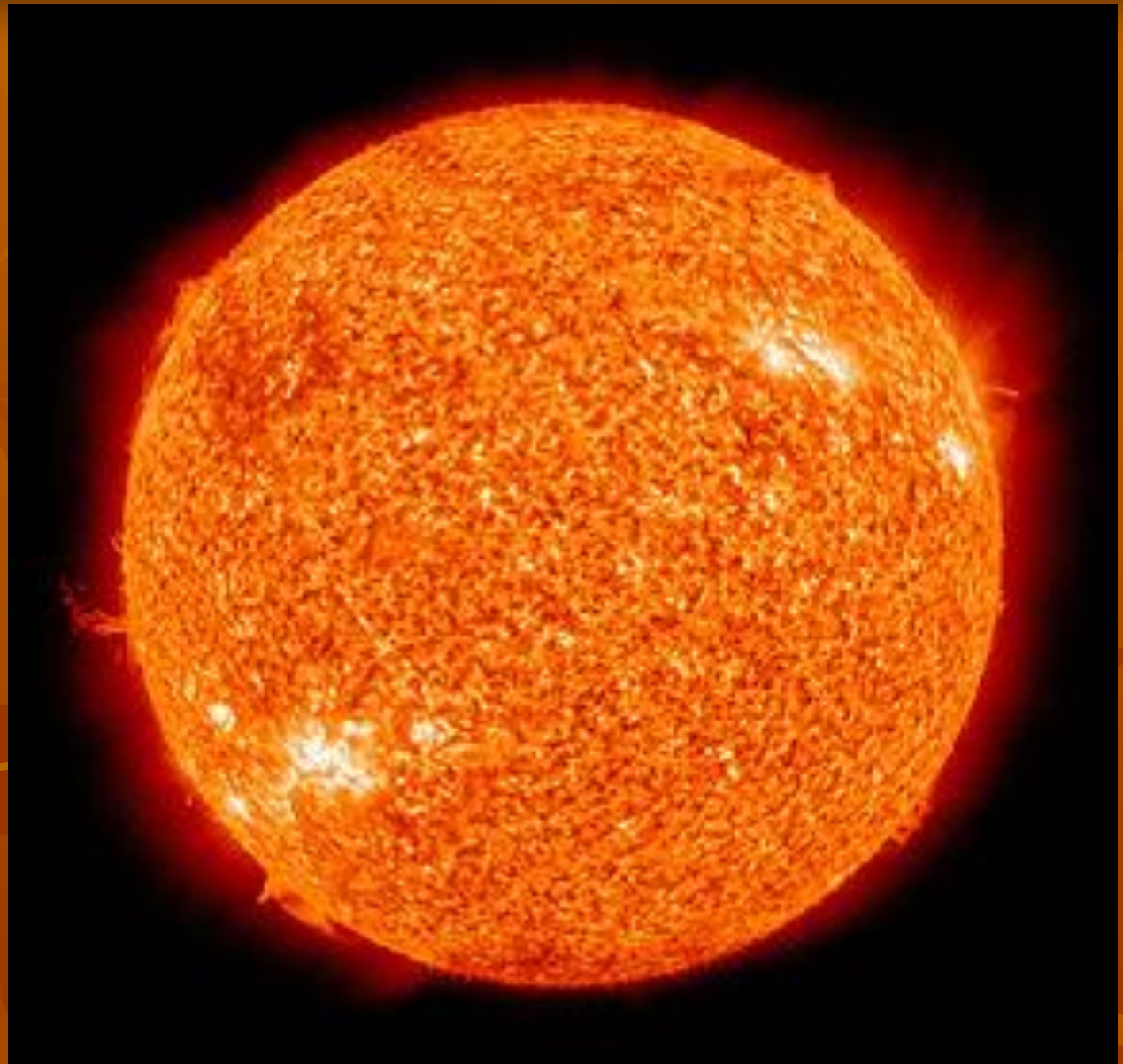
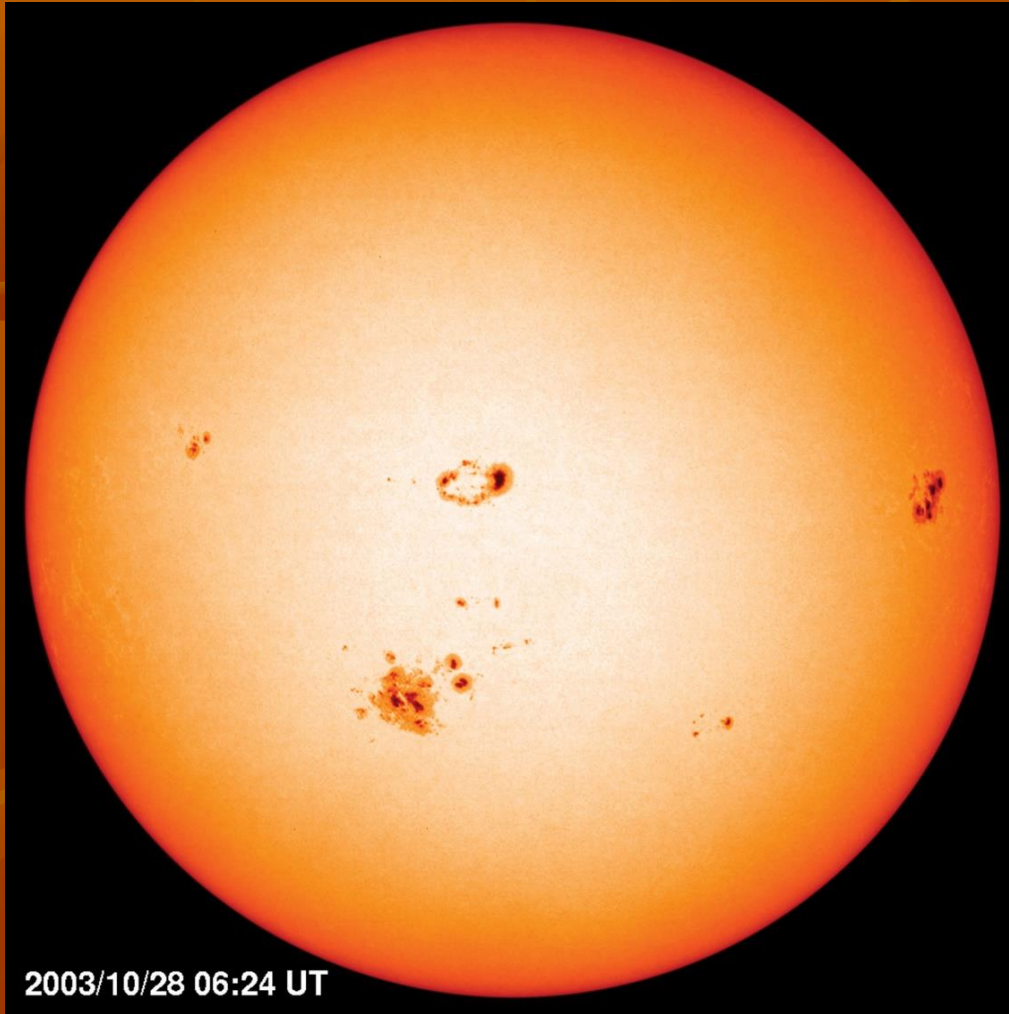


# Солнце

Сергей Попов  
(ГАИШ МГУ)

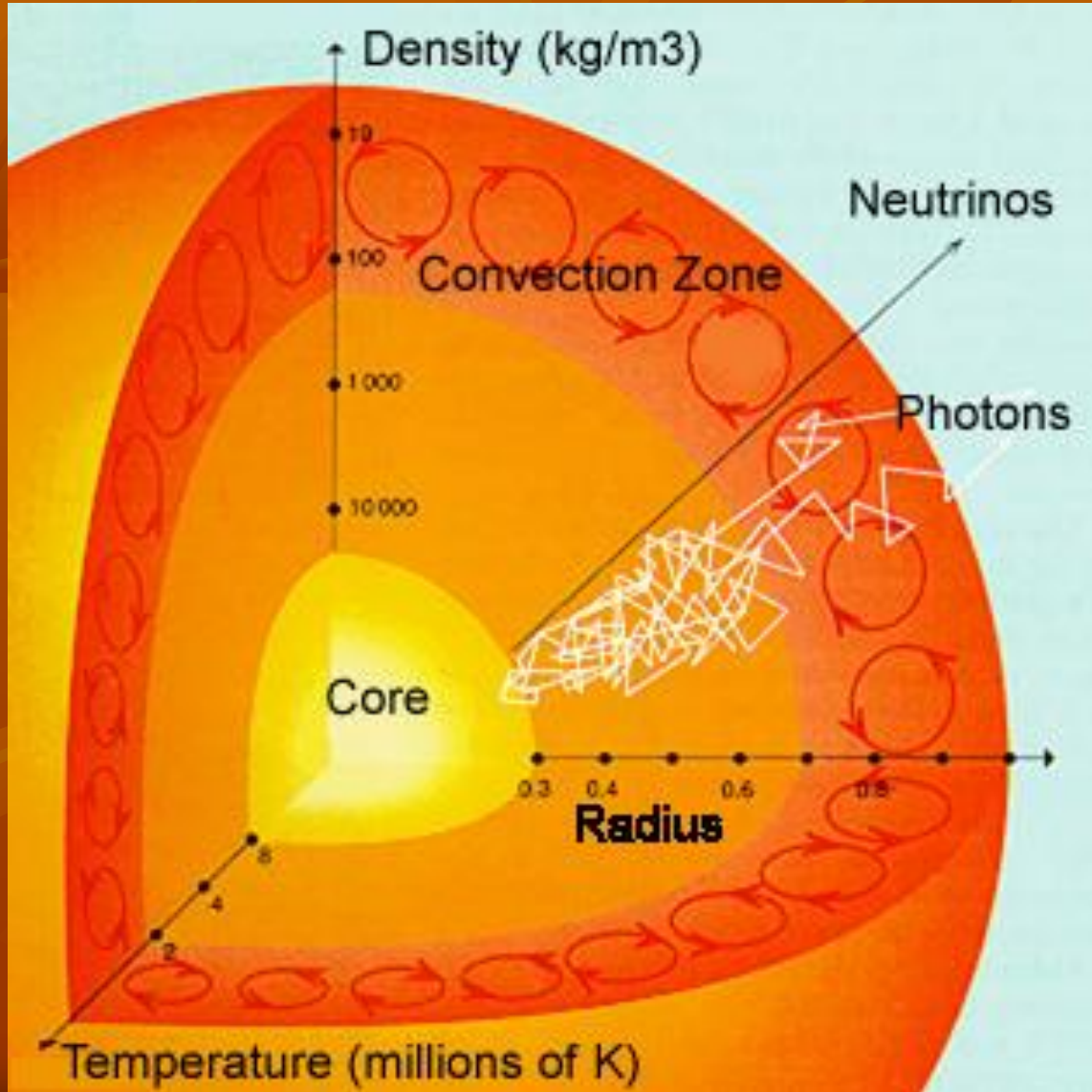


# Основные параметры



Масса	$1.99 \cdot 10^{33}$ г
Светимость	$3.86 \cdot 10^{33}$ эрг/с
Радиус	690000 км
Средняя плотность	$1.4$ г/см <sup>3</sup>
Плотность в центре	$\sim 100$ г/см <sup>3</sup>
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

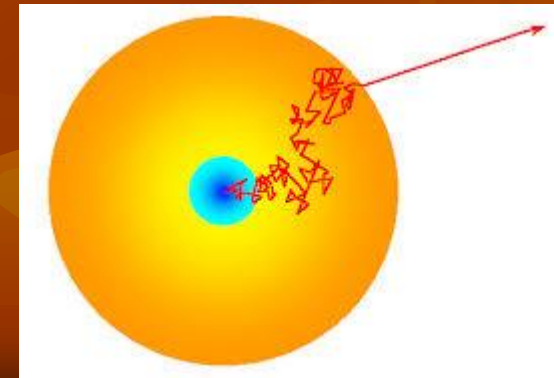


Ядро – термоядерное горение.

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.

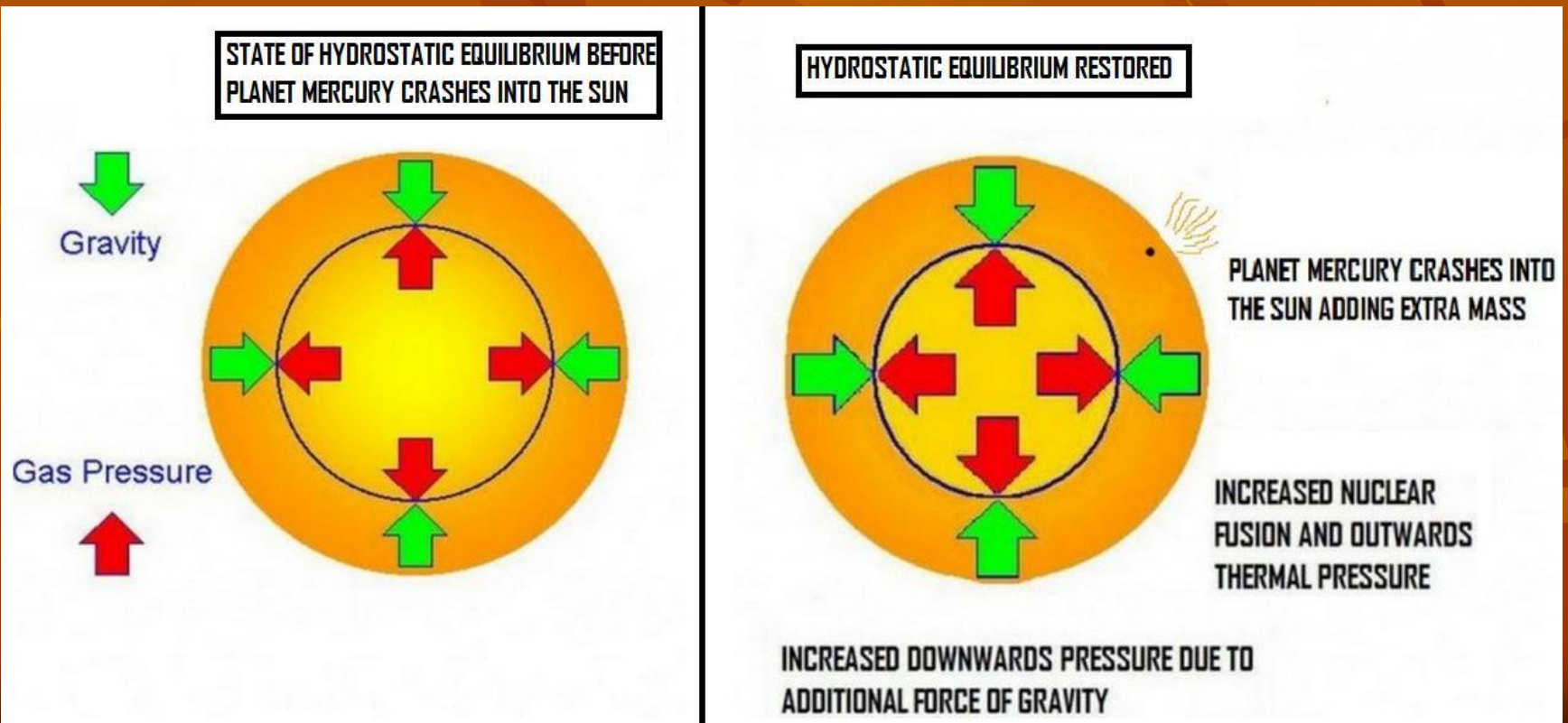
«Отрицательная теплоемкость».

При нагреве Солнца оно расширяется и остывает.

При охлаждении – сжимается и нагревается.

Это общее свойство систем в равновесии при участии гравитации.

Теорема вириала.

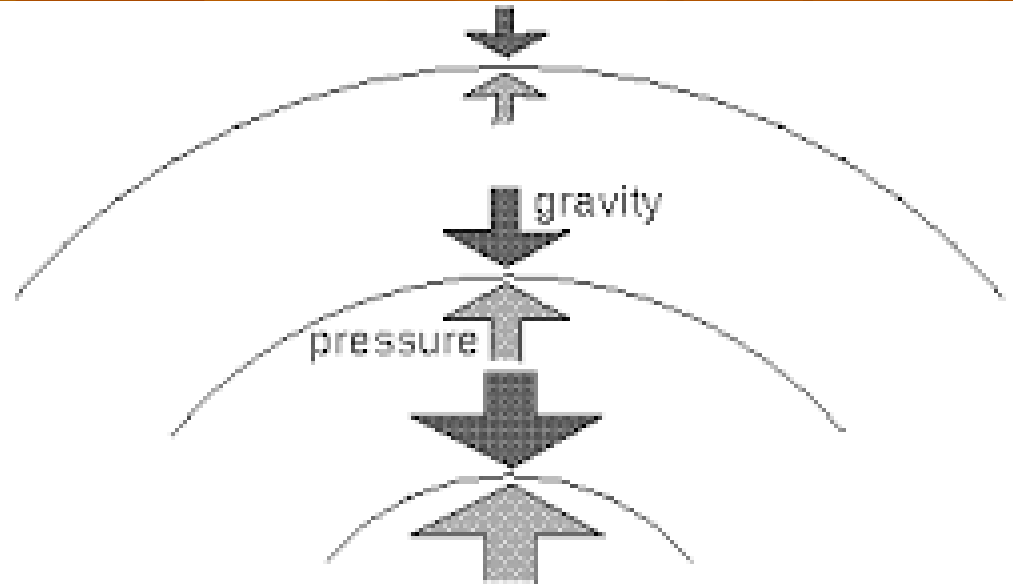


# Гидростатическое равновесие

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

or,

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

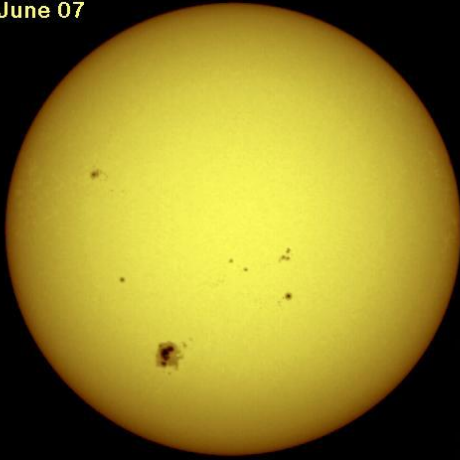


Deeper layers have more gravity compression, so they have greater outward pressure to compensate.

Устойчивость Солнца обеспечивается равновесием между гравитацией и градиентом давления.

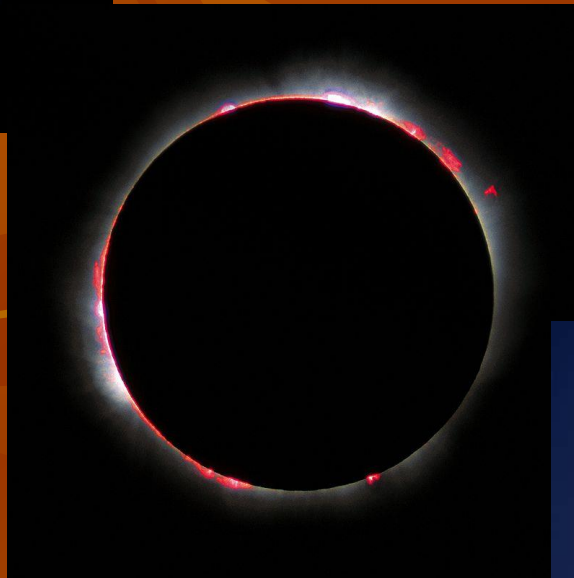
# Внешняя структура Солнца

1992 June 07



Фотосфера

Это, собственно, видимый диск



Хромосфера

0.0001 плотности фотосферы

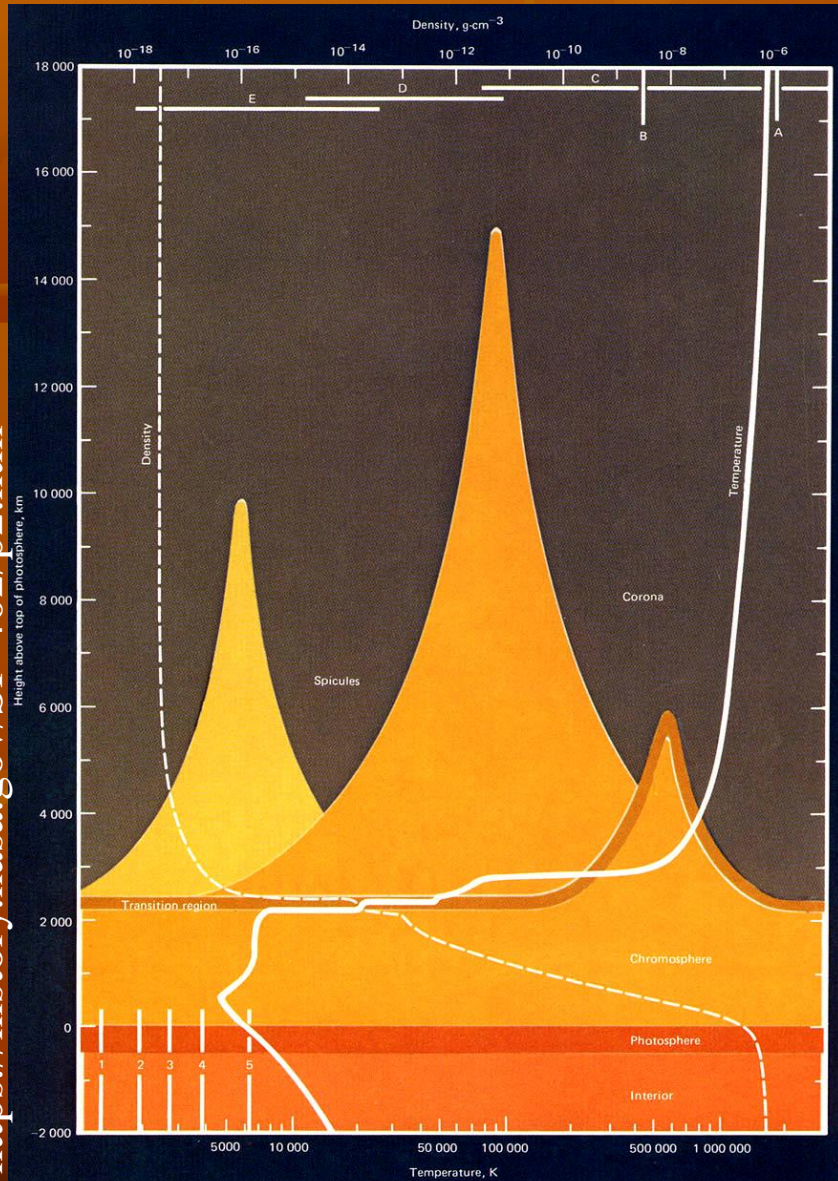
Корона

Разреженная, но  
очень горячая.

Видна по время затмений.



# Внешние слои: свойства

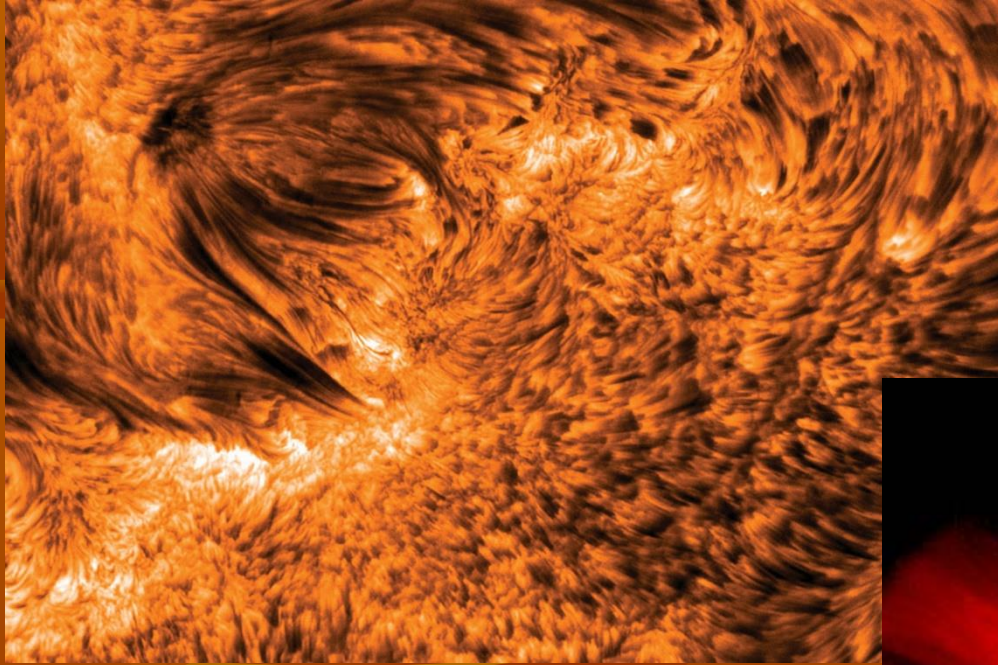


Фотосфера имеет толщину около 400 км.

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

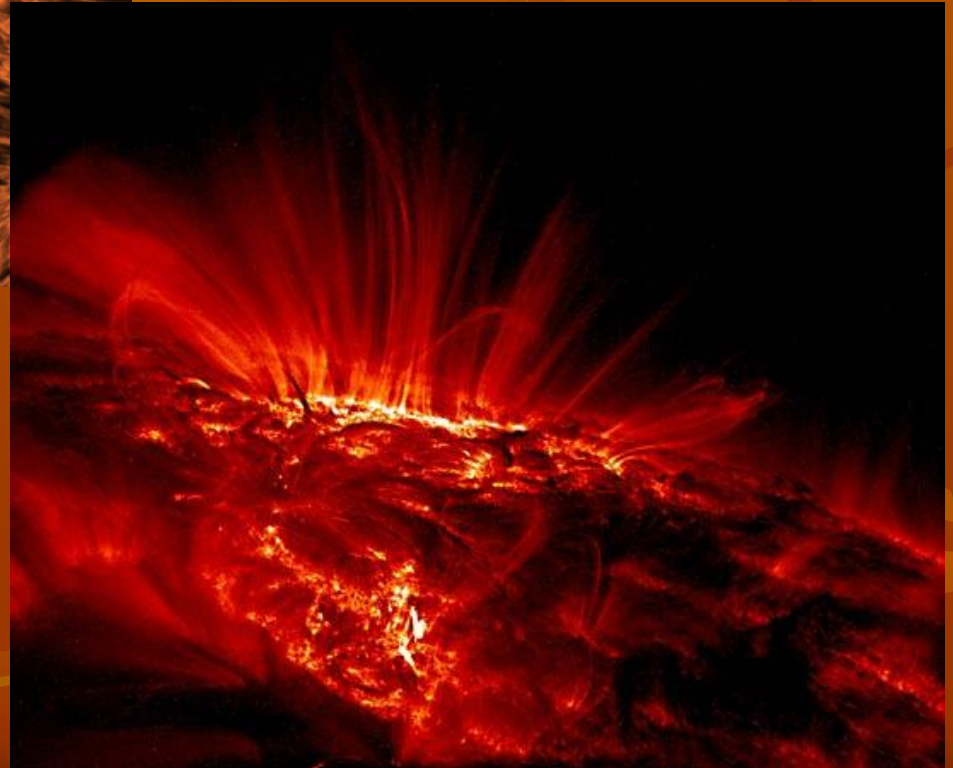
Корона имеет размер порядка  
нескольких миллионов километров.  
Температура там - несколько млн. градусов.

# Солнечные пятна



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

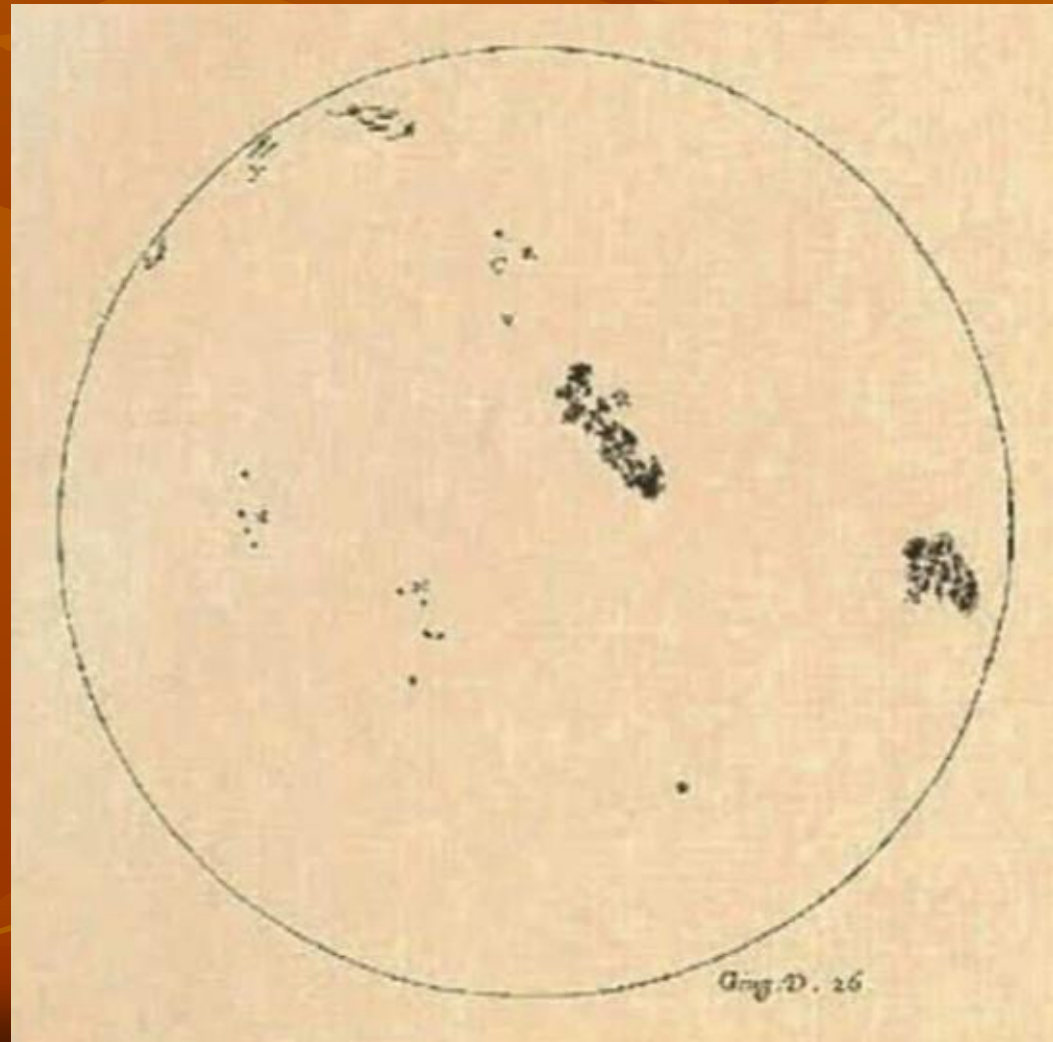
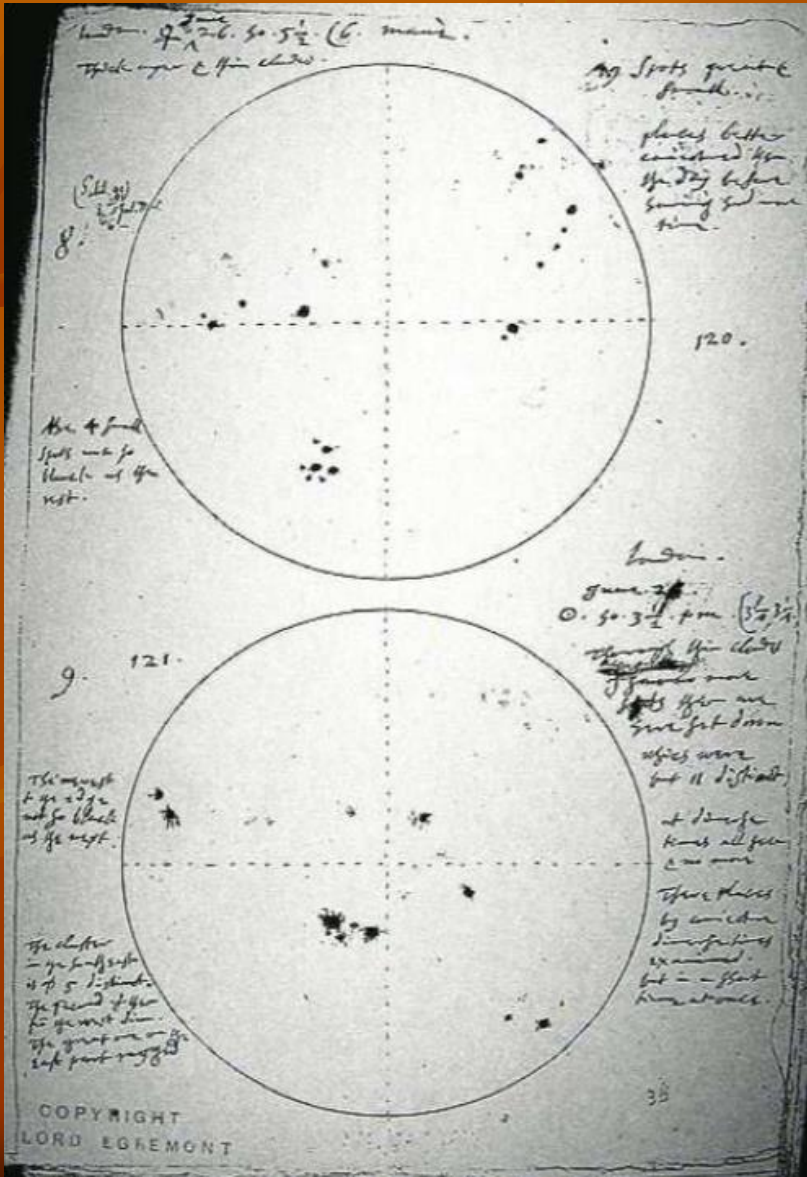
В области пятен подавлен подвод тепла.  
Это связано с более сильным  
магнитным полем.



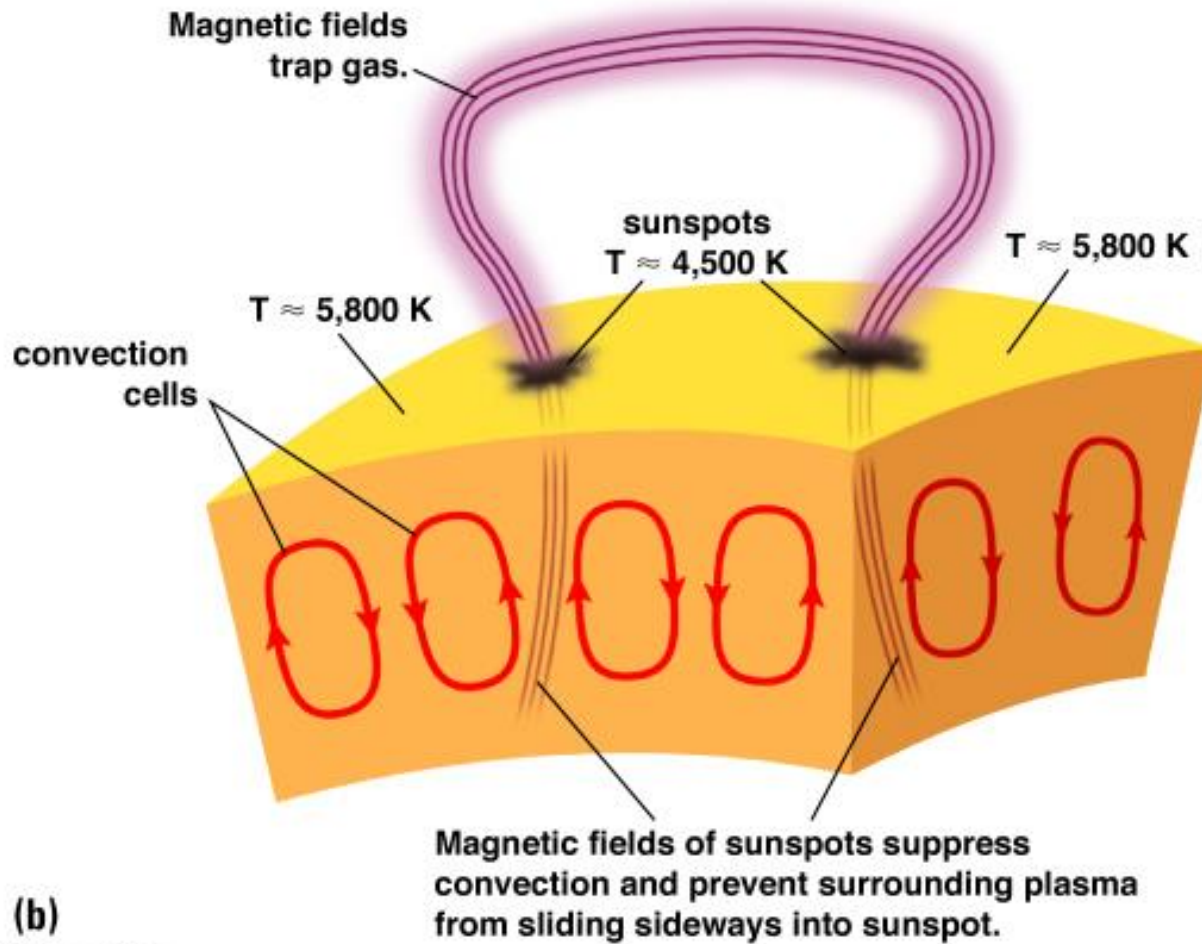


# Открытие пятен

Томас Гарриот и Галилео Галилей в 1610 году



# Пятна и магнитные поля

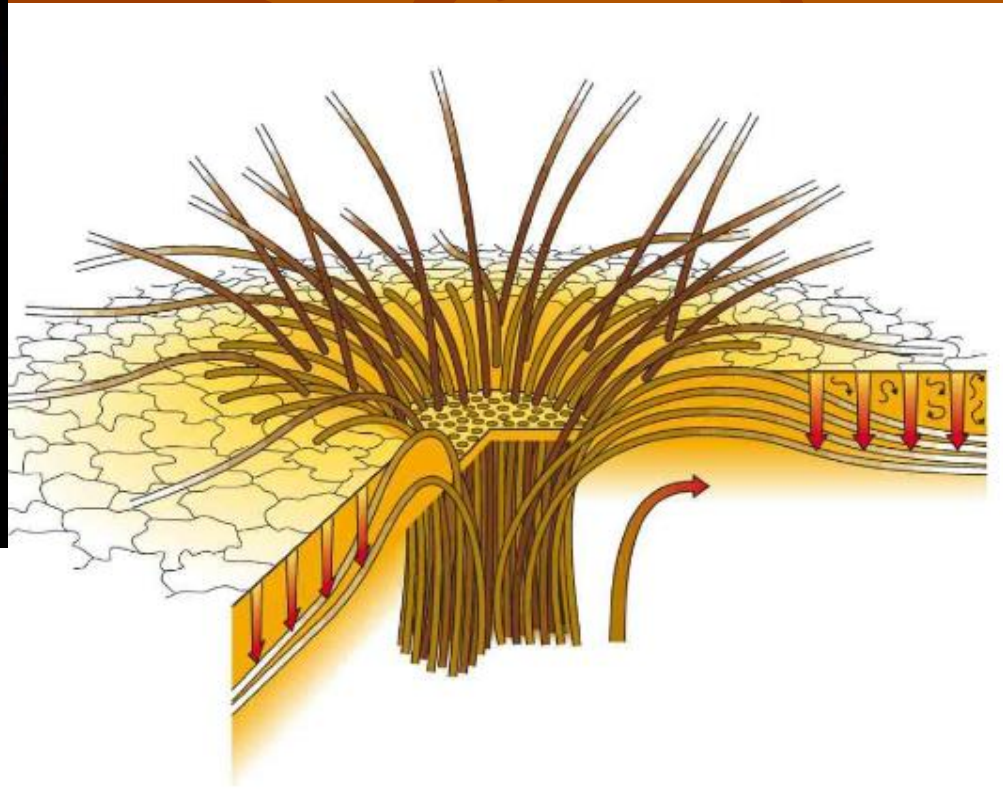
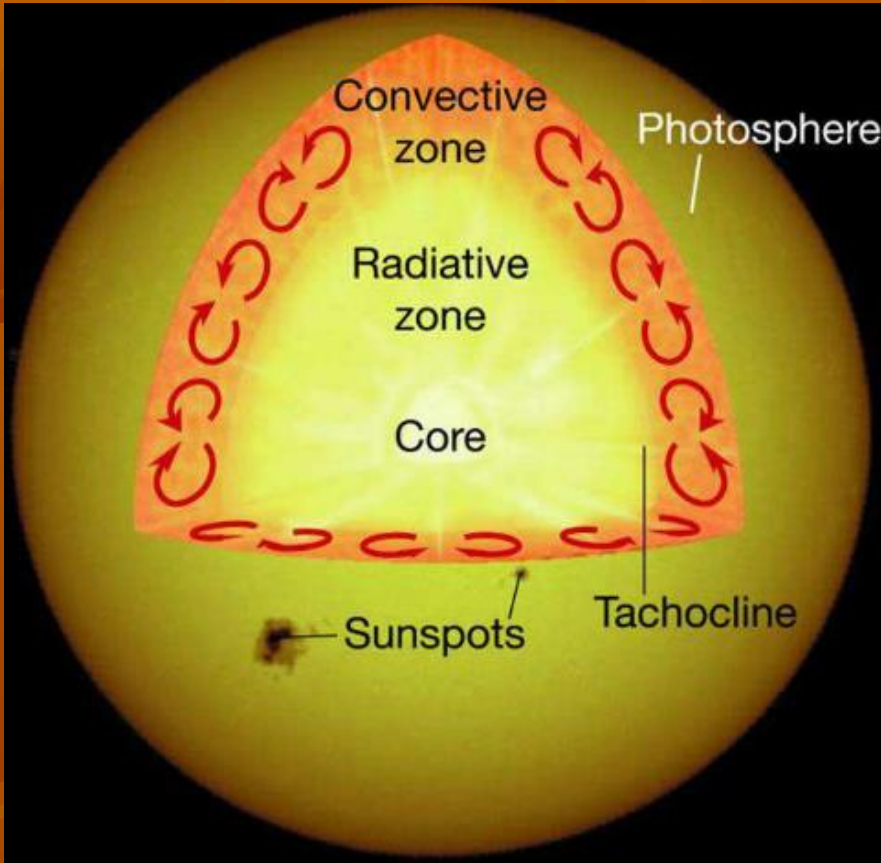


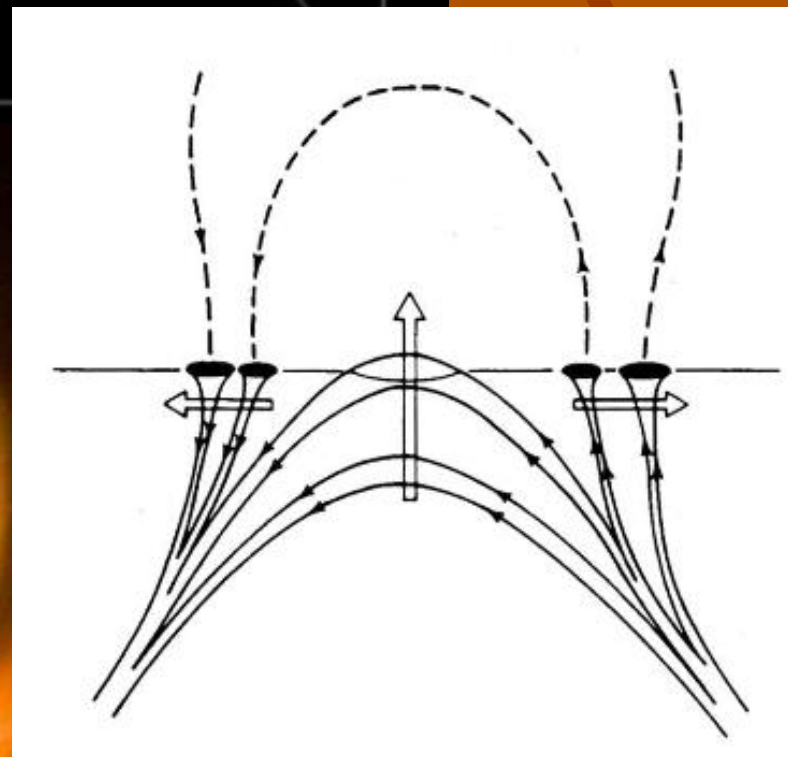
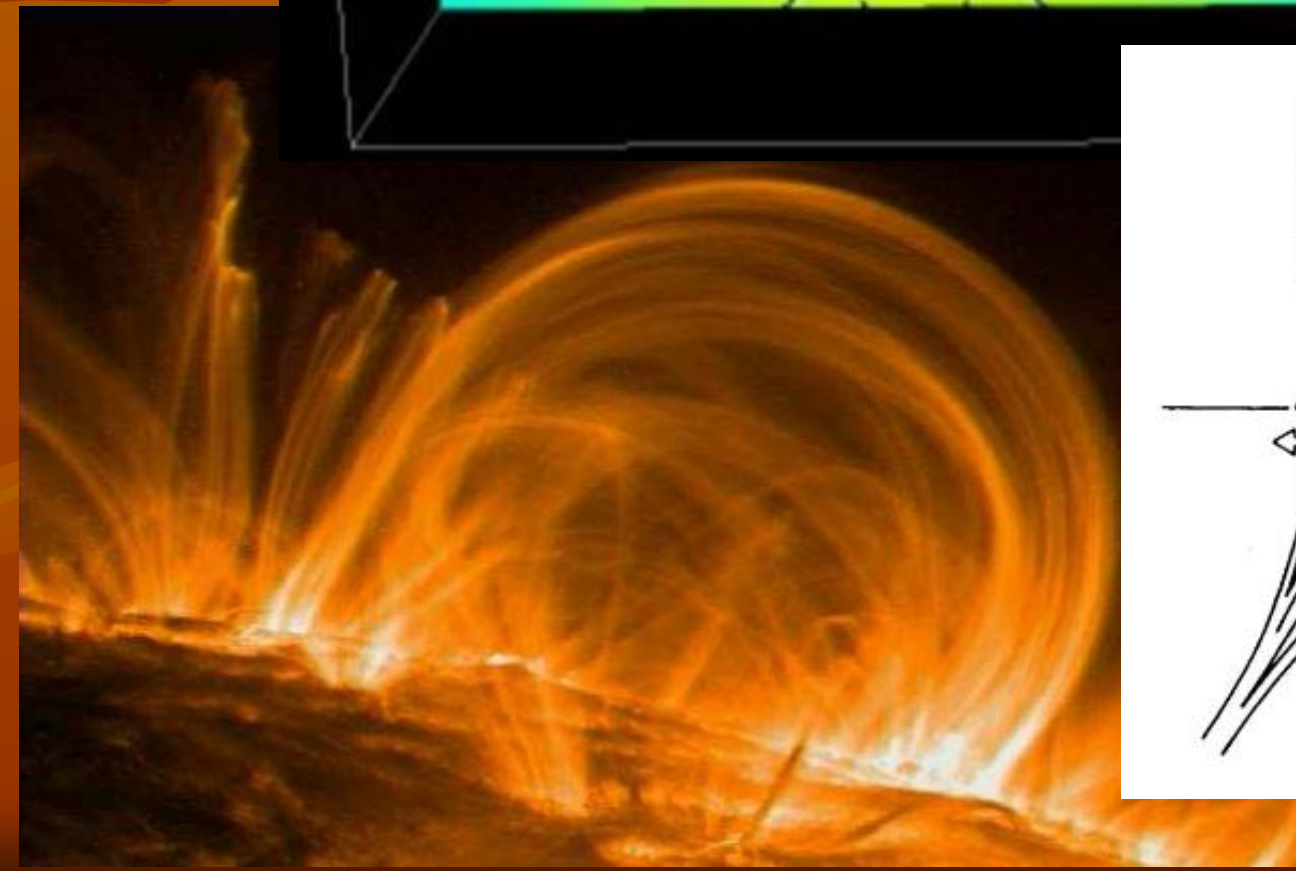
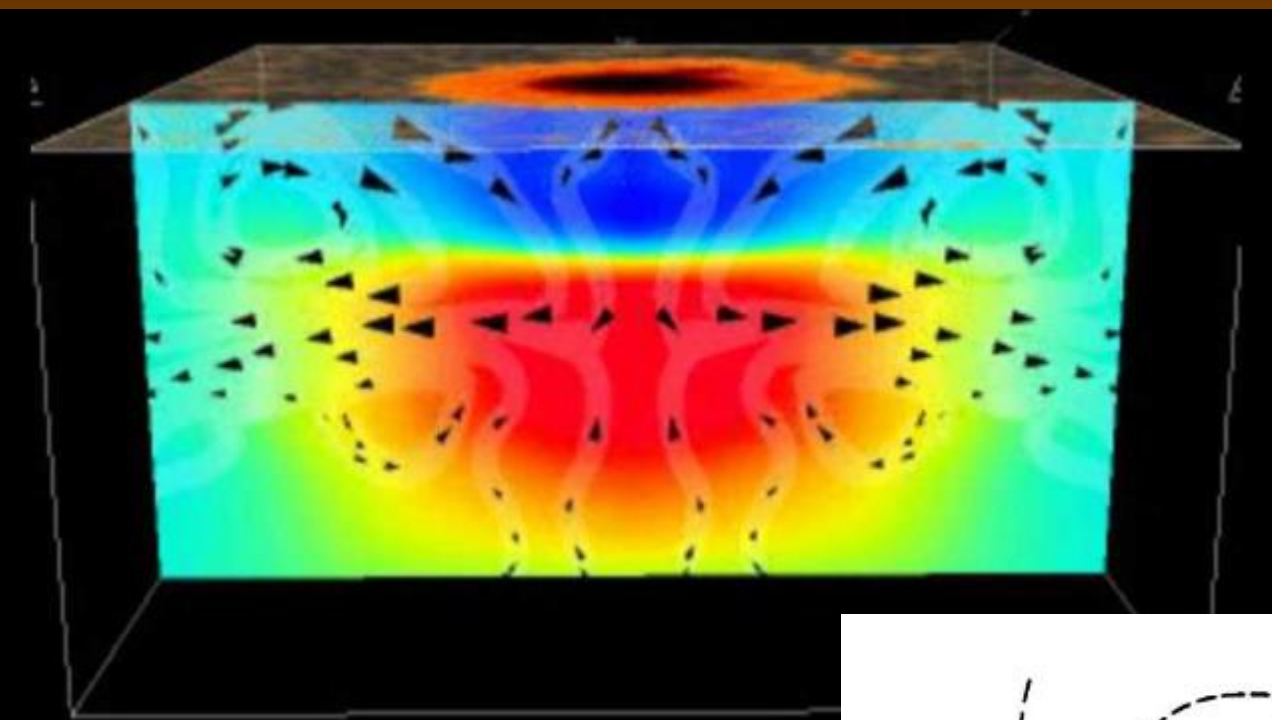
(b)

Copyright © Addison Wesley

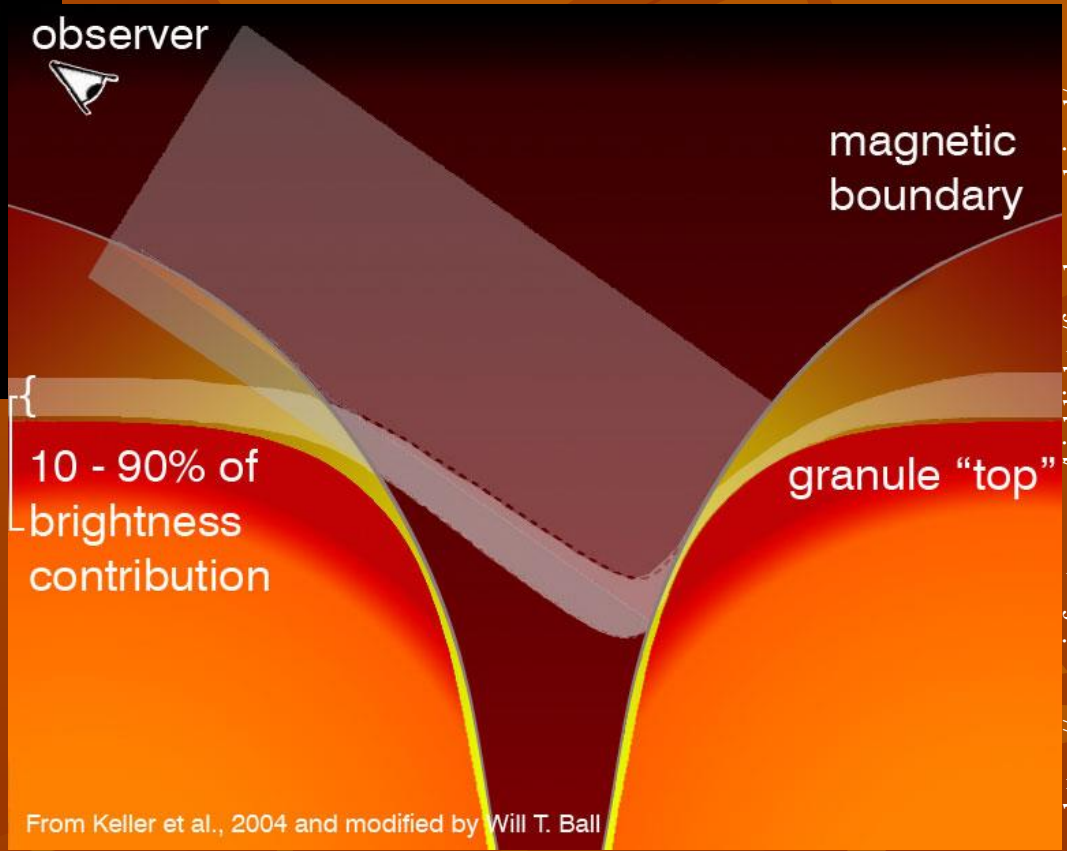
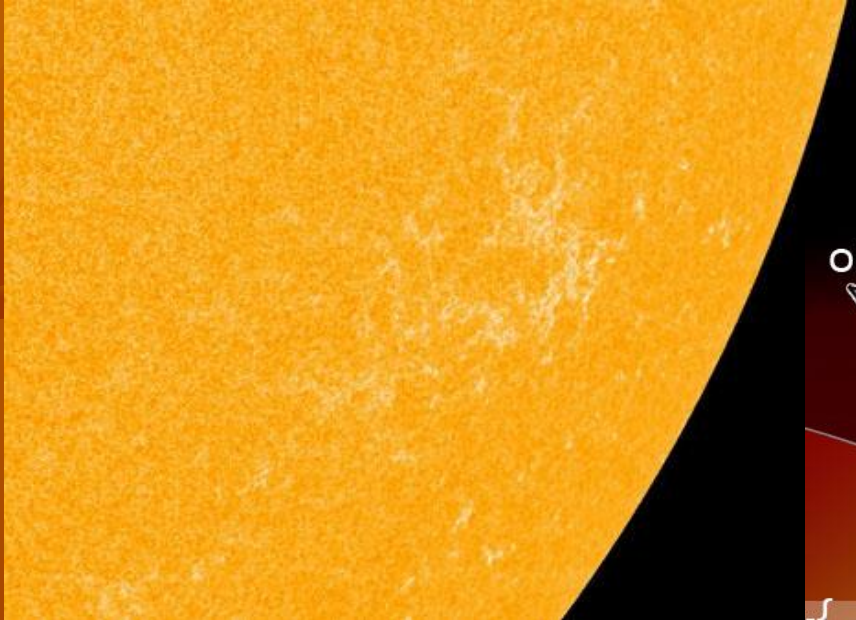
Сильные магнитные поля подавляют конвективный подвод тепла в области пятен.

# Роль магнитных полей





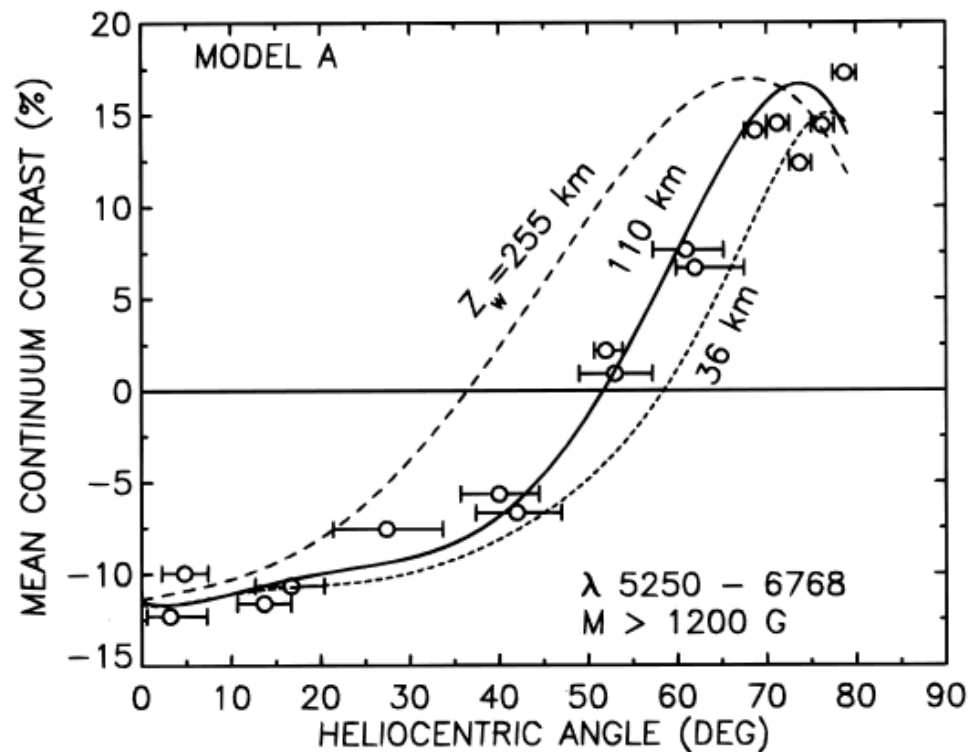
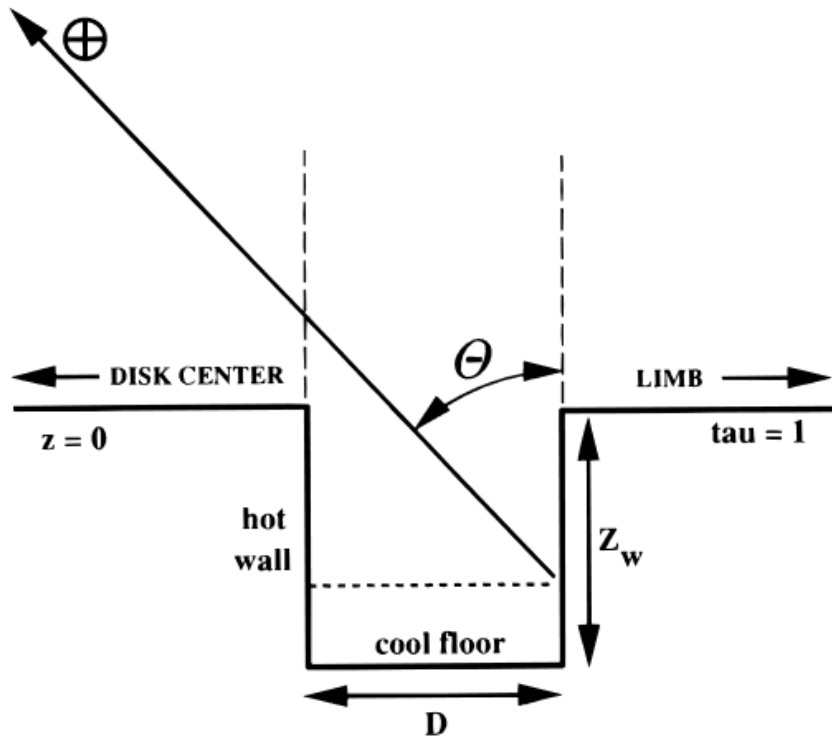
# Факельные поля



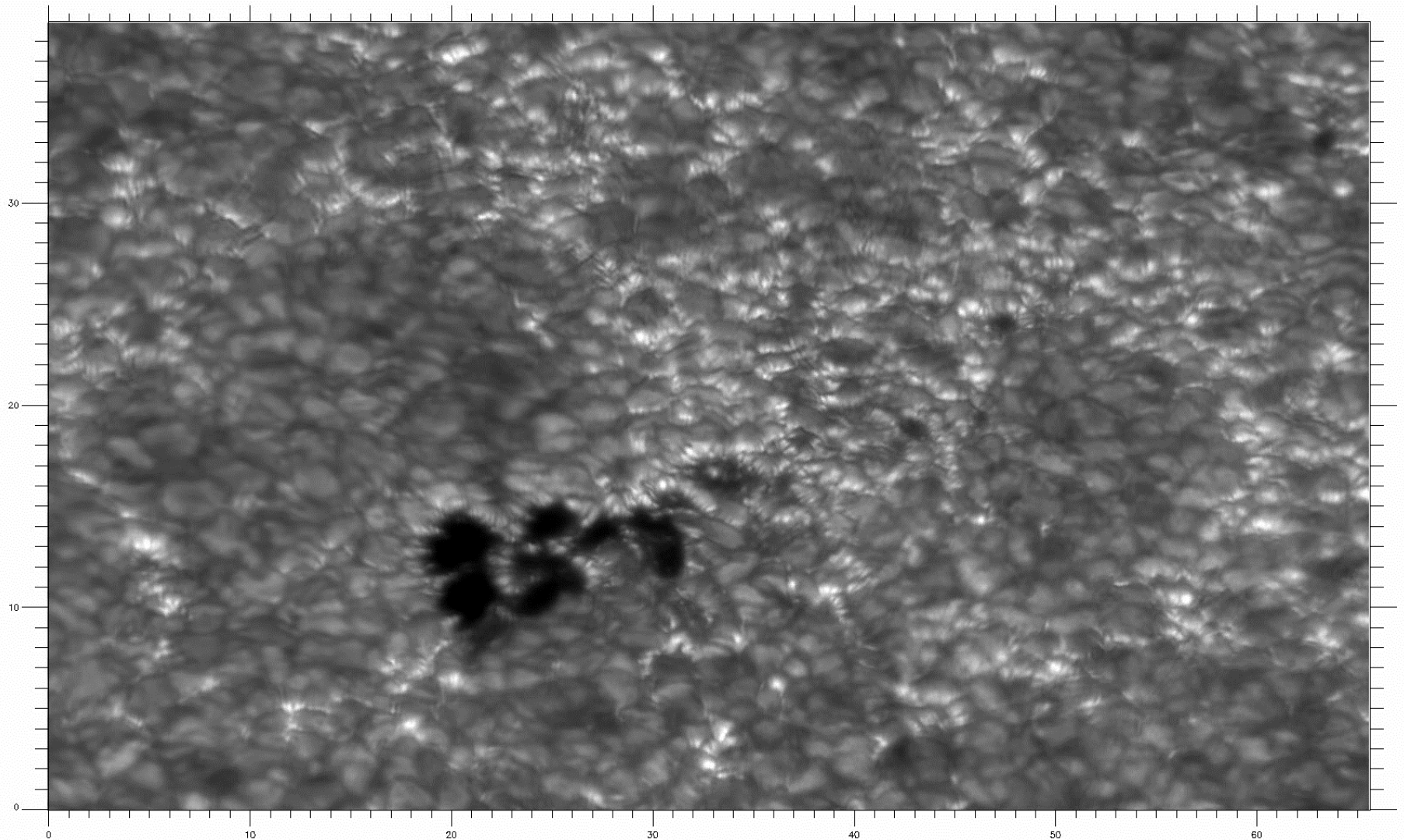
Сильное магнитное поле уменьшает плотность газа в области между гранулами, что приводит к повышению прозрачности и позволяет видеть более глубокие и горячие слои.

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

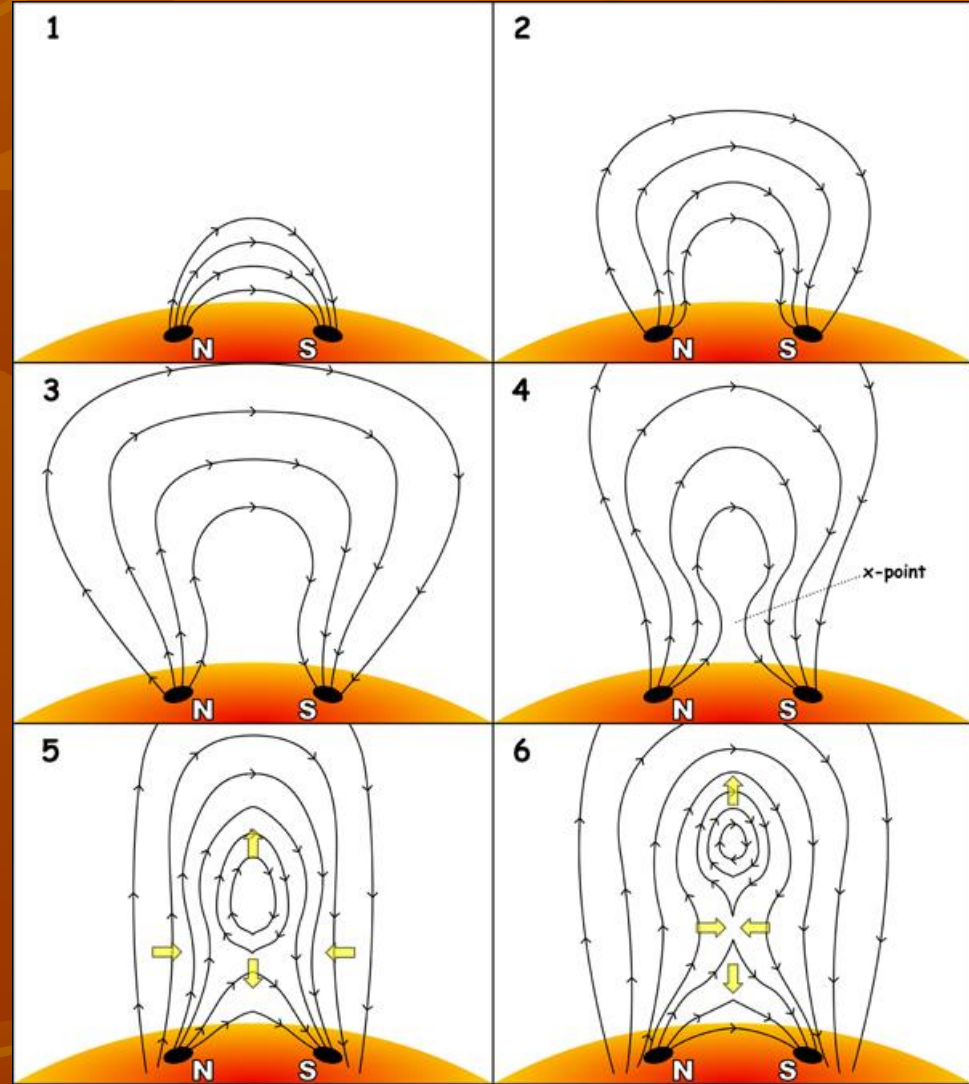
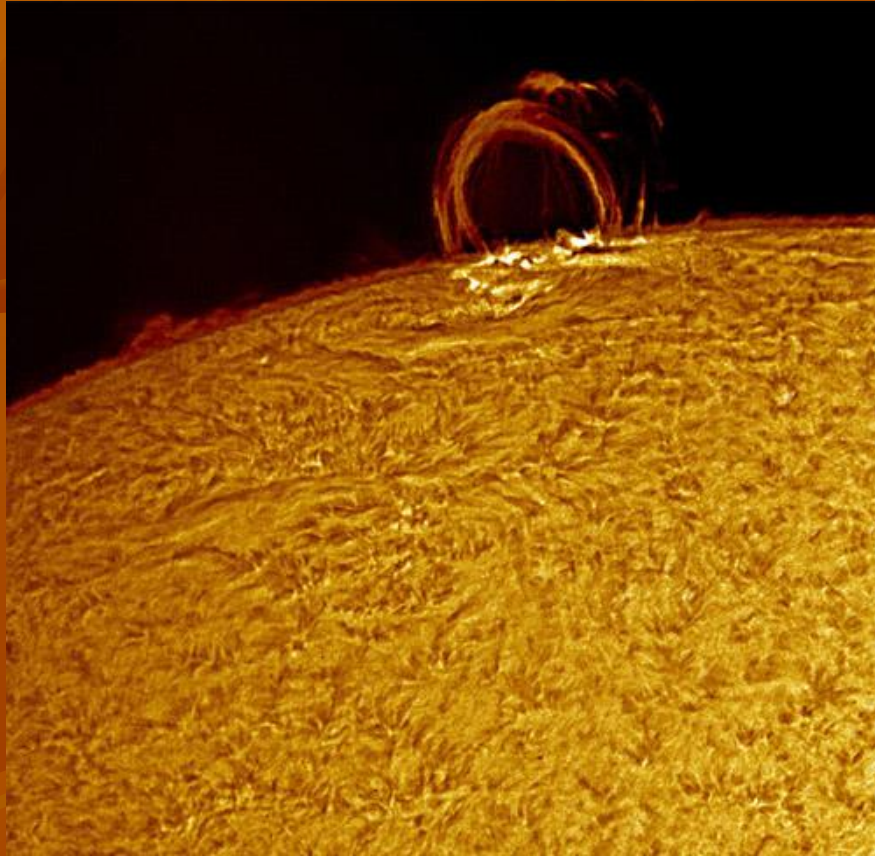
# Модель факельных полей



# Солнечные факелы



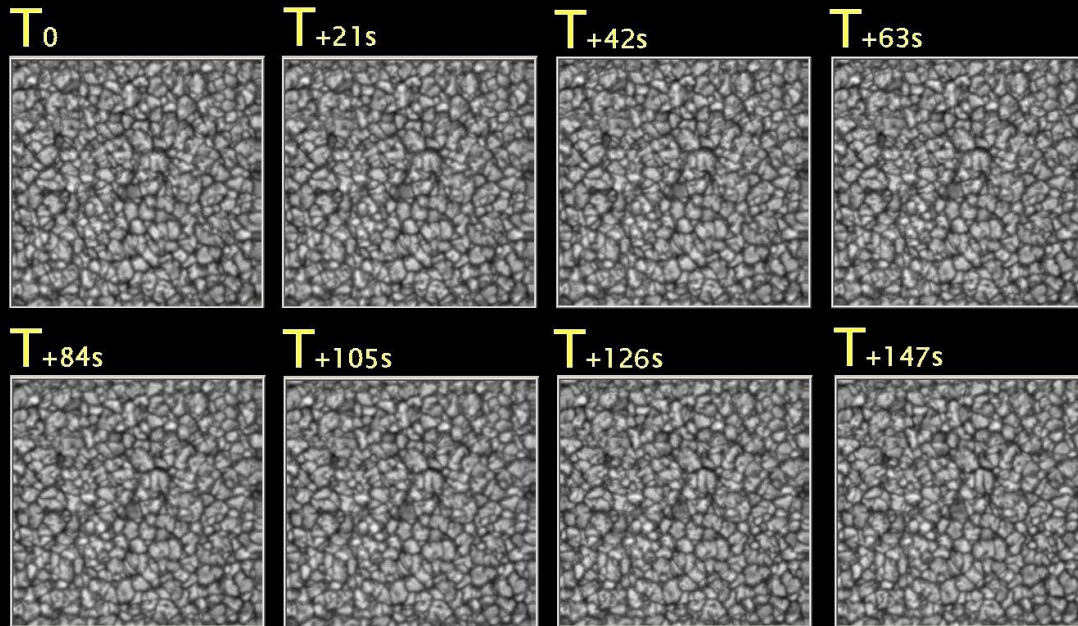
# Протуберанцы



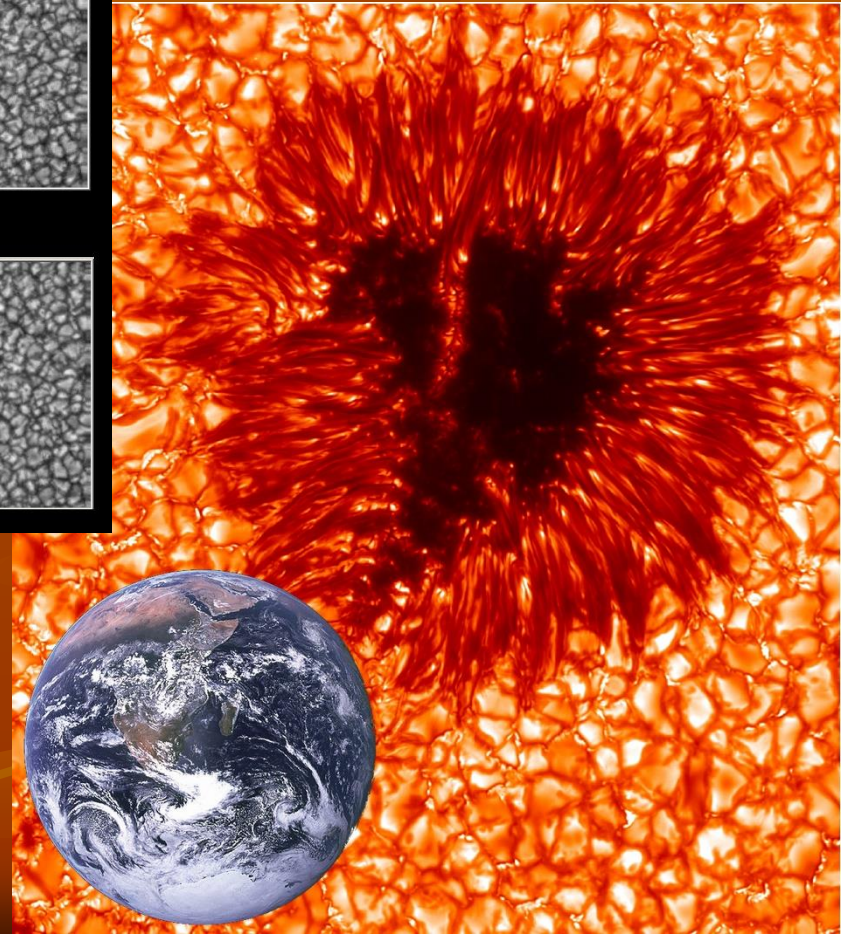


# Солнечная грануляция

Solar Granulation (from SVST, La Palma)



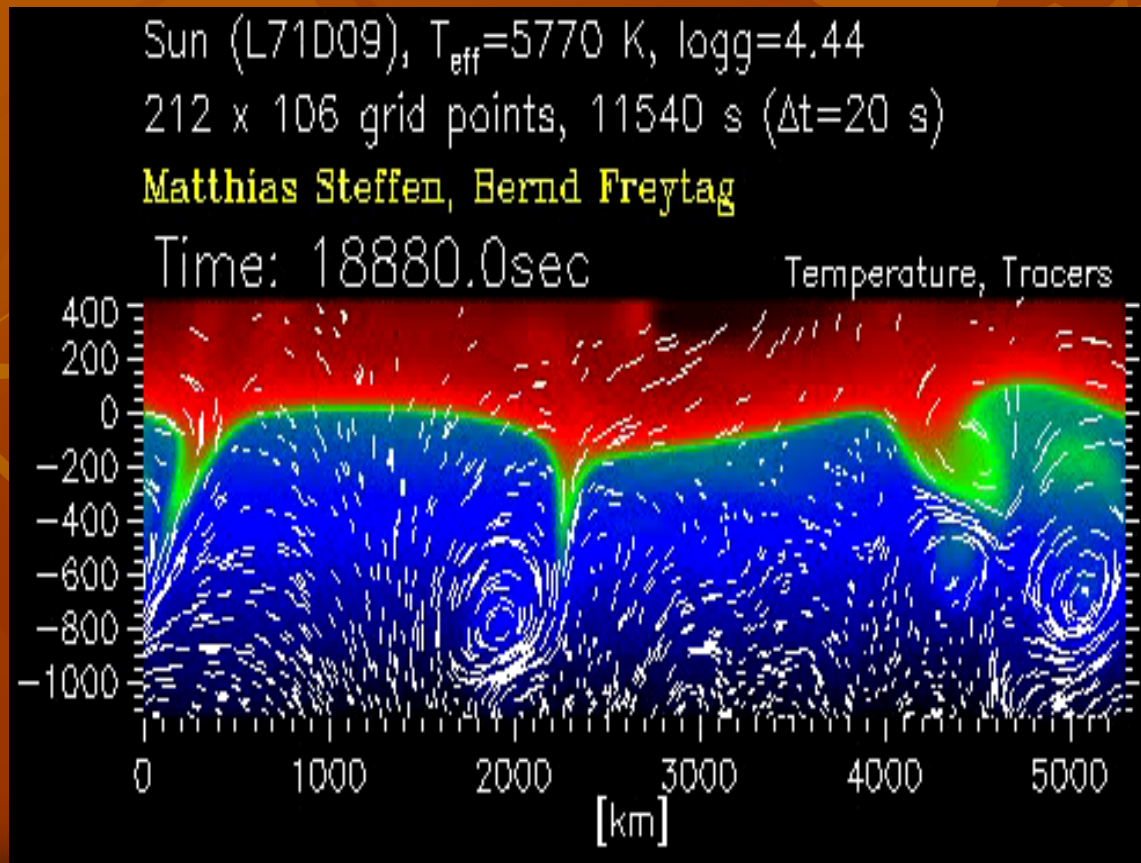
Гранулы имеют размеры порядка 700 км и живут несколько минут.



# Моделирование Солнца

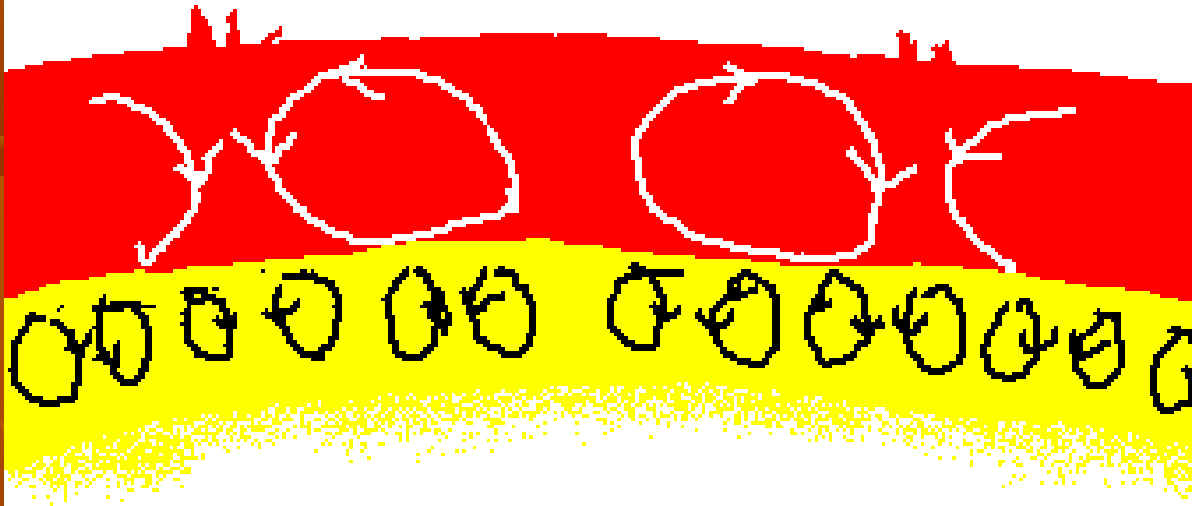
Основные проявления солнечной активности связаны с магнитными полями.  
Сами поля во многом связаны с динамикой внешних слоев Солнца.

Внешняя часть Солнца конвективна.

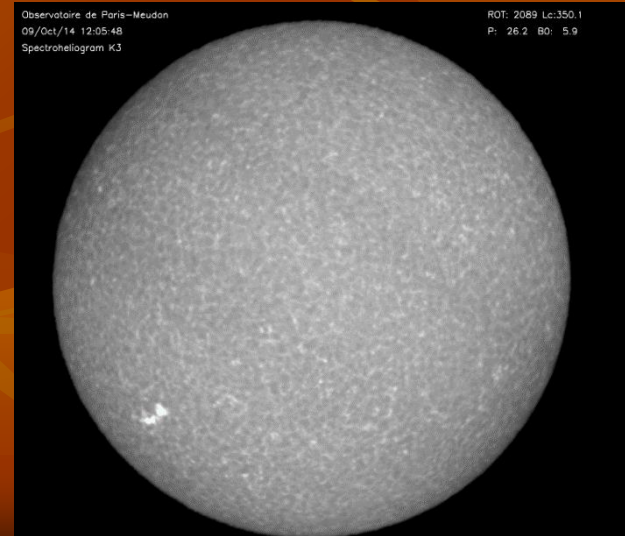
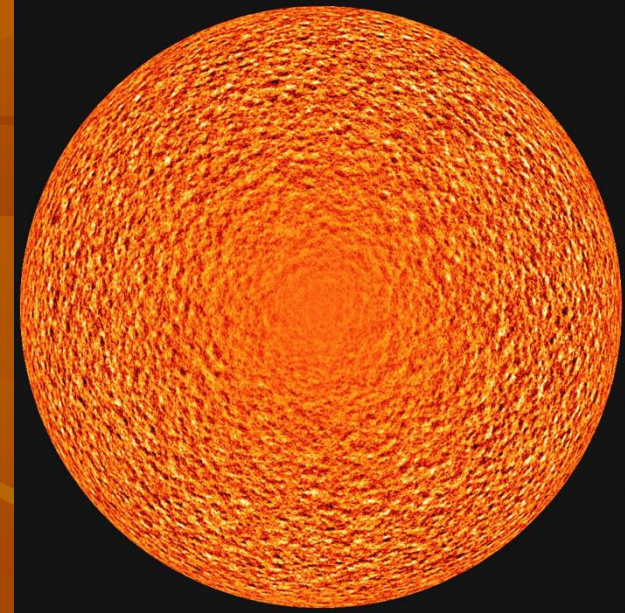


# Супергрануляция в хромосфере

supergranulation in chromosphere



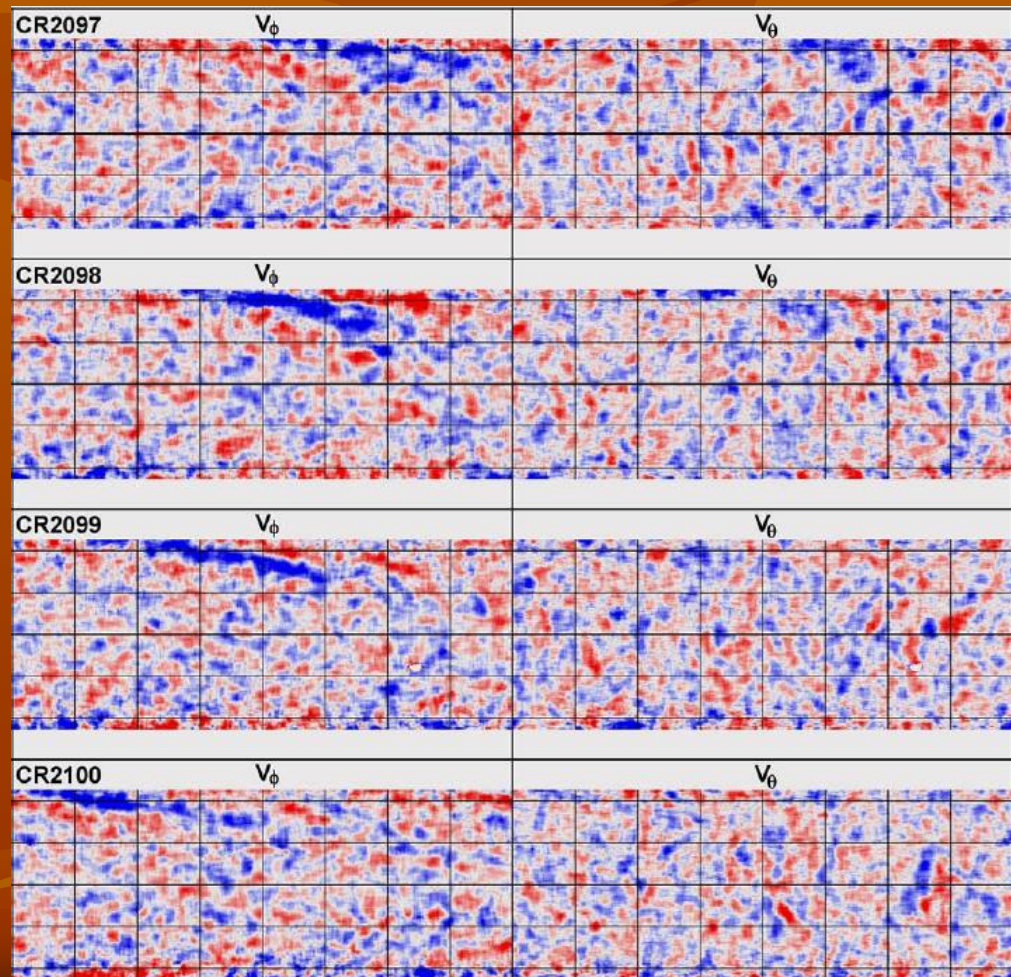
granulation in photosphere



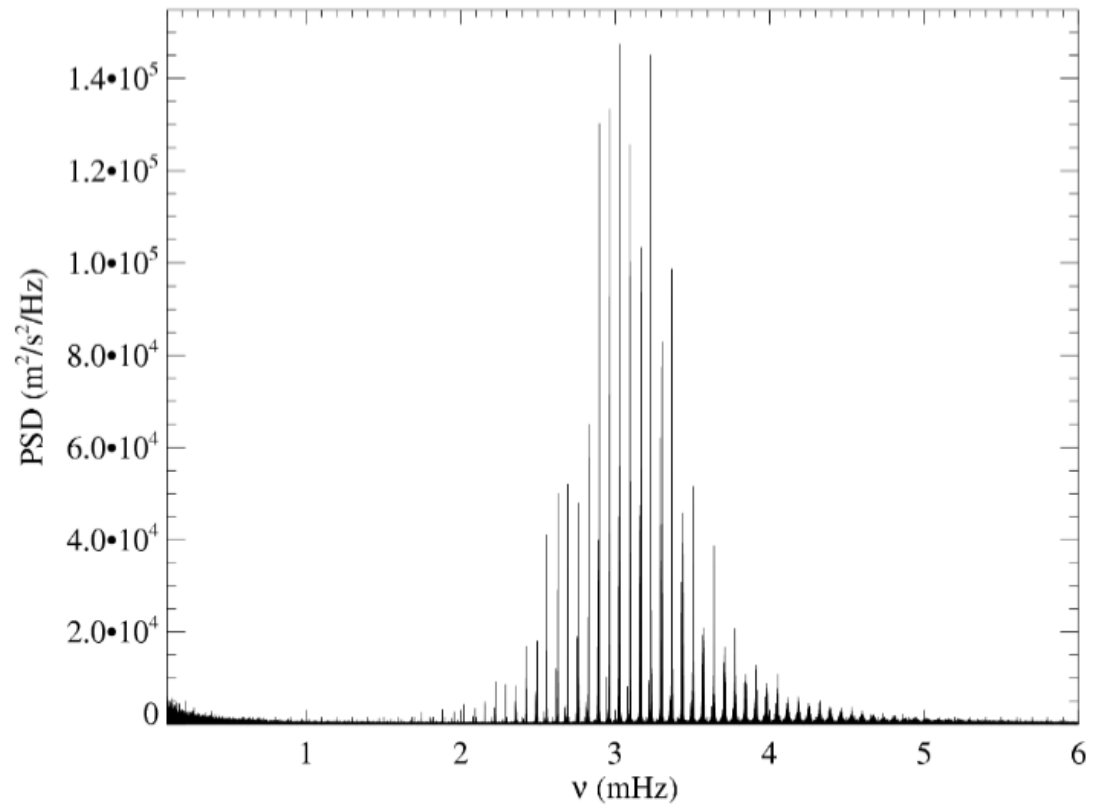
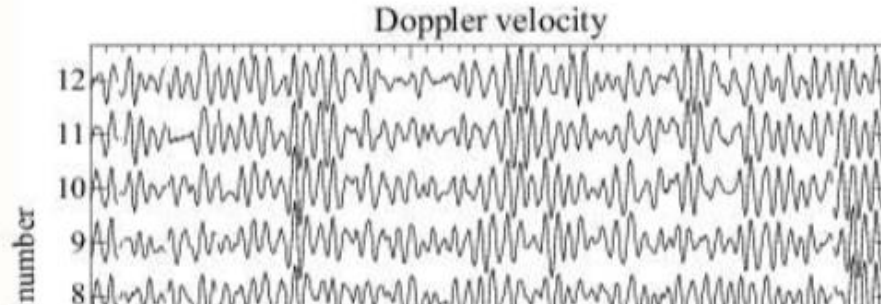
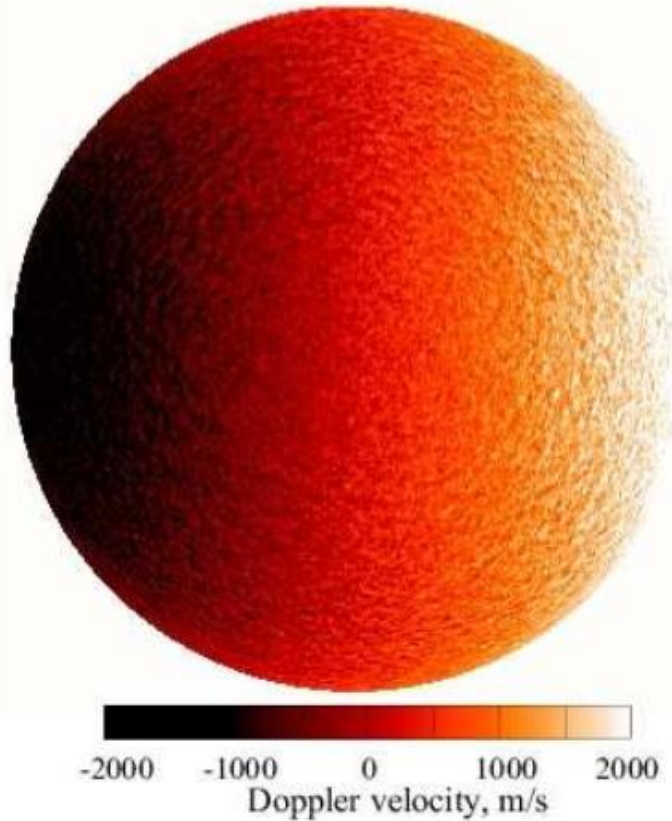
Супергранулы хорошо видны на хромосферных изображениях. Их размеры в десятки раз больше, чем у гранул в фотосфере. Существуют порядка одного дня.

# Гигантские конвективные ячейки

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

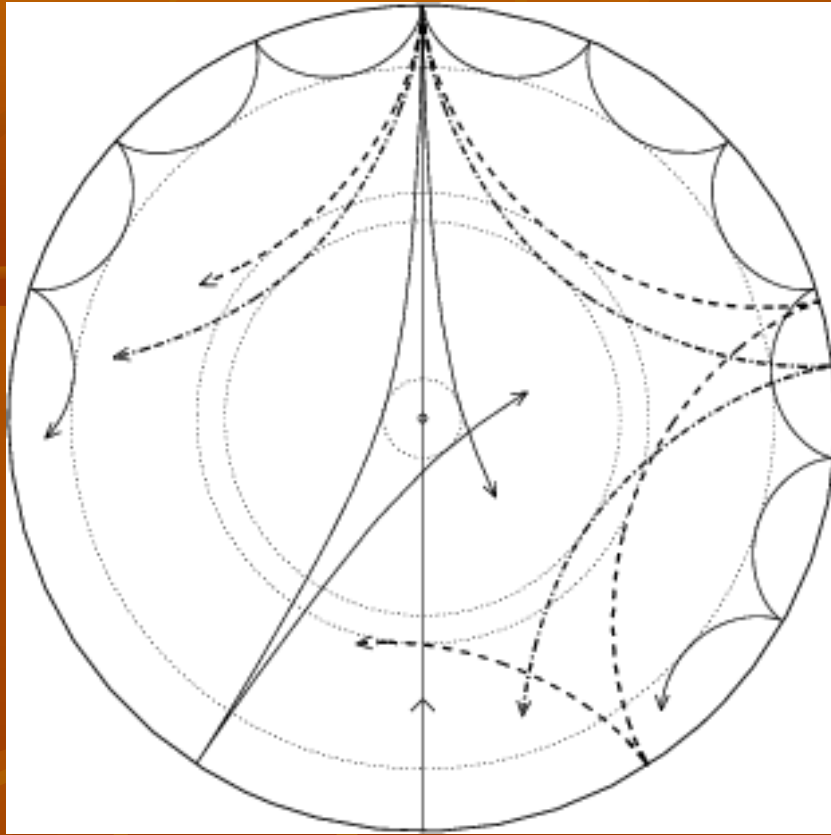


# Гелиосейсмология



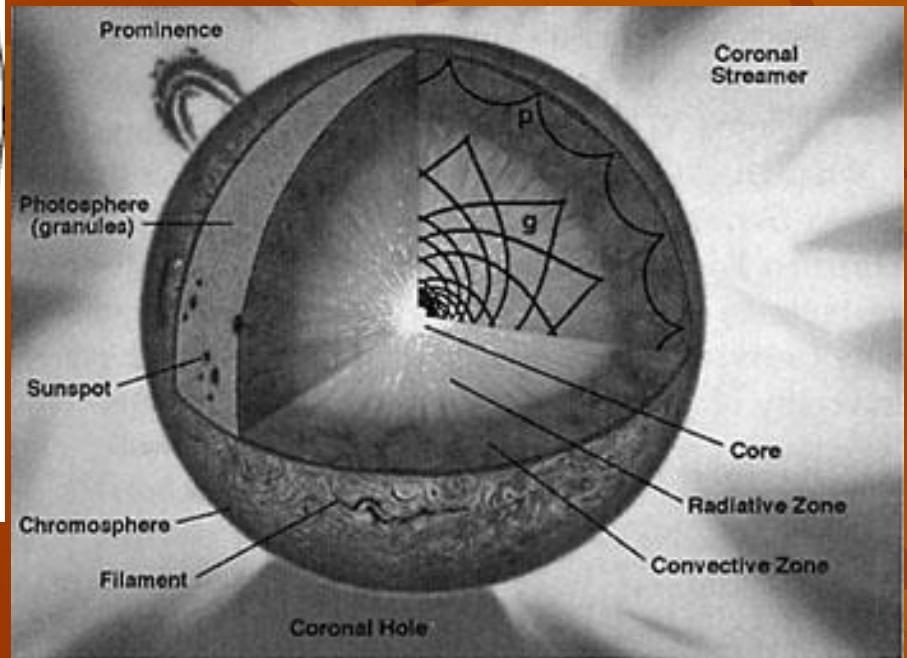
Поверхность Солнца постоянно «дышит». Это солнечные осцилляции. На больших масштабах они имеют характерные периоды около сотен секунд.

# 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.

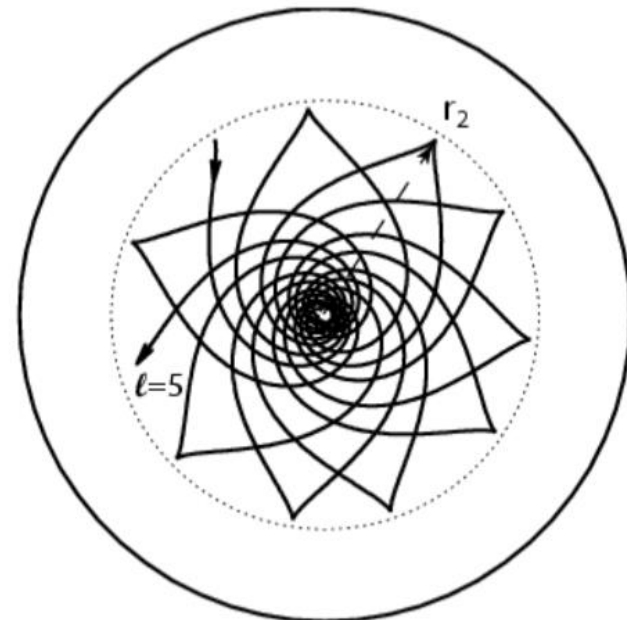
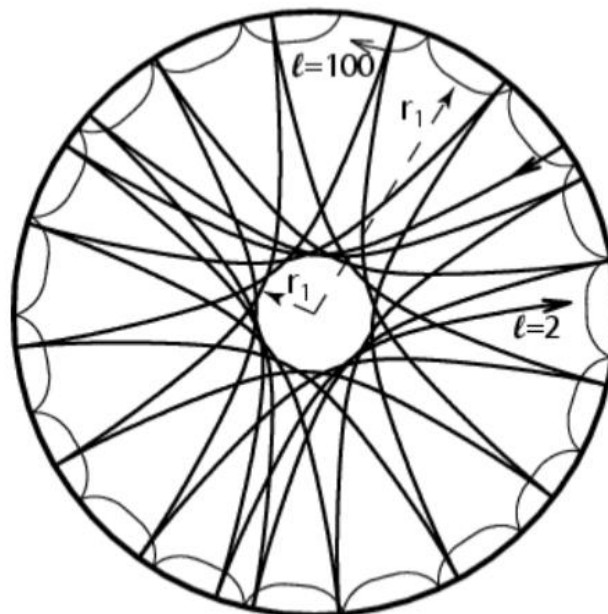
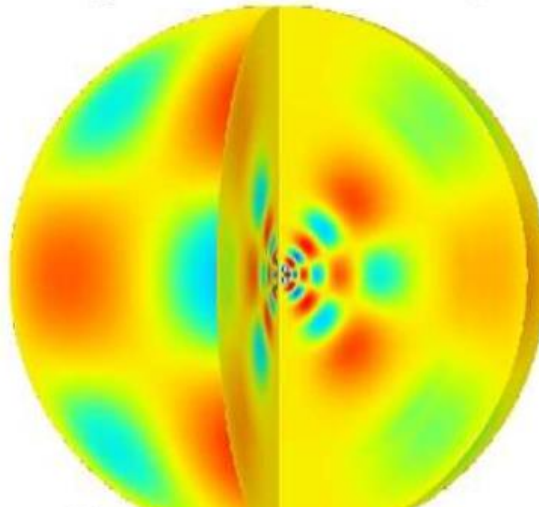
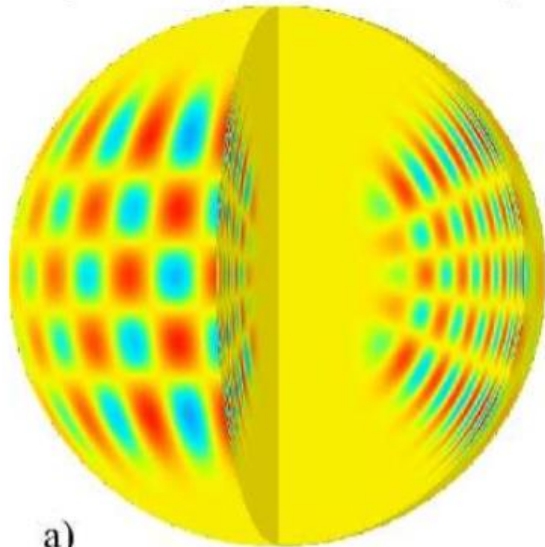


*A cut-away diagram of major features of the sun. Courtesy of the SOHO/MDI consortium. SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA.*

# Глобальные колебания

*p*-mode ( $l=20, m=16, n=14$ )

*g*-mode ( $l=5, m=3, n=6$ )

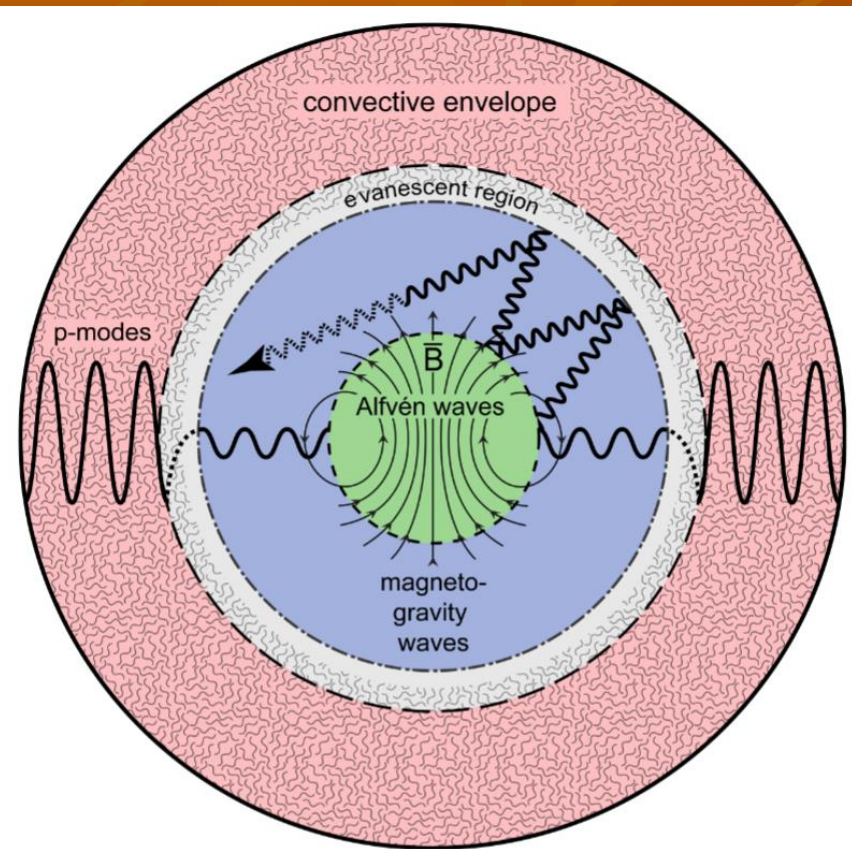


# Магнитные поля в недрах красных гигантов

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.

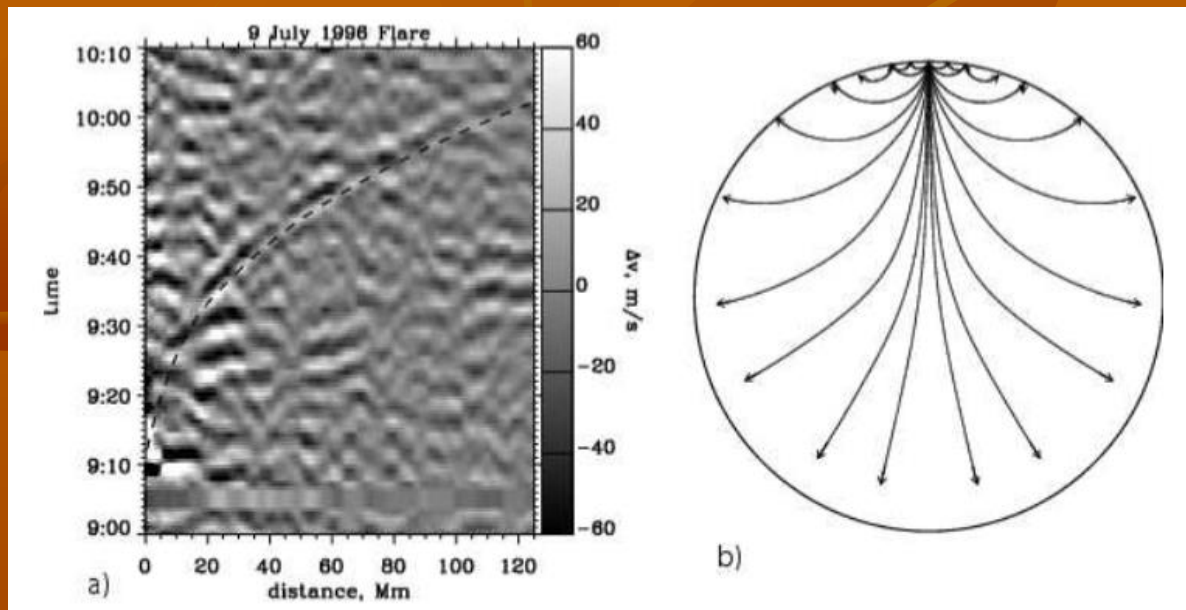


Волны возбуждаются на поверхности и идут внутрь. Там они частично отражаются и выходят обратно во внешние слои. Идея авторов состоит в том, что волны взаимодействуют с магнитным полем внутри звезды. Это приводит к их превращению в другой тип волн, которые уже не могут выйти наружу.

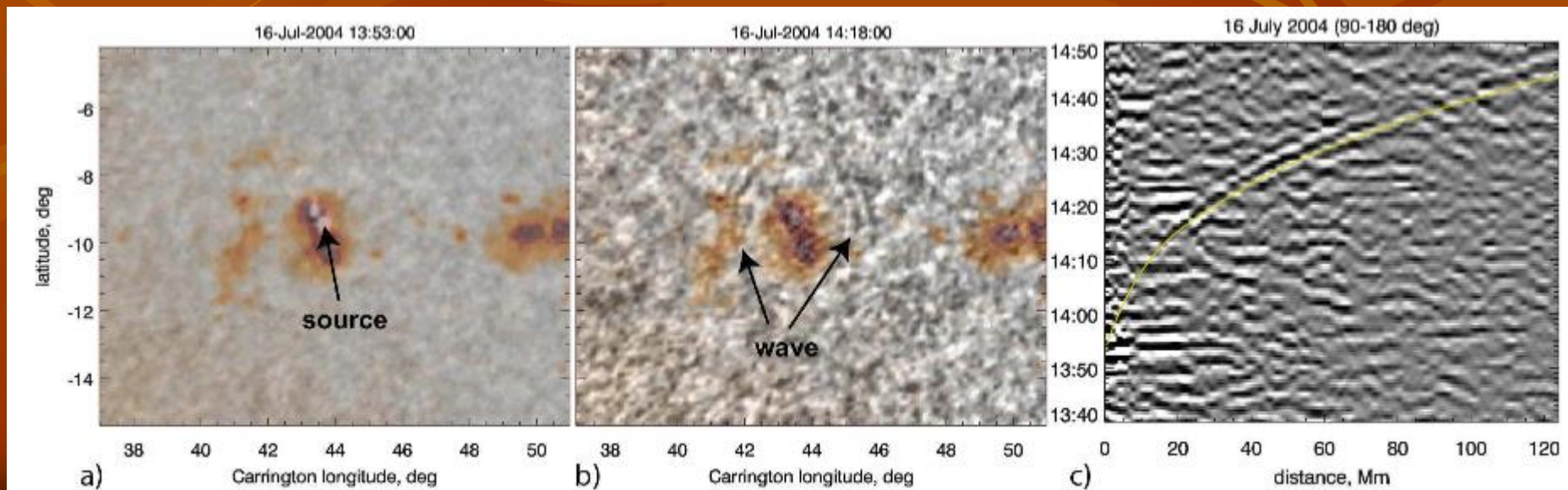


# Вспышки и осцилляции

1103.1707

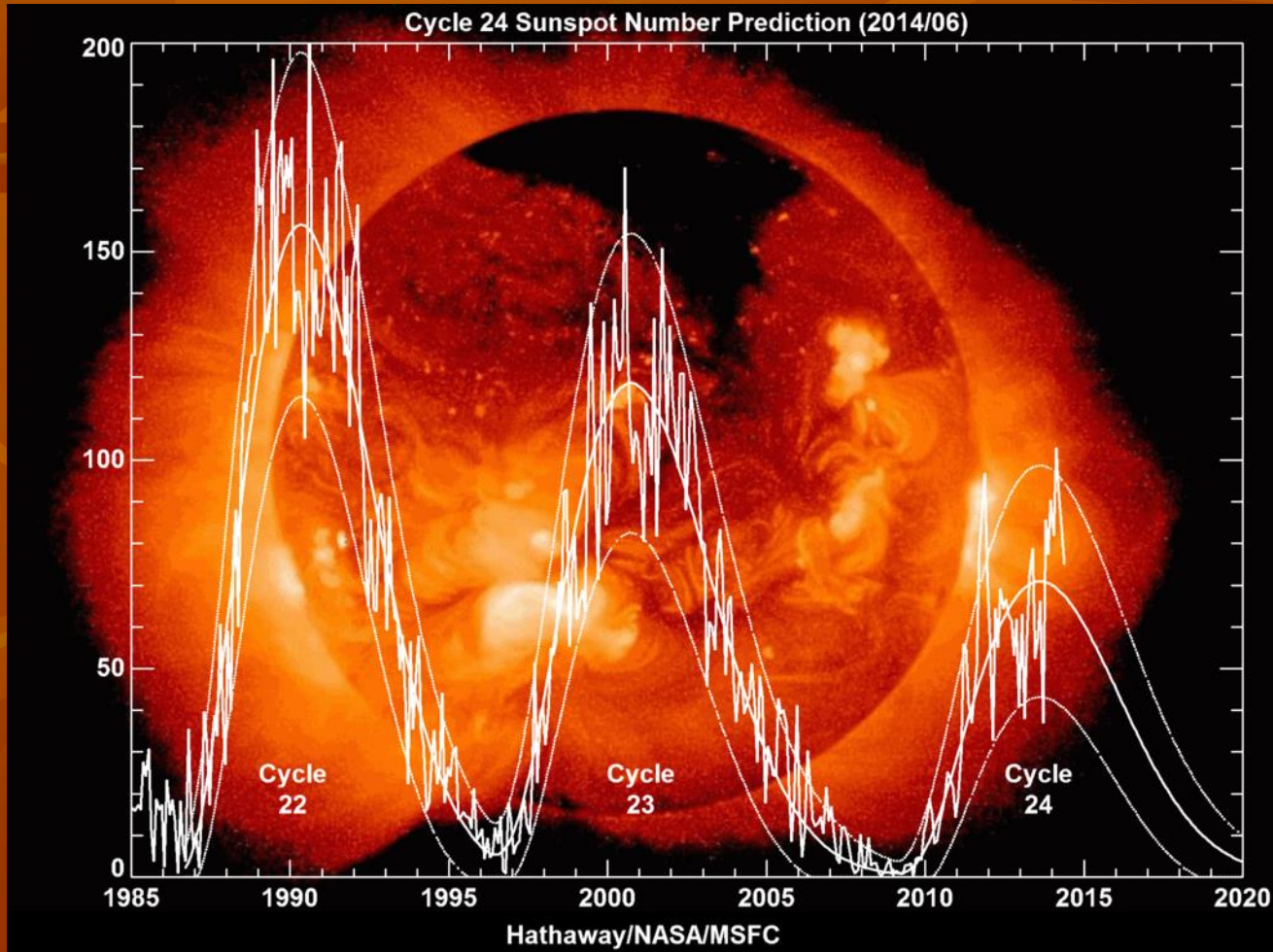


Мощные вспышки на Солнце порождают волны во внешних слоях и осцилляции.



# Солнечный цикл

11-летний цикл солнечной активности

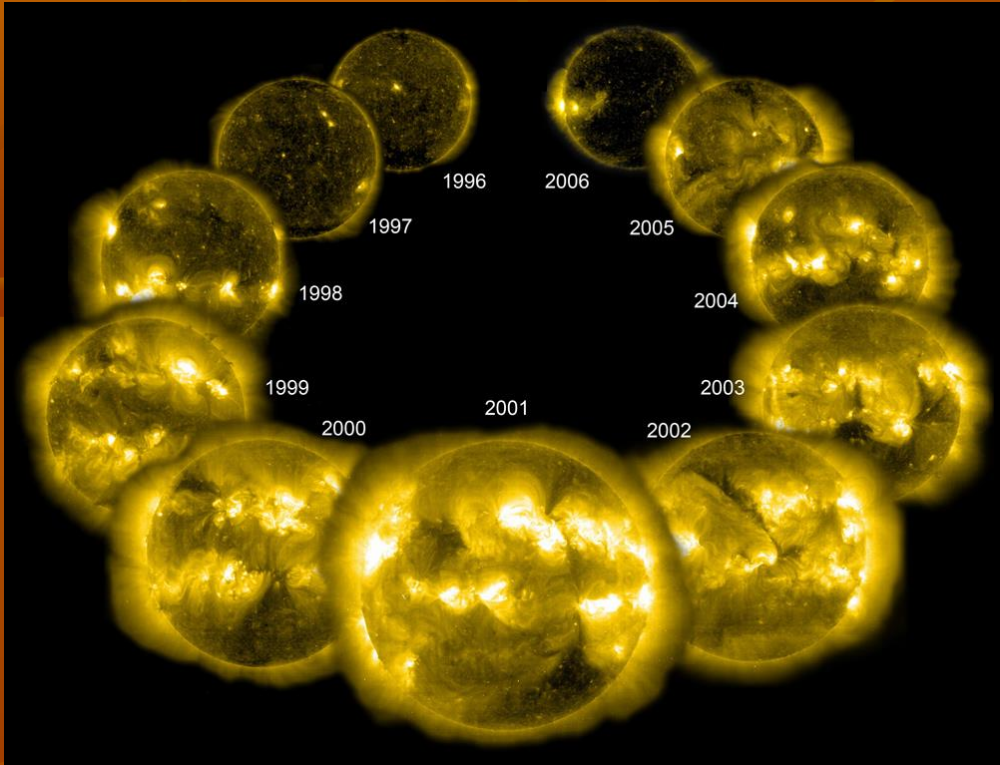


Количество пятен, а также другая солнечная активность меняются с периодом примерно 11 лет

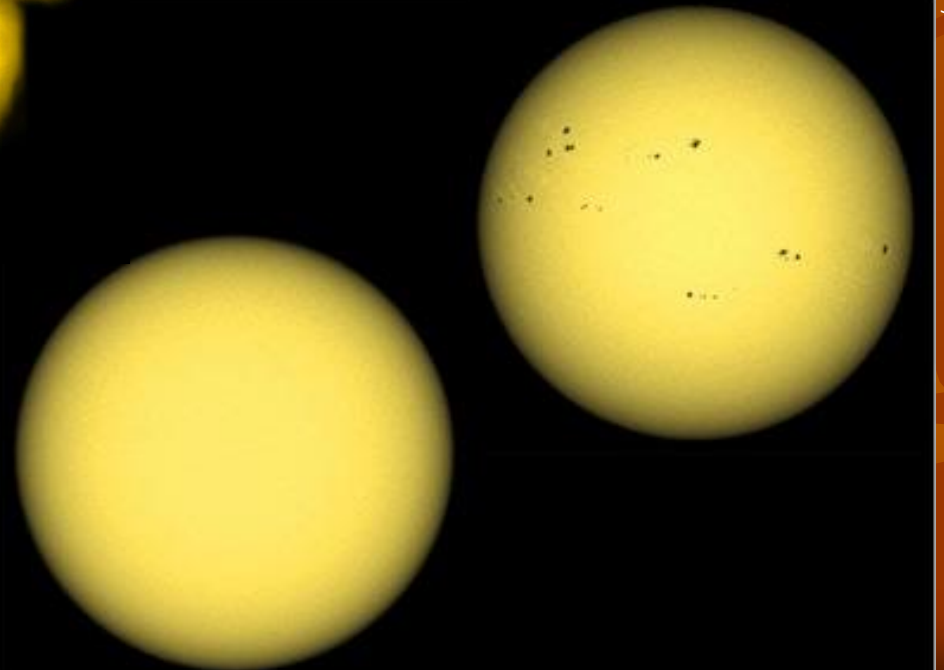
Открыт Швабе в 1843 г.

Солнечный цикл связан с поведением глобального магнитного поля Солнца.

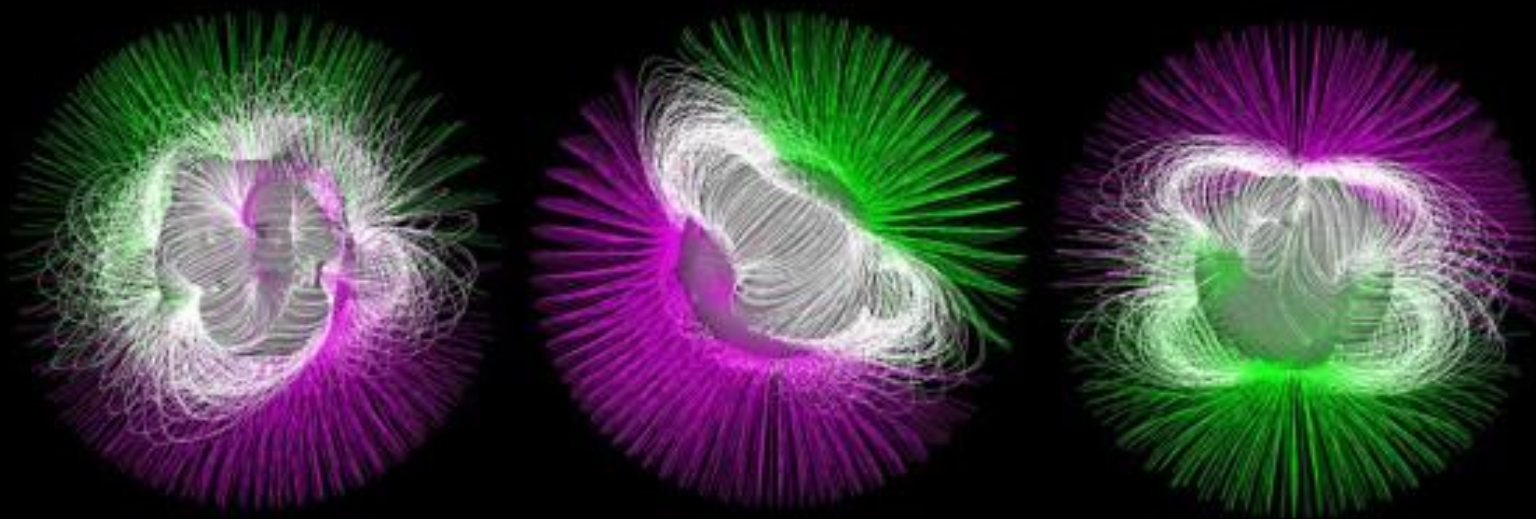
# Активность Солнца



Изображения получены спутником SOHO в ультрафиолетовых лучах.



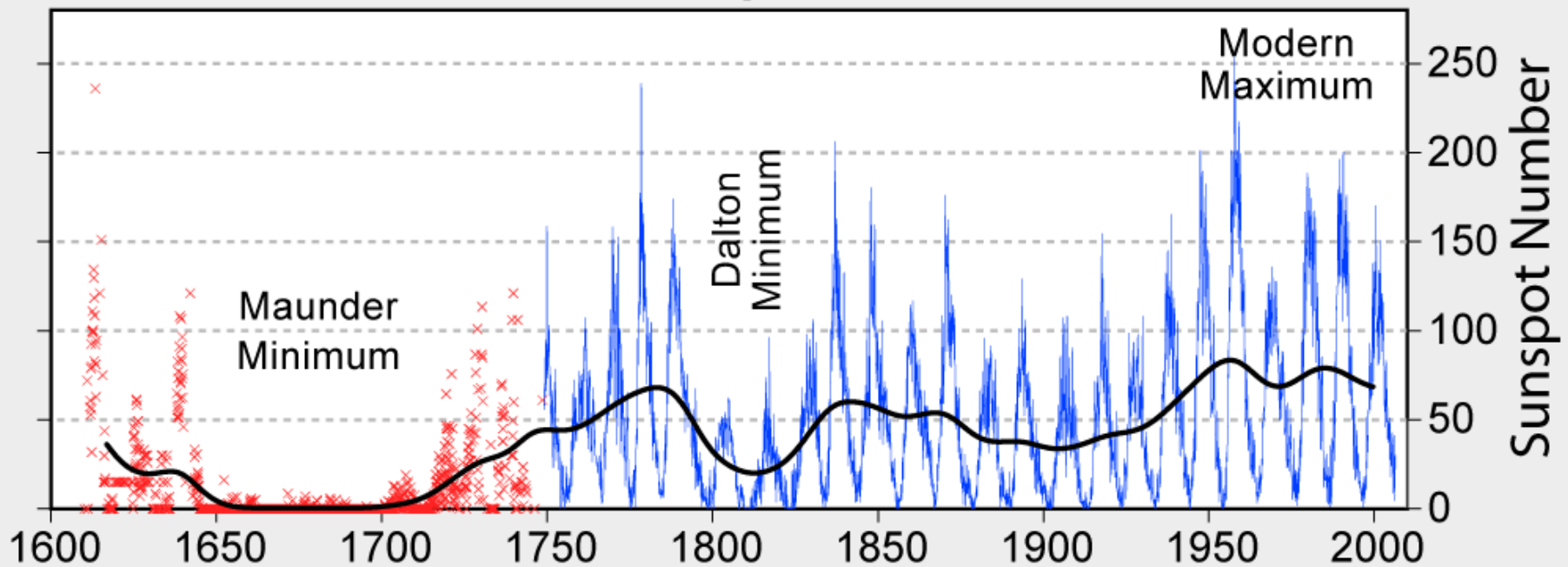
# Переворачивание магнитного поля



# Маундеровский минимум

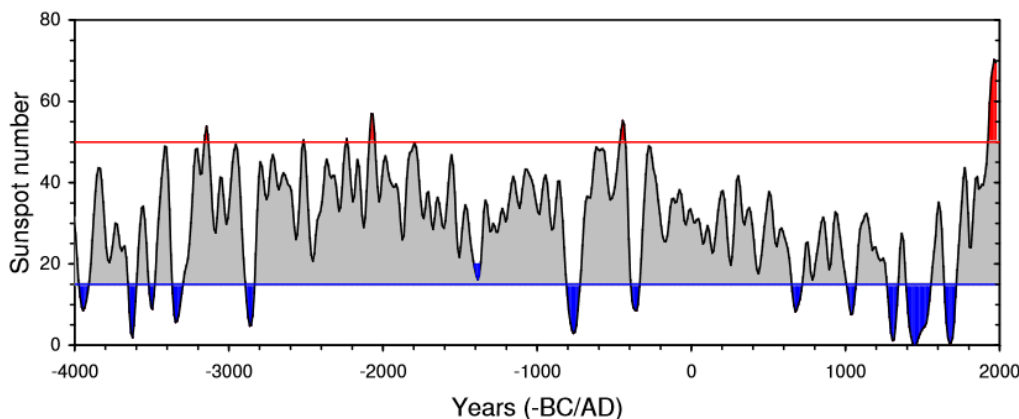
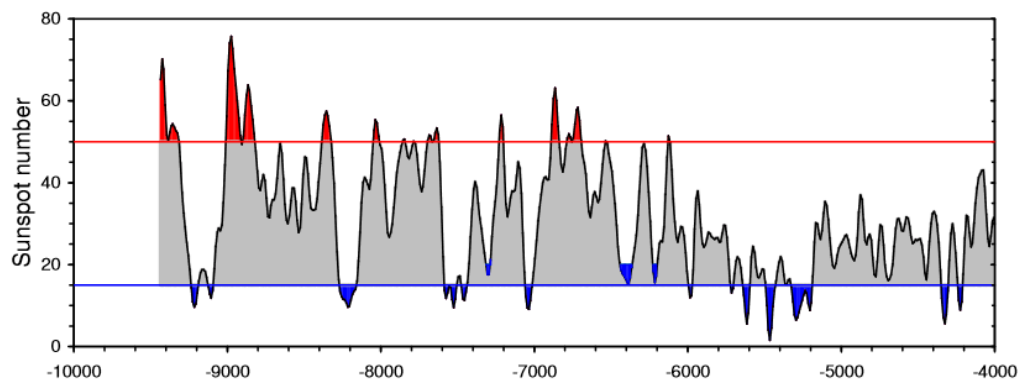
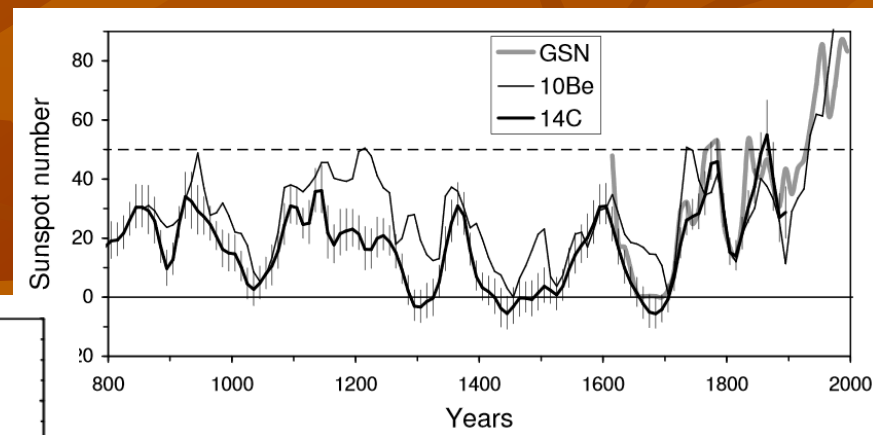
Иногда ровный ход 11-летний циклов нарушается. Наблюдалось несколько минимумов активности, самый заметный из которых – маундеровский.

## 400 Years of Sunspot Observations



# Реконструкция на большом масштабе времени

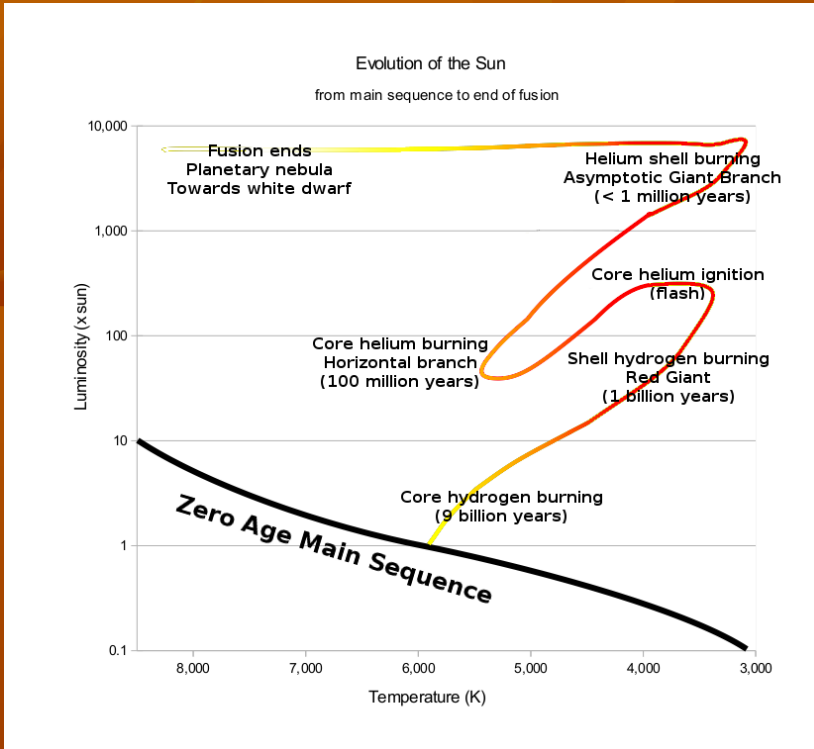
Ученые пытаются восстановить солнечную активность на временах порядка тысяч лет.



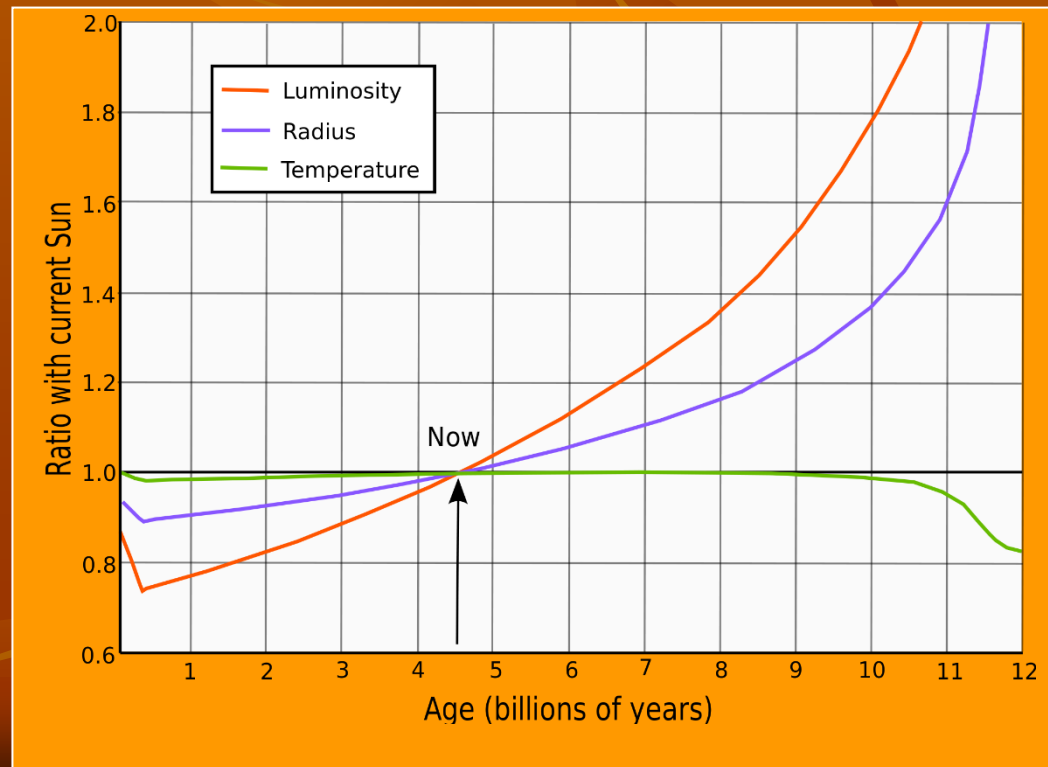
Используются данные по годовичным кольцам деревьев и по ледяным кернам.

Содержание беррилия-10 и углерода-14.

# Эволюция Солнца

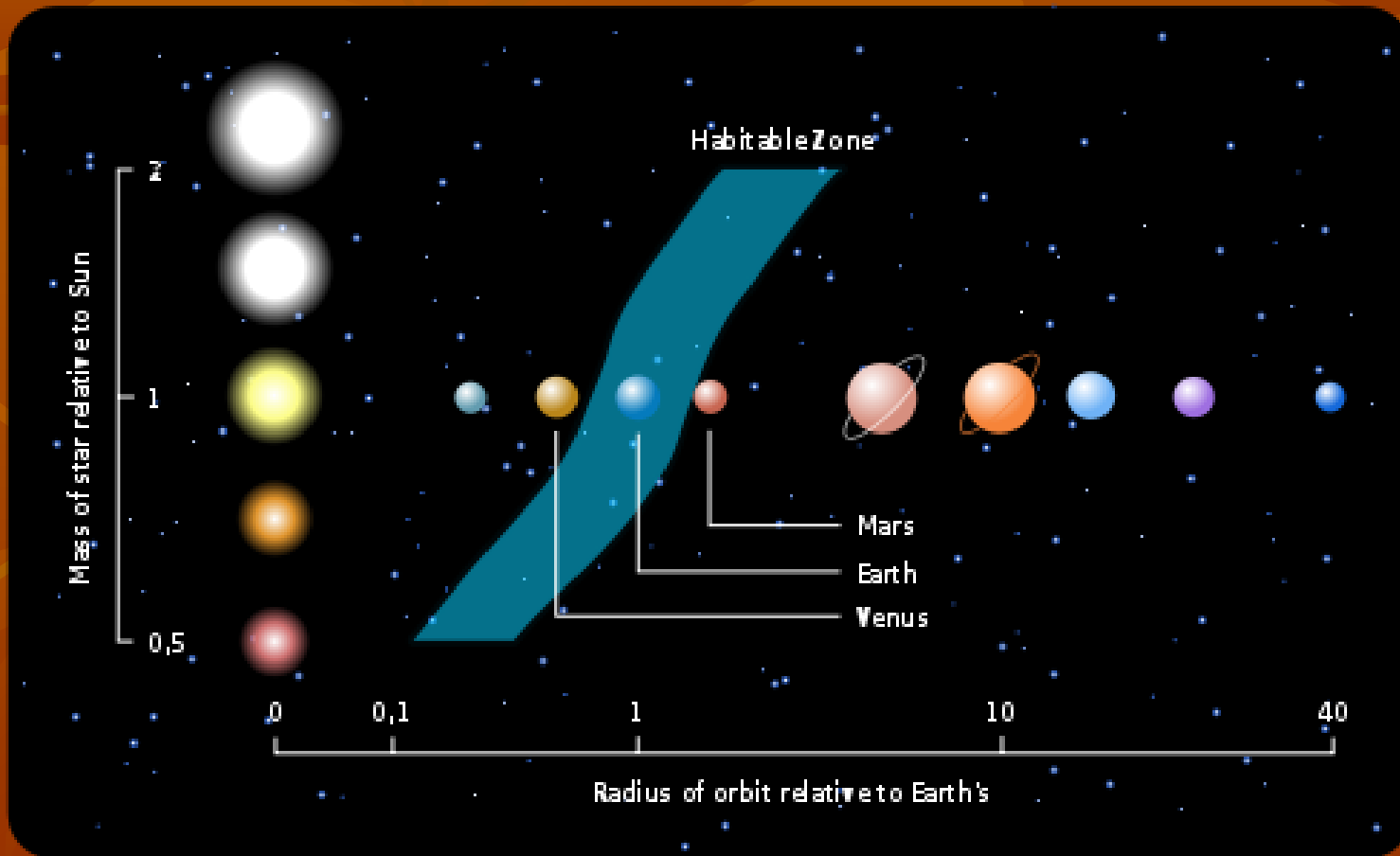


Сейчас Солнце пережигает водород в своих недрах, Очень медленно Солнце становится больше и ярче.



# Зона обитаемости

Возможность существования жидкой воды (не холодно, не жарко)

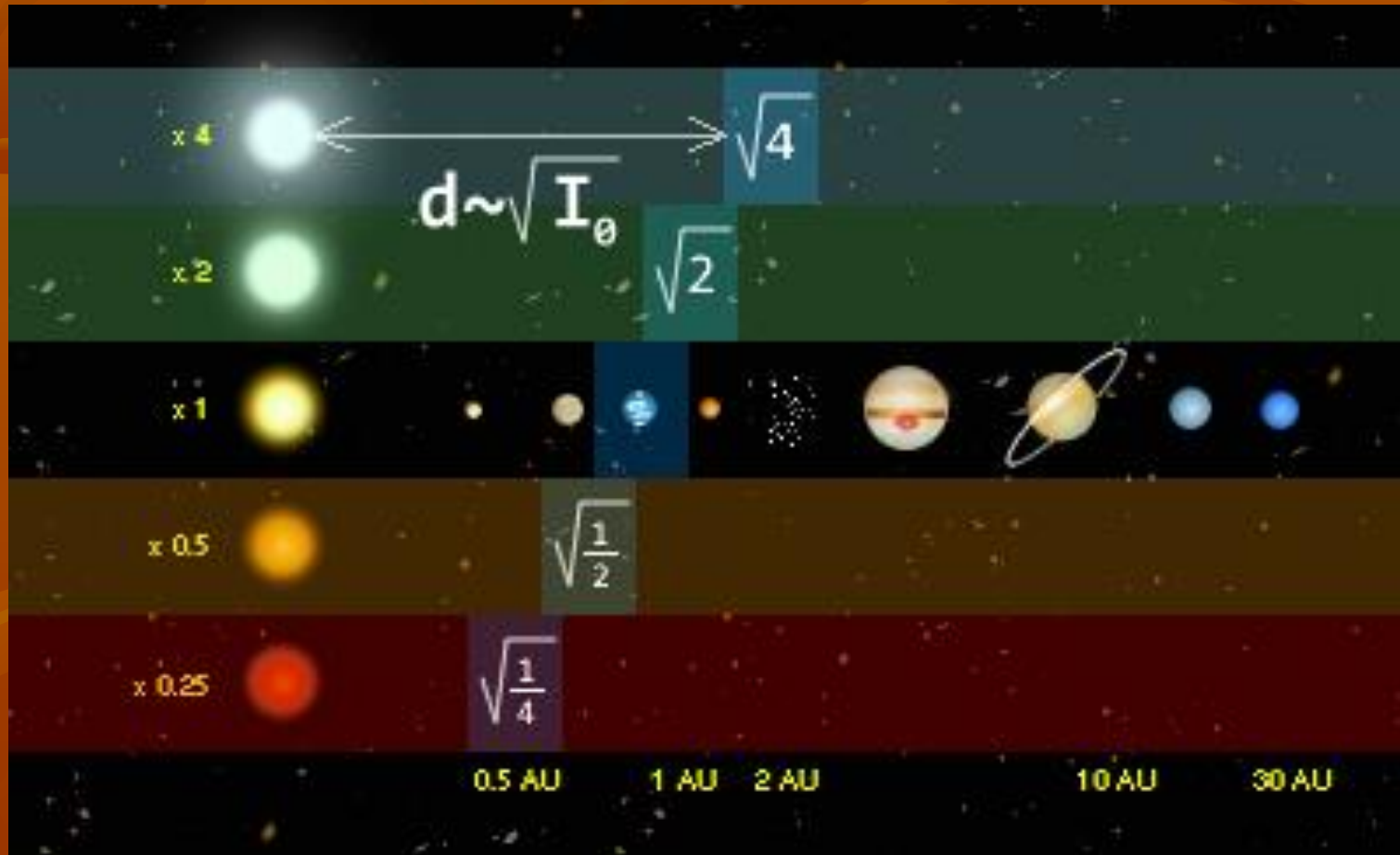


Обсуждение этой идеи началось в 1950-е гг.



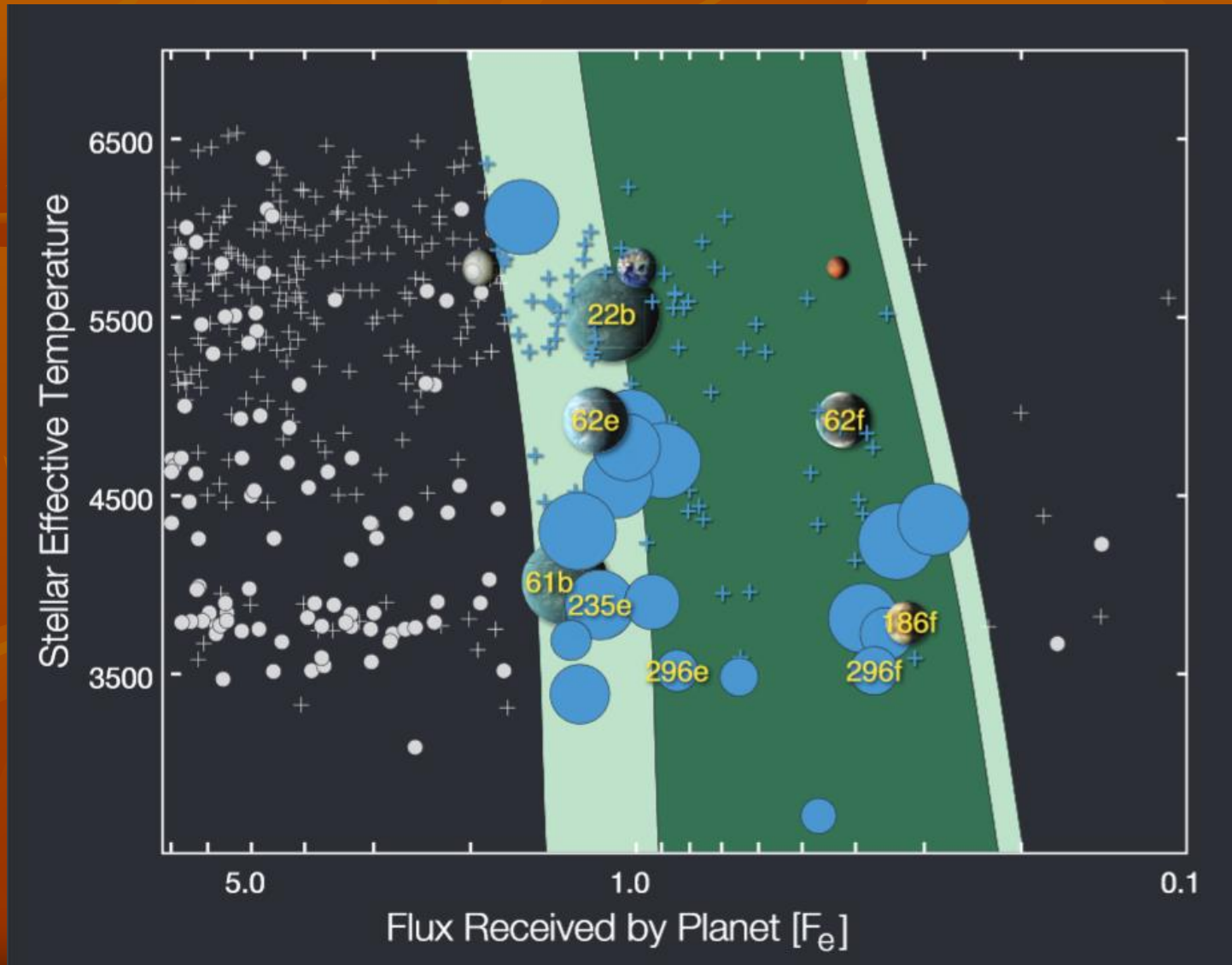
# Зависимость от светимости

Параметры зоны обитаемости зависят от светимости звезды

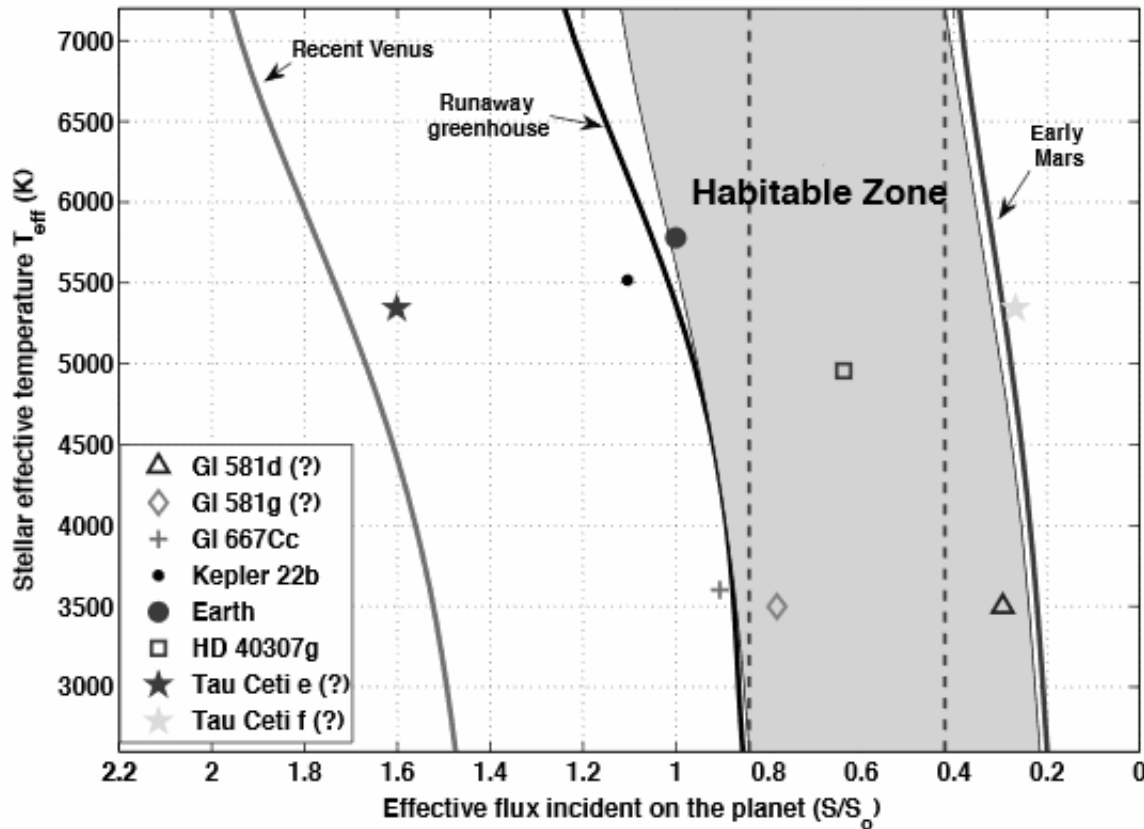


$$F = \left( R_* / R_{\odot} \right)^2 \left( T_* / T_{\odot} \right)^4 \left( a_{\oplus} / a_p \right)^2$$

1409.1904

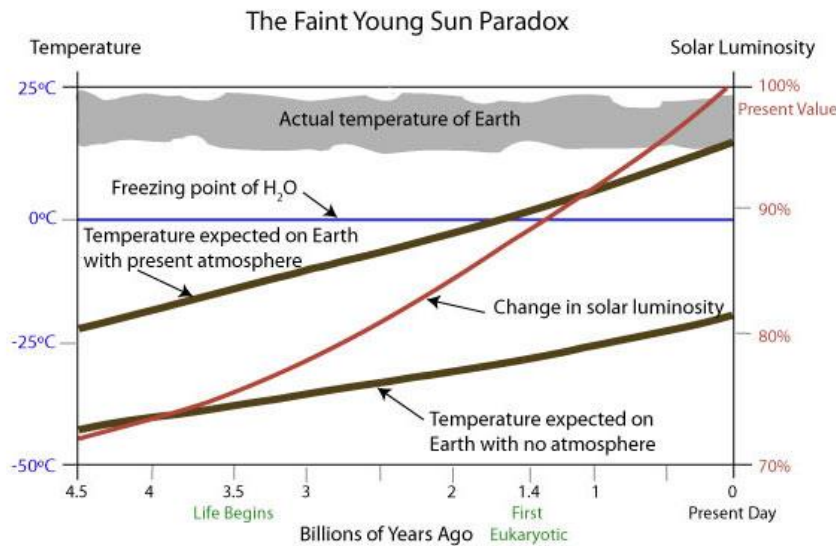


# Детальные расчеты



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

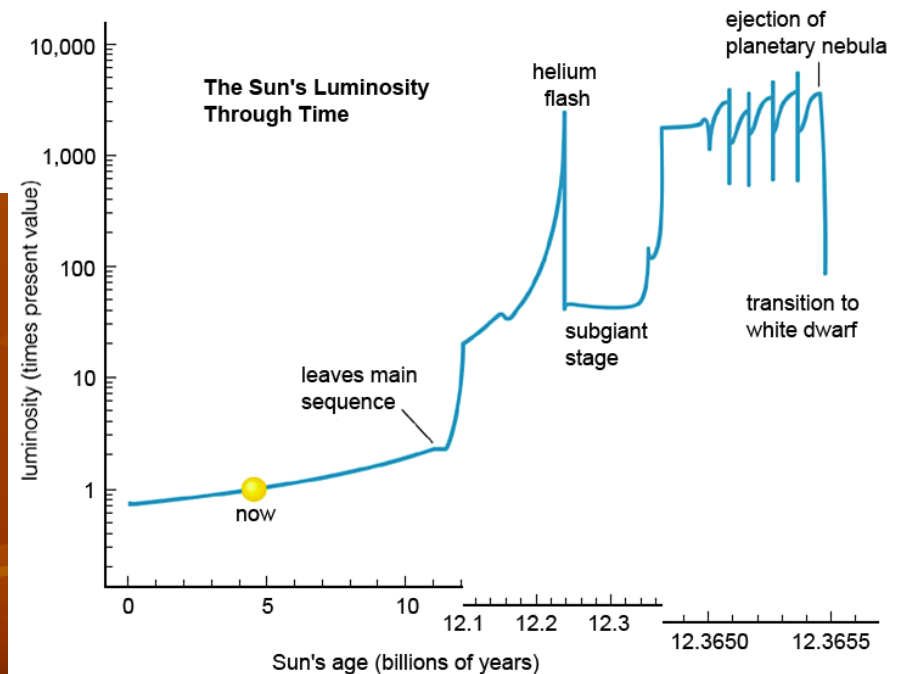
# Парадокс тусклого Солнца



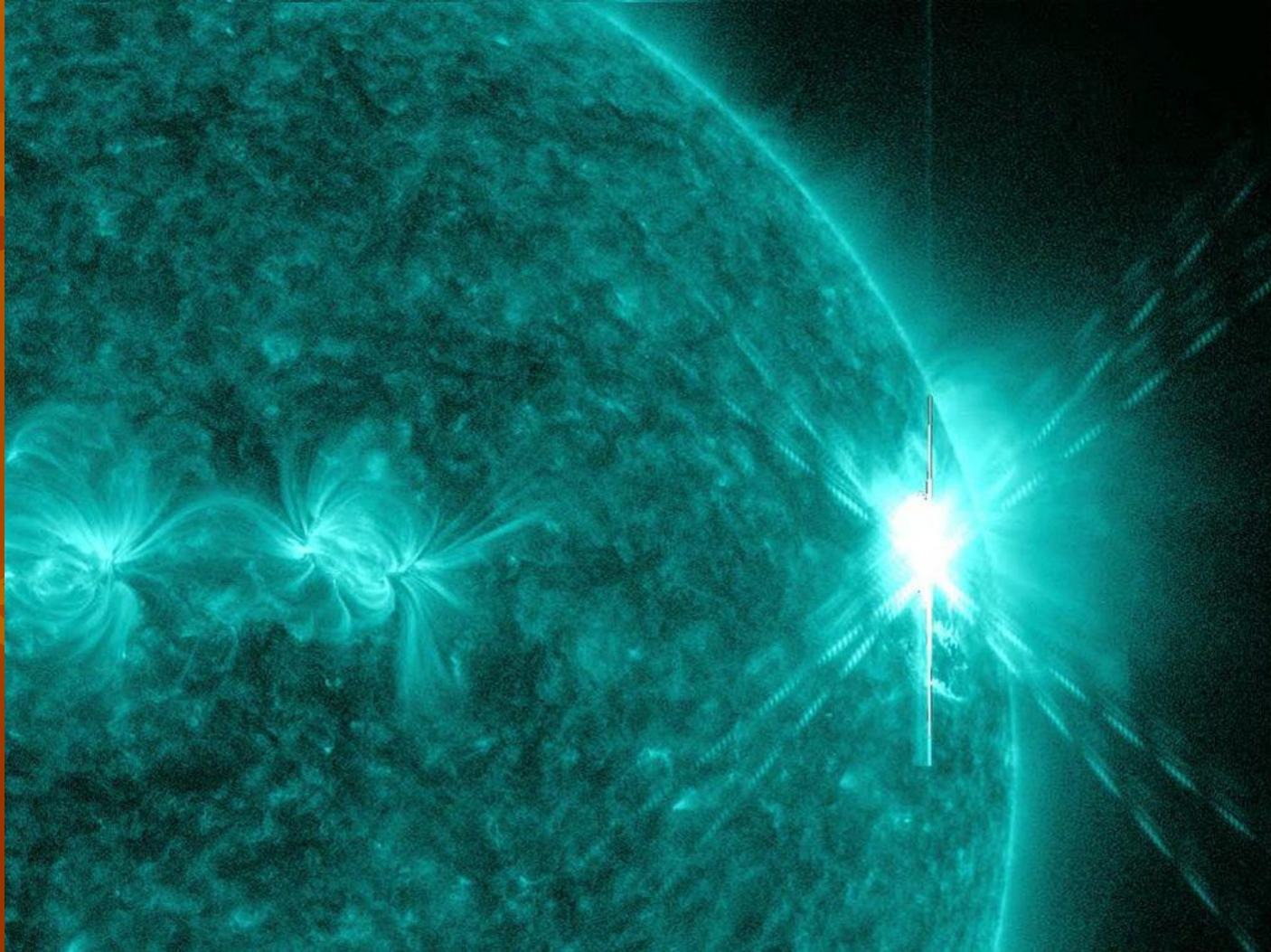
Even though the Sun was about 30% dimmer than it is now, the temperature on Earth has been more or less stable.

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](#)).

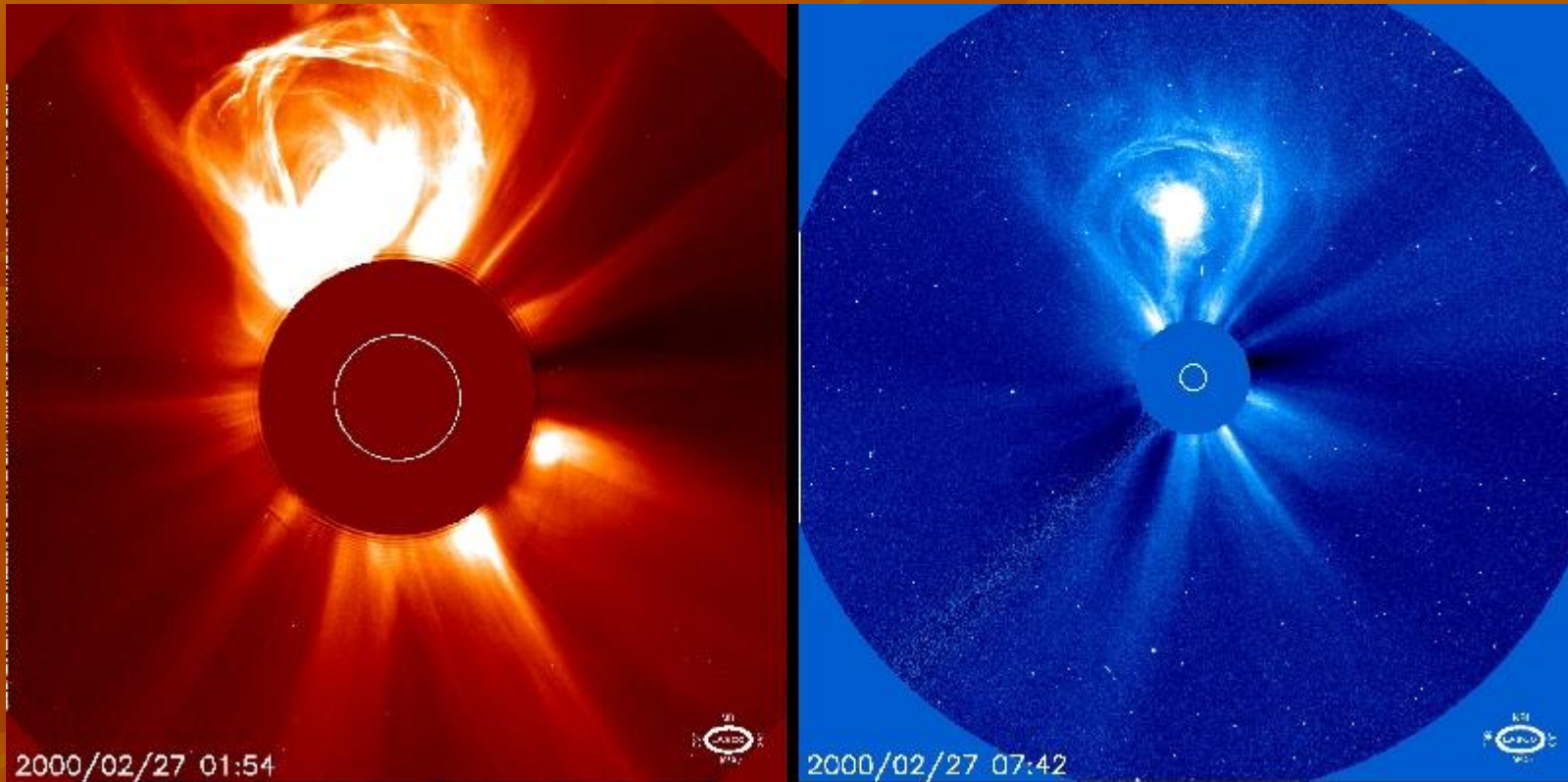


# Вспышки на Солнце



Ультрафиолетовое изображение, SDO, NASA

# Корональные выбросы

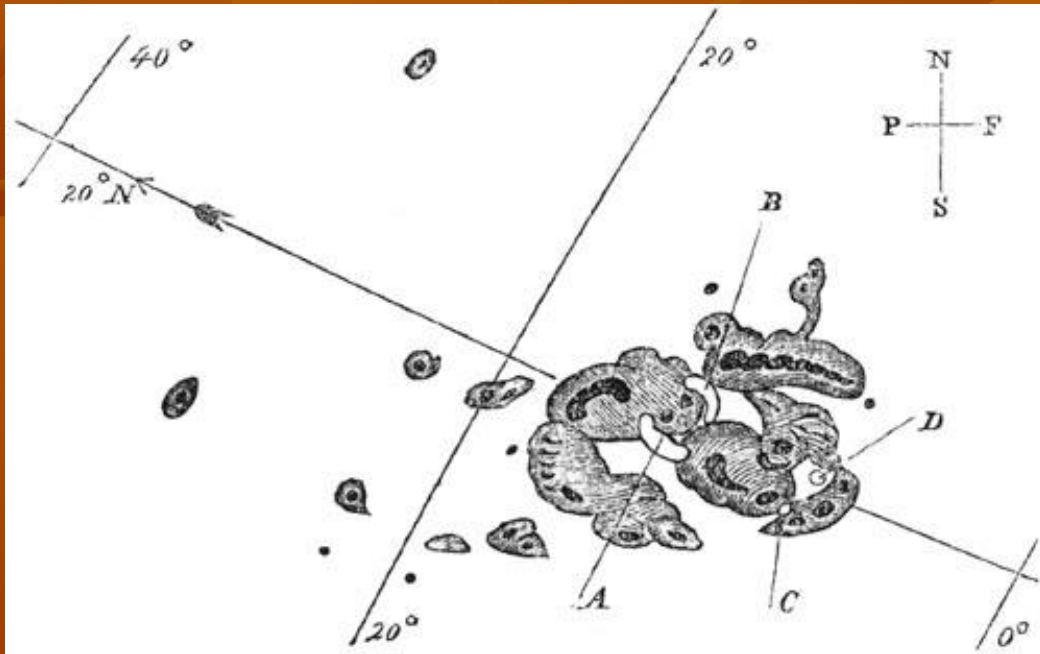


Частота таких событий от нескольких в день во время максимума активности, до раз в несколько дней – во время минимума активности.

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.

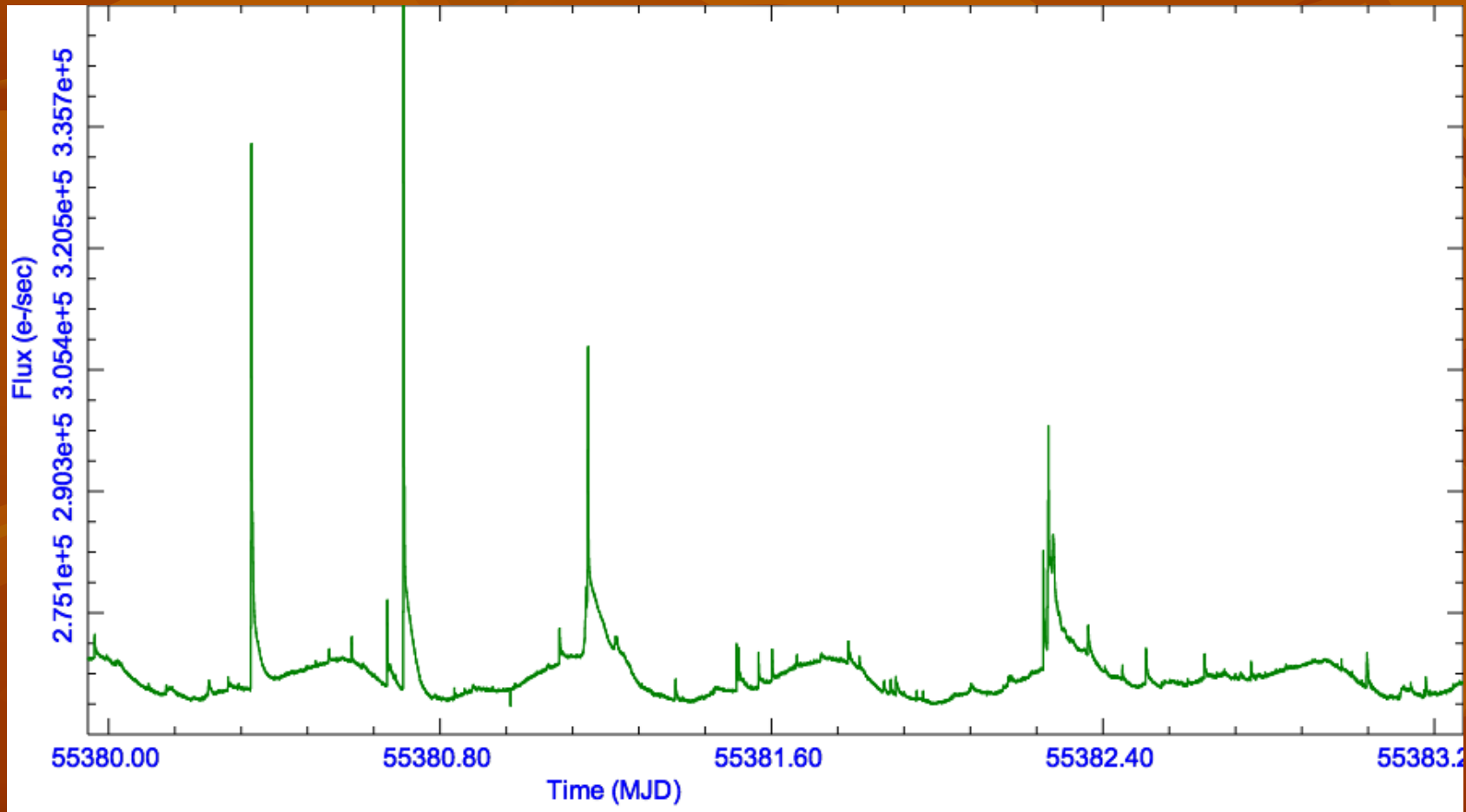
«Встали» телеграфные линии.

Мощнейшие полярные сияния.

# Гигантские вспышки

Вспышки происходят и на других звездах.

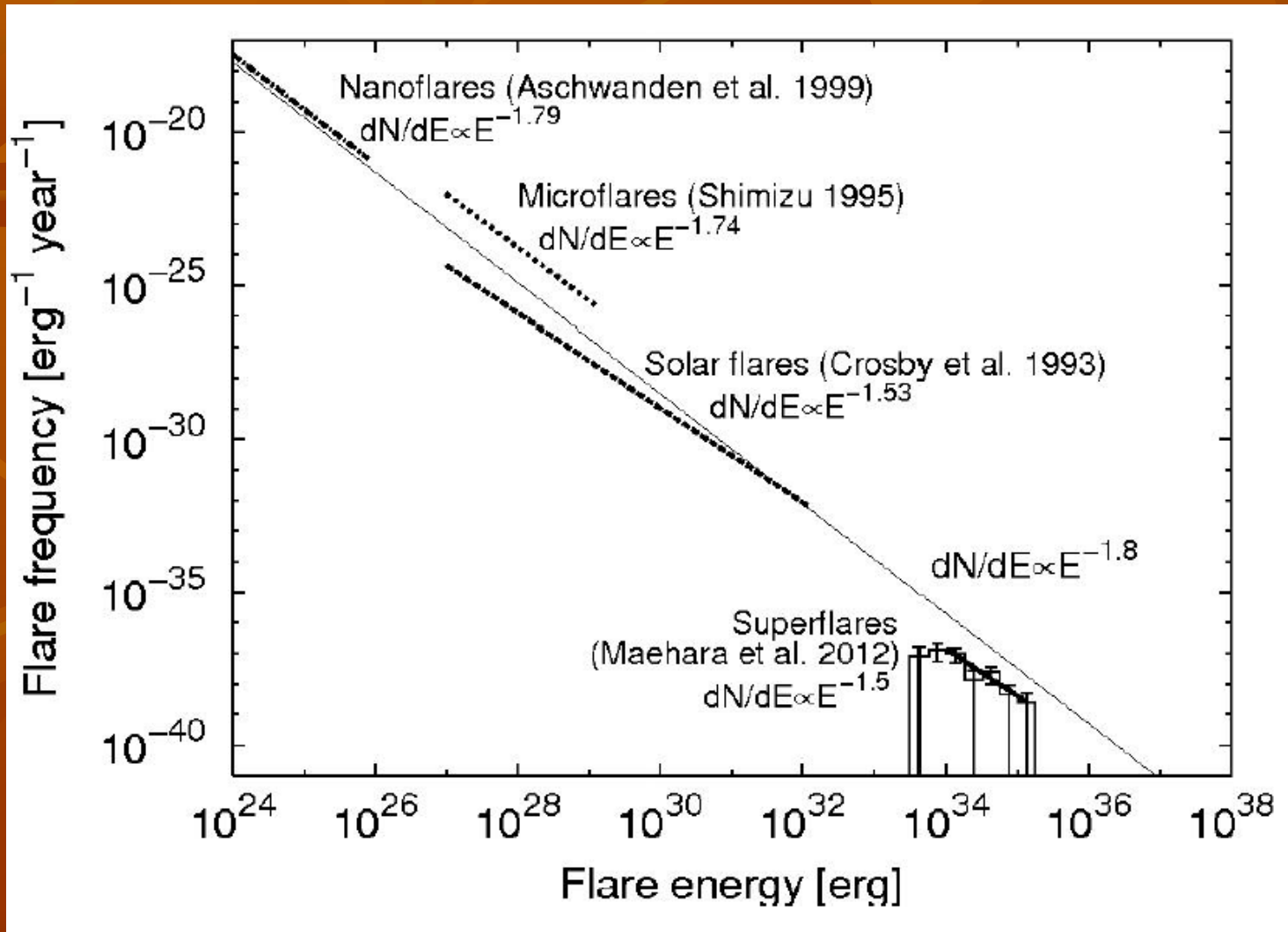
Как правило, чем легче звезда – тем она активнее.



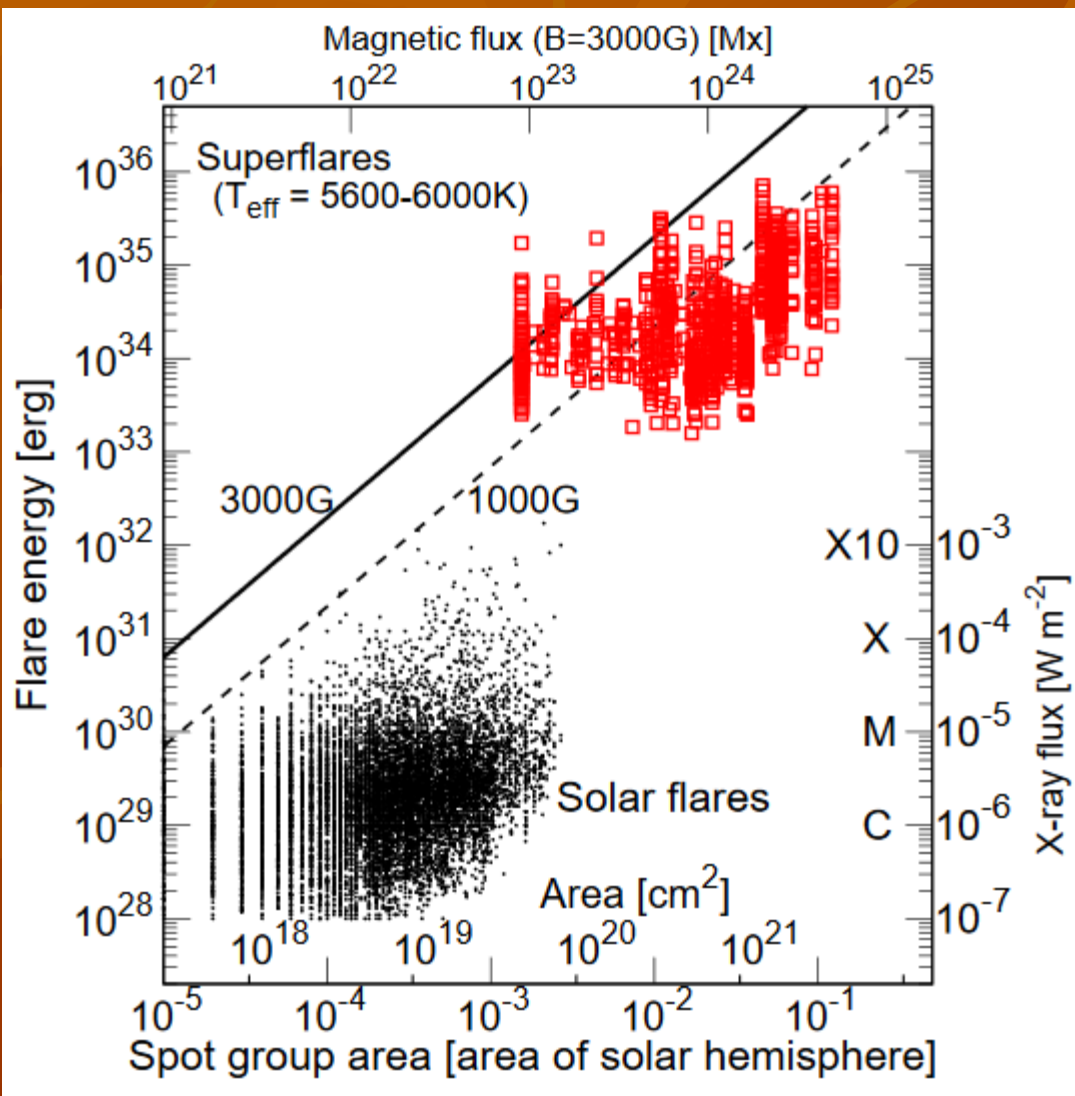
Данные спутника «Кеплер»



# Частота вспышек



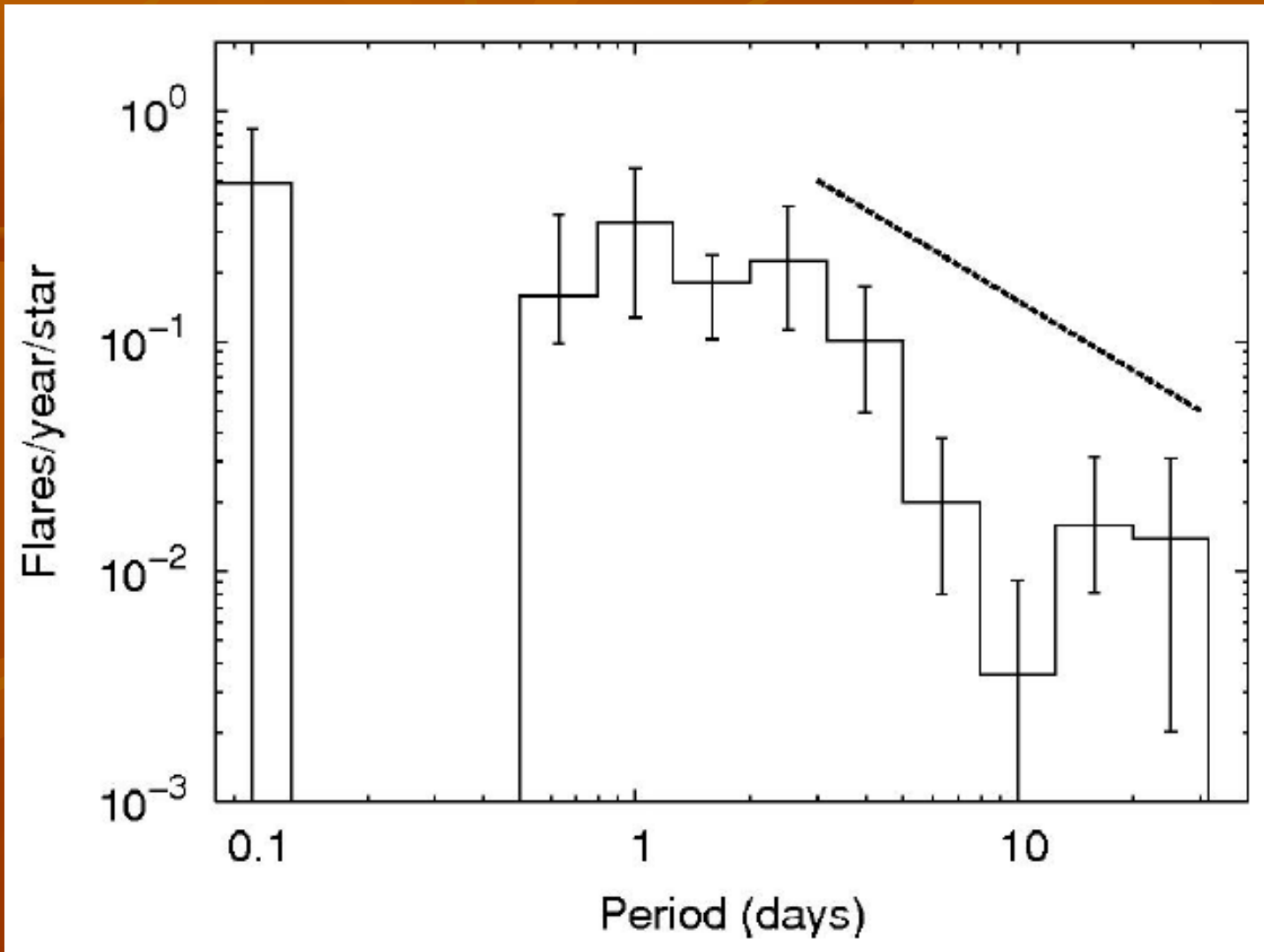
# Вспышки и пятна



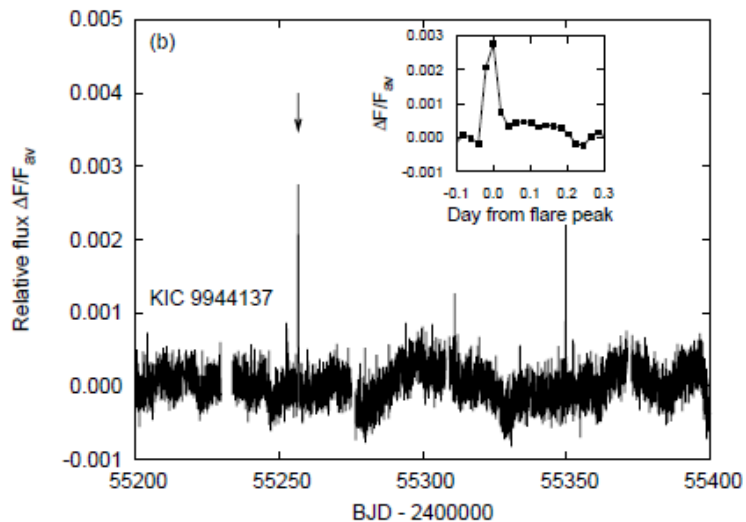
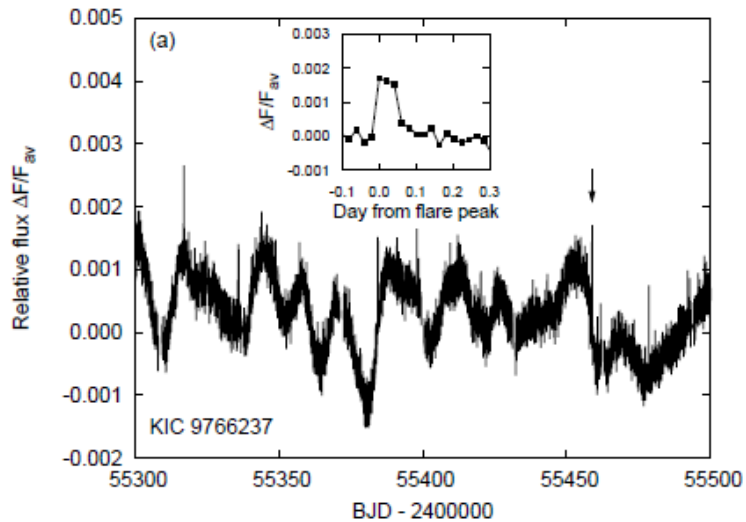
Верхняя группа – вспышки на звездах.  
Нижняя – на Солнце.

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

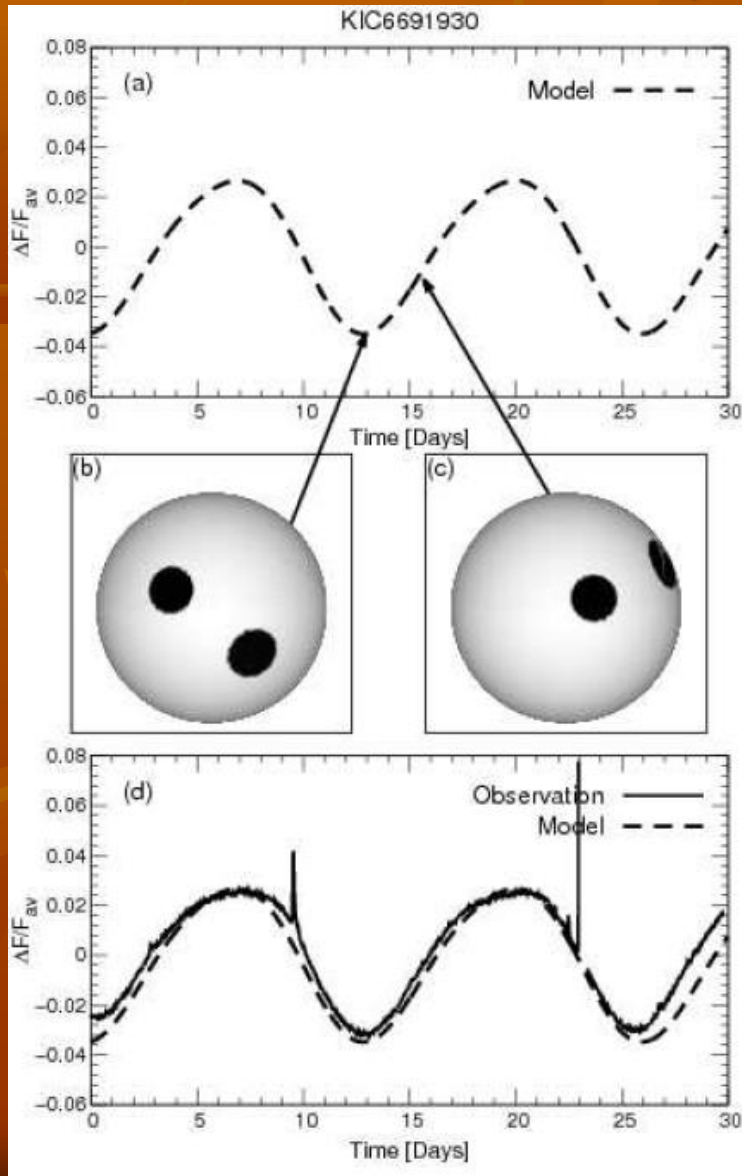


# Вспышки на звездах с вращением, как у Солнца



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

# Вспышки, пятна, вращение

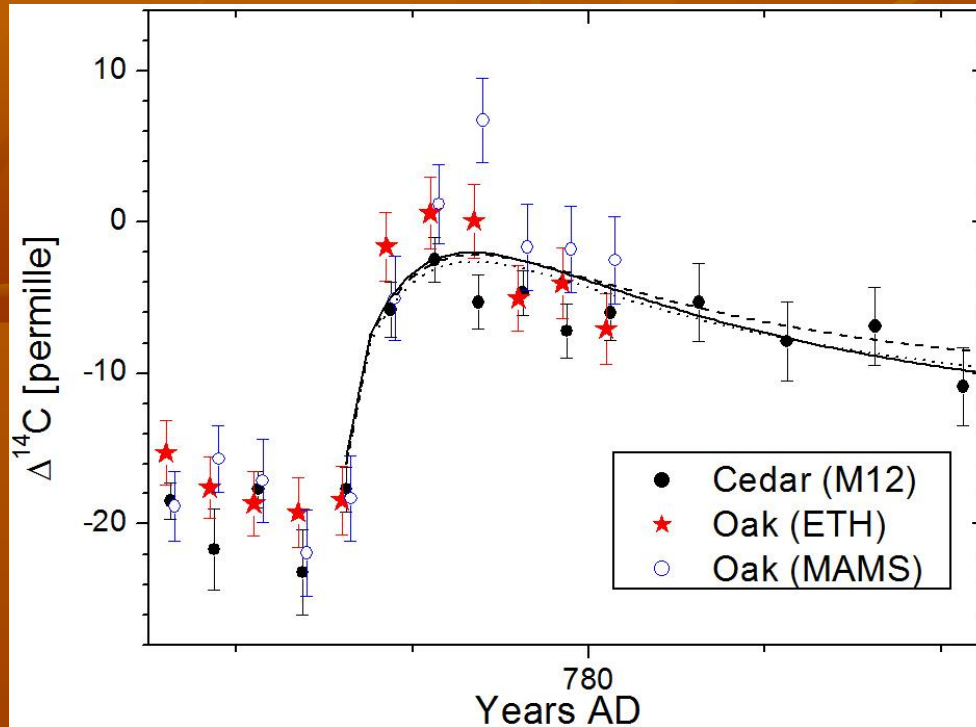


Данные по вспышкам на звездах позволяют строить модели.

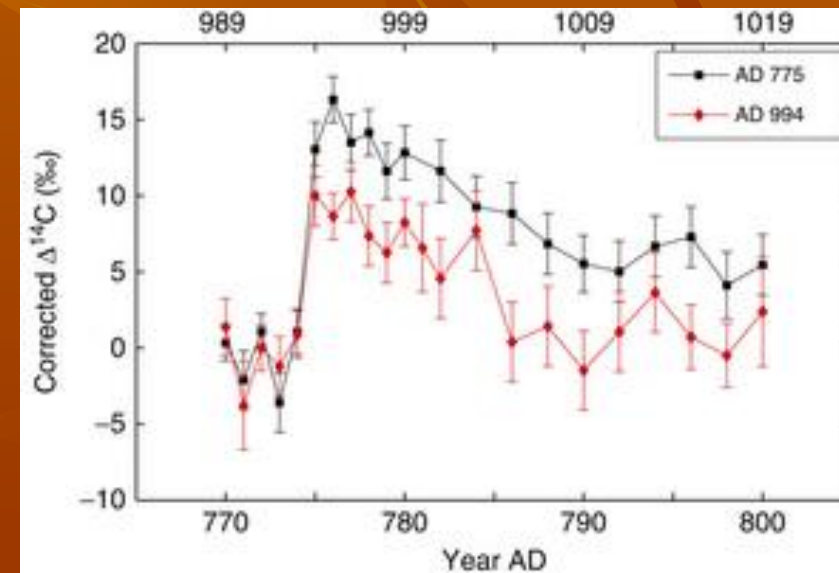
Мощные вспышки могут происходить на Солнце раз в 1000 – 10000 лет.

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

# Вспышка в 8 веке?



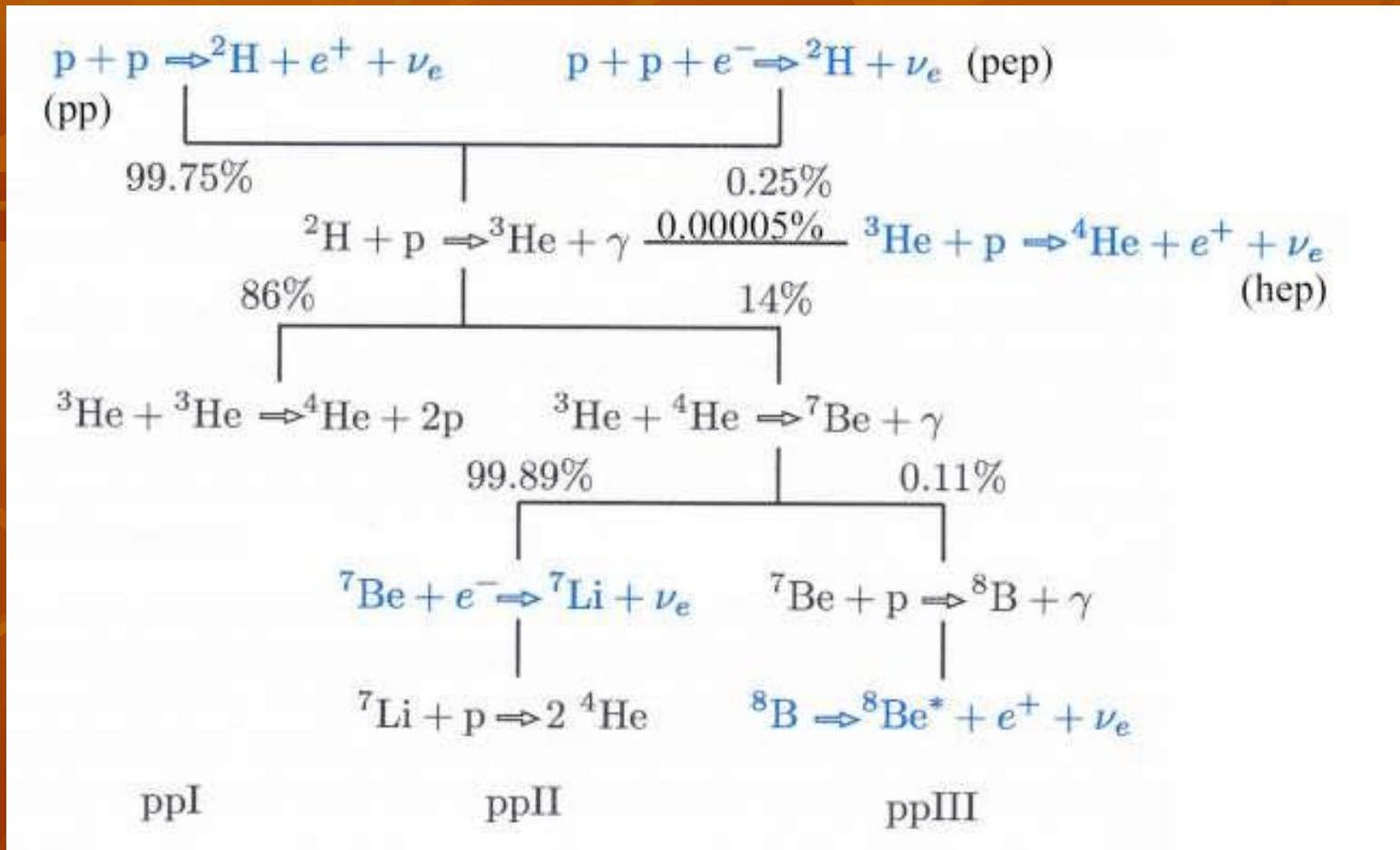
Анализ содержаний углерода-14 показывает, что в 774-775 гг. Была аномалия, которую можно связать с мощной солнечной вспышкой.



О механизме производства  $^{14}\text{C}$  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.).

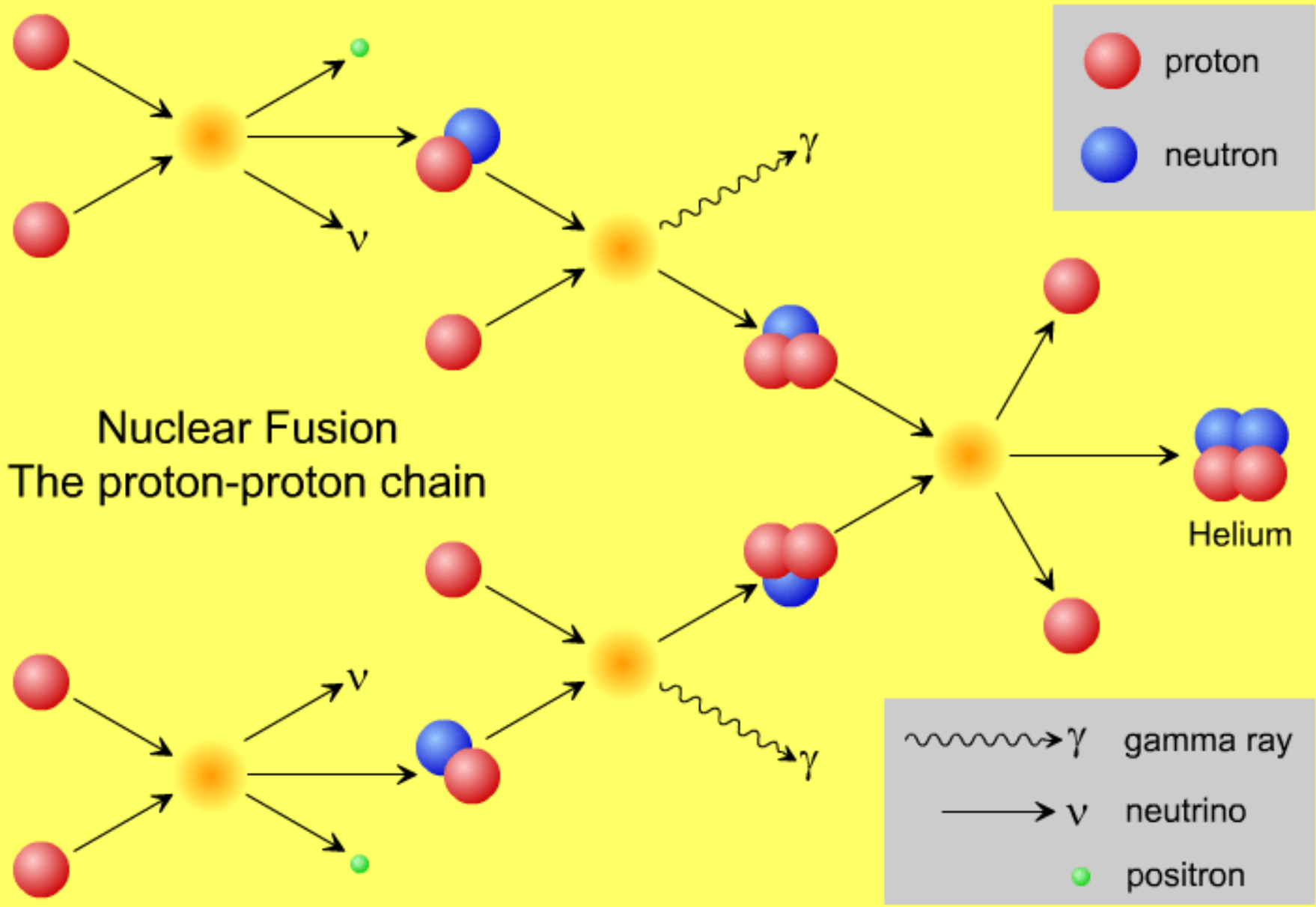
# Солнечные нейтрино



В ряде термоядерных реакций часть энергии уносится нейтрино.

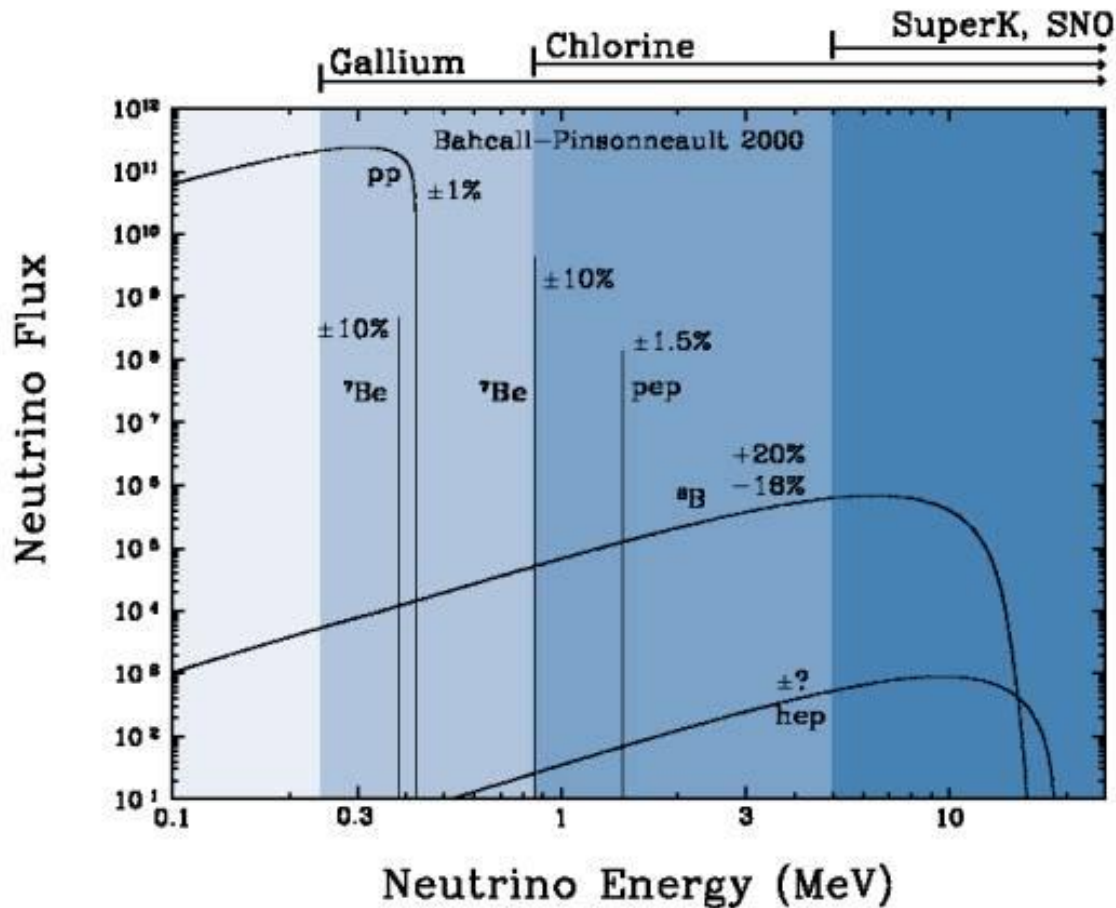
Важно, что эти частицы свободно покидают Солнце.

Т.е., они несут информацию об условиях в солнечных недрах «сейчас».





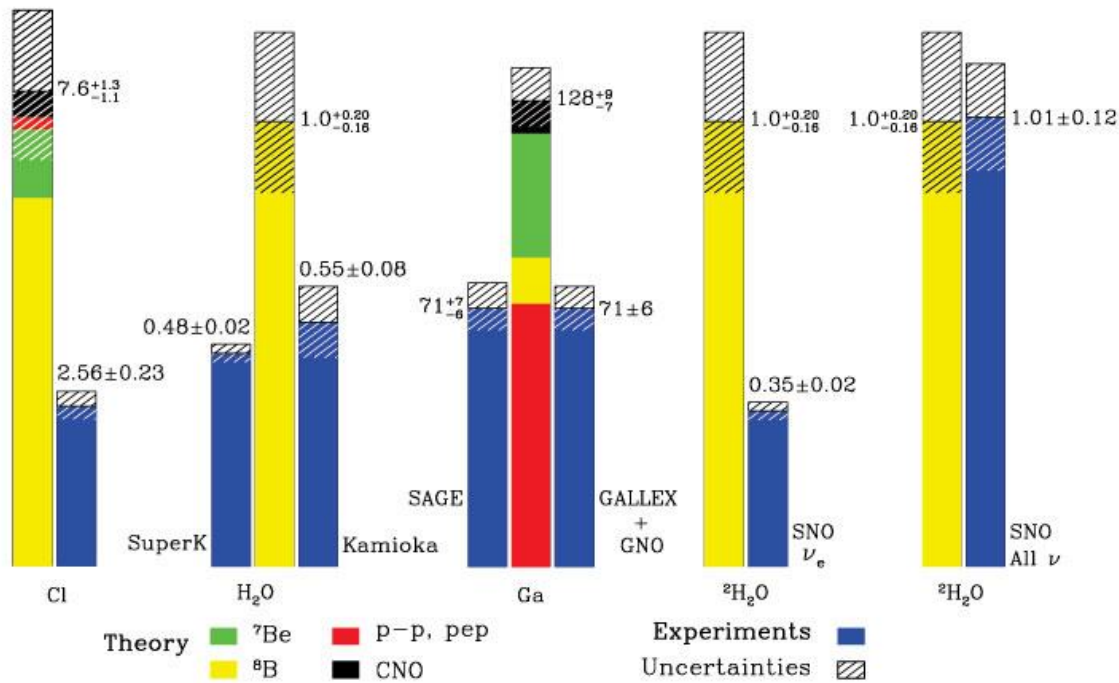
# Регистрация нейтрино



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.

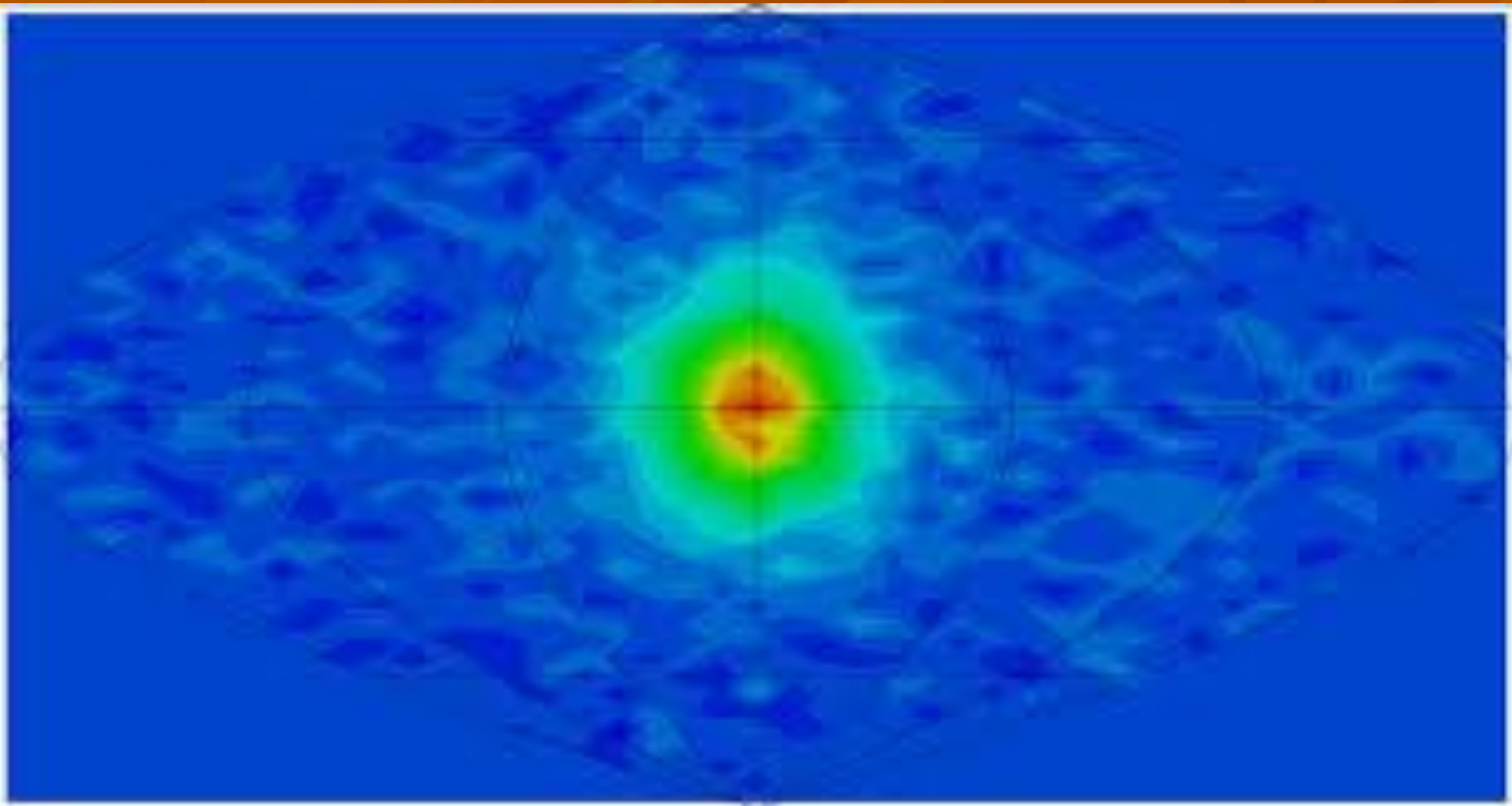
На пути к нам нейтрино разных типов могут превращаться друг в друга.

Это означает, что нейтрино имеют массу.

Нобелевская премия 2015 года!

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

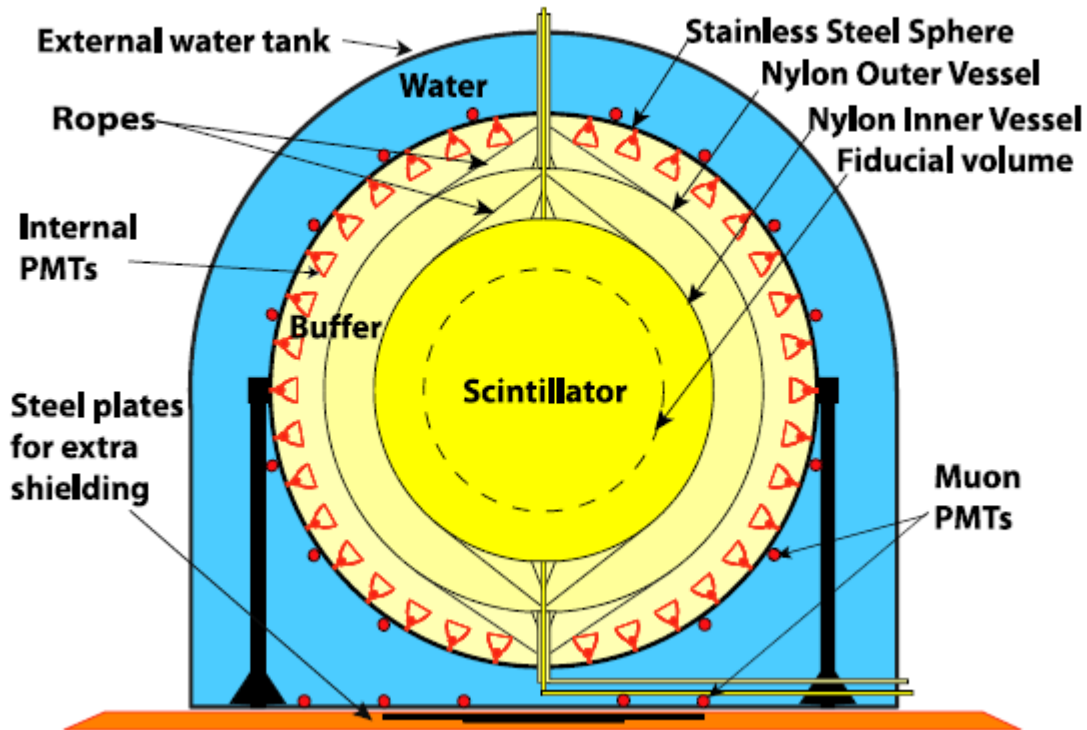
# Нейтринное изображение Солнца



Super-Kamiokande

# Борексино

## Borexino Detector



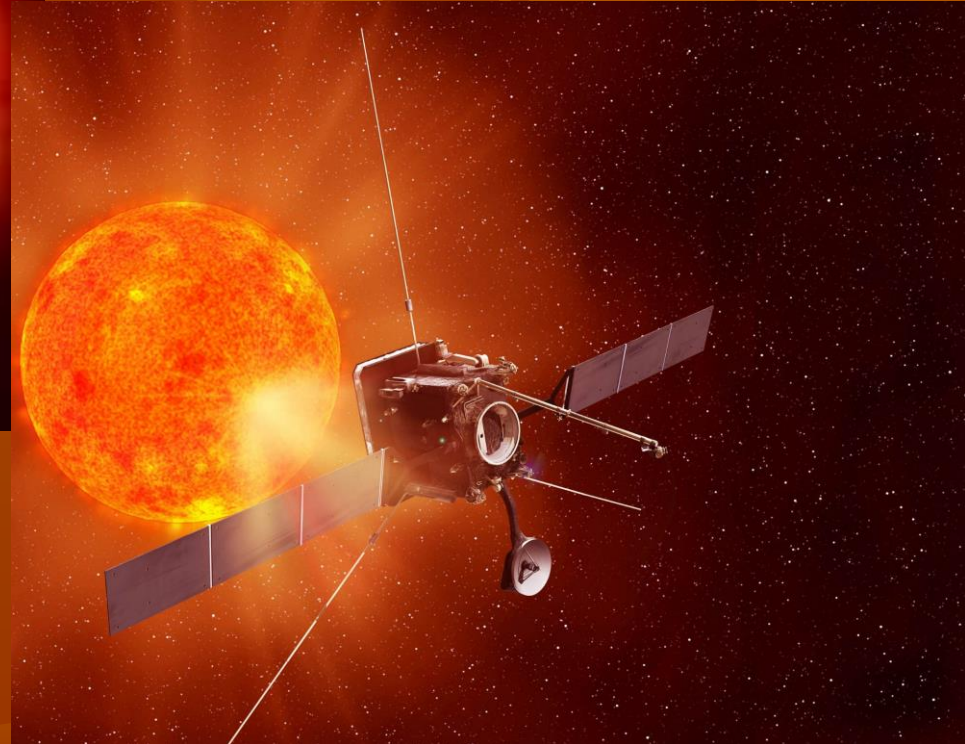
Благодаря достижению очень низкого уровня шума на энергиях ниже 1 МэВ впервые удалось увидеть нейтрино от pp- реакции.

В 2020 г. появилась статья о регистрации нейтрино от реакций от CNO-цикла.

[arXiv:2006.15115](https://arxiv.org/abs/2006.15115)

# Новые спутники

Parker Solar Probe (2018-...)



Solar Orbiter (2020-...)

