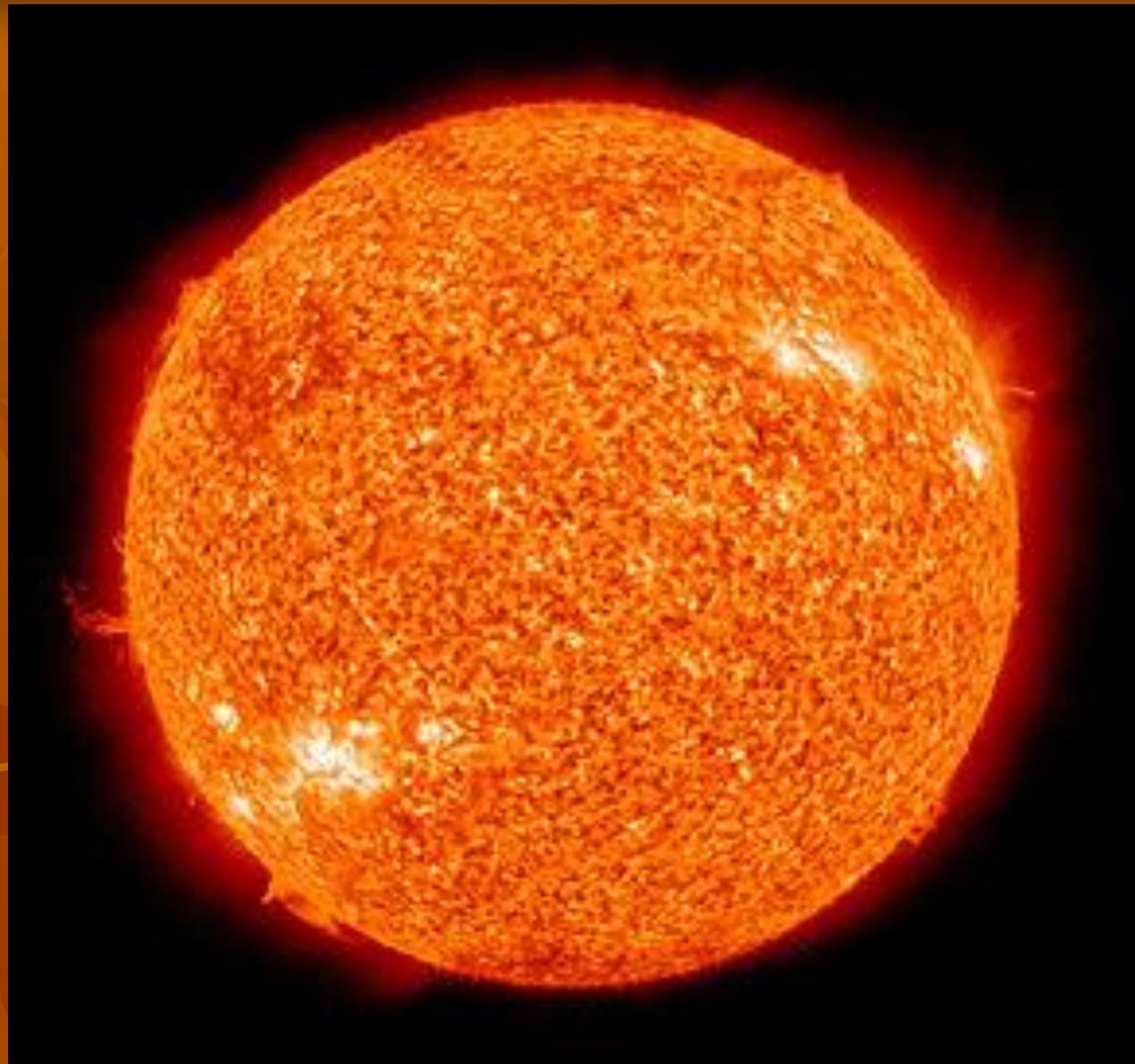
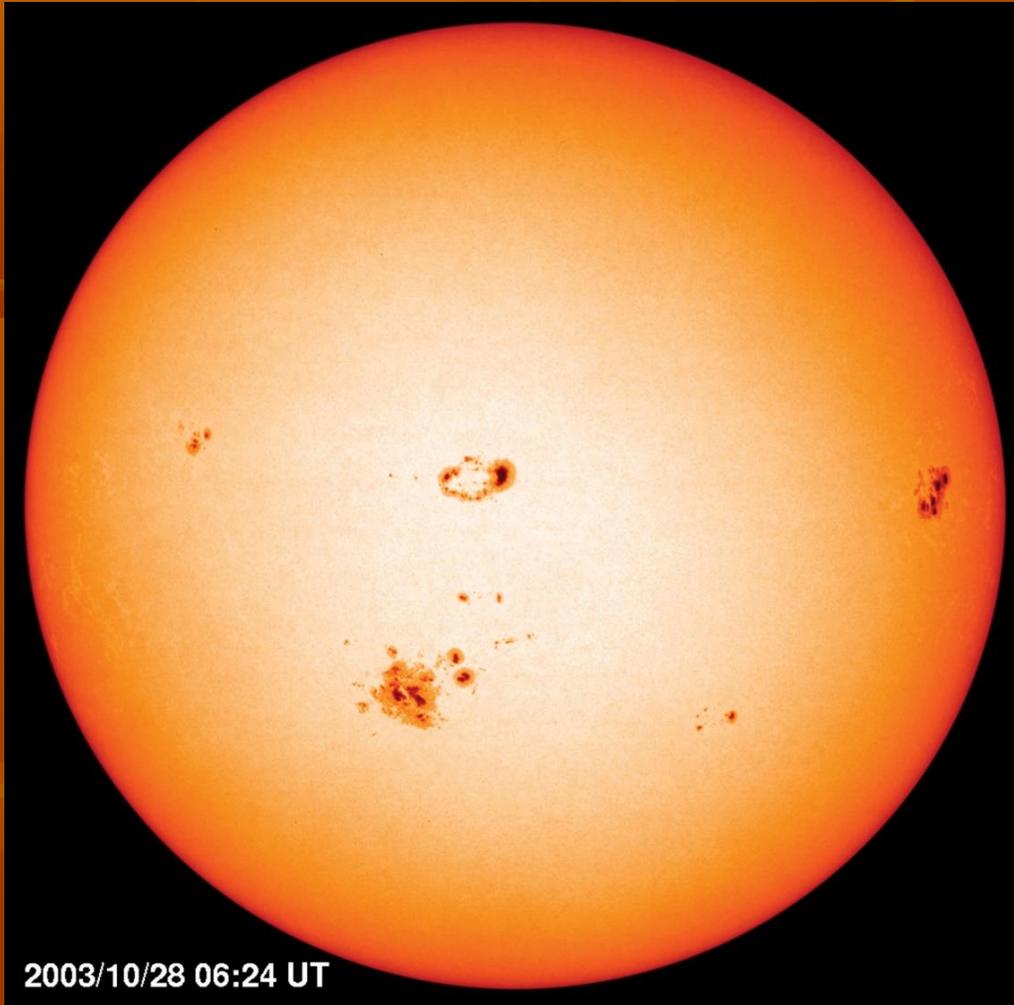


Солнце

Сергей Попов
(ГАИШ МГУ)

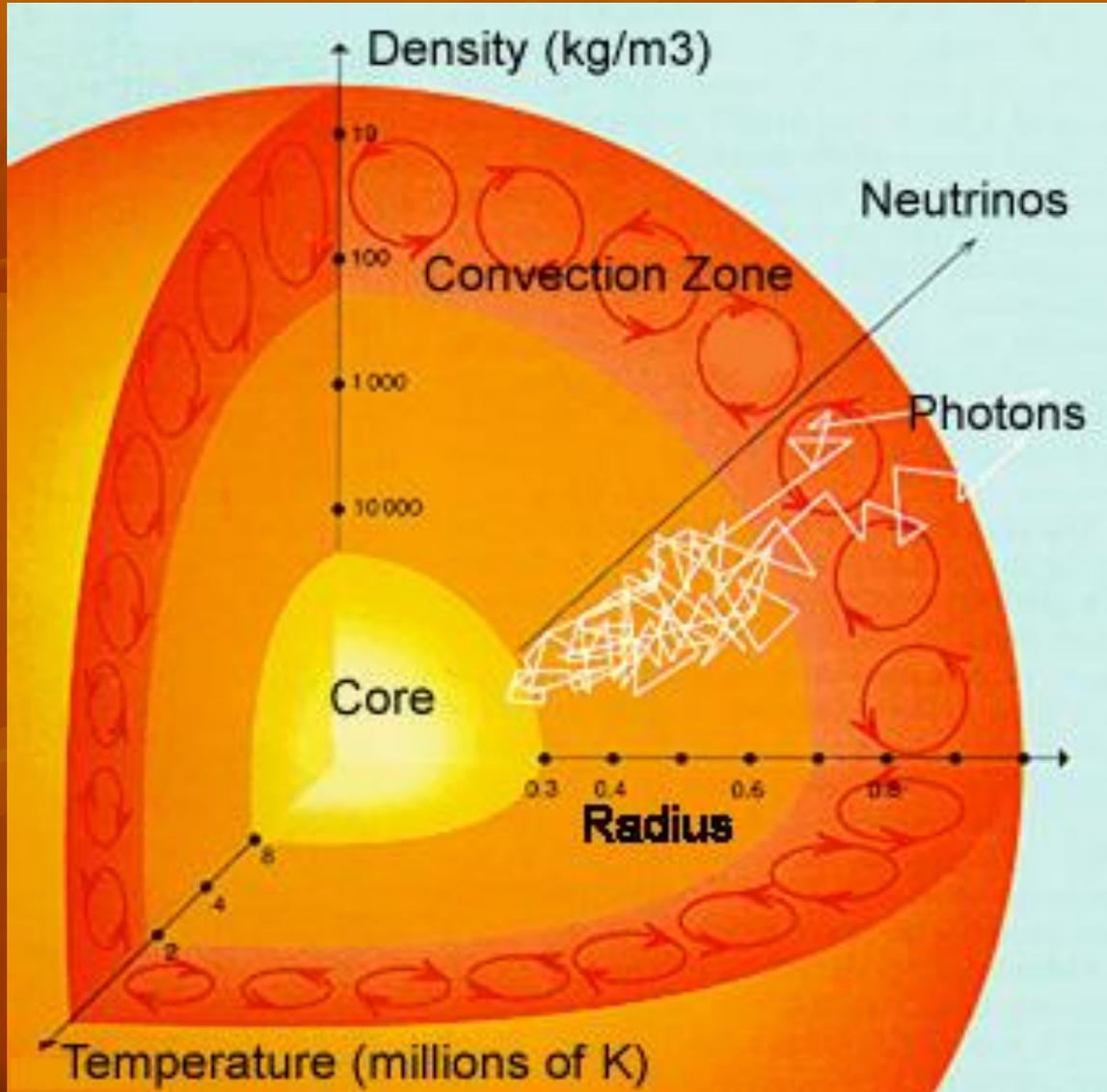


Основные параметры



Масса	$1.99 \cdot 10^{33}$ г
Светимость	$3.86 \cdot 10^{33}$ эрг/с
Радиус	690000 км
Средняя плотность	1.4 г/см ³
Плотность в центре	~ 100 г/см ³
Температура поверхности	6000К
Температура в центре	10^7 К
Период вращения	25-38 дней
Состав	70% водород 28% гелий
Возраст	$5 \cdot 10^9$ лет
Время жизни	$\sim 10^{10}$ лет

Строение Солнца

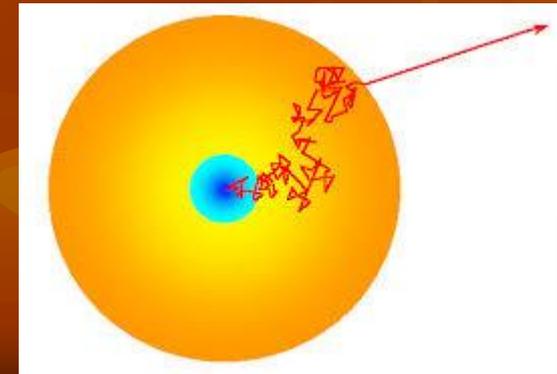


Ядро – термоядерное горение.

0.25-0.75 радиуса – зона лучистого переноса энергии

Внешняя часть – конвективная зона

Фотон, испущенный в недрах Солнца в результате реакции, после ряда перерождений будет испущен с поверхности через 170 000 лет!



Устойчивость Солнца

Солнце находится в состоянии гидростатического равновесия.

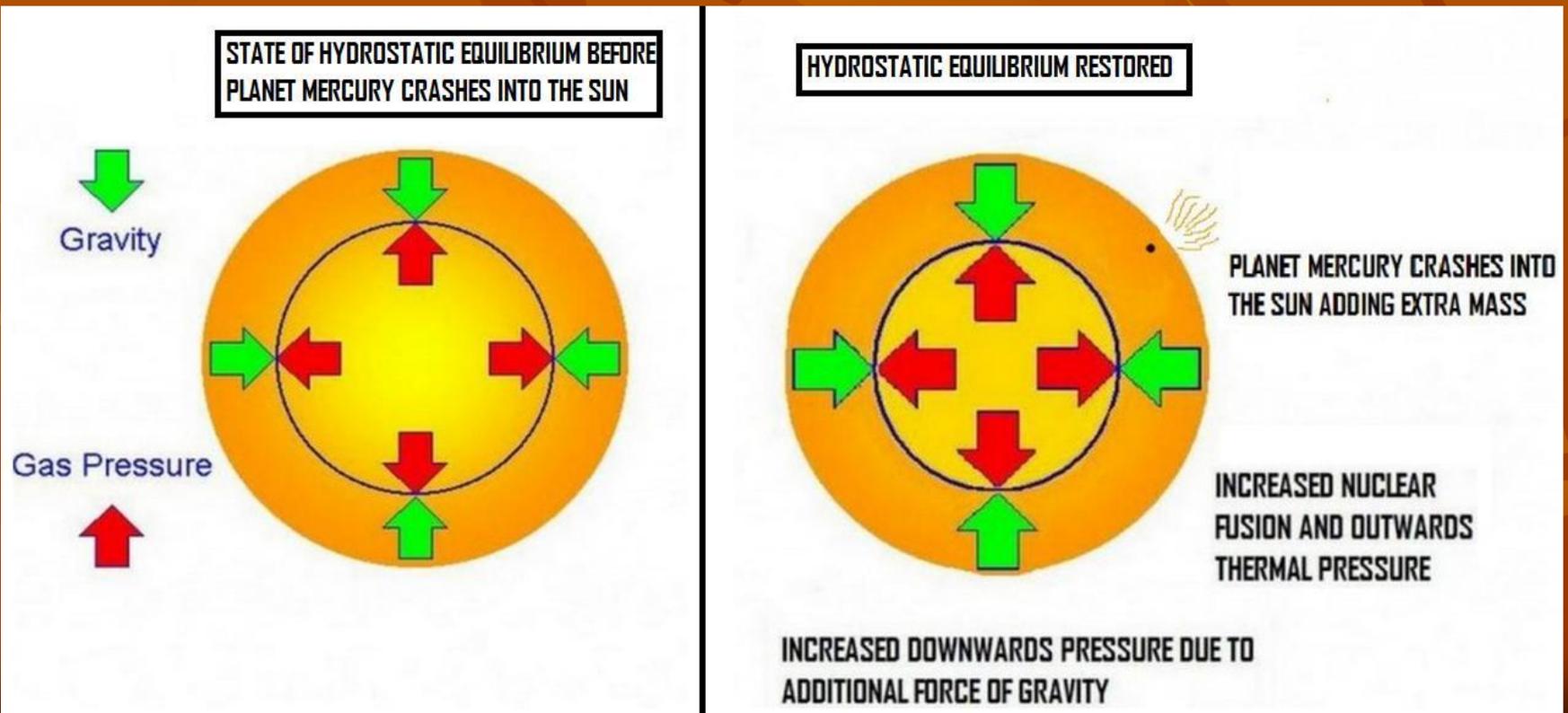
«Отрицательная теплоемкость».

При нагреве Солнца оно расширяется и остывает.

При охлаждении – сжимается и нагревается.

Это общее свойство систем в равновесии при участии гравитации.

Теорема вириала.

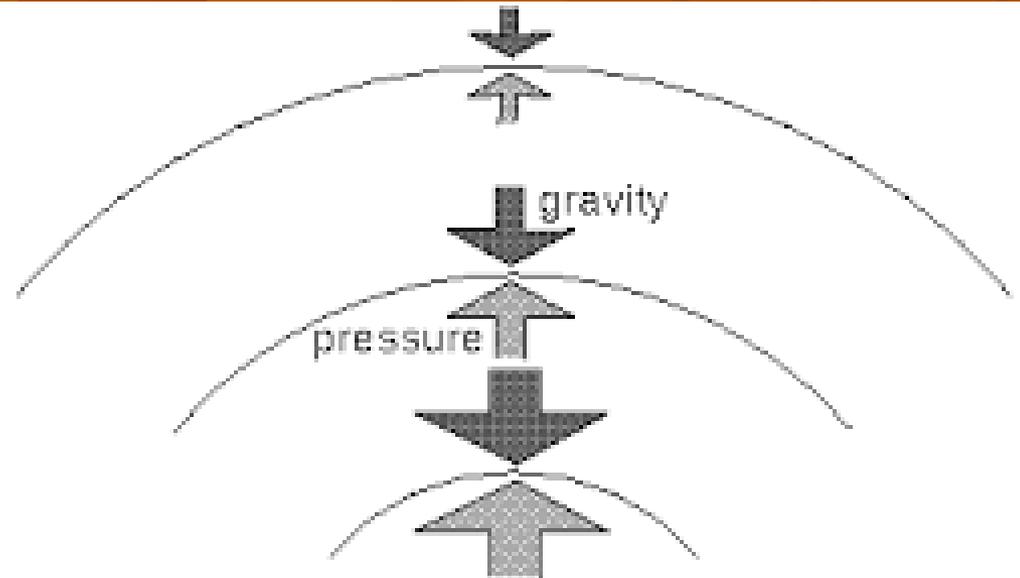


Гидростатическое равновесие

$$\frac{dP}{dr} = -\rho(r)g(r)$$

or,

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)\rho(r)}{r^2}$$

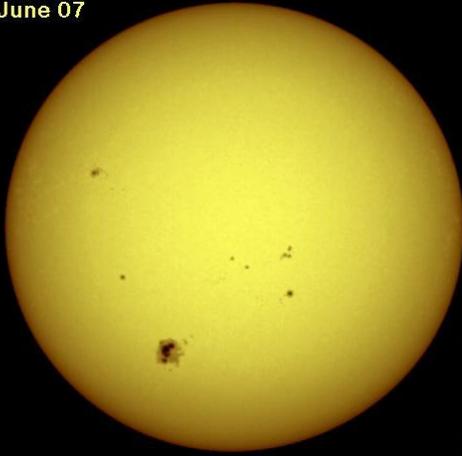


Deeper layers have more gravity compression, so they have greater outward pressure to compensate.

Устойчивость Солнца обеспечивается равновесием между гравитацией и градиентом давления.

Внешняя структура Солнца

1992 June 07



Фотосфера

Это, собственно, видимый диск



Хромосфера

0.0001 плотности фотосферы

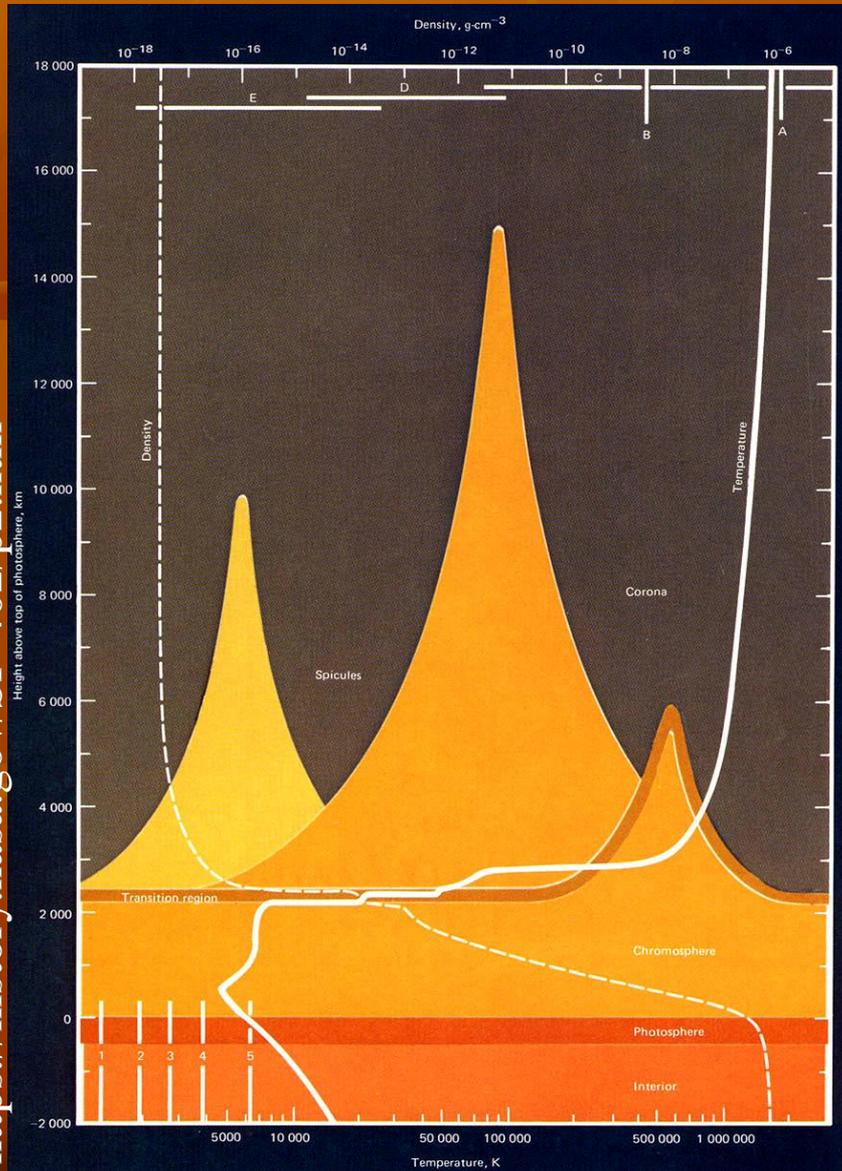
Корона

Разреженная, но
очень горячая.

Видна по время затмений.



Внешние слои: свойства

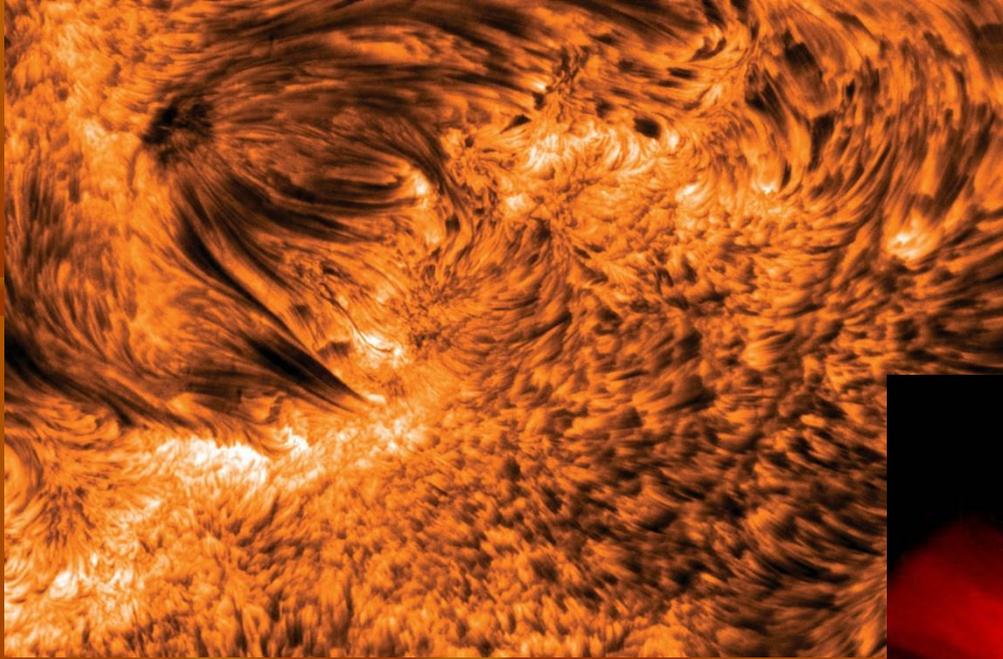


Фотосфера имеет толщину около 400 км.

Хромосфера простирается на 10000 км.
В ней температура в начале падает до $<4000\text{K}$,
но потом вырастает до $35000\text{-}50000\text{K}$.

Корона имеет размер порядка
нескольких миллионов километров.
Температура там - несколько млн. градусов.

Солнечные пятна



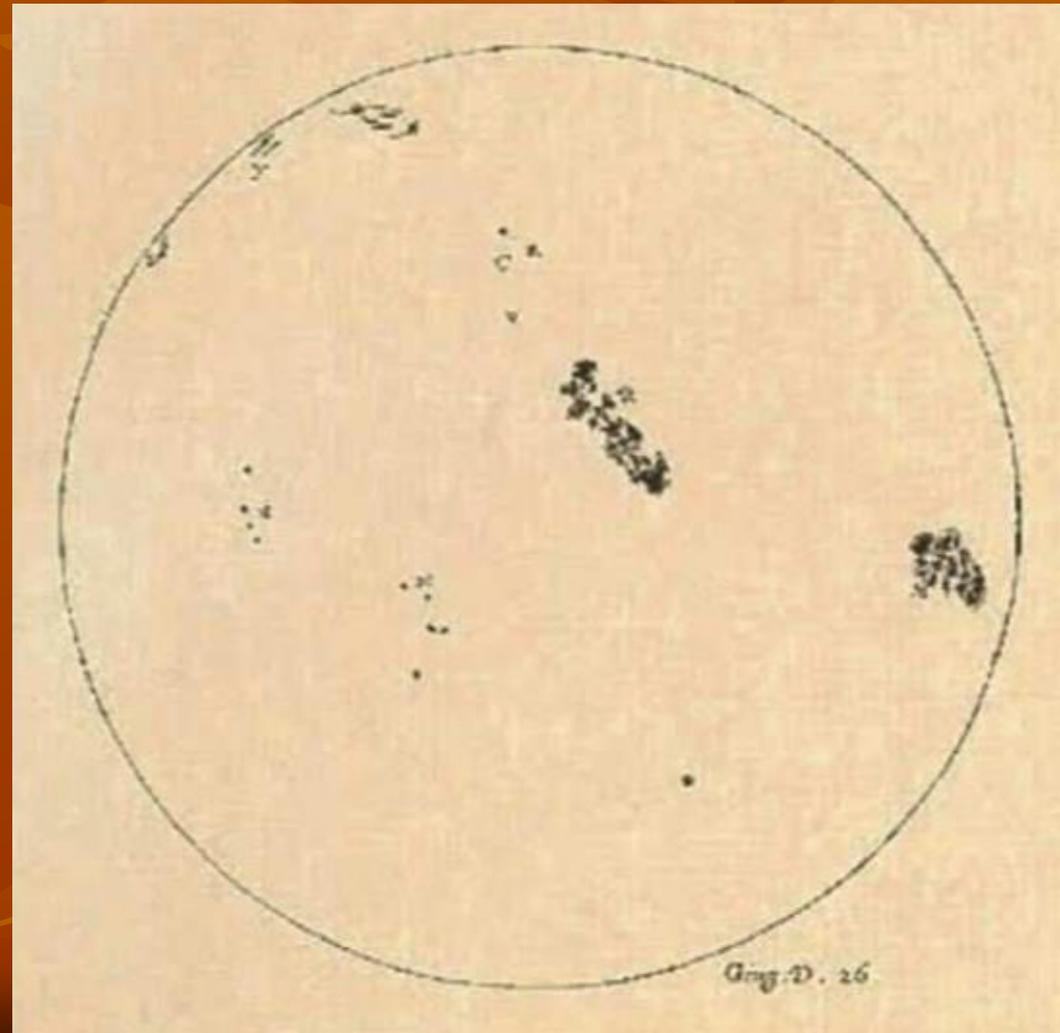
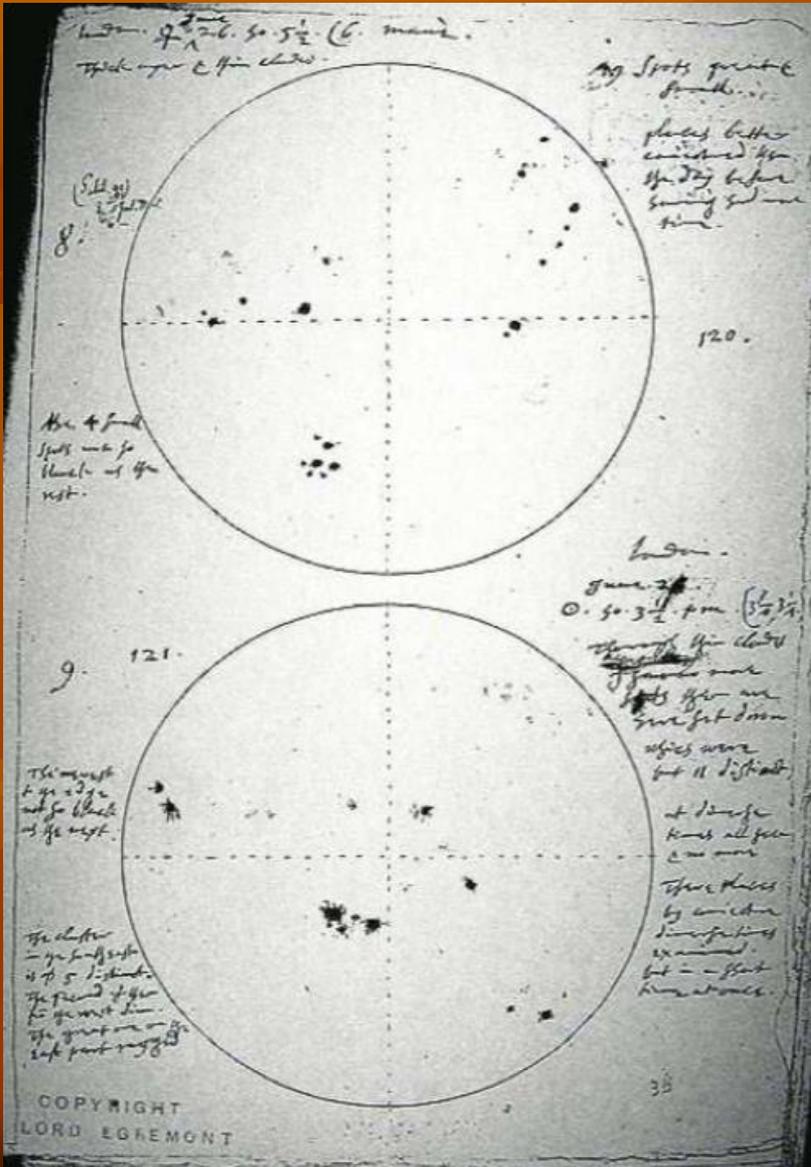
Температура пятен ниже – 4500К,
поэтому они кажутся темнее.

В области пятен подавлен подвод тепла.
Это связано с более сильным
магнитным полем.

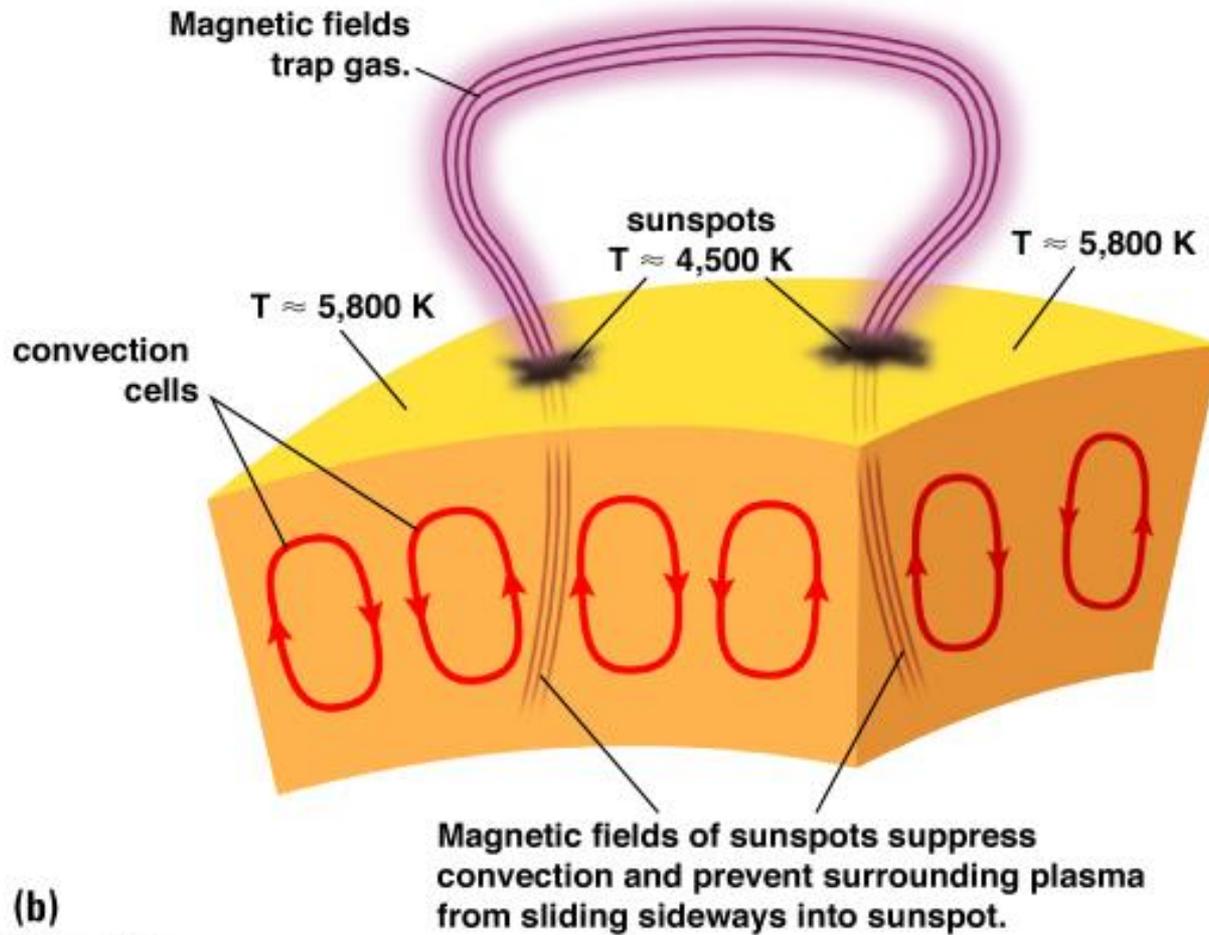


Открытие пятен

Томас Гарриот и Галилео Галилей в 1610 году

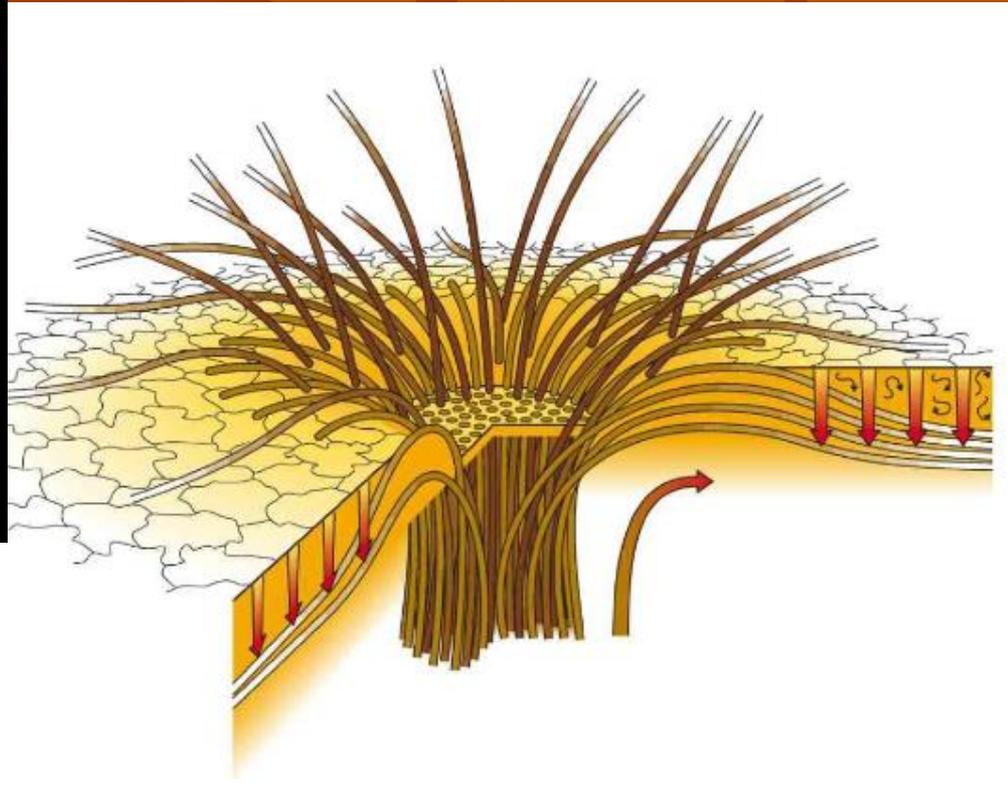
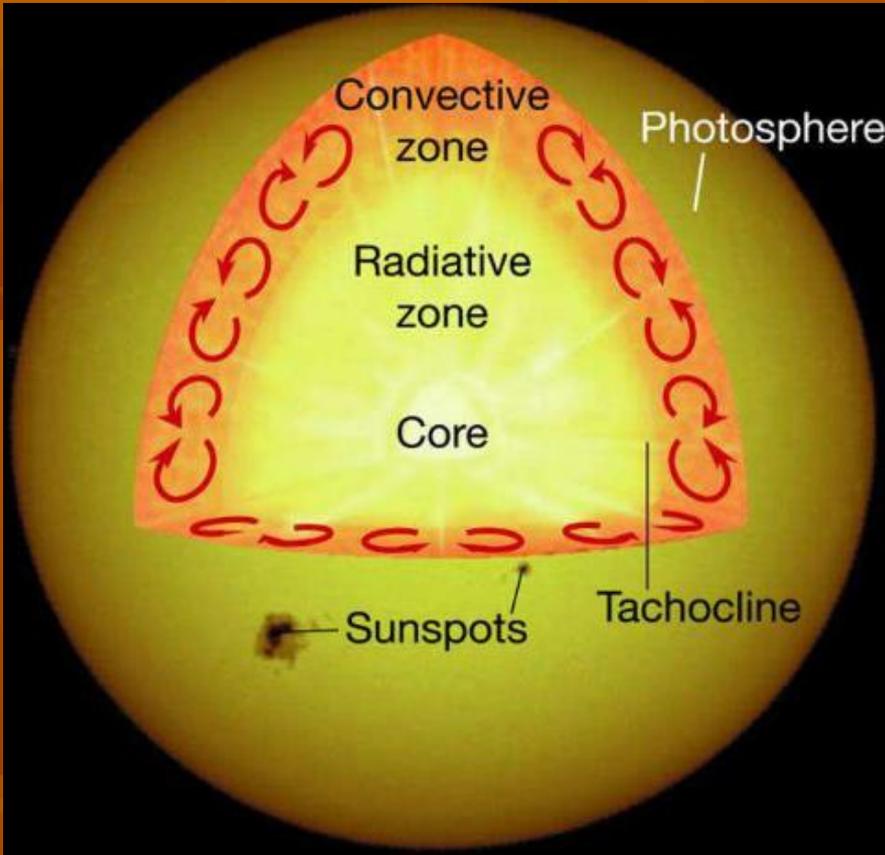


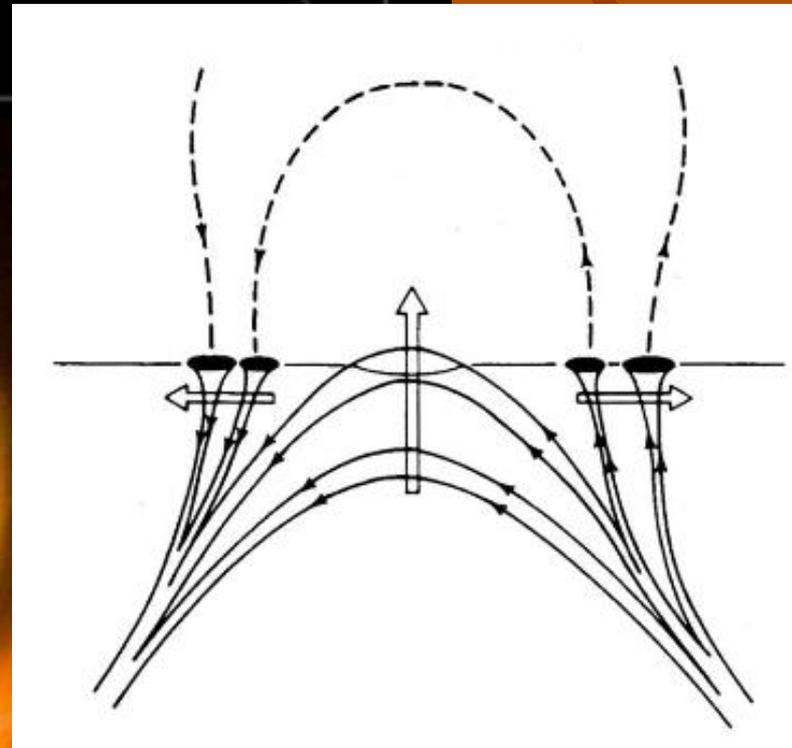
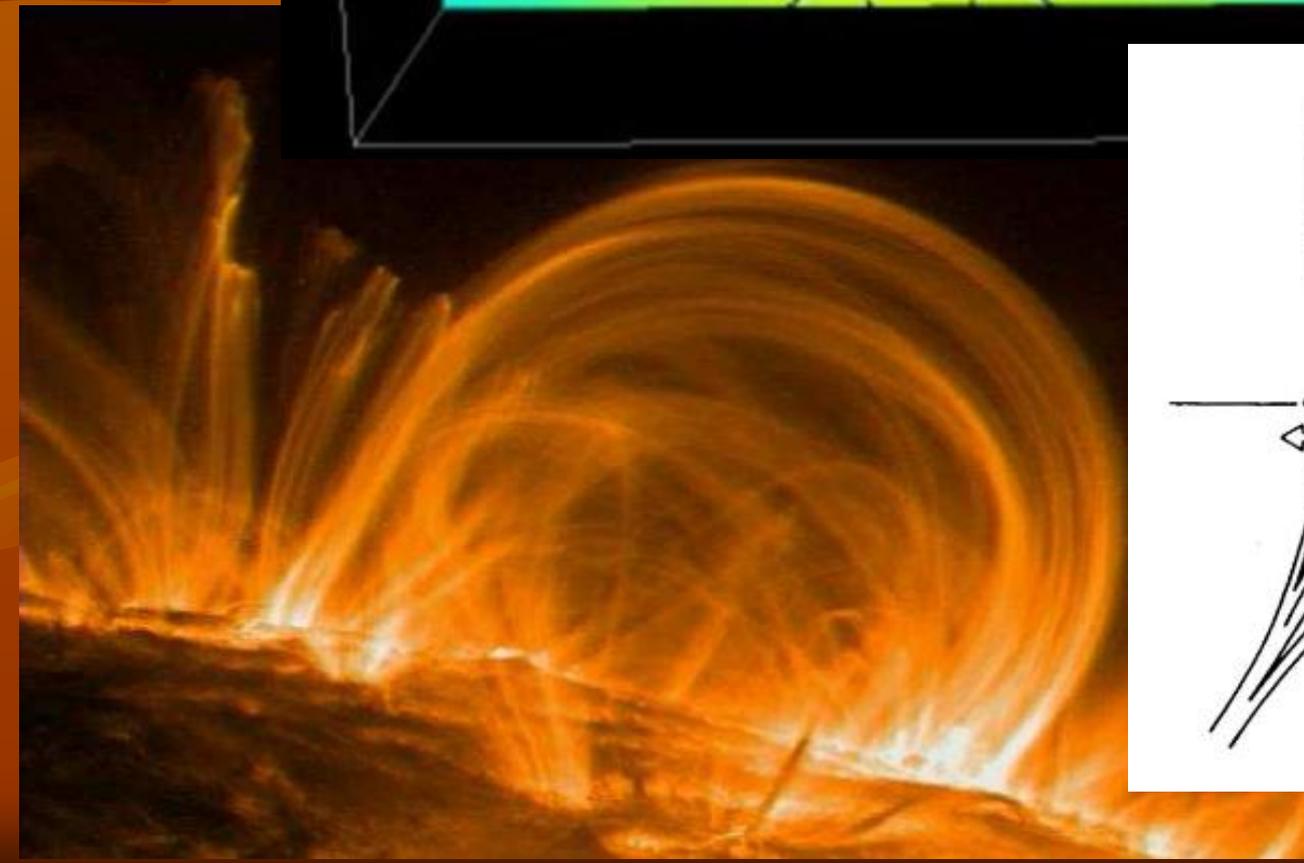
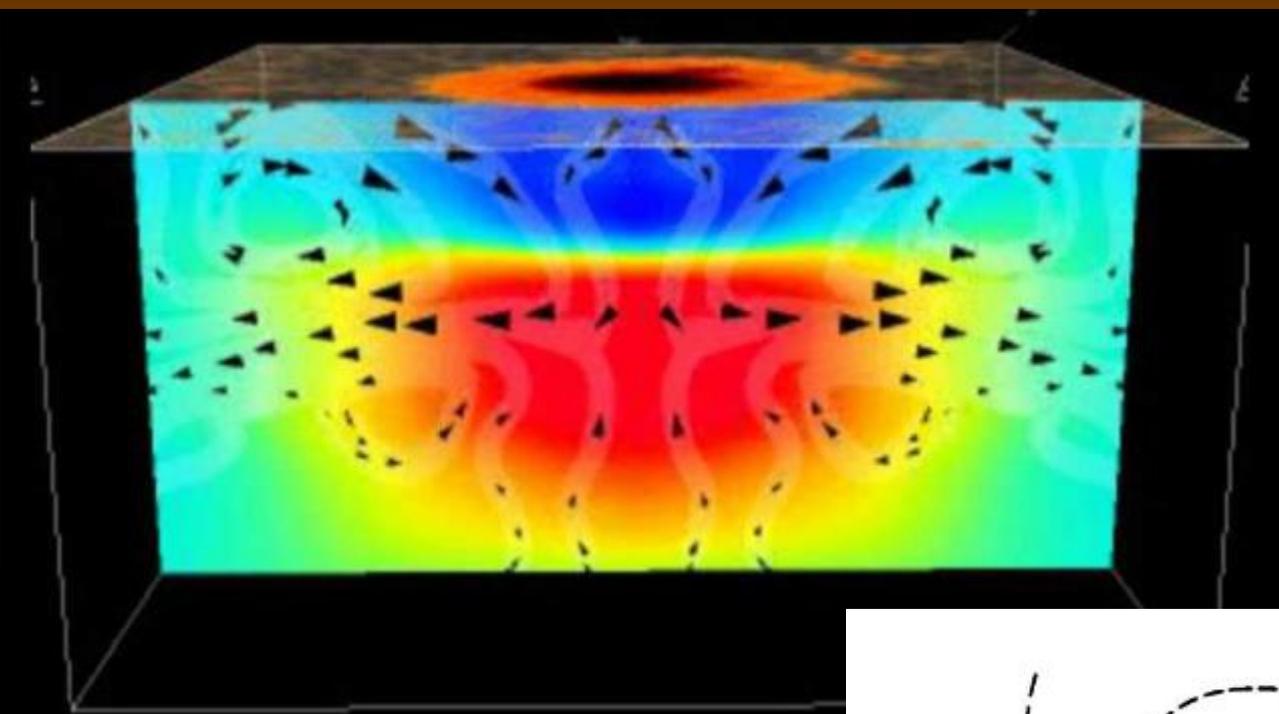
Пятна и магнитные поля



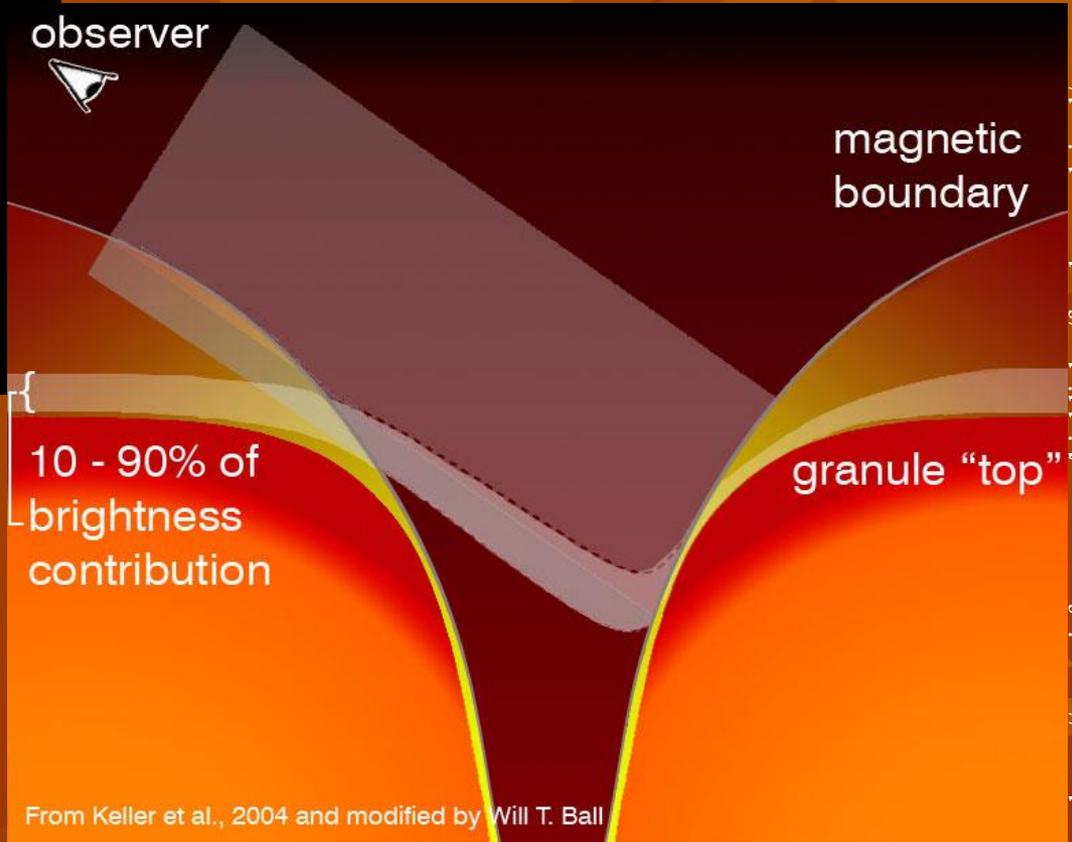
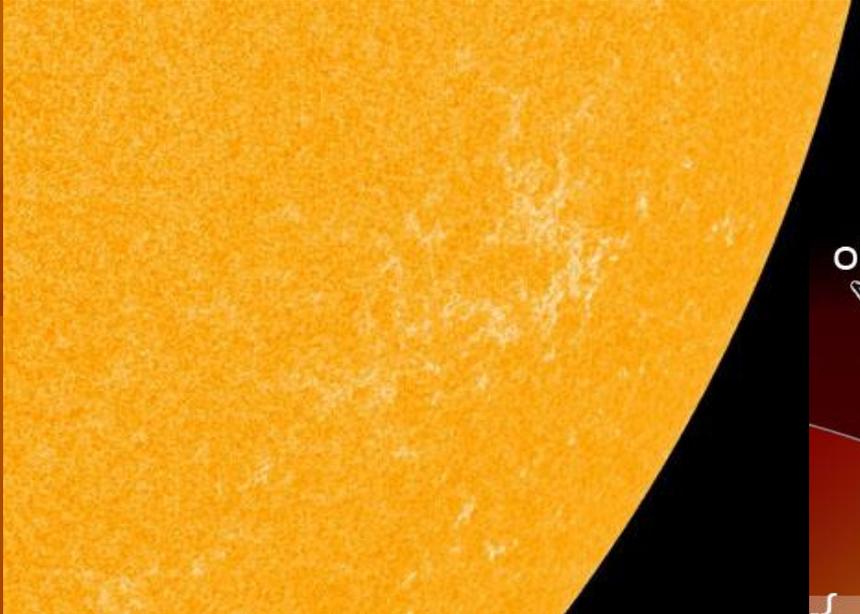
Сильные магнитные поля подавляют конвективный подвод тепла в области пятен.

Роль магнитных полей





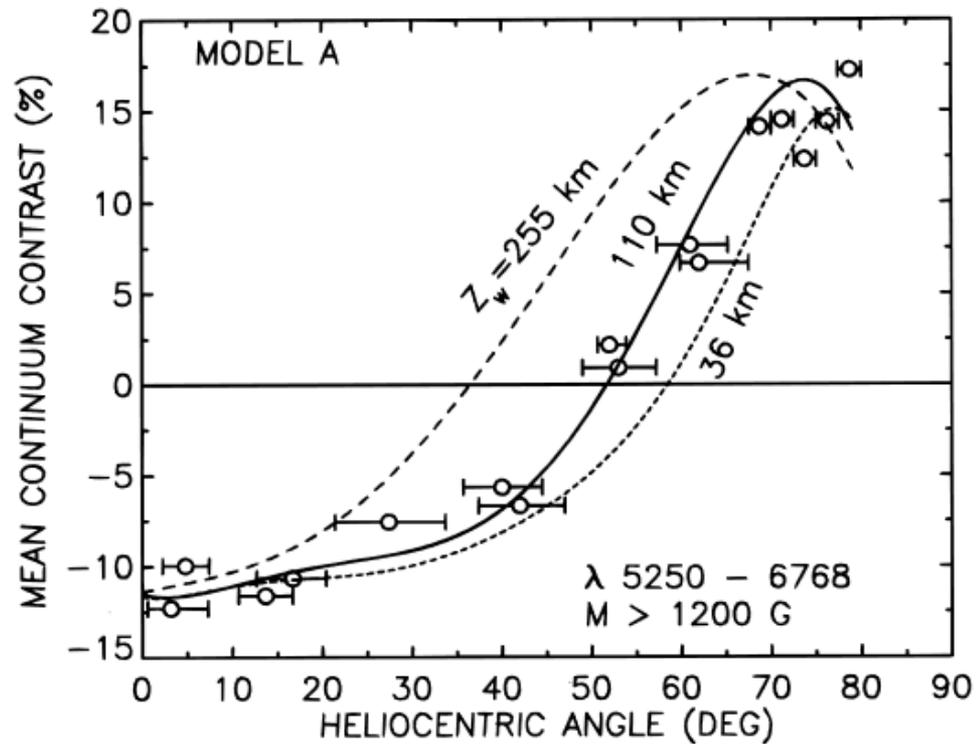
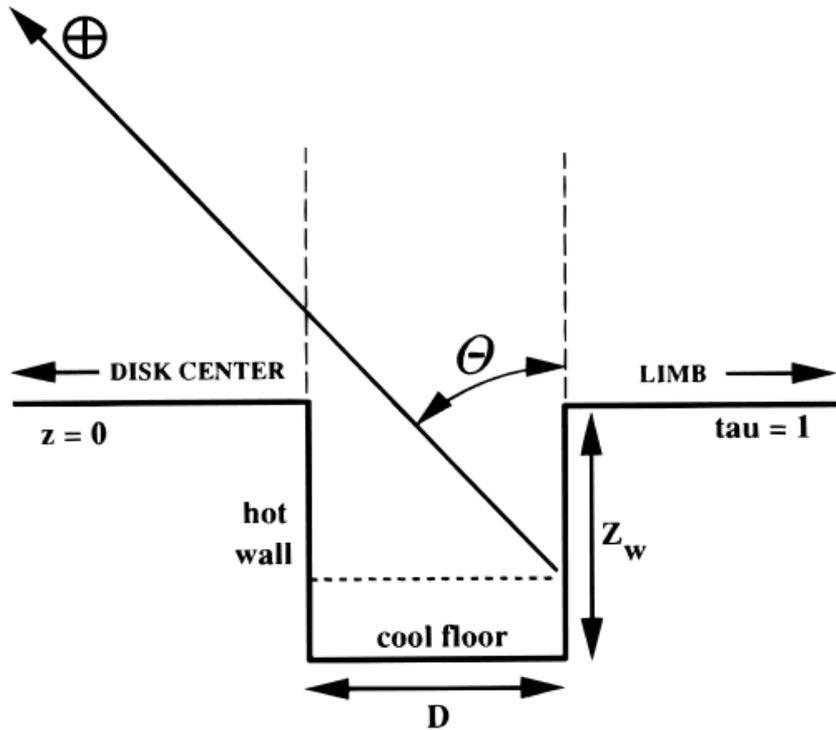
Факельные поля



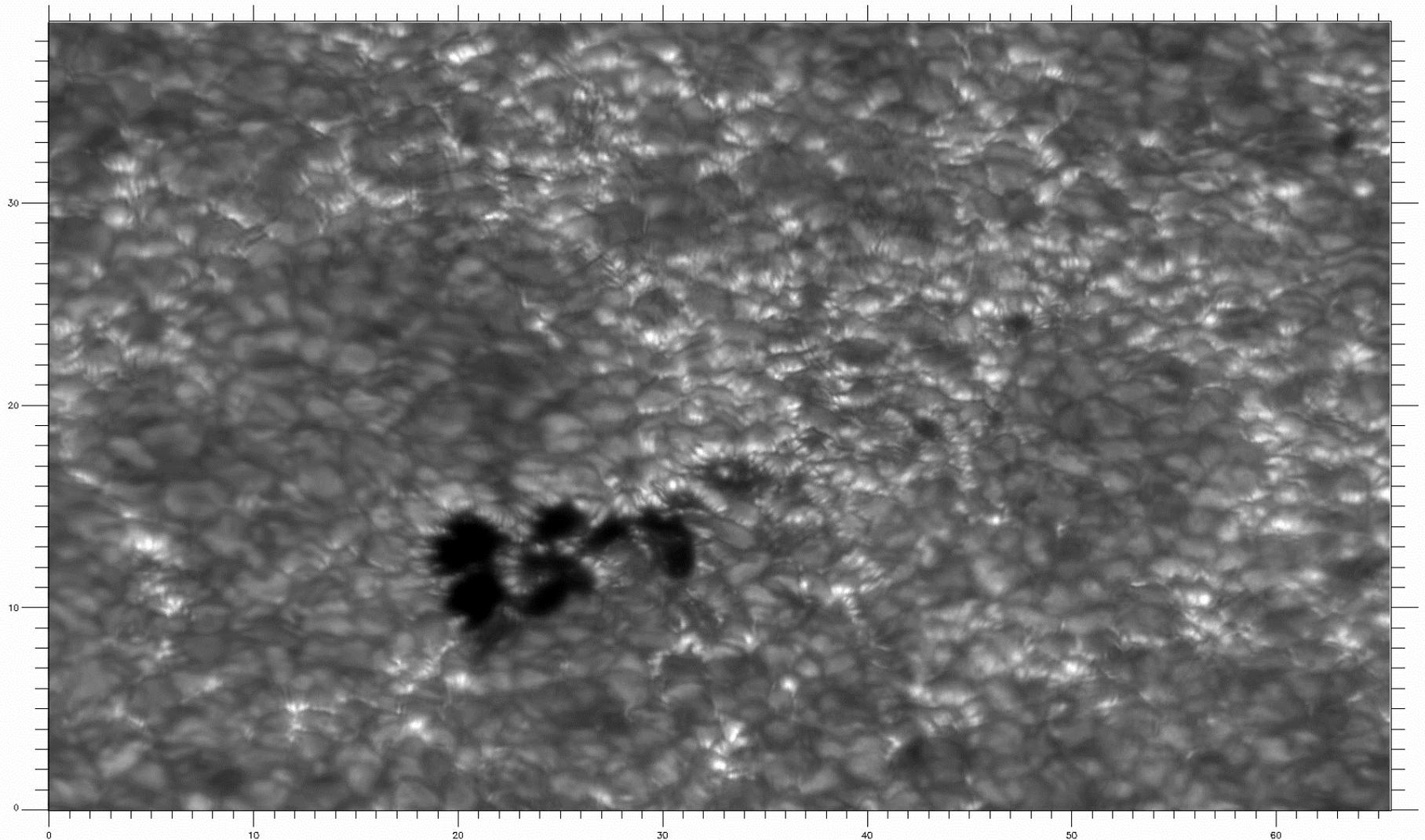
Сильное магнитное поле уменьшает плотность газа в области между гранулами, что приводит к повышению прозрачности и позволяет видеть более глубокие и горячие слои.

From Keller et al., 2004 and modified by Will T. Ball

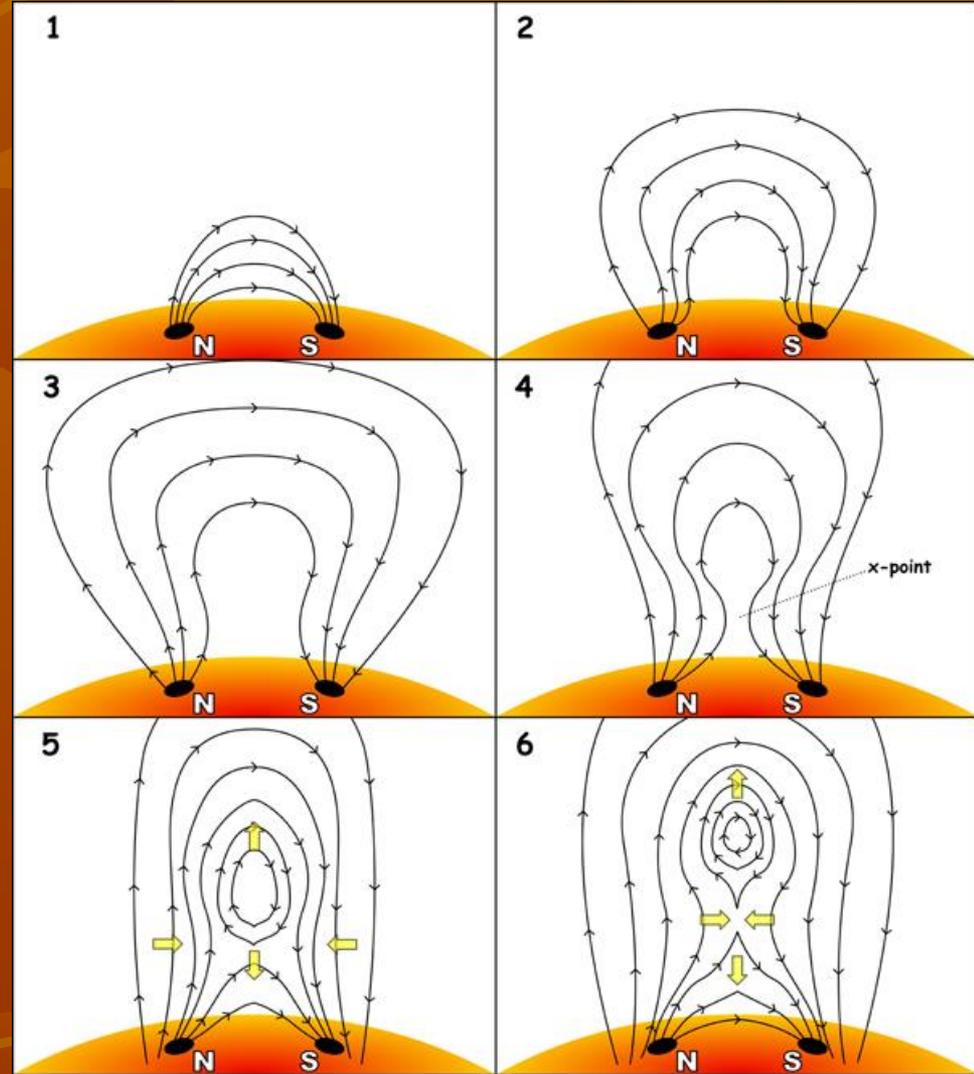
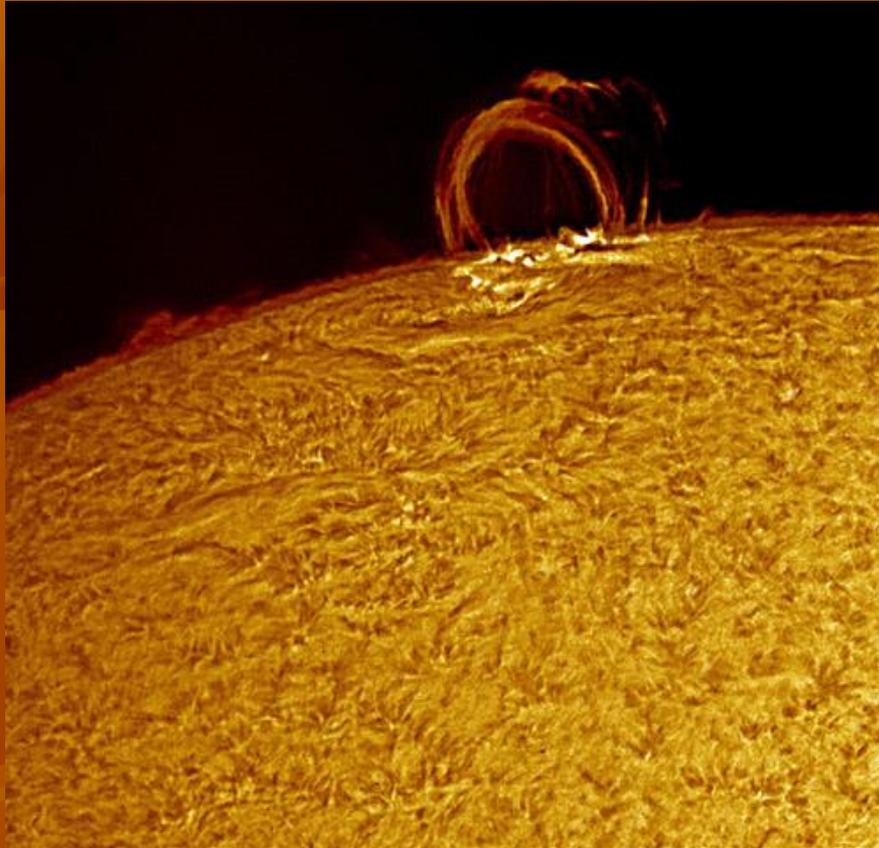
Модель факельных полей



Солнечные факелы

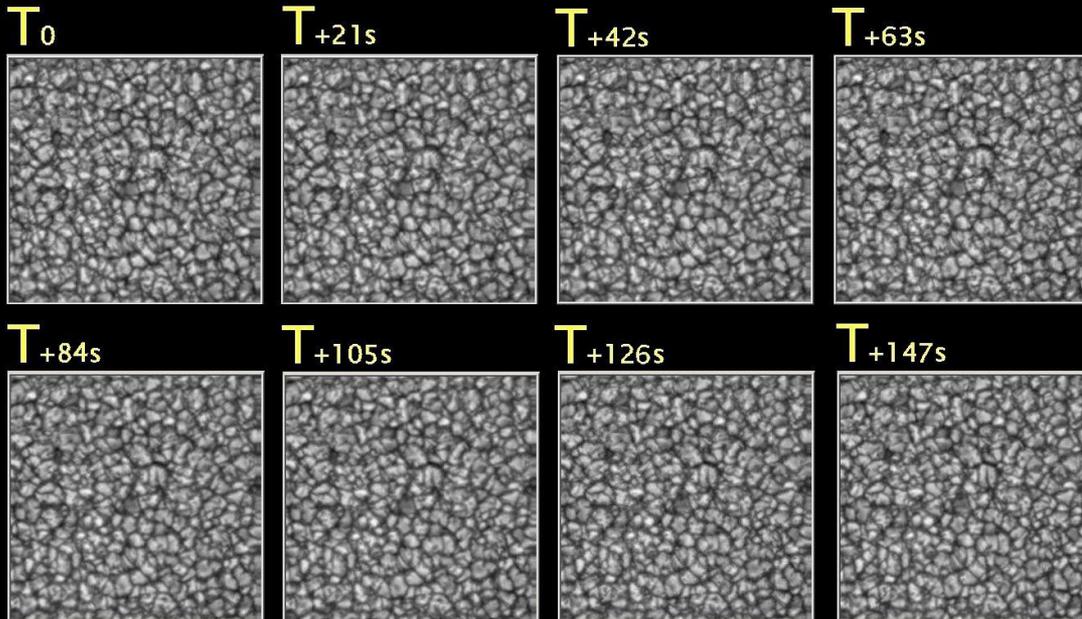


Протуберанцы

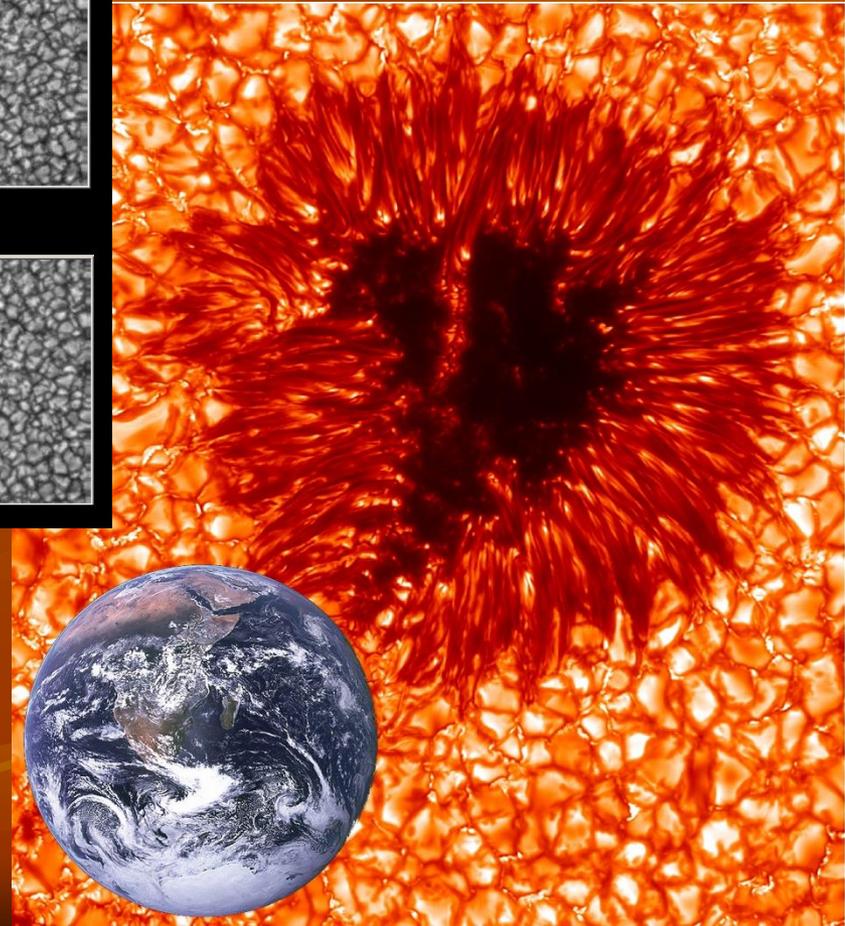


Солнечная грануляция

Solar Granulation (from SVST, La Palma)



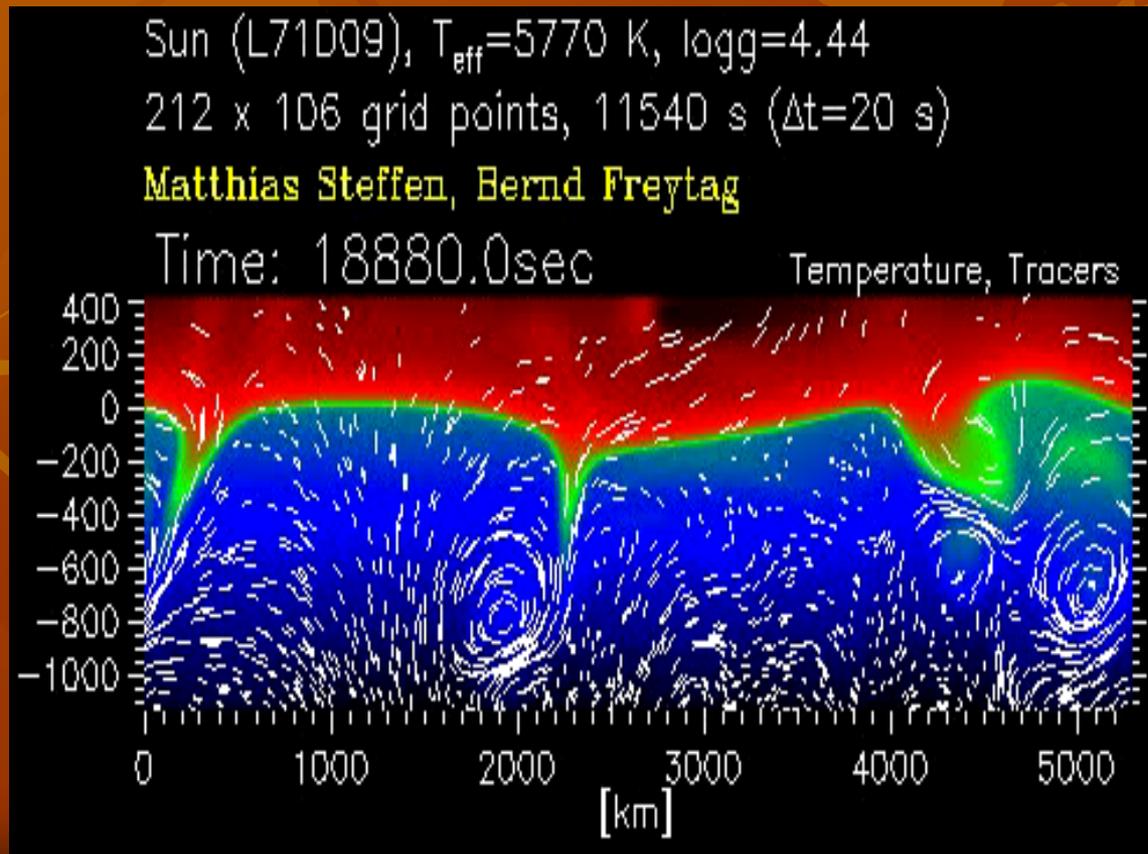
Гранулы имеют размеры порядка 700 км и живут несколько минут.



Моделирование Солнца

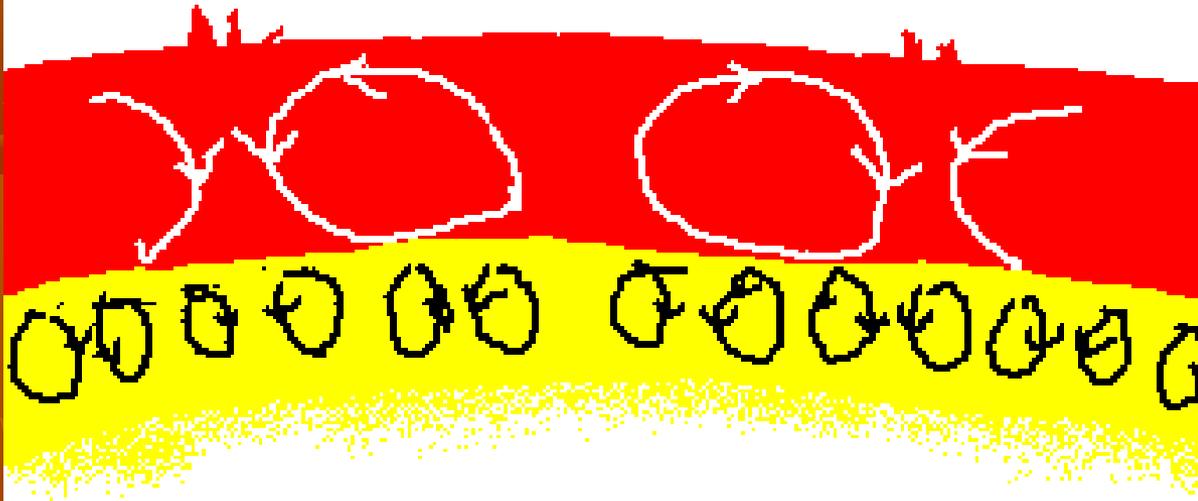
Основные проявления солнечной активности связаны с магнитными полями.
Сами поля во многом связаны с динамикой внешних слоев Солнца.

Внешняя часть Солнца конвективна.

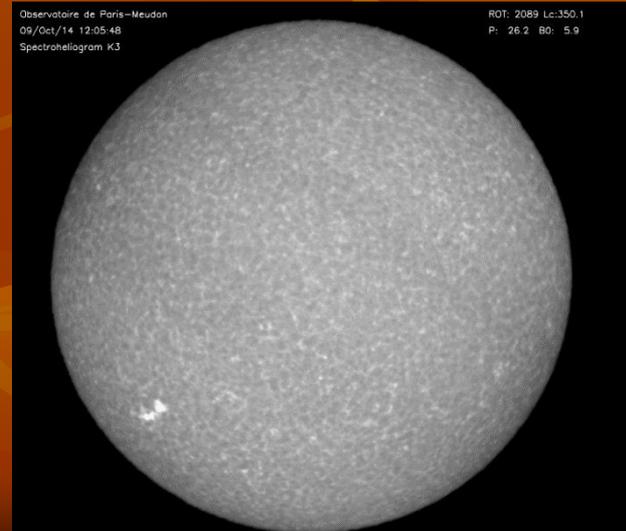
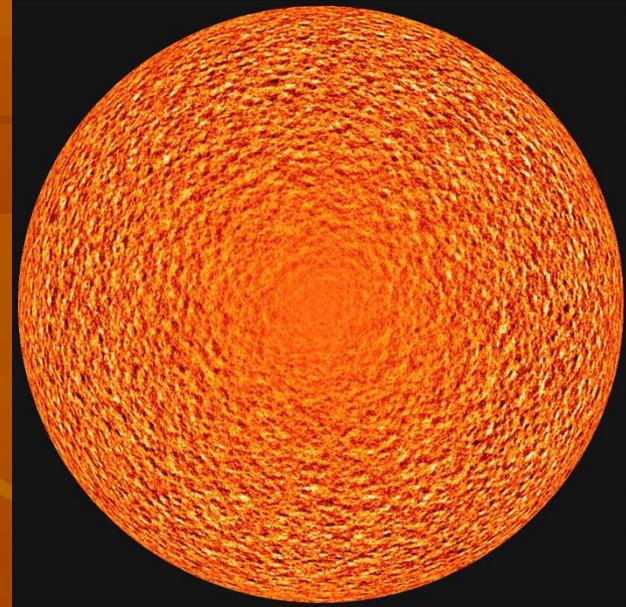


Супергрануляция в хромосфере

supergranulation in chromosphere



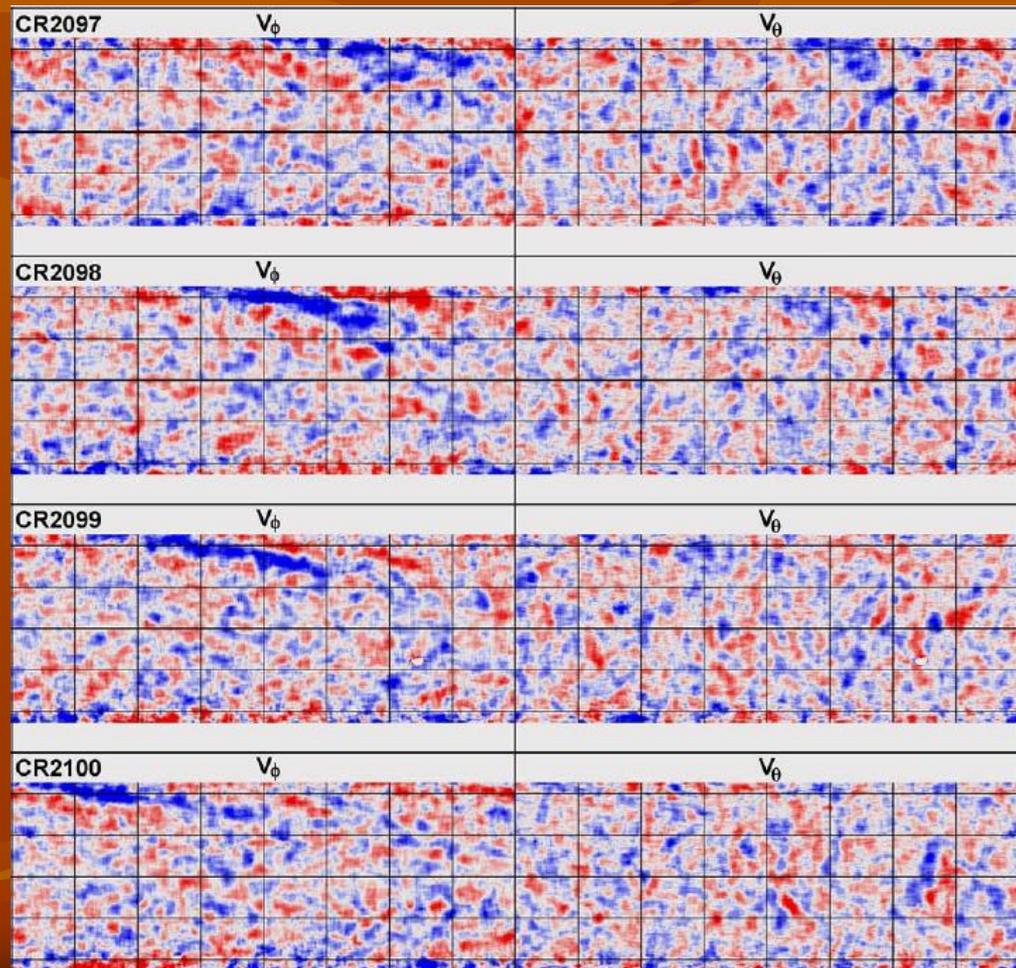
granulation in photosphere



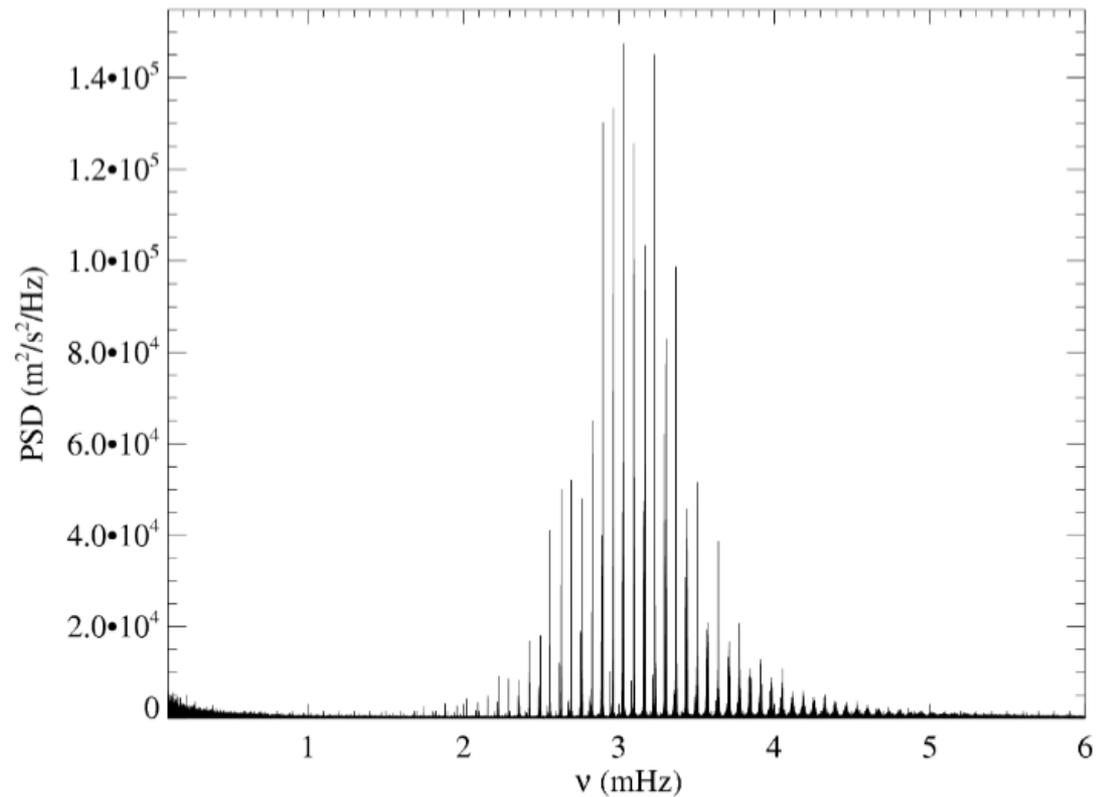
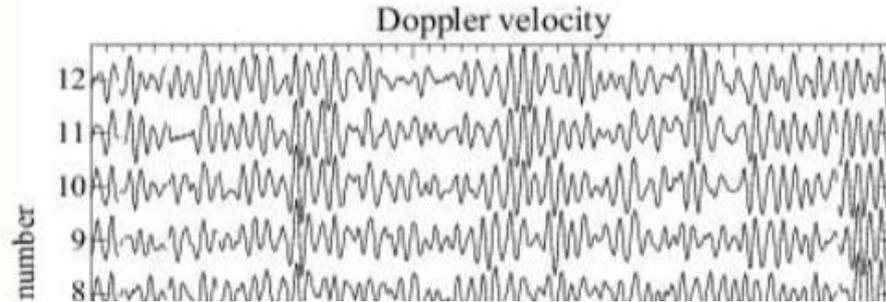
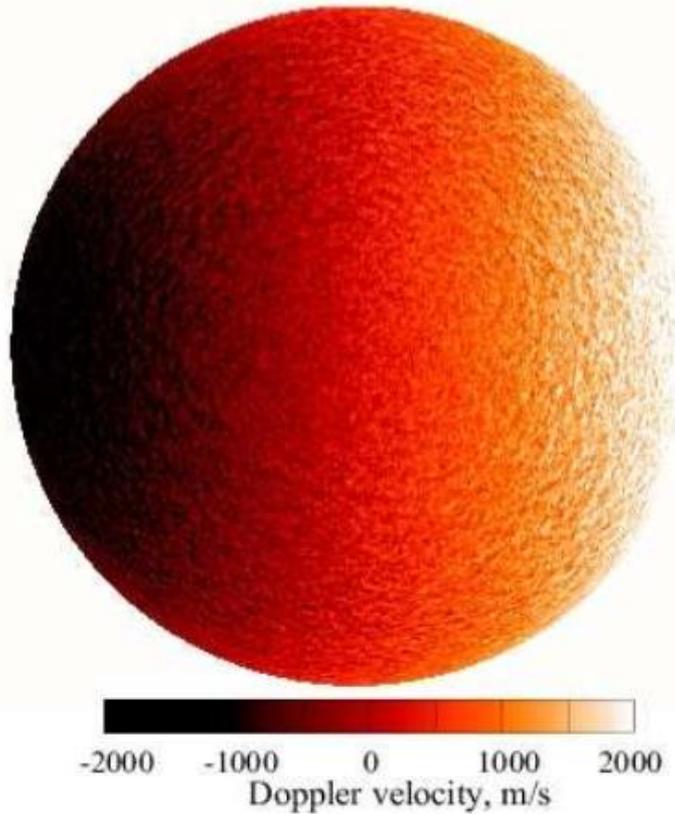
Супергранулы хорошо видны на хромосферных изображениях. Их размеры в десятки раз больше, чем у гранул в фотосфере. Существуют порядка одного дня.

Гигантские конвективные ячейки

Такие структуры предсказывались:
размеры $\sim 200\,000$ км; глубоко в конвективной зоне;
время жизни порядка месяца.

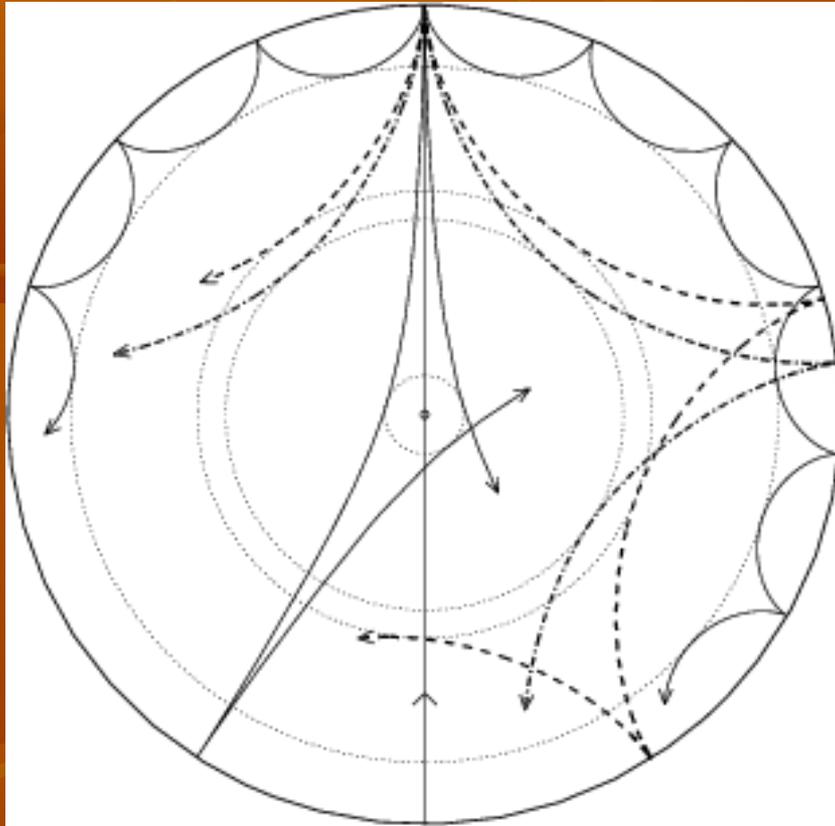


Гелиосейсмология



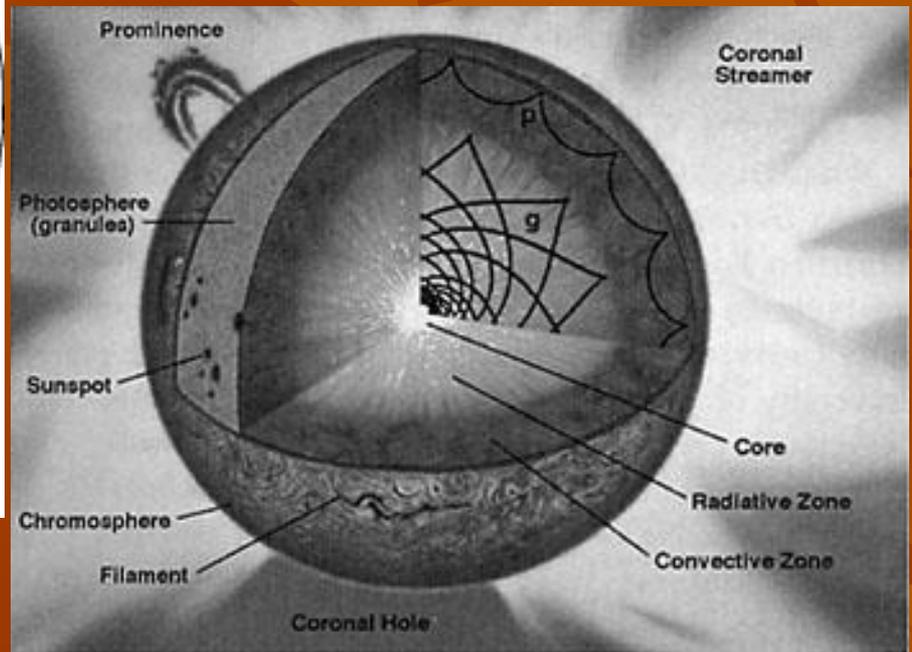
Поверхность Солнца постоянно «дышит». Это солнечные осцилляции. На больших масштабах они имеют характерные периоды около сотен секунд.

Возбуждение колебаний



g-моды колебаний в основном заперты в недрах Солнца.

Колебания возбуждаются во внешних слоях из-за конвекции и распространяются внутрь. Скорость звука растет по мере продвижения. В какой-то момент колебания отражаются.



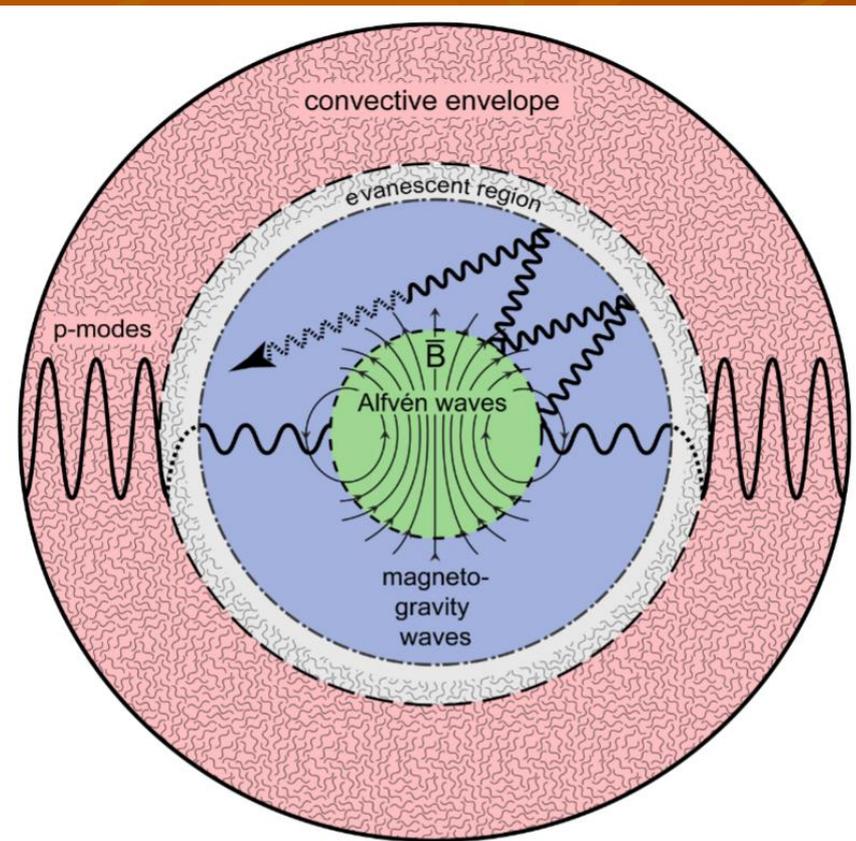
A cut-away diagram of major features of the sun. Courtesy of the SOHO/MDI consortium. SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA.

Магнитные поля в недрах красных гигантов

Астросейсмология помогла измерить магнитное поле в недрах красных гигантов.

В звездах «гуляют» волны, проявления которых мы можем наблюдать, изучая кривые блеска.

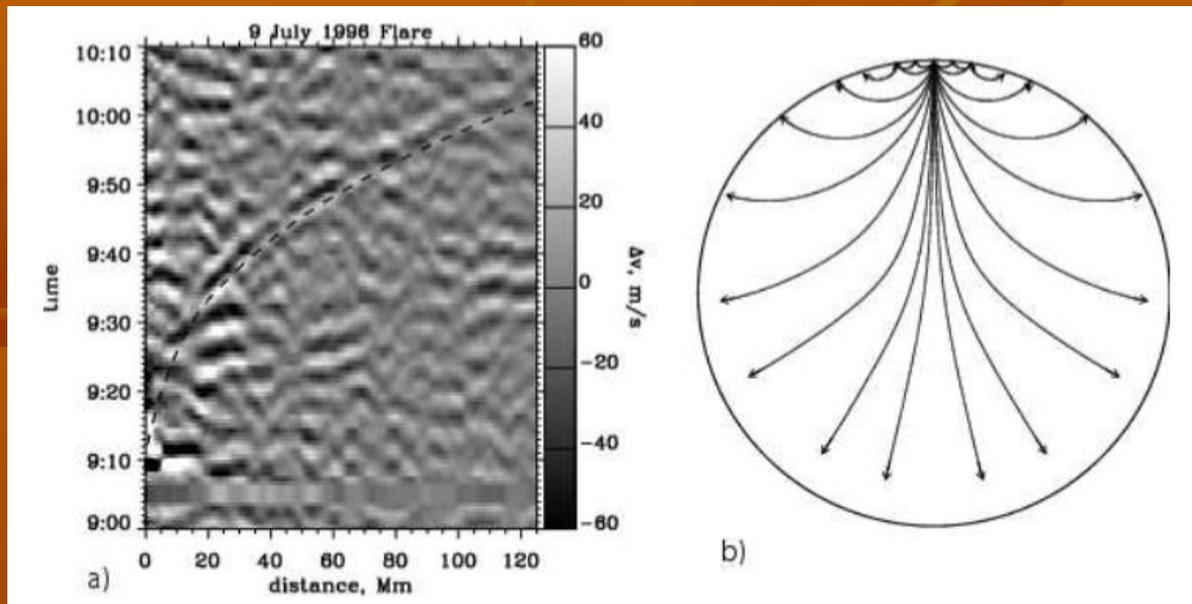
Волны бывают разные. Очень удобно разложить их на гармоники: монополь, диполь, квадруполь и т.д. Так вот, есть красные гиганты, у которых монополярная (сферически-симметричная) составляющая сильна, а дипольная сильно подавлена. Хорошего объяснения этой особенности до недавнего времени не было.



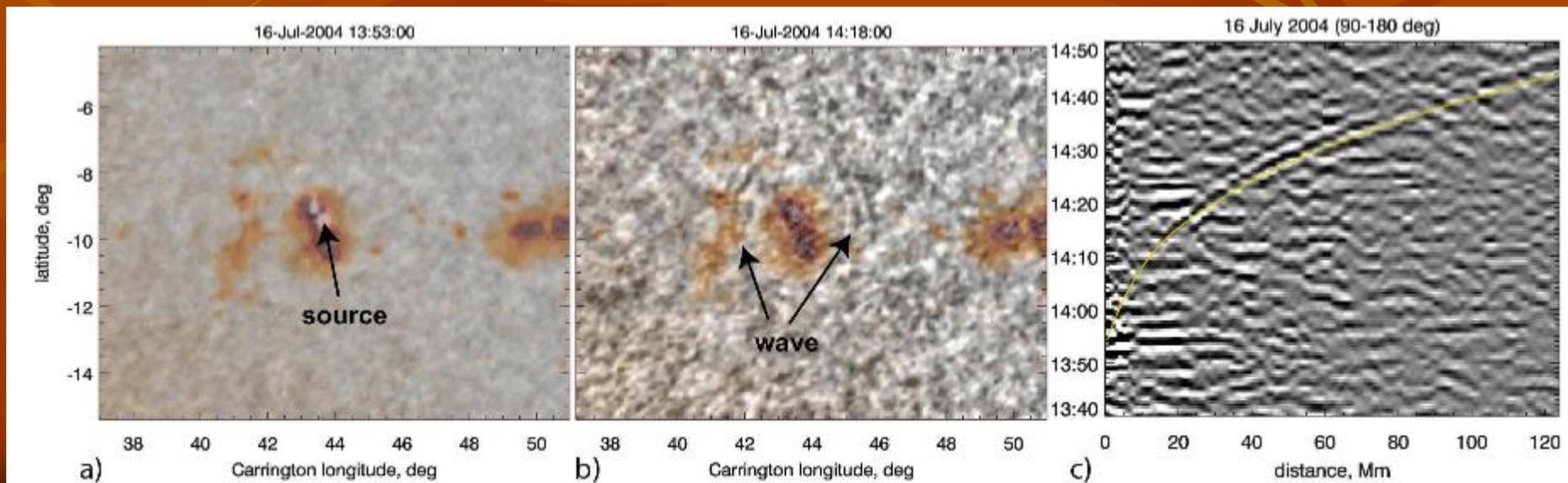
Волны возбуждаются на поверхности и идут внутрь. Там они частично отражаются и выходят обратно во внешние слои. Идея авторов состоит в том, что волны взаимодействуют с магнитным полем внутри звезды. Это приводит к их превращению в другой тип волн, которые уже не могут выйти наружу.

Вспышки и осцилляции

1103.1707

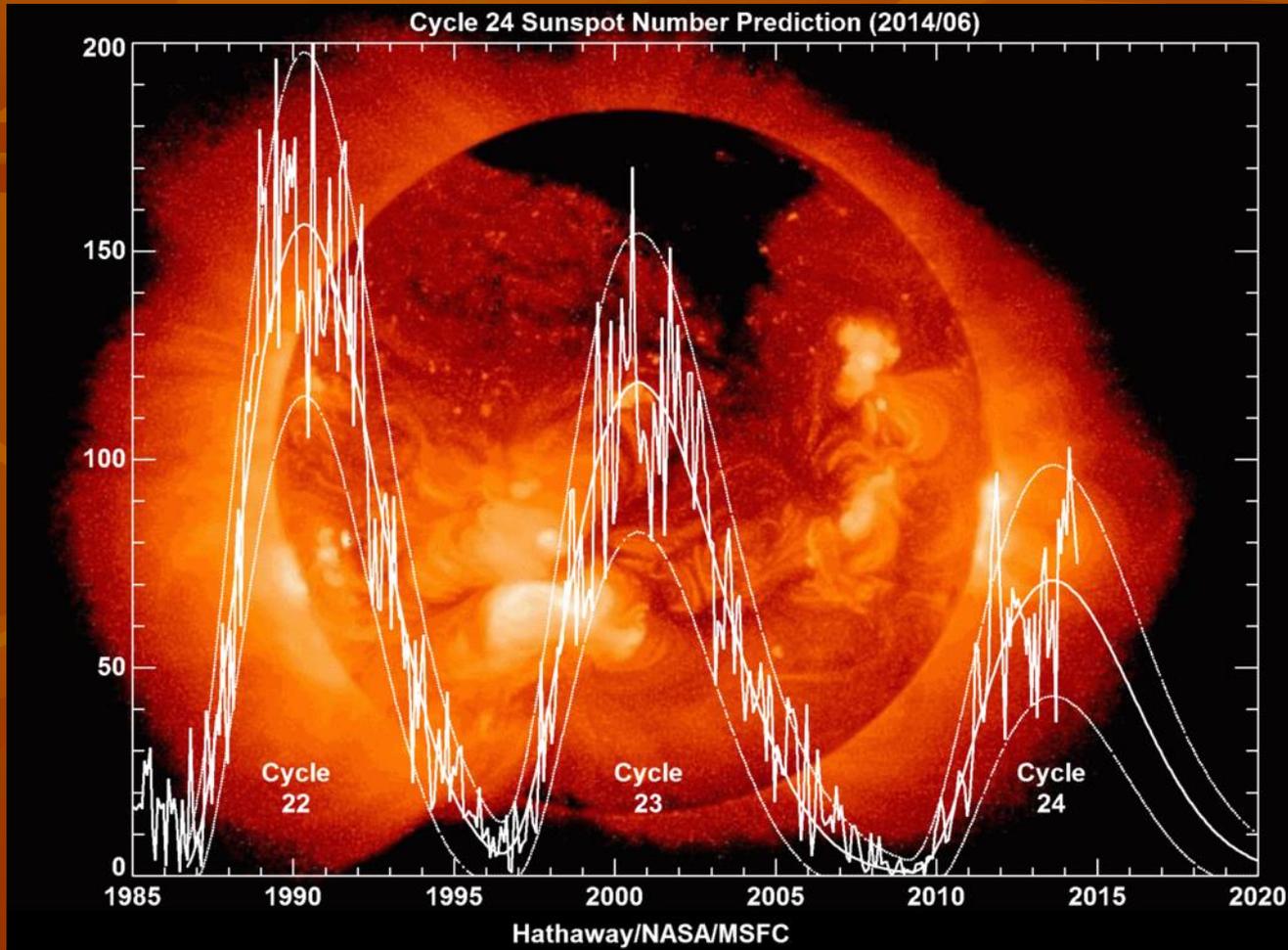


Мощные вспышки на Солнце порождают волны во внешних слоях и осцилляции.



Солнечный цикл

11-летний цикл солнечной активности

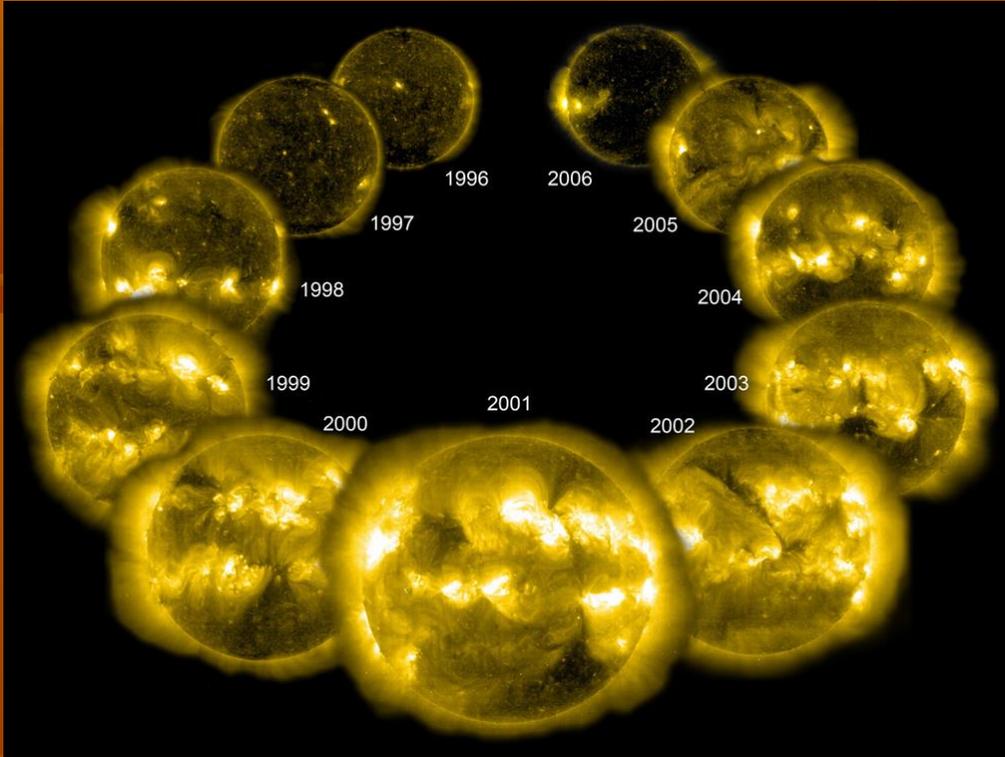


Количество пятен, а также другая солнечная активность меняются с периодом примерно 11 лет

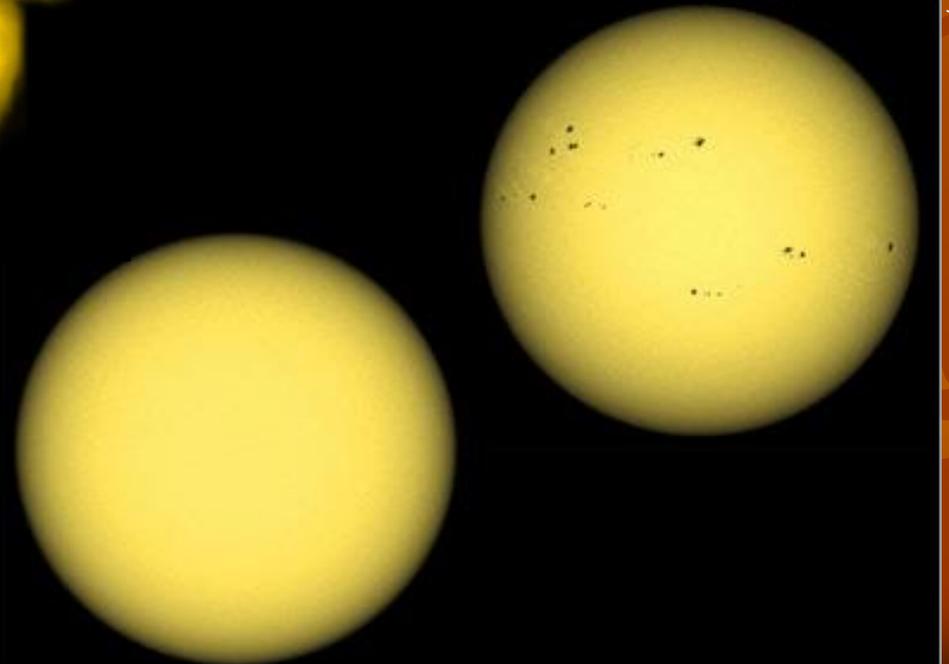
Открыт Швабе в 1843 г.

Солнечный цикл связан с поведением глобального магнитного поля Солнца.

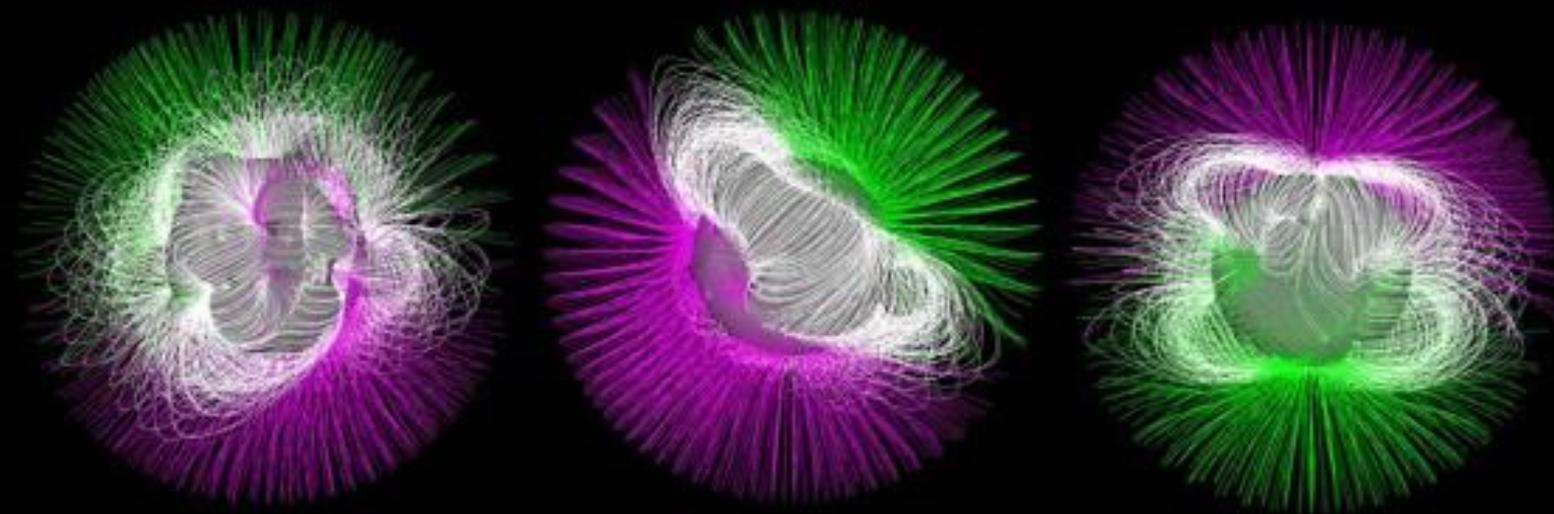
Активность Солнца



Изображения получены спутником SOHO в ультрафиолетовых лучах.



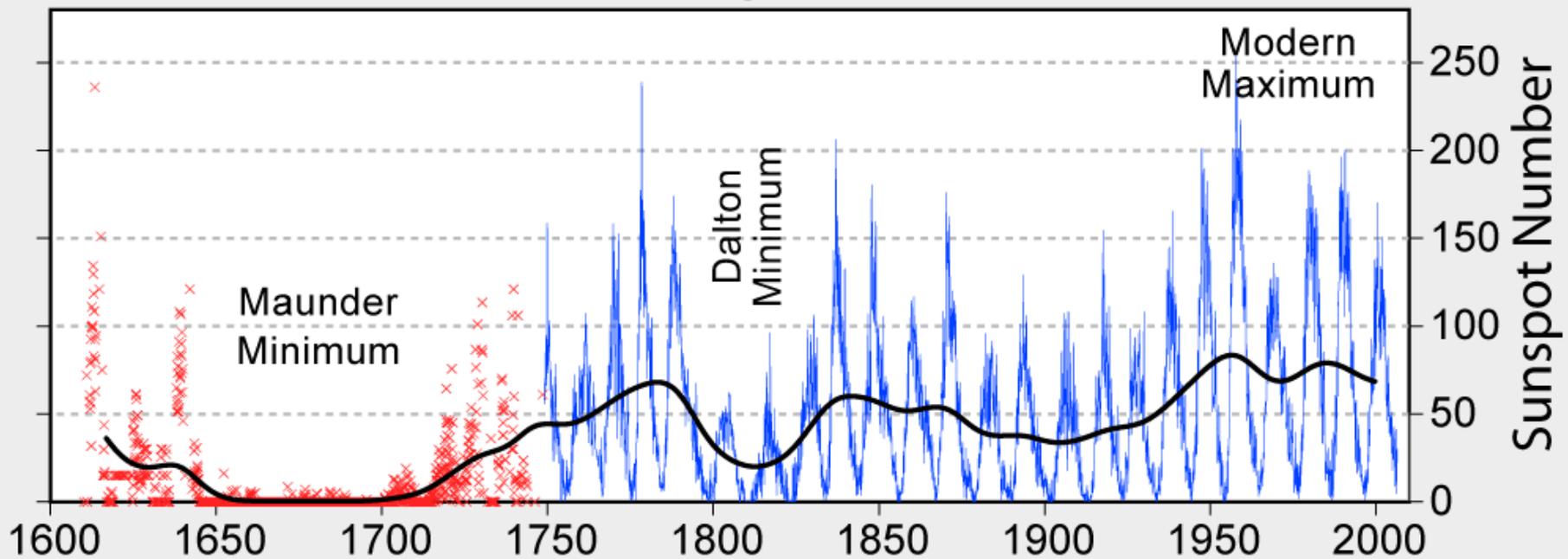
Переворачивание магнитного поля



Маундеровский минимум

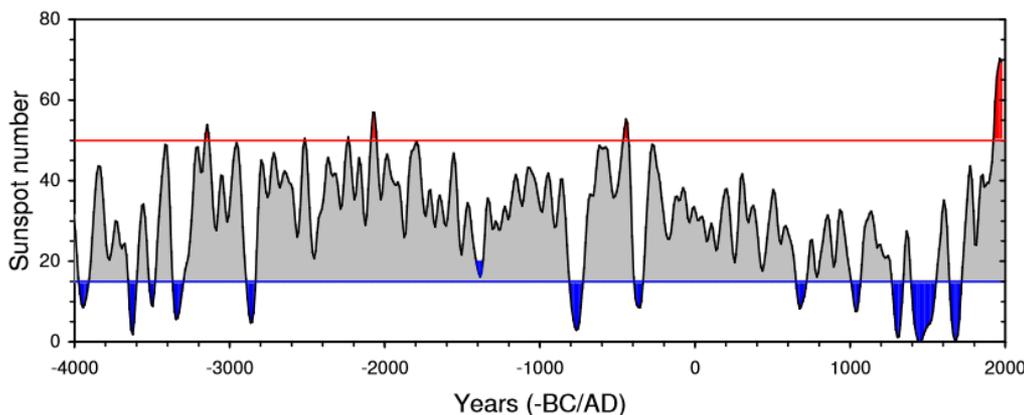
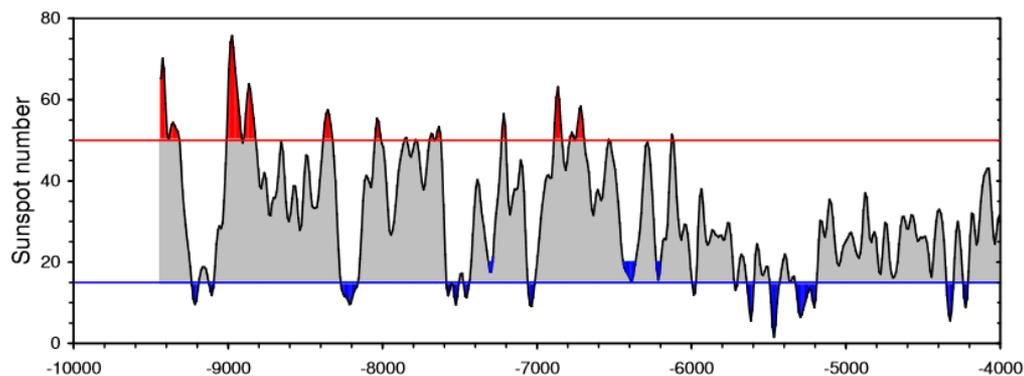
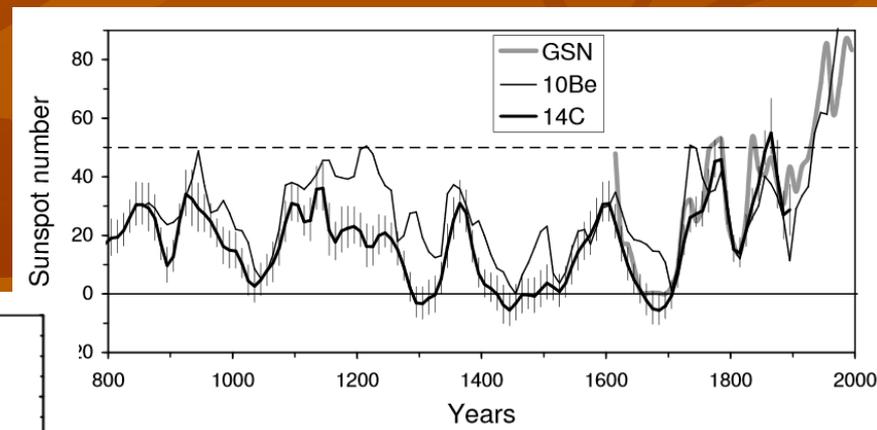
Иногда ровный ход 11-летний циклов нарушается. Наблюдалось несколько минимумов активности, самый заметный из которых – маундеровский.

400 Years of Sunspot Observations



Реконструкция на большом масштабе времени

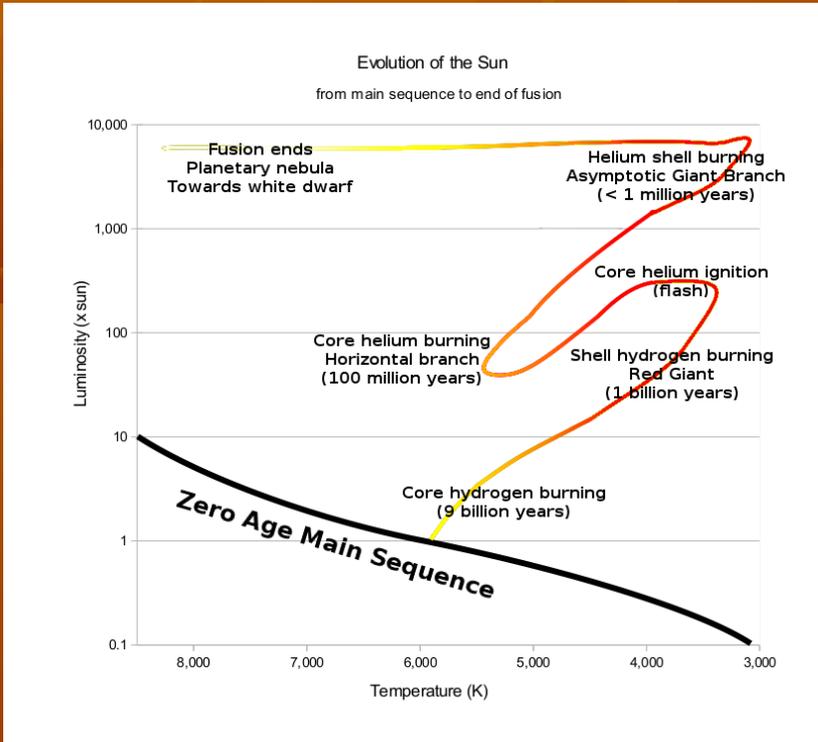
Ученые пытаются восстановить солнечную активность на временах порядка тысяч лет.



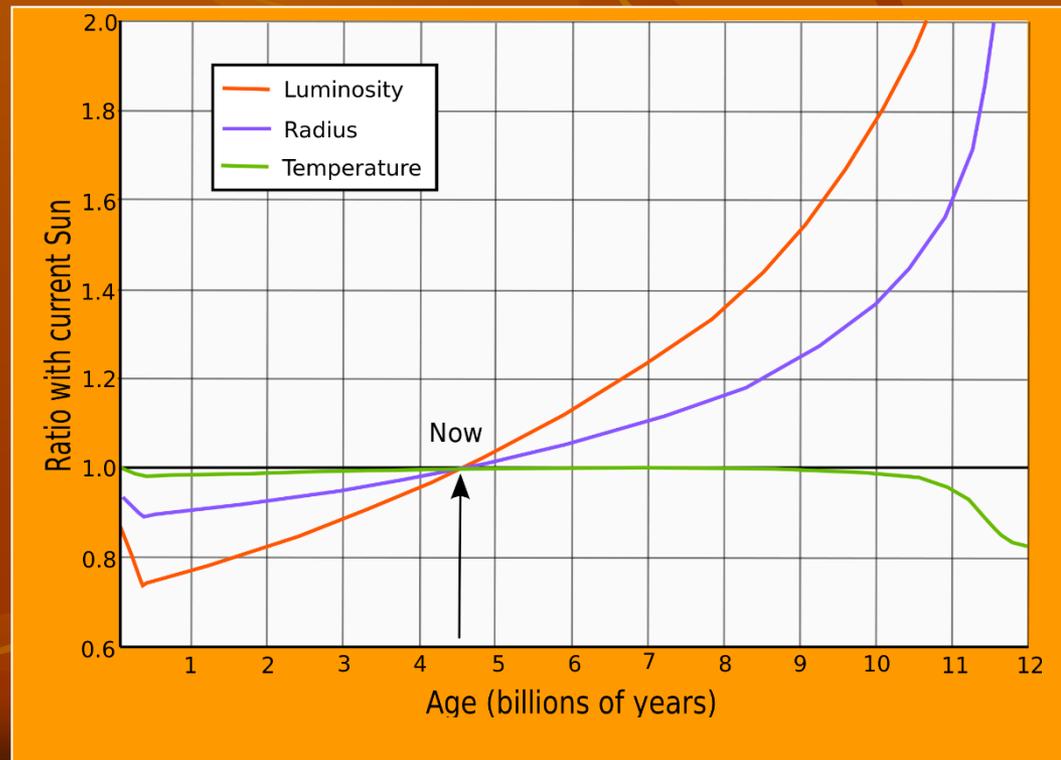
Используются данные по годовичным кольцам деревьев и по ледяным кернам.

Содержание беррилия-10 и углерода-14.

Эволюция Солнца

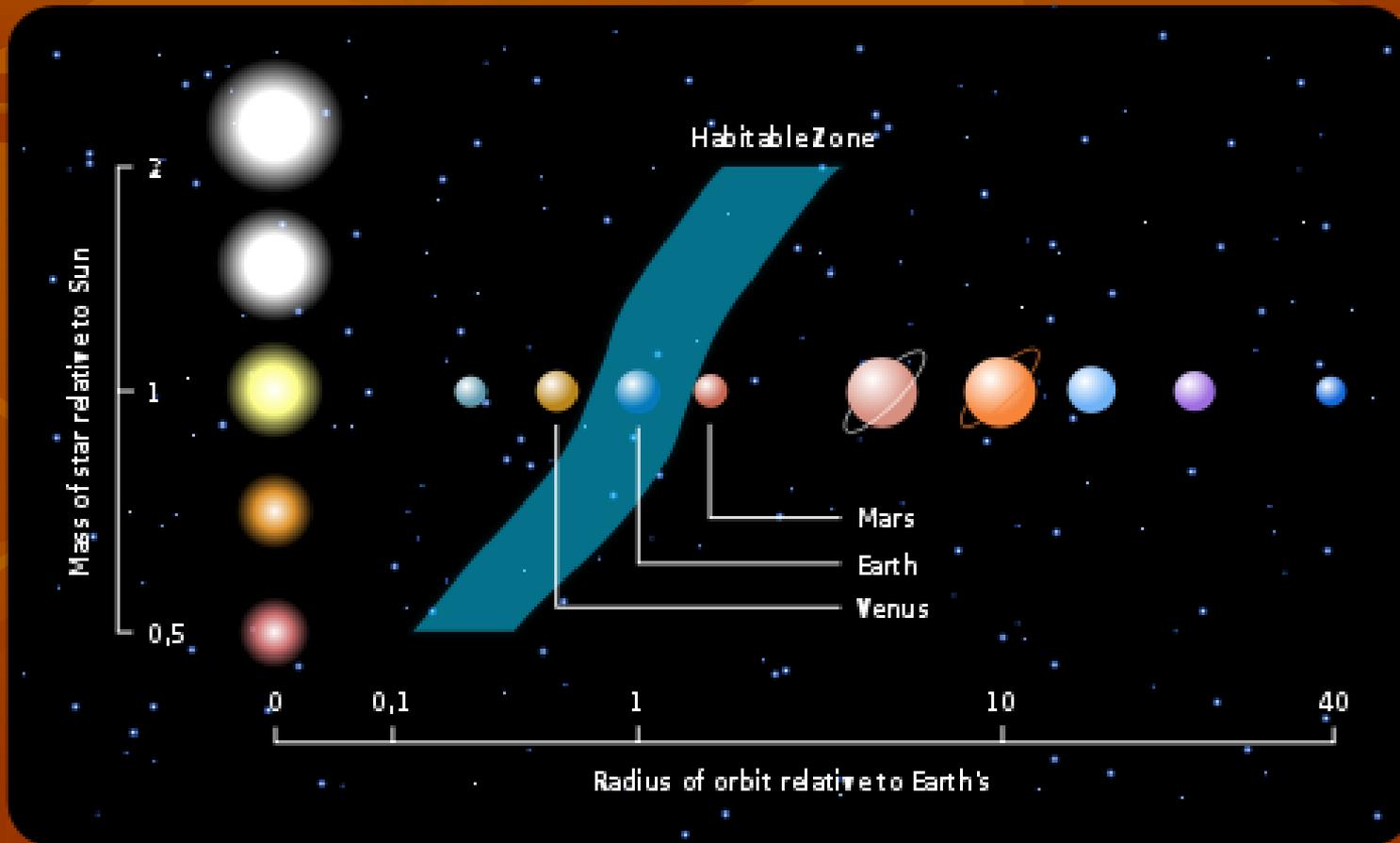


Сейчас Солнце пережигает водород в своих недрах, Очень медленно Солнце становится больше и ярче.



Зона обитаемости

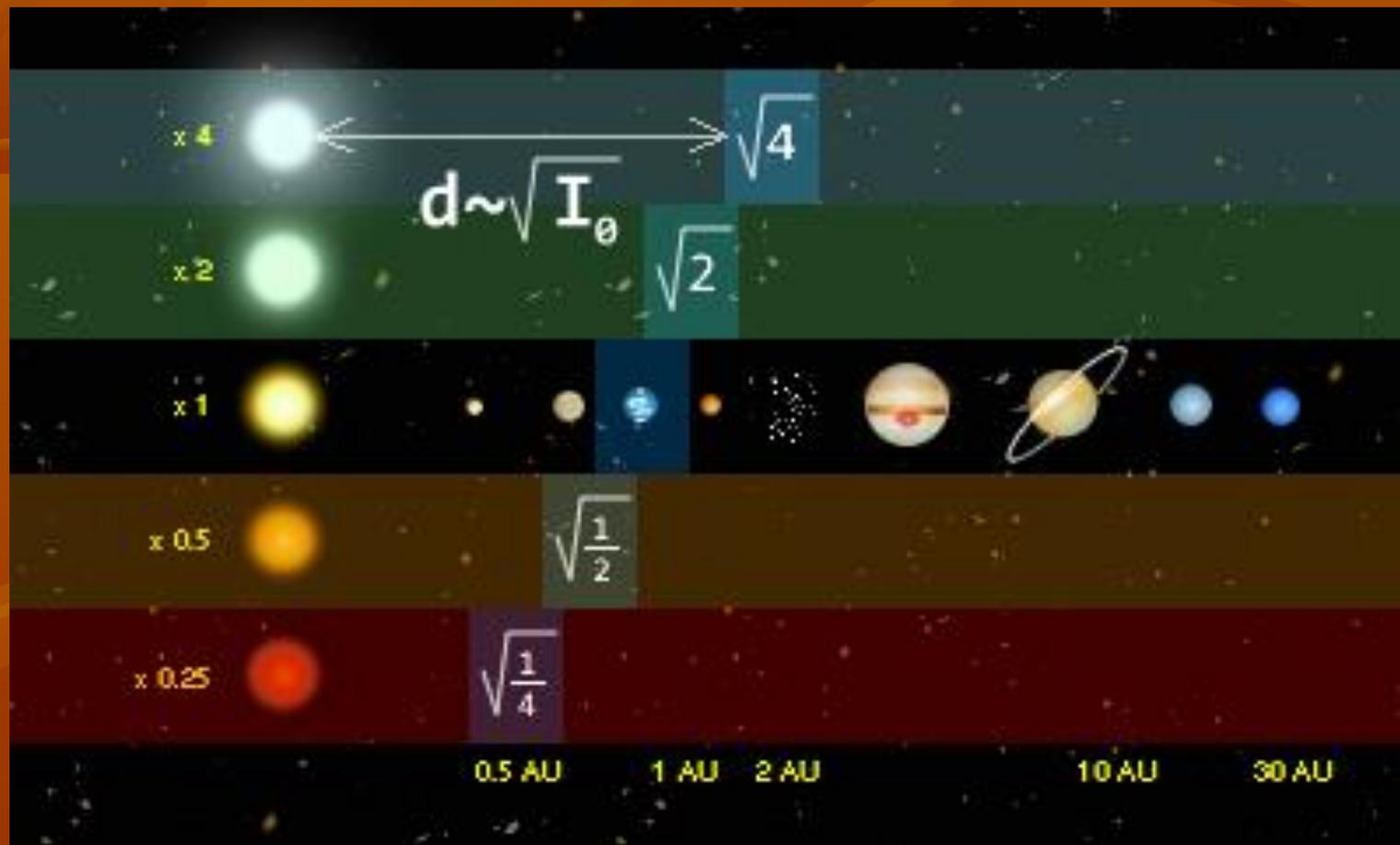
Возможность существования жидкой воды (не холодно, не жарко)



Обсуждение этой идеи началось в 1950-е гг.

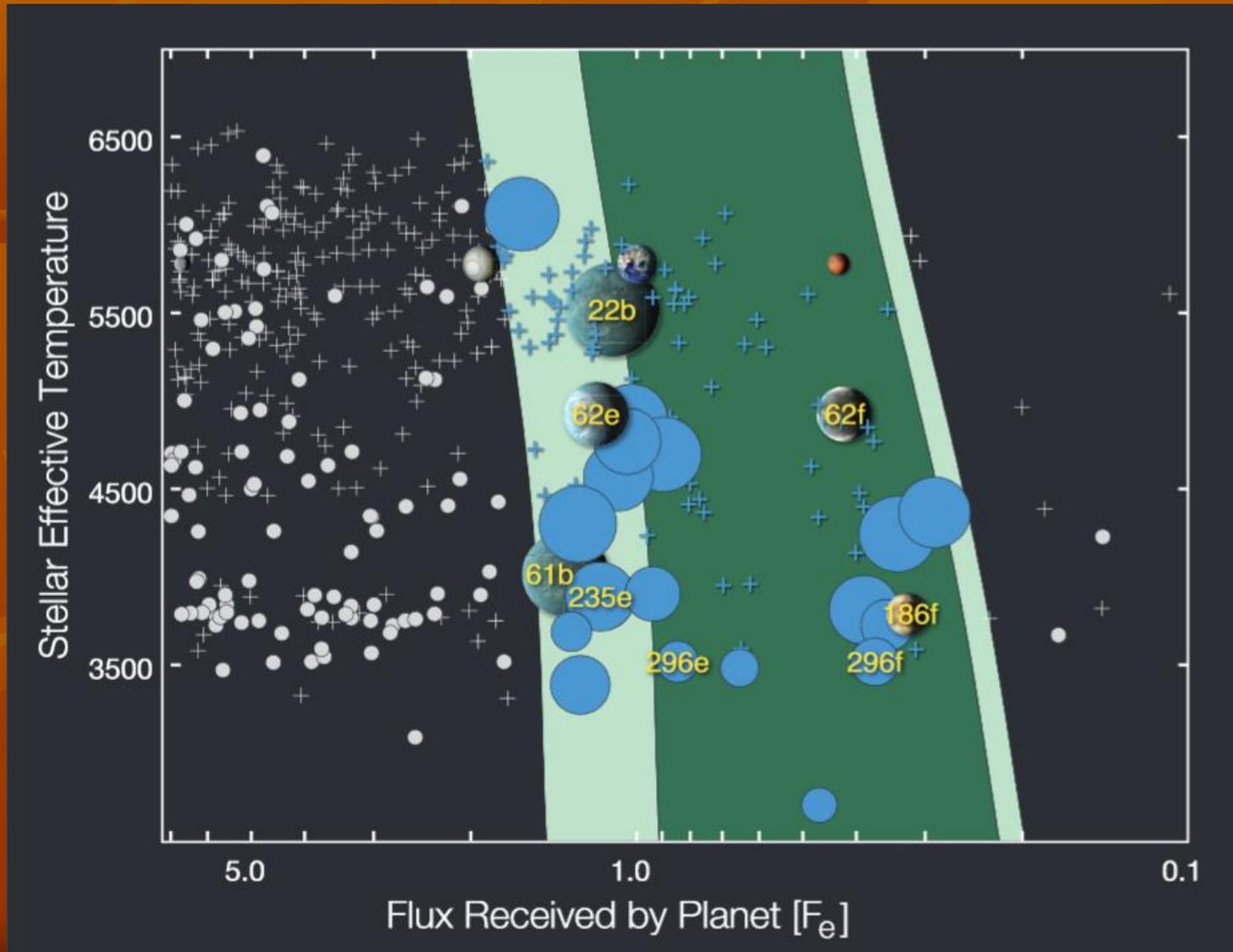
Зависимость от светимости

Параметры зоны обитаемости зависят от светимости звезды

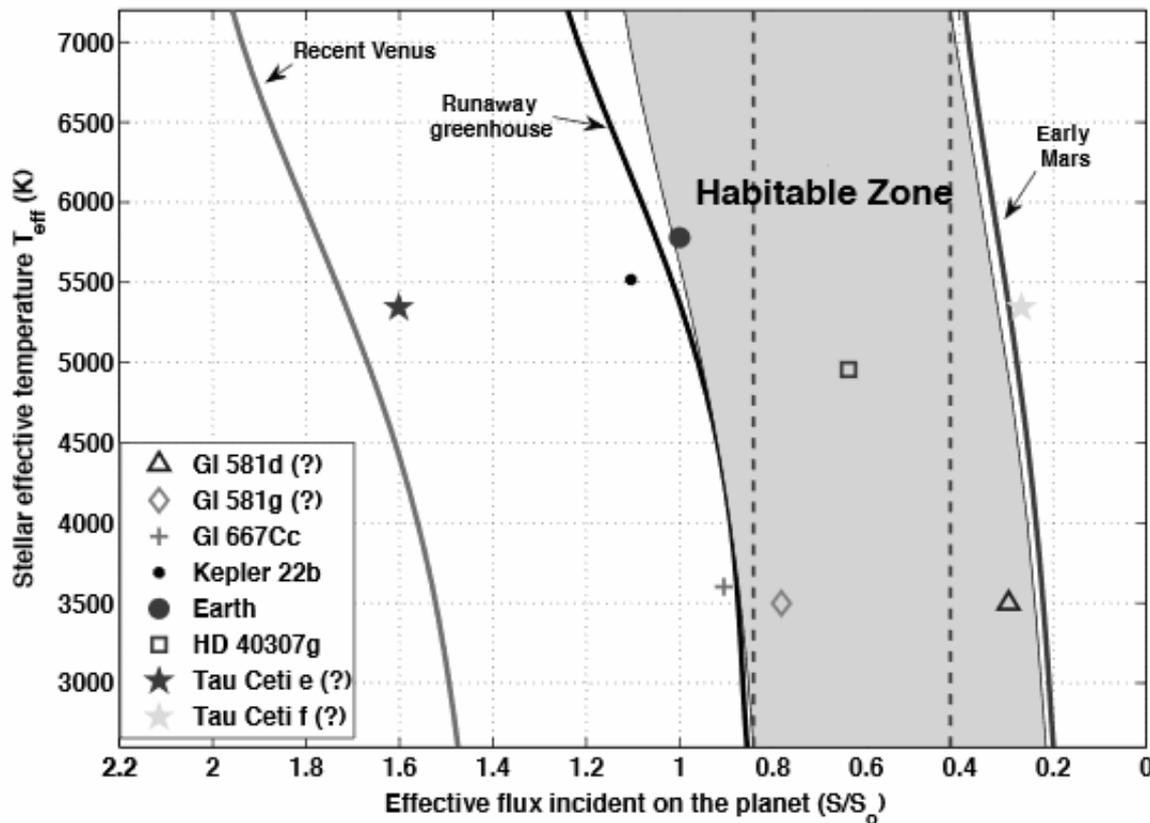


$$F = \left(R_* / R_{\odot} \right)^2 \left(T_* / T_{\odot} \right)^4 \left(a_{\oplus} / a_p \right)^2$$

1409.1904



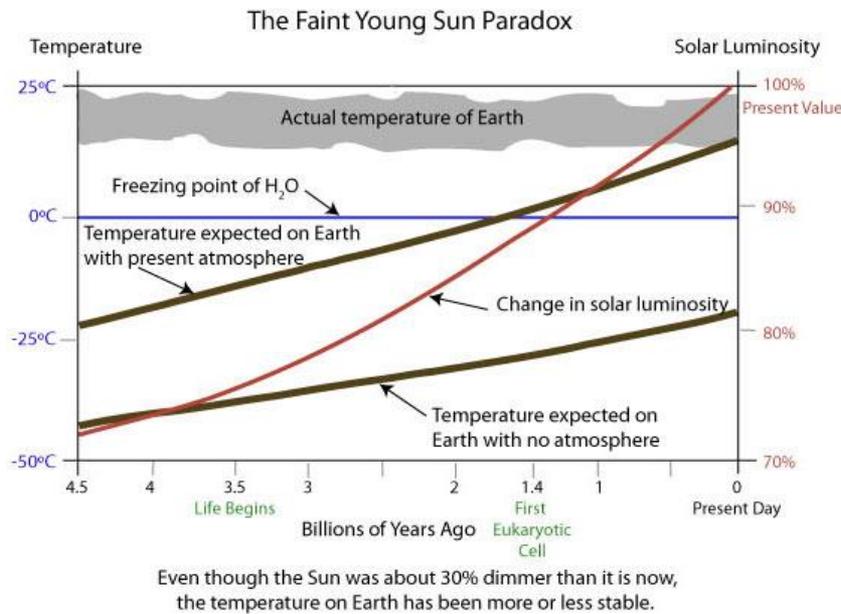
Детальные расчеты



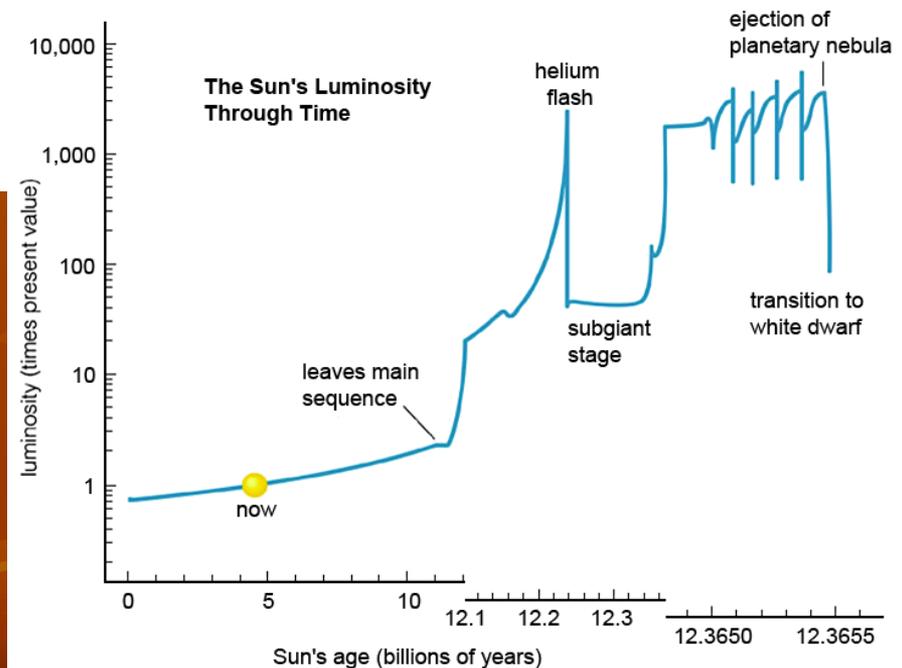
Существуют разные расчеты размера зон обитаемости, т.к. в основном они завязаны на климат (парниковый эффект), а не просто на равновесную температуру.

Парадокс тусклого Солнца

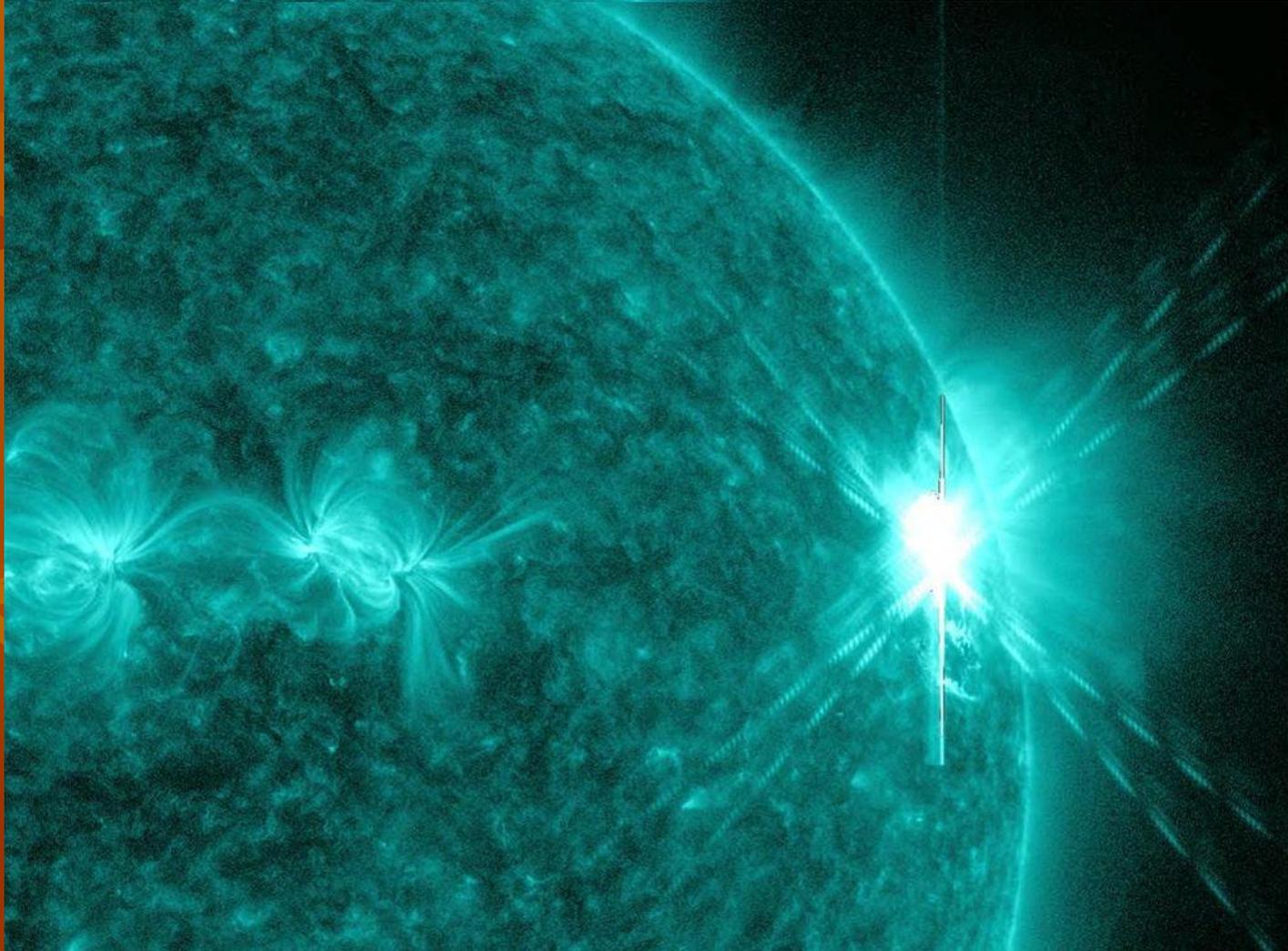
Миллиарды лет назад Солнце светило менее ярко, тем не менее, на Земле существовала жидкая вода.



В 2020 гду появилась работа, в которой авторы показывают, что причиной был углекислый газ ([2006.06265](#)).

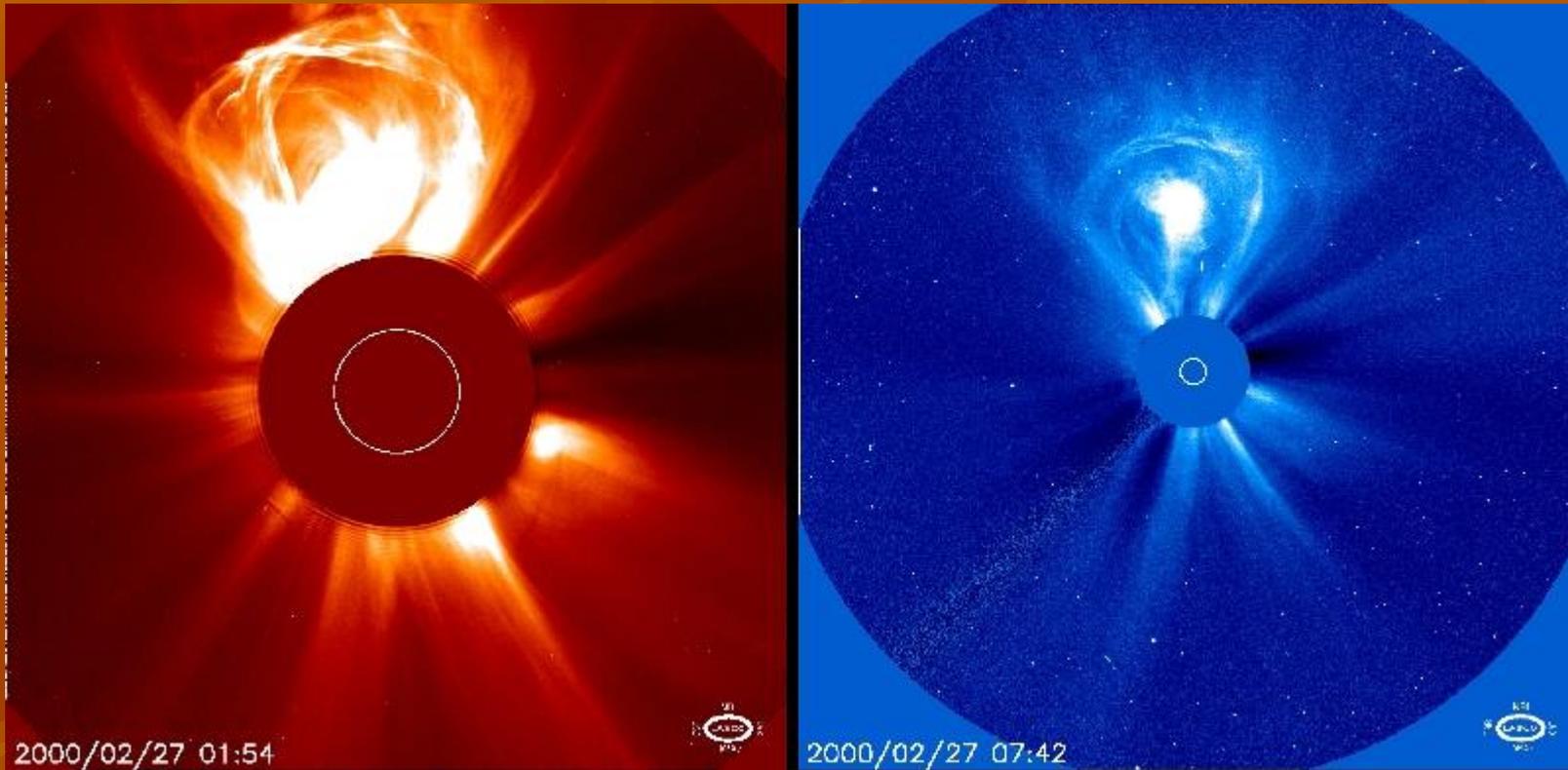


Вспышки на Солнце



Ультрафиолетовое изображение, SDO, NASA

Корональные выбросы

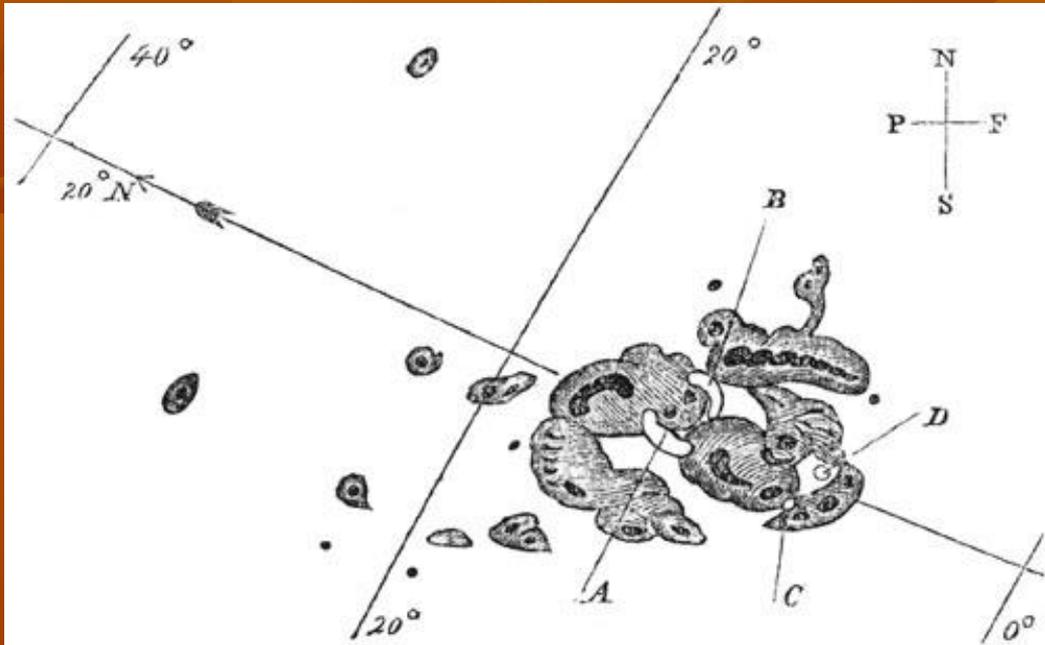


Частота таких событий от нескольких в день во время максимума активности, до раз в несколько дней – во время минимума активности.

Масса выброса 10^{15} г.

До Земли долетает за 1-4 дня.

Событие Каррингтона. 1859 г.



Визуальные наблюдения вспышки астрономами-любителями, плюс данные по геомагнитному шторму.

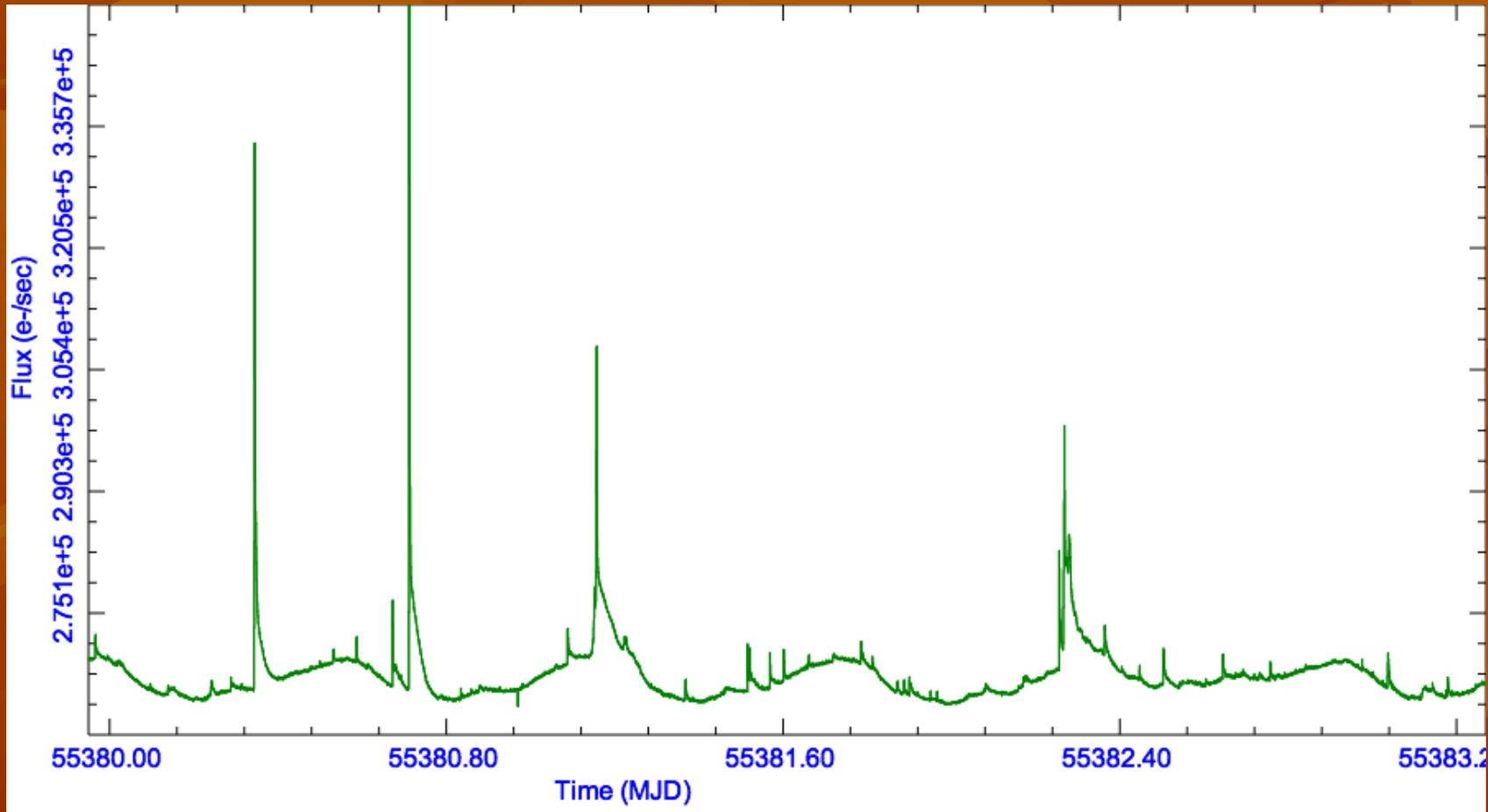
«Встали» телеграфные линии.

Мощнейшие полярные сияния.

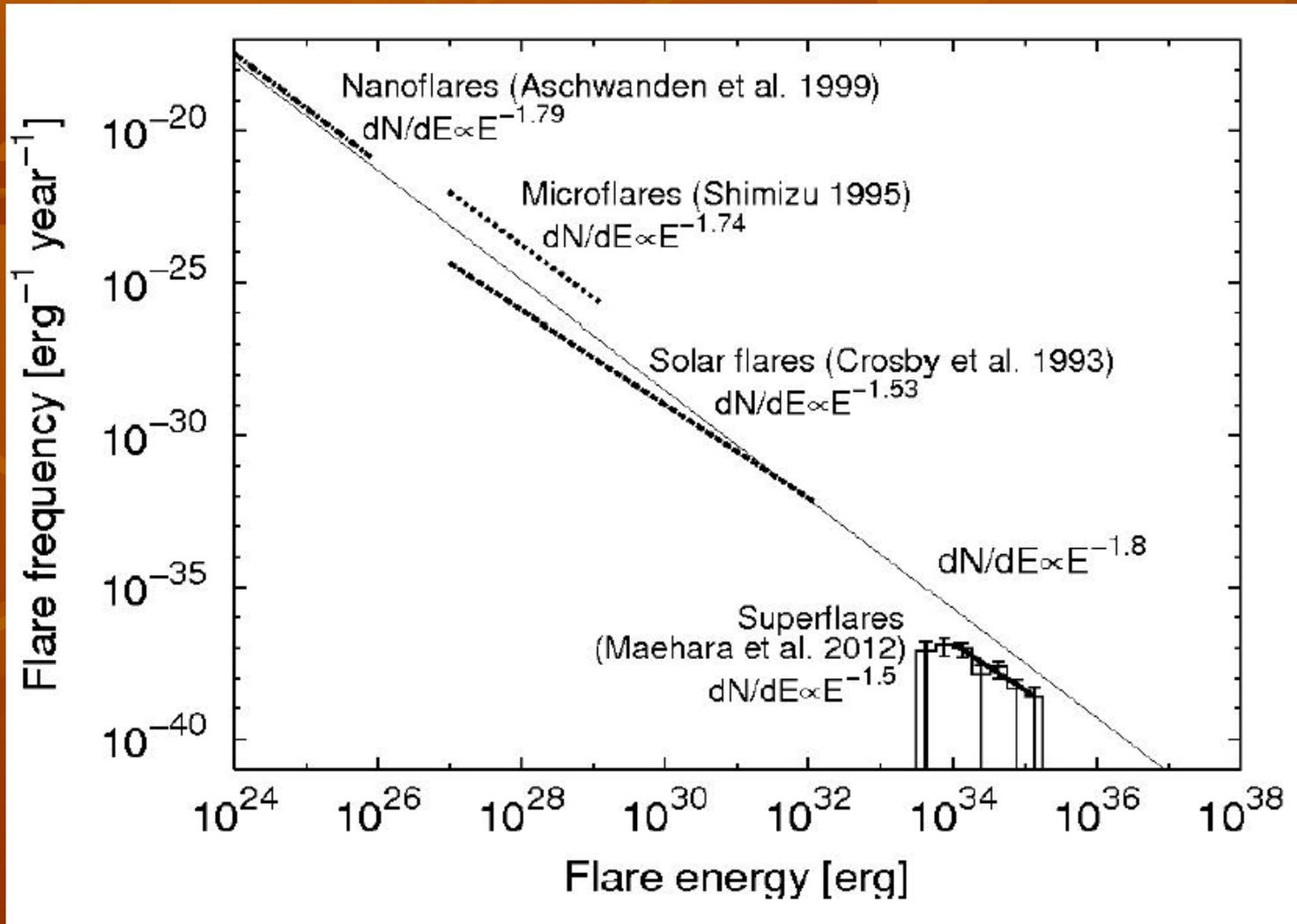
Гигантские вспышки

Вспышки происходят и на других звездах.

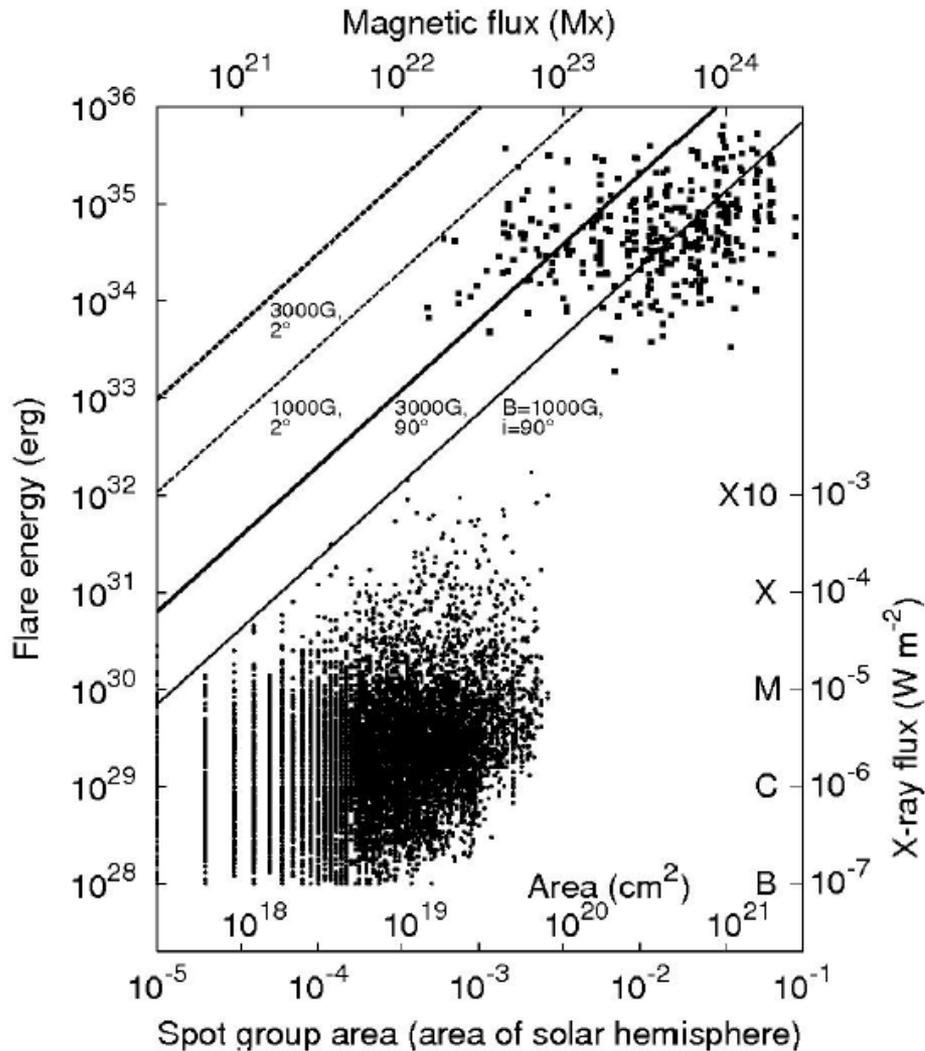
Как правило, чем легче звезда – тем она активнее.



Частота вспышек



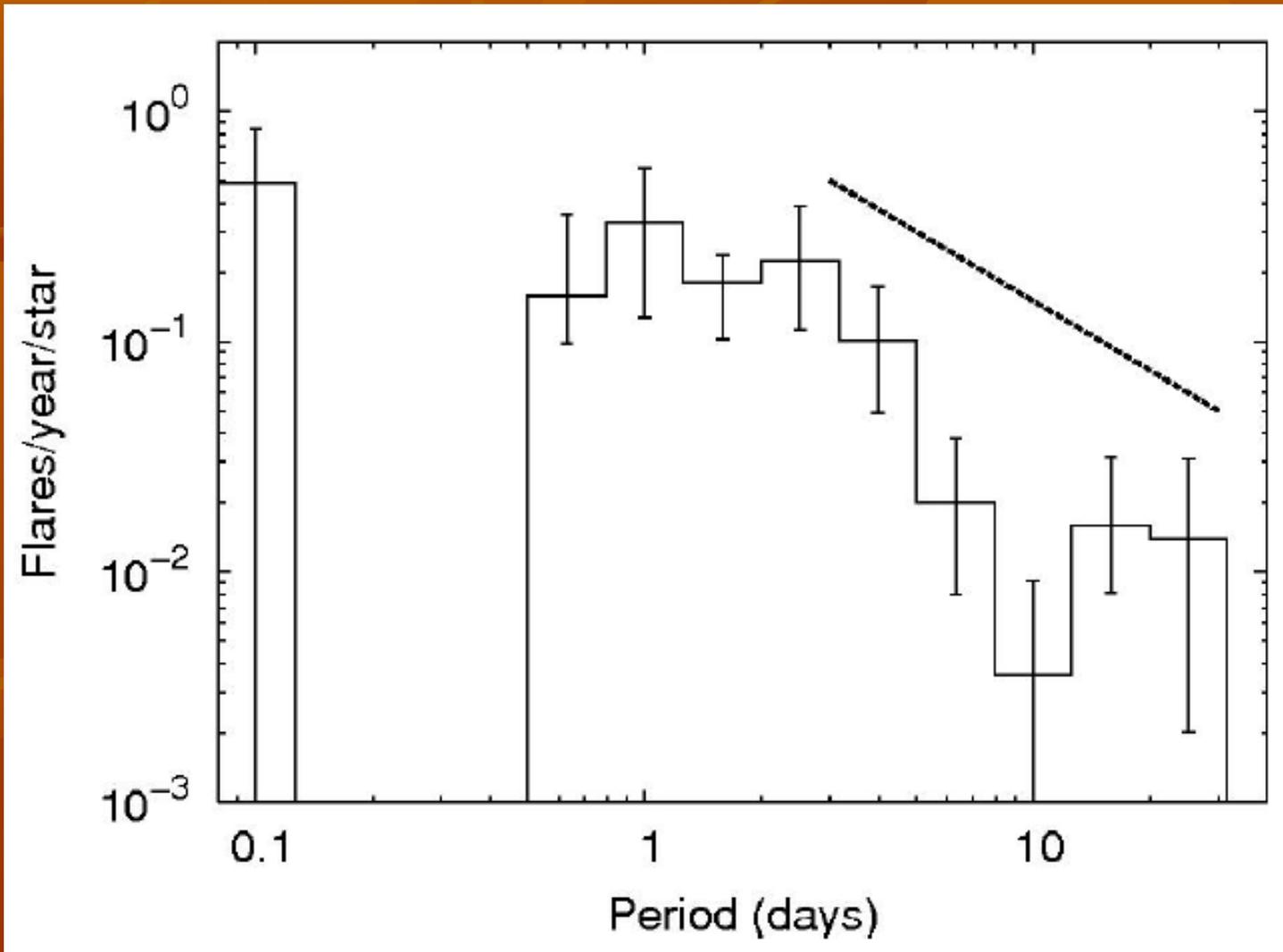
Вспышки и пятна



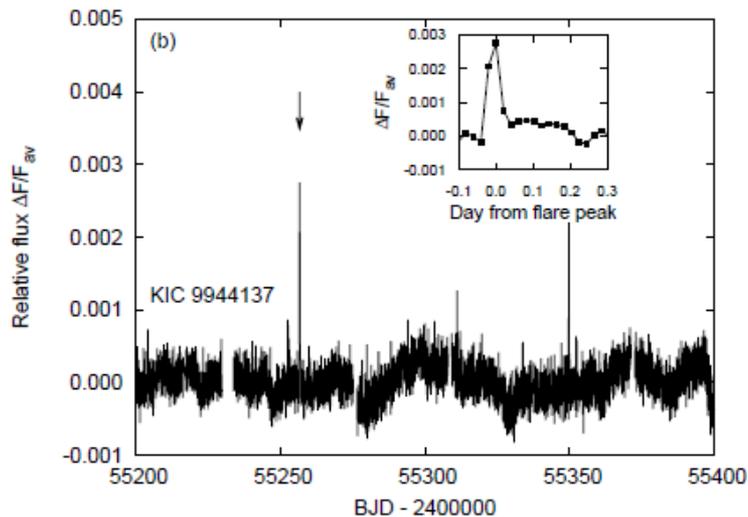
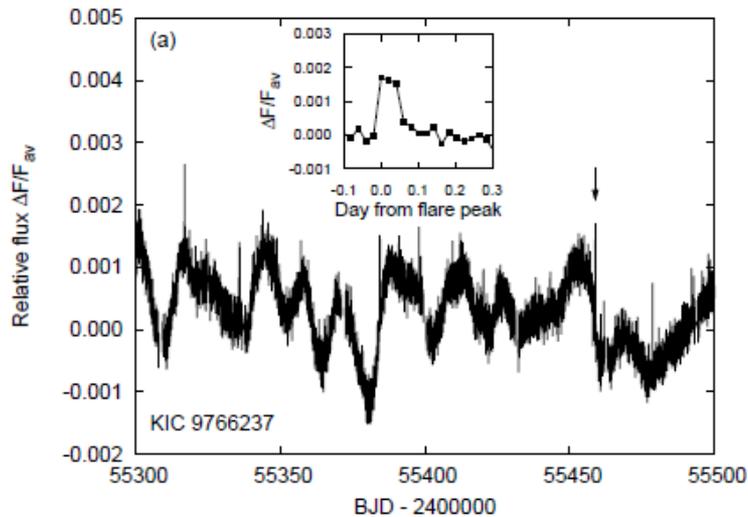
Верхняя группа – вспышки на звездах.
Нижняя – на Солнце.

Чтобы «накрутить» большое поле для большой группы пятен, Солнцу нужно около 40 лет, что больше длительности солнечного цикла. Поэтому не очевидно, что очень мощные вспышки могут происходить на Солнце.

Вращение и вспышки

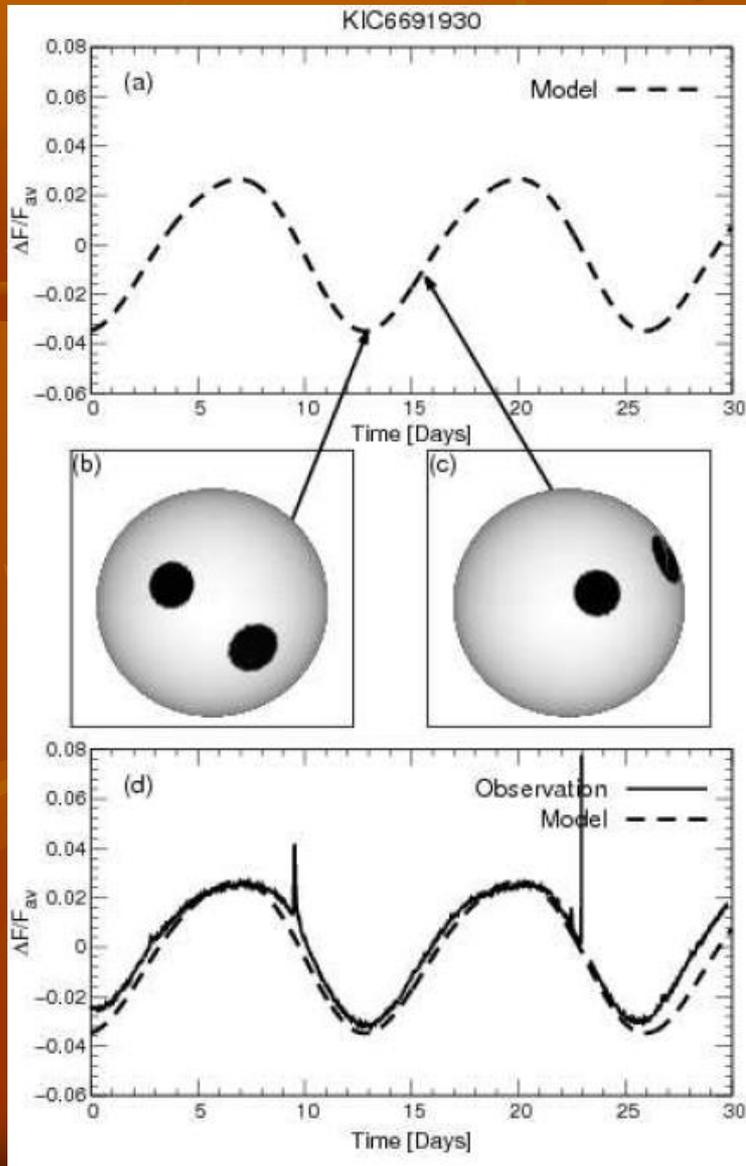


Вспышки на звездах с вращением, как у Солнца



Периоды вращения ~22 и 25 дней.
Магнитные поля 1-20 гаусс.
Это не молодые звезды. Одиночные.

Вспышки, пятна, вращение

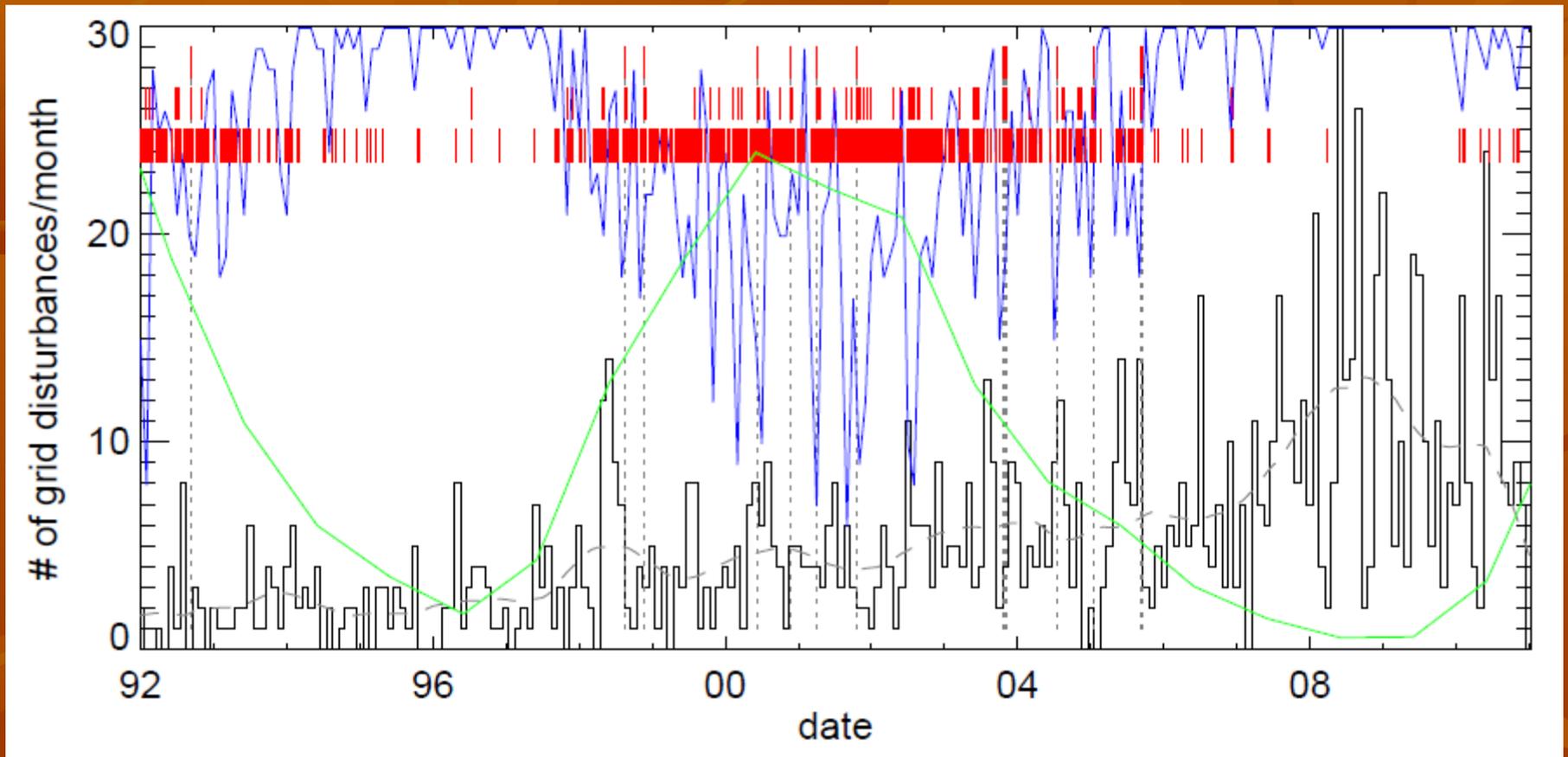


Данные по вспышкам на звездах позволяют строить модели.

Мощные вспышки могут происходить на Солнце раз в 1000 – 10000 лет.

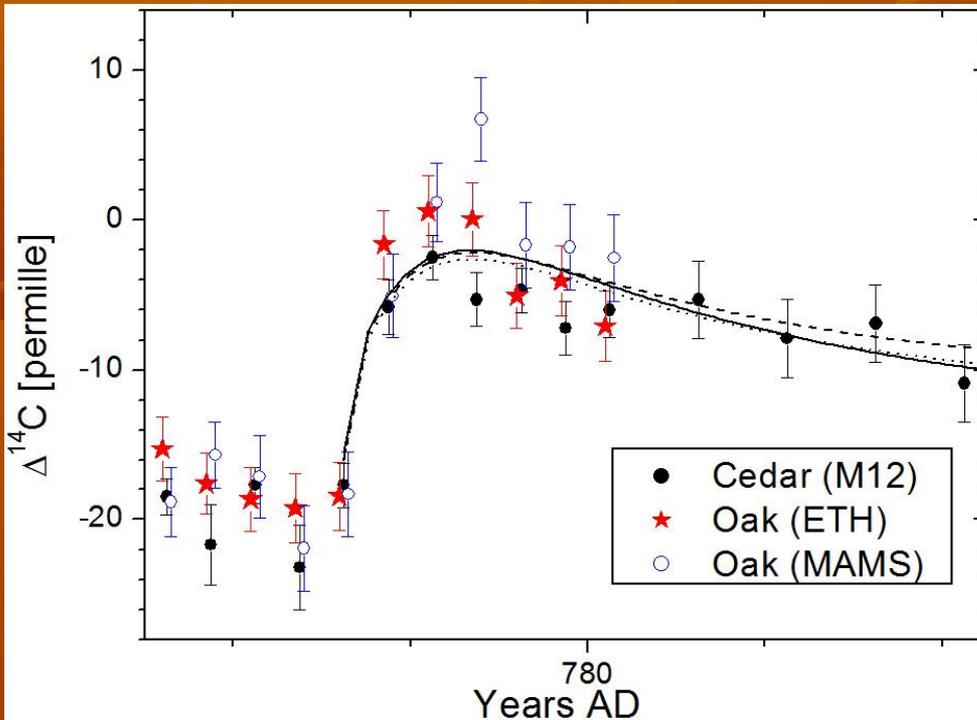
Выявить их наличие в прошлом трудно, т.к. существенно влияние они могут оказать только на электронику.

Воздействие на технику

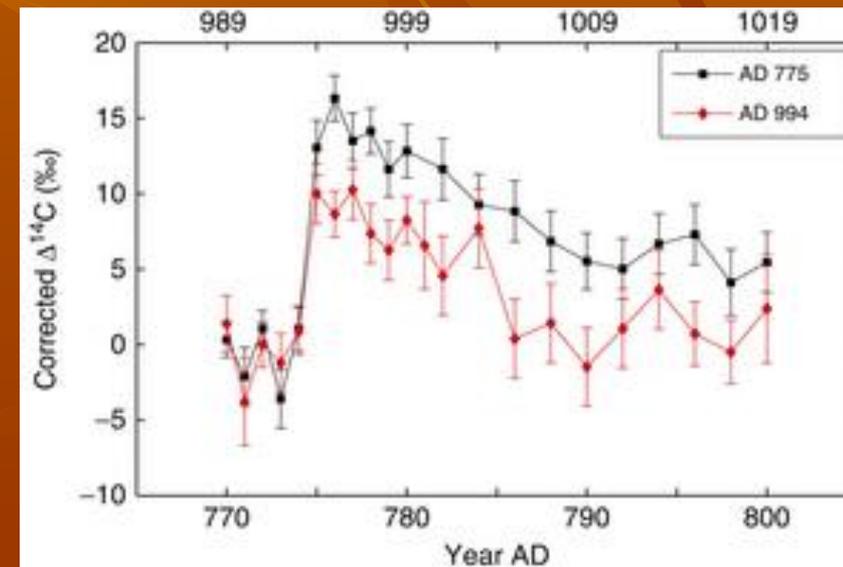


Примерно 4% возмущений в электросетях США связаны с солнечной активностью.

Вспышка в 8 веке?



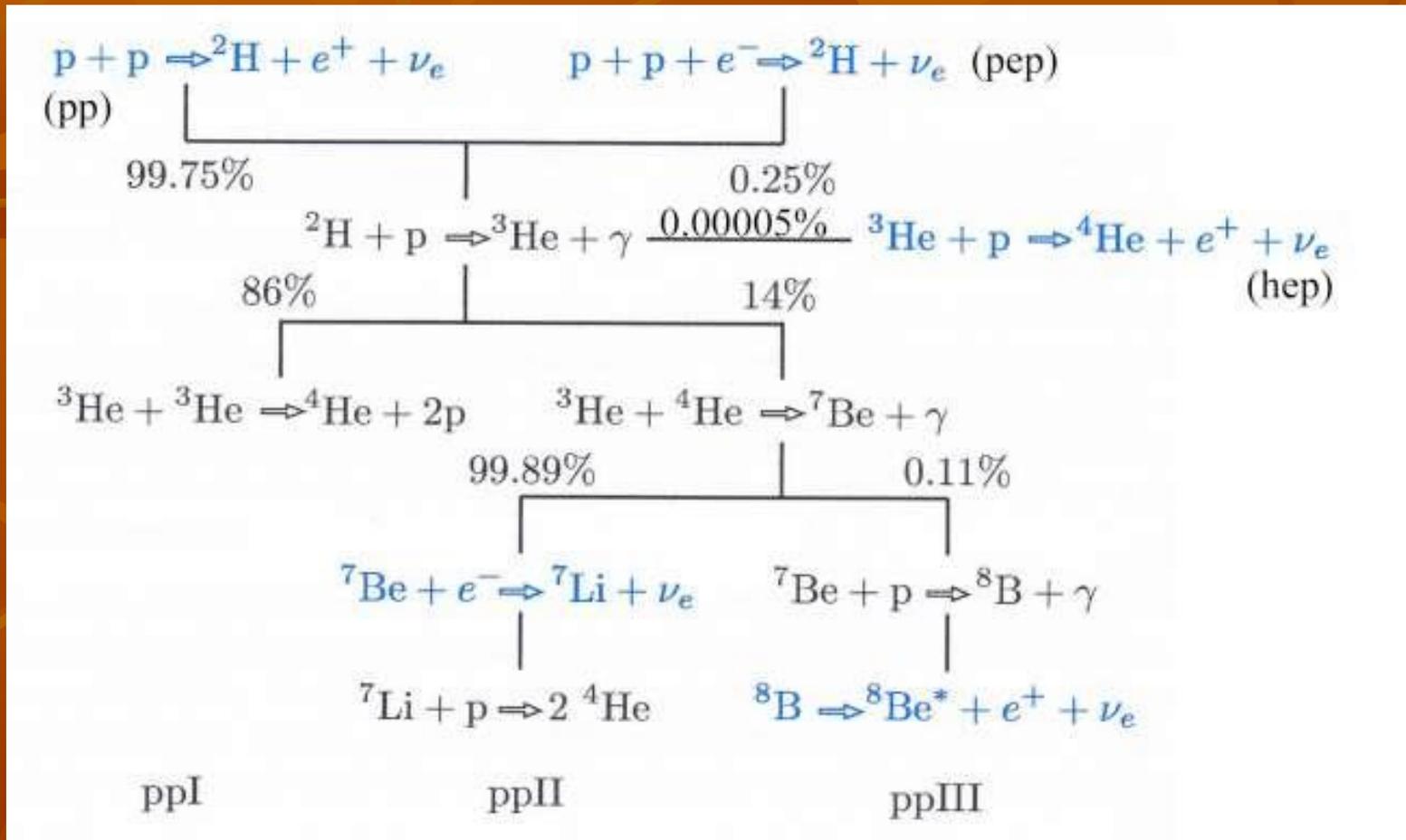
Анализ содержаний углерода-14 показывает, что в 774-775 гг. Была аномалия, которую можно связать с мощной солнечной вспышкой.



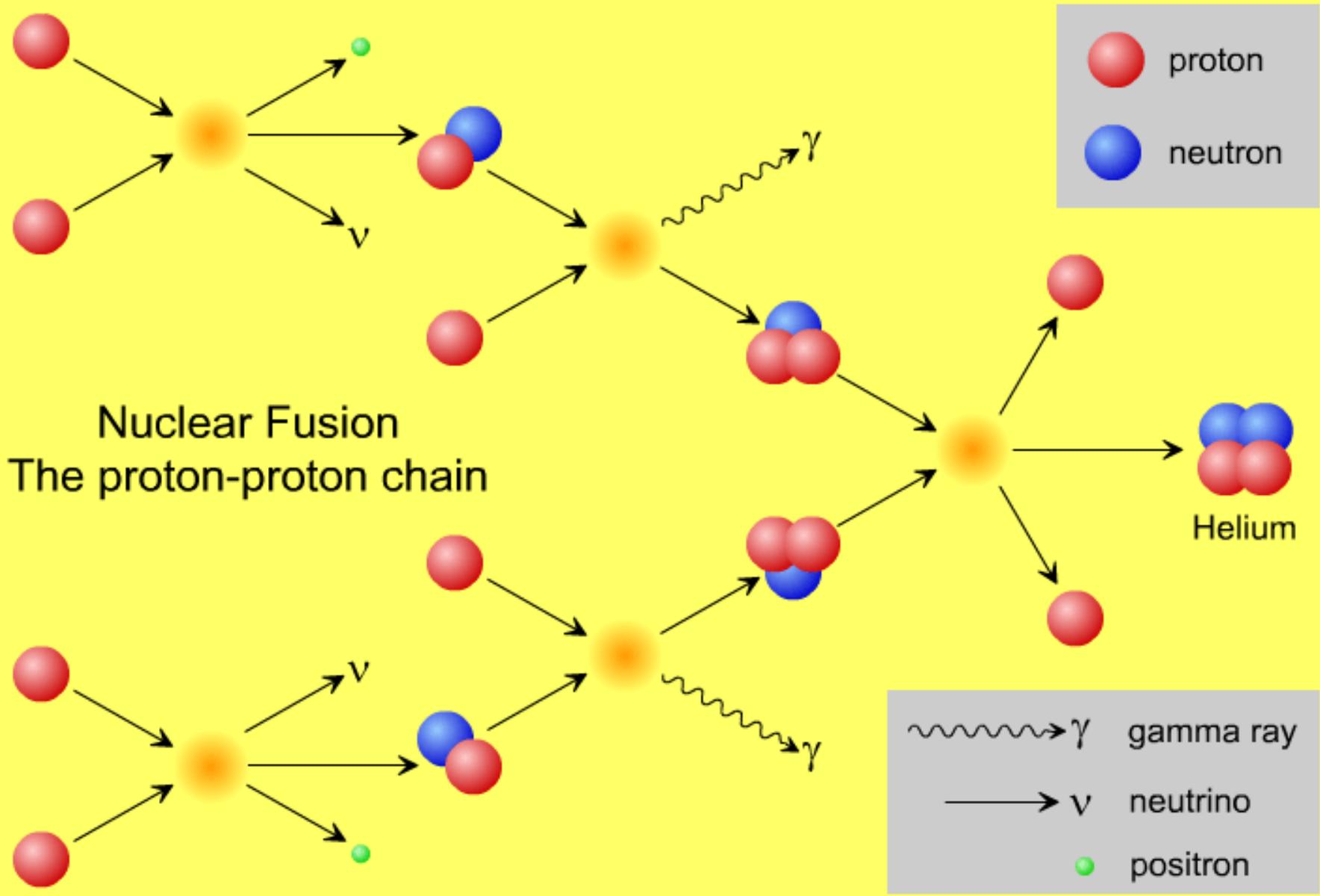
О механизме производства ^{14}C и его связи с солнечными вспышками см. 1408.2934 и <http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon-14>

Похожее, но более слабое событие могло произойти в 10 веке (994 г.).

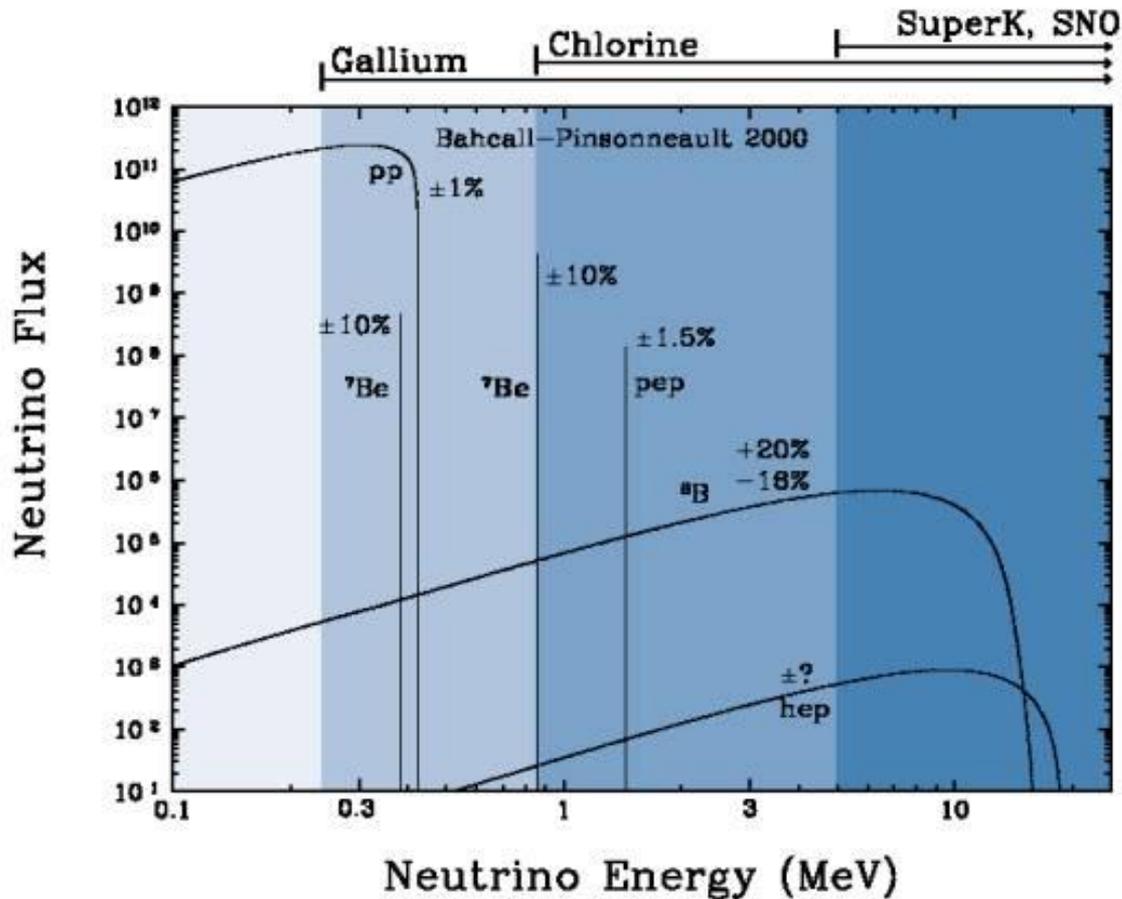
Солнечные нейтрино



В ряде термоядерных реакций часть энергии уносится нейтрино. Важно, что эти частицы свободно покидают Солнце. Т.е., они несут информацию об условиях в солнечных недрах «сейчас».



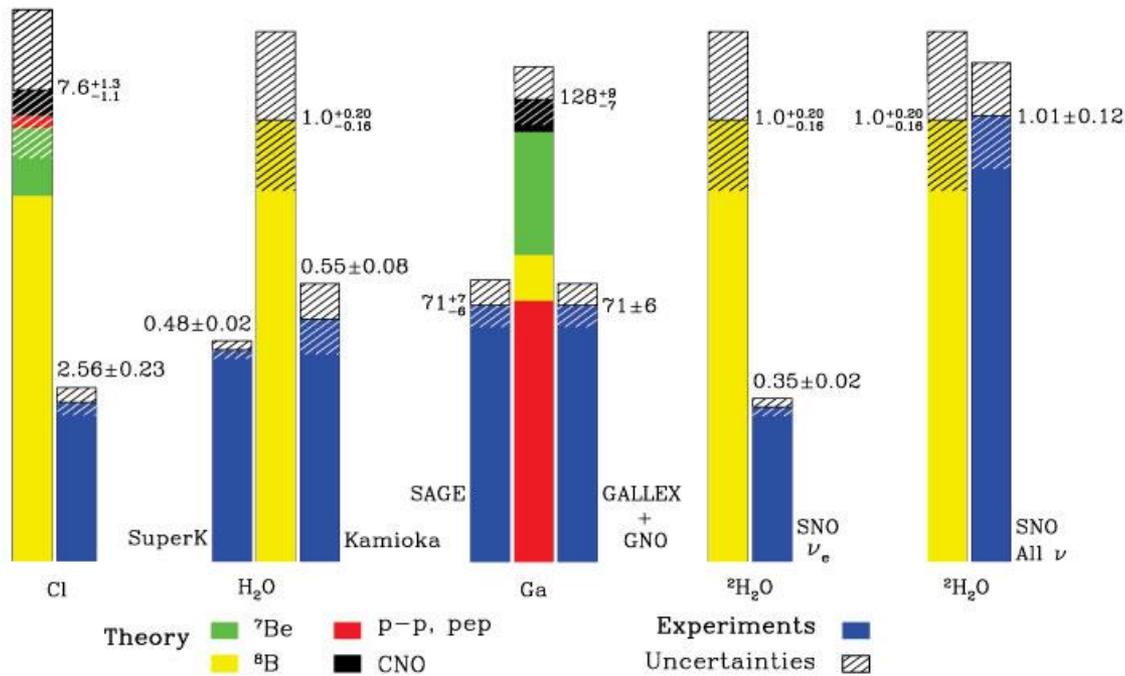
Регистрация нейтрино



Нейтрино очень трудно регистрировать. Особенно на низких энергиях. Не так уж давно удалось зарегистрировать солнечные pp нейтрино.

Проблема солнечных нейтрино

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2000



В течение ряда лет эксперименты показывали дефицит нейтрино.

Решение проблемы оказалось связано с нейтринными осцилляциями.

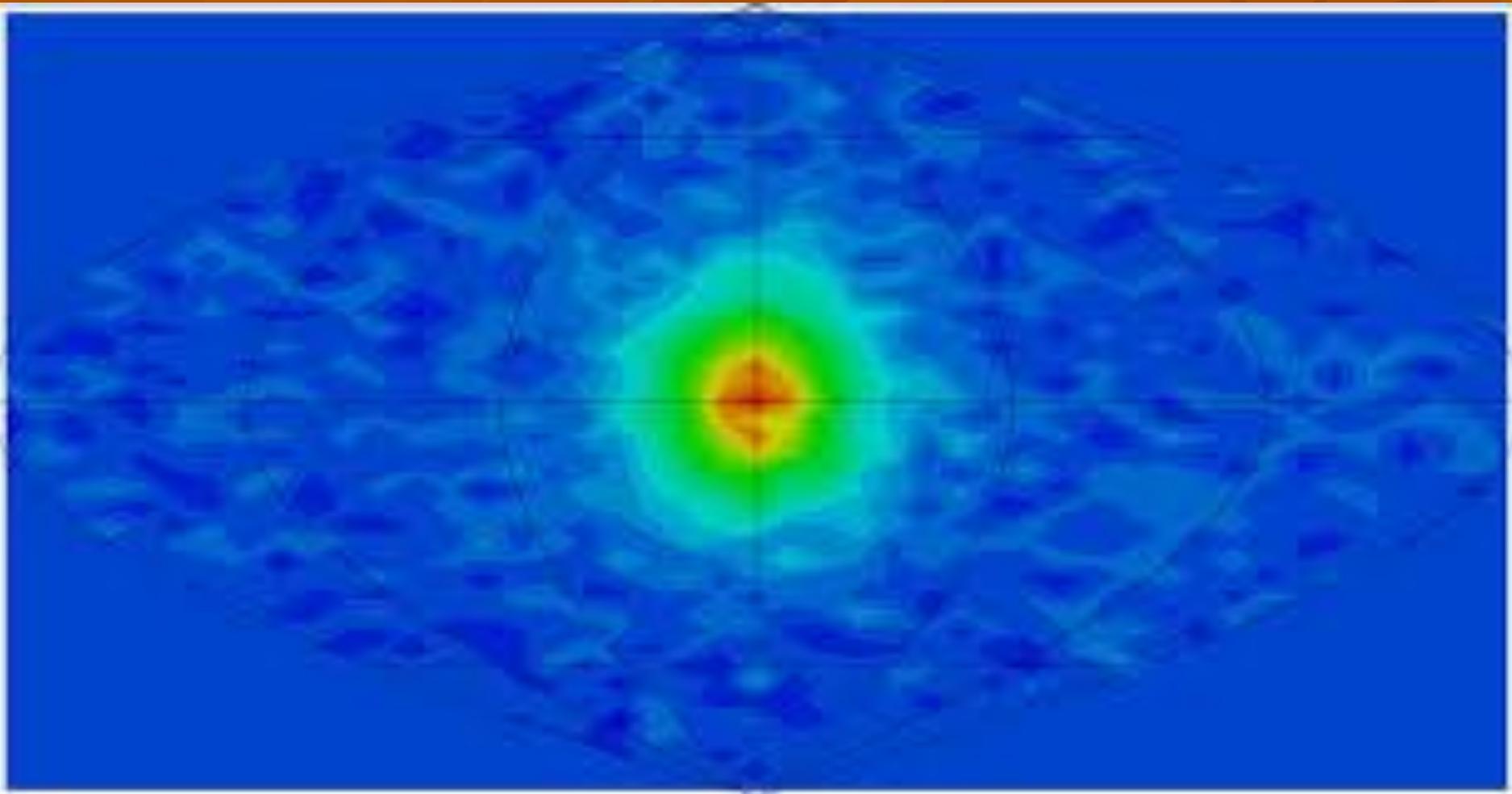
На пути к нам нейтрино разных типов могут превращаться друг в друга.

Это означает, что нейтрино имеют массу.

Нобелевская премия 2015 года!

Превращения ($E > 5$ МэВ) в основном происходят в недрах Солнца за счет эффекта MSW.

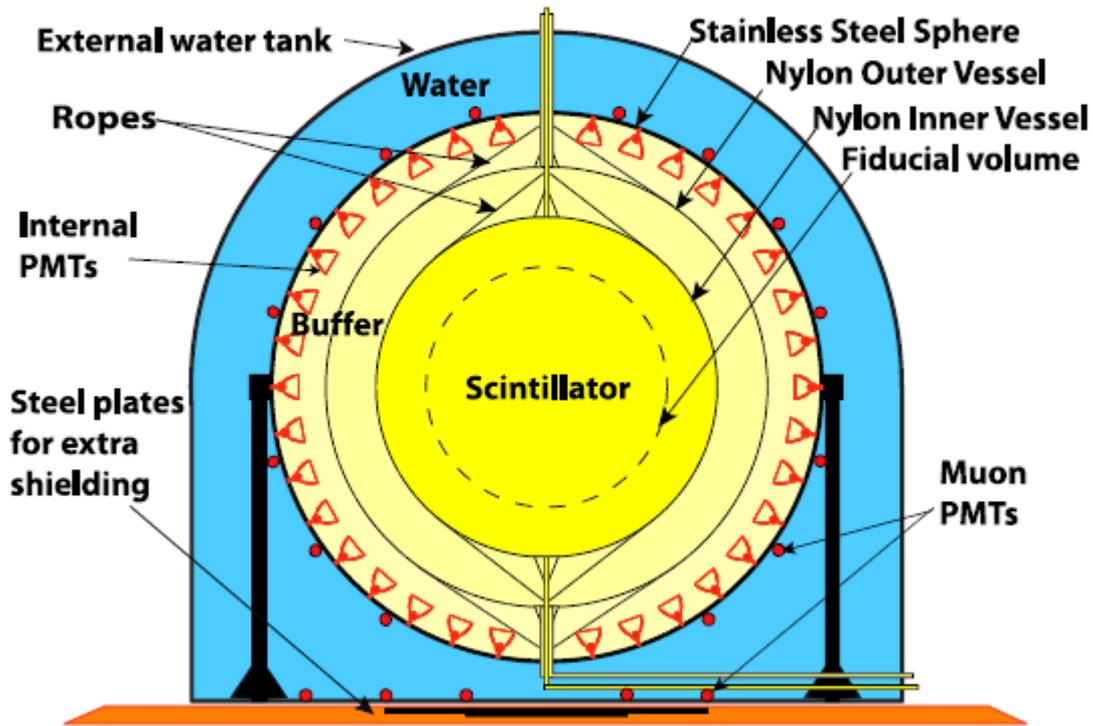
Нейтринное изображение Солнца



Super-Kamiokande

Борексино

Borexino Detector

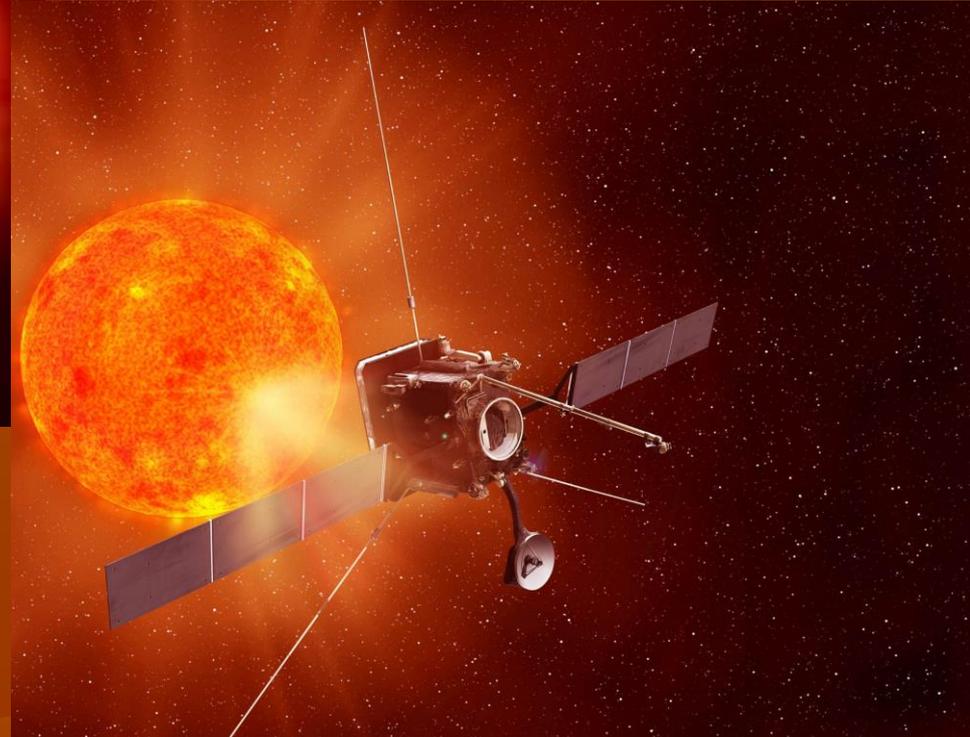


Благодаря достижению очень низкого уровня шума на энергиях ниже 1 МэВ впервые удалось увидеть нейтрино от pp-реакции.

Пока не видны реакции от CNO-цикла....

Новые спутники

Parker Solar Probe (2018-...)



Solar Orbiter (2020-...)

