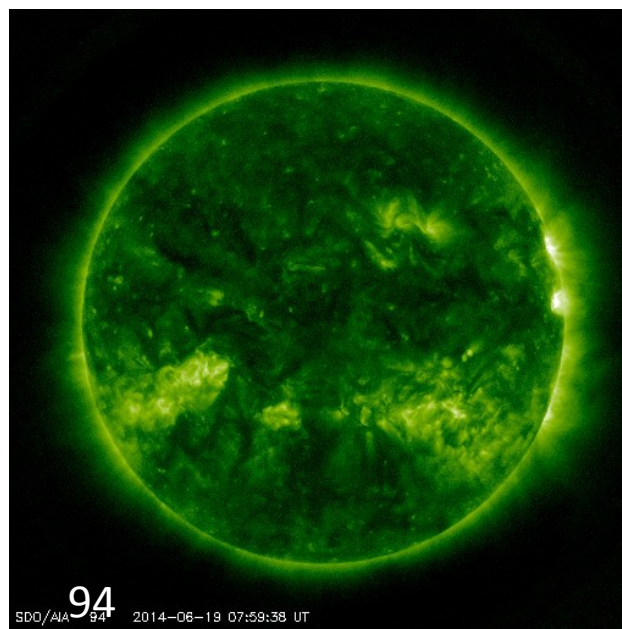
171
SDO/AIA 171 2014-06-19 07:56:00 UT



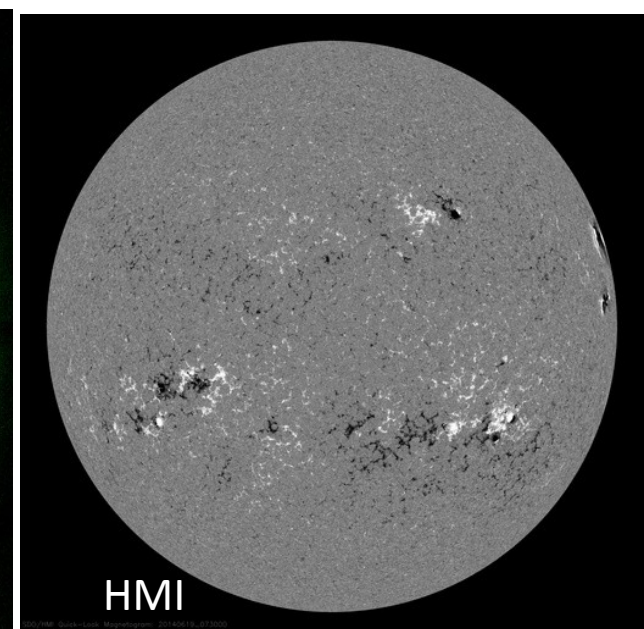
304
SDO/AIA 304 2014-06-19 07:53:32 UT



1600
SDO/AIA 1600 2014-06-19 08:02:41 UT

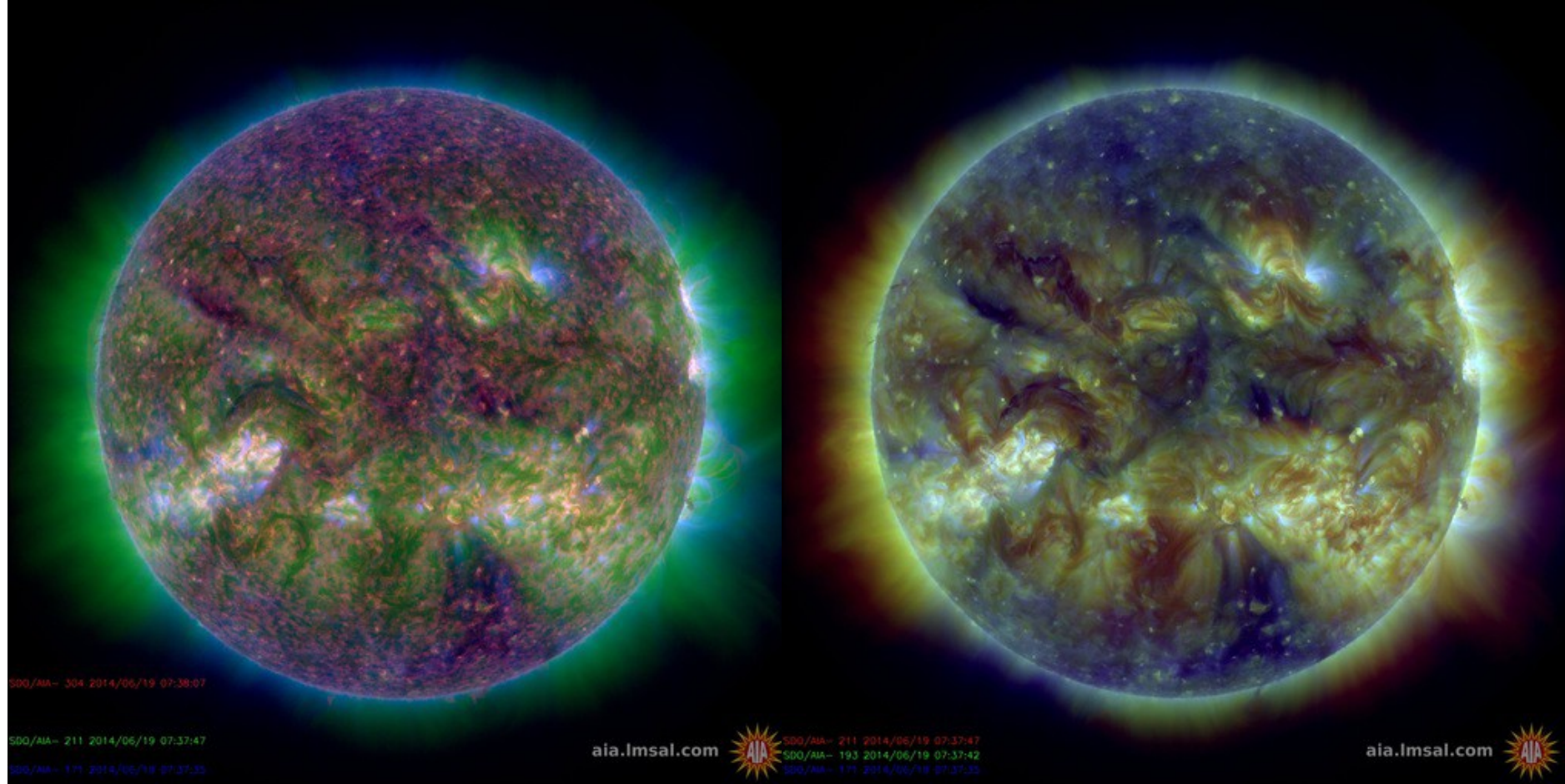


94
SDO/AIA 94 2014-06-19 07:59:38 UT



HMI
SDO/HMI G1000-Look MagnetoGram 20140619_073000

19 июня 2014



304, 211, 171

211, 193, 171

19 июня 2014

Характеристики Солнца

Возраст Солнца: 4.57 миллиардов лет

Масса Солнца: Масса 1.9891×10^{30} кг, это (**332 946 масс Земли**)

Радиус Солнца составляет: 695 990 км или **109 радиусов Земли**

Расстояние от Земли до Солнца: 149 600 000 км, свет проходит это расстояние **за 8.31 световых минут** (1 астрономическая единица)

Светимость Солнца: 3.846×10^{33} эрг/сек

Температура поверхности Солнца 5770 К, а в центре Солнца - 15 600 000 К

Плотность плазмы на поверхности Солнца: 2.07×10^{-7} г/см³ (**в 10000 раз меньше плотности воздуха при атмосферном давлении**)

Плотность плазмы в центре Солнца: 150 г/см³

Химический состав на поверхности: 70% водорода (H), 28% гелия (He), на остальные элементы по массе приходится не более 2%

Химический состав в центре Солнца: 35% водорода (H), 63% гелия (He), на остальные элементы по массе приходится не более 2%

Ускорение свободного падения на Солнце: 274 м/с² (почти в 30 раз больше, чем на поверхности Земли)

Вторая космическая скорость (необходимая, чтобы преодолеть солнечное притяжение и удалиться от Солнца на произвольное расстояние) на поверхности Солнца составляет 618 км/с

Угловой размер Солнца для земного наблюдателя: 0.5 градуса (~30 угловых минут)

Видимая с Земли звездная величина Солнца: -26.7^m

Абсолютная звездная величина Солнца: $+4.83^m$

Скорость вращения на экваторе: 1 оборот за 25 суток

Скорость вращения на полюсах: 1 оборот за 30 суток

Наклон оси вращения Солнца: $82^\circ 45'$ к плоскости земной орбиты

Параметры внутри галактической орбиты Солнца

Расстояние от центра Галактики: 2.5×10^{17} км (26 000 световых лет)

Расстояние от плоскости Галактики: 4.6×10^{14} км (48 световых лет)

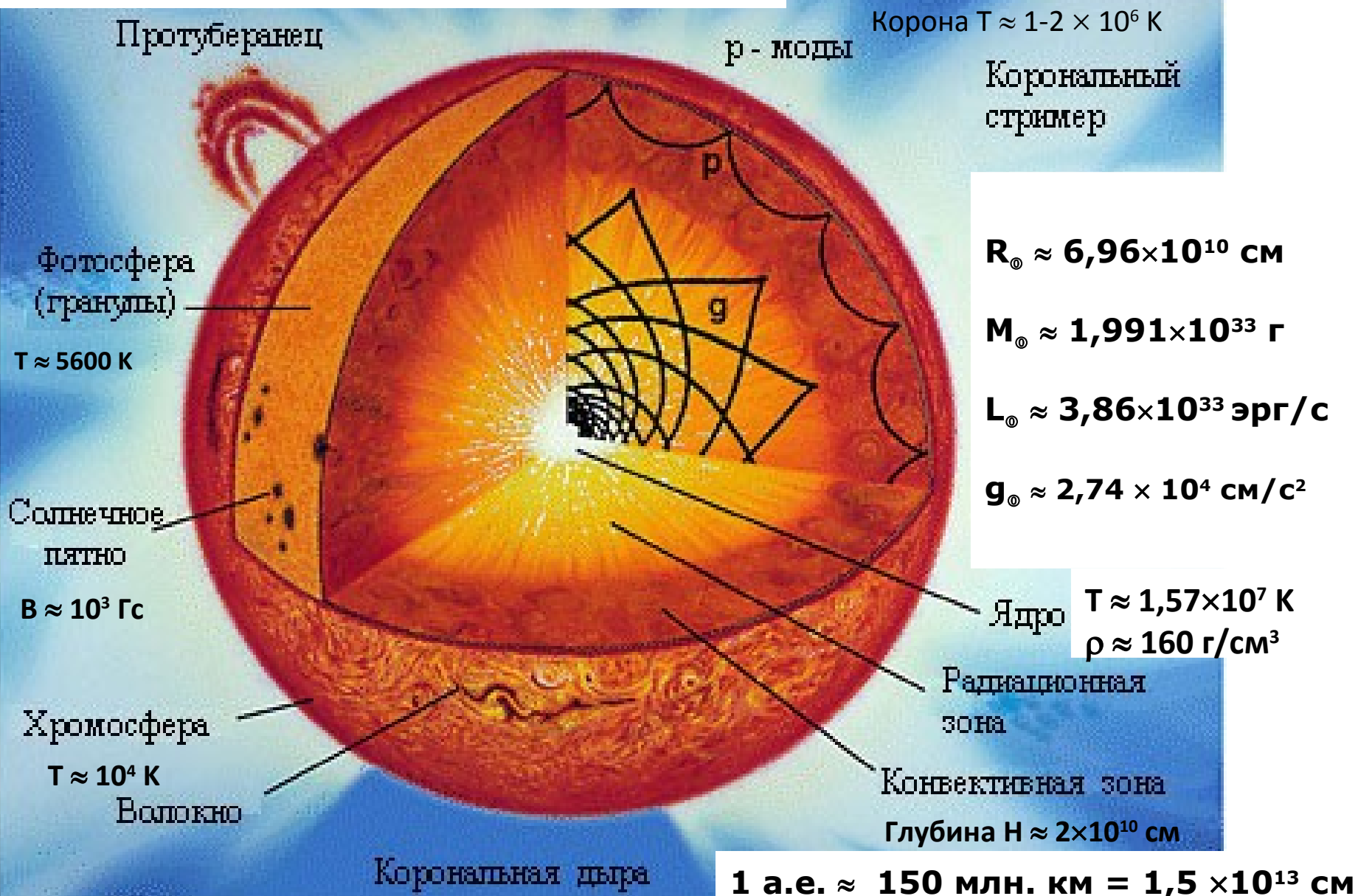
Галактический период обращения: $2.25\text{--}2.50 \times 10^8$ лет

Скорость движения по орбите вокруг центра Галактики: 217 км/с

Скорость движения относительно соседних звёзд Галактики:
20 км/с

Модель Солнца

Средний период вращения Солнца вокруг своей оси 25,38 суток



Наблюдательной основой гелиосейсмологии является набор колебаний, которые позволяют выяснить внутреннее строение и природу Солнца. Достаточно давно известно, что элементы солнечной поверхности осциллируют, то есть периодически движутся вверх и вниз с характерным временем около 5 минут. Природа и источник этих пятиминутных осцилляций оставались загадкой долгие годы с момента их открытия в 1962 году. Загадочный источник пятиминутных колебаний был сначала установлен путем теоретических рассуждений в 1970 году, а затем подтвержден наблюдательно в 1975 году. Область распространения волн и их частота определяются физическими свойствами внутренних слоев Солнца. Внутренние слои Солнца являются сферическими резонаторами для акустических волн соответствующих типов. В гелиосейсмологии, в основном, рассматриваются акустические моды (типы) звуковых колебаний, обусловленные давлением (**p-моды**). Внутренние гравитационные **волны (g-моды)** надежно еще не обнаружены. Отдельное возмущение может распространяться в любом направлении. Одним из важнейших результатов гелиосейсмологии является уточнение положения основания конвективной зоны, 200 тыс. км. А также получили зависимость скорости звука от радиуса, скорость дифференциального вращения в недрах, зависимость параметров колебаний от цикла солнечной активности СА. Гелиосейсмология является единственной возможностью экспериментального изучения изменения с глубиной на Солнце характера дифференциального вращения.

Солнечная атмосфера имеет довольно сложную структуру: фотосфера, хромосфера , корона

- **ФОТОСФЕРА** (светящаяся сфера, сфера света) - поверхностный слой, видимая поверхность тонкая и непрозрачная имеет очень малую толщину (~ **300 км**) нагретая в среднем до 5780 К. Температура конвективного слоя около млн. град. **Плотность газов в фотосфере в тысячи раз меньше, чем воздух у поверхности Земли.** В фотосфере видны **гранулы, факелы, пятна.**

«Видимая» поверхность Солнца определяется той глубиной в атмосфере, ниже которой она практически непрозрачна. За эту поверхность условно принимают уровень, на котором при наблюдении оптическая толщина на длине волны $\lambda = 500$ нм достигает единицы. От этого уровня отсчитывают высоту ***h*** в атмосфере. Видимый нами свет излучается отрицательными ионами водорода. Они же его и поглощают, фотосфера с глубиной быстро теряет прозрачность.

Видимый край Солнца кажется нам очень резким.

- **ХРОМОСФЕРА (окрашенная сфера)** - ярко светящийся ободок вокруг Солнца, который виден во время полных солнечных затмений. Температура хромосферы - около 10 000 К, толщина - 10 000 км, нагрета сильнее фотосферы. В хромосфере наблюдаются **флоккулы, волокна, протуберанцы, серджи, спреи, петли, вспышки, спикеры**.

Спикеры - это вертикальные струи газа, поднимающиеся под действием магнитного поля до 10 000 км и через несколько минут опадающие; **макроспикеры** поднимаются до 40 000 км.

Протуберанцы имеют длину 60 000-600 000, высоту 15000-100000, толщину 4000-15000 км, наблюдаются месяцами, а иногда внезапно взрываются и уносятся от Солнца, превращаясь в корональные выбросы, вызывающие на Земле магнитные бури и полярные сияния.

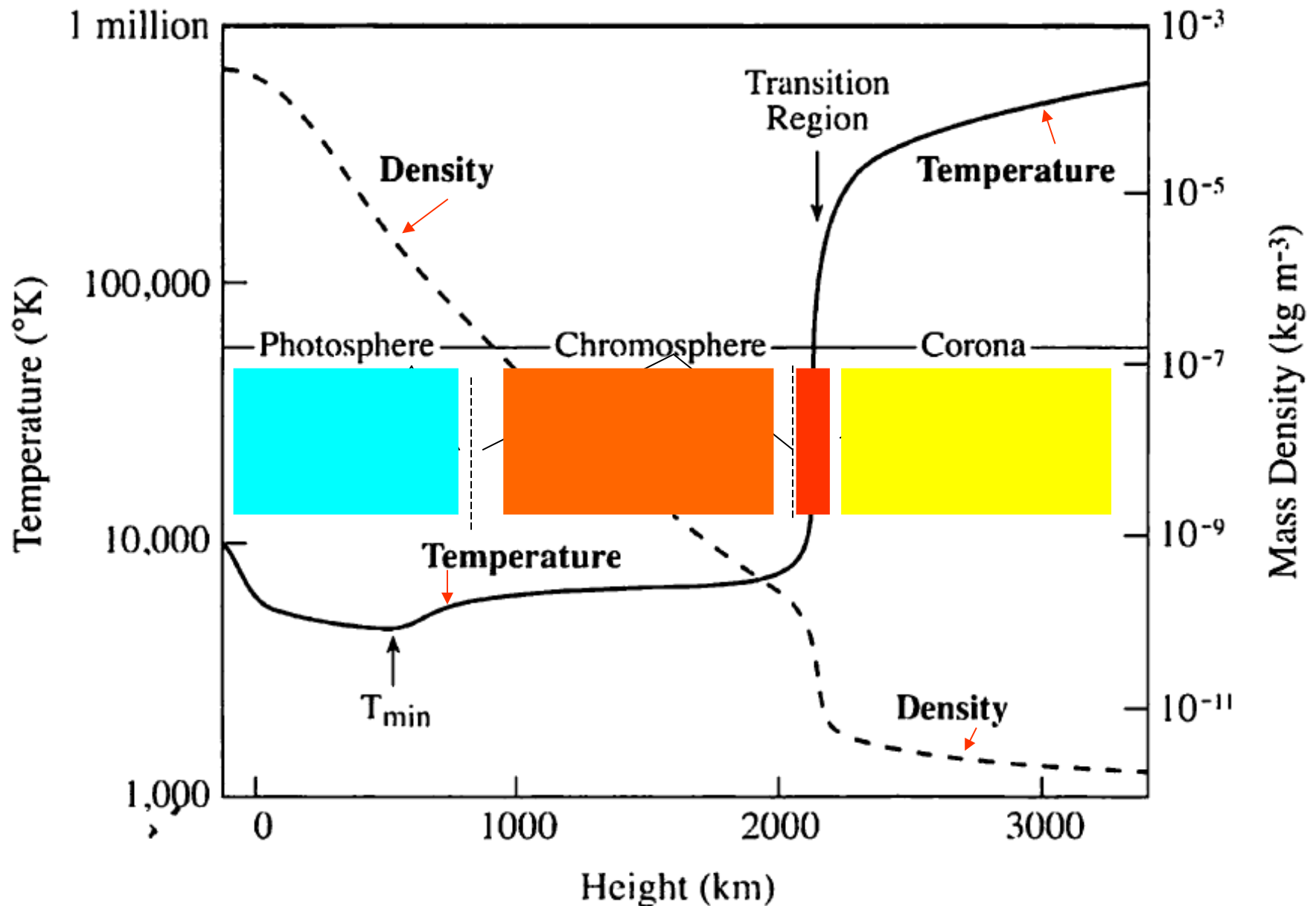
При наблюдении в проекции на солнечный диск протуберанцы видны в поглощении как **темные волокна**.

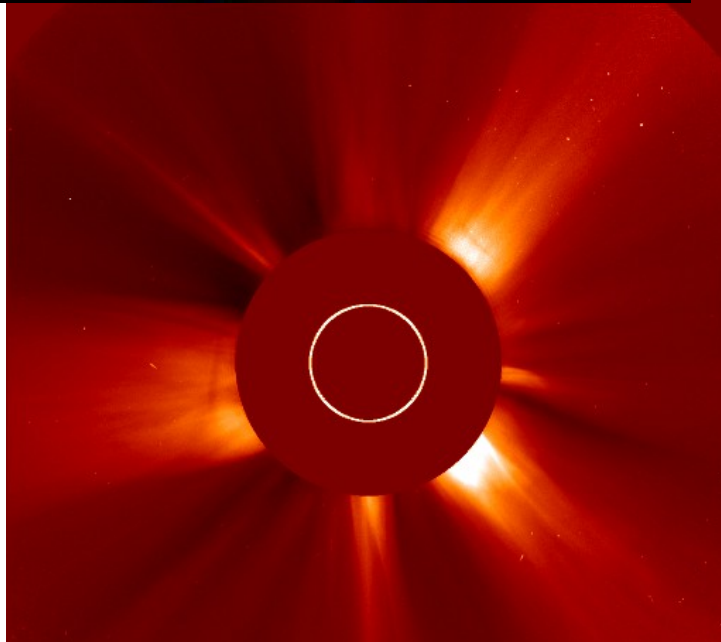
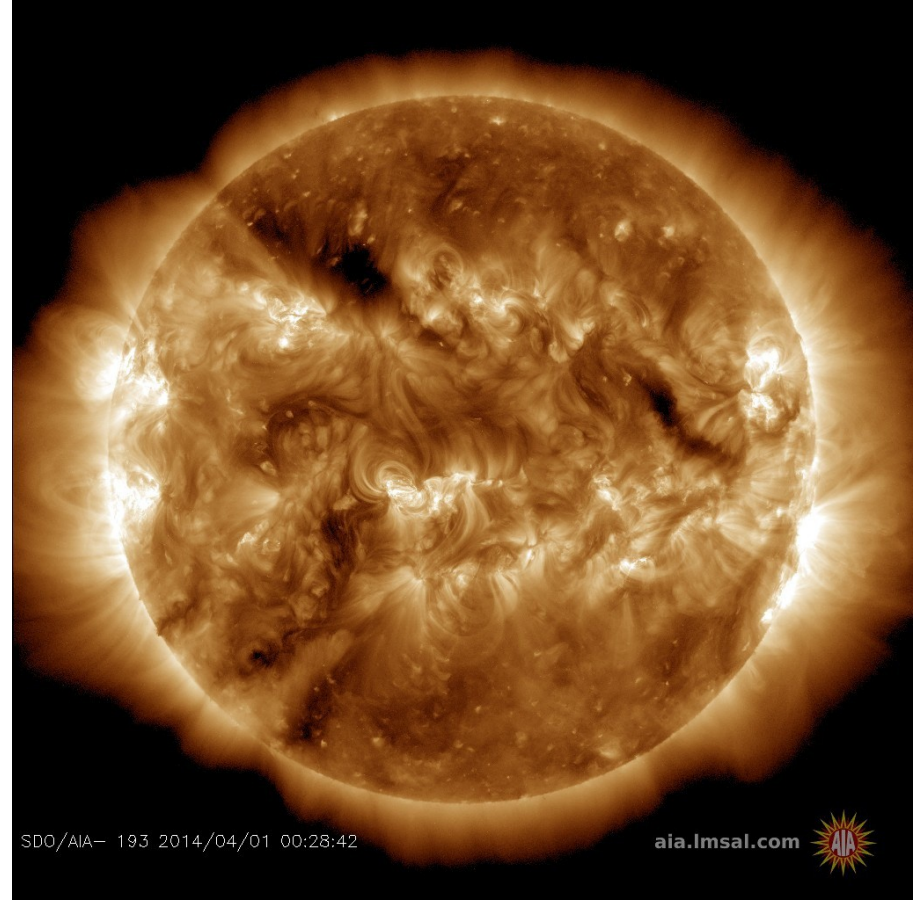
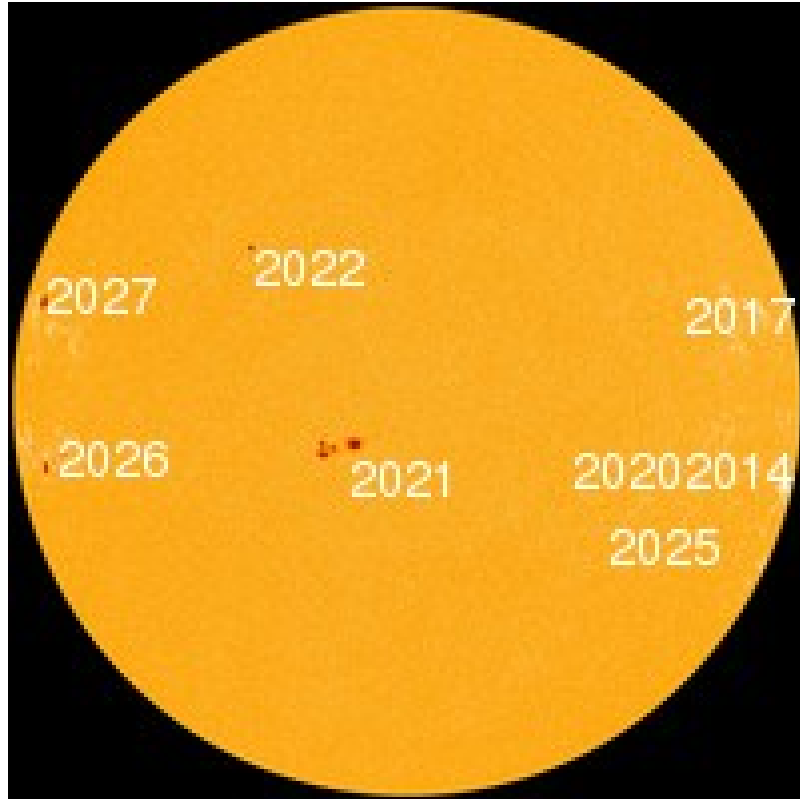
· **СОЛНЕЧНАЯ КОРОНА** расположена выше хромосферы, видна во время полных затмений. Светящаяся область размером $(2 - 3) R_{\text{sun}}$. Форма ее зависит от степени активности Солнца; корона не имеет чёткой границы и, по некоторым данным, простирается до Плутона и дальше. **Температура достигает $2 \cdot 10^6 \text{ K}$.**

При наблюдении в белом свете видны лучи, арки, петли, полярные щеточки, корональные конденсации, корональные дыры.

· **ПЕРЕХОДНАЯ ОБЛАСТЬ** – тонкий неоднородный слой атмосферы Солнца, отделяющий горячую корону от более холодной атмосферы. Температура повышается от $20\,000 \text{ K}$ до 10^6 K . Наблюдается с помощью приборов, установленных на космических спутниках (SOHO, TRACE).

Распределение температуры и плотности в спокойной солнечной атмосфере





**Пятна, корональные дыры,
корона 1 апреля 2014 г.**

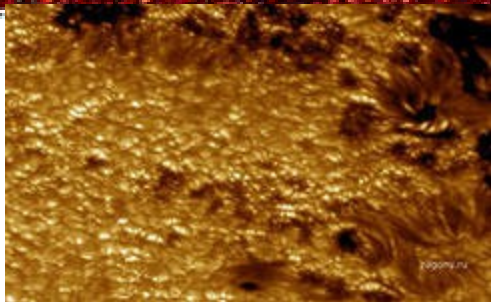
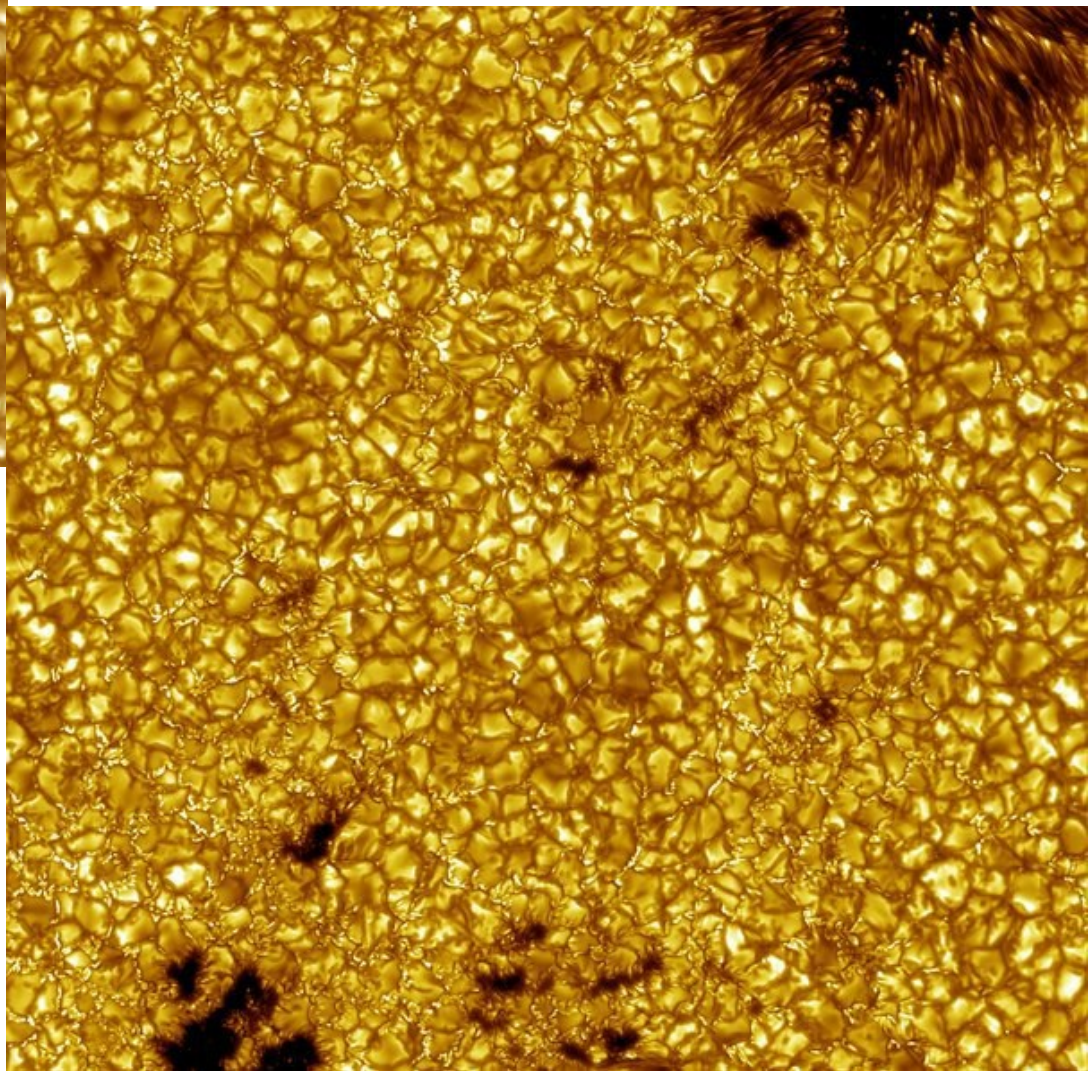
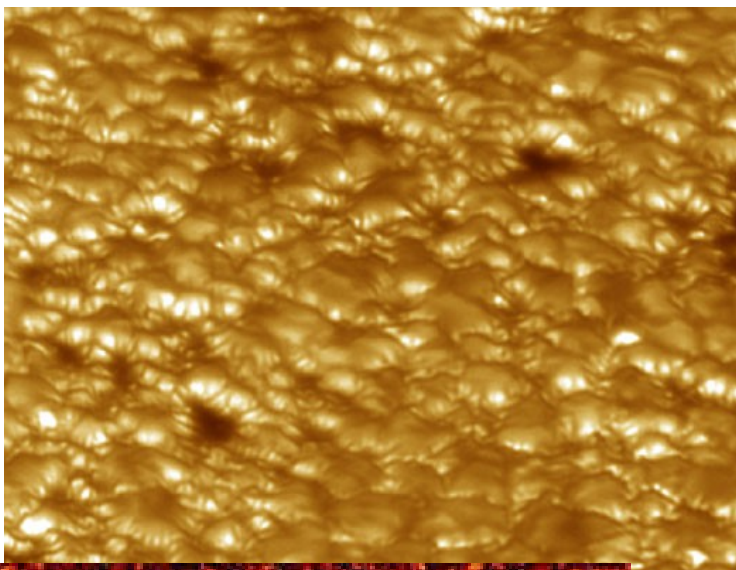
ФОТОСФЕРА

6 июня
2014 г.

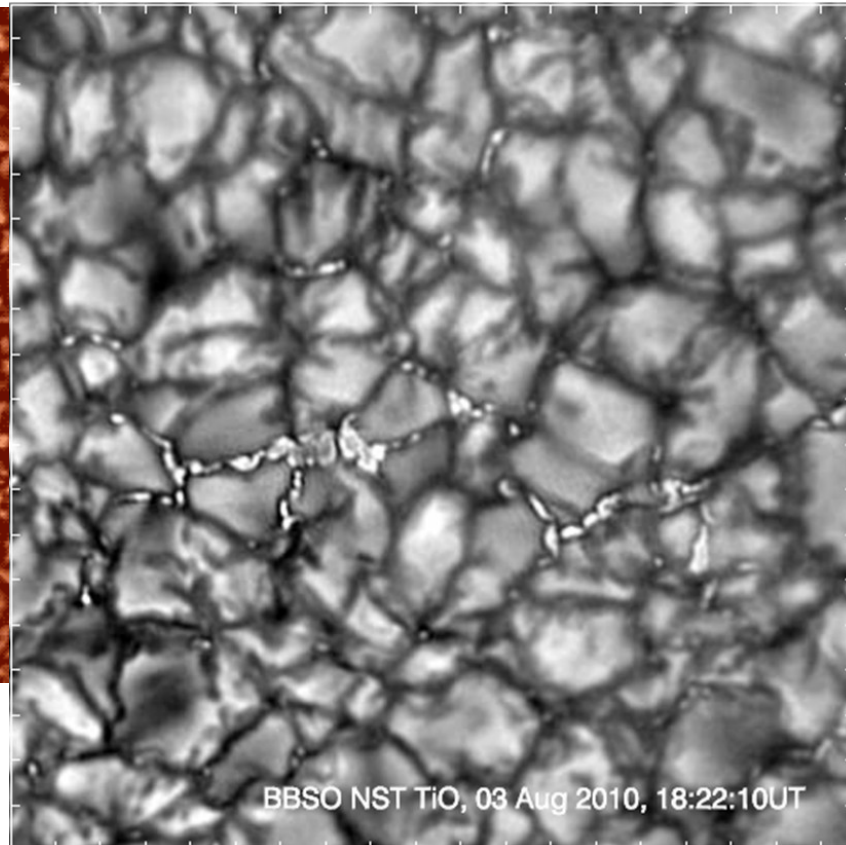
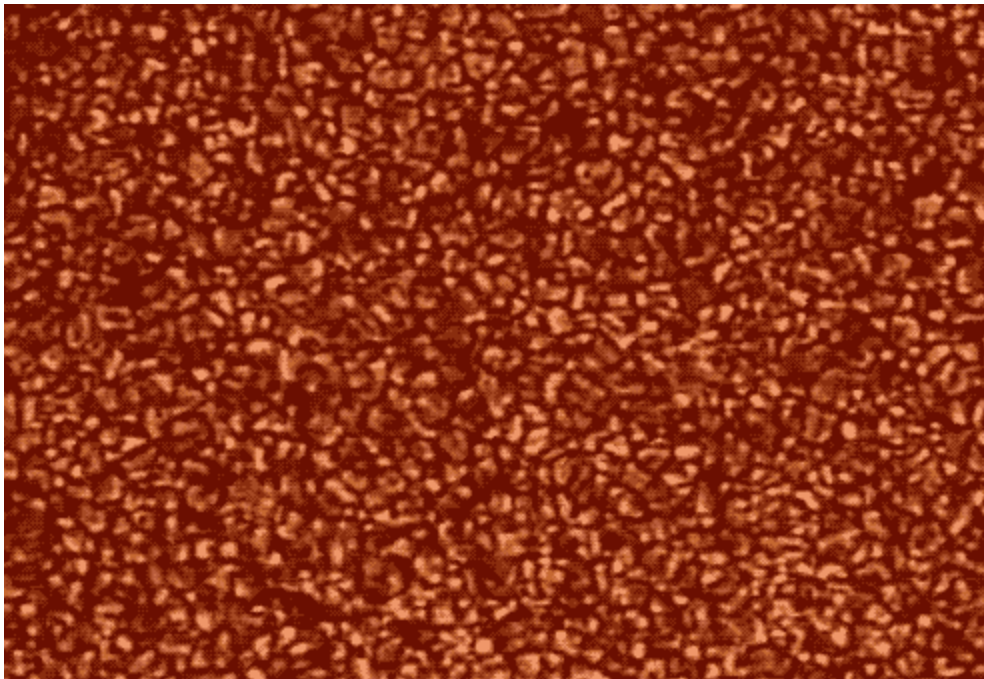
Фотосфера полностью поглощает излучение,
идущее из солнечного ядра и по этой причине
не позволяет нам заглянуть внутрь Солнца



Грануляция



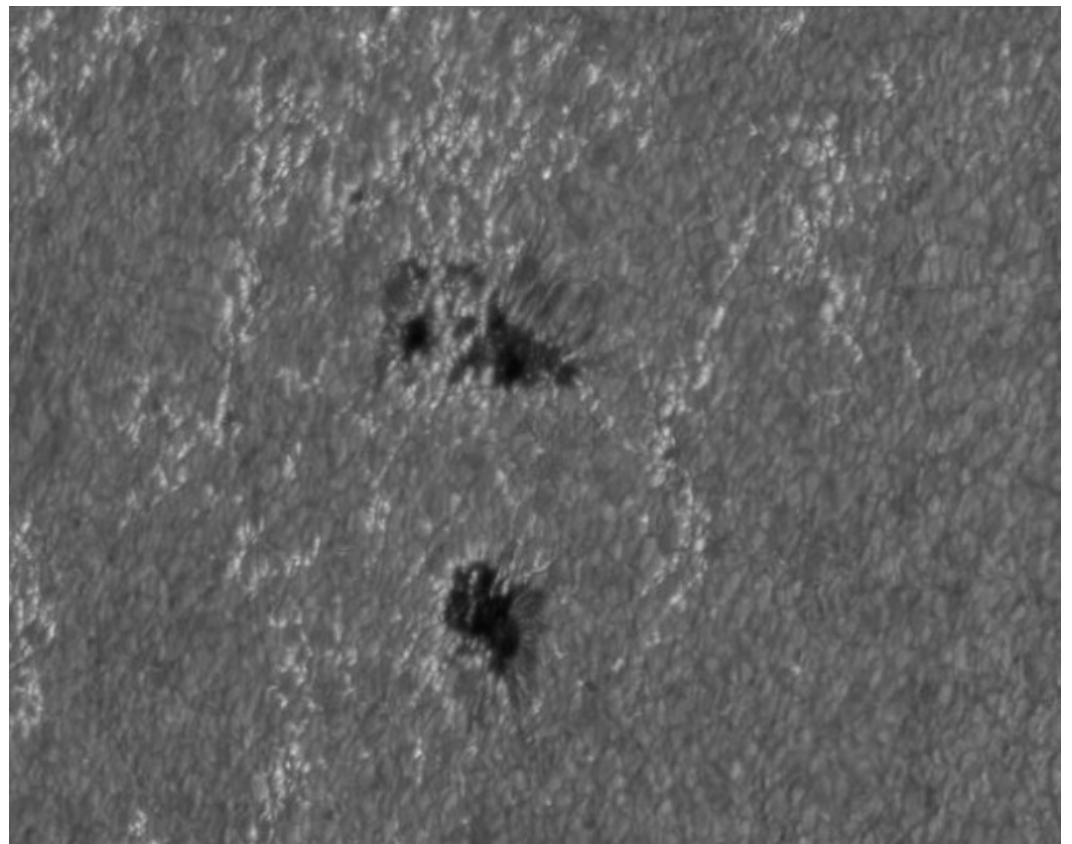
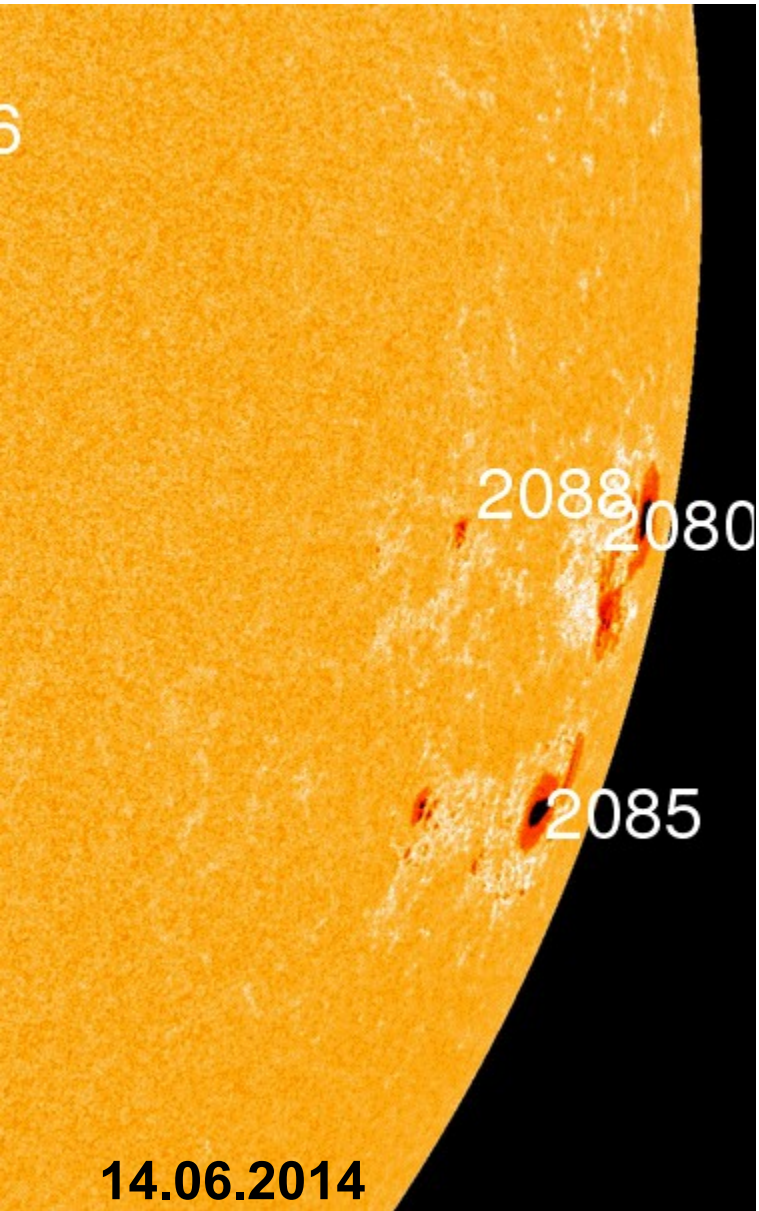
Размер гранул около 1000 км. Это верхняя часть уходящих вглубь Солнца конвективных ячеек. **В центре этих ячеек горячее вещество поднимается** из внутренних слоев, затем растекается горизонтально по поверхности, охлаждается и **опускается вниз на границах ячейки**. **Отдельные гранулы живут несколько минут**. В результате поверхность постоянно меняет свой вид. Потoki внутри гранул достигают скоростей более 7 км/с и на поверхности Солнца наблюдаются волны.



Новый телескоп (NST) заработал в январе 2009 г. Обсерватория (Big Bear)

BBSO NST TiO, 03 Aug 2010, 18:22:10UT





Факелы - это участки фотосферы повышенной яркости, которые хорошо видны около лимба. . В центральной части диска, где сосредоточены более глубокие и более нагретые (более яркие) слои атмосферы) факелы не видны - они сливаются с фотосферой.



Факелы- это области повышенного магнитного поля, но поле здесь сконцентрировано во много более компактных узлах, чем в пятнах.

Факелы часто предшествуют образованию солнечных пятен и наблюдаются после их распада. Температура факелов на несколько сотен градусов превышает температуру фотосферы. Факелы существуют ~ 15 суток, но могут наблюдаться до 3 месяцев.

Вблизи максимума солнечной активности число **факелов** и **пятен** на поверхности Солнца растет.

Повышение светимости, связанное с **факелами** доминирует над уменьшением светимости из-за роста числа **пятен**, поэтому интегральная светимость поверхности Солнца во время **максимума** слегка возрастает - примерно на **0.1%** по сравнению с ее светимостью во время **минимума** активности.

Многие объекты, наблюдаемые на Солнце, обязаны своим происхождением **магнитному полю**.

Солнечные пятна представляют собой места, где гигантские магнитные петли, всплывающие из недр Солнца, проникают сквозь солнечную поверхность. Именно по этой причине группы пятен, как правило, состоят из двух областей различной магнитной полярности - северной и южной. Эти две области соответствуют противоположным основаниям всплывающей магнитной трубки.

Цикл солнечной активности также является результатом циклических изменений магнитного поля, происходящих в солнечных недрах.

Протуберанцы, висящие над поверхностью Солнца, в действительности поддерживаются линиями магнитного поля.

Корональные стримеры и петли повторяют своей формой топологию окружающих их магнитных полей.

Магнитные поля, наблюдаемые в солнечной фотосфере, разделяют на два типа в соответствии с их масштабом.

Крупномасштабное (общее или глобальное) магнитное поле с размерами, сравнимыми с размерами Солнца, имеет среднюю напряжённость на уровне фотосферы порядка **нескольких гаусс**. В минимуме цикла солнечной активности это поле имеет приблизительно дипольную структуру, при этом напряжённость поля на полюсах Солнца максимальна. Затем, по мере приближения к максимуму цикла солнечной активности, напряжённости поля на полюсах постепенно уменьшаются и через некоторое время после максимума цикла становятся равными нулю (так называемая «переполюсовка солнечного магнитного поля»). На этой фазе общее магнитное поле Солнца не исчезает полностью, но его структура носит не дипольный, а квадрупольный характер. После этого напряжённость солнечного диполя снова возрастает, но при этом он имеет уже другую полярность. Таким образом, полный цикл изменения общего магнитного поля Солнца, с учётом перемены знака, равен удвоенной продолжительности 11-летнего цикла солнечной активности — примерно 22 года («закон Хейла»).

Локальные (мелкомасштабные) поля Солнца отличаются бóльшими напряжённостями полей. Самые мощные магнитные поля (до нескольких тысяч гаусс) наблюдаются в группах солнечных пятен. Магнитные поля пятен имеют биполярную или мультиполярную структуру. Наблюдаются также и униполярные области магнитного поля, которые, в отличие от групп солнечных пятен, располагаются ближе к полюсам и имеют значительно меньшую напряжённость магнитного поля (несколько гаусс), но большую площадь и продолжительность жизни (до нескольких оборотов Солнца).

Согласно современным представлениям, разделяемым большей частью исследователей, магнитное поле Солнца генерируется в нижней части конвективной зоны с помощью механизма гидромагнитного конвективного динамо, а затем всплывает в фотосферу под воздействием магнитной плавучести. Этим же механизмом объясняется 22-летняя цикличность солнечного магнитного поля.

Магнитные поля на Солнце

впервые были обнаружены в 1908 г. Дж.Хейлом.

Обнаружение и измерение МП полей производится на основе **эффекта Зеемана** по расщеплению спектральных линий под действием на излучающее вещество внешнего магнитного поля. Этот эффект был открыт в 1896 г. нидерландским физиком П.Зееманом. Картина расщепления зависит от направления поля.

В 1953 г. американский астроном Х.Бэбкок открыл дипольную составляющую магнитного поля с напряженностью ~ 1 Гс.

Изучение магнитных полей активных образований ведется на Солнце с помощью магнитографов. Измеряются поля до 1 Гс и меньше.

Магнитное поле Солнца играет важную роль в формировании солнечной хромосферы и разогреве солнечной короны.

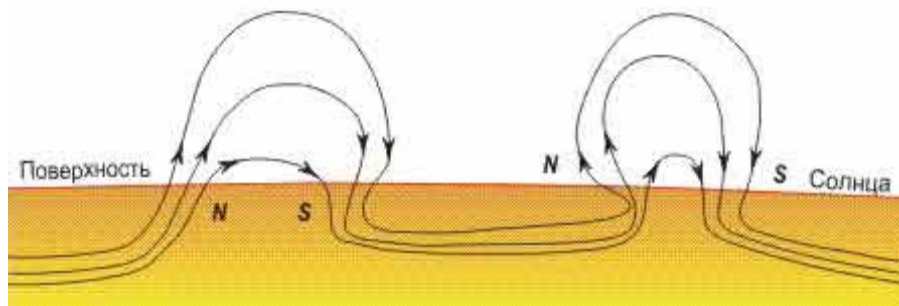
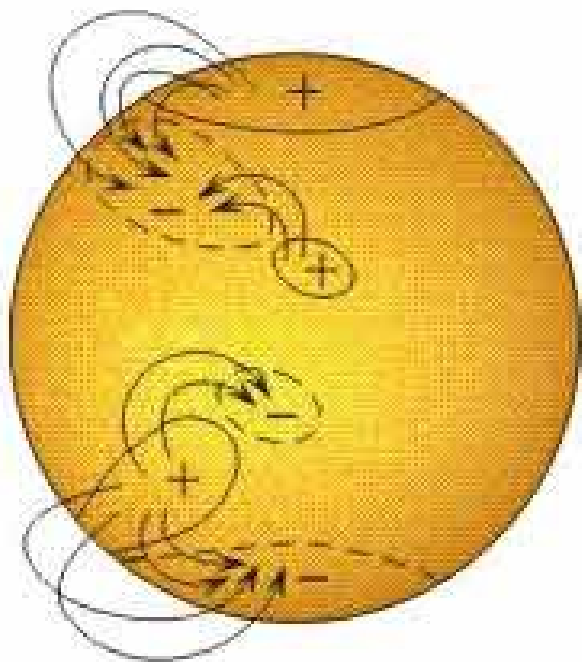
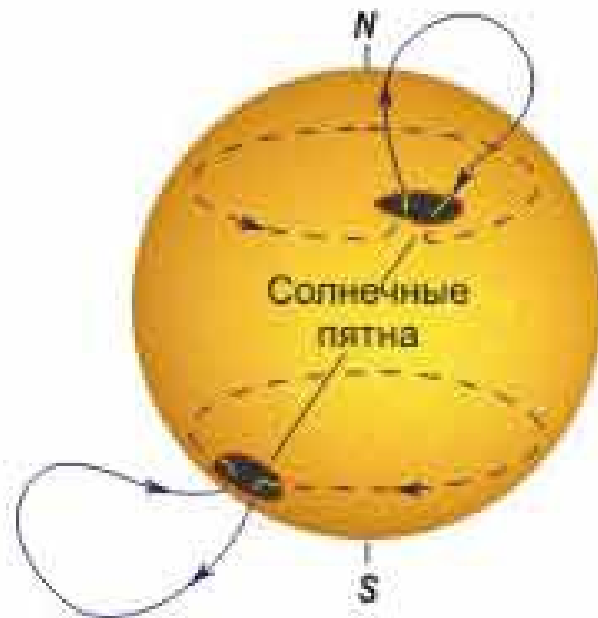
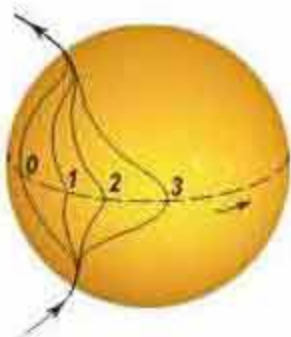


Схема выхода магнитного поля на поверхность Солнца.

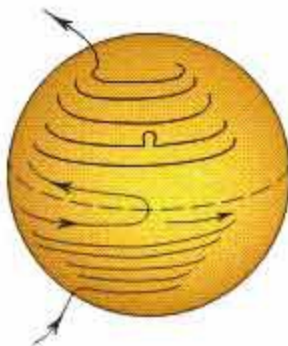


Внутри области, занятой солнечными пятнами, магнитное поле в виде трубки выходит из одного пятна и, образуя арку, входит в другое. Эта картина объясняет двойную полярность и также хорошо согласуется с наблюдениями арочных волокон. Наблюдения с космических аппаратов, особенно наблюдения активных областей, позволяют теперь проследить эту структуру и значительно выше фотосферы.

Дифференциальное вращение Солнца постепенно наматывает силовые линии магнитного поля.



- 0) начало,
- 1) после 1-го оборота,
- 2) после 2-го оборота,
- 3) после 3-го оборота



после многих оборотов

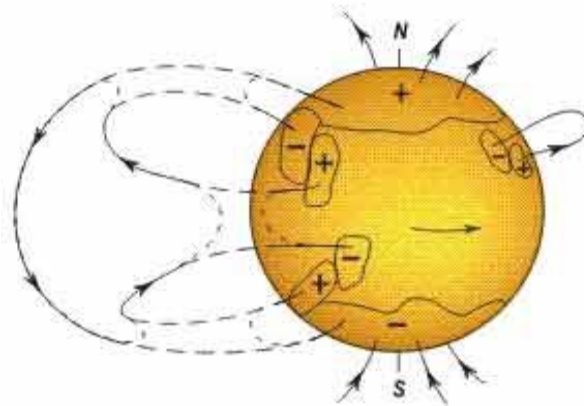
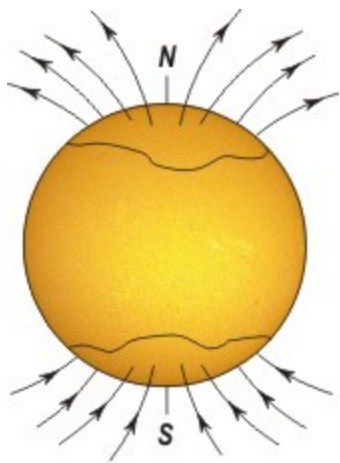
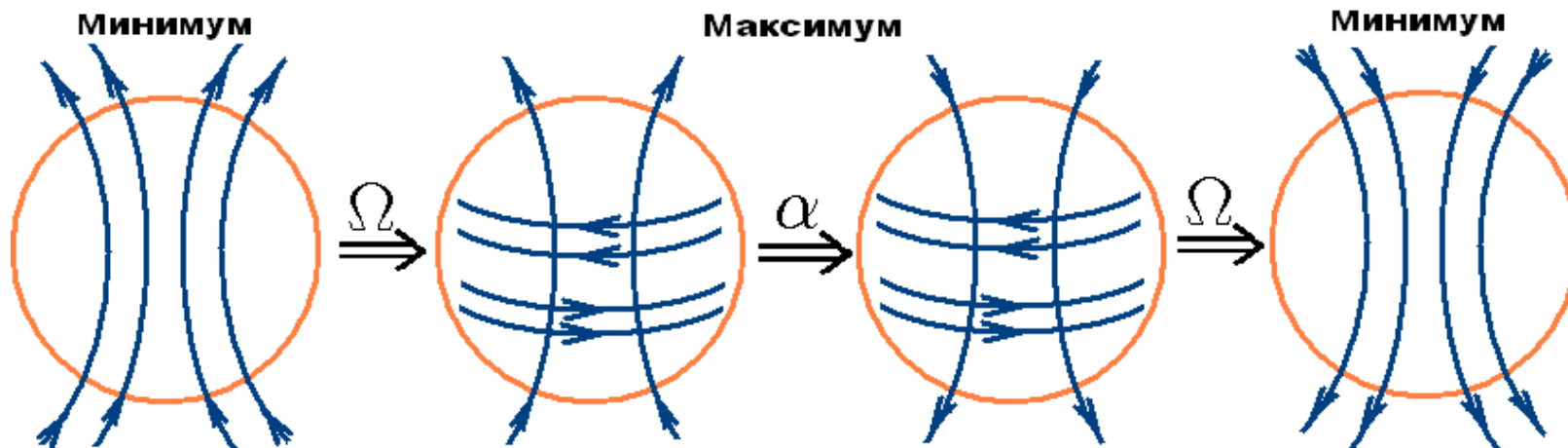


Схема превращения
полоидального магнитного
поля в тороидальное
(Babcock H.W.).



В эпоху минимума солнечных пятен магнитное поле Солнца близко к полю диполя: противоположные полярности сконцентрированы у полюсов. Общее магнитное поле Солнца с периодом ~11 лет меняет знак

Схема действия циклического динамо

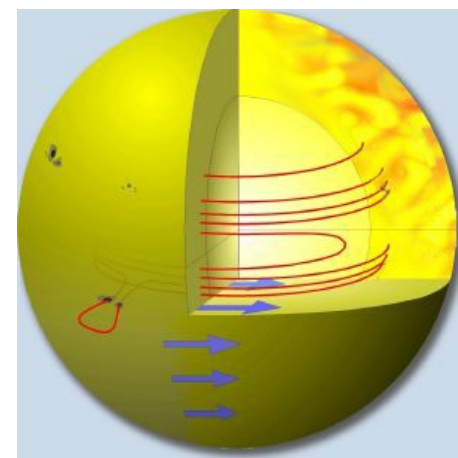
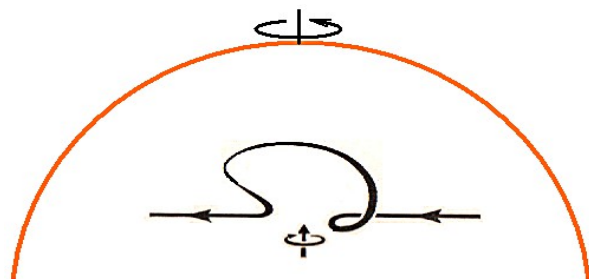


Ω – эффект

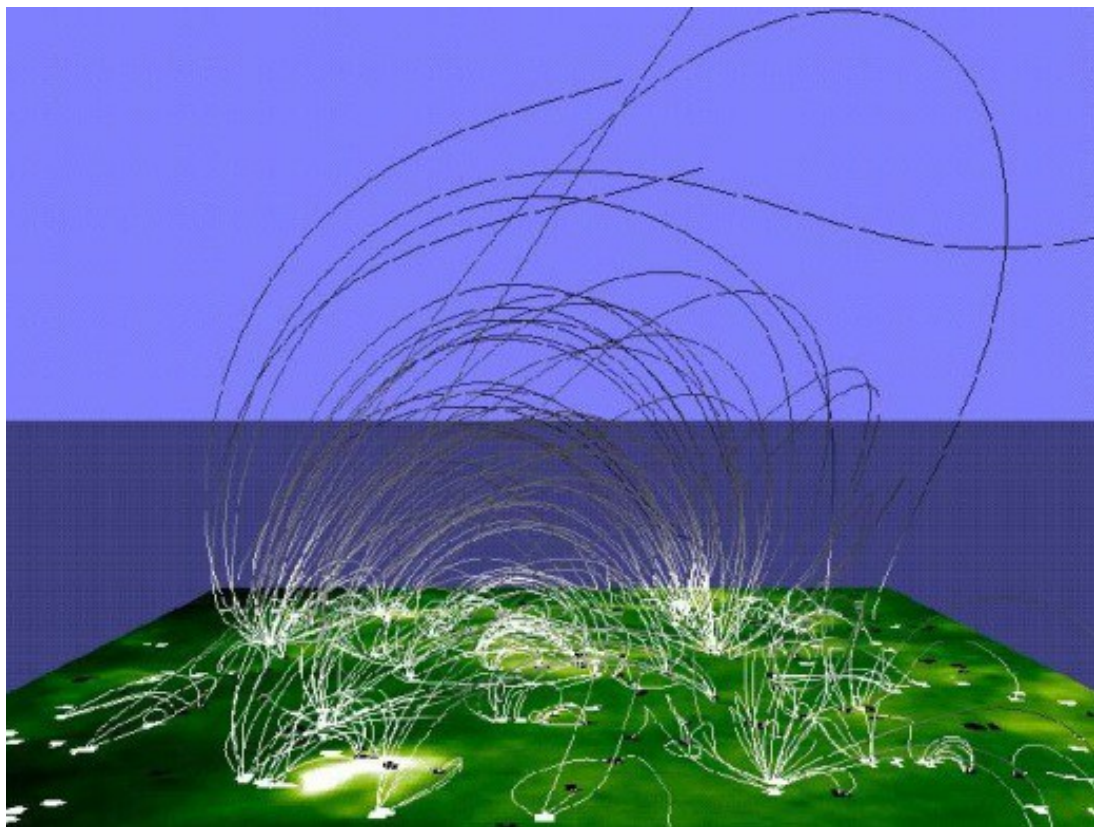
Омега-эффект — это намотка тороидального магнитного поля. Происходит на Солнце всегда, пока есть полоидальное магнитное поле и дифференциальное вращение

α – эффект

Альфа-эффект производит преобразование тороидального МП в полоидальное, чтобы замкнуть цикл. Примерно каждые 11 лет общее магнитное поле Солнца меняет знак.



Вращение Солнца неоднородно. Угловая скорость возрастает от полюсов к экватору приблизительно на 30%.



Пространственная картина магнитного поля теоретически рассчитывается на основании магнитограмм, получаемых при помощи специальных спектральных приборов магнитографов, которые регистрируют фотосферные поля. Вычисленная картина силовых линий магнитного поля, представляет наблюдаемое распределение поля в АО.

Магнитные поля от фотосферы до короны (TRACE)

Магнитный ковер



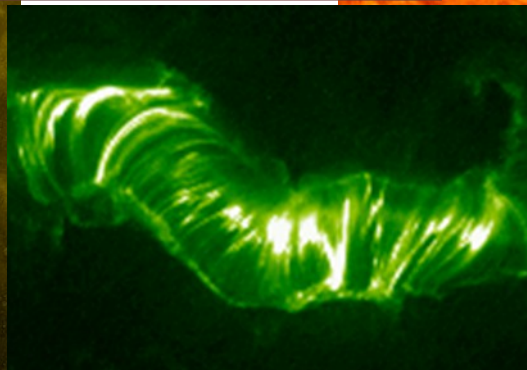
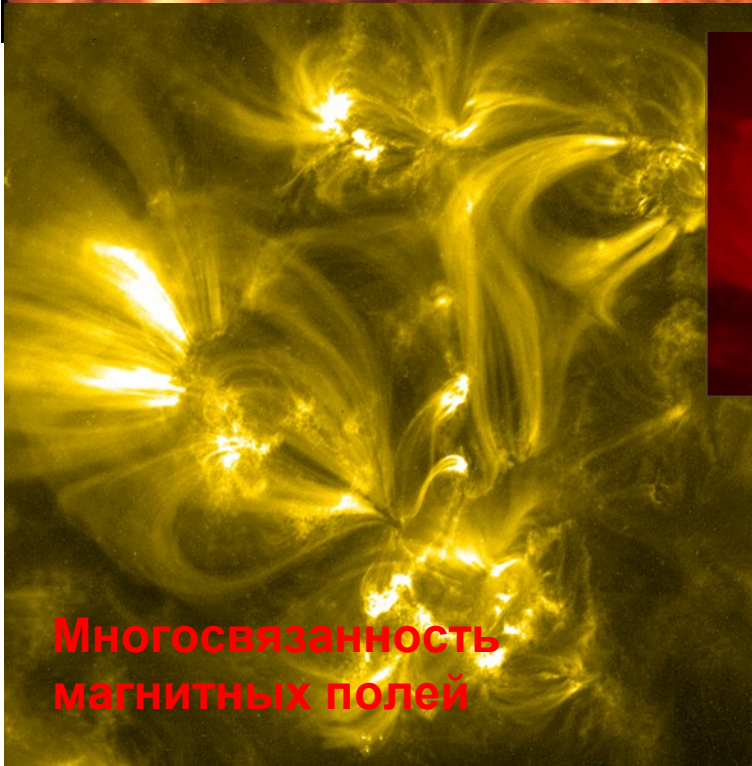
Большие и малые петли



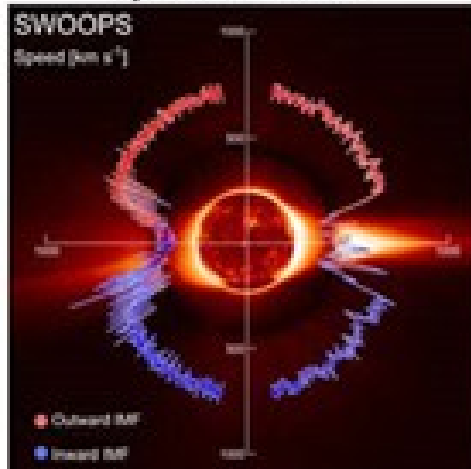
Сложная структура
магнитного поля



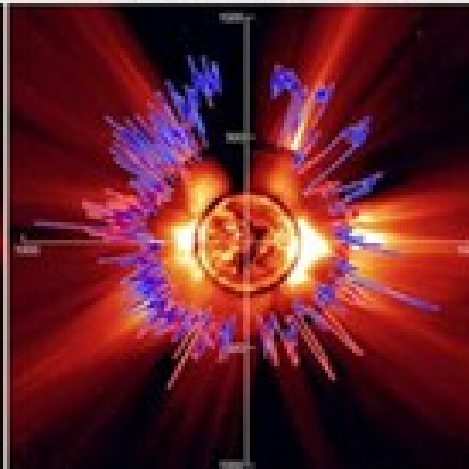
Многосвязанность
магнитных полей



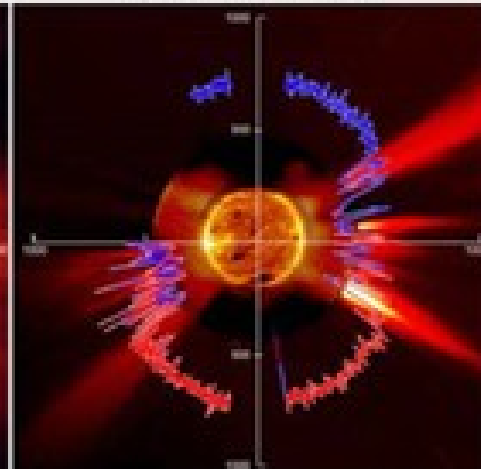
Ulysses First Orbit



Ulysses Second Orbit



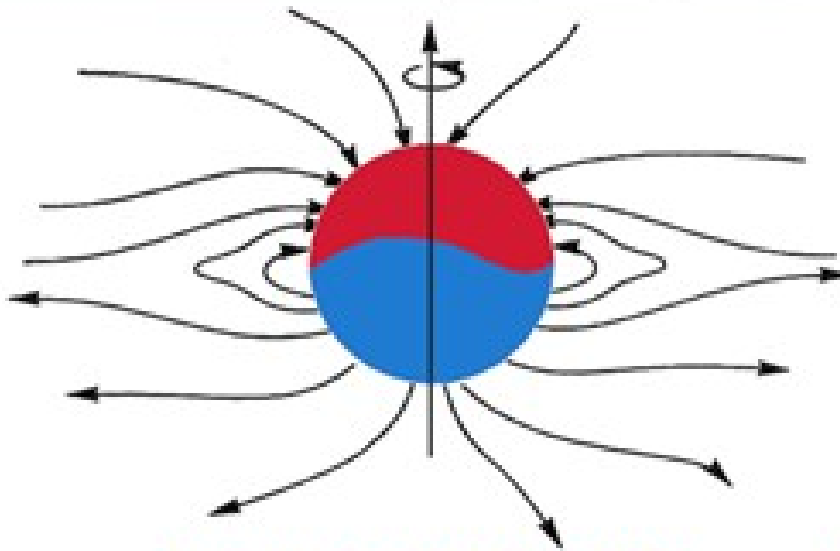
Ulysses Third Orbit



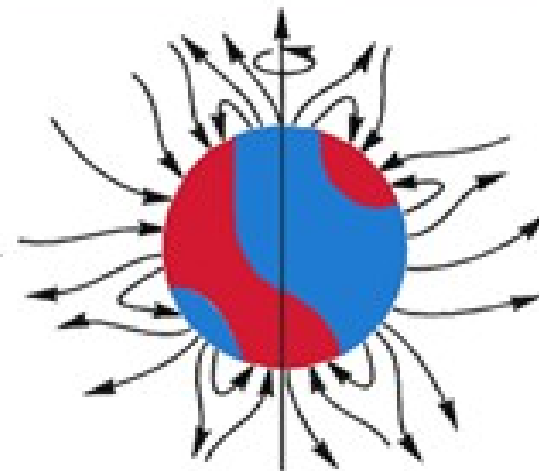
Smoothed
Sunspot Number

140
120
100
80
60
40
20
0

20000_A01_2



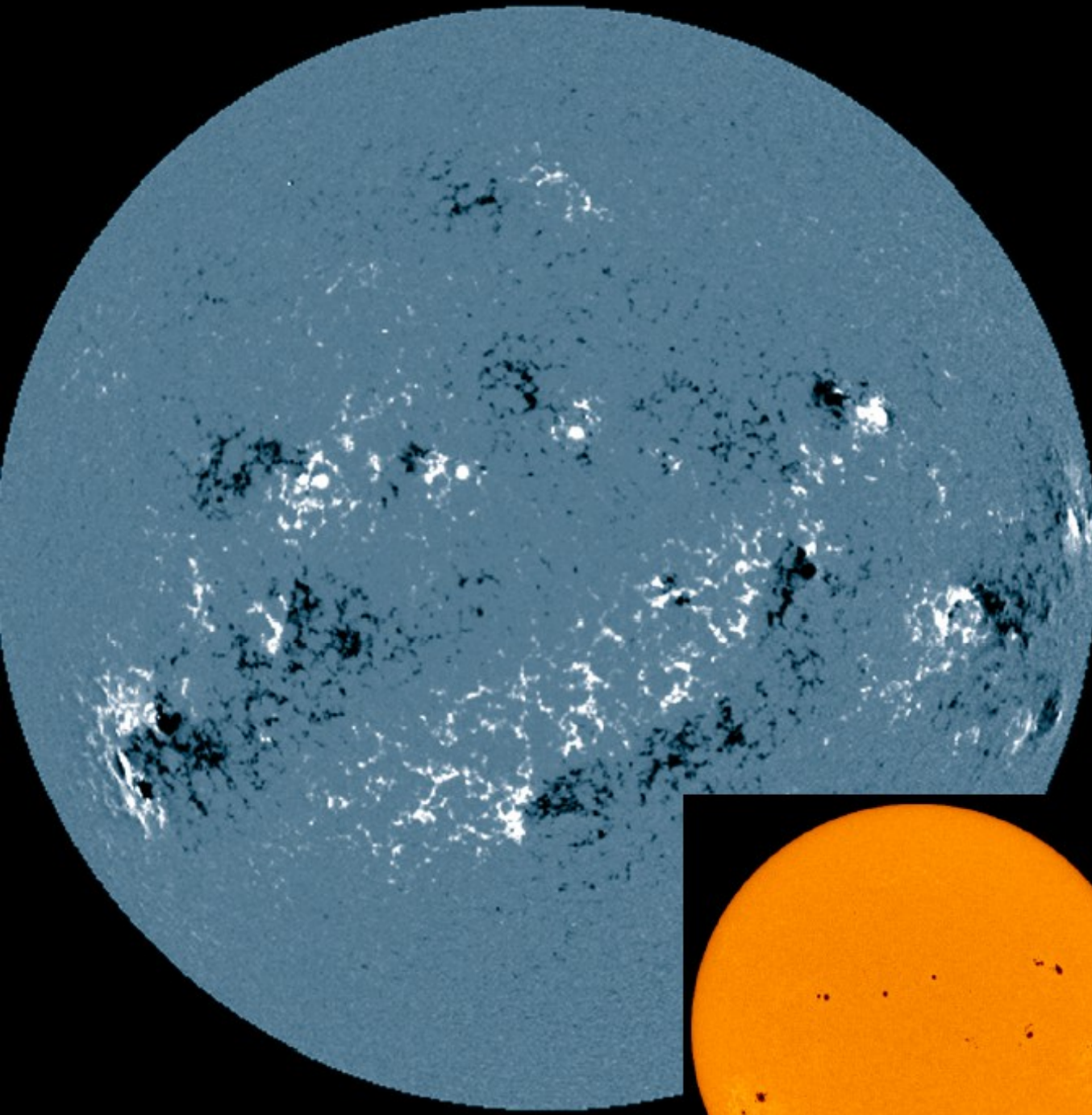
Минимум активности



Максимум активности

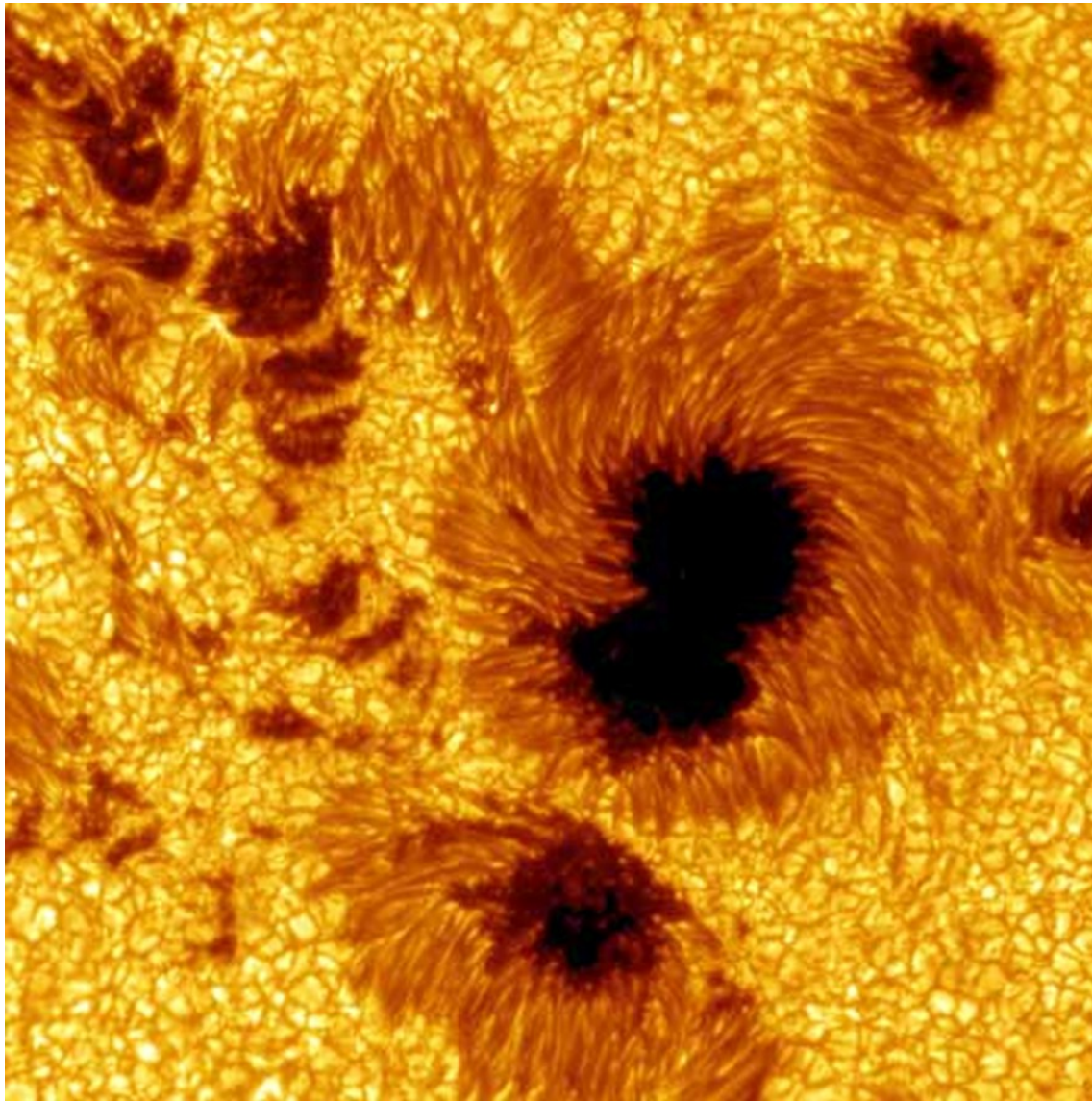
Current Sheet Tilt (deg)
WSO Radial

0 20 40 60 80



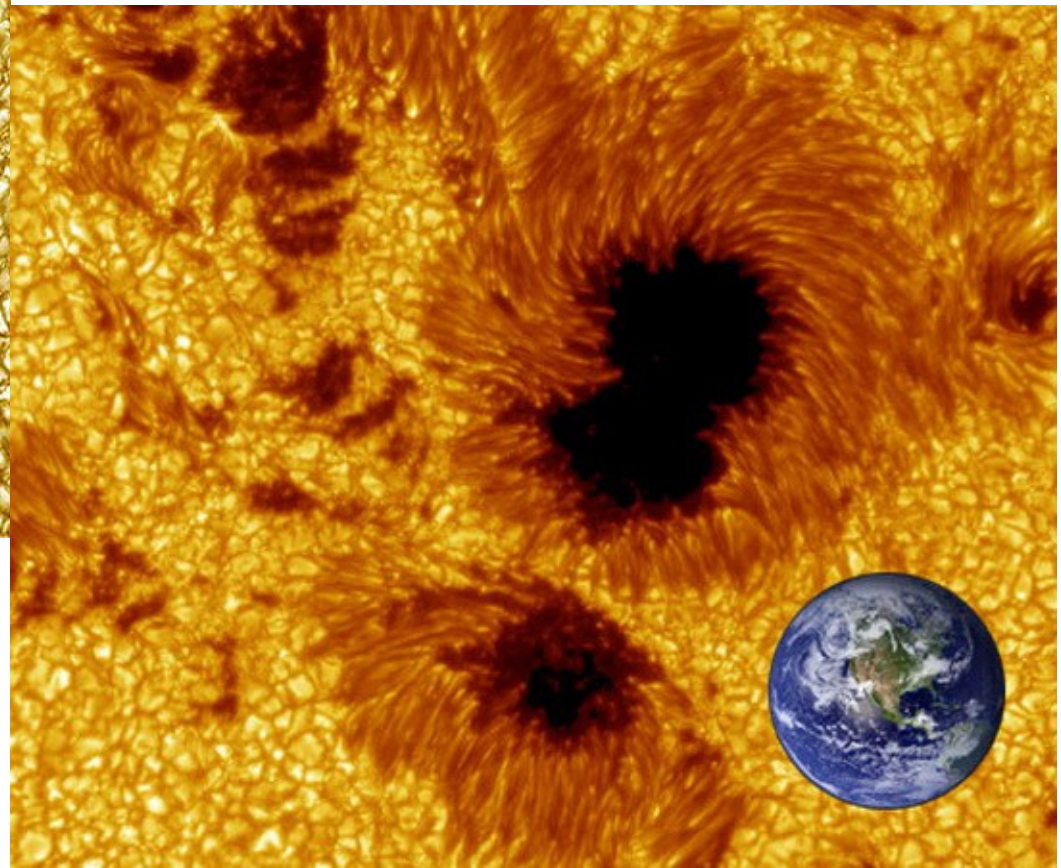
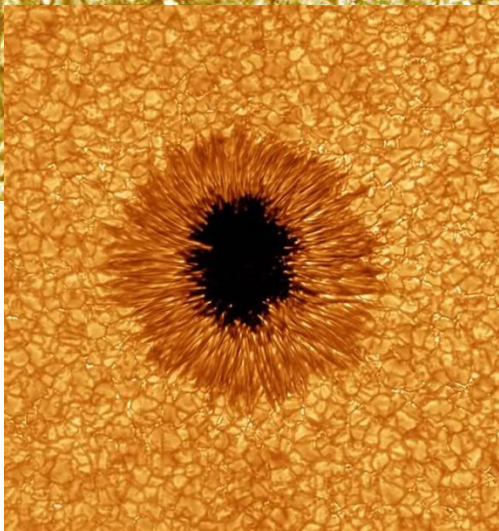
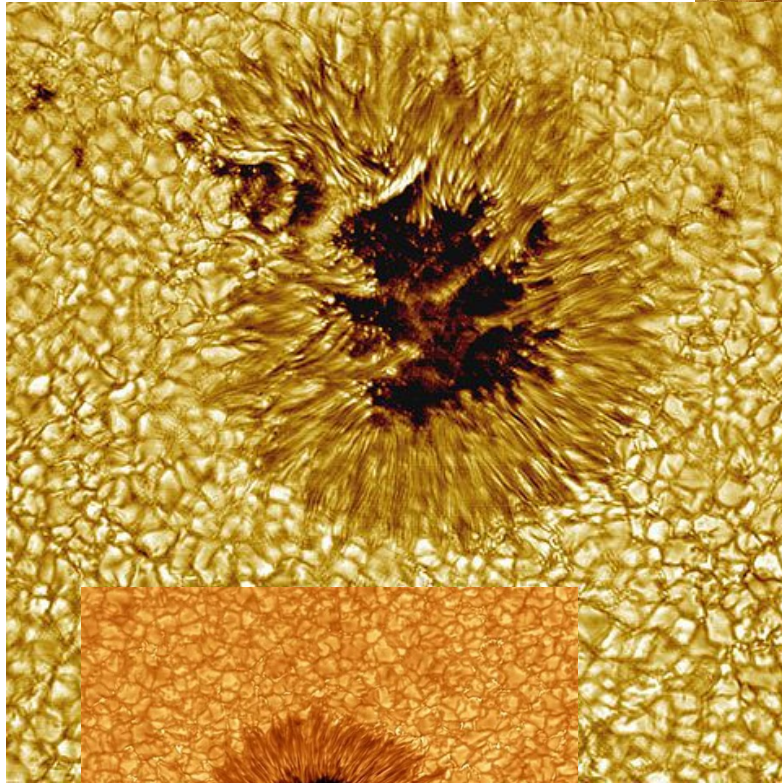
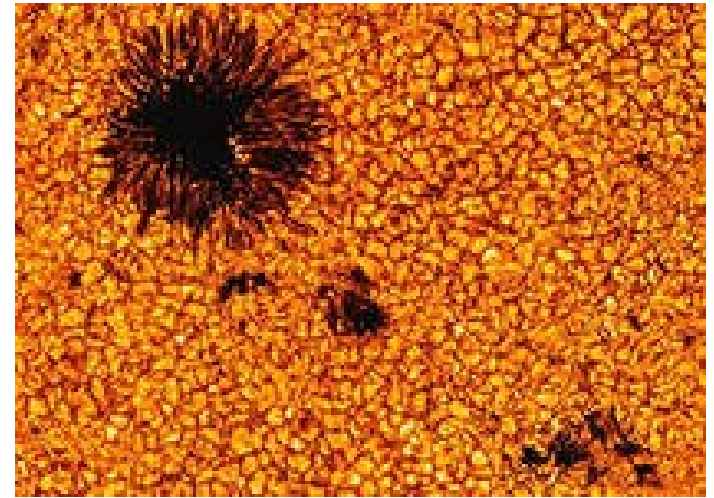
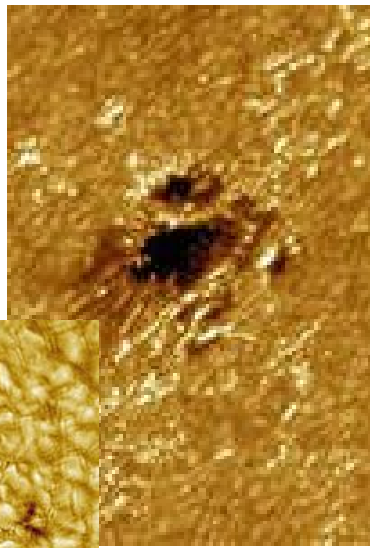
Фотосфера

Магнитные
поля и пятна
01.01.2002 г.

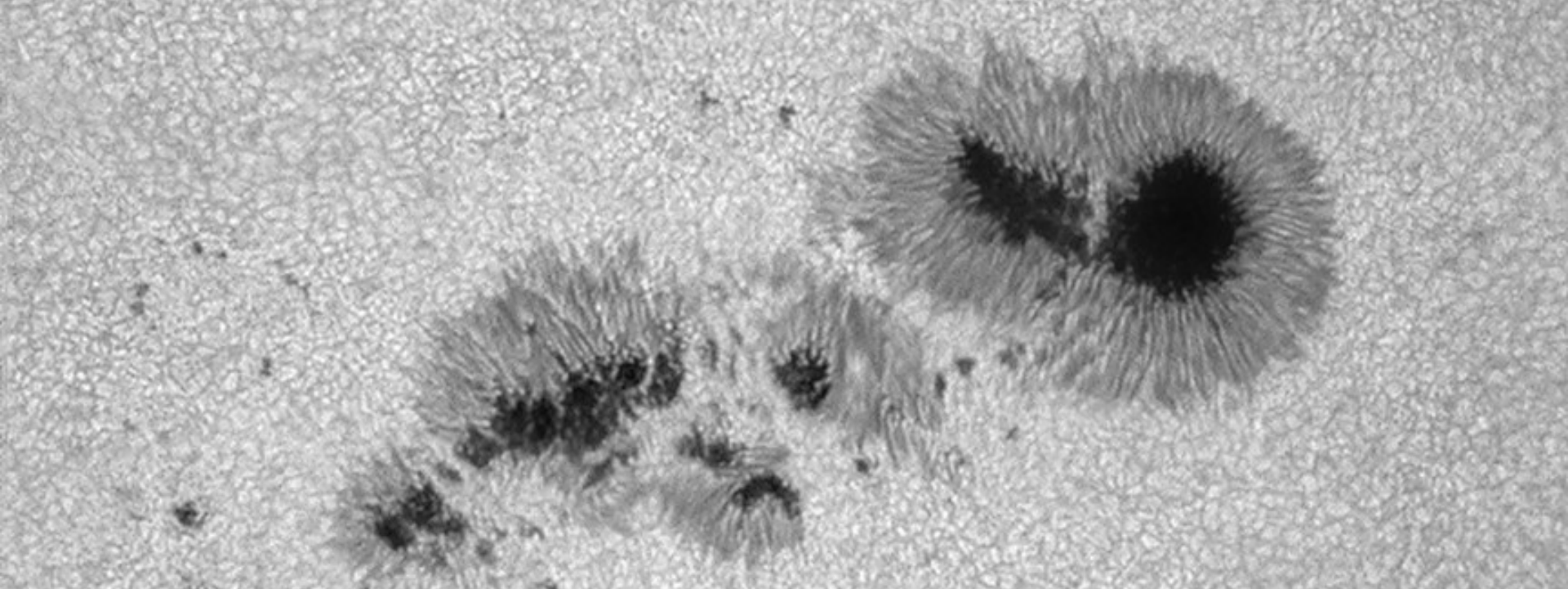


Сильное магнитное поле препятствует движению плазмы, если оно направлено не вдоль линий магнитного поля. В местах выхода трубок магнитного поля из глубин Солнца на поверхность конвекция ослабевает, появляются более холодные участки – пятна.

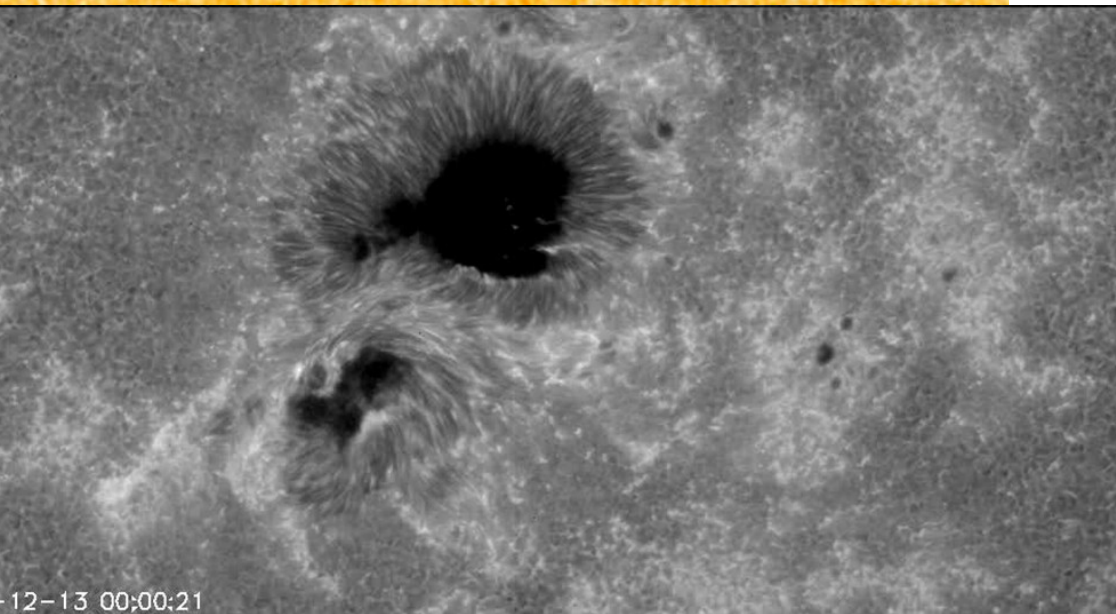
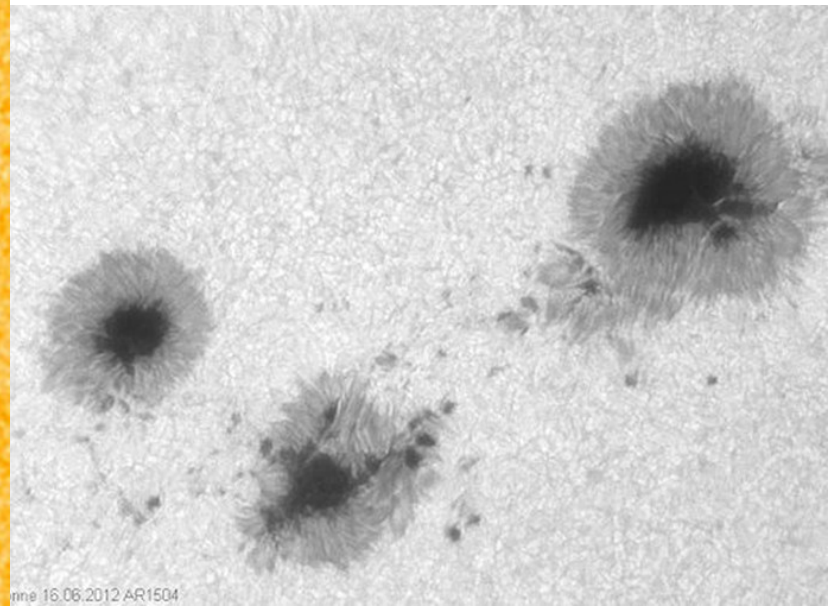
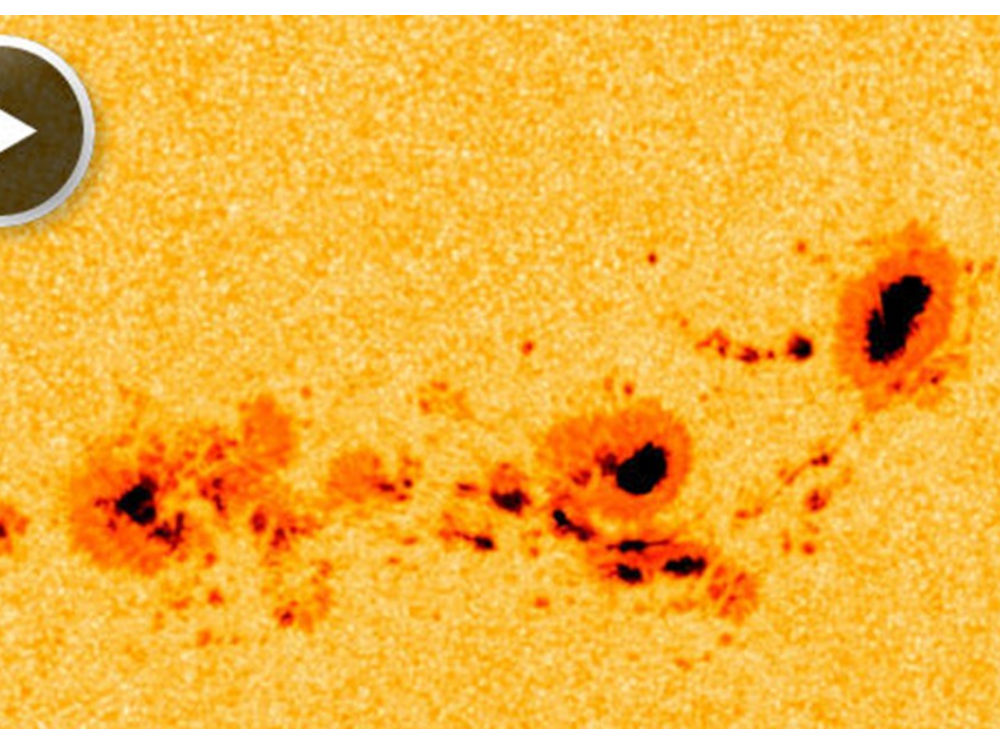
Пятна



Диаметры пятен достигают 200 000 км. Маленькие пятна называют порами. Время жизни пятен от нескольких часов до нескольких месяцев.



Пятна образуют группы: униполярные, биполярные и сложные (мультиполярные, содержащие пятна различной полярности, часто объединённых общей полутенью). Группы пятен окружены факелами и флоккулами, протуберанцами, вблизи них происходят солнечные вспышки, в солнечной короне над ними наблюдаются образования в виде лучей, шлемов, опахал - всё это вместе образует **активную область на Солнце.**



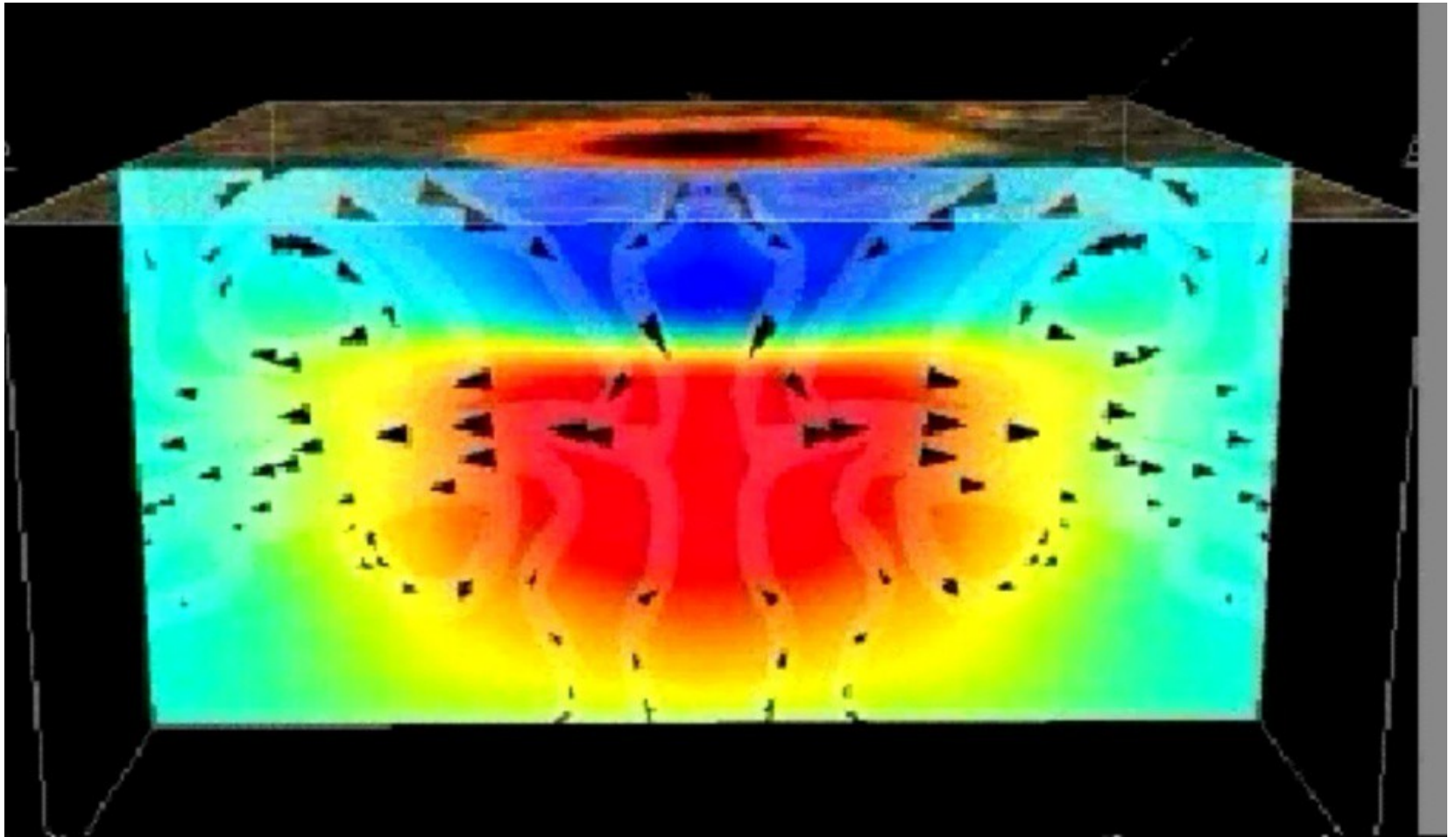
Биполярные группы пятен состоят из двух крупных пятен - **ГОЛОВНОГО И ХВОСТОВОГО**, имеют противоположную магнитную полярность и несколько более мелких. Головные пятна имеют одну и ту же полярность в течение всего цикла солнечной активности, эти полярности противоположны в северной и южной полусферах Солнца.

Самая большая группа солнечных пятен за всю историю наблюдений возникла в апреле 1947 года в южном полушарии Солнца. Её максимальная длина составляла 300 000 км, максимальная ширина — 145 000 км, а максимальная площадь превышала 6000 миллионов долей площади полусферы (мдп) Солнца, что примерно в 36 раз больше площади поверхности Земли.

Группа была легко видна невооружённым глазом на закате. Согласно каталогу Пулковской обсерватории, эта группа (№ 87 за 1947 год) проходила по видимой с Земли полусфере Солнца с 31 марта по 14 апреля 1947 года, максимальная её площадь составила 6761 мдп, а максимальная площадь наибольшего пятна в группе — 5055 мдп; количество пятен в группе достигало 172.

Используя результаты наблюдений, полученных с прибором MDI/SOHO (Michelson Doppler Imager), построили схему потоков вещества непосредственно под наблюдаемым пятном. Под пятном имеются мощные потоки вещества, показанные на рисунке темными стрелками. Сходящиеся и уходящие вниз потоки затягивают вещество с поверхности в глубину, препятствуя удалению друг от друга областей сильного магнитного поля, отталкивающихся подобно полюсам обычных железных магнитов. Такая конфигурация потоков отличается от обычного течения плазмы под действием тепла, поступающего из внутренних областей Солнца, и создает самоподдерживающееся солнечное пятно. Прибор MDI исследует свойства и поведение вещества внутри Солнца, регистрируя движения, производимые звуковыми колебаниями, когда они достигают солнечной поверхности.

Структура и устойчивость солнечных пятен

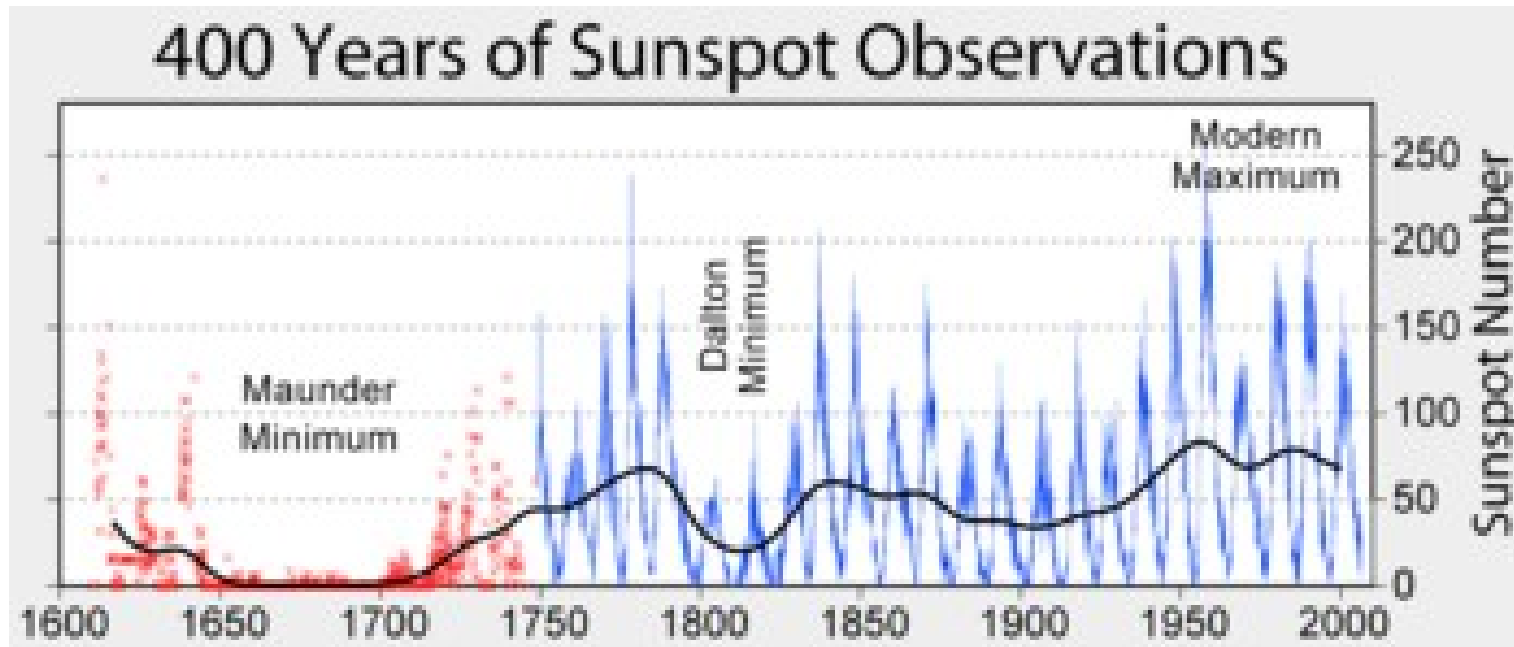


Вещество в пятнах вытекает на более низких уровнях и втекает на более высоких. Скорости движения достигают 3 км/с. Пятна холоднее фотосферы на 1-2 тыс градусов (4500 К и ниже). Поэтому пятна кажутся тёмными. Пятна обладают сильным магнитным полем ~ 4000 Гс.



Пятна - это места выхода в солнечную атмосферу сильных магнитных полей. Магнитные поля уменьшают поток энергии идущий из недр Солнца к фотосфере, поэтому в месте их выхода на поверхность температура падает. Пятна холоднее окружающего их вещества примерно на 1500 К, а следовательно, и менее яркие. За счет более низкой температуры они выглядят тёмными.

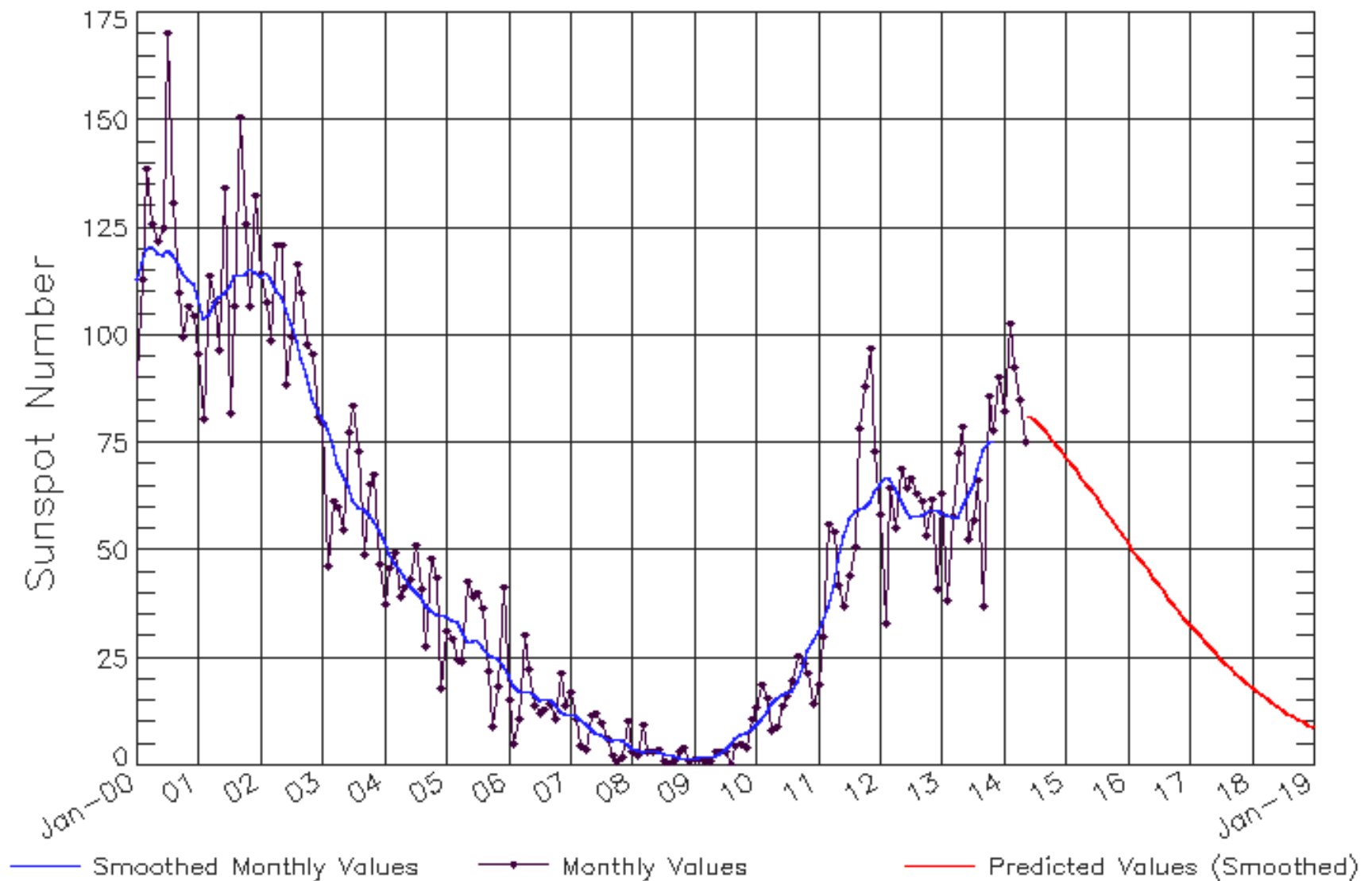
Среднегодовое число наблюдаемых пятен и активных областей, их средняя площадь меняется с периодом около 11 лет (от 7,5 до 16 лет). Наибольшее число пятен, одновременно видимых на поверхности Солнца, меняется для различных циклов более чем в два раза.

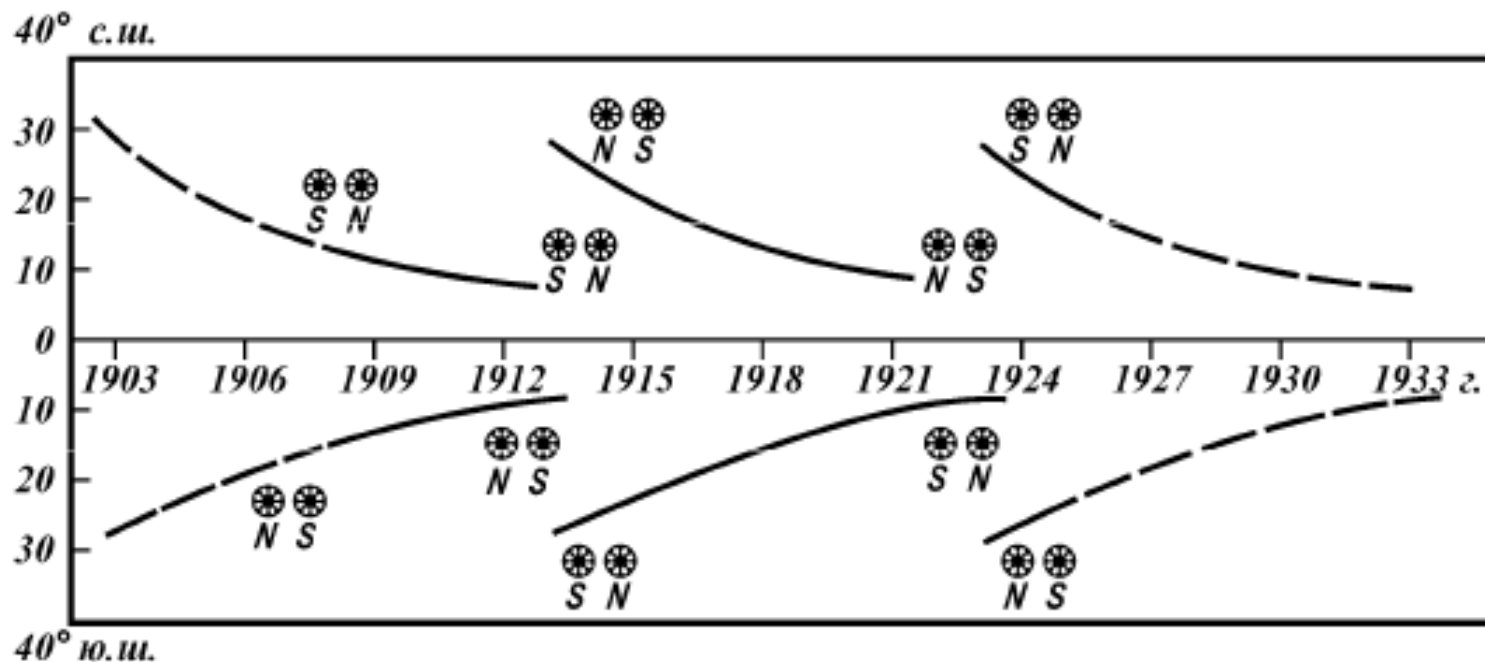


Одним из наиболее распространённых показателей уровня солнечной активности является число Вольфа, связанное с количеством солнечных пятен на видимой полусфере Солнца. Общий уровень солнечной активности меняется с характерным периодом, примерно равным 11 годам. Число Вольфа для данного дня вычисляется по формуле $W = k(f + 10g)$

ISES Solar Cycle Sunspot Number Progression

Observed data through May 2014





Смена полярности магнитных полей солнечных пятен в циклах солнечной активности.

S – южная полярность, N – северная полярность.

В начале 11-летнего цикла пятна появляются на более высоких широтах (королевских зонах) и постепенно смещаются к солнечному экватору, а на более высоких широтах появляются пятна нового цикла.

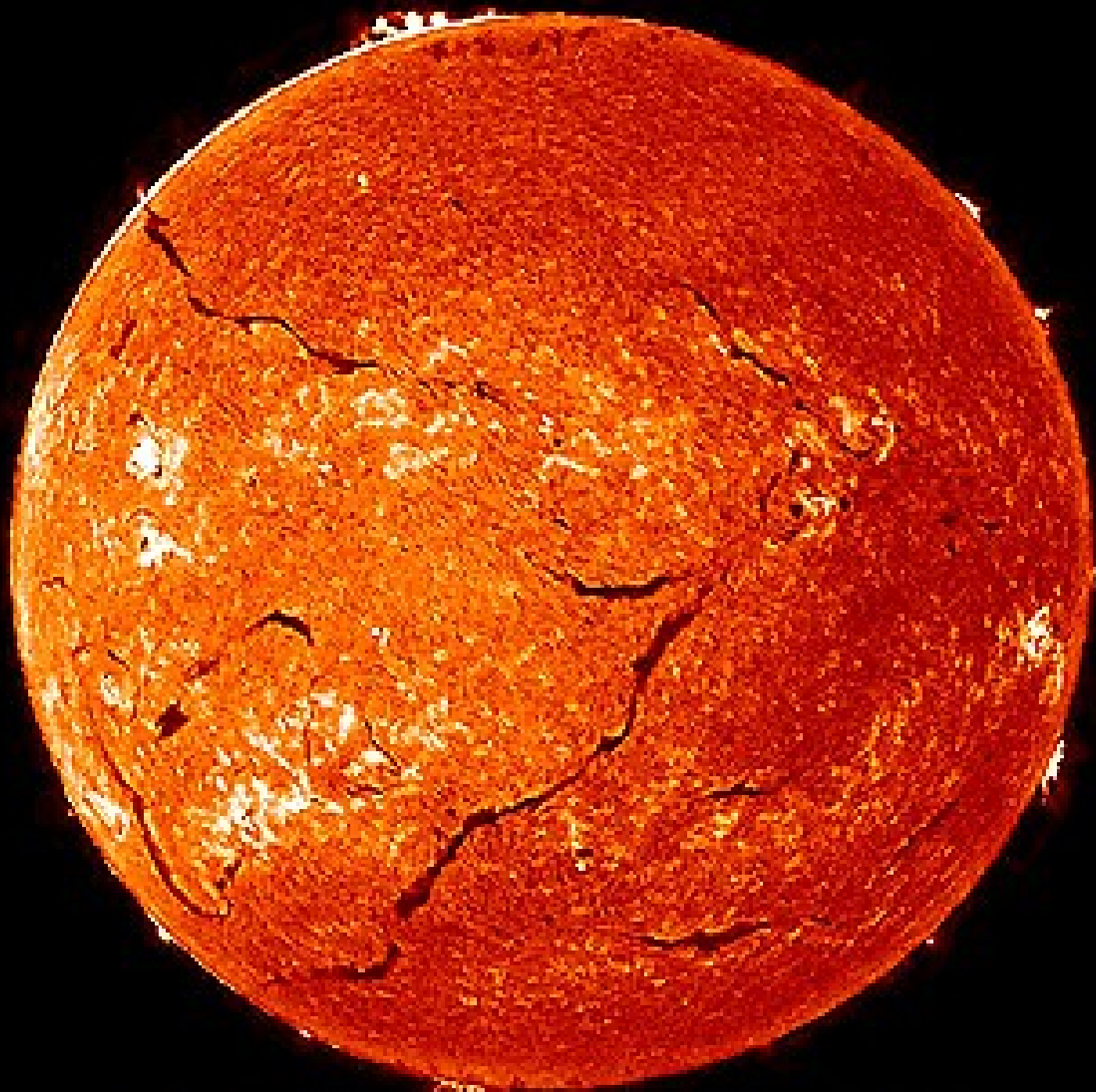
Солнечное
затмение 1999 г.

ХРОМОСФЕРА

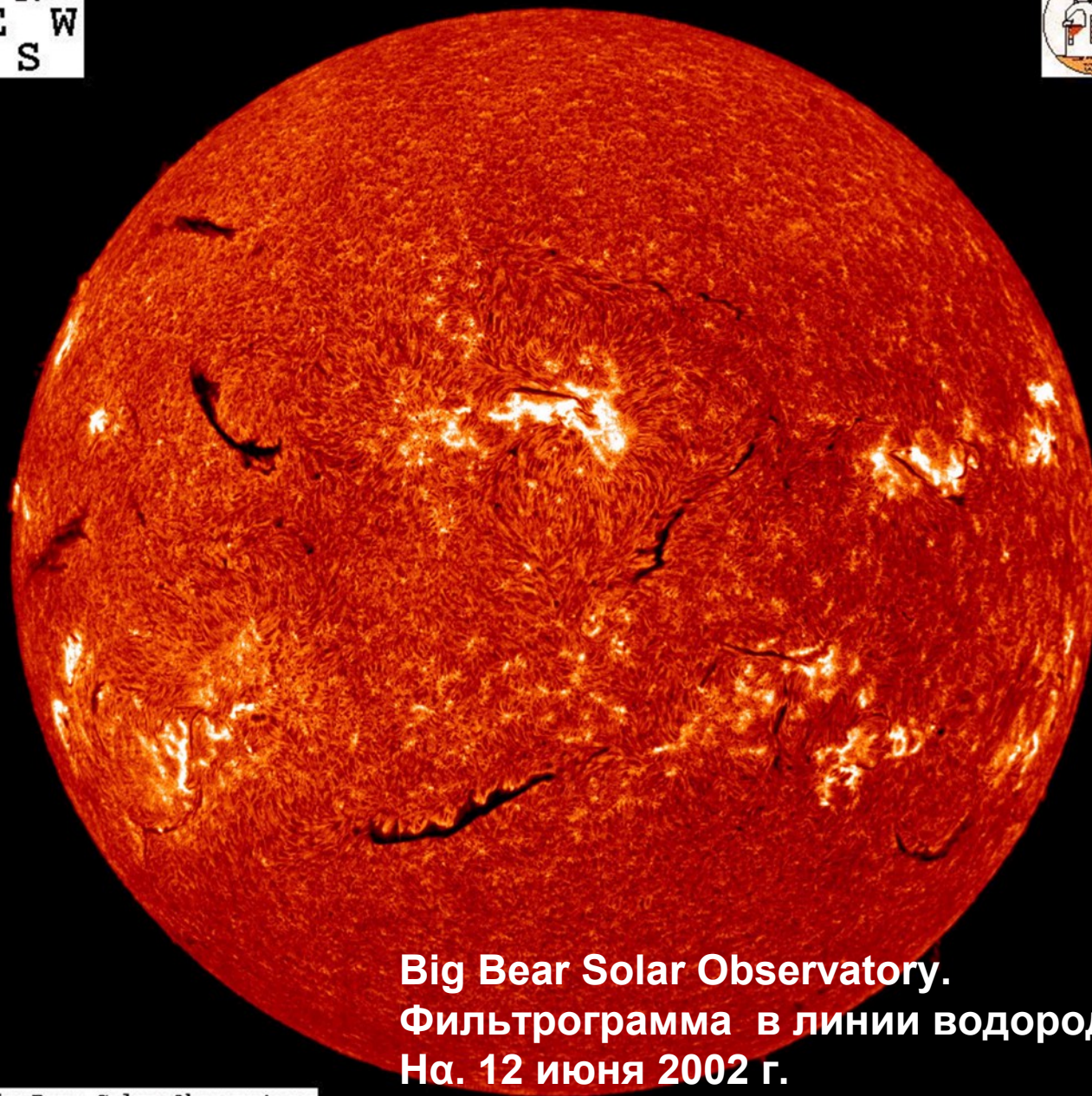


Выше
фотосферы
расположен
слой
атмосферы
Солнца,
называемый
хромосферой.
Хромосфера
видна только
во время
полных
солнечных
затмений как
розовое
кольцо,
окружающее
тёмный диск
Луны.

ХРОМОСФЕРА

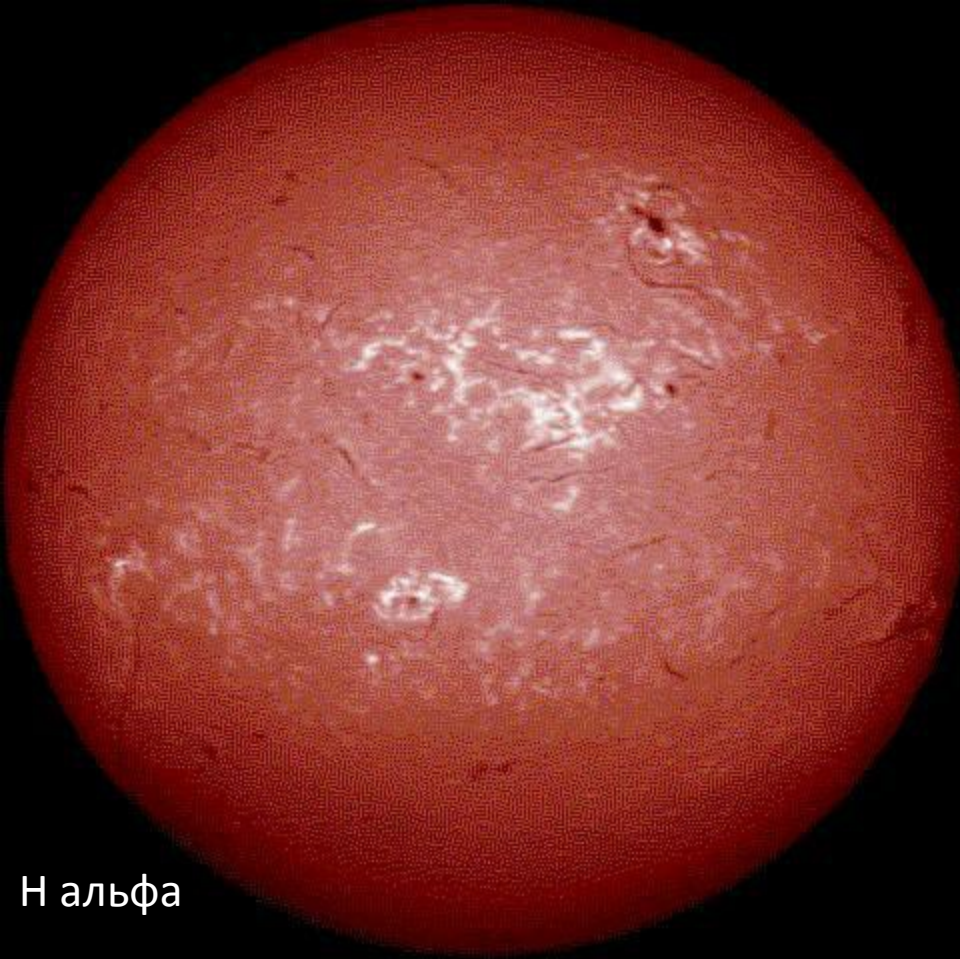


N
E S W

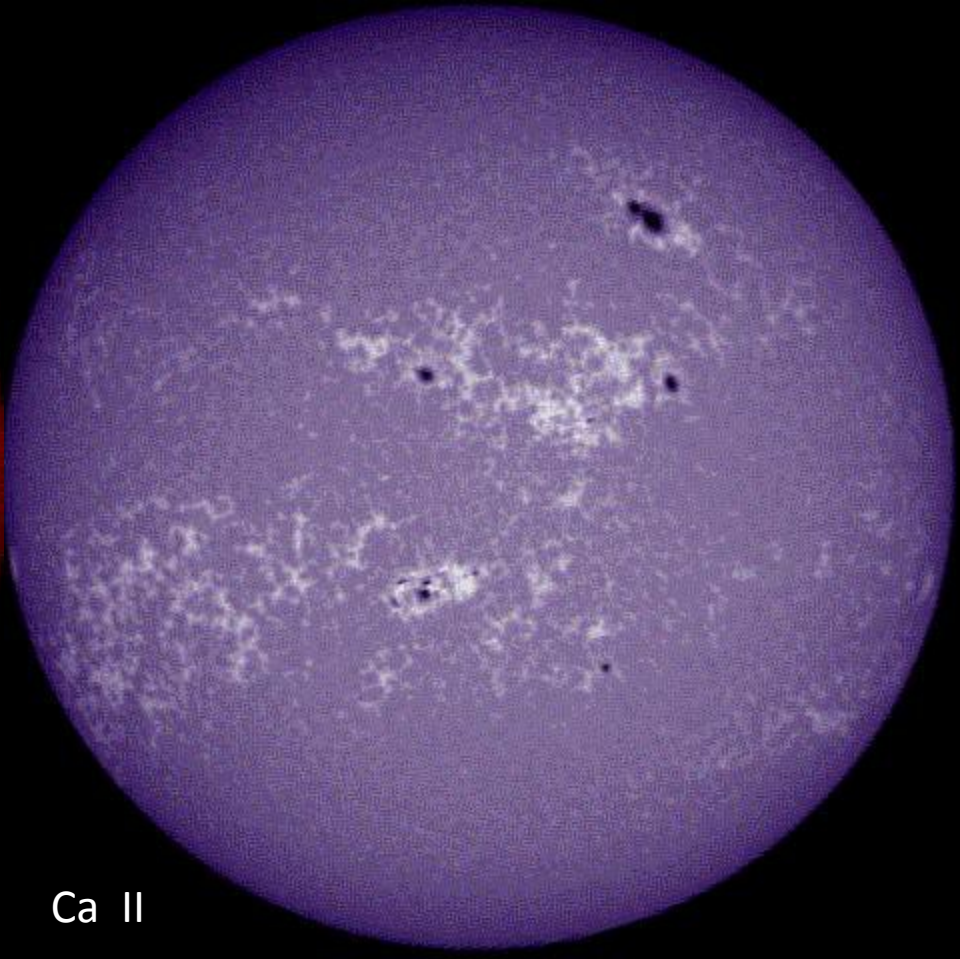


Big Bear Solar Observatory.
Фильтрограмма в линии водорода
H α . 12 июня 2002 г.

Big Bear Solar Observatory
2002-12-08 17:17:42 UT



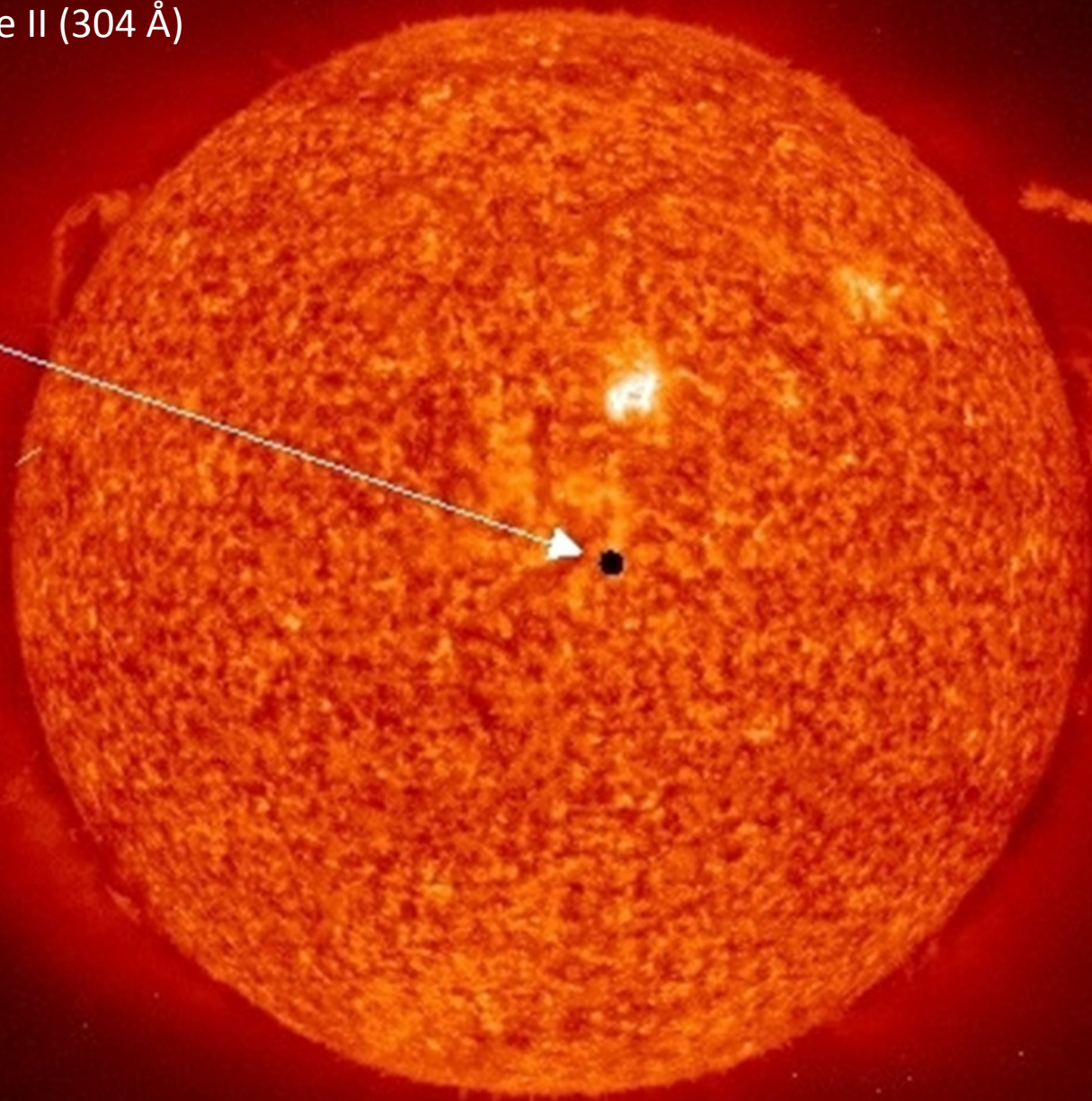
Н альфа



Ca II

Исследования **хромосферы Солнца** не исчерпываются наблюдениями в линии Н-альфа. Многие детали на поверхности **хромосферы** также видны в линии излучения ионизованного кальция Ca II с длиной волны 3934 ангстрем (линия К кальция), расположенной в фиолетовой части солнечного спектра. Это излучение обнаружено и на других звездах солнечного типа. Благодаря этому мы теперь знаем не только о **хромосфере Солнца**, но и о **хромосфере** далеких звезд

He II (304 Å)



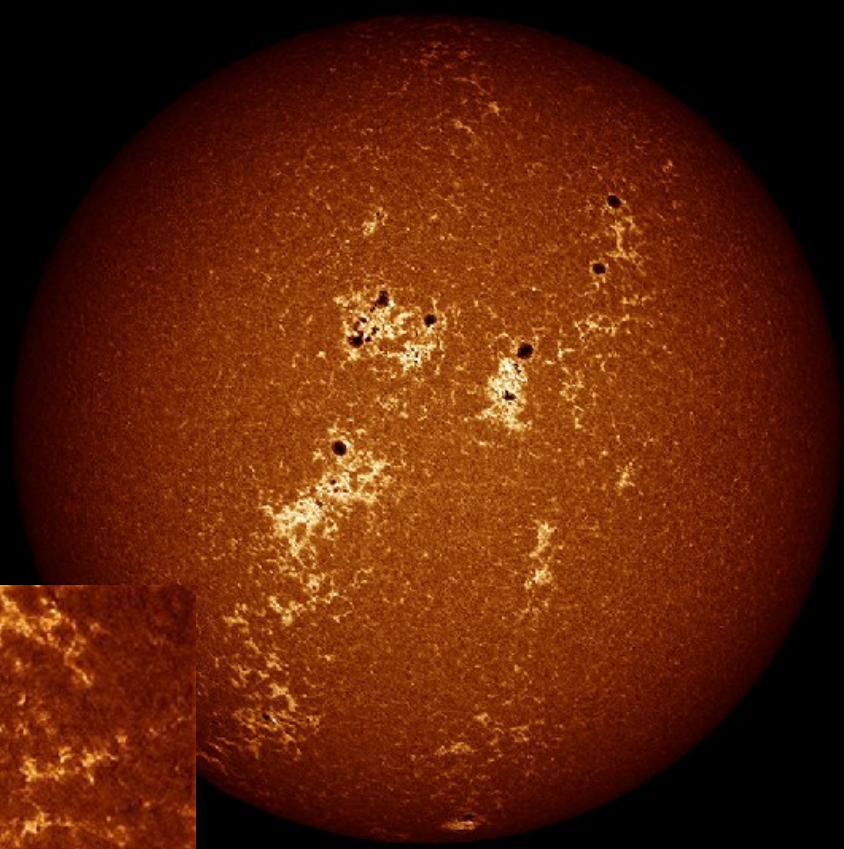
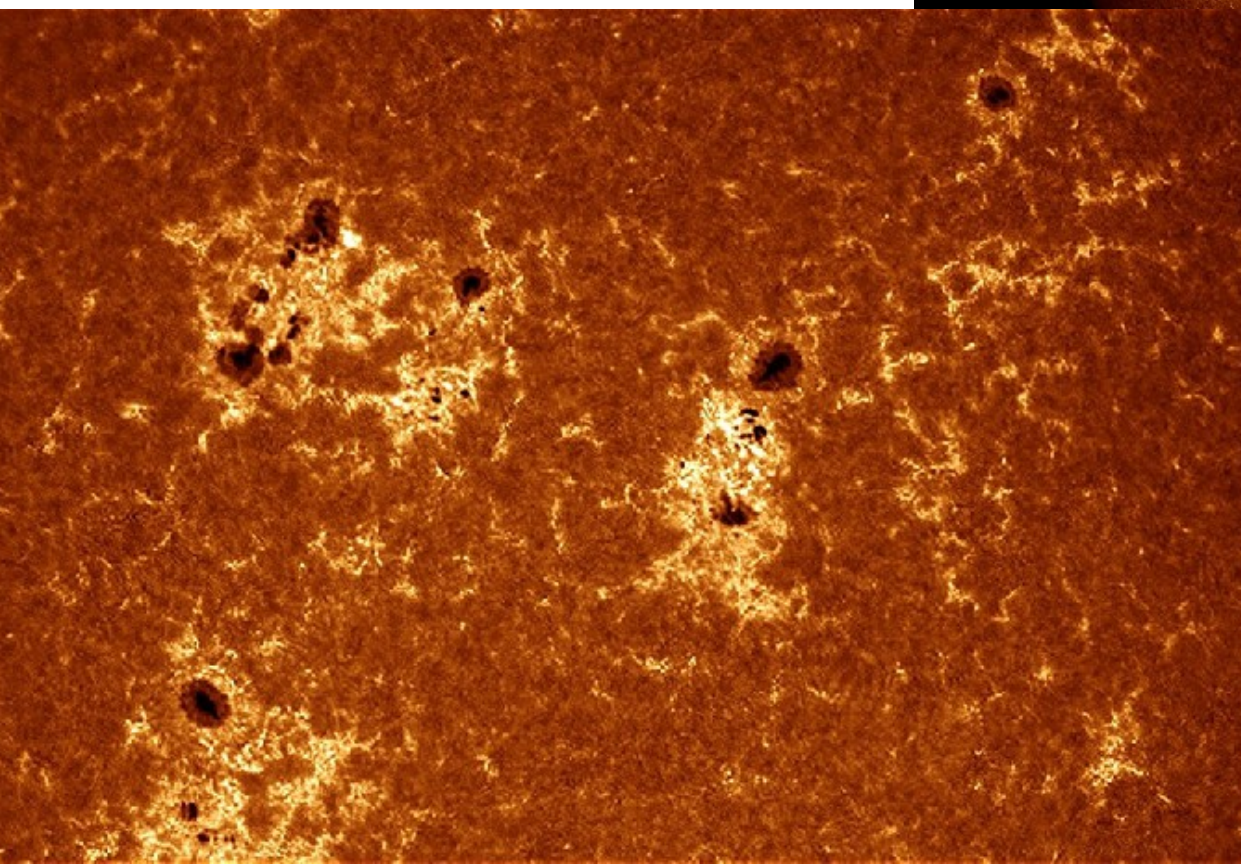
Размеры Земли в сравнении с Солнцем

Активные
области,
протуберанцы,
хромосферная
сетка, спикюлы

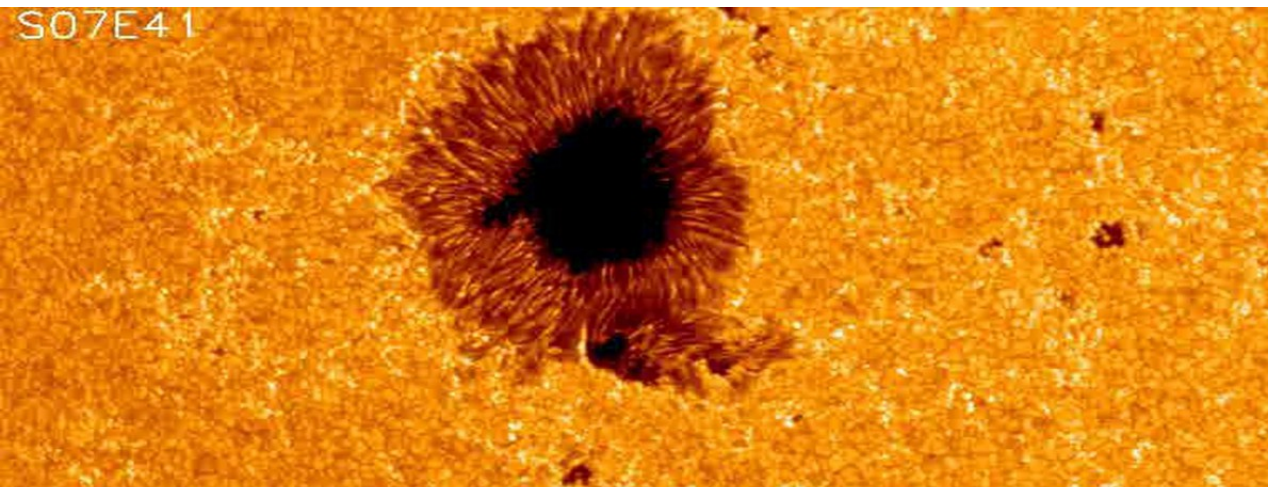


Хромосфера

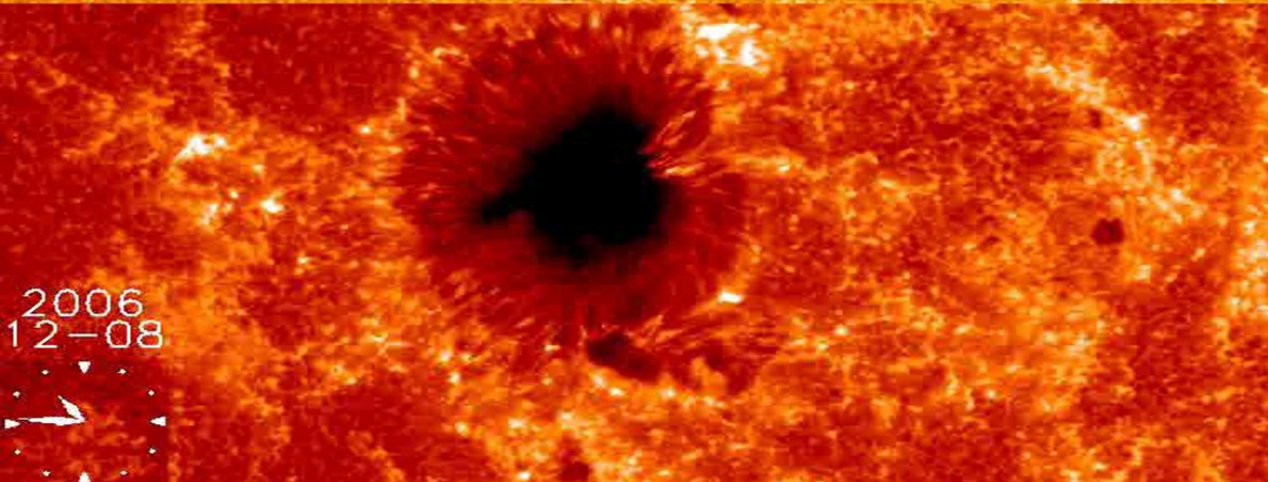
16 апреля 2014 г.



S07E4 1



Уменьшение потока энергии в пятнах («чернота») обусловлена торможением сильным магнитным полем конвективных движений вещества фотосферы. (Подавление конвекции).



SOT/Hinode может измерять магнитные поля фотосферы и наблюдать расположенную выше хромосферу с помощью выбранных фильтров. Это позволяет изучать динамические явления, такие как нагрев вокруг солнечных пятен, вспышки и джеты (jets).

Изображение в линии Ca II H (397 нм), представляет хромосферу выше фотосферы. Яркие места показывают нагрев хромосферы, совпадают с концентрацией магнитных полей на фотосфере.

Плотность в хромосфере падает с увеличением расстояния от центра Солнца. Исследование спектров хромосферы привело к выводу, что в слое, где происходит переход от фотосферы к хромосфере, температура переходит через минимум над основанием хромосферы $T \sim 10^4 \text{ K}$, а на высоте в несколько тыс. км $\sim 1,5-2 \cdot 10^5 \text{ K}$. Скорости до $15 \cdot 10^3 \text{ м/с}$.

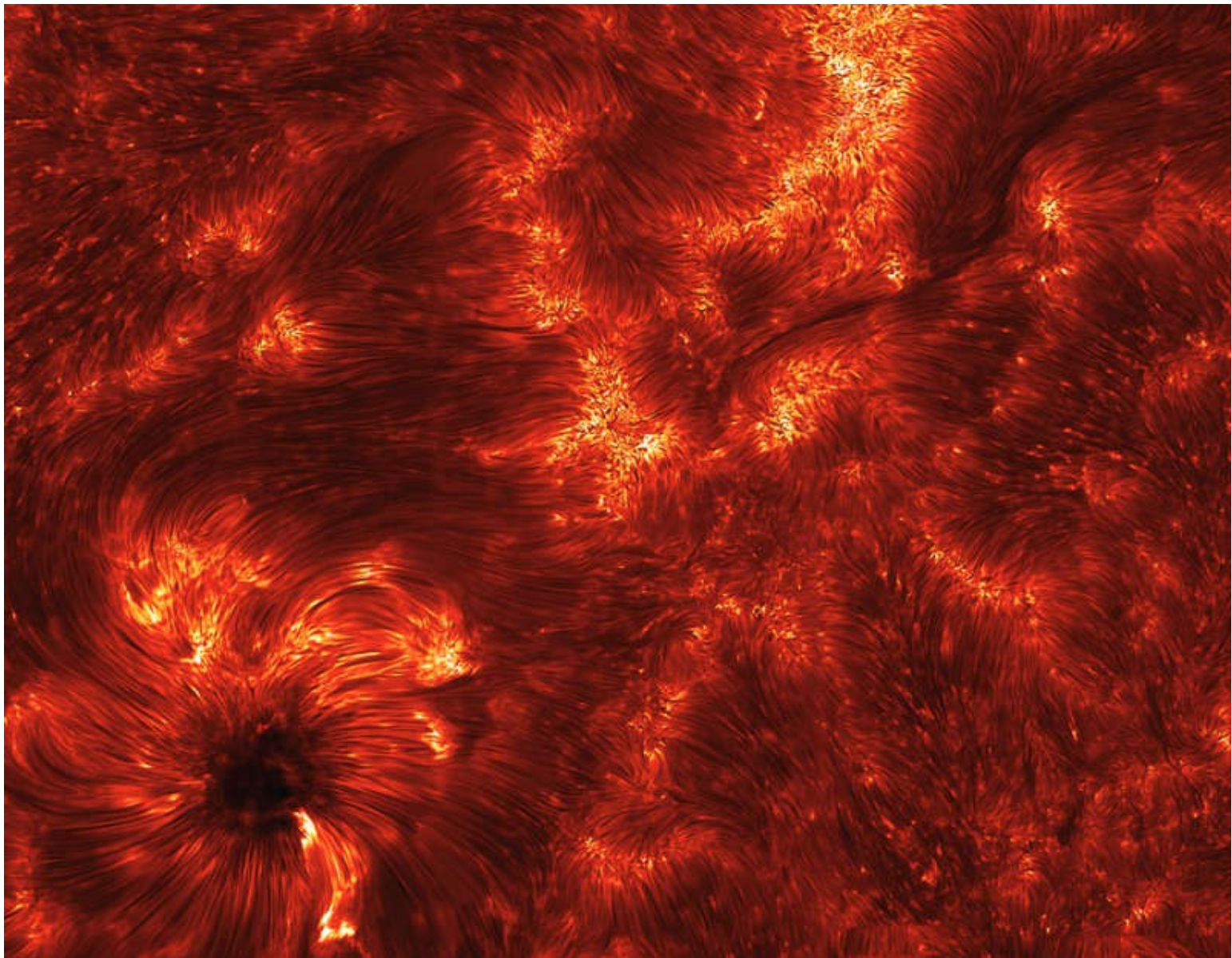
В хромосфере факелы обычно называют **флоккулами**. В линии водорода $H\alpha$ 6563 Å видны **тёмные волокна**

На диске Солнца видна яркая **хромосферная сетка**, состоящая из отдельных мелких узелков диаметром до 1000 км и крупных диаметром от 2000 до 8000 км. Крупные узелки представляют собой скопления мелких. Размеры ячеек сетки 30-40 тысяч км. На границах ячеек хромосферной сетки образуются **спикулы** - это струи плазмы, которые представляют собой длинные и вытянутые образования, выбрасываемые с поверхности Солнца в его атмосферу,

На краю диска Солнца хромосфера видна как неровная полоска, из которой выступают отдельные зубчики - **хромосферные спикеры**. Диаметр спикер 200-2000 км, высота порядка 10000 км, скорость подъёма плазмы в спикерах до 30 км/с. Одновременно на Солнце существует до 250 тысяч спикер.



Спикеры - это потоки на Солнце. Основная причина возникновения спикер — похожее на звук волны, распространяющиеся по поверхности Солнца и проникающие в его атмосферу

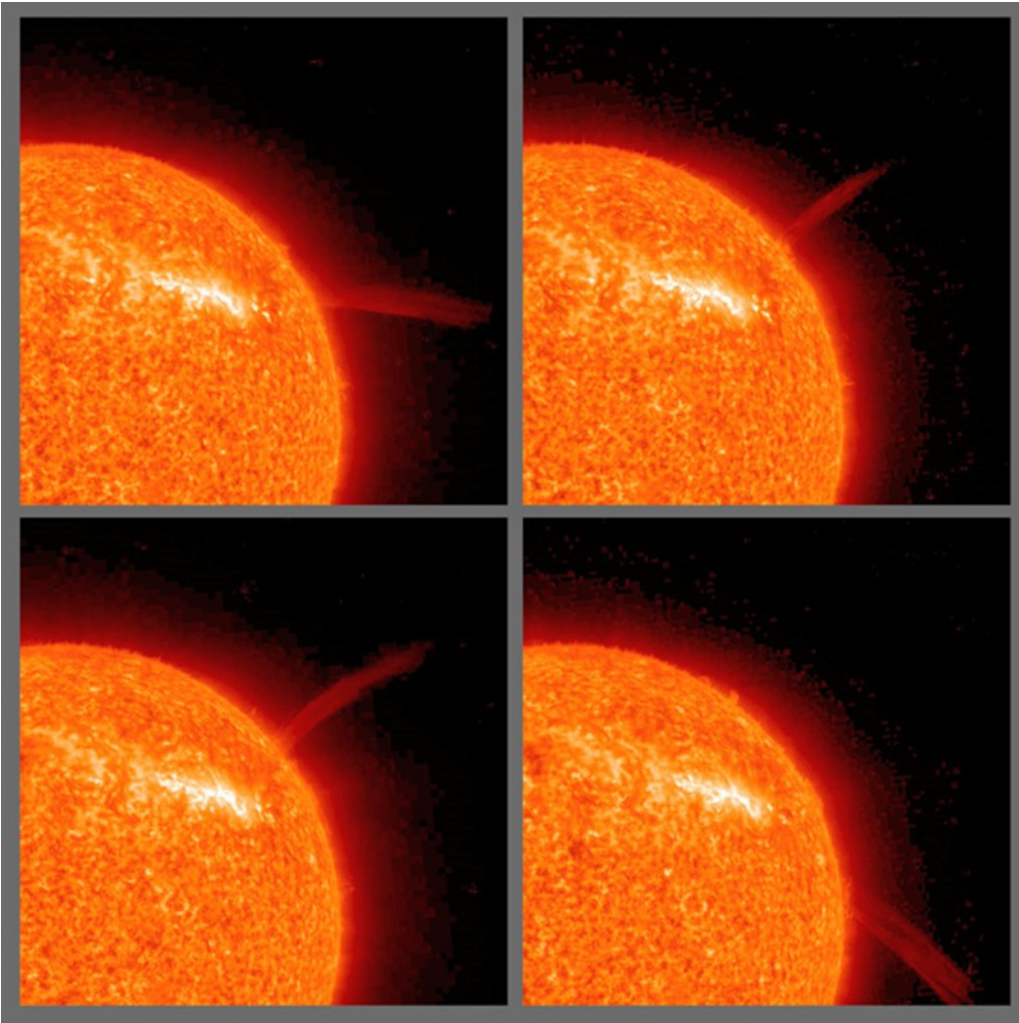


NSO – новый телескоп 1.6 м солнечной обсерватории Big Bear

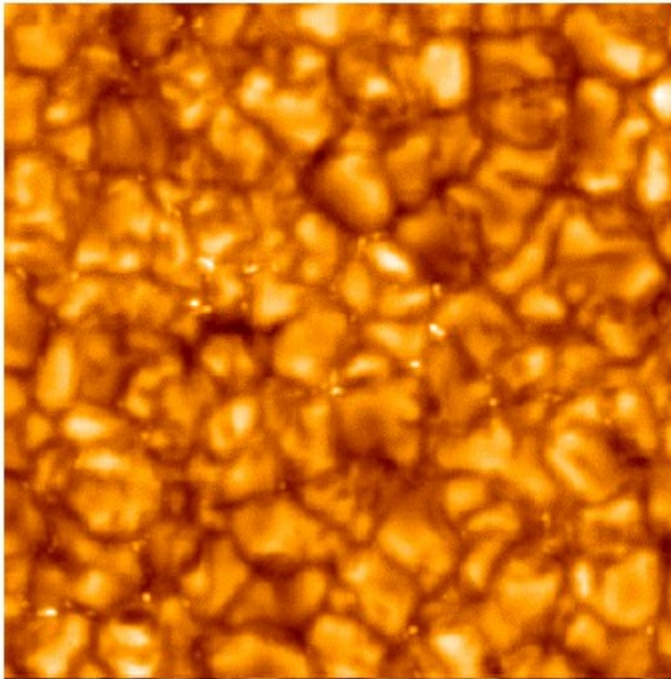


Серджи (STEREO)

**Узкие и направленные
выбросы. Результат
действия магнитных сил
в активной области**

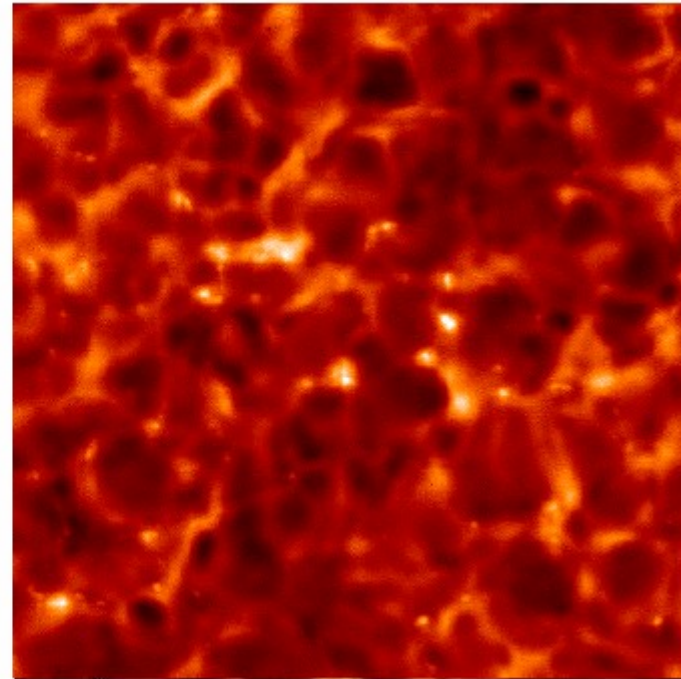


SOT/Hinode (японский спутник «Восход Солнца»), (2006) может *одновременно наблюдать фотосферу и хромосферу*. В G-полосе яркие точки указывают на сильные магнитные потоки. Яркие структуры в Ca II H - нагрев хромосферы. Эти данные могут дать ключ к пониманию нагрева хромосферы.



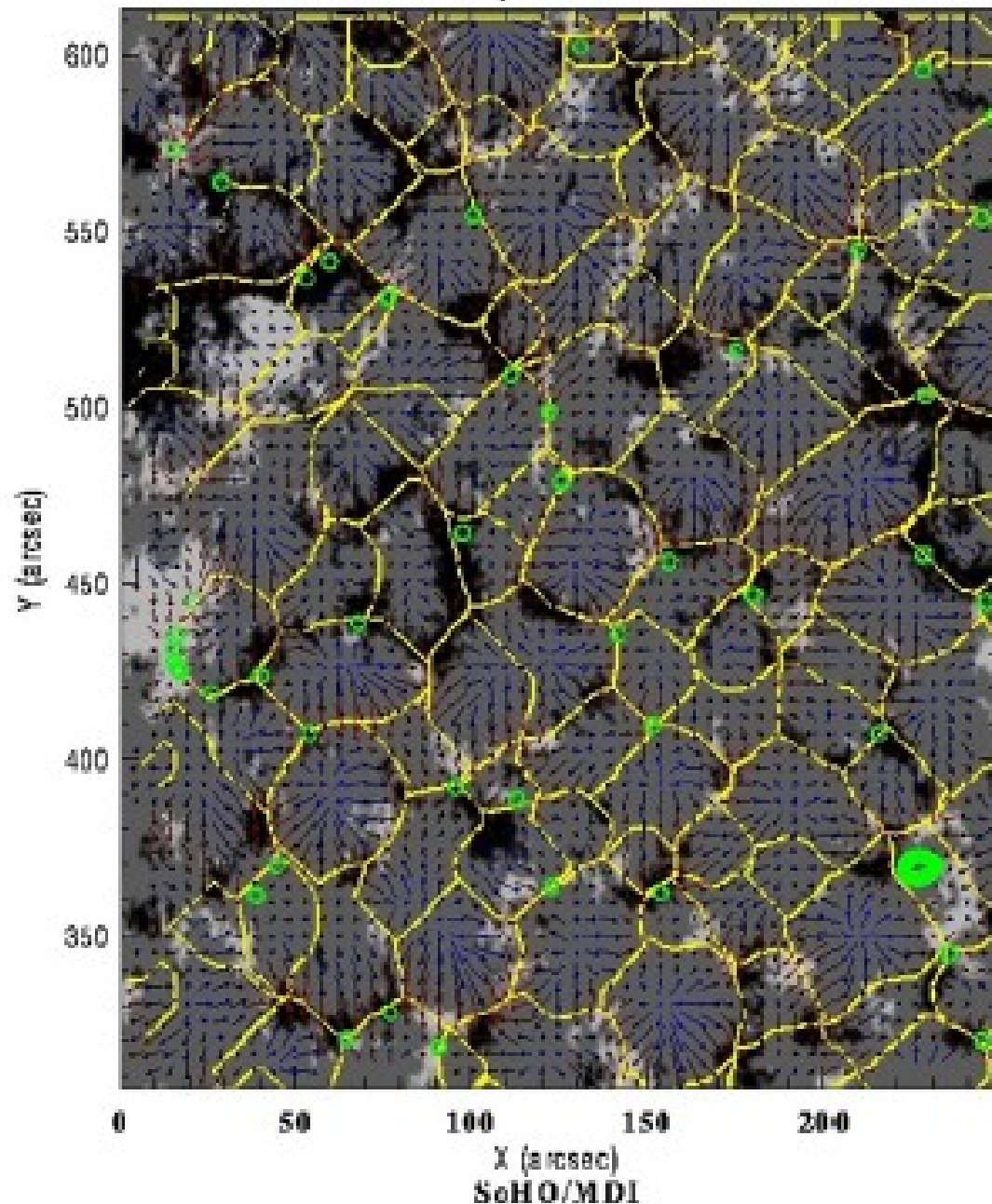
G-band (фотосфера)

G-band (430nm)



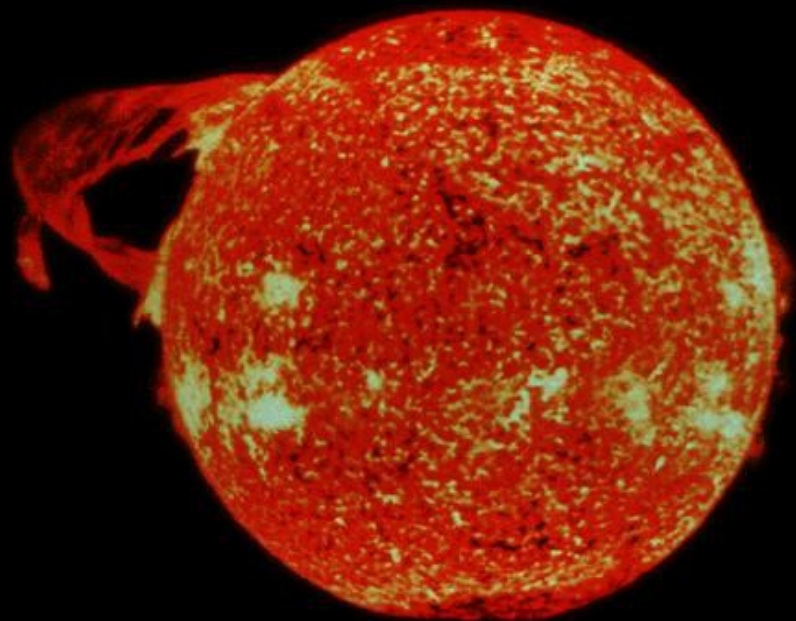
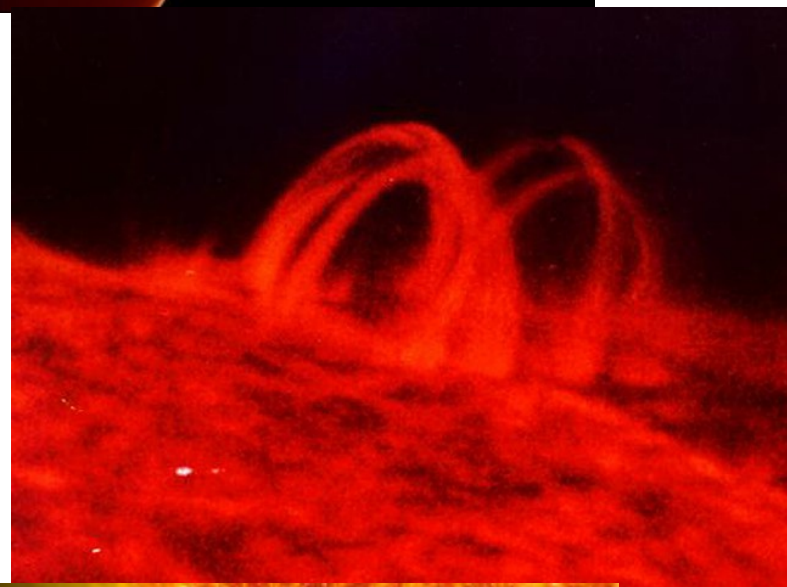
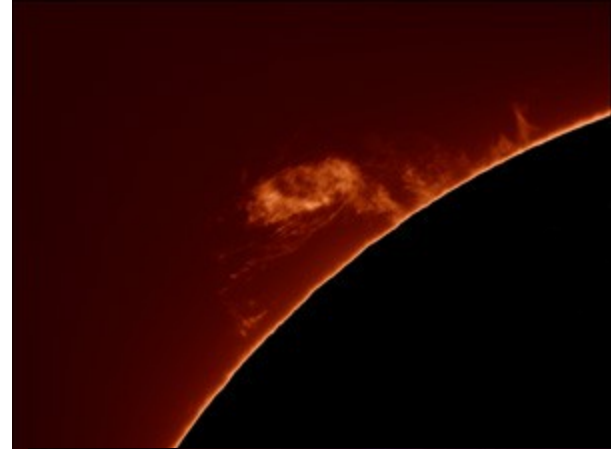
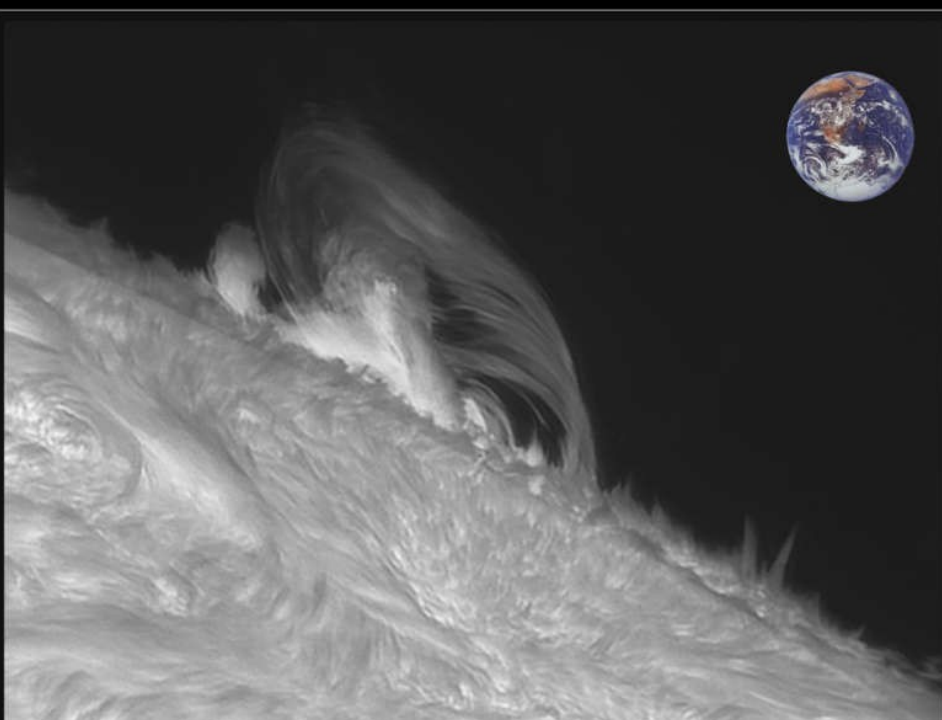
Ca II H (хромосфера)

23 Feb. 1996, 16:44 to 21:03 UT



Магнитограмма
SOHO/MDI. Границы
супергрануляционных
ячеек отмечены желтым,
стрелочки показывают
супергрануляционные
потoki.
SOHO (Solar and
Heliospheric Observatory)

П
Р
О
Т
У
Б
Е
Р
А
Н
Ц
Ы



ПРОТУБЕРАНЦЫ

представляют собой облака **хромосферного газа**, висящие в короне. Средняя плотность частиц в протуберанце 10^{11} см^{-3} . температура 7000 К. Плотность на два порядка больше, чем в окружающей короне, а T на два порядка меньше. Поддерживать плотное вещество способны только магнитные силы.

Протуберанцы разделяют:

На волокна активных областей (состоят из пучка тонких нитей, слабо закрученных в жгут, длина 50 Мм, высота -10 Мм, ширина несколько Мм) на лимбе едва выступают над хромосферой.

и

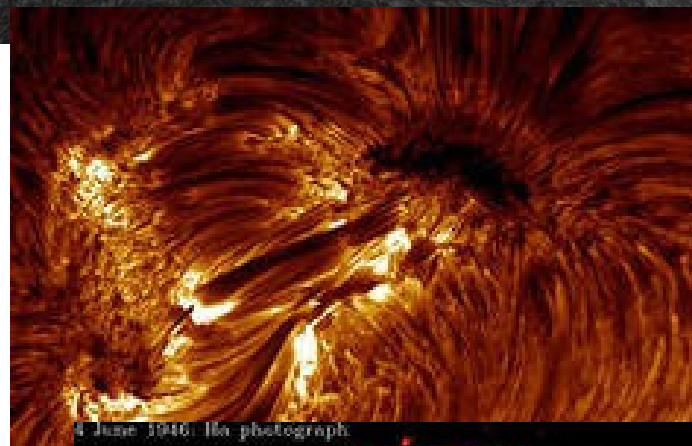
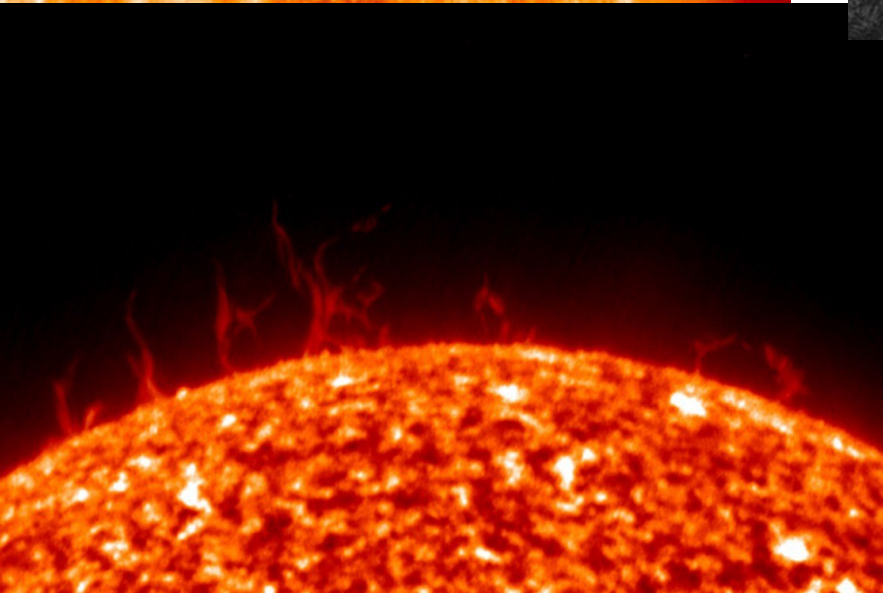
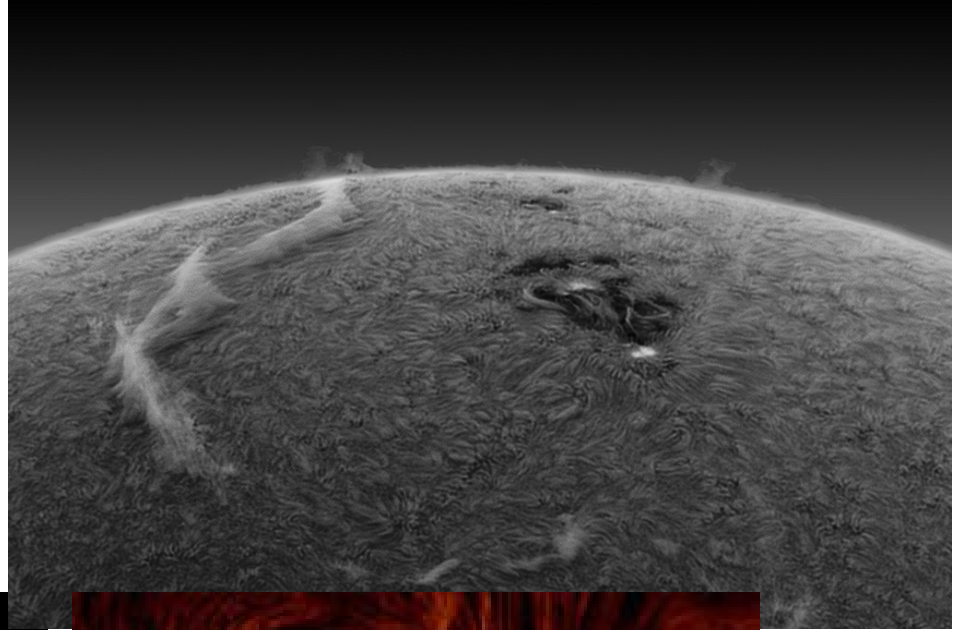
Спокойные протуберанцы, имеют большие размеры - длина 600 Мм, высота 1000 Мм, ширина 15 Мм. Спокойный протуберанец обычно живёт около месяца.

Магнитная природа протуберанцев проявляется в их положении на Солнце. Волокна всегда располагаются на линиями раздела полярностей радиального поля, которую называют **нейтральной линией**, образуют зону инверсии или канал волокна. Распределение волокон по солнечной поверхности меняется с фазой цикла.

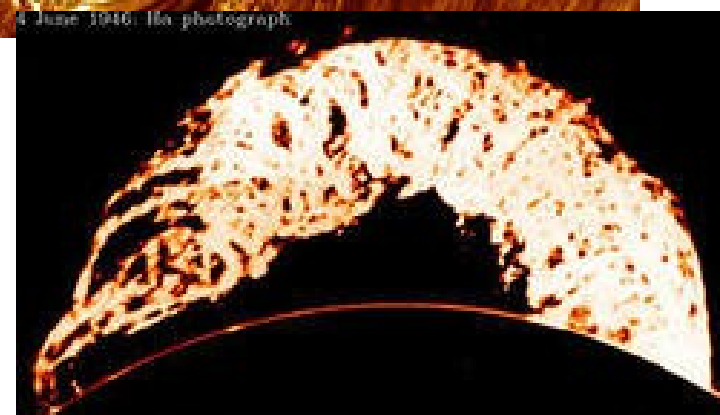
Протуберанцы бывают неподвижными или медленно меняющиеся, окружёнными плавными изогнутыми струями, которые втекают в хромосферу или вытекают из неё, поднимаясь на десятки и сотни тысяч километров. При наблюдении в красной линии водорода $H\alpha$ на диска Солнца они кажутся тёмными, длинными и изогнутыми волокнами.

Протуберанцы имеют примерно ту же плотность и температуру, что и хромосфера. Но они находятся над ней и окружены более высокими, сильно разреженными верхними слоями солнечной атмосферы. На лимбе они видны как яркие образования. Протуберанцы не падают в хромосферу потому, что их вещество поддерживается магнитными полями активных областей Солнца.

Впервые спектр протуберанца рассмотрел **французский астроном Жансен Пьер Жюль Сезар** в Гунтуре, маленьком городке на восточном побережье Индии, во время наблюдения полного солнечного затмения **18 августа 1868 г.** Он увидел в спектре незнакомую — ярко-желтую лингию. Такое же открытие, независимо в Англии, сделал **Джозеф Норман Локьер**. Это новое вещество, найденное на поверхности Солнца с помощью спектроскопа, спустя два года Локьер совместно с английским химиком Эдвардом Франкландом, в сотрудничестве с которым он работал, предложил называть «гелий» от греческого слова «солнце» — «гелиос».



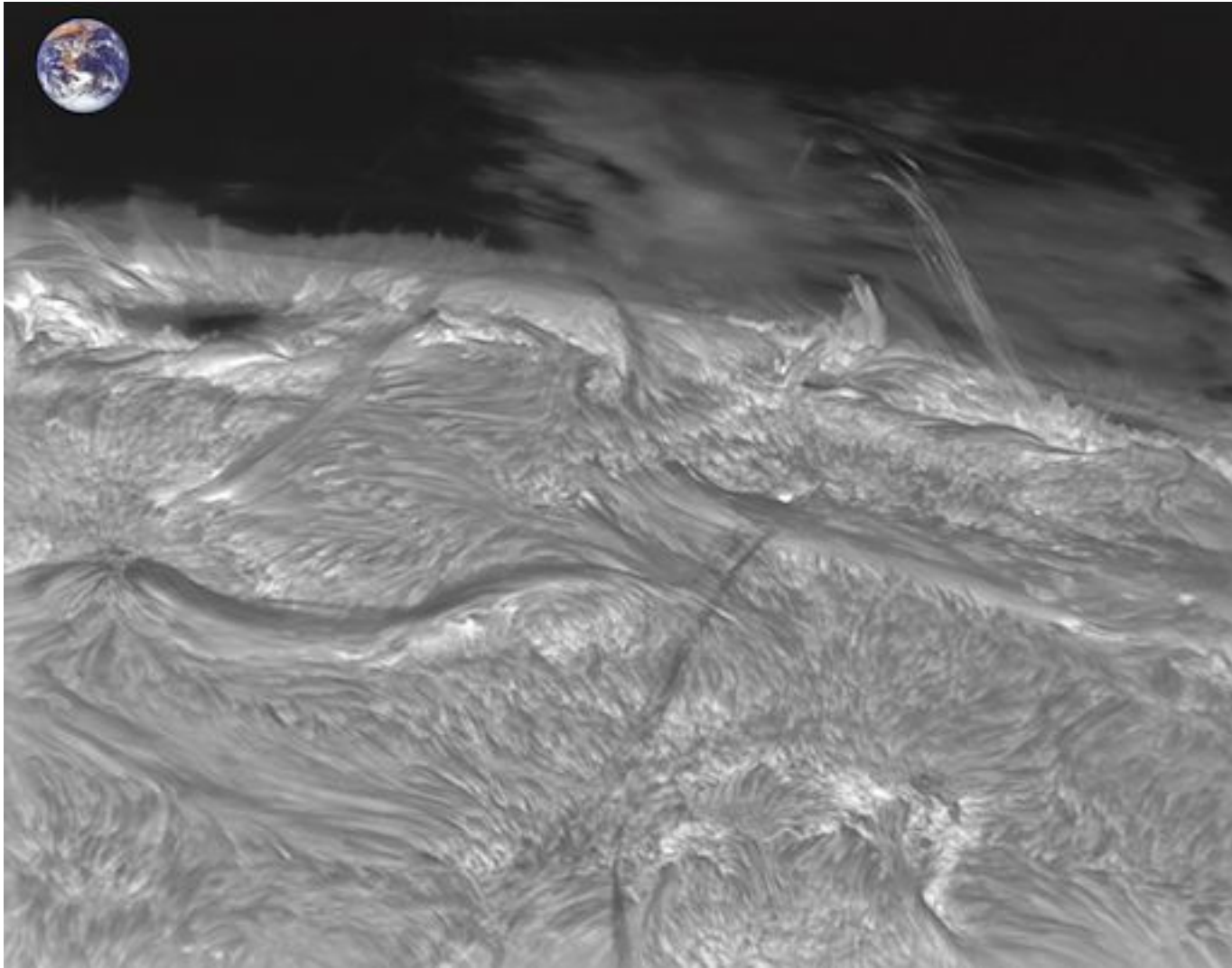
4 June 1940: Ha photograph



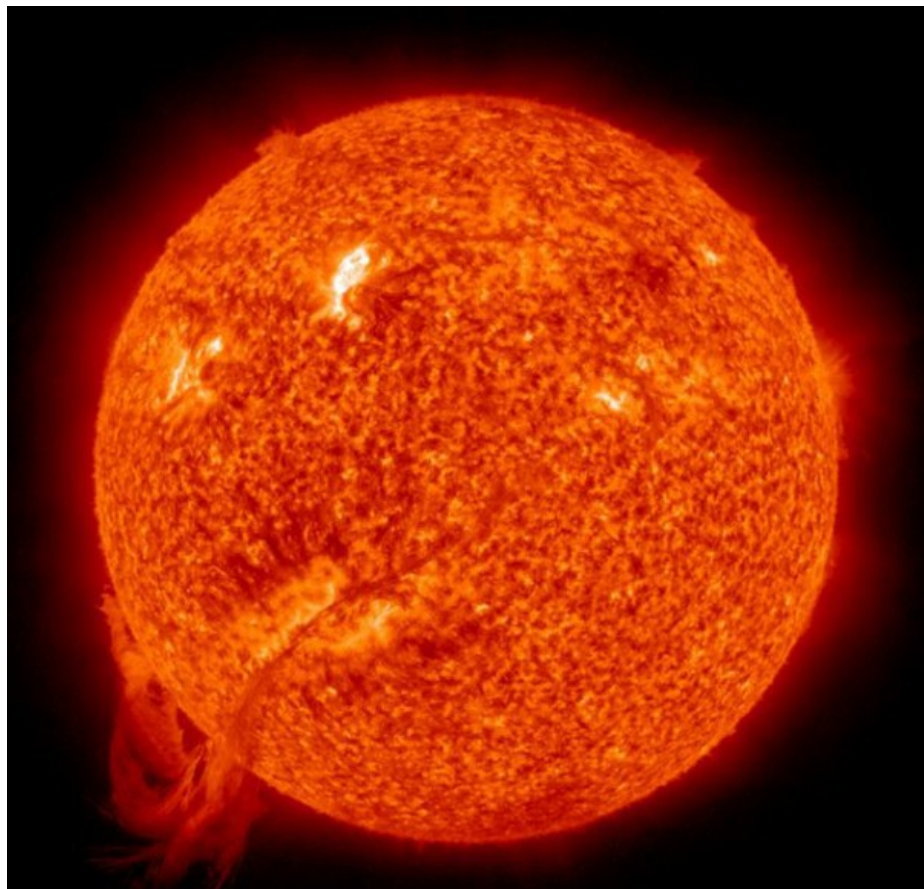
Source: High Altitude Observatory Archives

HAO A-007

15 июня 2014 г.



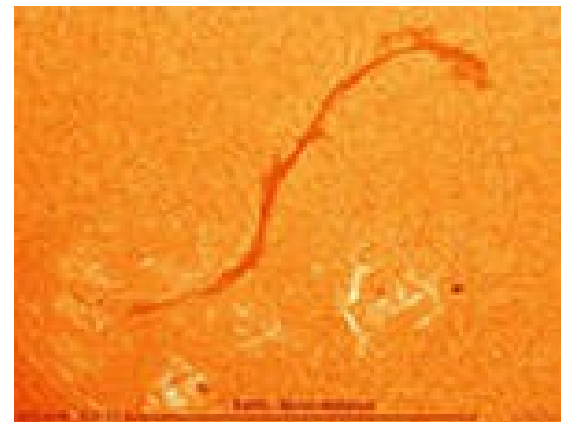
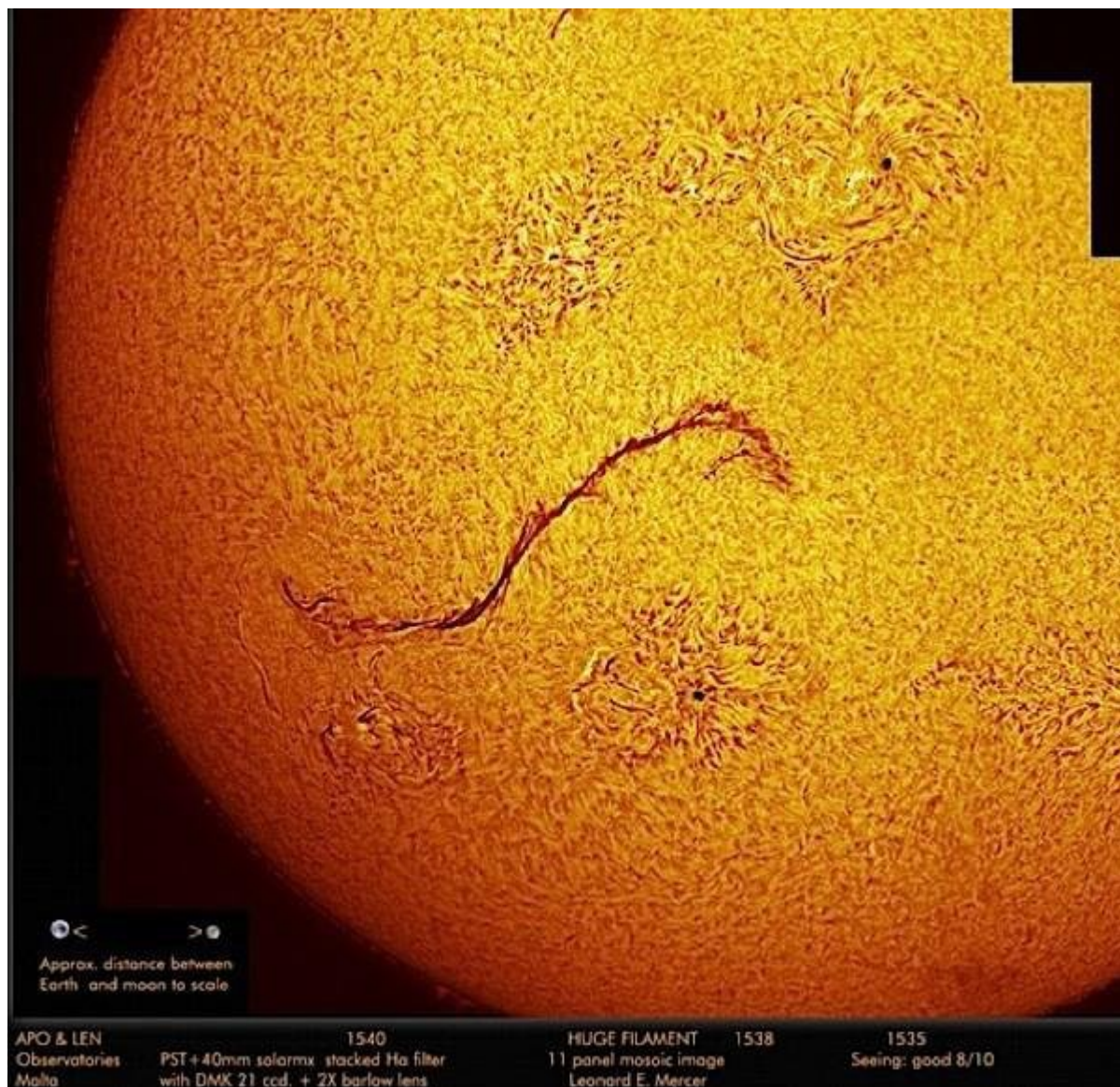
Облако солнечного вещества, поднявшееся над поверхностью Солнца с помощью магнитного поля



Волокно 10 октября 2013 г.



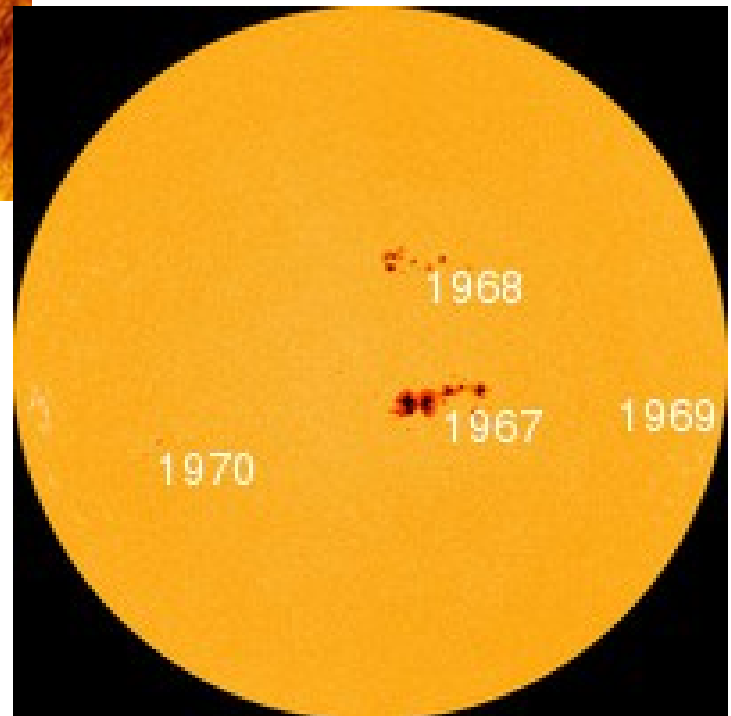
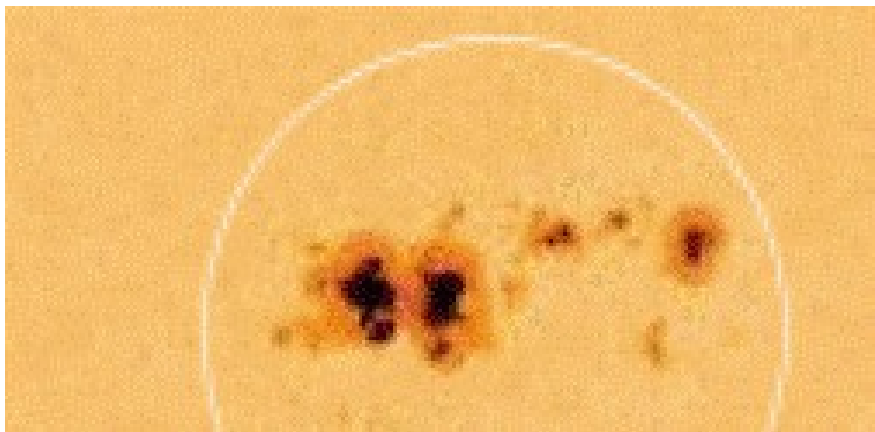




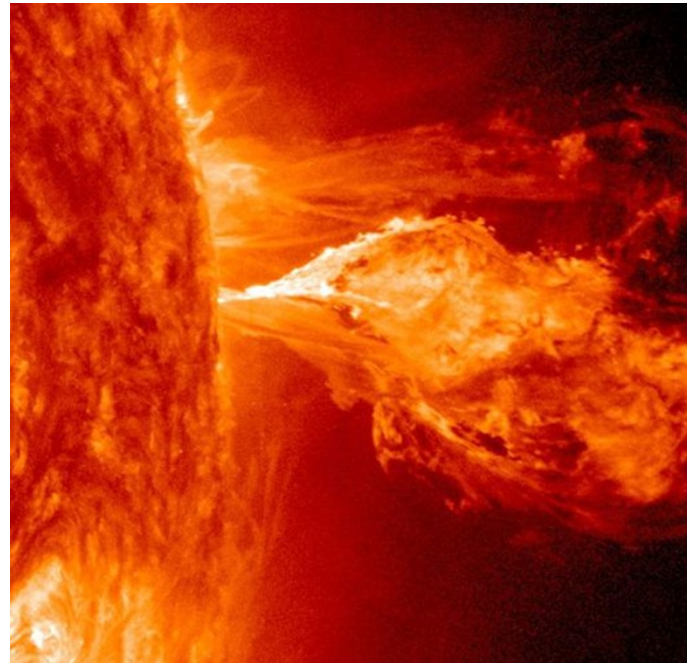
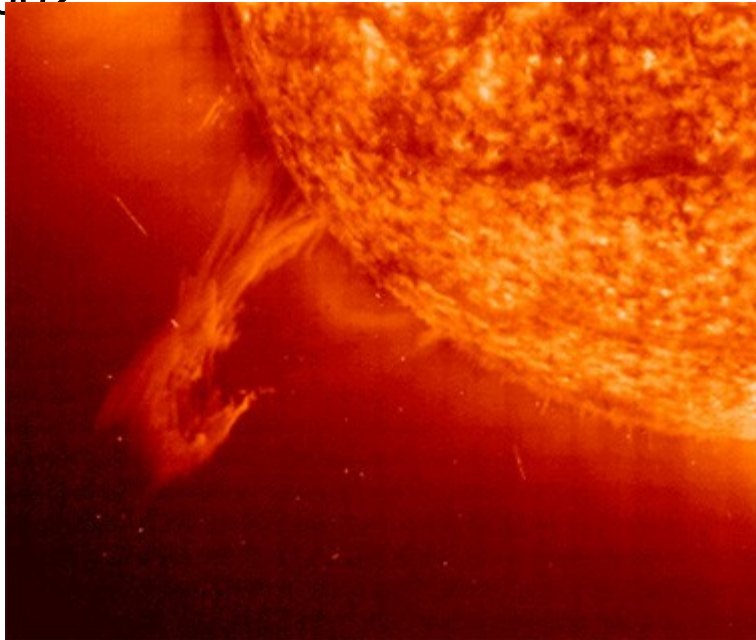
Большое волокно 05 августа 2012 г.

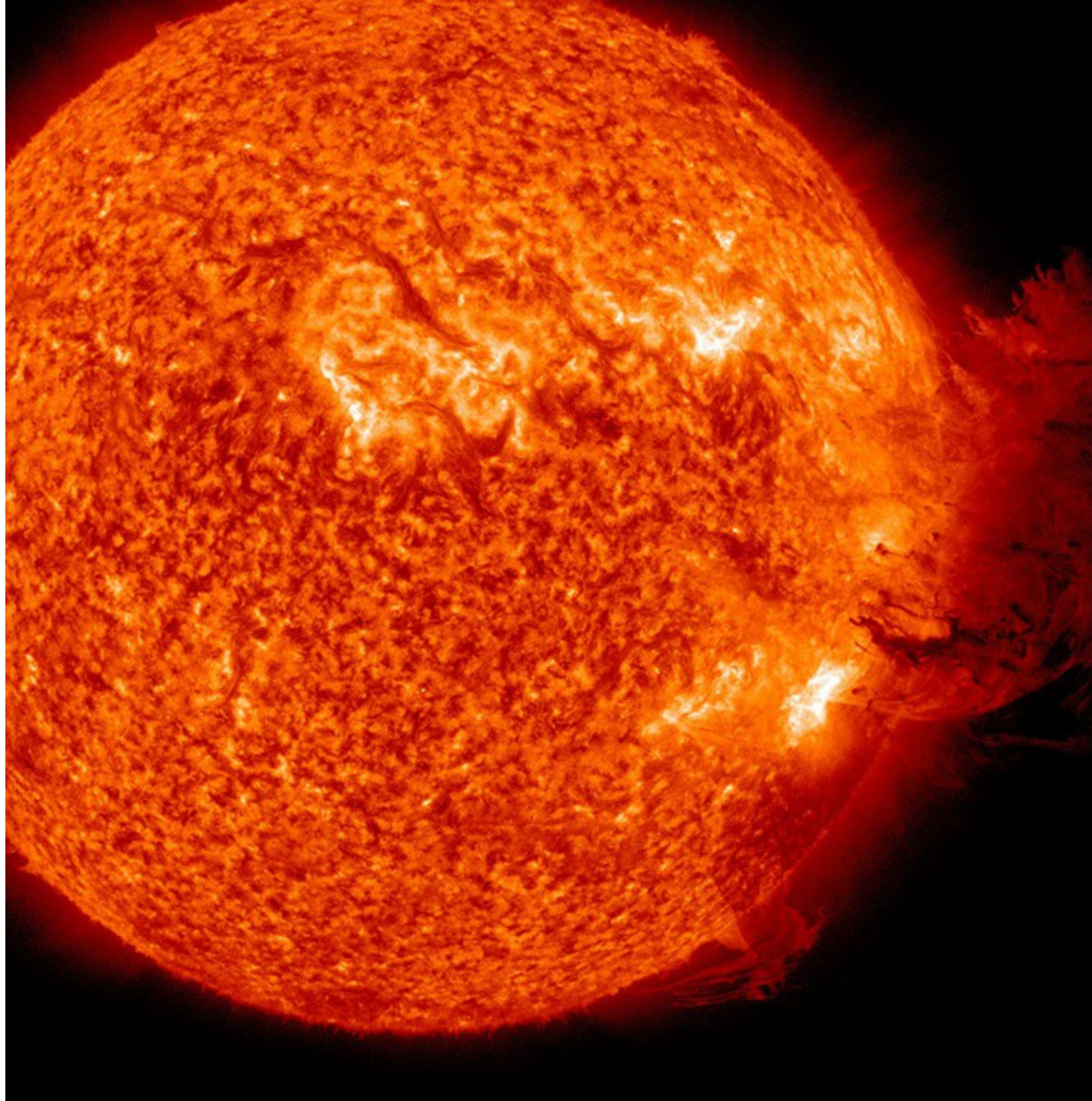


Активная область
NOAA 1967
4 февраля 2014 г.



Эруптивные протуберанцы (ЭП) - это крупные образования в атмосфере Солнца, отличающиеся от окружающего их вещества повышенной плотностью и пониженной температурой; наиболее заметный тип проявления активности в солнечной короне. Примером события, когда распад волокна (волокно – это протуберанец, наблюдаемый в проекции на солнечный диск) стал источником возрастания потоков СКЛ в ОКП, может служить событие 14-17 апреля 1994. Но следует отметить, что такие события являются относительно редкими. В качестве примера показан крупный протуберанец, наблюдавшийся на SOHO в УФ диапазоне в июле 2002



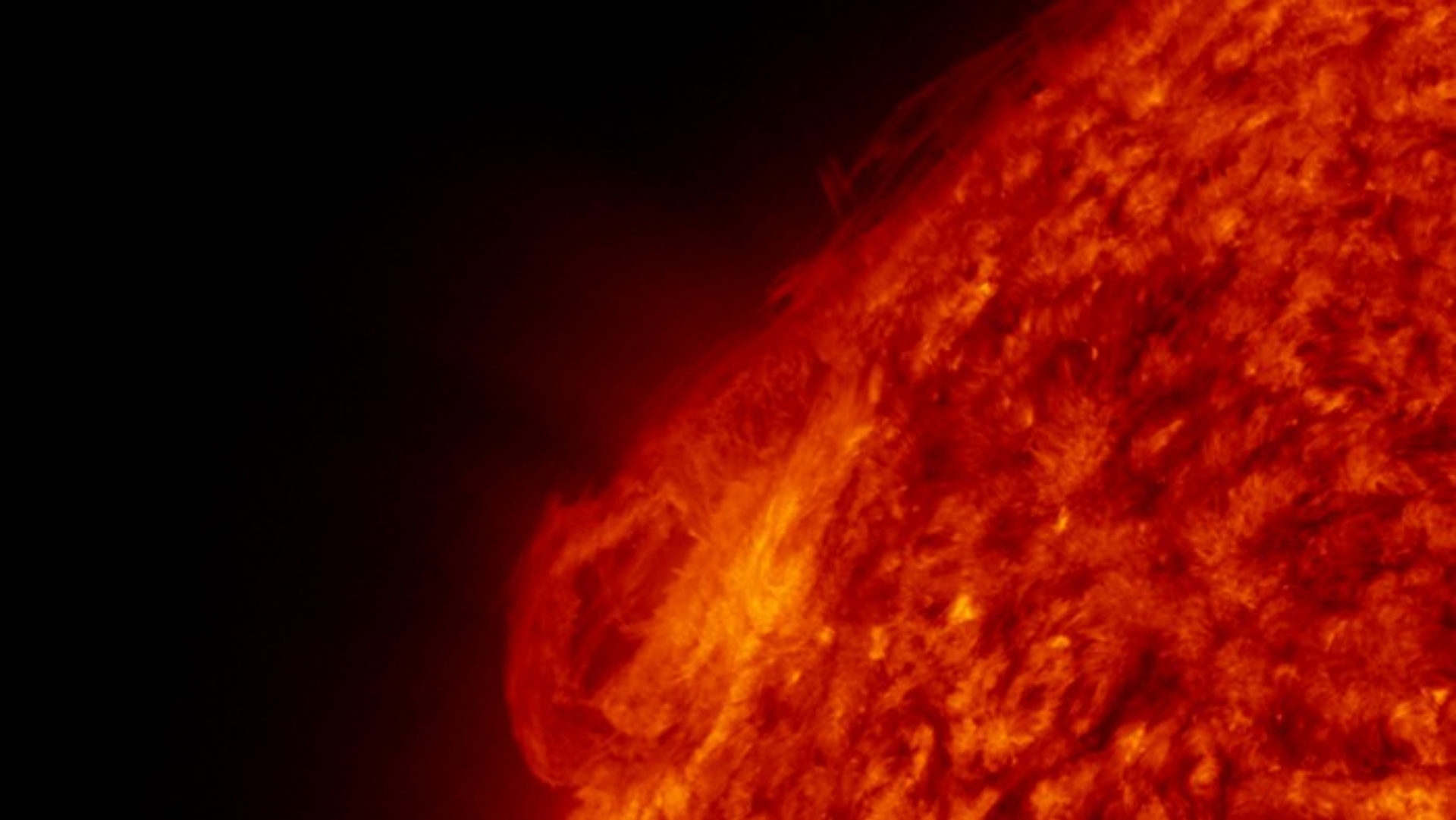


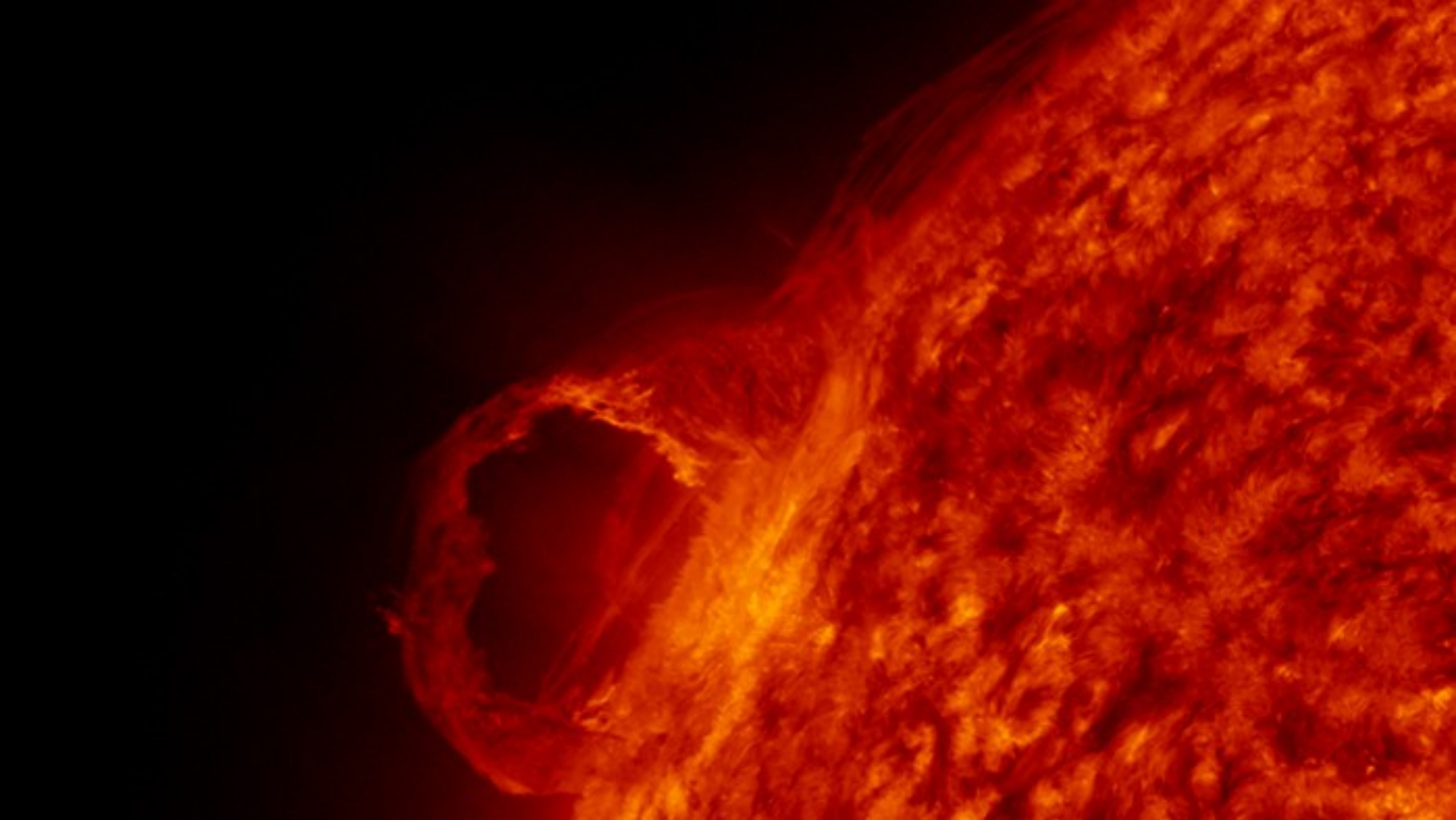
A small satellite with a yellow body and blue solar panels is shown in space, with the Earth's horizon visible in the background.

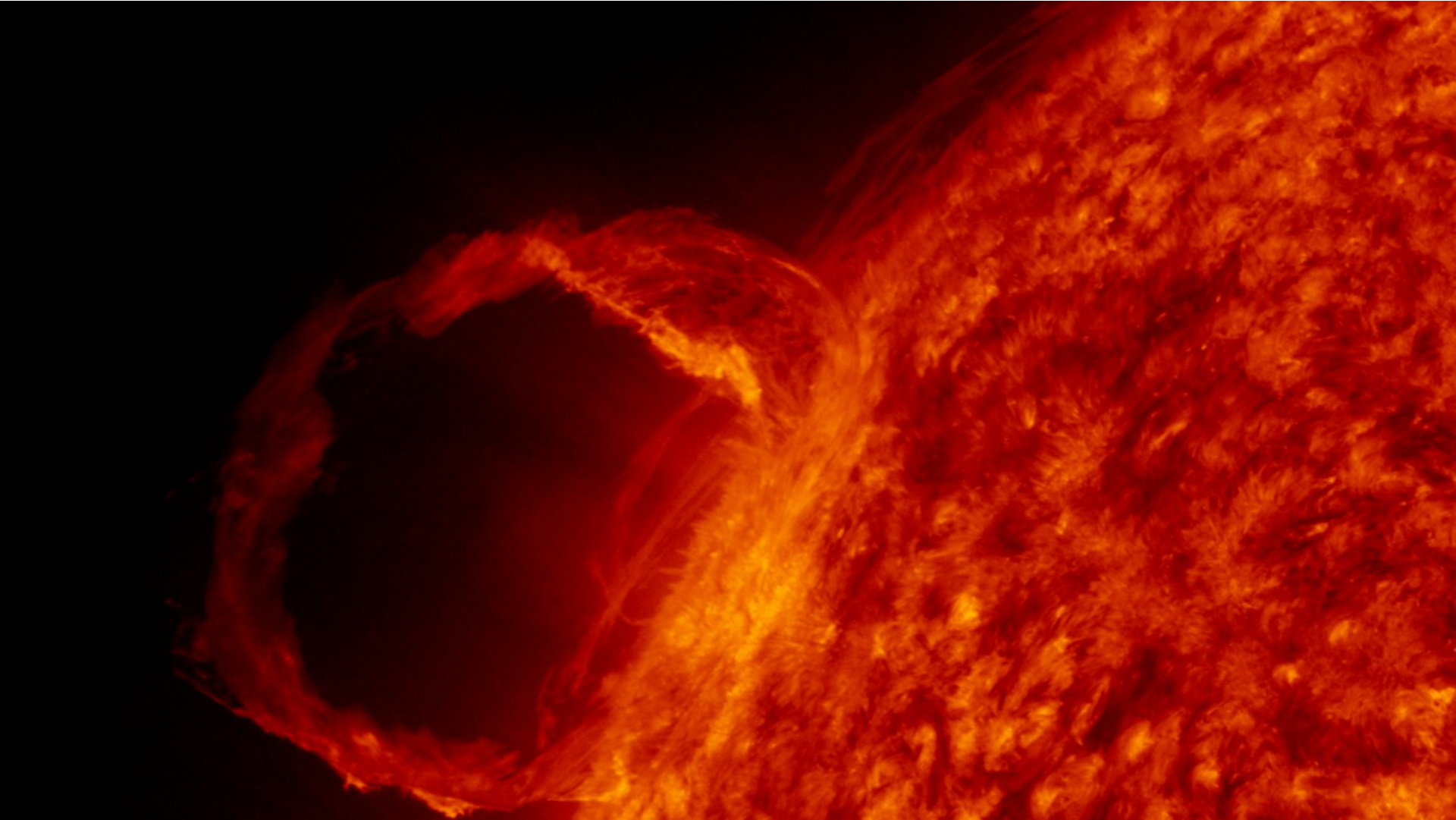
LWS Solar Dynamics Observatory Mission

A large, detailed image of the solar surface showing intricate patterns of magnetic fields and plasma flows in a deep red and orange color palette.

SDO/AIA 30 марта 2010 года, в УФ линии He II (304 Å), $T \sim 50\,000\text{ K}$.











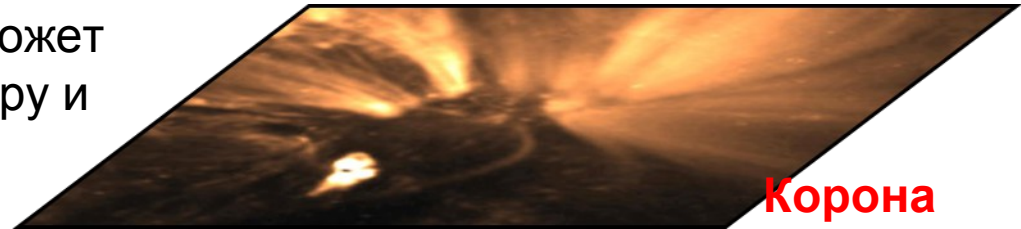
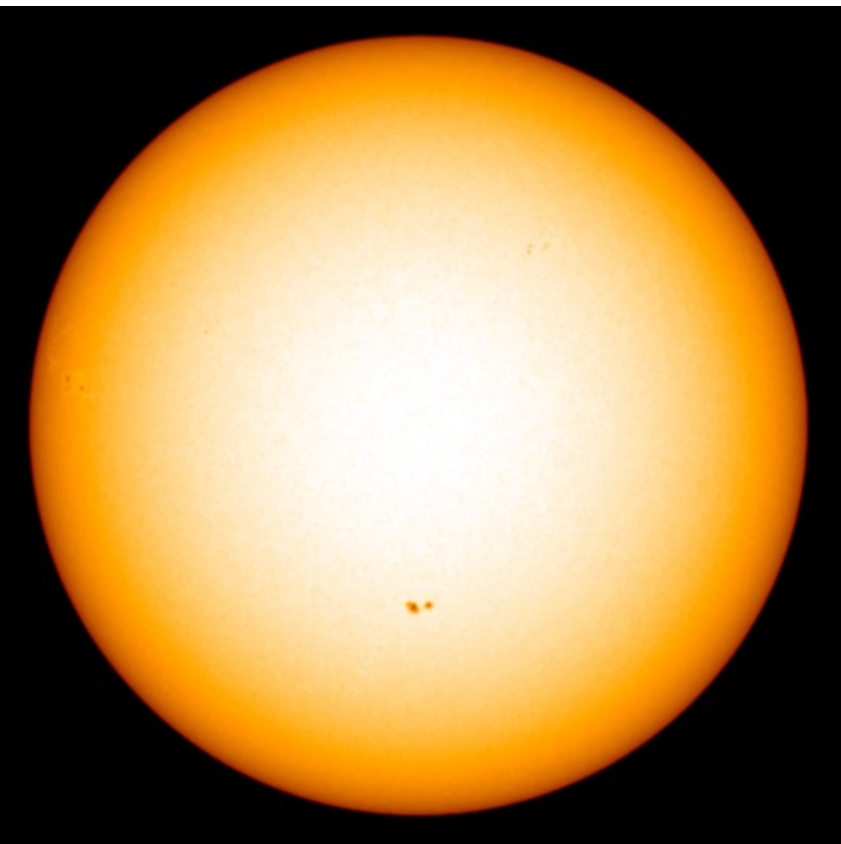


Approx. size of Earth → 

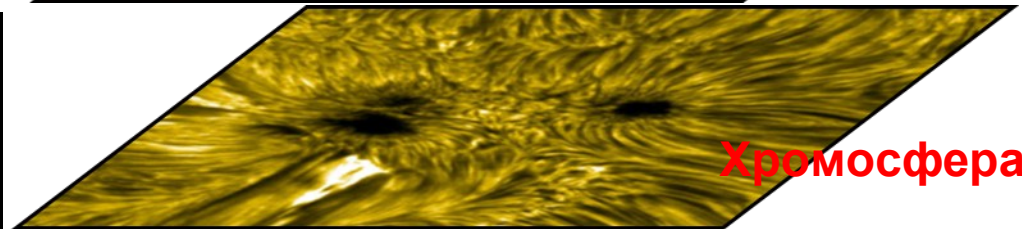


Каждому спектральному изображению соответствует определенный температурный слой в солнечной атмосфере

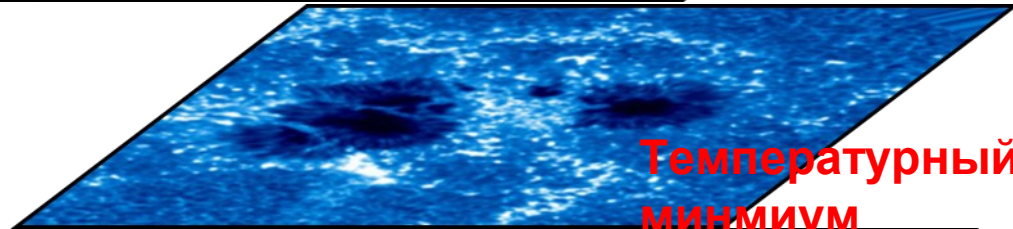
The Solar Optical Telescope - солнечный телескоп (SOT) on Hinode (2006) может одновременно наблюдать фотосферу и хромосферу Солнца



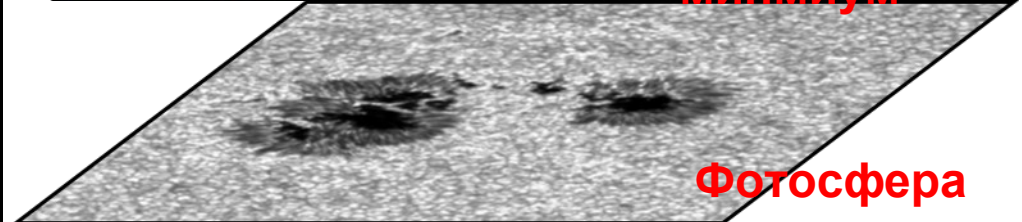
Корона



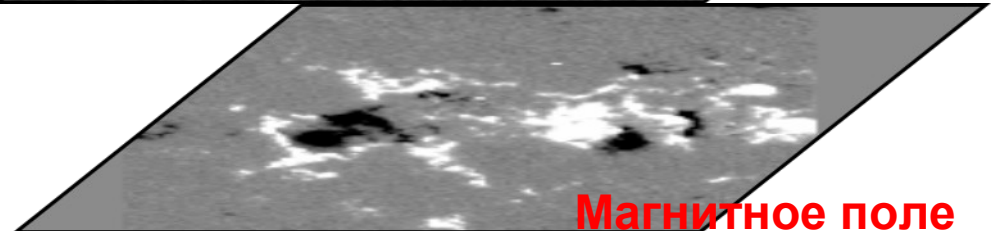
Хромосфера



Температурный минимум



Фотосфера

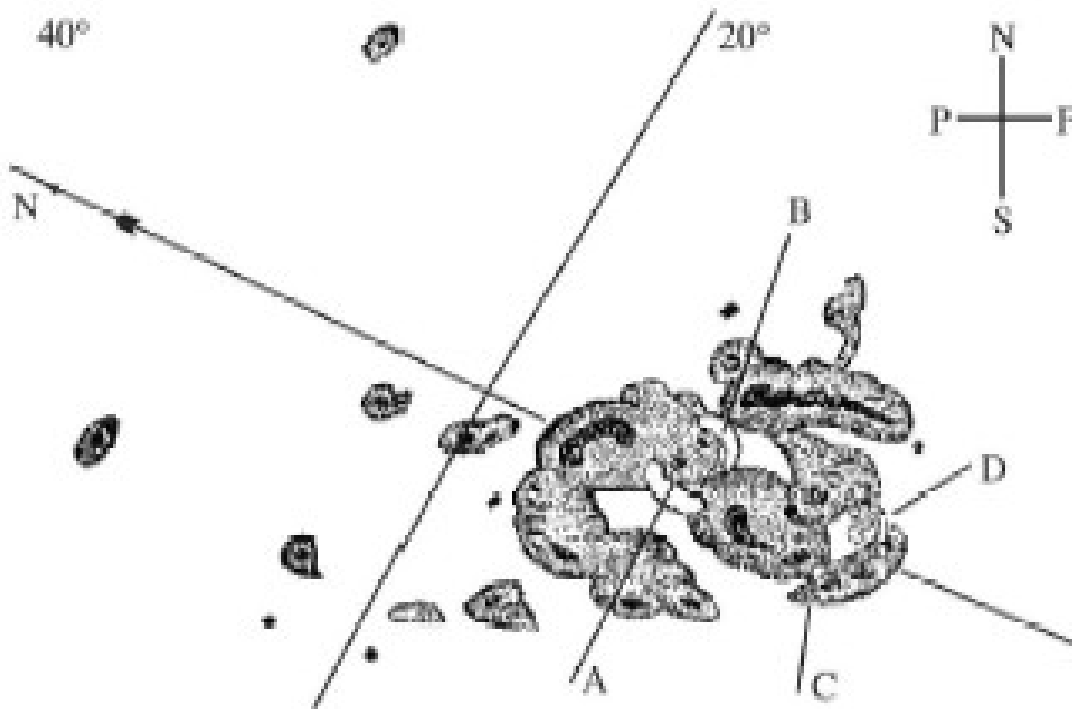


Магнитное поле

Вспышка Кэррингтона 1 сентября 1859 г.

Впервые вспышку в белом свете 1 сентября 1859 г. независимо наблюдали в Англии Кэррингтон и Ходжсон. В результате этой вспышки наблюдалась самая мощная солнечная буря за всю историю наблюдений Солнца. Наблюдались полярные сияния, настолько яркие, что свет от сияния разбудил американских старателей, добывавших золото в районе Скалистых гор – они подумали, что наступило утро.

По всей Америке и Европе телеграфное сообщение было нарушено. Линии передач искрили, телеграфная бумага спонтанно возгоралась. Некоторые устройства продолжали работать даже будучи отключенными от линий передач.



Самая сильная буря с начала космической эры (с 1957 года) произошла **13 марта 1989 г.** Также после 1859 г. менее сильные бури происходили в 1951 и 1960 гг., когда отмечались массовые сбои радиосвязи.

Количество наблюдений сильных бурь довольно мало: с 1957 по начало 2003 года произошло всего 3 магнитные бури с $Dst < -400$ нТ

11 февраля 1958 г. $Dst < -426$,

15 июля 1959 г. $Dst < -429$ и

13 марта 1989г. $Dst < -589$ нТ.

Поэтому две сильнейшие бури в октябре-ноябре 2003 года 30 октября ($Dst -401$) и 20 ноября ($Dst -465$ нТ)

существенно расширяют экспериментальный материал по таким экстремальным возмущениям магнитосферы Земли

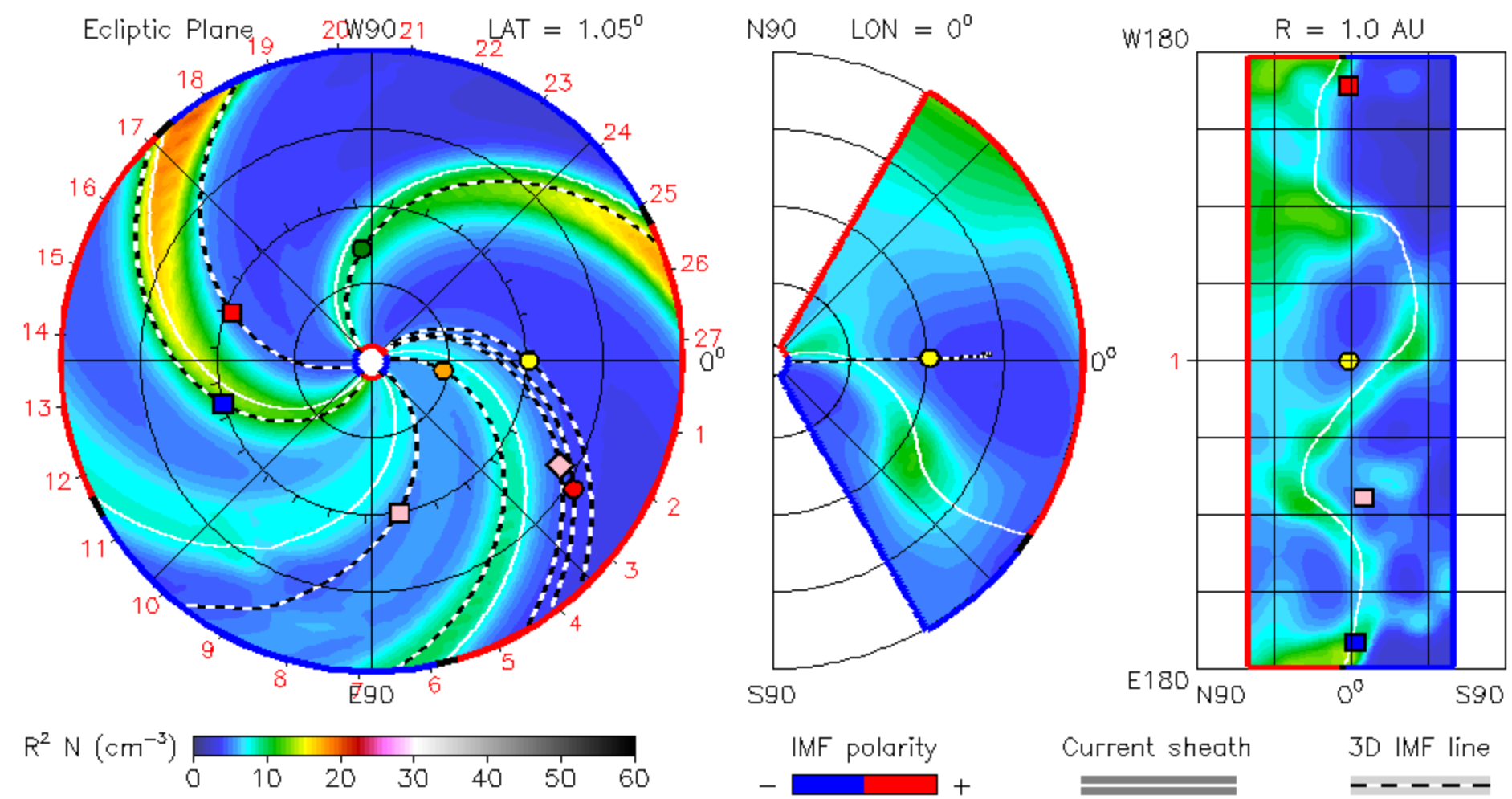
Солнечная вспышка – это мощное проявления солнечной активности, вызванное возникновением неустойчивой конфигурации магнитного поля в активной области на Солнце. Вспышки наблюдаются в виде внезапного увеличения яркости солнечной хромосферы, при мощных событиях - и фотосферы (белая вспышка). Вспышка длится от нескольких минут до десятков минут и сопровождается выделением энергии до 10^{25} - 10^{26} Дж в виде коронального выброса массы и потока космических лучей, электромагнитного излучения во всех диапазонах от ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучения до метровых радиоволн.

Не каждая вспышка, произошедшая на Солнце, влияет на состояние ОКП, то есть является геоэффективной. Геоэффективность вспышечных явлений, в основном, определяется **мощностью (интенсивностью) и локализацией на диске Солнца**. Естественно, что чем мощнее вспышка, тем более сильное влияние она может оказать на ОКП, при условии, что образовавшиеся в ней частицы достигнут орбиты Земли. Согласно последним исследованиям, **максимальную геоэффективность** имеют вспышки рентгеновского класса **выше M5**, произошедшие на западной половине солнечного диска.

2014-06-15T12:00

2014-06-09T00 +6.50 days

● Earth ● Mars ● Mercury ● Venus ◆ Mavén □ Spitzer ■ Stereo_A ■ Stereo_B



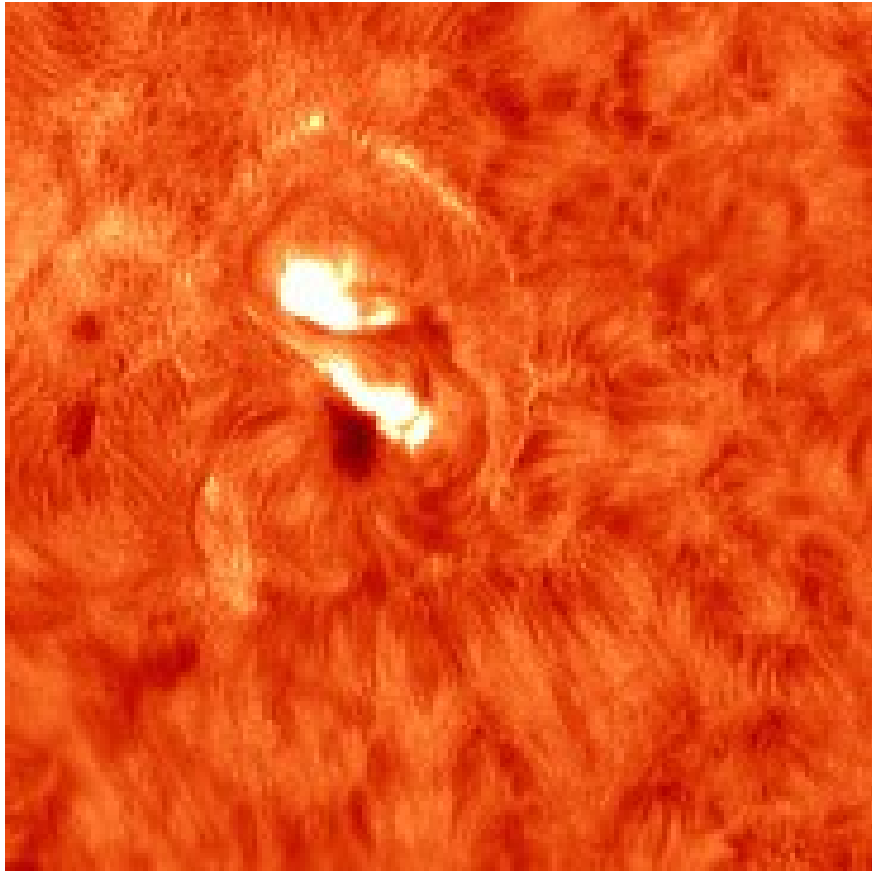
Наблюдать солнечные вспышки легче всего в красной линии водорода, излучаемой хромосферой. В радиодиапазоне усиление яркости в активных областях бывает настолько велико, что полный поток энергии радиоволн, идущих от всего Солнца, возрастает в десятки и даже многие тысячи раз. Эти явления называются всплесками радиоизлучения Солнца.

Вспышки – это мощные кратковременные процессы, приводящие к локальному нагреву плазмы до многих миллионов градусов и к ускорению протонов и электронов до световых скоростей, все это за счет энергии магнитных полей

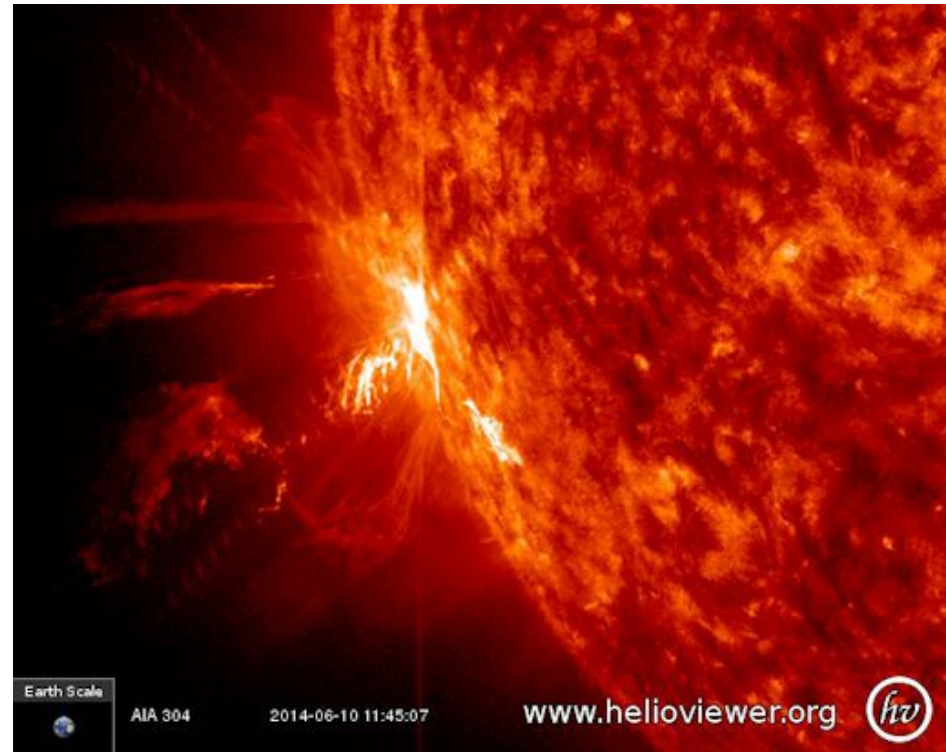
Одна мегатонна тротилового эквивалента - это $4 \cdot 10^{15}$ Дж = $4 \cdot 10^{22}$ эрг.
Бомба, разрушившая Хиросиму, имела энергию 20 тысяч тонн.
Самый мощный термоядерный взрыв в истории был осуществлен в 1961 г. в СССР (50 Мегатонн = $2 \cdot 10^{24}$ эрг).

Типичная солнечная вспышка ($2 \cdot 10^{32}$ эрг) эквивалентна ста миллионам таких взрывов.

**Вспышка 16 апреля 2014 г.
C5.2 02:17 UT**



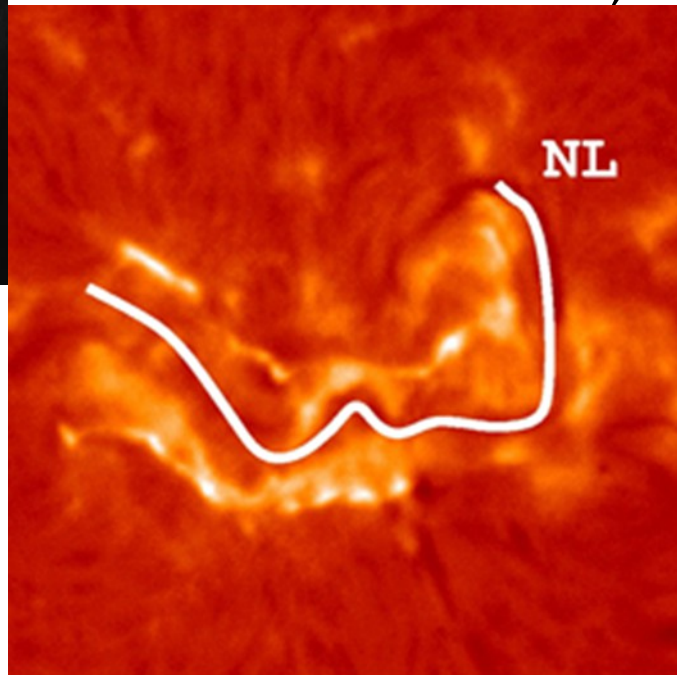
Вспышка 11 июня 2014 г.





Двухленточные вспышки

Часто вспышка развивается в виде пары ярких нитей по обе стороны от главной линии инверсии магнитного поля активной области. Это – двухленточная вспышка. При этом волокно (протуберанец), если оно имеется на линии инверсии, обычно исчезает с началом вспышки. Обе нити вспышки, как правило, расходятся со скоростями от 2 до 10 км/с и часто соединяются яркими или темными (если они более плотные) вспышечными петлями, образующими аркаду.



Вспышка 14 июля 2000 г. в виде двух «лент» в хромосфере, расположенных по разные стороны относительно «нейтральной линии» NL.



Во время вспышки возрастает излучение практически **во всех диапазонах спектра**.

В видимой области это увеличение сравнительно невелико: у самых мощных вспышек, наблюдаемых даже в белом свете на фоне яркой фотосферы, оно составляет не более полутора – двух раз.

В далекой ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра и, особенно, в радиодиапазоне на метровых волнах это увеличение очень велико.

Иногда наблюдаются всплески гамма лучей.

Примерно половина общей энергии вспышки уносится мощными выбросами плазменного вещества, которое проходит через солнечную корону и достигает орбиты Земли в виде корпускулярных потоков, взаимодействующих с земной магнитосферой, что приводит к появлению полярных сияний и магнитным бурям.

Мощные вспышки, сопровождающиеся выбросом высокоэнергичных заряженных частиц – протонов с энергиями в десятки и сотни МэВ, **называются «протонными»**, а также потоками электронов с энергиями более 40 кэВ, а в некоторых случаях даже релятивистских электронов с энергиями более десятка МэВ.

Потоки энергичных частиц от протонных вспышек представляют опасность для здоровья и жизни космонавтов в космическом пространстве. Они могут вызывать сбои бортовых ЭВМ и других приборов.

Мощные вспышки видны даже в «белом свете» на фоне яркой фотосферы, но такие события весьма редки.

Как показали космические исследования, **основная часть энергии большой вспышки выделяется не в оптическом излучении**, а в виде огромных выбросов солнечной плазмы (миллиарды тонн) в межпланетное пространство, которые движутся со скоростями до 1000 км/сек, потоков ускоренных частиц и жесткого электромагнитного излучения. **Оптическое излучение вспышки возникает как вторичный эффект в хромосфере и фотосфере, вдали от источника энергии вспышки, в основаниях петель.** Корональные петли представляют собой трубки магнитного потока, заполняемые во время вспышки горячей плазмой.

Вспышки на Солнце – самое мощное среди всех нестационарных явлений, происходящих в всех слоях его атмосферы.

Вспышка – внезапное увеличение яркости в атмосфере Солнца, распространяющееся через все ее слои и сопровождающееся быстрыми движениями вещества, солнечной плазмы. Увеличение яркости того или иного слоя подразумевает дополнительный его нагрев, т.е. дополнительный вклад энергии в этот слой. Наблюдаемая последовательность свечения различных слоев в атмосфере Солнца свидетельствует о том, что энергия вспышки накапливается до ее начала на некоторой высоте в короне. Во время вспышки она распространяется вверх и вниз. Задача изучения вспышек облегчается тем, что наша звезда, Солнце, расположена близко от нас. Поэтому вспышки на Солнце, в отличие от вспышек на других звездах, а также от многих других аналогичных явлений во Вселенной (например, вспышек в коронах аккреционных дисков релятивистских объектов), доступны самому всестороннему исследованию.

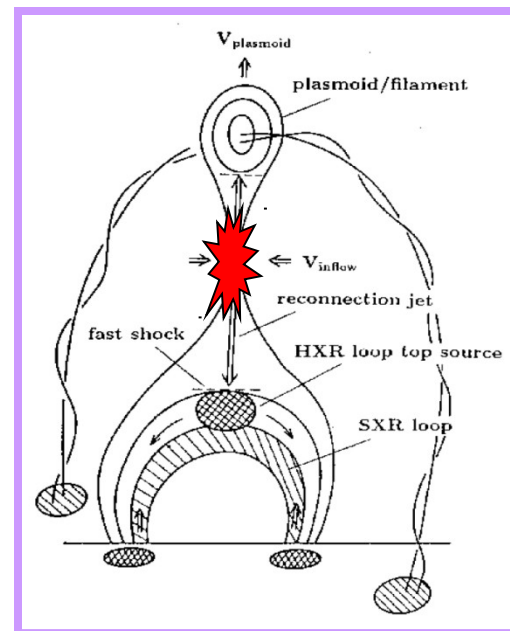
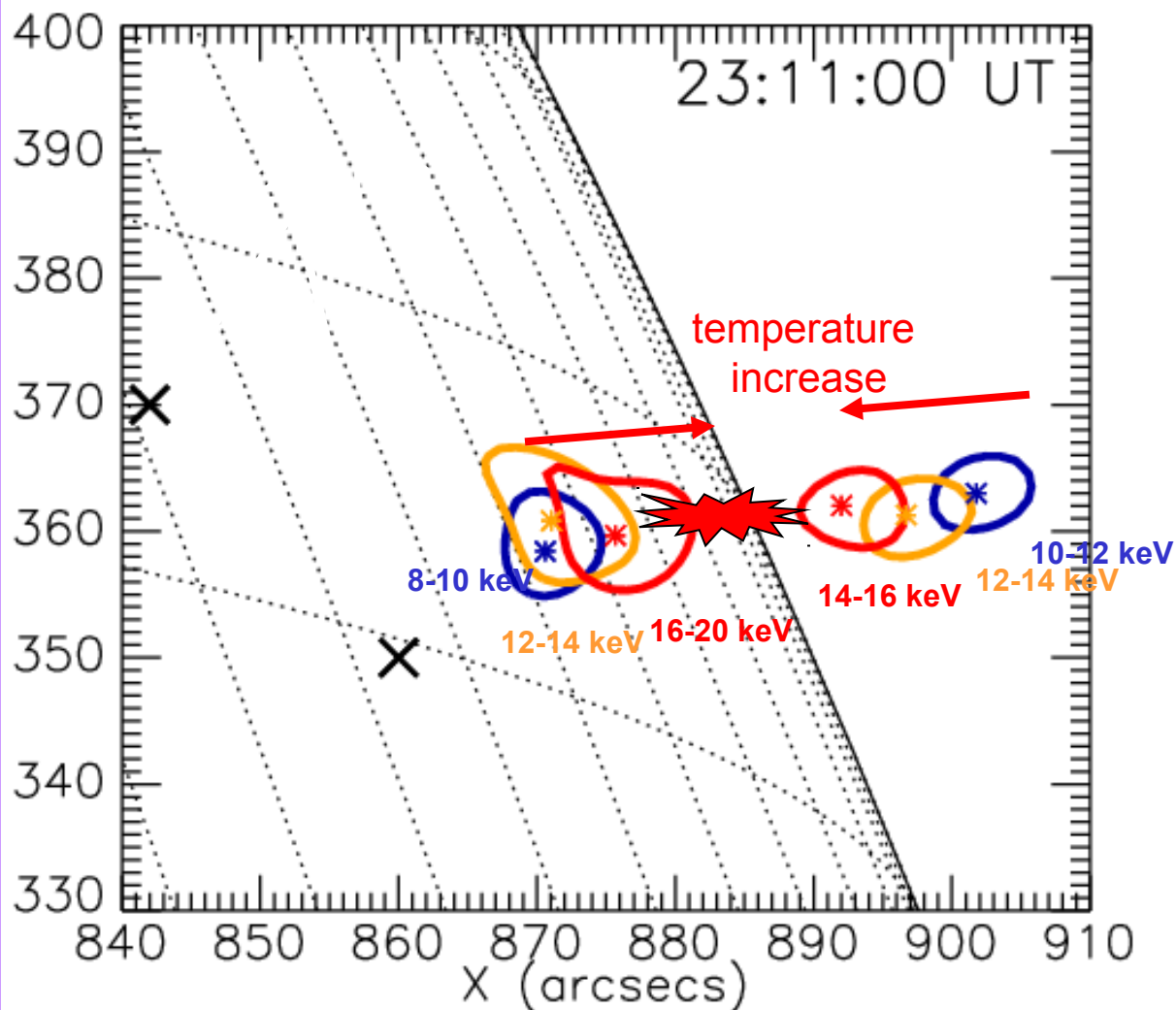
Уже первые внеатмосферные наблюдения с помощью космических аппаратов показали, что солнечные вспышки представляют собой корональное, а не хромосферное явление. Современные многоволновые наблюдения Солнца с космических и наземных обсерваторий свидетельствуют о том, что источник энергии вспышки расположен над аркадой вспышечных петель в короне, наблюдаемых в мягком рентгеновском и УФ-излучении. Аркады опираются на хромосферные вспышечные ленты, которые расположены по разные стороны линии раздела полярности фотосферного магнитного поля, или фотосферной нейтральной линии.

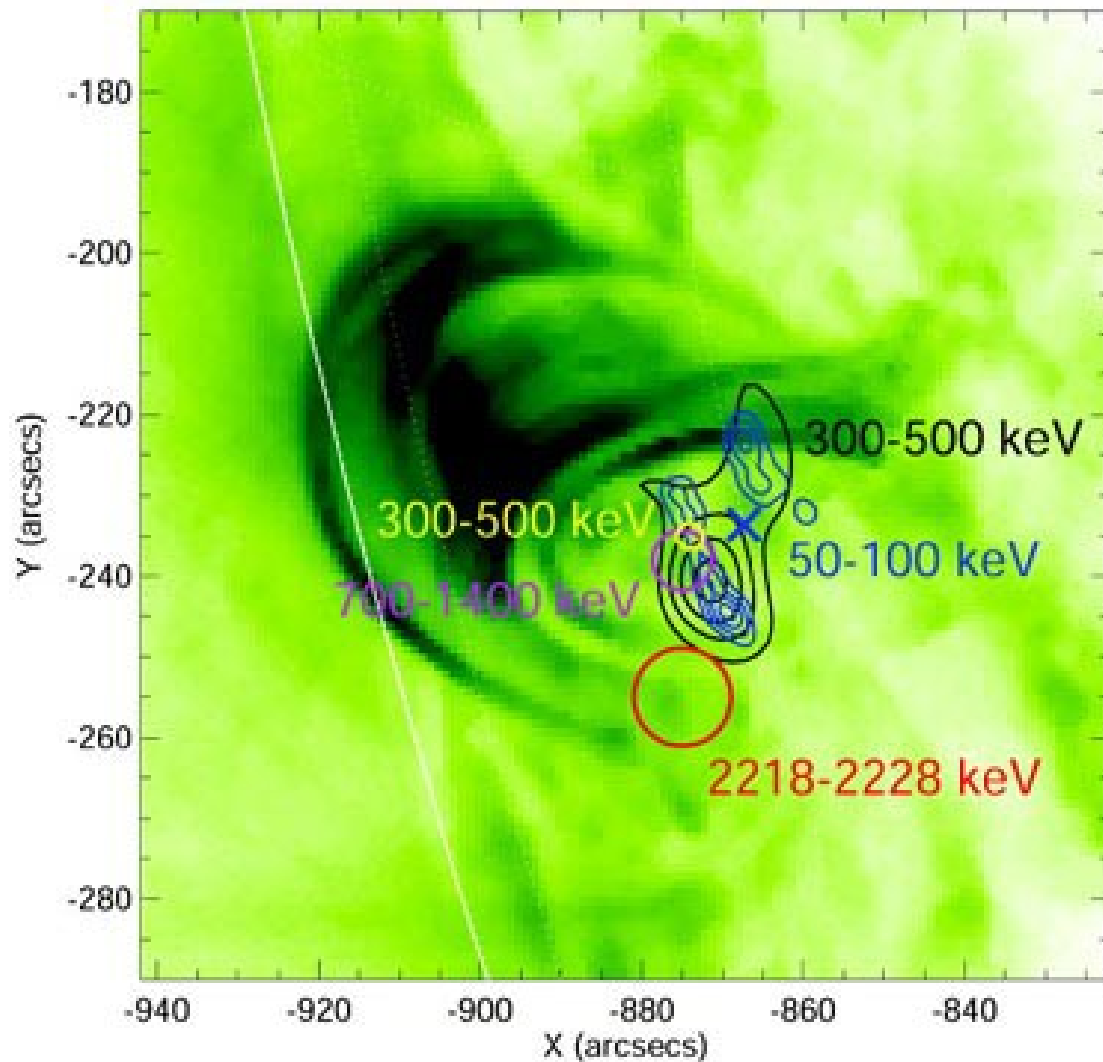
Солнечная вспышка - самое мощное из всех проявлений активности Солнца. Энергия большой вспышки достигает $(1-3) \times 10^{32}$ эрг, что приблизительно в сто раз превышает тепловую энергию, которую можно было бы получить при сжигании всех разведанных запасов нефти и угля на Земле. Эта гигантская энергия выделяется на Солнце за несколько минут и соответствует средней (за время вспышки) мощности 10^{29} эрг/с. Однако это меньше сотых долей процента от мощности полного излучения Солнца в оптическом диапазоне, равной 4×10^{33} эрг/с.

Распределение температуры

$$1 \text{ эВ} = 11\,605 \text{ K}$$

Градиент температуры
направлен к сверх-горячему турбулентному токовому слою (super-hot turbulent-current layer, **SHTCL**)





Вспышка 23 июля 2003 г.
Изображение получено в результате наложения снимков, сделанных КА "TRACE" и "RHESSI".
Распределение зеленого фона дали УФ-наблюдения со спутника "TRACE" спустя 90 мин после вспышки; видны черные послевспышечные петли в короне и источники жесткого рентгеновского (100-200 кэВ) и гамма-излучения (2223 кэВ).

Рентгеновское излучение Солнца впервые было обнаружено 5 августа 1948 в США. К середине 70-х гг. 20 в. солнечное рентгеновское излучение детально исследовано во всей области спектра. Наличие на диске Солнца активных областей приводит к появлению жёсткого рентгеновского и даже гамма-излучения. В основном непрерывный спектр имеет тепловой характер с температурой от 10^6 и до 2×10^7 К.

Первые пространственные наблюдения гамма-излучения вспышек на космической обсерватории "RHESSI" (2002) показали, что ускоренные электроны и ускоренные ионы вторгаются в хромосферу в различных областях. Этот новый наблюдательный факт, хотя и требует дальнейшего детального изучения, в общих чертах согласуется с предположением о первичном ускорении частиц электрическим полем в пересоединяющем ВТТТС. Положительно и отрицательно заряженные частицы ускоряются крупномасштабным электрическим полем в противоположные стороны и, соответственно, высыпаются из токового слоя в хромосферу вдоль различных линий магнитного поля. Аккуратные теоретические расчеты эффекта, к сожалению, пока отсутствуют.

Источник энергии вспышки - магнитное поле в атмосфере Солнца.

Оно определяет морфологию и энергетику той активной области, где произойдет вспышка. Здесь энергия поля много больше, чем тепловая и кинетическая энергия плазмы. Во время вспышки происходит быстрое превращение избыточной энергии поля в энергию частиц и изменения плазмы. Физический процесс, обеспечивающий такое превращение, называется магнитным пересоединением.

Возникновение вспышек

Вспышка возникает в хорошо развитой активной области , где в малой области пространства «сталкиваются» сильные противоположно направленные магнитные поля, в результате чего существенно меняется их структура.

Обычно солнечная вспышка характеризуется быстрым увеличением яркости и площади (за несколько минут у быстрых явлений и до часа у медленных) и более медленным спадом (20 – 100 минут).

Роль магнитного поля

При усилении напряженности магнитного поля (МП) в некоторой области хромосферы или короны (например за счет всплывания из конвективной зоны нового магнитного потока) изменяется картина распределения магнитных силовых линий (топология поля). В областях сближения старого и нового МП перераспределяются потоки МП и меняется общая их структура. Накопление значительной энергии МП может приводить к состоянию неустойчивости, индуцированию больших электрических токов и быстрым выделением тепловой энергии. В целом процесс напоминает сильный взрыв, сопровождающийся ускорением частиц плазмы до высоких энергий, а также выбросом облаков плазмы со скоростями в тысячи км/с.

При движении плазмы с очень высокой электропроводностью имеет место замечательное свойство «приклеенности» магнитных силовых линий. При движении плазмы силовые линии следуют за ней, будучи как бы «вморожены» в плазму. Силовые линии магнитного поля и частицы среды жестко связаны друг с другом. Магнитные силовые линии перемещаются вместе со средой.

При сложном движении плазмы силовые линии с различными направлениями могут подходить очень близко друг к другу, почти соприкасаясь. При дальнейшем движении плазмы силовые линии могут разойтись в прежней топологии, а могут и «перезамкнуться».

Перезамыкание (пересоединение) может произойти без касания линий, а всего лишь при тесном их сближении. Пересоединение, т. е. изменение топологии магнитного поля иногда принимающего взрывной характер.

Магнитная индукция — векторная величина, является силовой характеристикой магнитного поля (его действие на заряженные частицы). Определяет, с какой силой $\vec{F}$ магнитное поле действует на заряд q , движущийся со скоростью $\vec{v}$. Магнитная индукция не зависит ни от силы тока, ни от длины проводника, она зависит только от магнитного поля.

Магнитное поле графически изображают при помощи линий магнитной индукции. Линией магнитной индукции (магнитной линией) называется такая линия, касательная к которой в любой точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции.

Магнитные линии используют для указания направления магнитного поля и характеристики его интенсивности. Чем больше интенсивность магнитного поля (индукция), тем чаще проводят эти линии.

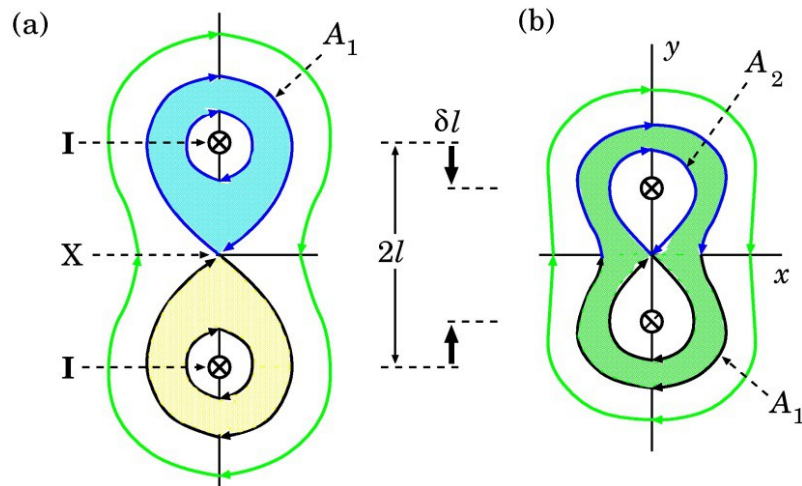
Для характеристики магнитного поля наряду с вектором магнитной индукции B пользуются величиной, называемой напряженностью магнитного поля - H . Она характеризует интенсивность так называемого внешнего магнитного поля (без учета магнитных свойств среды). Напряженность магнитного поля - векторная величина.

Направление вектора напряженности магнитного поля в изотропной среде, т. е. в среде, имеющей одинаковые свойства по всем направлениям, совпадает с вектором магнитной индукции в данной точке поля.

В неоднородных полях, в отличие от однородного, вектор магнитной индукции меняется от точки к точке.

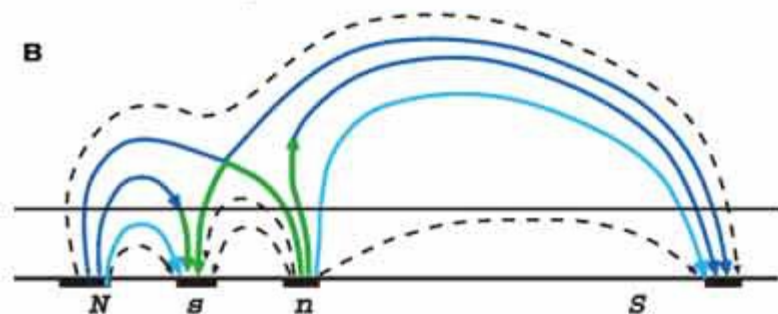
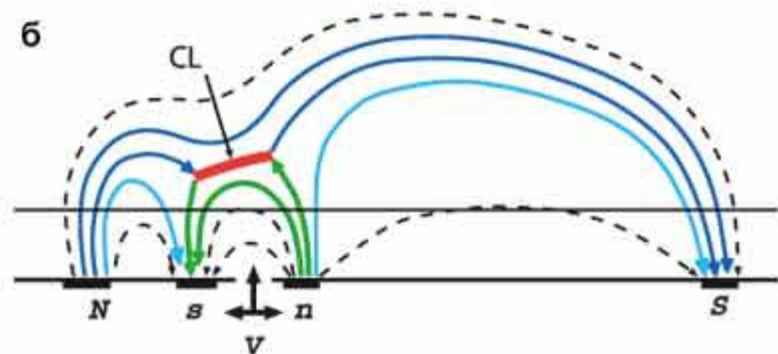
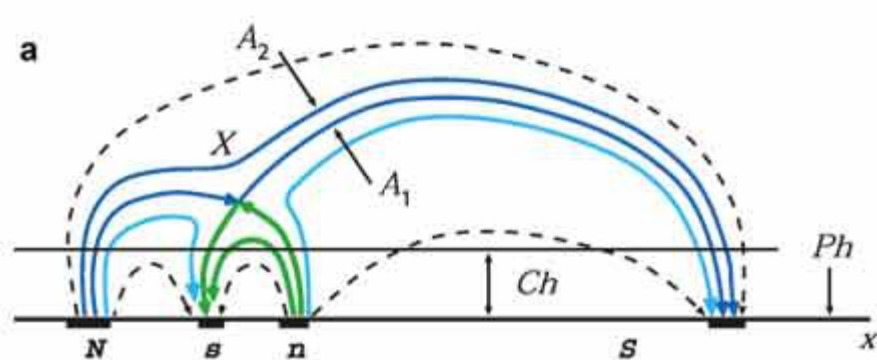
Магнитное поле называется однородным, если во всех его точках магнитная индукция одинакова.

Вспышка – это быстрое пересоединение, которое связано с сильным электрическим полем E (больше $10\text{--}30\text{ В/см}$) в сверхгорячем (температура электронов больше 10^8 К) турбулентном токовом слое, несущем огромный электрический ток ($\sim 10^{11}$ Ампер). Таковы реальные условия в источнике энергии солнечной вспышки. Потоки тепла и ускоренных частиц быстро распространяются вдоль пересоединенных линий магнитного поля и моментально нагревают хромосферу по обе стороны от фотосферной нейтральной линии. Так образуются пары вспышечных лент, наблюдаемые в видимых хромосферных линиях и УФ-линиях переходного слоя между короной и хромосферой. Нагретые до высоких температур верхние слои хромосферы «испаряются» в корону. Эффект быстрого расширения нагретой хромосферной плазмы в корону хорошо виден в рентгеновских лучах. «Хромосферное испарение» (так называют это явление) вместе с плазмой, вытекающей из токового слоя, порождает аркады вспышечных петель.



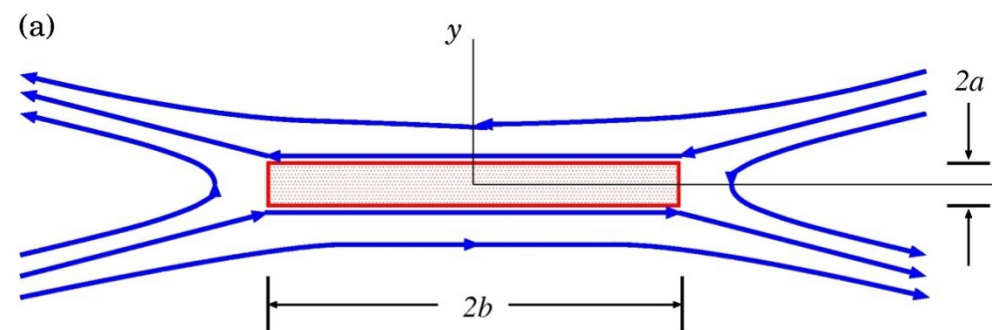
Два параллельных потока (а) в начальный момент времени, (б) после того, как потоки сдвинуты на расстояние Δl друг к другу. Так происходит пересоединение в вакууме.

Два прямых проводника на расстоянии $2l$ друг от друга. По каждому из них течет электрический ток I . Тогда магнитное поле этих токов образует три различных магнитных потока. Два из них (показаны синим и желтым цветом) принадлежат соответственно верхнему и нижнему токам; каждый поток охватывает свой проводник. Они расположены внутри сепаратрисной линии поля A_1 , которая образует «восьмерку» с точкой пересечения типа буквы X (X-точка). Третий поток расположен вне сепаратрисы; он принадлежит одновременно обоим токам. Зеленым цветом показан общий магнитный поток двух токов.

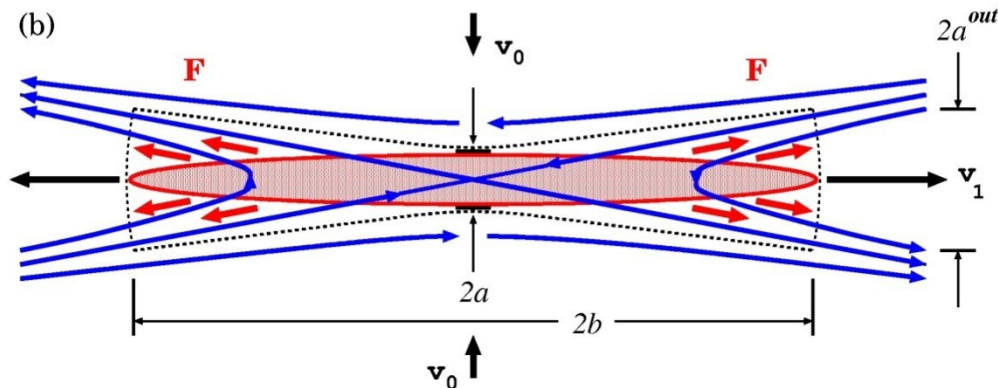


Источник энергии вспышки - магнитное поле в атмосфере Солнца. Оно определяет морфологию и энергетику той активной области, где произойдет вспышка. Здесь энергия поля много больше, чем тепловая и кинетическая энергия плазмы. Во время вспышки происходит быстрое превращение избыточной энергии поля в энергию частиц и изменения плазмы. Физический процесс, обеспечивающий такое превращение, называется магнитным пересоединением.

В отличие от вакуума плазма в солнечной короне очень хорошо проводит электрический ток. Поэтому, как только появляется поле $\mathbf{E}$, оно сразу же порождает ток, направленный тоже вдоль X-линии. Этот ток приобретает форму *токового слоя*, который мешает процессу пересоединения. Подобно металлическому листу (рис. 7а) он экранирует верхний магнитный поток от нижнего. Это приводит к тому, что перед вспышкой вместо пересоединения происходит накоплению избытка магнитной энергии.

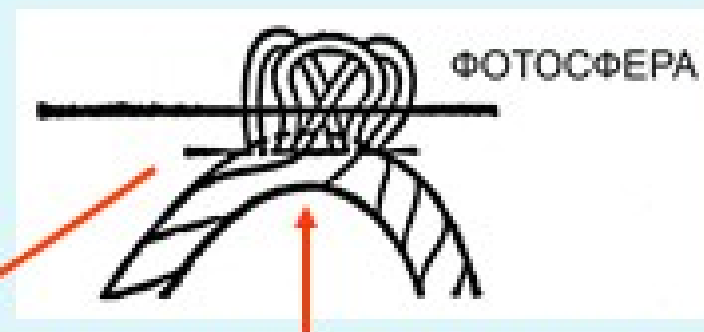
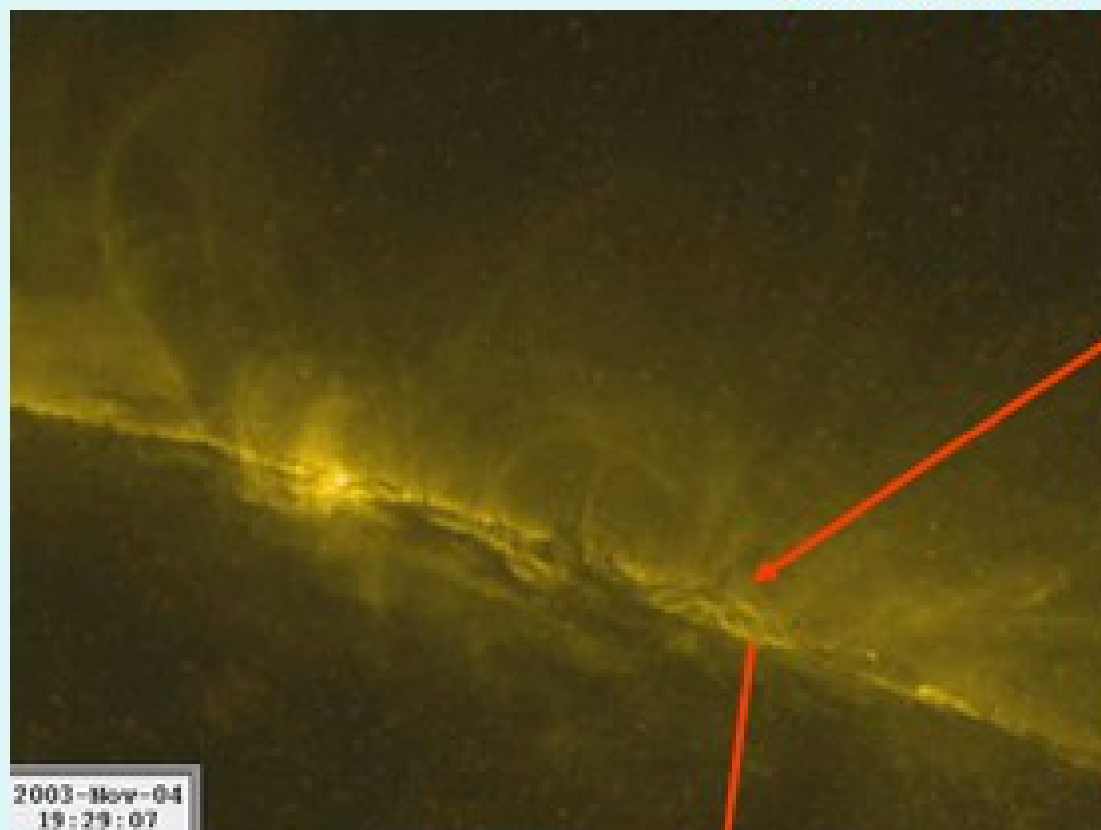


(a) Предвспышечный токовый слой экранирует взаимодействующие магнитные потоки противоположной направленности. $2a$ - толщина слоя, $2b$ - его ширина.

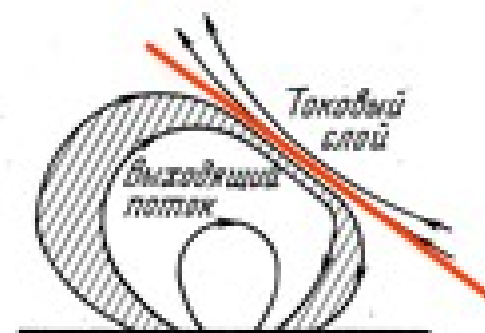


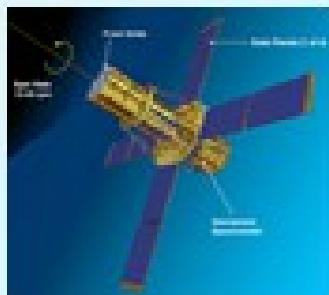
(b) «Сверхгорячий» турбулентный токовый слой низкой проводимости. Это приводит к быстрому процессу пересоединения во время вспышки: короткими толстыми стрелками v_0 показаны скорости втекания плазмы в слой, длинными стрелками v_1 - скорости вытекания. Стрелки $\mathbf{F}$ – потоки тепла, «сверхгорячей» плазмы и ускоренных частиц вдоль линий магнитного поля. В результате вспышки токовый слой разрушается.

Токовые слои, магнитное пересоединение и вспышки

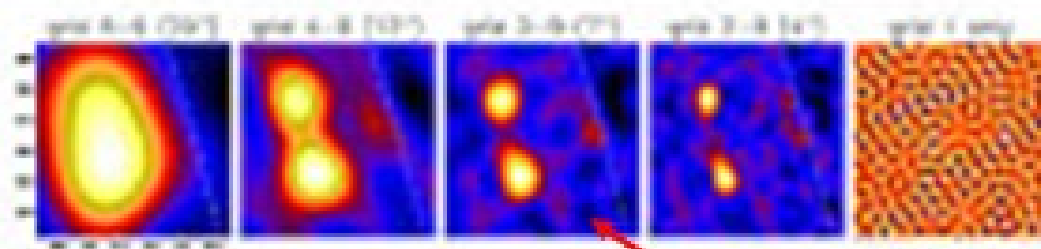


Всплывающий магнитный
поток





Магнитное пересоединение и энерговыведение во вспышках (RHESSI)



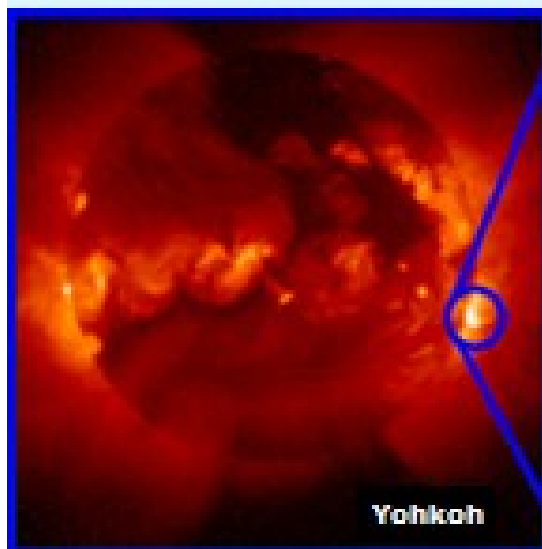
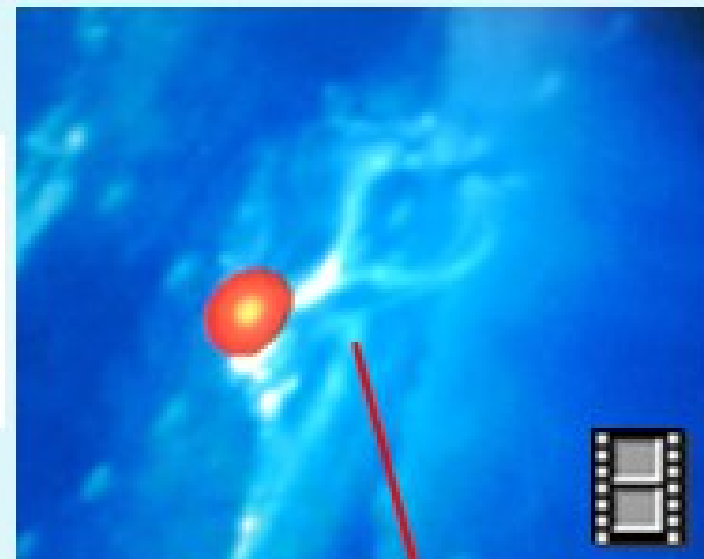
20"

12"

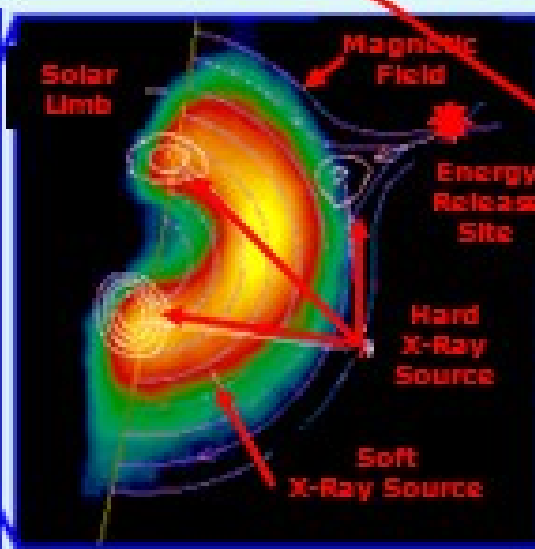
7"

4"

2,3"

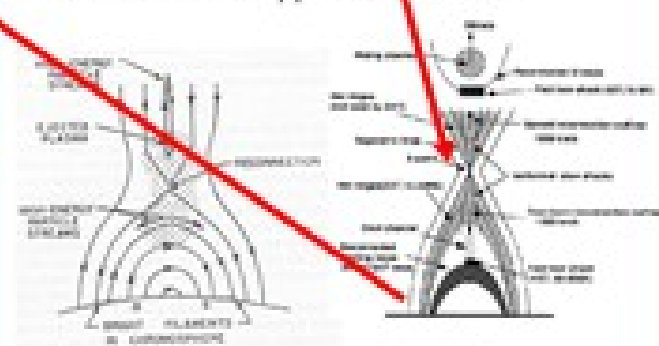


Yohkoh



"Standard" model

This has evolved to keep pace with observations



Sturrock 1960

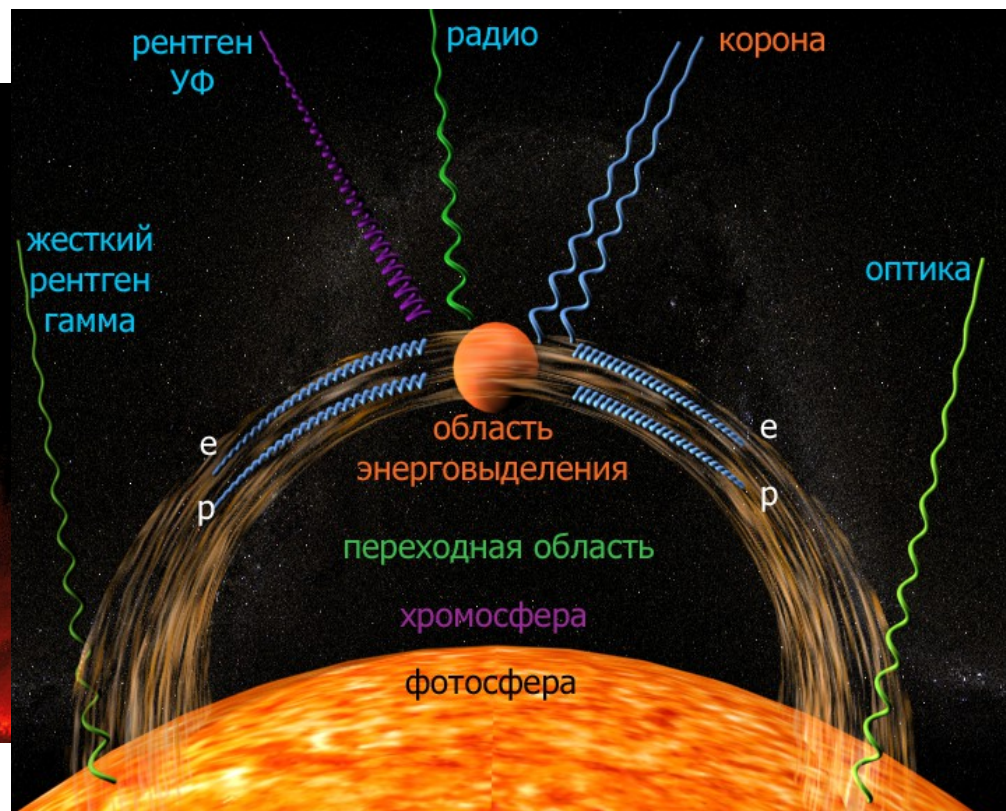
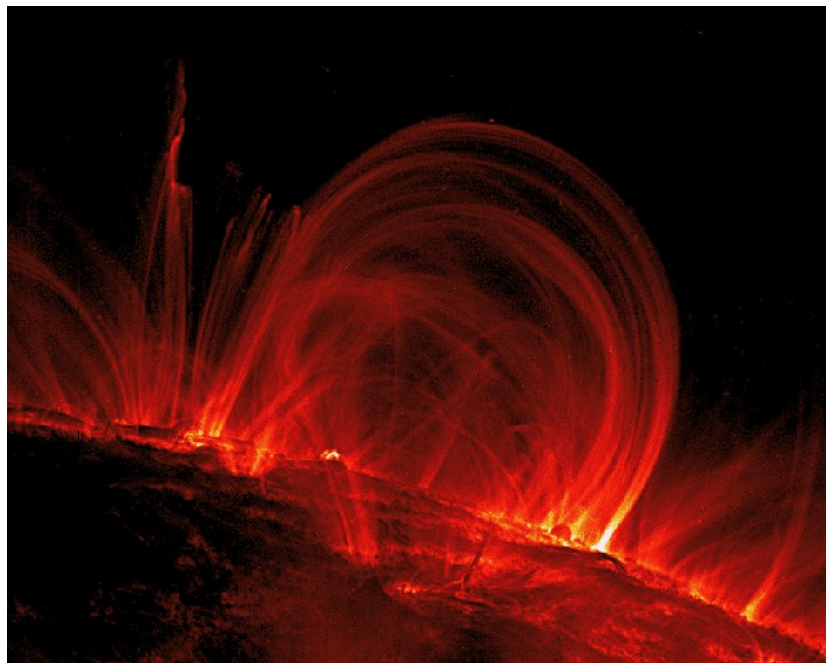
Tsuneta 1997

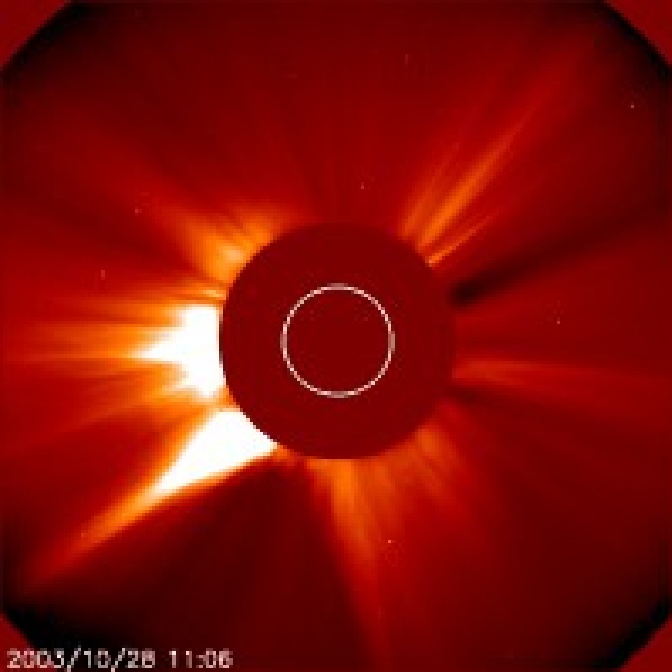
ITP Workshop (Jan 18-19, 2001)



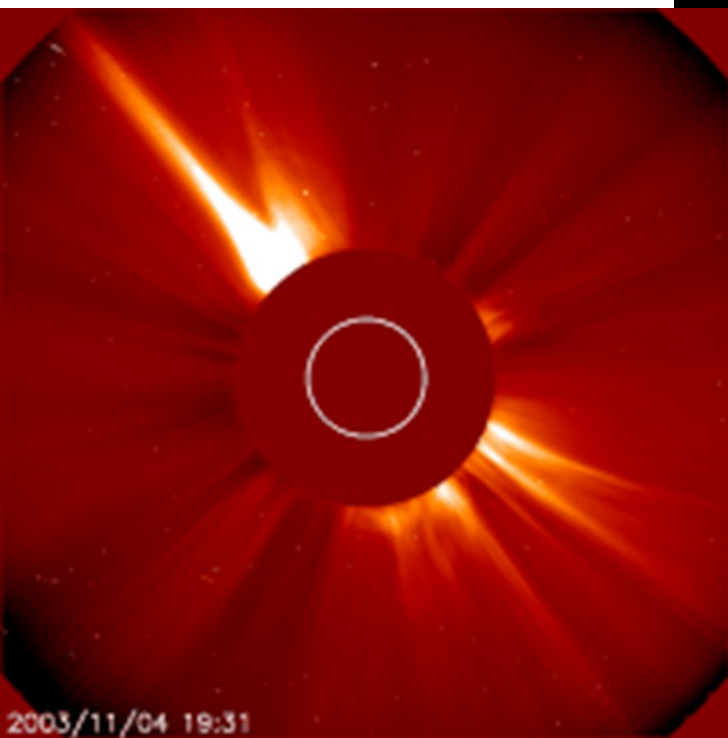
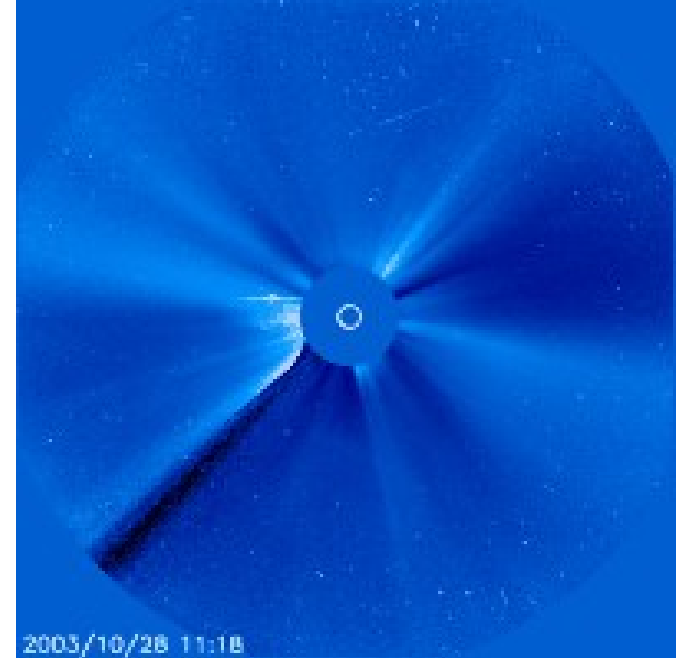
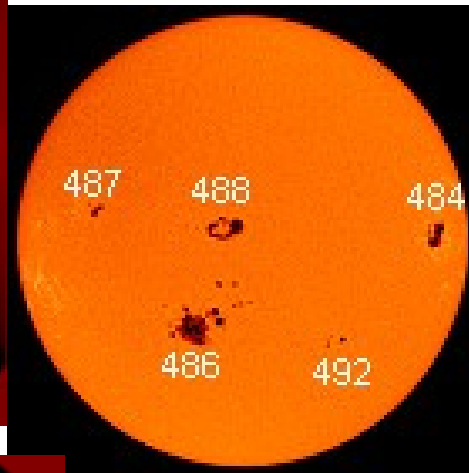
Вспышка 28 октября 2003 г.

Фон

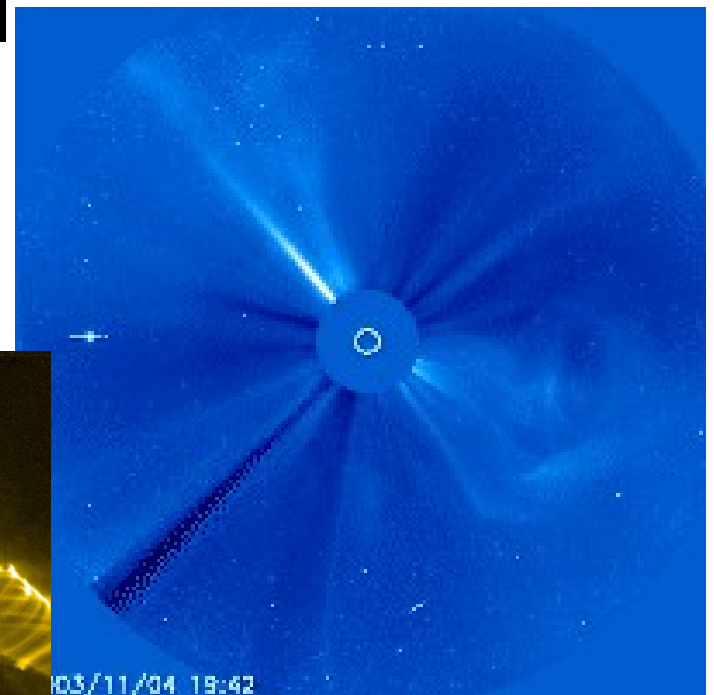
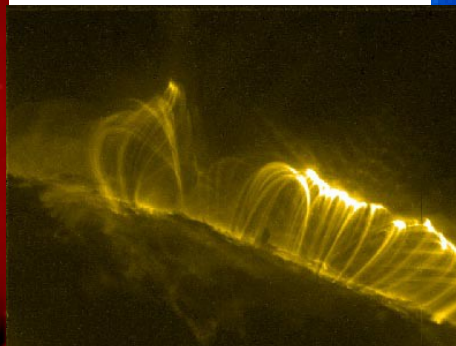


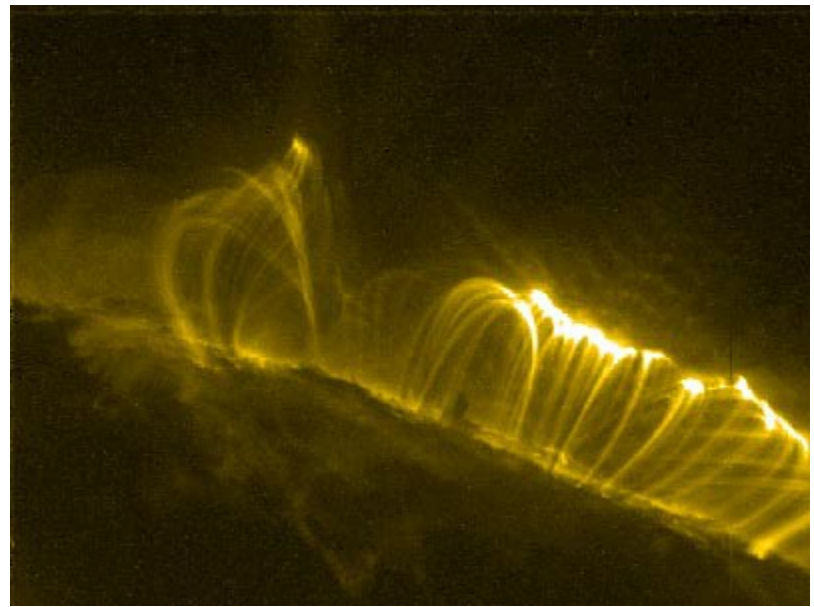
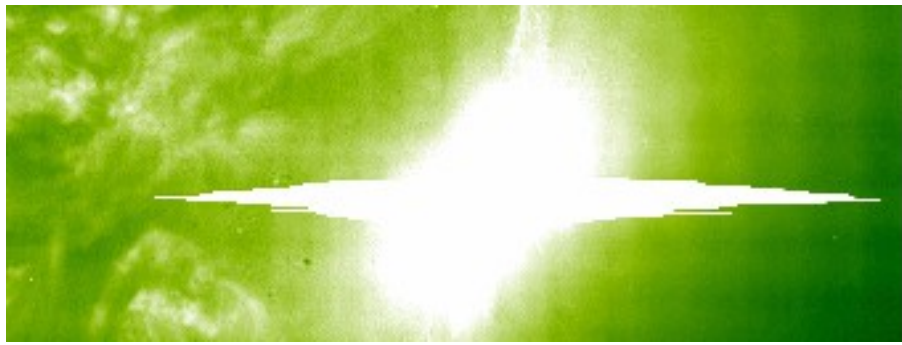


28 октября 2003 г.



04 ноября 2003 г.

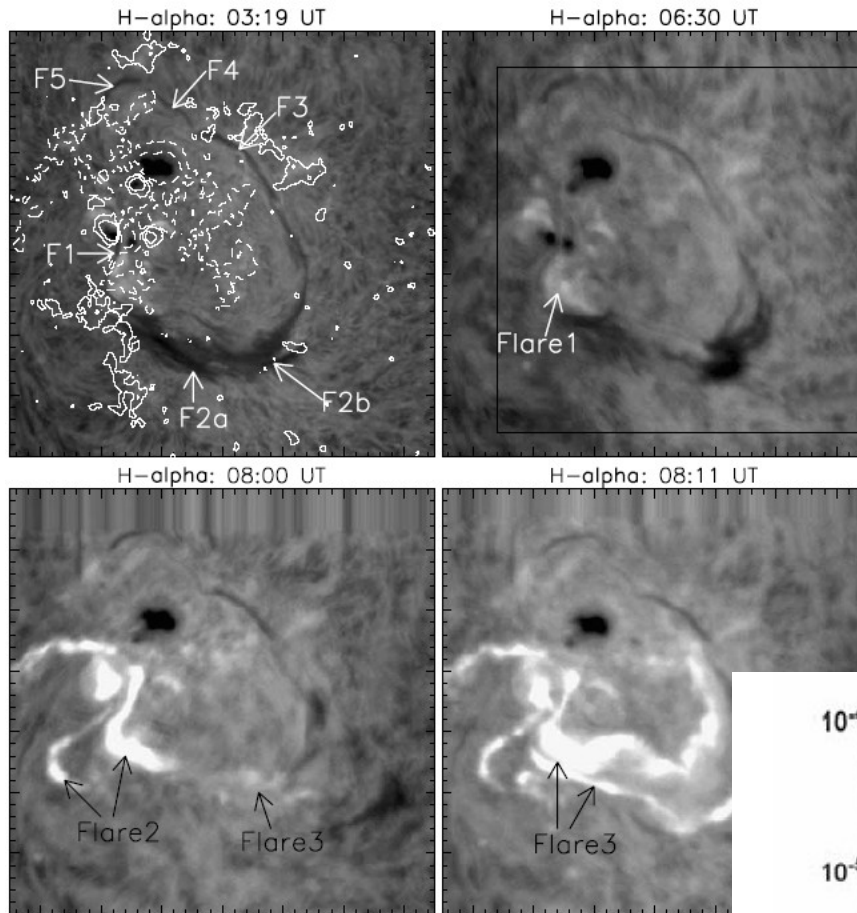




Рекордная по мощности вспышка на Солнце была отмечена **4 ноября 2003 года.**

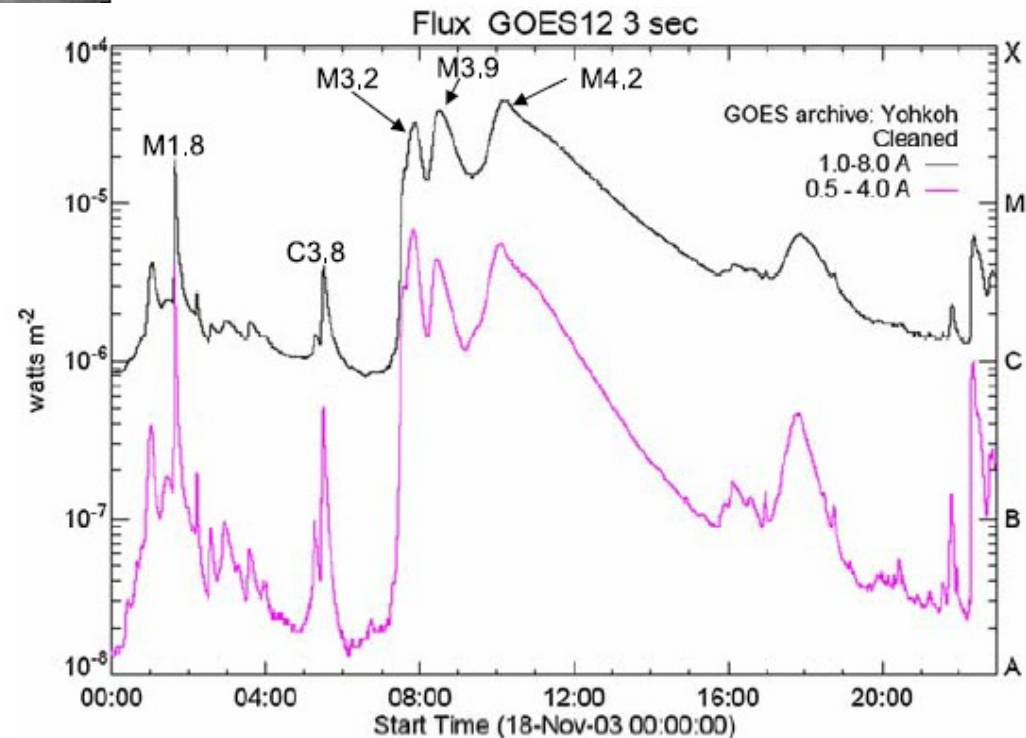
Непосредственно измерить ее мощность не удалось - датчики орбитальных телескопов "зашкалили" на 11 минут, не выдержав такой интенсивности. Позднее, на основании косвенных данных, она была классифицирована как вспышка X28, однако многие ученые заявляли, что речь идет о вспышке класса X40 или даже более мощной. Это невообразимое количество энергии - оно соответствует примерно десяти тысячам миллиардам баррелей нефти, что «достаточно для снабжения всего человечества энергией на протяжении 340 тыс. лет при сохранении текущего уровня ее потребления».

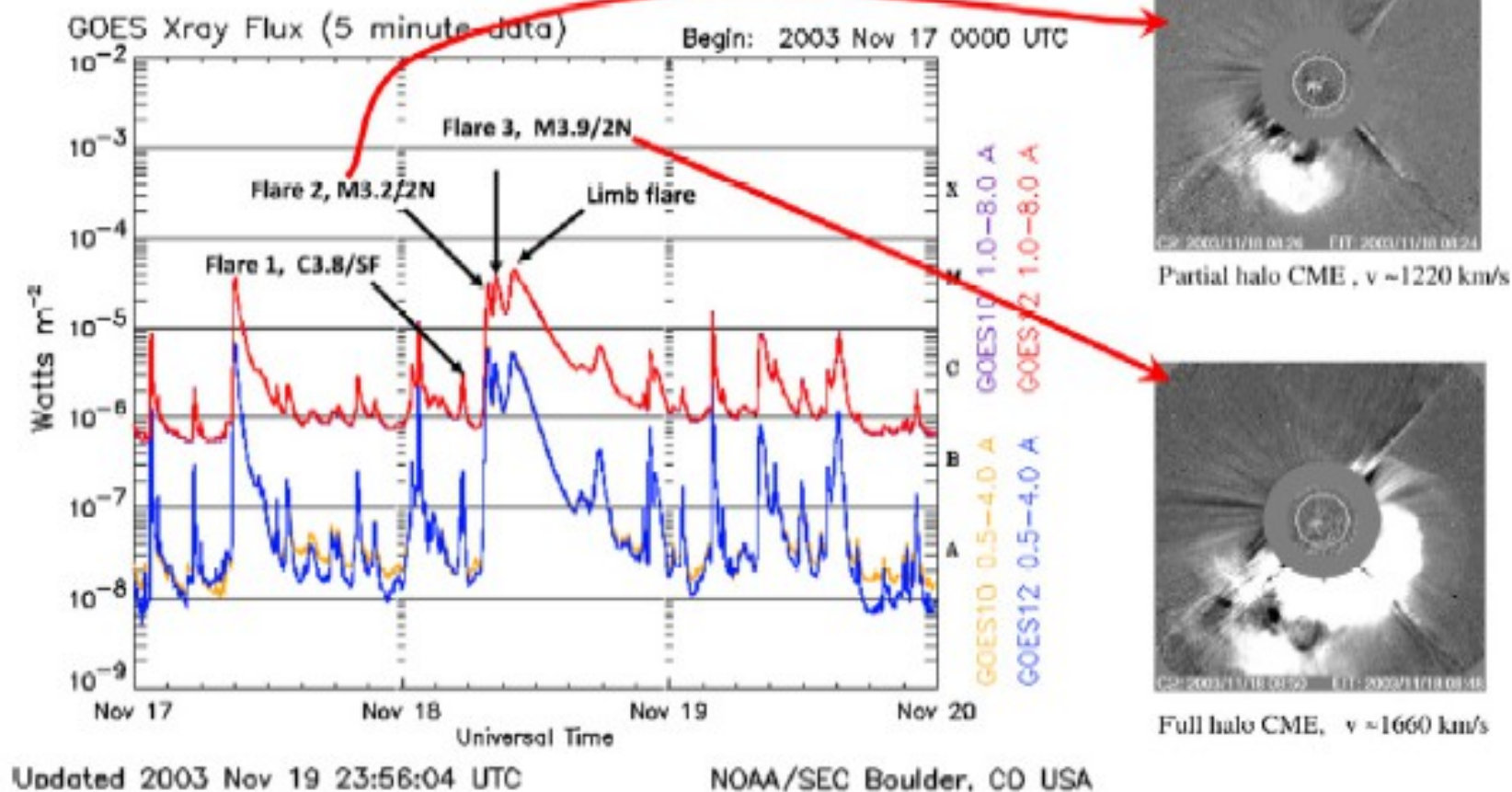
Вспышка 4 ноября 2003 года произошла на самом краю солнечного диска, и основной удар пришелся не на Землю.



Связь между солнечными вспышками и корональными выбросами массы уже давно является темой для дискуссии и постоянными исследованиями в солнечной физики..

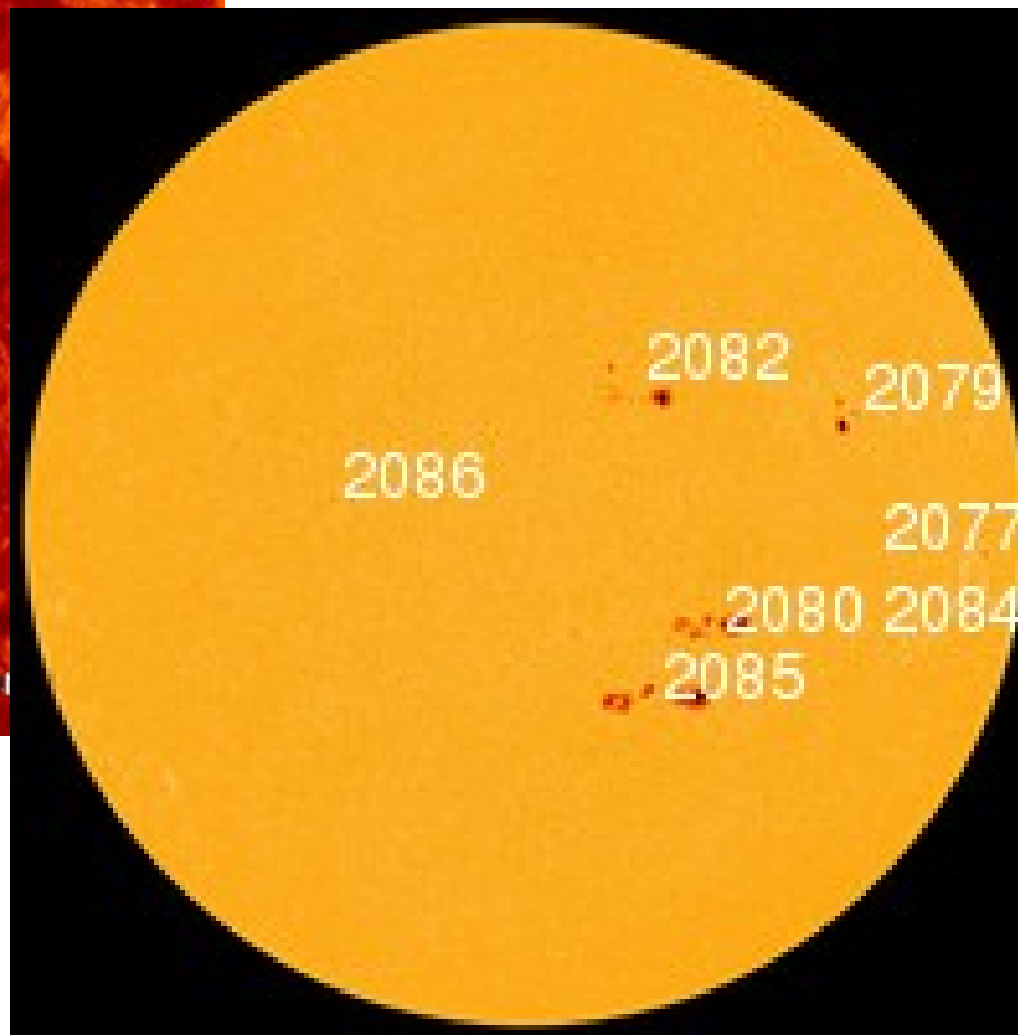
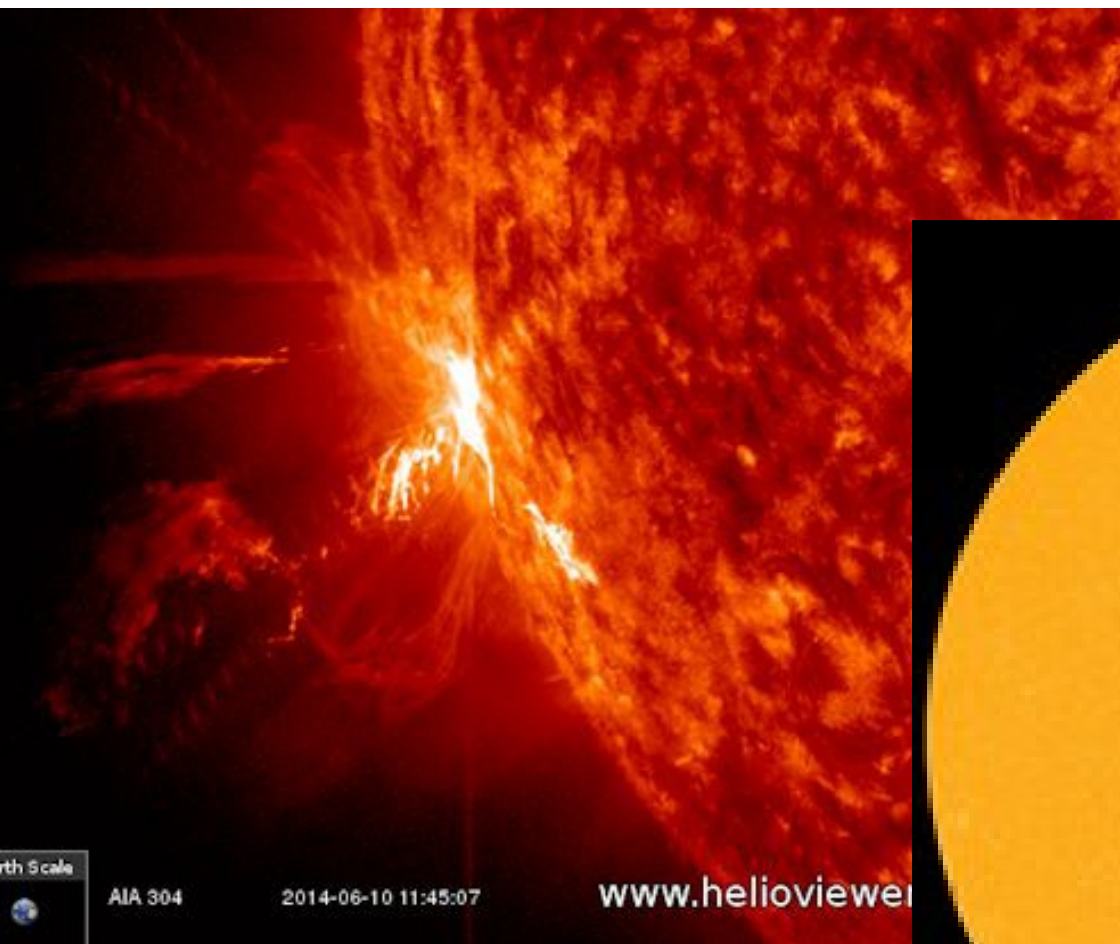
Вспышки 18 ноября 2003 г.





СМЕs были замечены в связи со вспышками и эруптивными протуберанцами и разрушениями стримеров . Можно сказать, что как рентгеновские вспышки так и КВМ приводят к перестройке топологии магнитных комплексов в короне через магнитное пересоединение

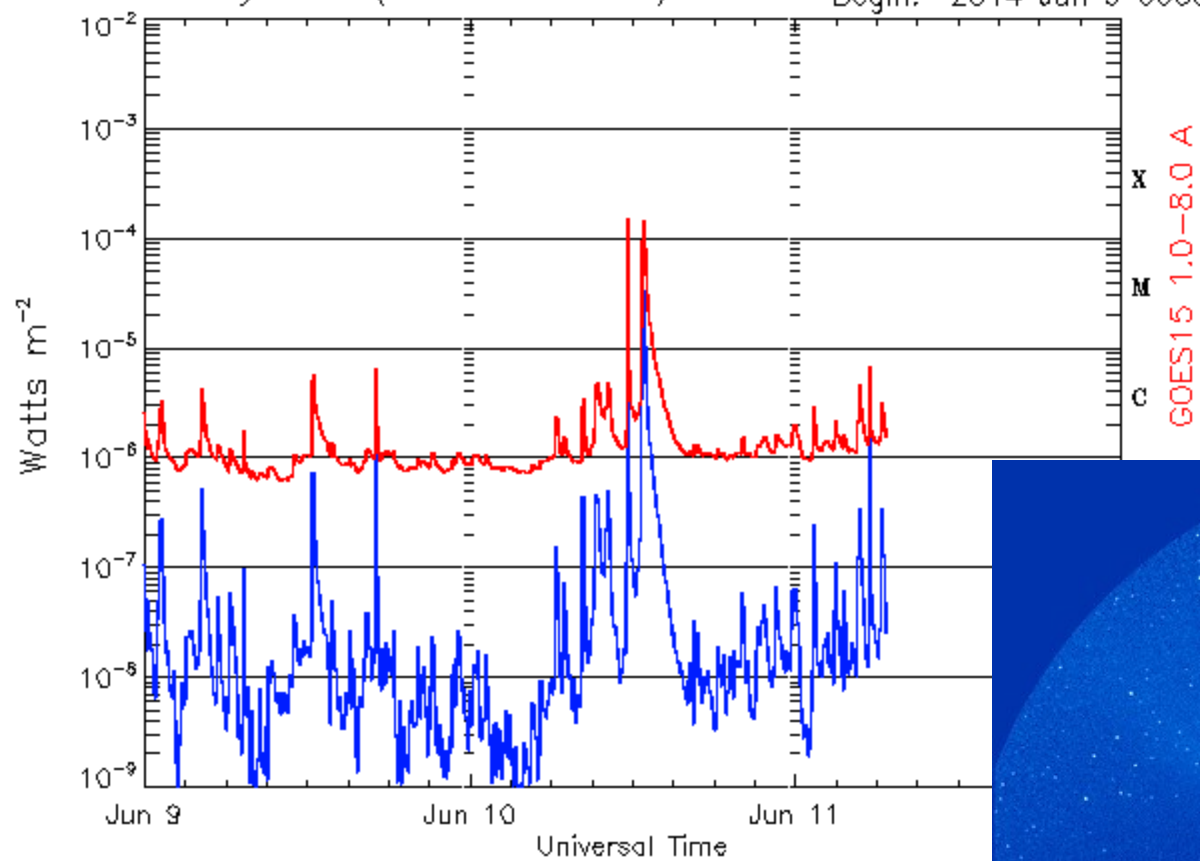
АО 2087, за Е-лимбом



**Вспышка и пятна
на Солнце 10 июня 2014**

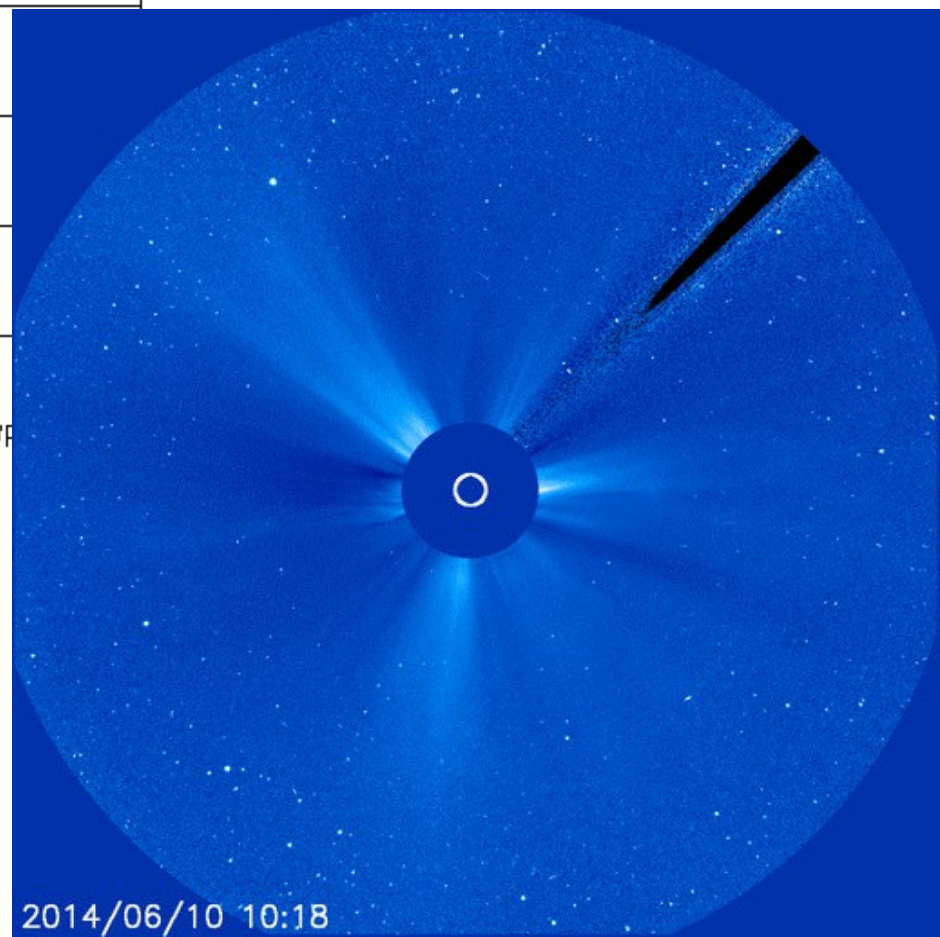
GOES Xray Flux (5 minute data)

Begin: 2014 Jun 9 0000 UTC



Updated 2014 Jun 11 06:55:11 UTC

NOAA/SWPC



Солнечная корона



Солнечная корона видна во время полных затмений как светящаяся область размером $(2 - 3) R_{\text{sun}}$. Форма ее зависит от степени активности Солнца; корона не имеет чёткой границы и, по некоторым данным, простирается до Плутона и дальше; температура достигает $2 \cdot 10^6 \text{ K}$.

При наблюдении в белом свете видны лучи, арки, петли, полярные щеточки, корональные конденсации, корональные дыры, транзиенты, шлемовидные и тонкие лучи.

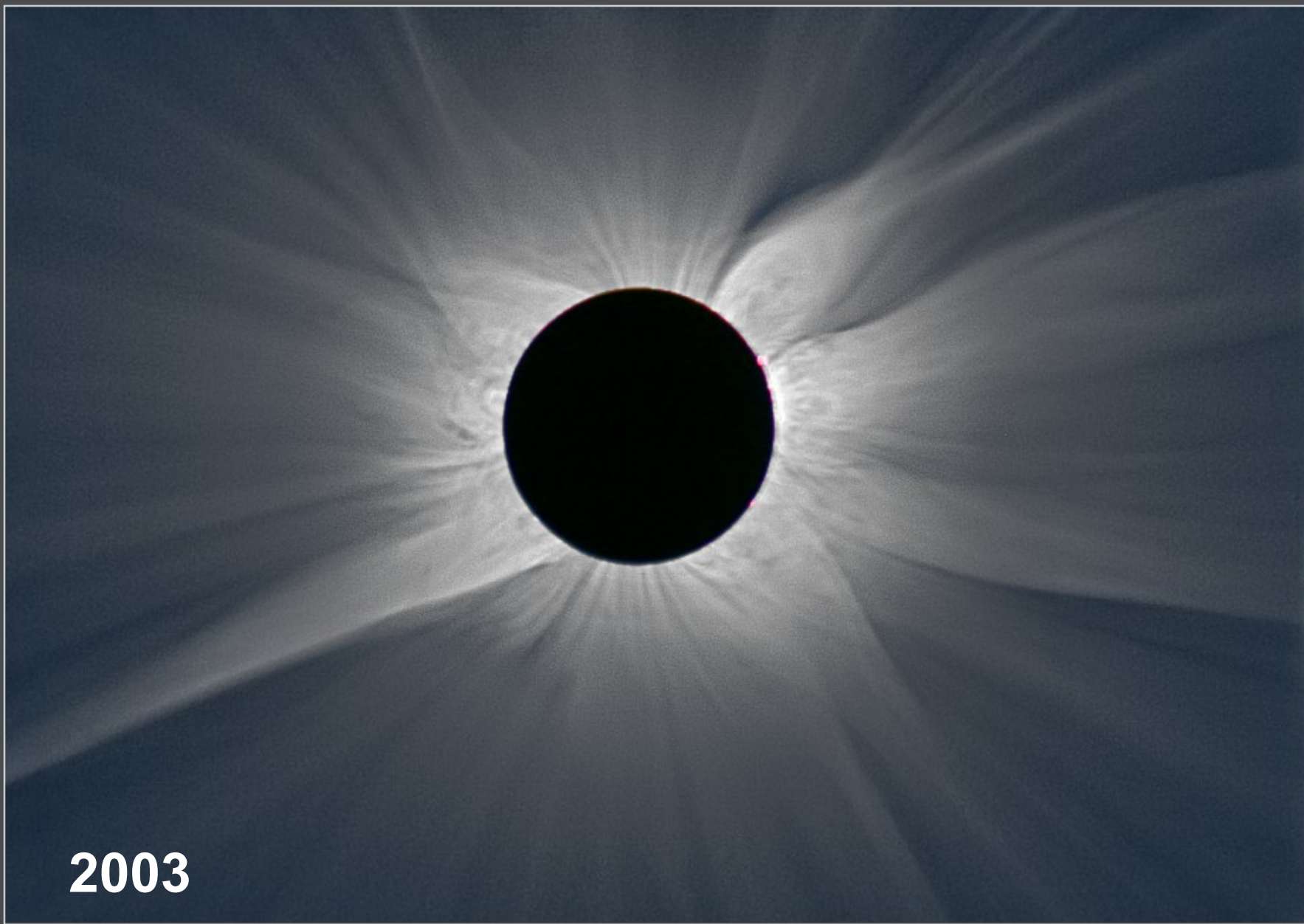
К-корона (электронная корона или непрерывная корона), **F-корона** (фраунгоферова или пылевая корона) и **E-корона** (эмиссионная линейчатая корона). Около 100 запрещенных обнаружено во время полных солнечных затмений.

Наиболее выделяется красная (Fe X 6374), зеленая Fe XIV 5303) и желтая (Ca XV 5694) корона.

.

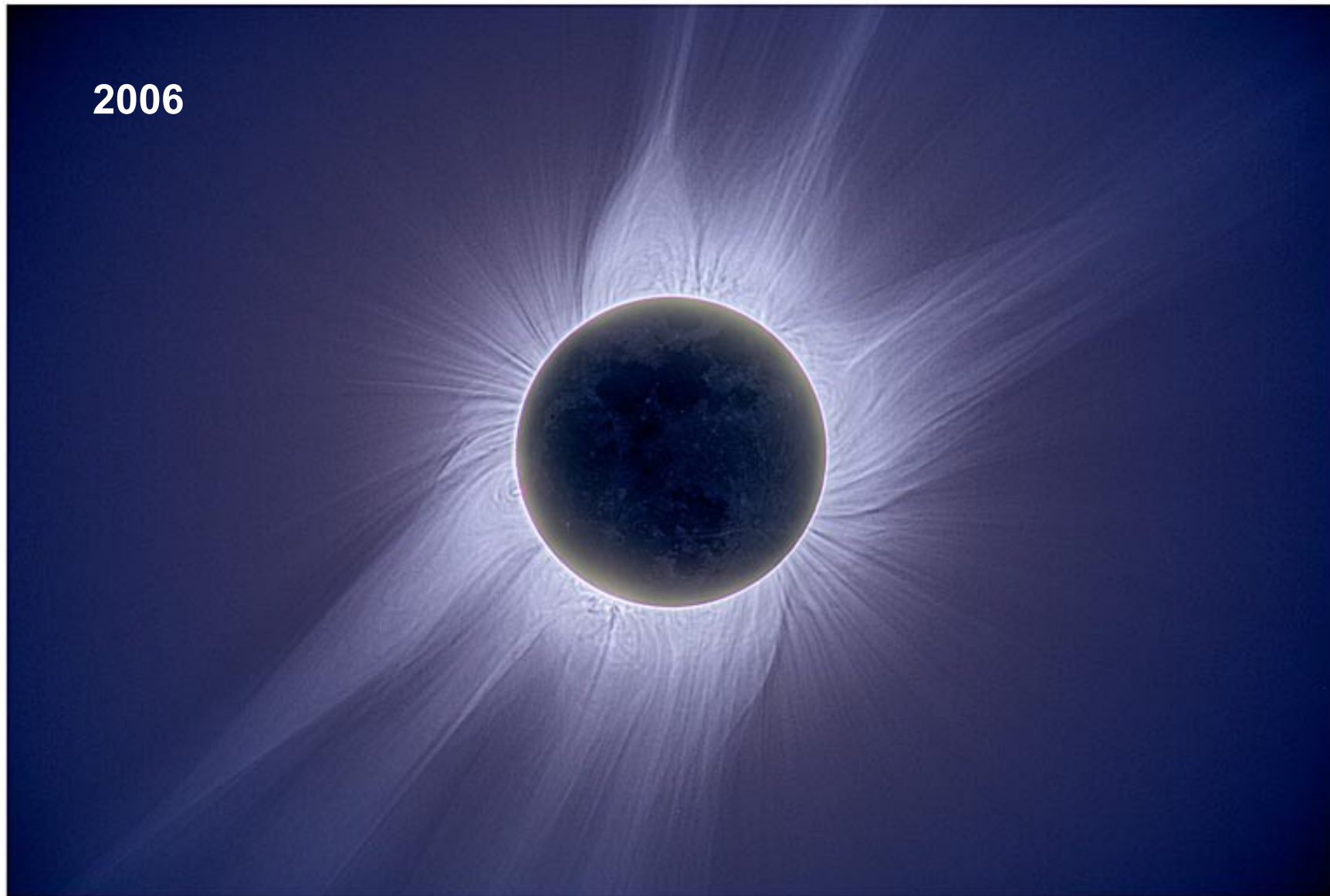


1999



2003

2006

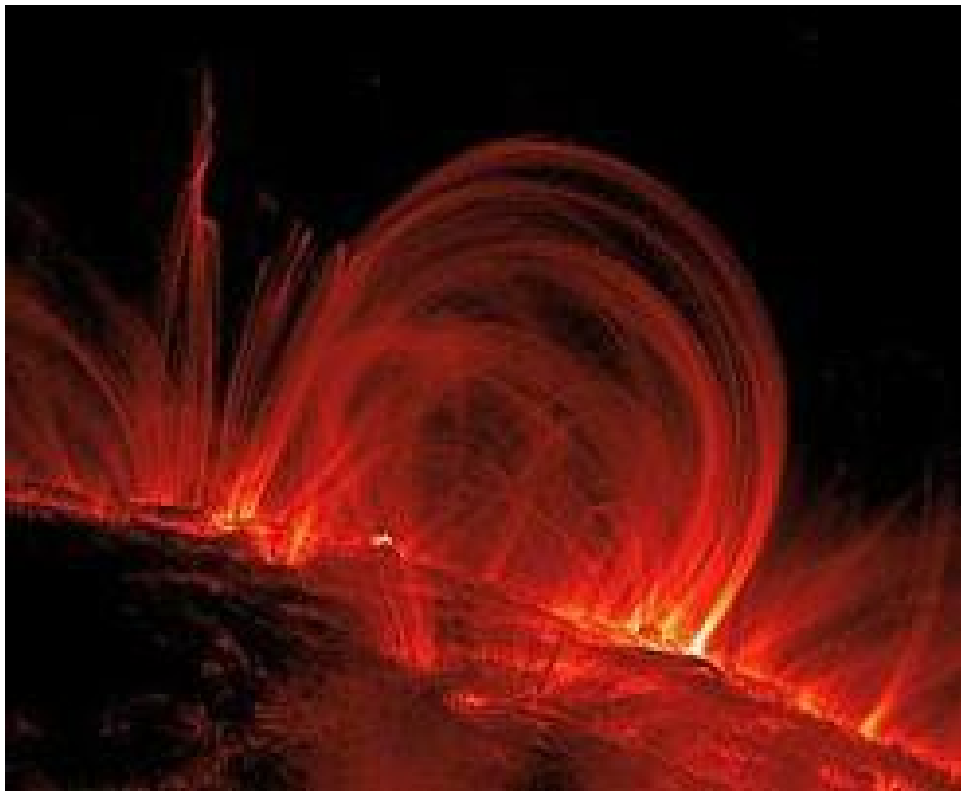


TOTAL SOLAR ECLIPSE - 2006 March 29 - LIBYAN DESERT (N 30°57'34.5" E 24°16'50.4")

Takahashi FSQ 106 (f.l. 530mm f/5) - Losmandy G11 - Nikon D2x

100 ISO - 11 photographs (from 1/500sec to 2sec) processed with Photoshop

GIANNI FARDELLI - e-mail: gianni@widepicture.com - <http://www.widepicture.com>



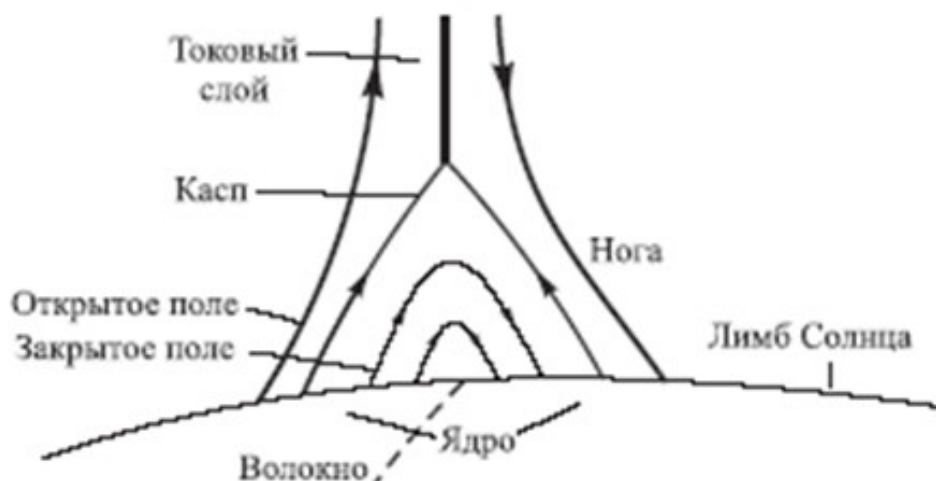
Корональные петли являются наиболее характерной особенностью нижней короны Солнца, часто окружают солнечные пятна и активные области. Времена жизни отдельных петель сильно различаются. Время жизни от нескольких дней и даже недель, хотя большинство меняется более быстро.

Существуют также петли, связанные с солнечными вспышками (вспышечные петли) с характерными временами жизни всего нескольких десятков минут. Корональные и вспышечные петли содержат более плотное и горячее вещество, чем окружающая корона и по этой причине выглядят как объекты повышенной яркости.



Корональные стримеры представляют собой вытянутые яркие шлемообразные структуры с открытой вершиной, которые часто формируются над пятнами и областями повышенной активности в атмосфере Солнца. Стримеры образуются из крупномасштабных петель магнитного поля, соединяющих группы солнечных пятен различной магнитной полярности, и могут удерживать над поверхностью Солнца протуберанцы и волокна. По этой причине эти объекты часто наблюдаются в основаниях стримеров.

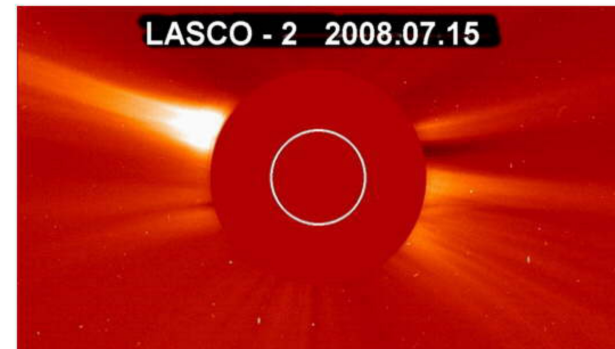
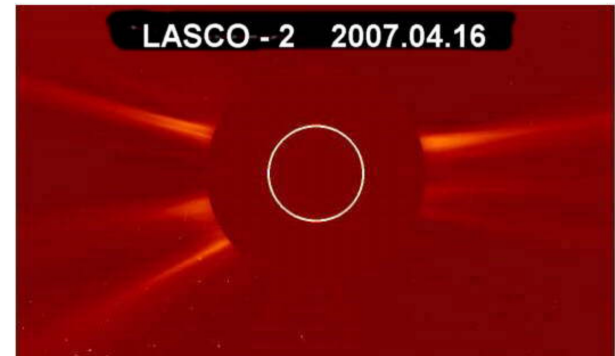
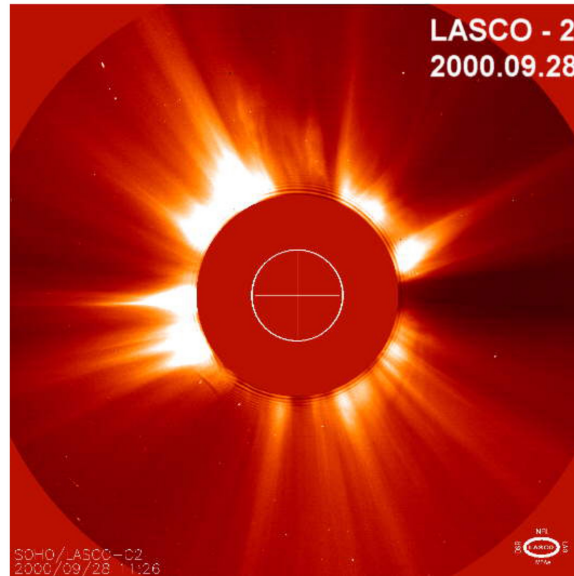
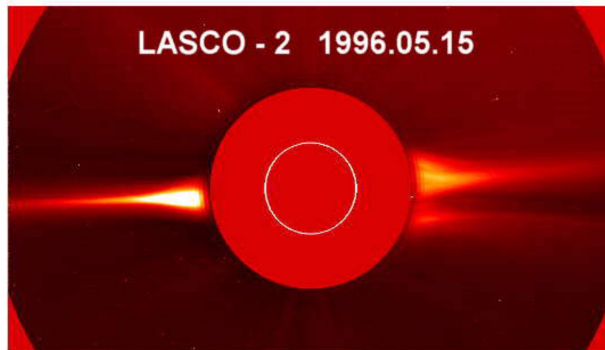
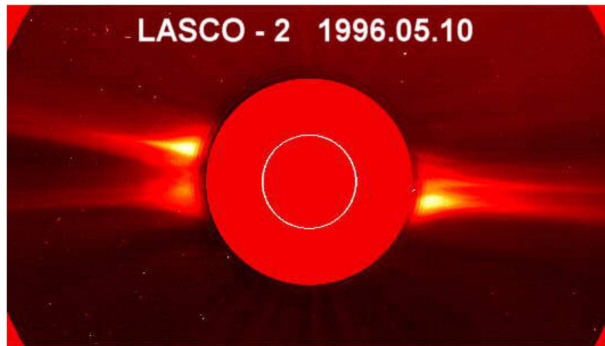
Петли, из которых состоят стримеры, представляют собой замкнутые магнитные структуры, которые могут удерживать внутри плазму и электрически заряженные частицы. По этой причине плотность вещества внутри стримеров обычно повышена и они выглядят более яркими, чем окружающая корона. Вытянутые вершины стримеров образуются из-за действия солнечного ветра, который течет от поверхности Солнца и растягивает линии магнитного поля.



Стримеры представляют собой основные крупномасштабные структуры солнечной короны, состоящие из серии закрытых петель, покрытых снаружи оболочкой открытых магнитных линий, и имеют шлемовидную форму. Стримеры возникают вдоль линии раздела магнитных полей разной полярности и могут располагаться в активных областях, спокойном Солнце или вдоль канала волокна. Во время солнечного минимума, когда общее магнитное поле на поверхности источника ($2.4 R_s$) хорошо описывается полем диполя, система стримеров располагается вблизи солнечного экватора, окаймляя Солнце и образуя так называемый пояс стримеров. Форма этой поверхности достаточно плоская. Во время максимума магнитная структура сложная. Корональные стримеры могут возникать почти на любой широте и видны везде вокруг солнечного лимба. Токовый слой, разделяющий магнитные поля разной полярности, образует сильно гофрированную поверхность

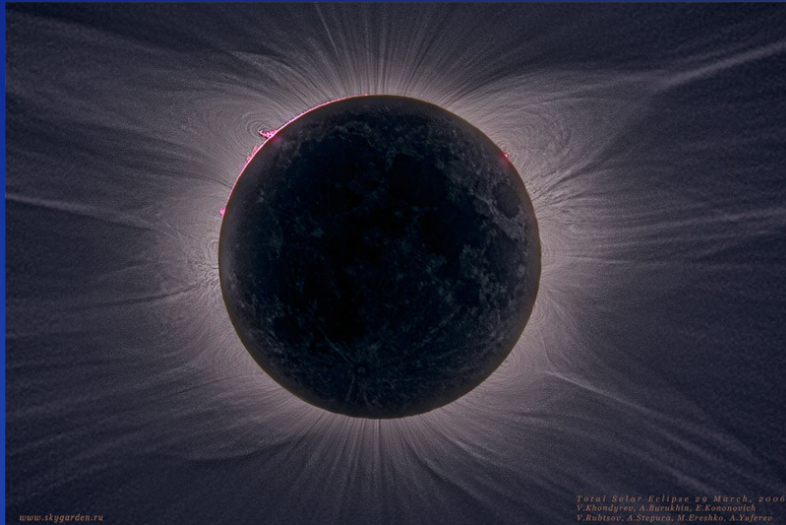
Пояс стр

МУНЛ



Стримеры в цикле

Солнечный минимум



Khondyrev et al., 2006

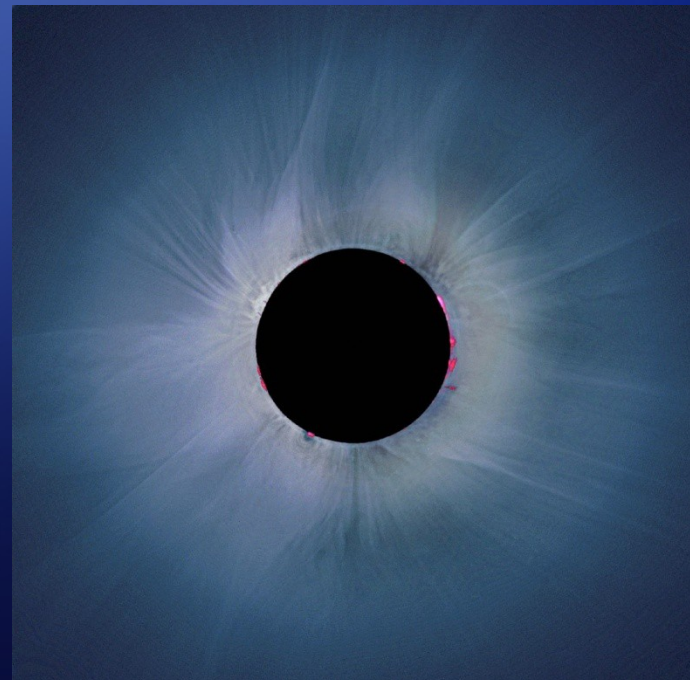


Hartvig and Luethen, 2008

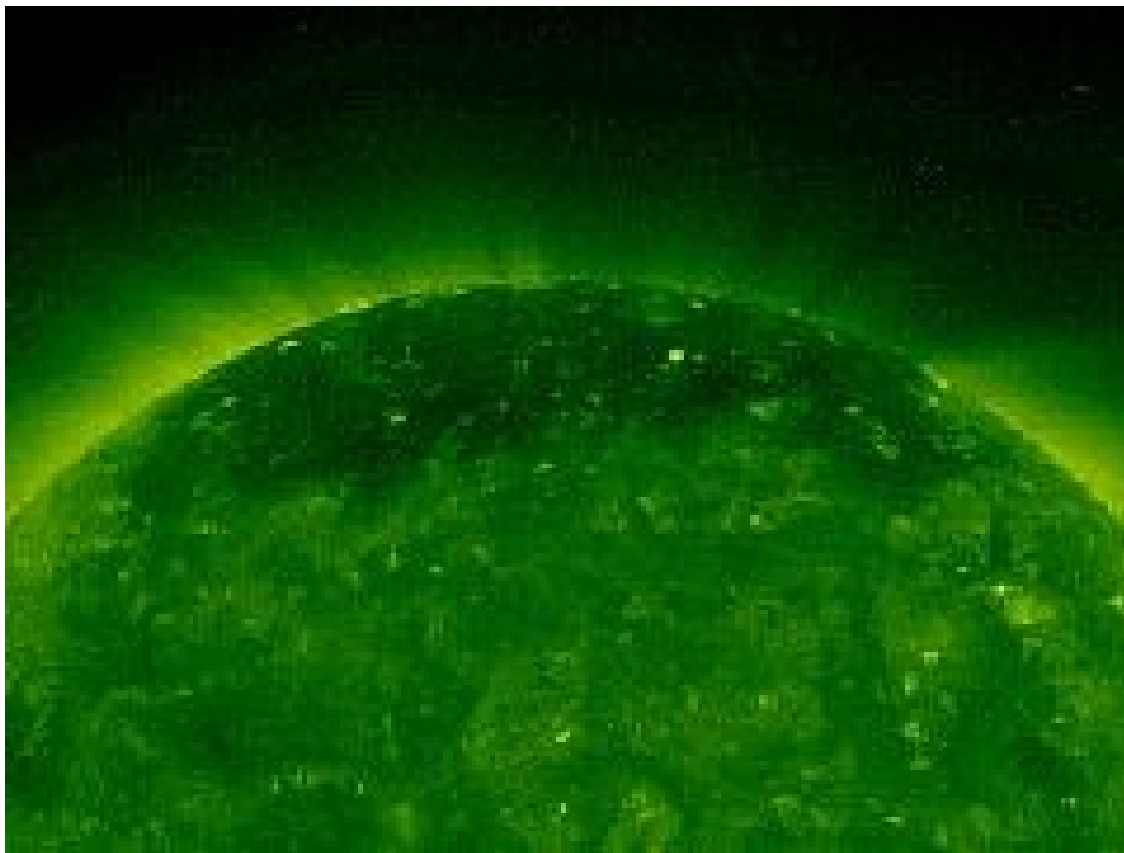
Солнечный максимум



*HAO,
1980*

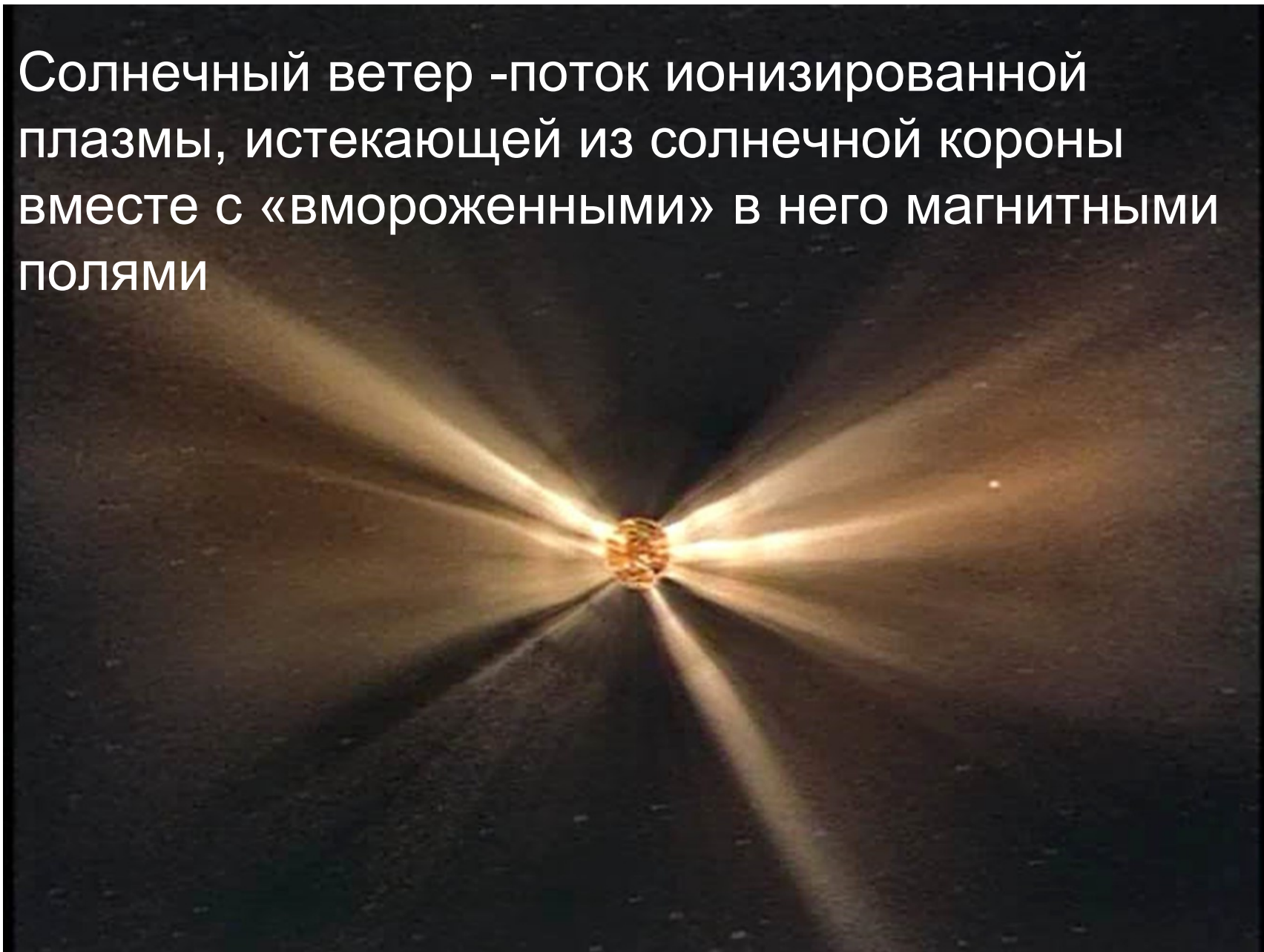


*IAP,
1999*



Полярные перья это очень тонкие стримеры, которые формируются не над активными областями и пятнами, а над северным и южным полюсами Солнца. Фактически, они представляют собой открытые линии магнитного поля, выходящие из магнитных полюсов. Форма полярных перьев определяется действием солнечного ветра, точно так же как и форма обычных шлемообразных стримеров.

Солнечный ветер -поток ионизированной плазмы, истекающей из солнечной короны вместе с «вмороженными» в него магнитными полями



Солнечный ветер - это поток ионизированной плазмы, истекающей из солнечной короны вместе с «вмороженными» в него магнитными полями, со скоростью около 400 км/с. Источником **солнечного ветра** является солнечная корона. Температура короны Солнца настолько высока, что сила гравитации не способна удержать ее вещество вблизи поверхности, и часть этого вещества непрерывно убегает в межпланетное пространство.

Хотя мы понимаем общие причины, по которым возникает **солнечный ветер**, многие детали этого процесса все еще не ясны. В частности, в настоящее время до конца не известно, где именно корональный газ ускоряется до таких высоких скоростей. Не исключено, что этот вопрос тесно связан с проблемой нагрева солнечной короны. **Солнечный ветер** не однороден. Его скорость является высокой (800 км/с) над корональными дырами и низкой (300 км/с) над стримерами. Эти потоки быстрого и медленного **солнечного ветра** взаимодействуют друг с другом и попеременно пересекаются Землей по мере того, как Солнце вращается. Такие резкие изменения в скорости **солнечного ветра** негативно воздействуют на магнитное поле Земли и могут производить магнитные бури в земной магнитосфере.

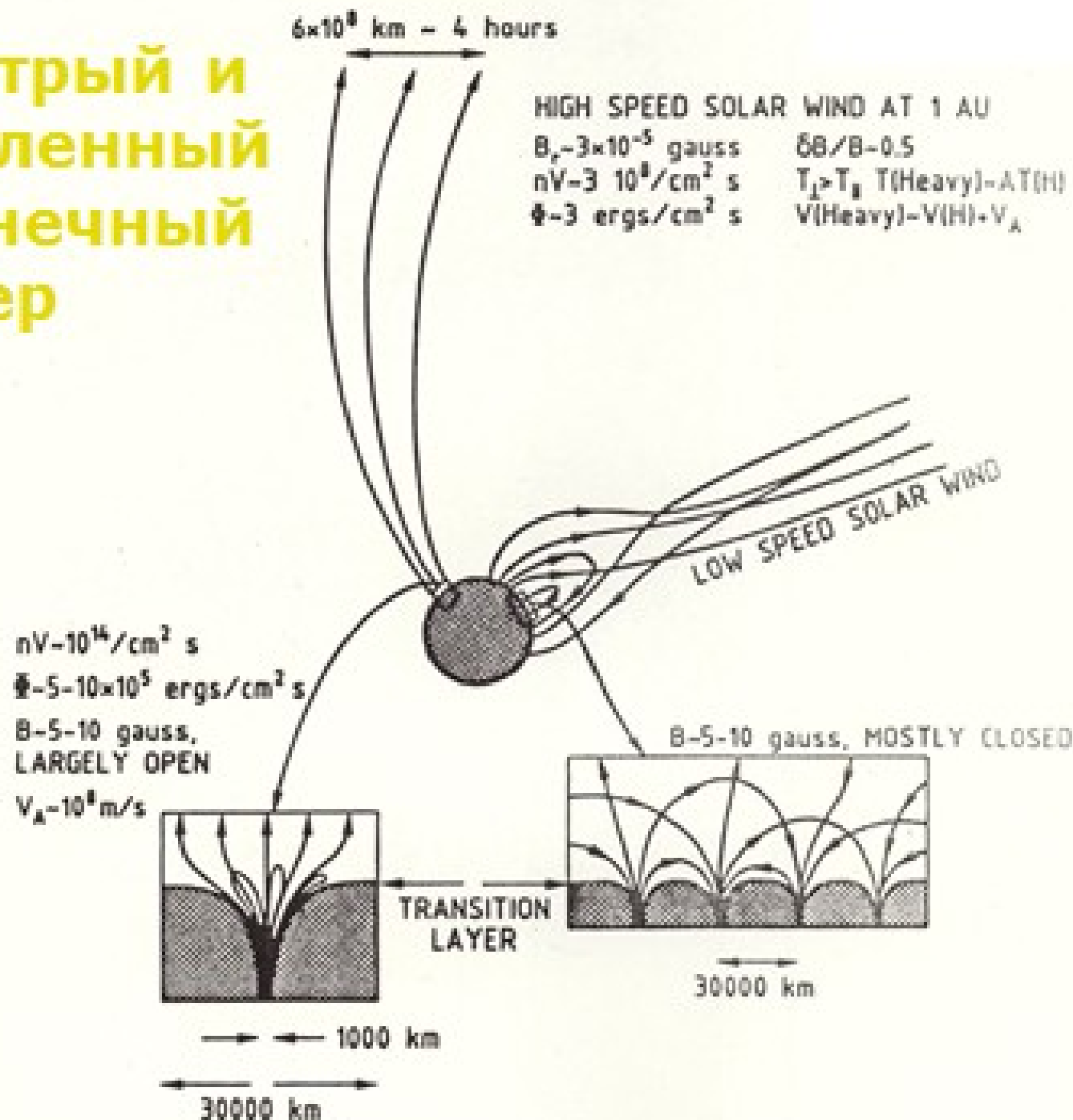
Солнечный ветер это смесь медленного и быстрого потоков. Скоростной поток, в свою очередь, делится на квазистационарные и спорадические потоки, имеющие разную природу.

Квазистационарные высокоскоростные потоки солнечной плазмы, ответственные за рекуррентные геомагнитные возмущения, наблюдаются над **корональными дырами**. Скорость здесь повышена до 700-1000 км/с, плотность понижена ($3-4 \text{ см}^{-3}$).

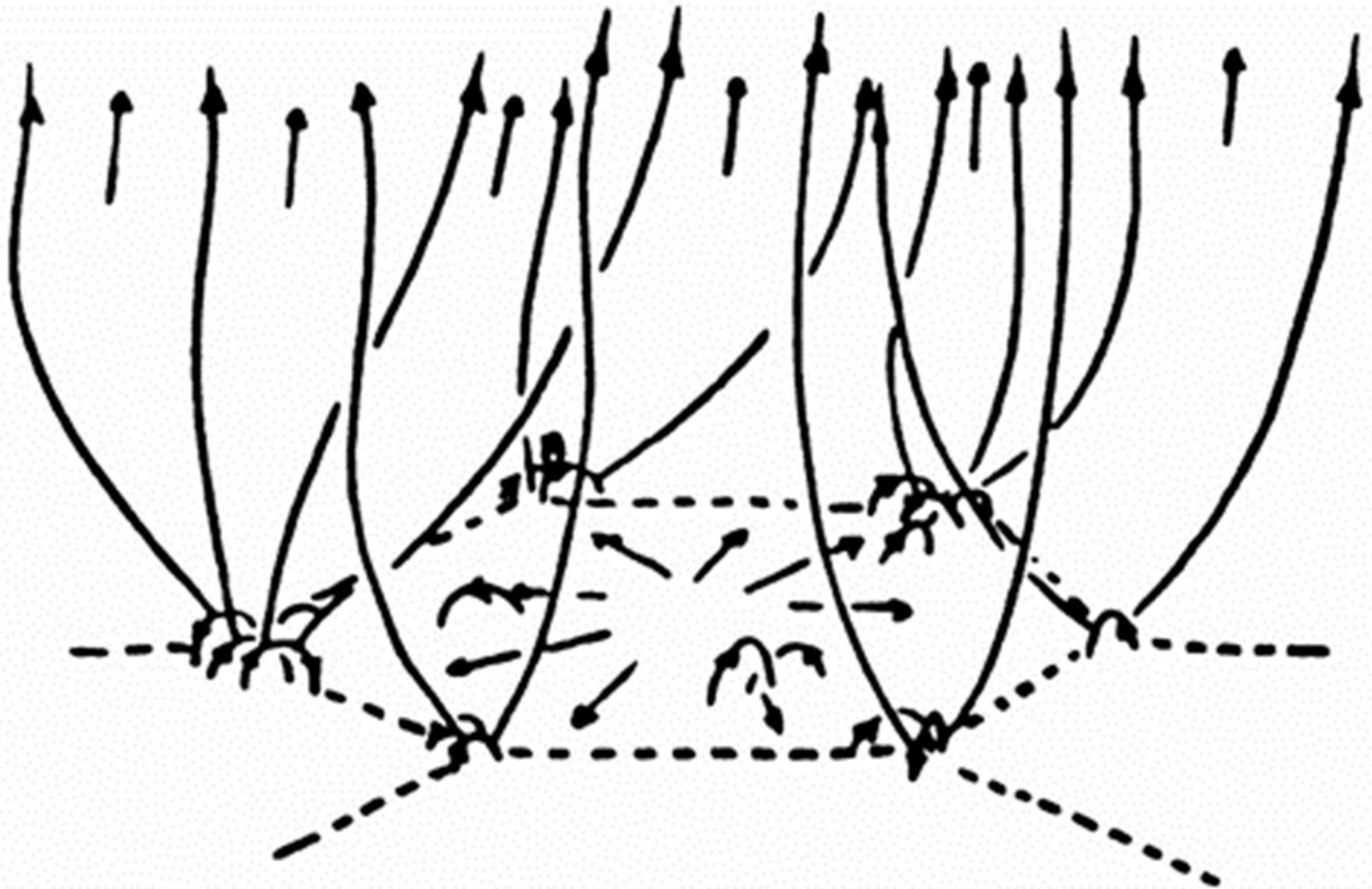
Спорадические высокоскоростные потоки - относительно кратковременные и сложные по структуре образования, ответственные за спорадические магнитосферные возмущения, в частности, с ними связаны большие магнитные бури.

Скорость солнечного ветра в спорадических потоках достигает 1200 км/с; на переднем фронте и впереди его образуется ударная волна.

Быстрый и медленный солнечный ветер



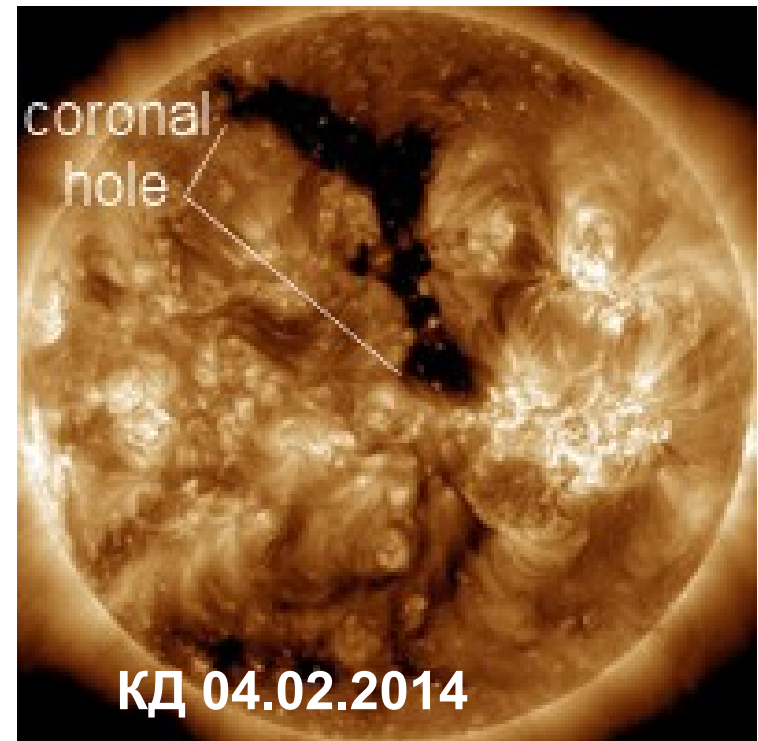
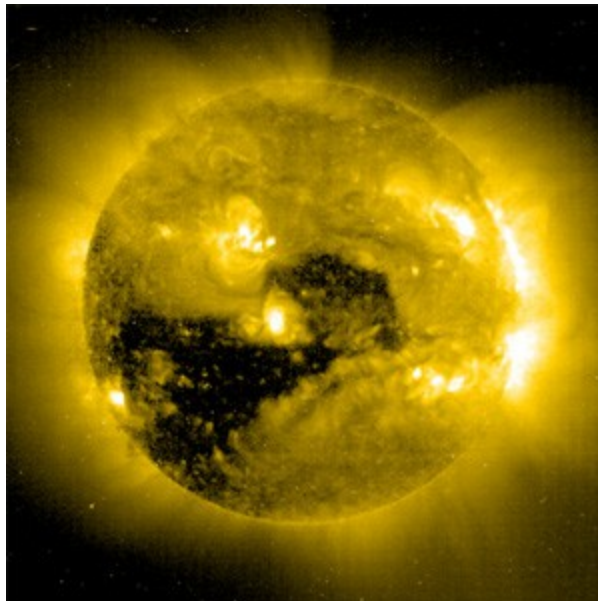
Источники солнечного ветра на Солнце



Хромосферная магнитная сетка

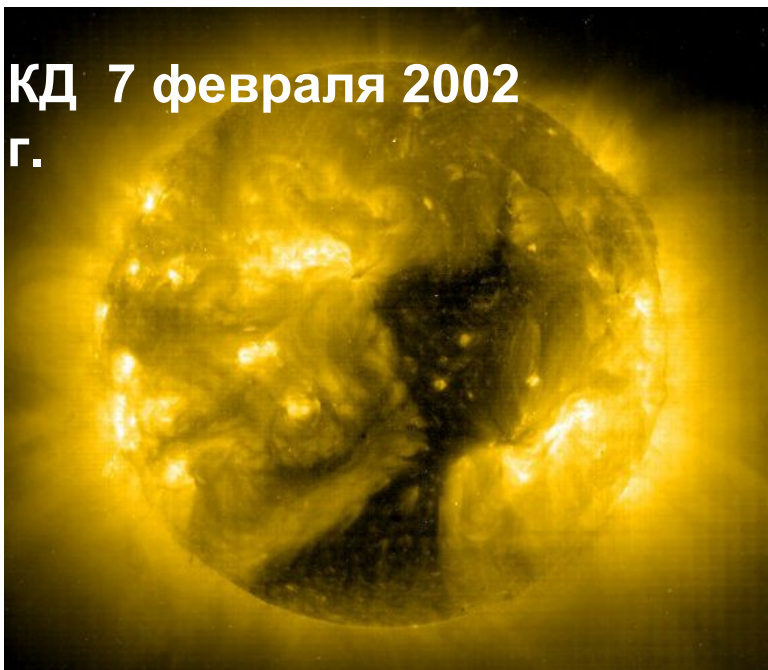
Корональные дыры (КД) - области солнечной короны с относительно низкой температурой (0.8×10^6 K), пониженной плотностью и магнитным полем, направленным примерно радиально от Солнца. В рентгеновских лучах КД выглядят тёмными по сравнению с другими областями короны. КД, по-видимому, всегда существуют в полярных областях Солнца и иногда продолжаются в область низких широт, где могут образовываться изолированные КД.

Изображение Солнца, полученное в крайнем УФ-диапазоне с помощью аппаратуры EIT на борту космической обсерватории SOHO. (Источник <http://www.astronet.ru/db/msg/1188361>)



КОРОНАЛЬНЫЕ ДЫРЫ

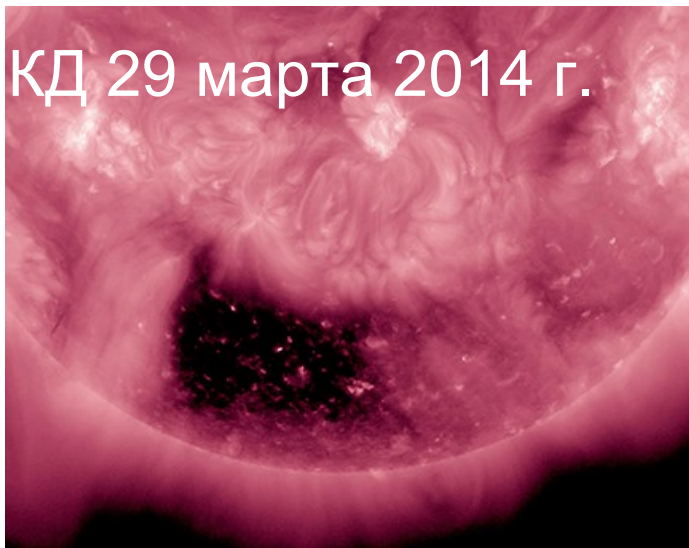
КД 7 февраля 2002
г.



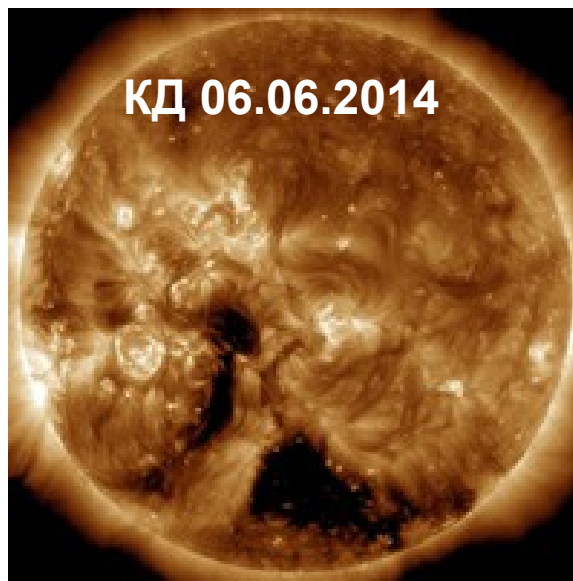
КД 25 июня 2013

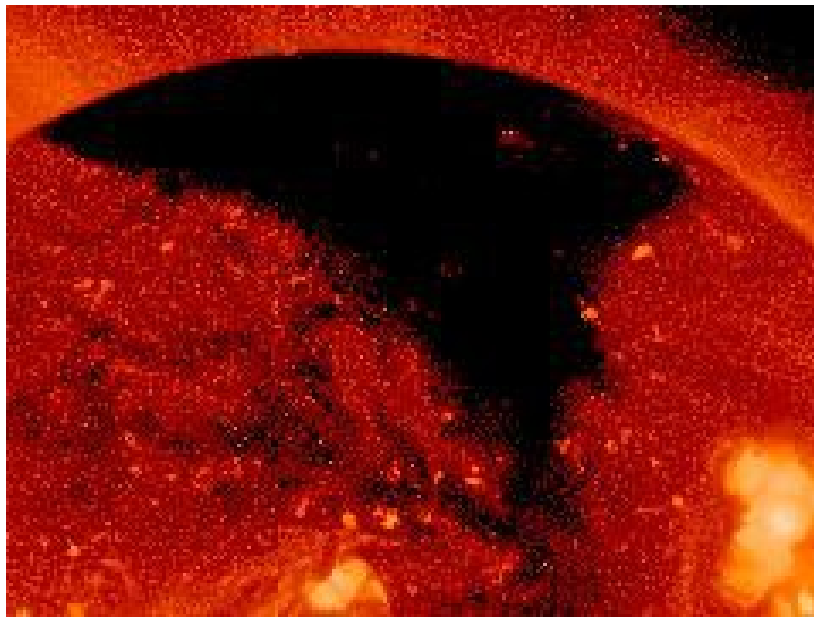


КД 29 марта 2014 г.



КД 06.06.2014





Корональные дыры это области короны пониженной светимости. Эти области были обнаружены после начала рентгеновских исследований Солнца с помощью космических аппаратов из за пределов земной атмосферы. Корональные дыры связаны с областями открытых линий магнитного поля и часто находятся на солнечных полюсах. В настоящее время считается, что высокоскоростной солнечный ветер формируется именно в корональных дырах.

Геоэффективные солнечные события

Геоэффективными в солнечно-земной физике принято называть события, непосредственно влияющие на **радиационную, геомагнитную и электромагнитную обстановку в околоземном пространстве (ОКП)**. Источником таких событий являются явления и процессы, происходящие в атмосфере Солнца и гелиосфере.

Явления, которые могут стать причиной геоэффективных солнечных событий:

солнечные вспышки

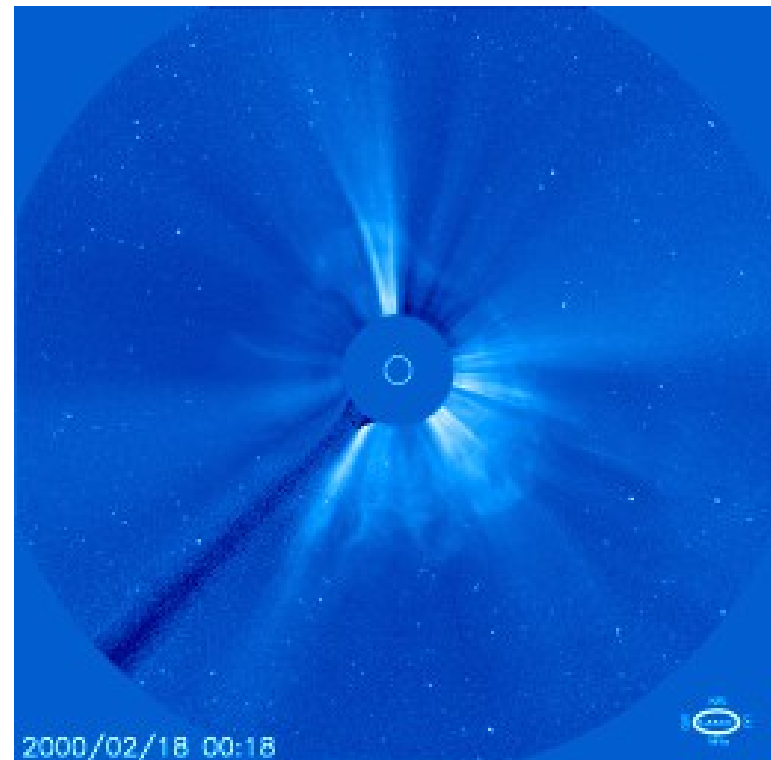
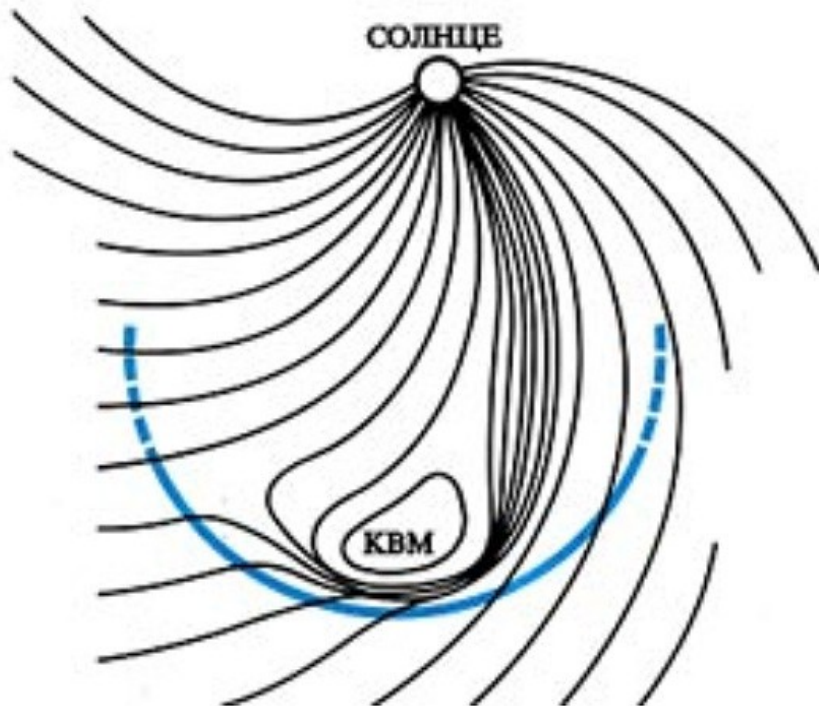
корональные выбросы массы (КВМ)

эруптивные протуберанцы

высокоскоростные потоки солнечного ветра (следуют за ударной волной от мощных вспышечных событий, а также истекают из корональных дыр)

коротирующие области взаимодействия (КОВ), возникающие в результате взаимодействия быстрого и медленного потоков солнечного ветра.

В 90-е гг. 20 века стало ясно, что важным источником геоэффективных возмущений являются не только солнечные вспышки, но также и гигантские выбросы вещества из короны Солнца, так называемые **корональные выбросы массы (КВМ)**. Схематично КВМ выглядит как оторвавшаяся от Солнца замкнутая петля магнитного поля, несущая в себе сгусток коронального вещества. Толстой линией показана ударная волна перед фронтом выброса.



Корональный выброс
28.02.2000 (SOHO)

Наблюдаемая морфология CME зависит от топологии МП в нижней короне Солнца и ориентации CME по отношению к наблюдателю. Типичный выброс CME состоит из трех частей и имеет яркий ведущий фронт, за которым следует темная полость и хвостовое яркое ядро, представляющее собой выброшенное волокно . Существуют также и диффузные CMEs с размытой структурой и уплощенной формой . CMEs типа гало наблюдаются в виде яркого ореола, окружающего диск Солнца. Такие CMEs представляют собой выбросы, возникающие вблизи центрального меридиана и направленные к Земле или от Земли в зависимости от того, зародились ли они на видимой или противоположной от наблюдателя стороне Солнца . Различают симметричные и асимметричные формы. Выбросы типа гало являются наиболее геоэффективными. Наблюдение CME разных морфологических типов можно объяснить структурой магнитного поля в нижней короне Солнца и ориентацией CME в пространстве по отношению к наблюдателю. Свойства вспышек и выбросов корональной массы, возникающих в одних и тех же АО, коррелируют между собой. Обнаруживаются статистические связи между характеристиками CME и сопутствующих явлений. CMEs, связанные со вспышками, имеют большие скорости, чем CMEs, не связанные со вспышками (495 ± 8 км с⁻¹ и 422 ± 3 км с⁻¹ соответственно) . Ширина CMEs, связанных со вспышками, пропорциональна рентгеновскому потоку вспышки: $80^\circ \pm 10^\circ$ для CMEs, связанных с вспышками X класса и $42^\circ \pm 1.4^\circ$ для CMEs, связанных с вспышками B класса.

Наиболее массивные и широкие CMEs связаны с наиболее энергичными вспышками .

Солнечные нейтрино

Помимо энергии, выделяющейся во время термоядерных реакций в форме γ -квантов, а также и непосредственно в виде кинетической энергии возникающих частиц, важную роль играет образование нейтрино, поток которых должен буквально пронизывать всю Землю. **Нейтрино - частицы, чрезвычайно слабо взаимодействующие с веществом.** Поэтому они свободно выходят из недр Солнца и со скоростью, очень близкой к световой, распространяются в космическом пространстве, почти не поглощаясь веществом на их пути. **Возникновение на Солнце каждой α -частицы связано с выделением по крайней мере 26,7 МэВ энергии, поддерживающей наблюдаемую светимость Солнца.** Каждый такой акт сопровождается излучением двух нейтрино. Отсюда можно подсчитать, что полная нейтринная "светимость" Солнца, независимо от деталей термоядерных процессов, составляет **10^{38} нейтрино за 1 сек,** а поток солнечных нейтрино на Земле порядка 10^{11} нейтрино за секунду через площадку в 1 см^2 . Важно, что нейтрино от разных реакций обладают неодинаковыми энергиями. Скорости отдельных ядерных реакций и тем самым величина соответствующих потоков нейтрино сильно зависят от температуры и параметров химического состава и, в первую очередь, от содержания гелия. Поэтому, **регистрируя потоки солнечных нейтрино различных энергий, можно получить прямые экспериментальные данные об условиях в недрах Солнца.**

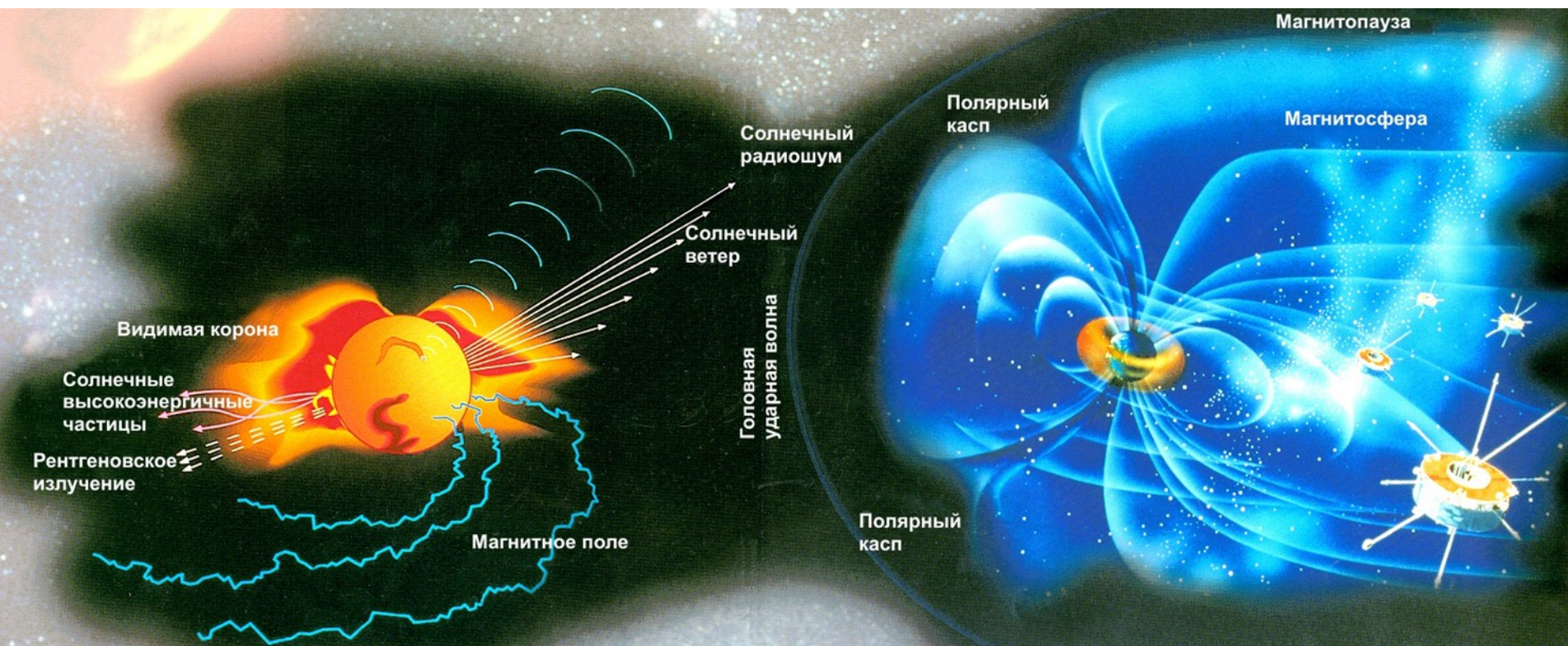
ИСТОРИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

История телескопических наблюдений Солнца начинается с наблюдений, выполненных Г. Галлилеем в 1611 году; были открыты солнечные пятна, определён период вращения Солнца вокруг своей оси. 1770 г. Эйлер померил расстояние от Земли до Солнца. В 1814 г. 547 линий поглощения в обнаружил Й. Фраунгофер в спектре Солнца - это положило начало изучению химического состава Солнца. С 1836 г. регулярно ведутся наблюдения затмений Солнца, что привело к обнаружению хромосферы Солнца, а также солнечных протуберанцев. В 1843 году немецкий астроном Г. Швабе обнаружил цикличность солнечной активности. Развитие методов спектрального анализа позволило изучить физические условия на Солнце. В 1913 году американский астроном Дж. Хейл наблюдал зеемановское расщепление фраунгоферовых линий спектра солнечных пятен и этим доказал существование на Солнце магнитных полей. В 1931 году Б. Лио изобрёл солнечный коронограф, позволивший наблюдать корону и хромосферу вне затмений. К 1942 году шведский астроном Б. Эдлен и другие отождествили несколько линий спектра солнечной короны с линиями высокоионизированных элементов, доказав этим высокую температуру в солнечной короне.

ИСТОРИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

В начале 40-х годов XX века было открыто радиоизлучение Солнца. Существенным толчком для развития физики Солнца во второй половине XX века послужило развитие магнитной гидродинамики и физики плазмы. 1952 магнитограф Бэбкок, 1958 - солнечный ветер (Паркер), 5-минутные колебания - Лейтон.

После начала космической эры изучение ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца ведётся методами внеатмосферной астрономии с помощью ракет, автоматических орбитальных обсерваторий на спутниках Земли, космических лабораторий с людьми на борту. В 90-е гг. 20 века стало ясно, что важным источником геоэффективных возмущений являются не только солнечные вспышки, но также и гигантские выбросы вещества из короны Солнца, так называемые корональные выбросы массы (КВМ).



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !