

Плазма в космосе

Лекция №10

Солнце, ч.2: атмосфера

Анненков Владимир, с.н.с. лаб. 9-1

18 ноября 2021



Содержание лекции

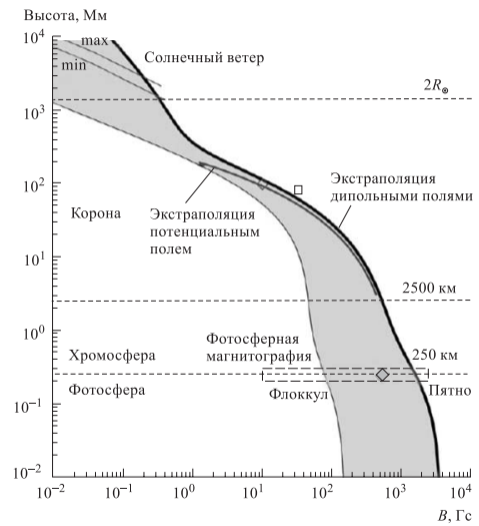
- 1 Солнечная атмосфера
 - Грануляция и супергрануляция
 - Спикулы
- 2 Солнечные пятна
 - Корональные петли
- 3 Солнечные циклы
 - Числа Вольфа
 - Бабочки Маундера
 - Минимум Маундера
- 4 Солнечное динамо

Солнечная атмосфера

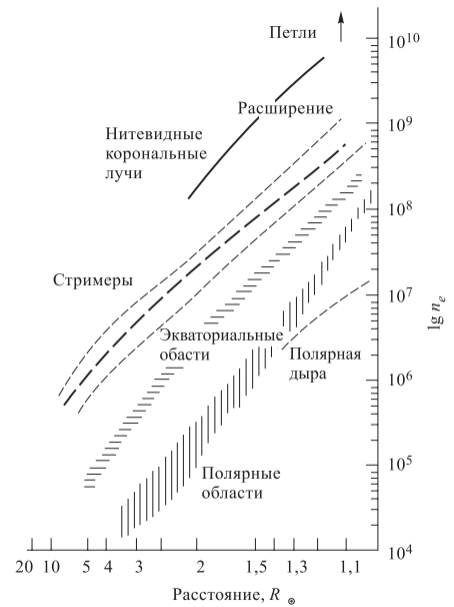
Video: the Sun's surface activity ESO

<https://www.youtube.com/watch?v=QVGz8Y66cGg>

Солнечная атмосфера

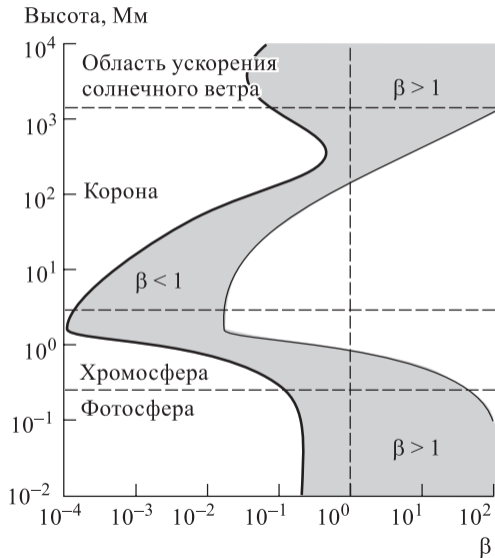


Модель магнитного поля над активной областью.



Распределение плотности электронов (см^{-3}) в зависимости от расстояния от фотосферы.

Солнечная атмосфера



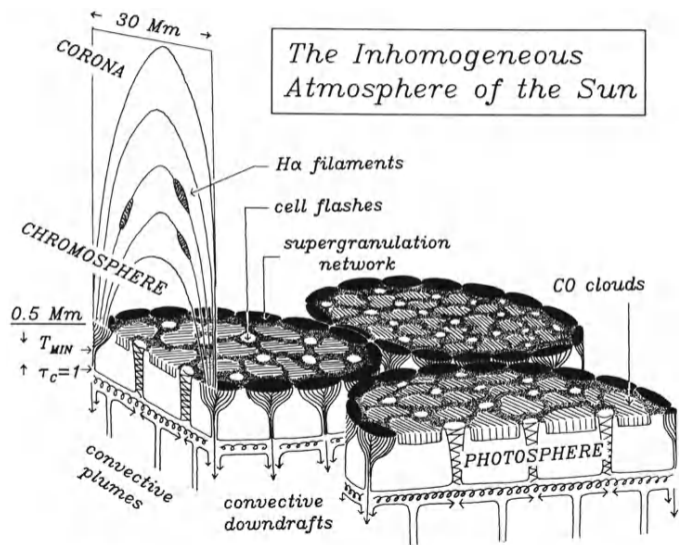
Модель плазменного бета

$$\beta = 16\pi \frac{nkT}{B^2}$$

над активной областью.

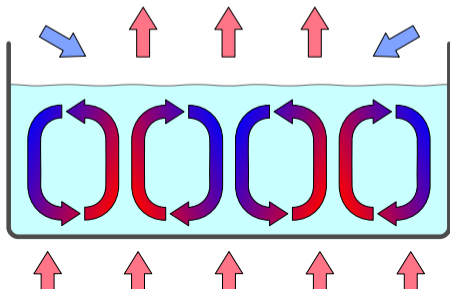
Серый фон – для открытых и закрытых конфигураций магнитного поля со значениями в источнике 2500 Гс (пятно) и 150 Гс (область флоккула).

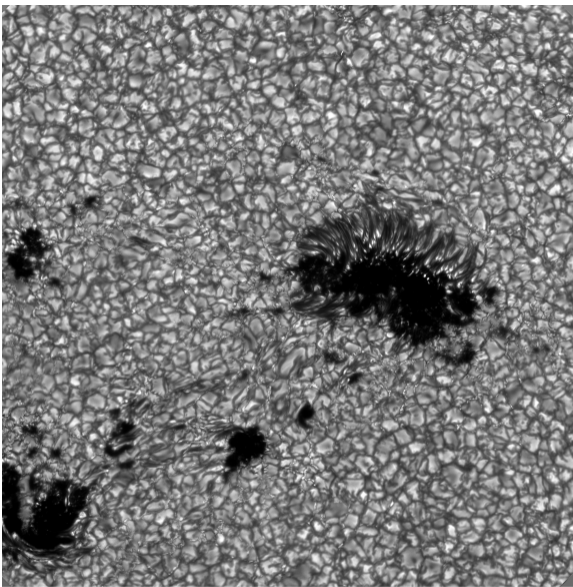
Солнечная атмосфера



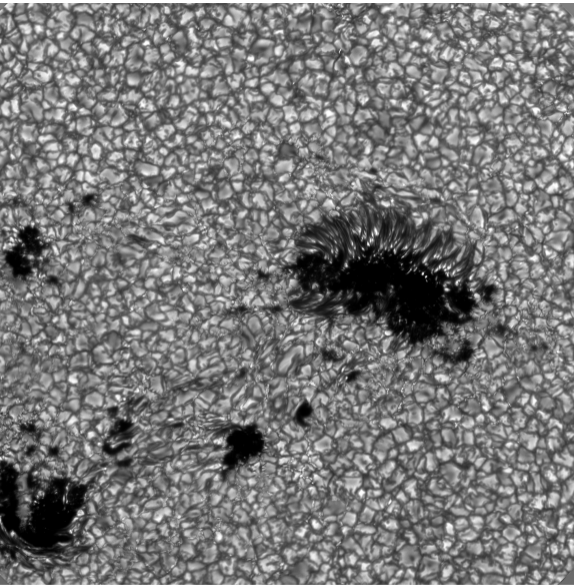
Конвекция

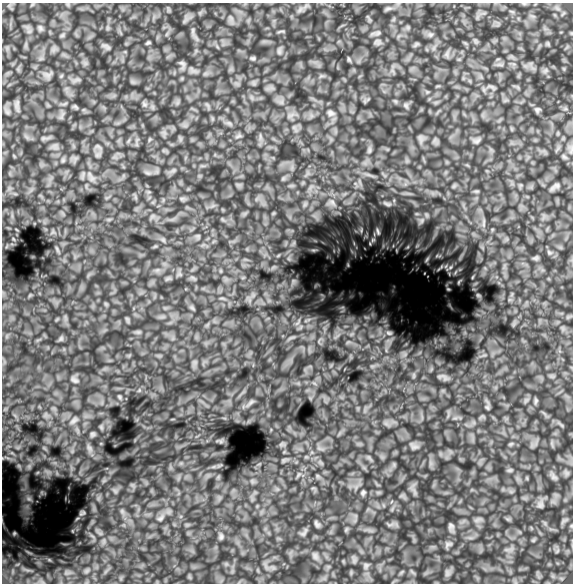
- Конвекция является преобладающим способом переноса энергии тогда, когда температура в поднимающемся элементе газа убывает медленнее, чем в окружающей среде, вследствие чего поднимающийся элемент оказывается менее плотным и приобретает плавучесть.
- Он несёт своё избыточное тепло вверх и передаёт его окружающей среде не посредством излучения, а рассасываясь и разрушаясь, т. е. путём непосредственного перемешивания.





- Гранулы – это небольшие (около 1000 км в поперечнике) ячеистые элементы, которые покрывают всё Солнце, за исключением тех областей, которые покрыты солнечными пятнами.
- Они представляют собой верхушки конвективных ячеек, где горячее вещество поднимается из глубины (светлая область), распространяется по всей поверхности, охлаждается и затем опускается обратно (тёмные области).
- Отдельные гранулы существуют всего около 20 минут. Старые гранулы постоянно оттесняются вновь появляющимися.
- Поток в гранулах может достигать сверхзвуковых скоростей более 7 км/с и производить звуковой шум, который генерирует волны на поверхности Солнца.





Конвективные ячейки (ячейки Рэлея-Бенара)

Оборудование:

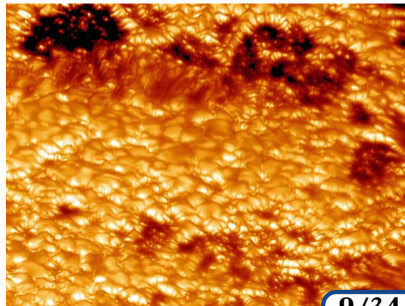
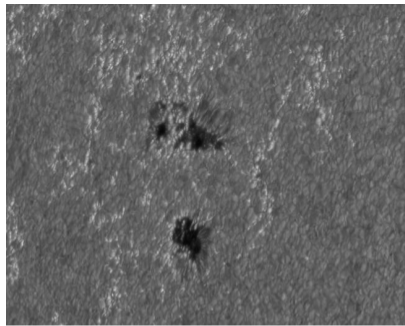
Плита, сковорода, силиконовое масло с порошкообразным алюминием, воронка.

Процедура:

Поместите сковороду на плиту. Установите температуру между 350 и 400 °С. Добавьте пол литра смеси масла и алюминиевого порошка.

Фотосферный факел

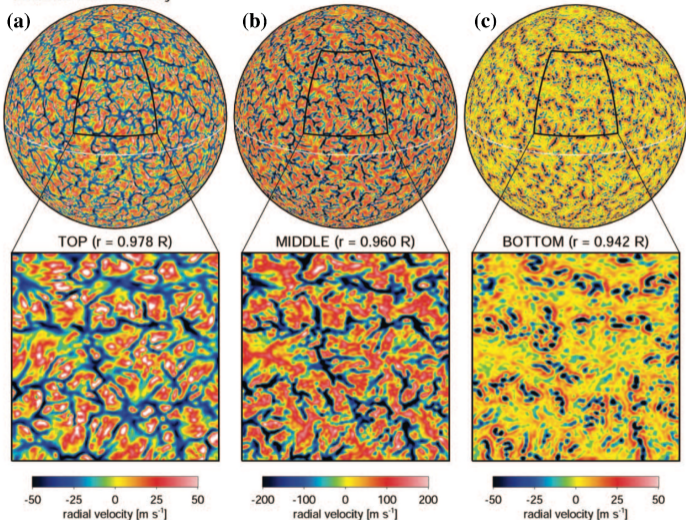
- Солнечные факелы – это яркие пятна, которые образуются в областях между гранулами.
- Магнитное поле в факелах по оценкам составляет около 400 Гс.
- В полярных факелах магнитные поля могут достигать величины 1500 Гс, т. е. одного порядка с активными образованиями экваториальных областей.
- Факелы кажутся яркими, потому что имеющееся большое магнитное поле делает газ более прозрачными и линия обзора проникает глубже в гранулы, где газ более плотный и излучает более интенсивно.



Супергрануляция

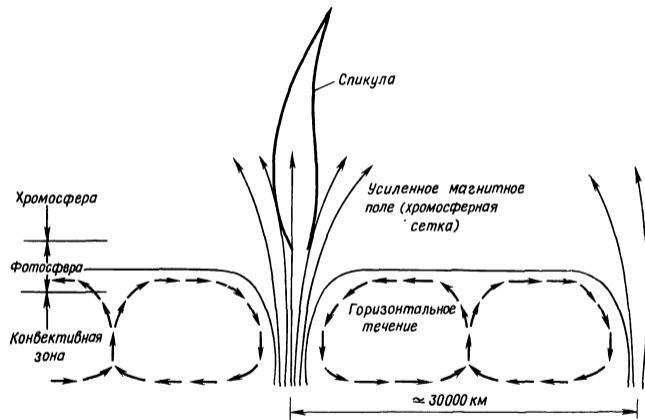
- Супергранулы – это гораздо более крупные версии гранул (около 35 тысяч км в поперечнике).
- Они охватывают все Солнце и постоянно эволюционируют.
- Отдельные супергранулы существуют в течение дня или двух и имеют скорость потока около 0.5 км/с.
- Наблюдаемые в супергранулах потоки жидкости переносят линии магнитного поля к краям ячеек, где они образуют **хромосферную сеть**.

Case S2: Radial Velocity



Спикулы

- На высотах 4000-10 000 км находятся изолированные образования, так называемые хромосферные спикулы, имеющие вид столбов.
- Время жизни отдельной спикулы 2-5 минут, диаметр 500-3000 км, скорость подъема вещества в ней до 20 км/с.
- На высоте ≈ 5000 км наблюдается примерно 10^4 спикул над всей солнечной поверхностью, и они занимают 0.5 % всей ее площади.
- <https://youtu.be/BQAtBNnt3es>



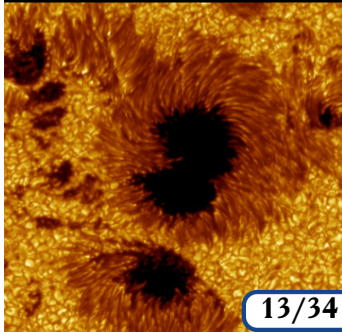
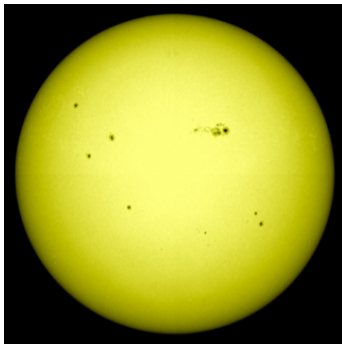
Video: Scientists Uncover Origins of Dynamic Jets on Sun's Surface

<https://www.youtube.com/watch?v=BQAtBNNt3es>

Солнечные пятна

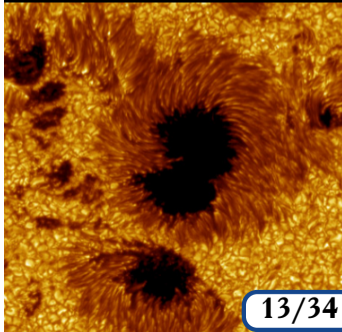
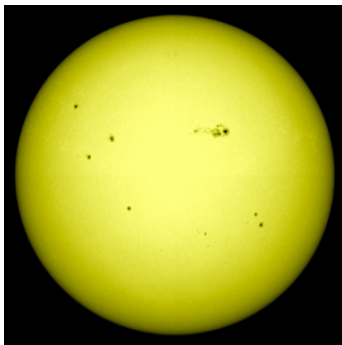
Солнечные пятна

- Часто в областях, располагающихся в зоне $\pm 30^\circ$ от экватора, кроме спокойной грануляционной картины наблюдаются солнечные пятна и факелы.
- Телескоп позволяет различать темный овал (так называемую тень пятна), окруженный более светлой полутенью.
- Характерный размер развитого пятна составляет ~ 35000 км.
- Диаметр тени примерно вдвое меньше.
- Близ тени появляются отдельные яркие участки, которые в виде узких струй (диаметр $D \approx 700$ км) растекаются к периферии пятна.
- Они образуют характерную волокнистую структуру полутени.



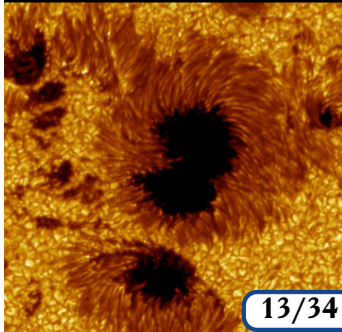
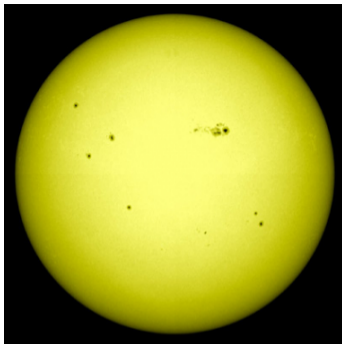
Солнечные пятна

- Время жизни отдельных волокон $\approx 30 \div 60$ мин.
- В самой тени пятна также наблюдаются слабоконтрастные флуктуации яркости – очень маленькие светлые точки ($D \approx 350$ км), живущие 15–30 мин.
- Их отождествляют с «остаточной» грануляцией в условиях сильного магнитного поля тени пятна.
- Поток лучистой энергии в тени пятна ослаблен примерно в 3 раза, что является следствием понижения температуры от 6000 до 4500 °К.
- Это понижение температуры отражается и на спектре пятен, ибо там усилены спектральные линии более низкого возбуждения, молекулярные полосы.



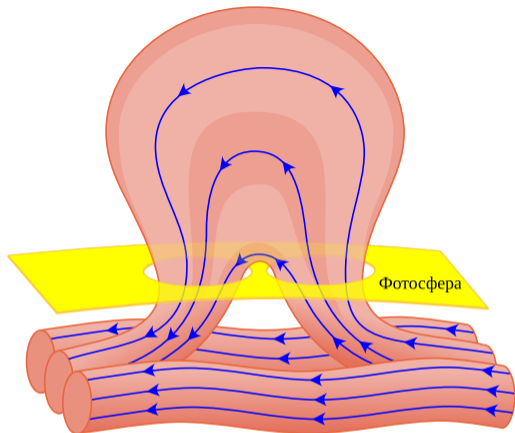
Солнечные пятна

- Магнитное поле в центре тени пятна достигает напряженностей примерно 2800 – 3000 Гс и в основном направлено радиально (вдоль оси пятна).
- С удалением от центра пятна силовые линии быстро расходятся. Уже в полутени силовые линии направлены преимущественно трансверсально, и наклон к вертикали превышает 70° .
- Такое быстрое расхождение может указывать на то, что пятна – не глубокие образования. Оценки по величине и расхождению магнитного поля дали значение залегания основания пятна не более чем 15000 км.



Образование солнечных пятен

- Пятна возникают в результате возмущений отдельных участков магнитного поля Солнца.
- В начале этого процесса трубки магнитного поля «прорываются» сквозь фотосферу в область короны, и сильное поле подавляет конвективное движение плазмы в гранулах, препятствуя в этих местах переносу энергии из внутренних областей наружу.

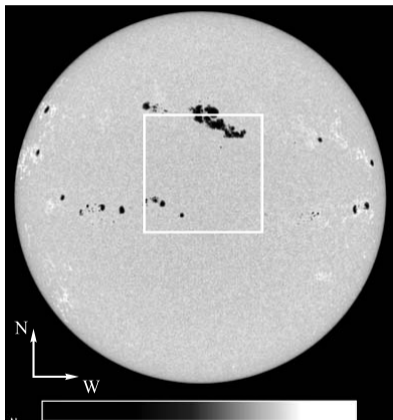


Линии магнитного поля

- Сначала в этом месте возникает факел, чуть позже и западнее – маленькая точка (пора), размером несколько тысяч километров.
- В течение нескольких часов величина магнитной индукции растет, размер и количество пор увеличивается.
- Они сливаются друг с другом и формируют одно или несколько пятен.

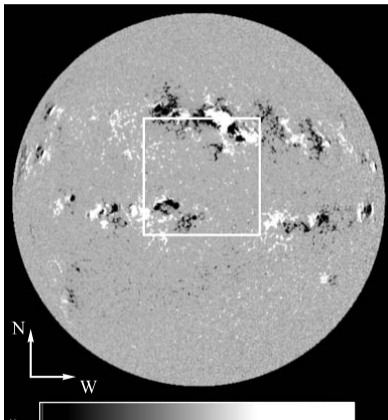
Активная зона

SOHO/MDI Continuum
29 Mar. 2001. 01:36



a

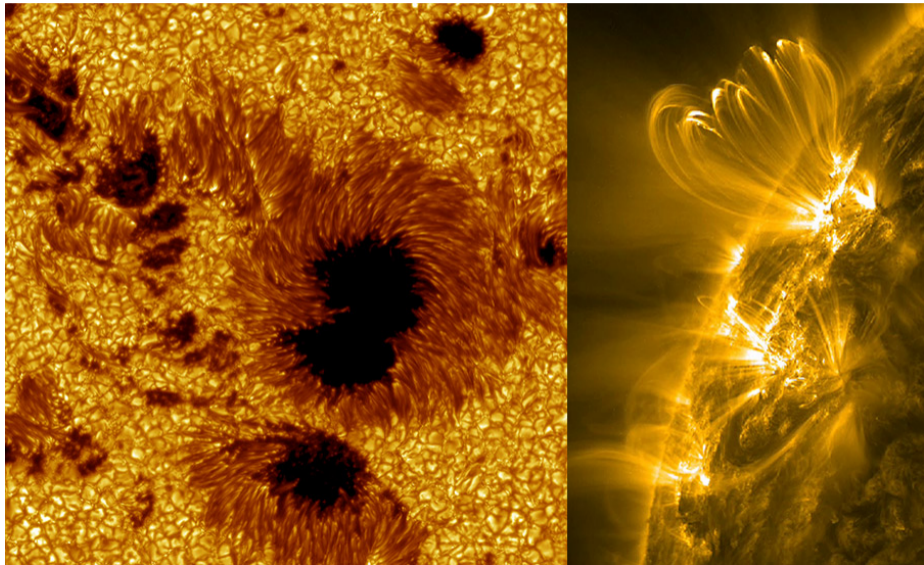
SOHO/MDI Continuum
29 Mar. 2001. 09:36



б

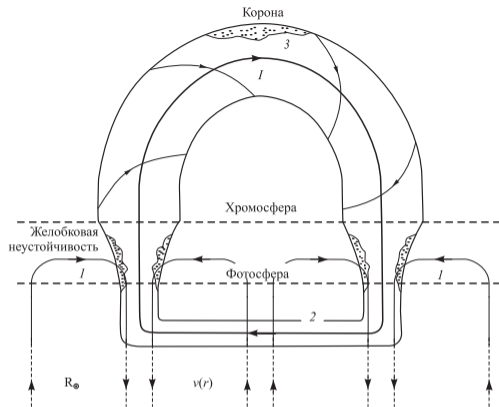
Пятна (а) и магнитные поля (б) по наблюдениям на SOHO.

Активная зона



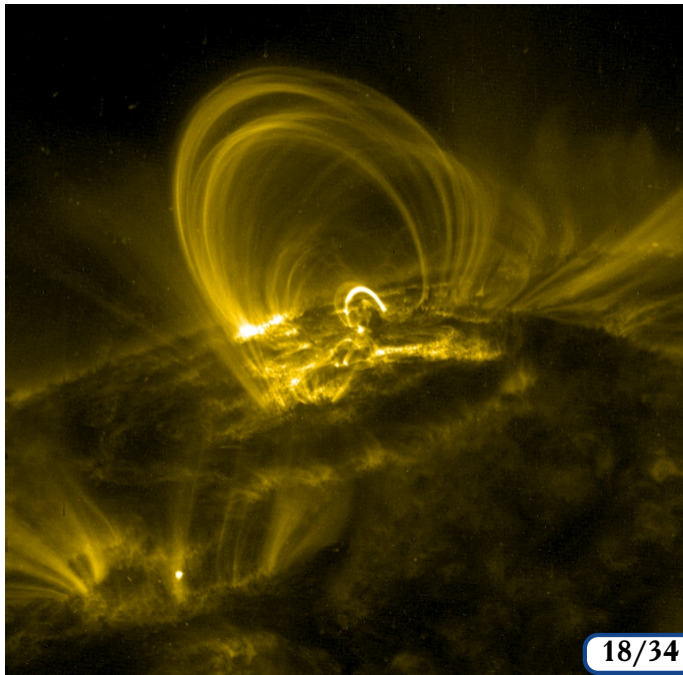
Корональные петли

- Корональные петли – это огромные петли магнитного поля, начинающиеся и заканчивающиеся на видимой поверхности Солнца (фотосфере), выступающие в солнечную атмосферу (корону).
- Горячий светящаяся плазма, попавшая в петли, делает их видимыми.
- Корональные петли широко варьируются в размерах до нескольких тысяч километров.



- Две «точки опоры», где петля проходит через поверхность солнца, часто являются солнечными пятнами, поскольку пятна появляются в областях с сильным магнитным полем.
- Сильное магнитное поле, где петля проходит через поверхность, создает барьер для конвекционных потоков, которые переносят горячую плазму изнутри на поверхность Солнца, поэтому плазма в этих областях с сильным полем холоднее, чем остальная поверхность Солнца, и выглядит как темное пятно.

Корональные петли



<https://youtu.be/HFT7ATLQQx8>

Video: NASA Fiery Looping Rain on the Sun

<https://www.youtube.com/watch?v=HFT7ATLQQx8>

Солнечные циклы

Цикл солнечных пятен

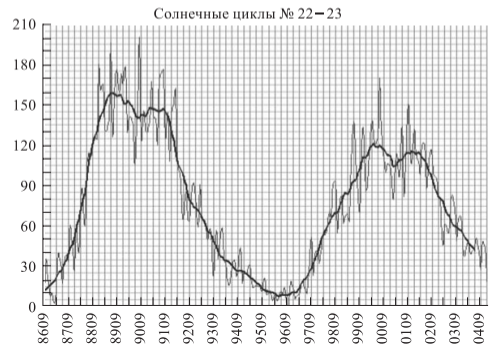
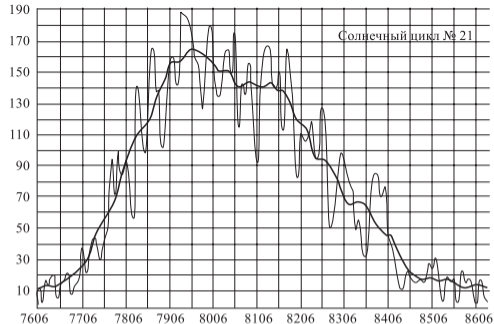
- Первооткрывателем цикла солнечных пятен был астроном-любитель аптекарь **Генрих Швабе** из Дессау в Германии.
- Надеясь открыть планету, более близкую к Солнцу, чем Меркурий, он в течение 25 лет упорно регистрировал все пятна.
- Через 17 лет в 1843 г. он объявил о том, что в числе пятен наблюдается **10-летний цикл**, на что, как это часто бывает, никто не обратил внимания.
- Только в 1851 г., когда его убедительные таблицы были опубликованы А. Гумбольдтом в третьем томе фундаментального труда «Космос», открытие было признано.
- Регулярные научные наблюдения были начаты Рудольфом Вольфом в 1848 г. в Берне, а затем в Цюрихе.
- В качестве меры пятнообразовательной деятельности он ввел относительное число солнечных пятен (**Wolf sunspot number**)

$$W = k(10G + n)$$

Здесь G – число групп солнечных пятен, n – полное число пятен, k – калибровочный коэффициент для приведения наблюдений различных обсерваторий к единой системе.

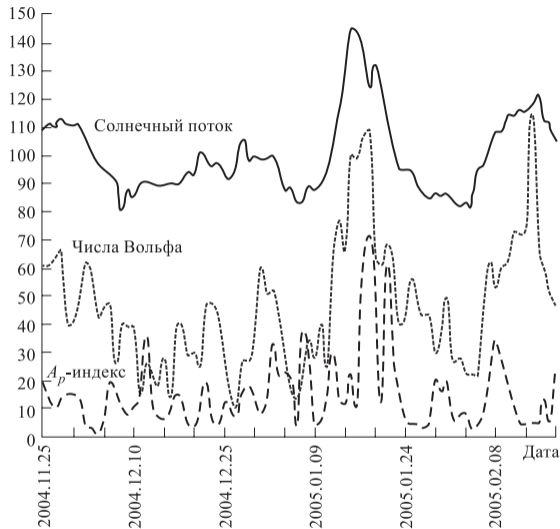
Числа Вольфа

- Средний период изменения числа солнечных пятен, часто отождествляемый с периодом солнечной активности вообще, составляет 11.1 лет.
- На самом деле этот «период» изменяется в довольно широких пределах, были циклы несколько длиннее или короче 11 лет, в XX в. средний период составил 10.4 г.
- Если посмотреть на среднемесячные значения, то видно, что имеют место квазипериодические вариации солнечной активности и на более коротком, чем 11 лет, временном интервале.
- Различные исследователи выделяли вариации с характерным временем 2-3 г., 1.1–1.3 г. и 160 дней.



Числа Вольфа

- Поскольку синодический период вращения Солнца (период вращения по наблюдениям с Земли) составляет 27.3 дня, а время существования крупной активной области — от нескольких недель до нескольких месяцев, имеет место так называемая 27-дневная повторяемость солнечной активности.
- 27-дневную повторяемость можно увидеть в повторении двух мощных максимумов чисел Вольфа в середине января и середине февраля.
- Однако легко видеть, что эта повторяемость неустойчива, крупный центр может возникнуть и исчезнуть, нарушая эту повторяемость.
- Кроме того видно, что геомагнитная возмущенность, конечно, связана с солнечной активностью, однако связь эта не всегда однозначная.

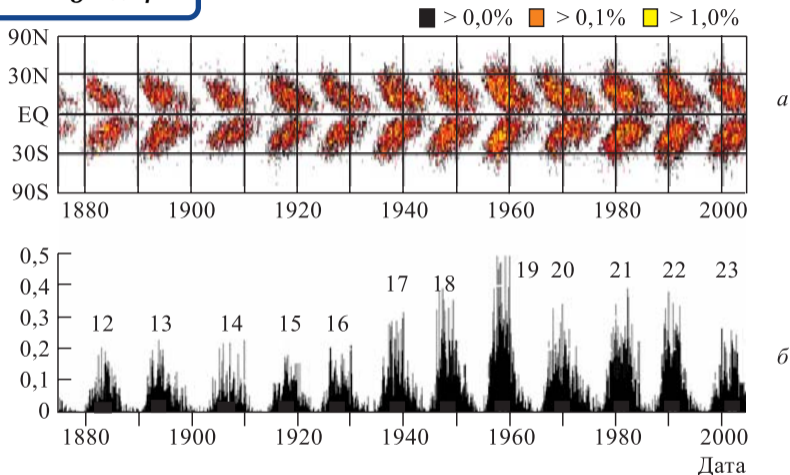


Планетарный A_p -индекс, характеризует возмущенность магнитного поля Земли.

Основные закономерности цикла

- Пятна нового цикла возникают за несколько лет до минимума на относительно высоких широтах $\sim 35 - 40^\circ$.
- С течением времени зона пятнообразования перемещается на все более низкие широты, приближаясь к экватору.
- Но в непосредственной близости к экватору в пределах $\pm 5^\circ$ пятна появляются редко.
- Этот закон часто называют законом Шперера, график зависимости положения пятен от времени и широты – диаграммой бабочек Маундера.
- Картина полярности пятен в каждом следующем цикле изменяется по отношению к предыдущему на обратную.
- Это естественным образом указывает на то, что в физическом смысле основным является не 11-летний, а 22-летний цикл.
- Вблизи максимума циклов часто наблюдается локальный минимум, иногда его называют провалом Гневышева (Gnevyshev gap).
- Сам М. Н. Гневышев, если быть точным, чаще говорил не о «провале», а о двухвершинной форме максимума цикла: первый максимум он связывал с возрастанием числа активных событий, а второй — с увеличением их средней мощности.

Бабочки Маундера

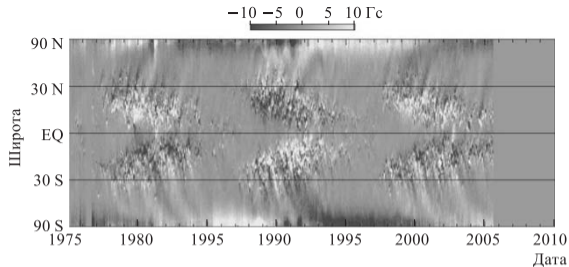


Первые пятна нового цикла появляются задолго до минимума, т. е. раньше, чем исчезают пятна предыдущего цикла. Циклы как бы существуют одновременно, но на разных широтах.

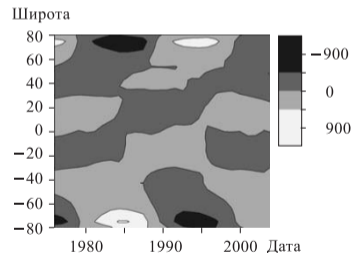
Это дало основание предположить, что истинная длина цикла не 11, а 15–17 лет.

Глобальное магнитное поле

- Крупномасштабное магнитное поле также изменяется с 11-летним циклом.
- Строго говоря, под крупномасштабным магнитным полем следует понимать все поля за пределами активных областей.
- В этом смысле они распространены по всей поверхности Солнца и не ограничиваются каким-либо поясом широт.
- В отличие от локальных полей, с течением времени они дрейфуют к полюсам.
- Полярное поле (или дипольная составляющая крупномасштабного поля) изменяет свой знак в максимуме цикла локальных полей.
- Смена знака крупномасштабного поля на разных широтах происходит в различные моменты времени.



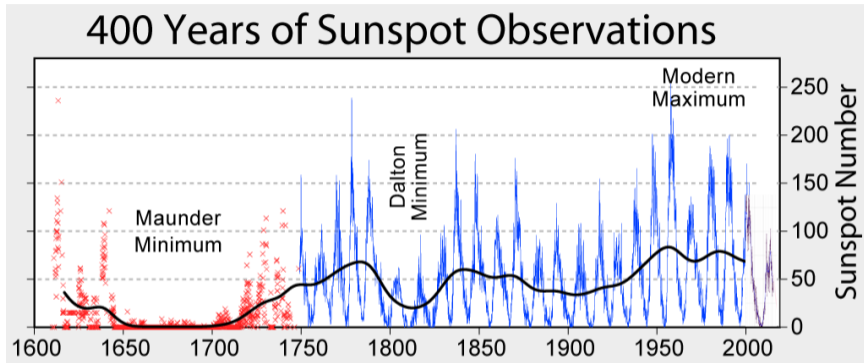
а



б

Осредненные по долготе значения магнитного поля, измеренные вдоль луча зрения (а); рассчитанная радиальная компонента магнитного поля (б)

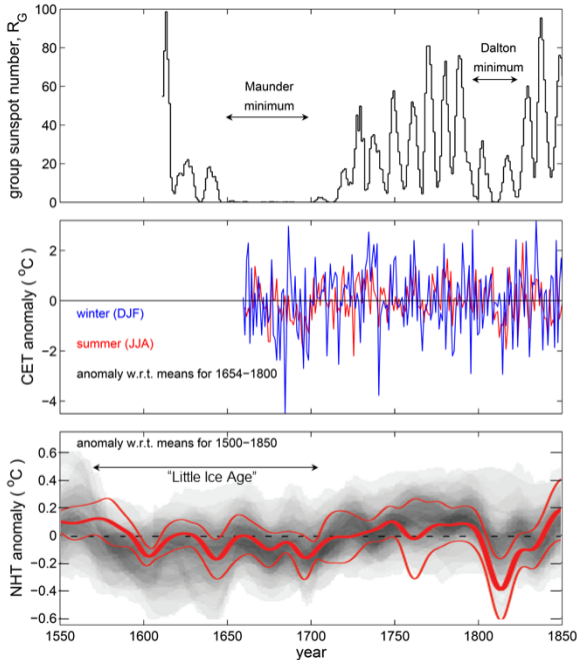
Минимум Маундера



- Период долговременного уменьшения количества солнечных пятен примерно с 1645 по 1715 годы.
- Получил название по имени английского астронома Эдварда Уолтера Маундера (1851—1928), обнаружившего это явление при изучении архивов наблюдения Солнца.
- Минимум Маундера совпадает по времени с наиболее холодной фазой глобального похолодания климата, отмечавшегося в течение XIV—XIX веков (так называемый малый ледниковый период) и периодом правления «короля-Солнца» Людовика XIV (1643—1715).

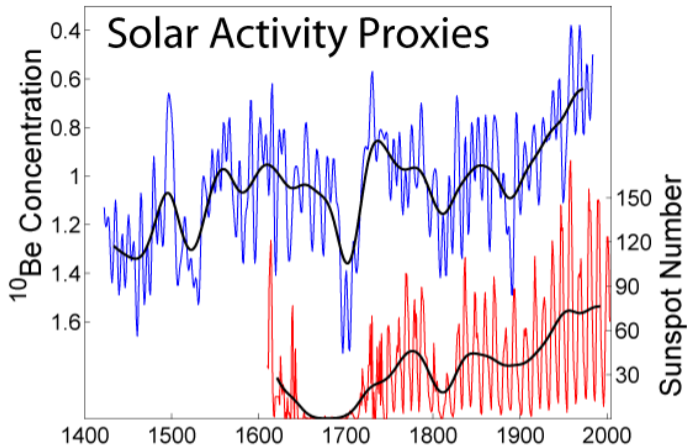
Минимум Маундера

- Сравнение числа пятен (вверху), наблюдений за температурой в Центральной Англии (CET) (в центре) и реконструкций и моделирования температур в северном полушарии (NHT).
- Красная линия в CET - это среднее за летние месяцы, а синяя - за зимние.
- NHT в сером цвете - это распределение из реконструкций палеоклимата (более темный серый показывает более высокие значения вероятности), а красные линии - из модельных симуляций, которые учитывают солнечные и вулканические изменения.



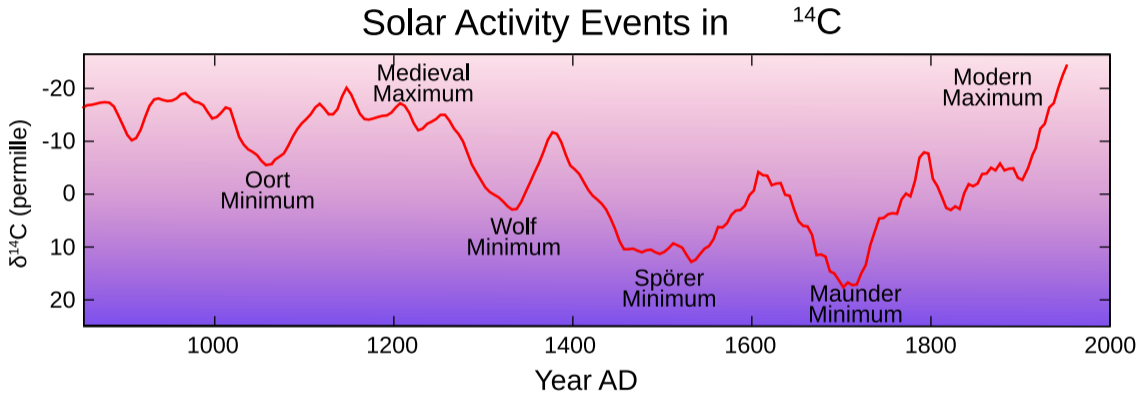
Минимум Маундера

- По подсчётам Маундера, за этот период наблюдалось всего около 50 солнечных пятен вместо обычных 40-50 тысяч.
- При этом подавляющее большинство пятен возникало в южном полушарии Солнца.



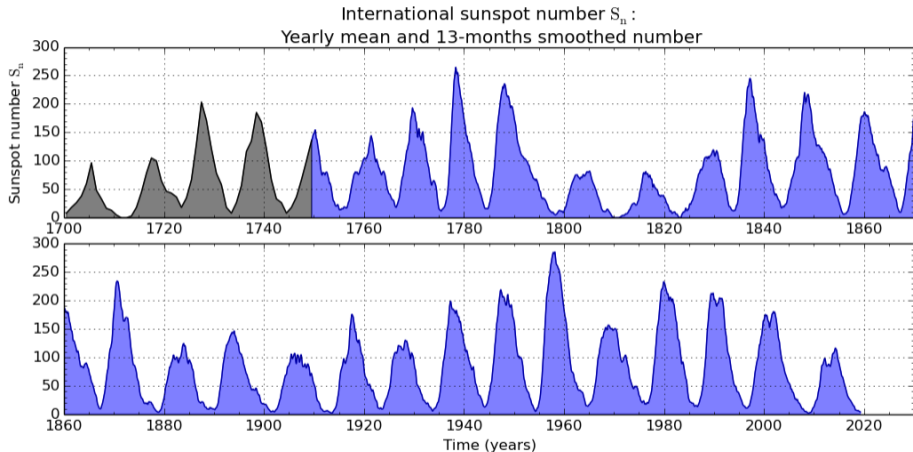
- В дальнейшем падение солнечной активности в указанный Маундером период было подтверждено анализом содержания углерода-14, а также некоторых других изотопов, например бериллия-10, в ледниках и деревьях.

Циклы солнечной активности



- Такой анализ позволил выявить 18 минимумов активности Солнца за последние 8000 лет, включая минимум Шпёра (1450—1540) и минимум Дальтона (1790—1820).
- Также, по некоторым данным, во время Маундеровского минимума наблюдалось падение интенсивности полярных сияний и скорости вращения Солнца.

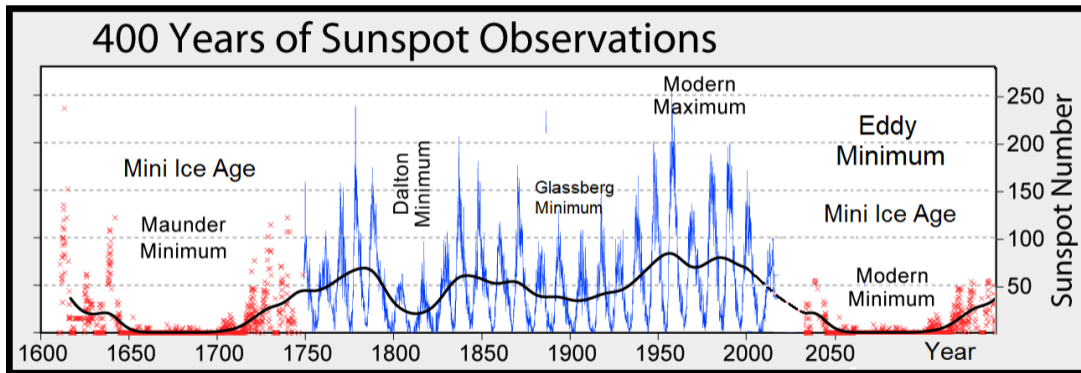
Циклы солнечной активности



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

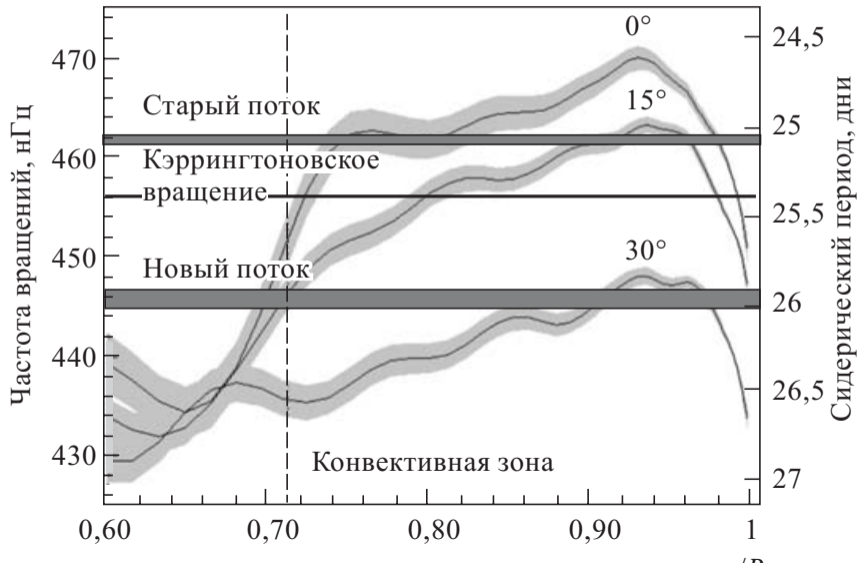
- Есть мнение, что в настоящий момент Солнце «засыпает» и следует ожидать глобальное похолодание.

Современный минимум



Солнечное динамо

Дифференциальное вращение Солнца



Солнечное динамо

- Динамо преобразует кинетическую энергию в электромагнитную.
- Так как проводимость солнечной плазмы достаточно высока, магнитные поля в конвективной зоне Солнца описываются магнитной гидродинамикой.
- Из-за того, что экваториальные области Солнца вращаются быстрее, чем полярные, изначально полоидальное поле, увлекаясь вращающейся плазмой, должно растягиваться вдоль параллелей, приобретая тем самым тороидальную компоненту.
- Однако для обеспечения замкнутого самоподдерживающегося процесса тороидальное поле должно каким-то образом снова преобразовываться в полоидальное.
- В 1955 году американский астрофизик Юджин Паркер показал, что поднимающиеся объёмы солнечной плазмы должны вращаться за счёт сил Кориолиса, и увлекаемые ими тороидальные магнитные поля могут преобразовываться в полоидальные (так называемый « α -эффект»).
- Солнце - это самоподдерживающееся динамо, которое преобразует конвективное движение и дифференциальное вращение внутри Солнца в электромагнитную энергию.

Солнечное динамо

(a) исходное полоидального поля. (b) и (c) – генерация тороидального поля с помощью дифференциального вращения - Ω -эффект. (d) и (e) – влияние циклонической турбулентности на прежние тороидальные поля, создавая мелкомасштабные вторичные полоидальные магнитные поля - α -эффект. Усредненные, они приводят к чистой электродвижущей силе, генерирующей новое крупномасштабное полоидальное поле (f), закрывая первую половину магнитного цикла новым полоидальным полем (g) с полярностью, противоположной исходной. (h) – начало механизма Бэбкока-Лейтона: тороидальные магнитные трубки плавно поднимаются к поверхности, образуя пятна, наклоненные биполярные области. В (i) поля из биполярных областей диффундируют и воссоединяются друг с другом и с полярными полями. Получающийся в результате полоидальный поток переносится меридиональной циркуляцией к полюсам (j), создавая конечное крупномасштабное полоидальное поле в (g).

