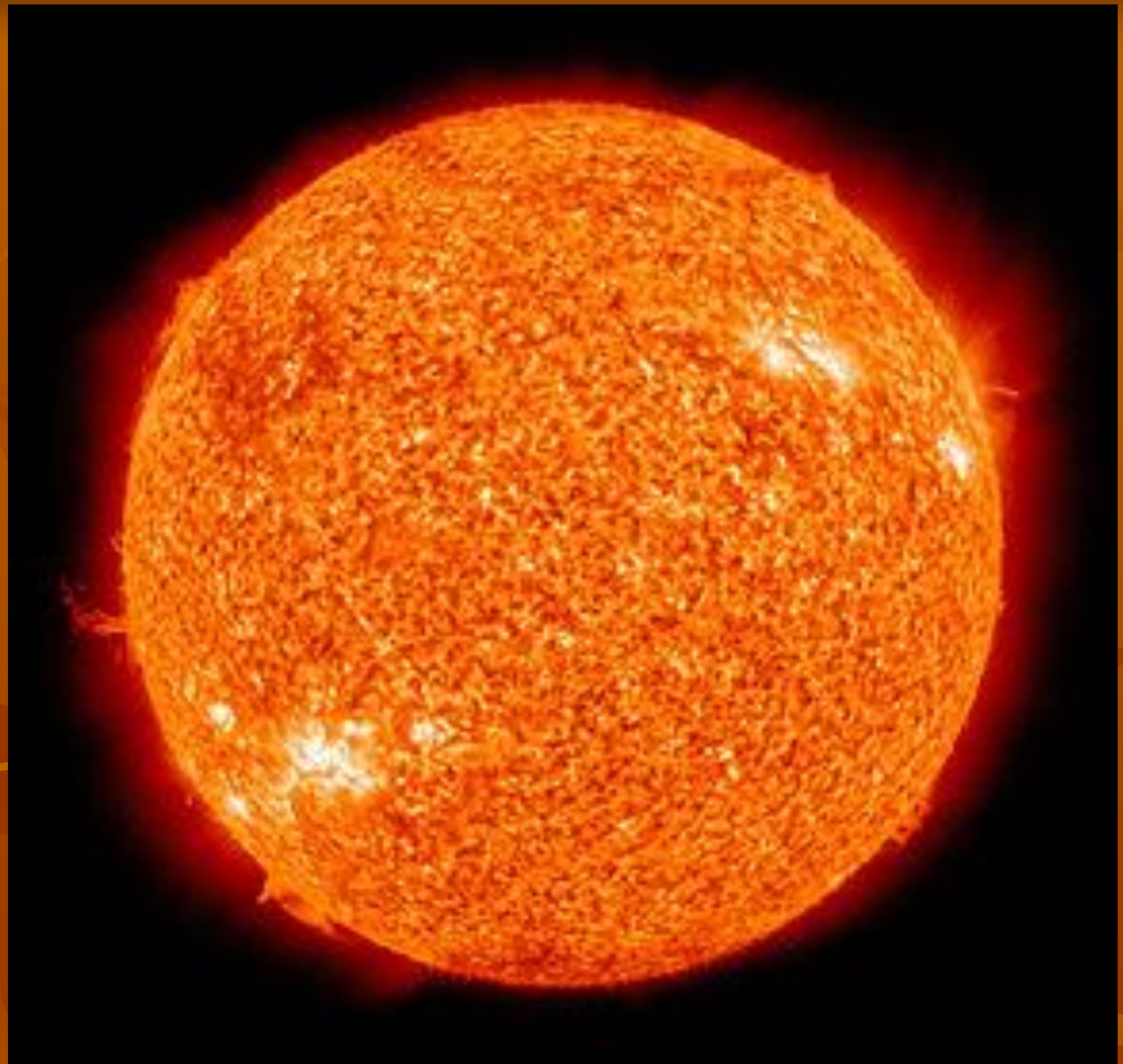
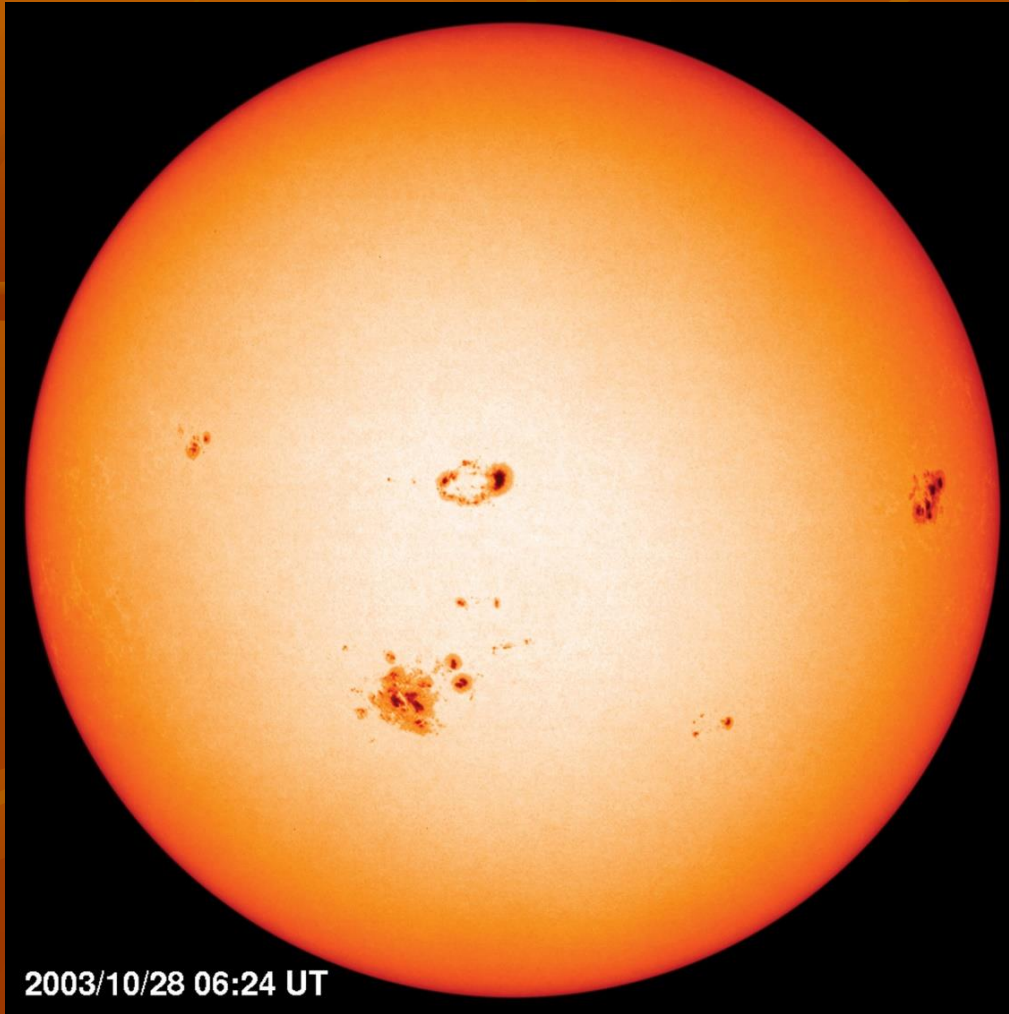


Солнце

Сергей Попов
(ГАИШ МГУ)

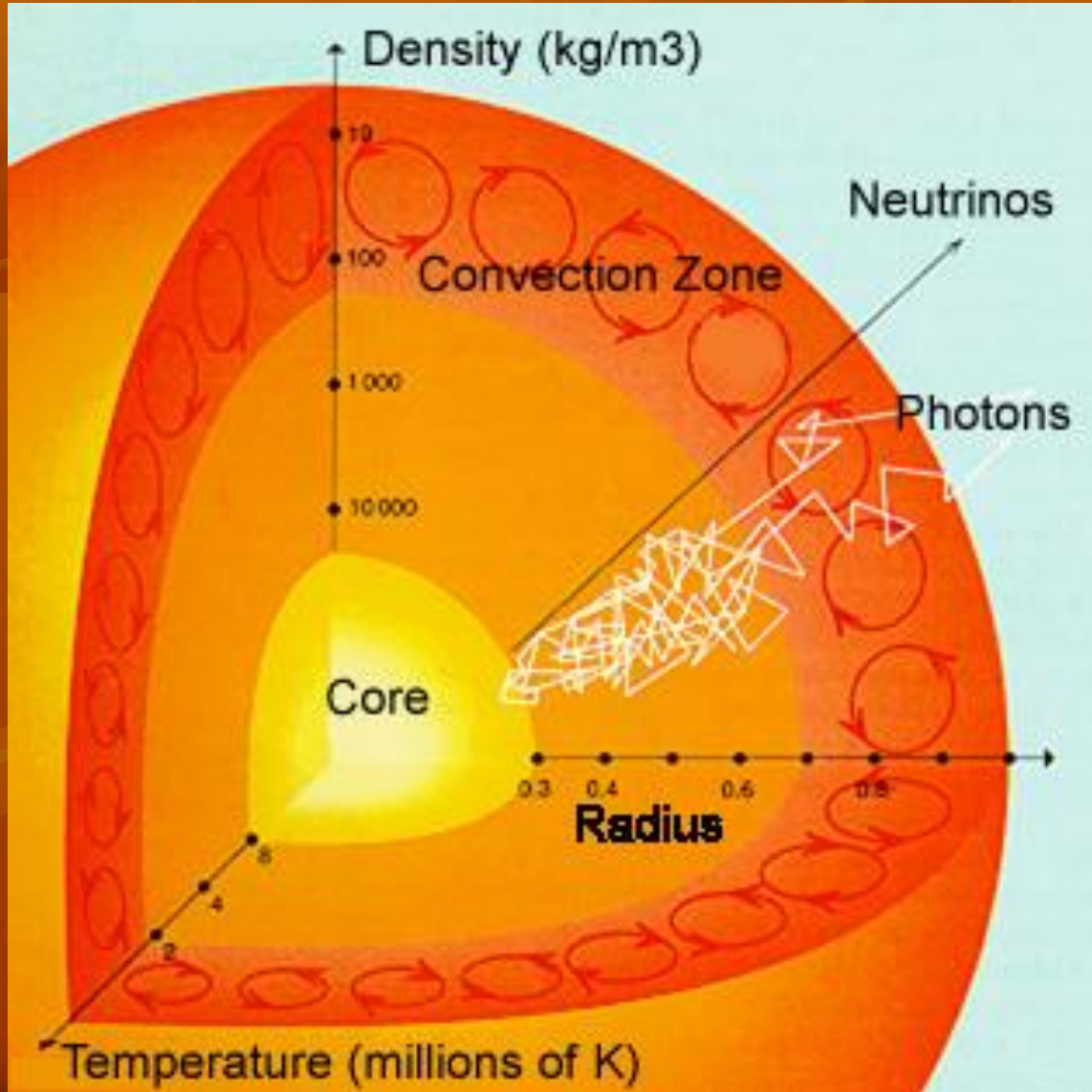


Основные параметры



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

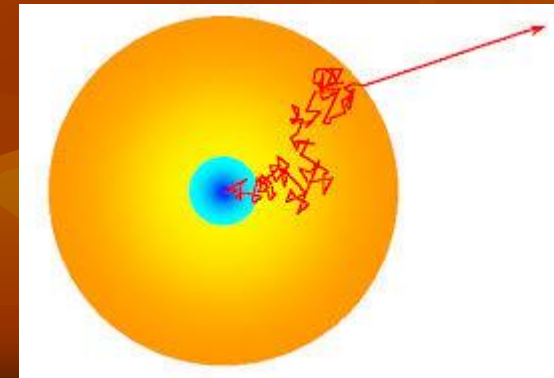


Ядро – термоядерное горение.

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.

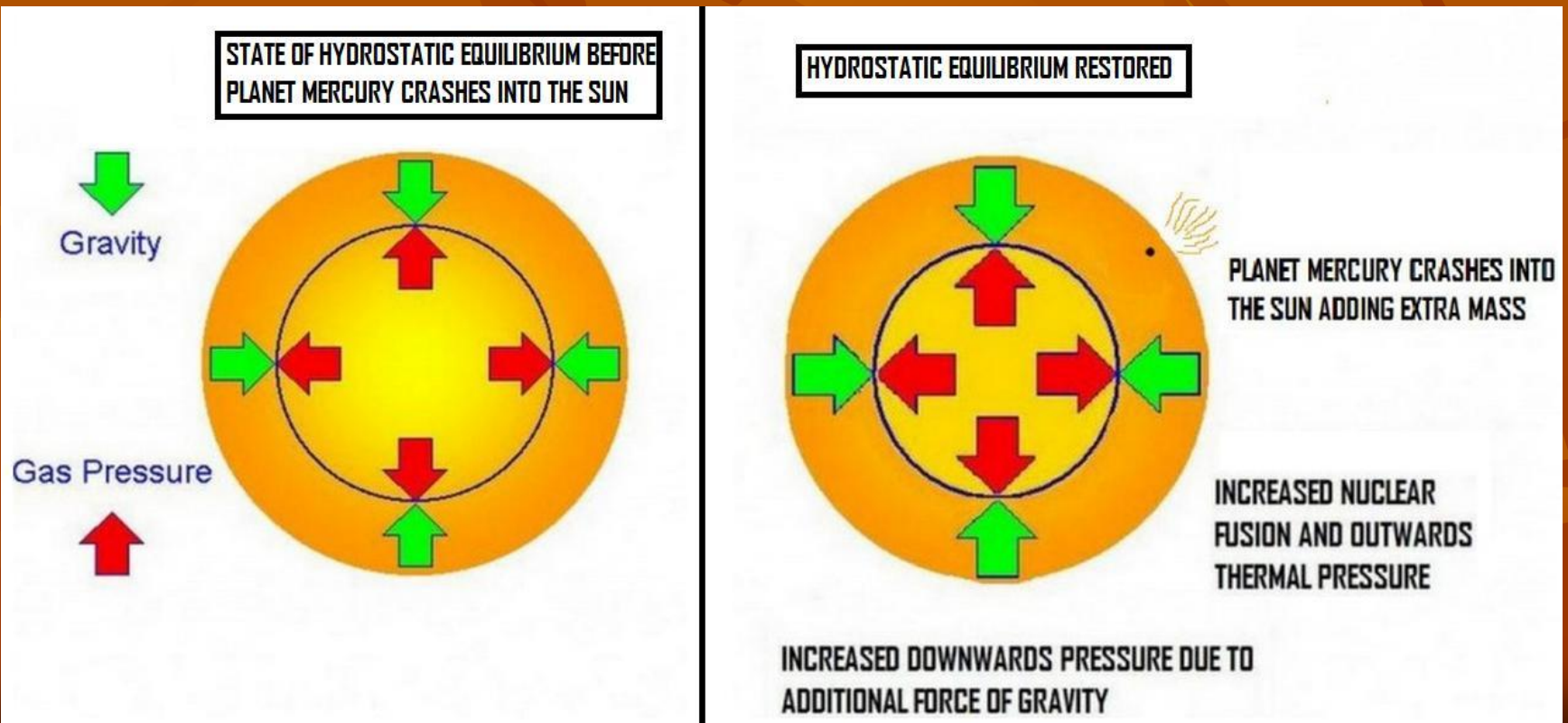
«Отрицательная теплоемкость».

При нагреве Солнца оно расширяется и остывает.

При охлаждении – сжимается и нагревается.

Это общее свойство систем в равновесии при участии гравитации.

Теорема вириала.

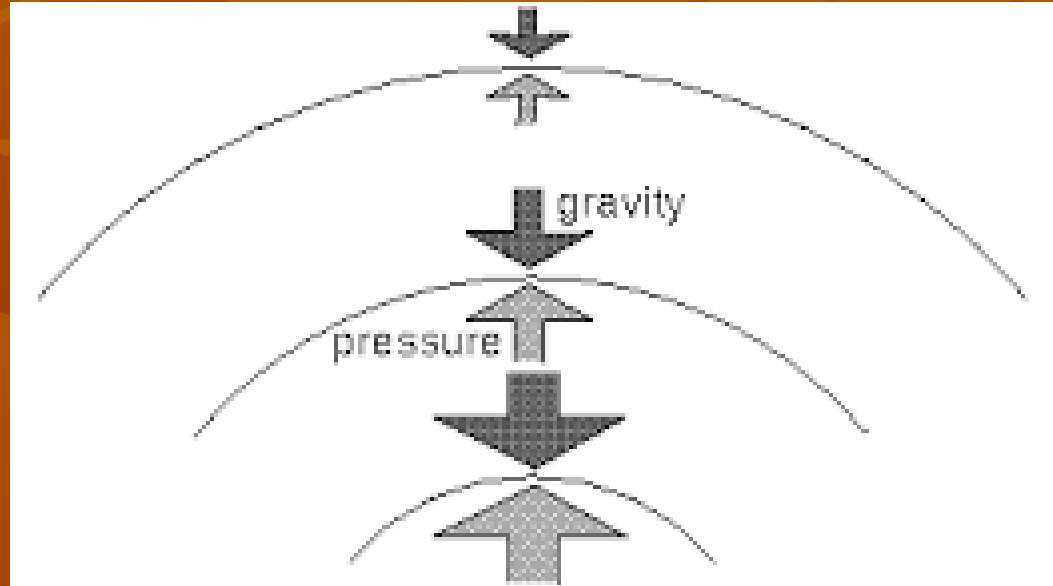


Гидростатическое равновесие

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

or,

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

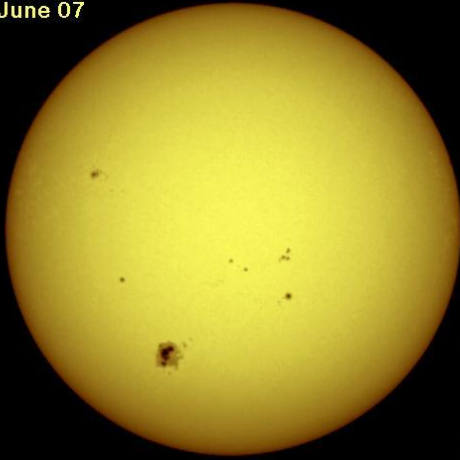


Deeper layers have more gravity compression, so they have greater outward pressure to compensate.

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

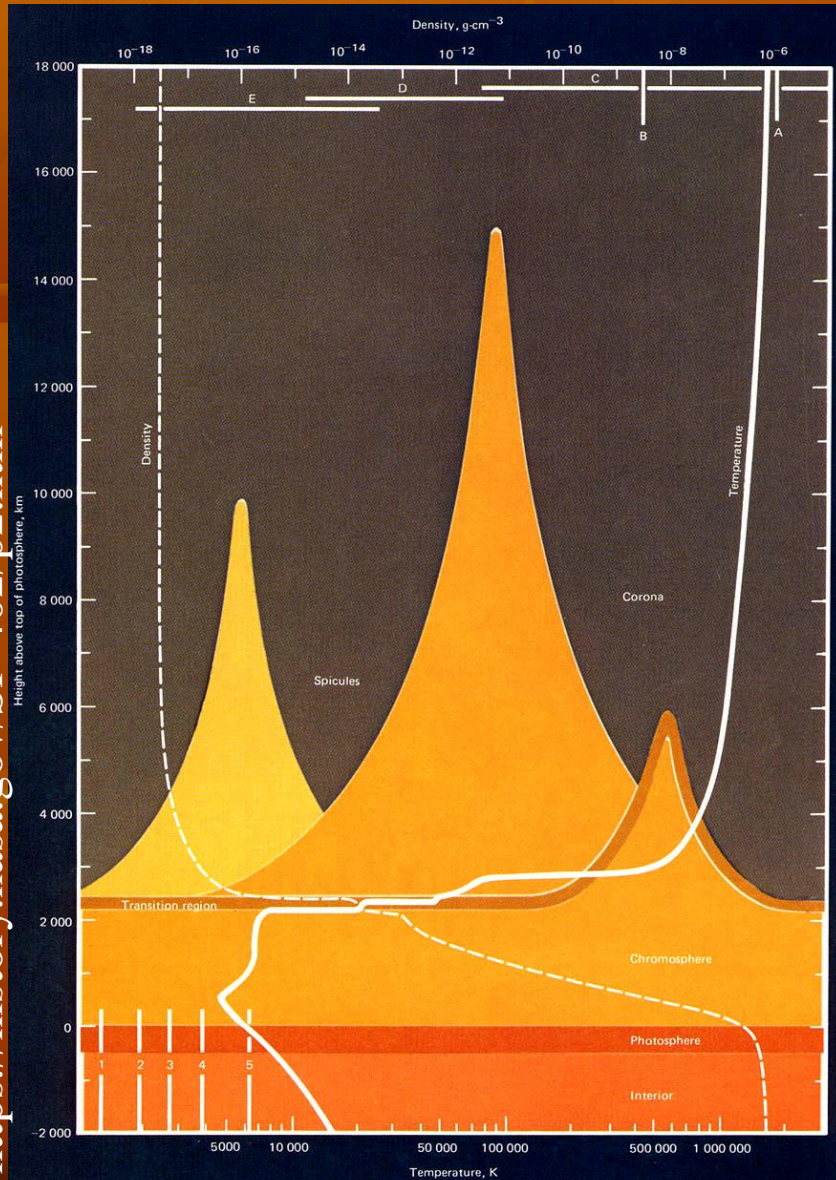
Корона

Разреженная, но
очень горячая.

Видна по время затмений.



Внешние слои: свойства

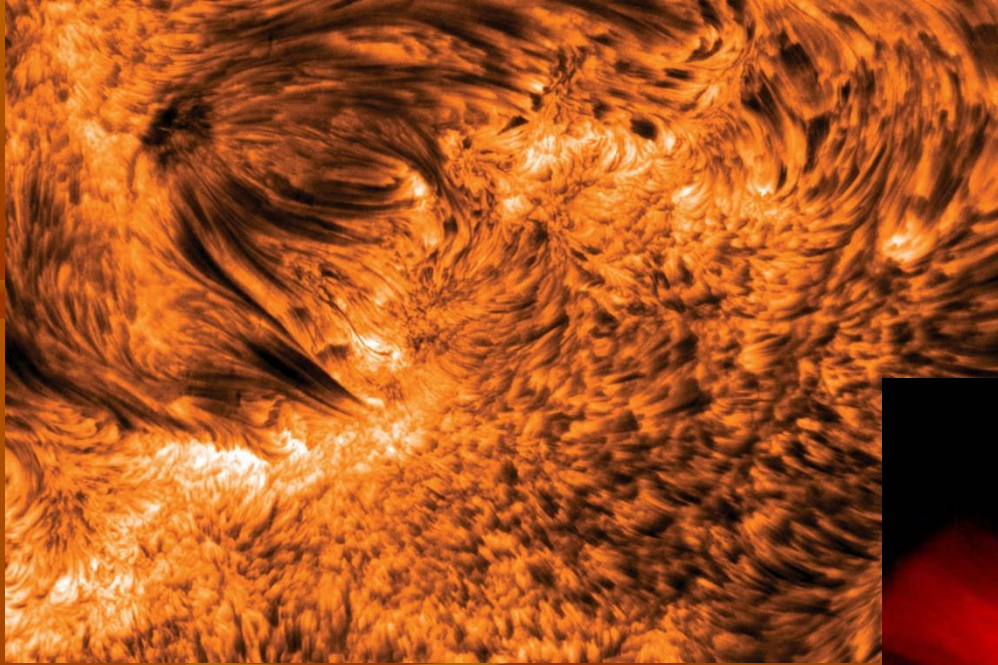


Фотосфера имеет толщину около 400 км.

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

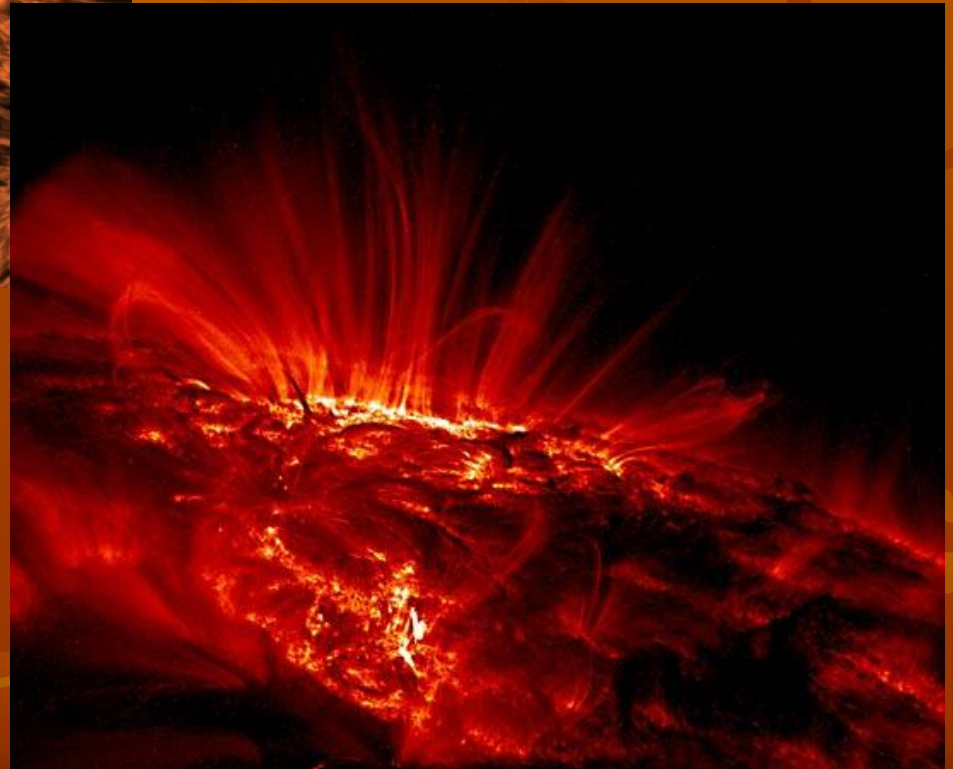
Корона имеет размер порядка
нескольких миллионов километров.
Температура там - несколько млн. градусов.

Солнечные пятна

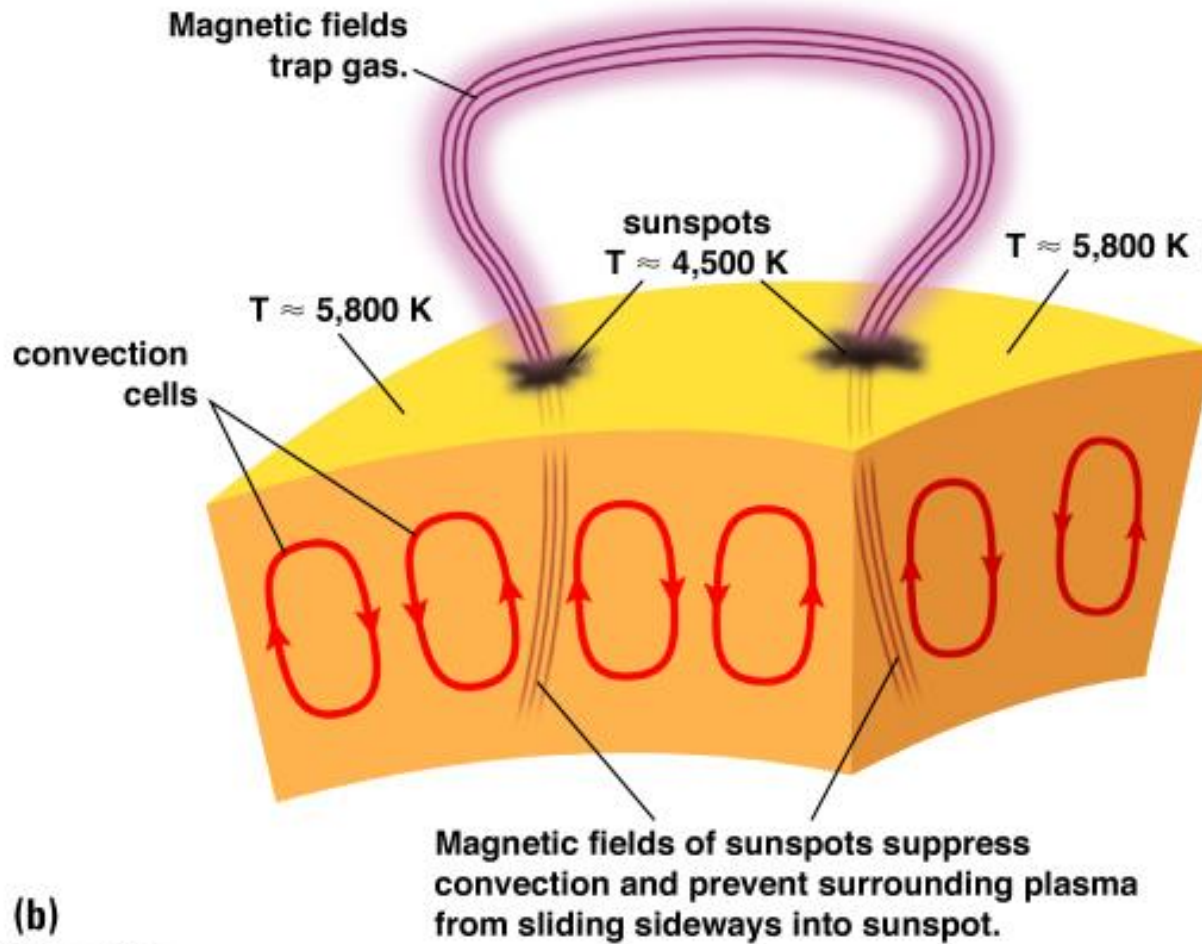


Температура пятен ниже – 4500К,
поэтому они кажутся темнее.

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



Пятна и магнитные поля

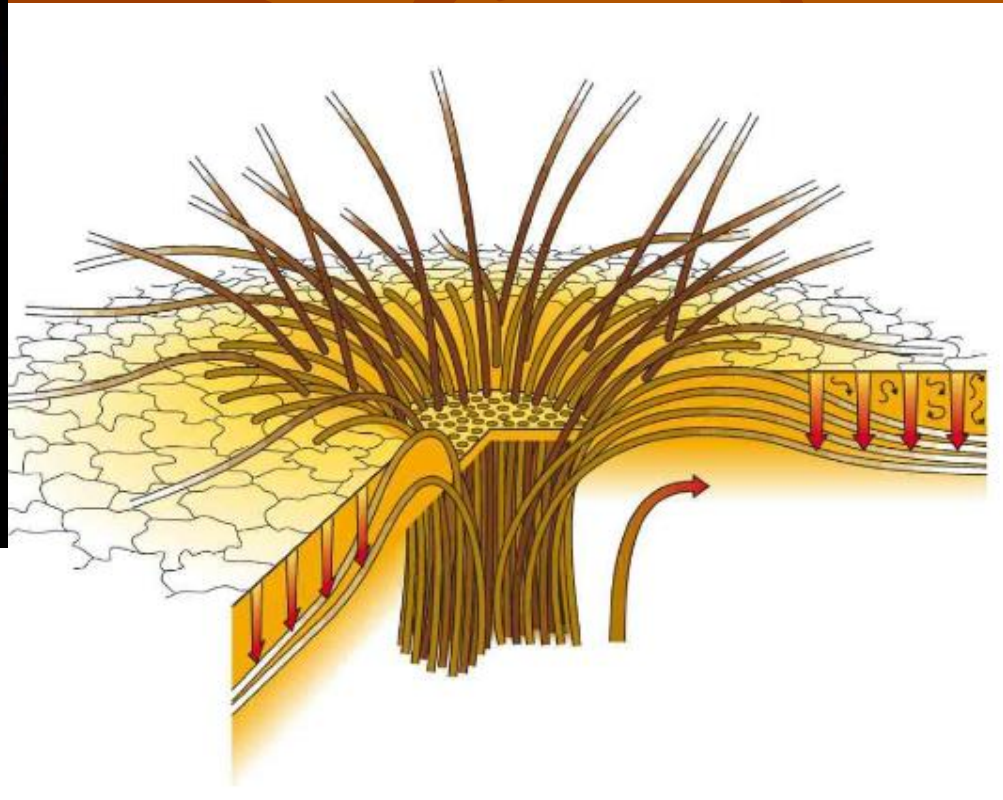
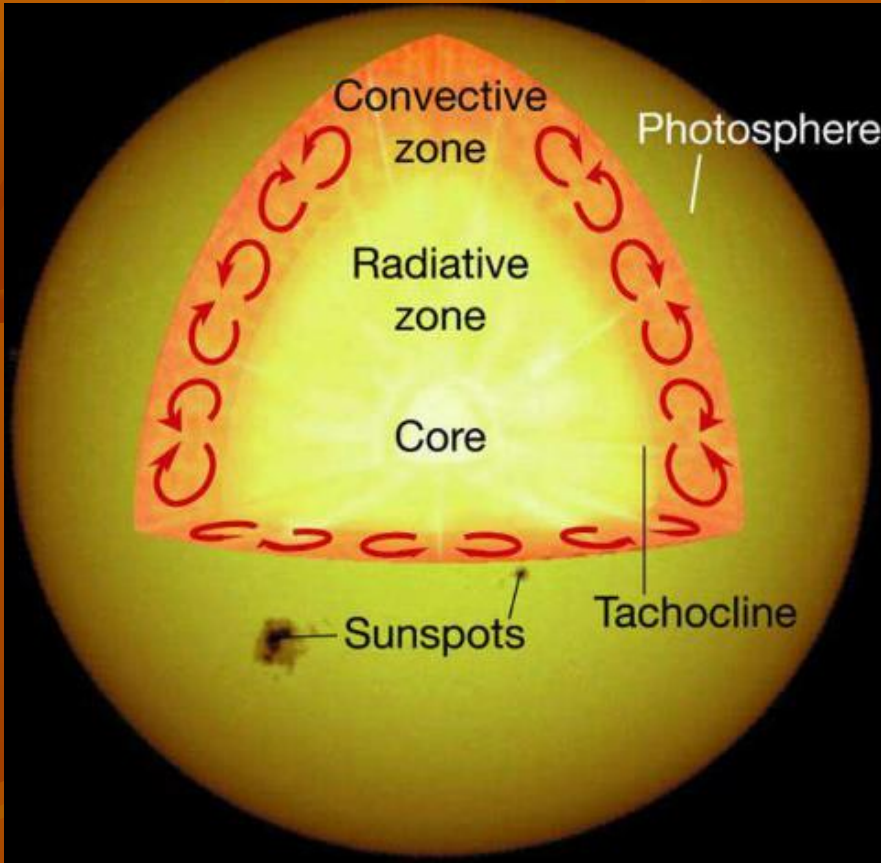


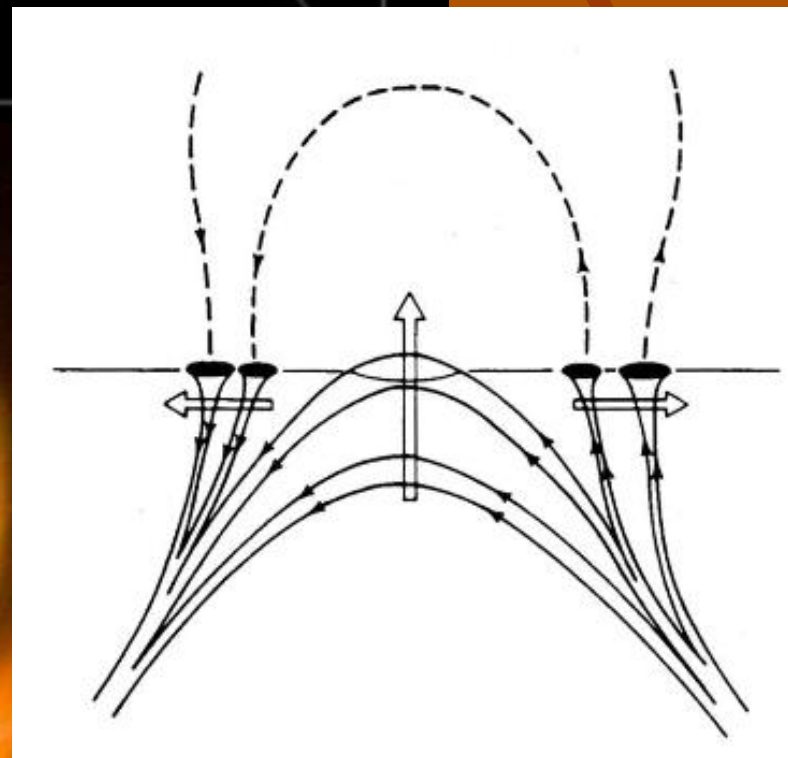
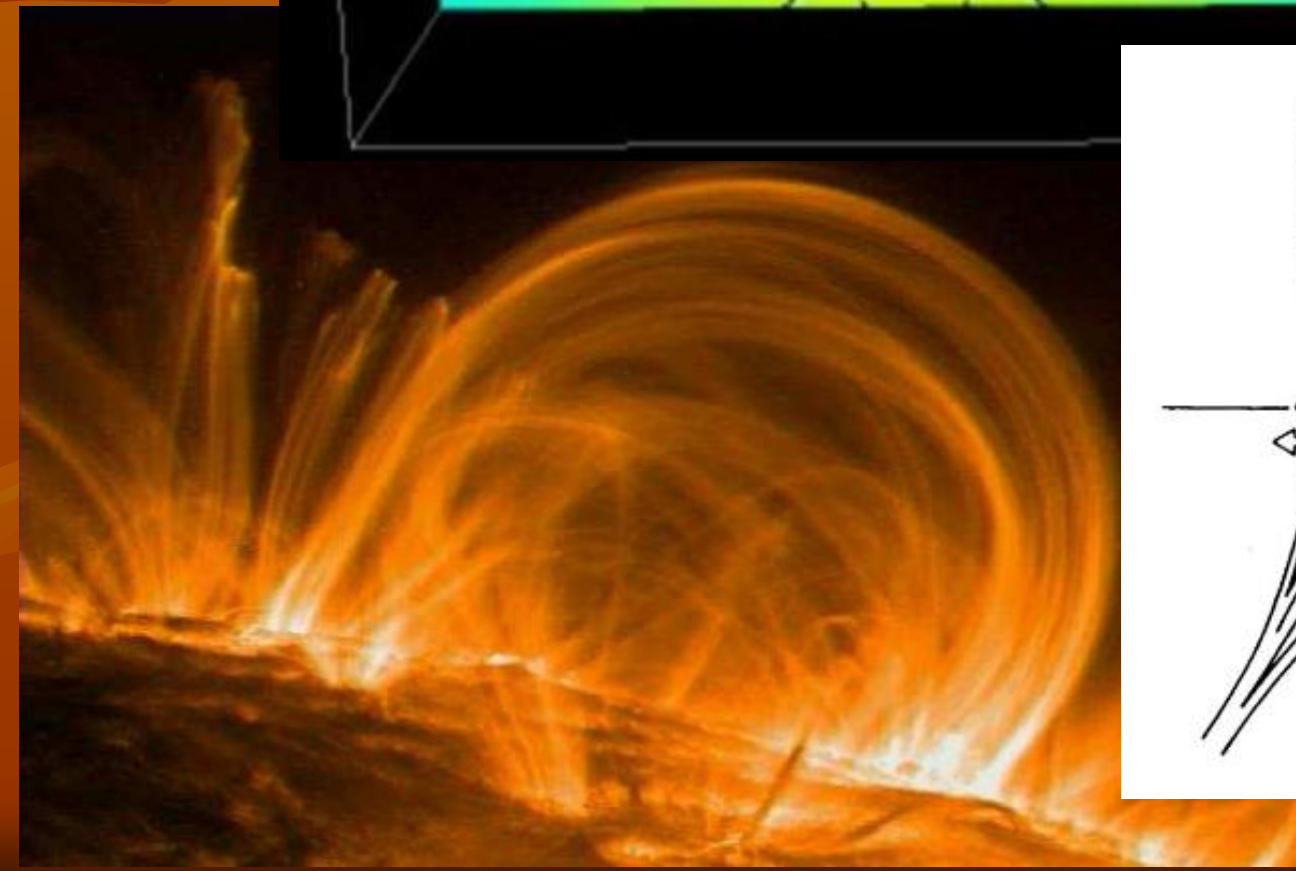
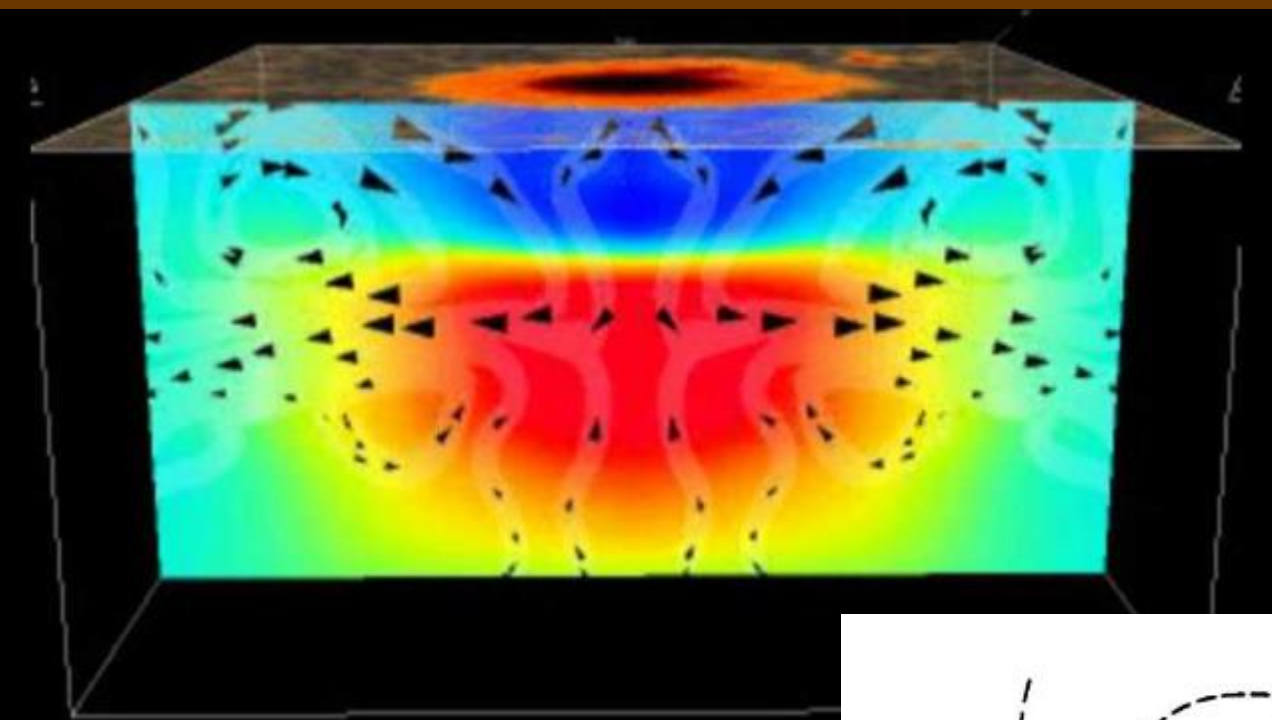
(b)

Copyright © Addison Wesley

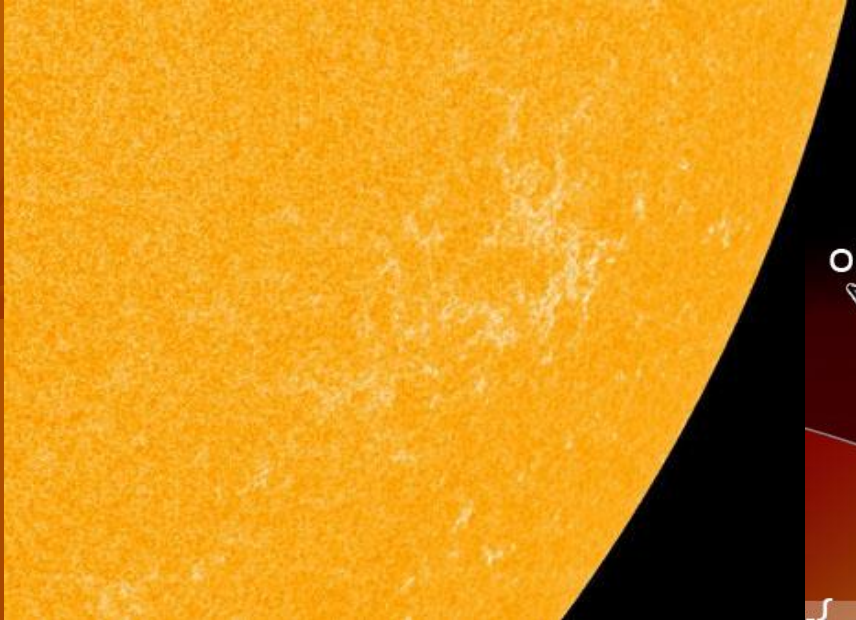
Сильные магнитные поля подавляют конвективный подвод тепла в области пятен.

Роль магнитных полей

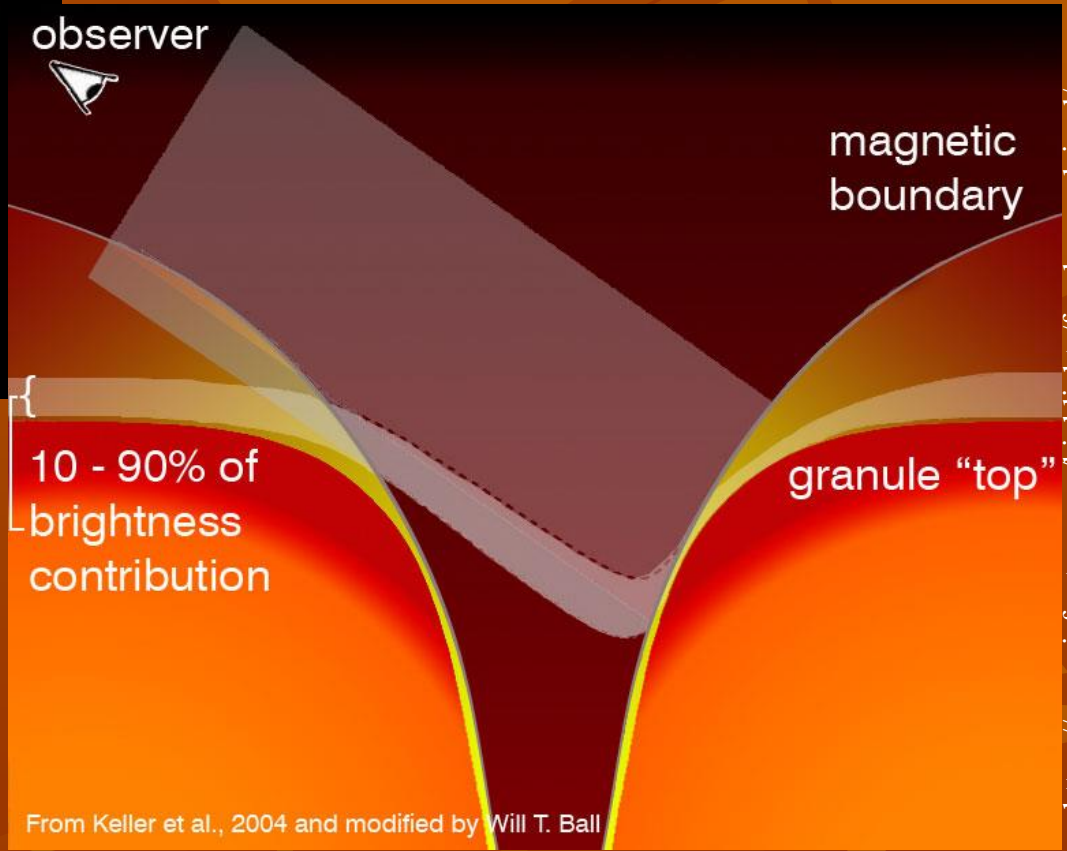




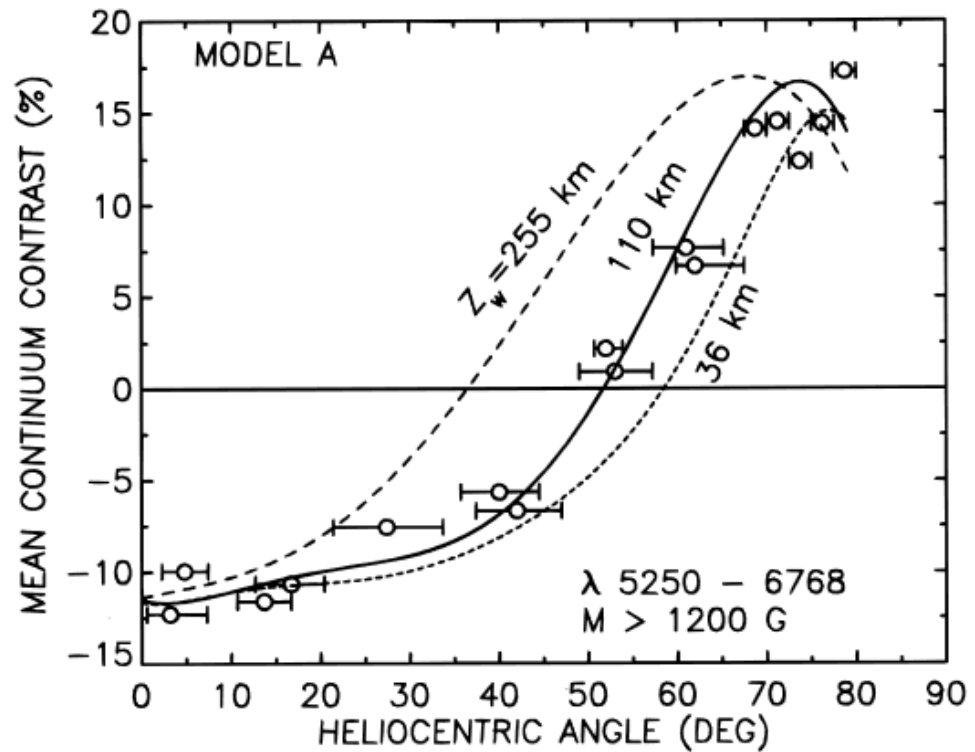
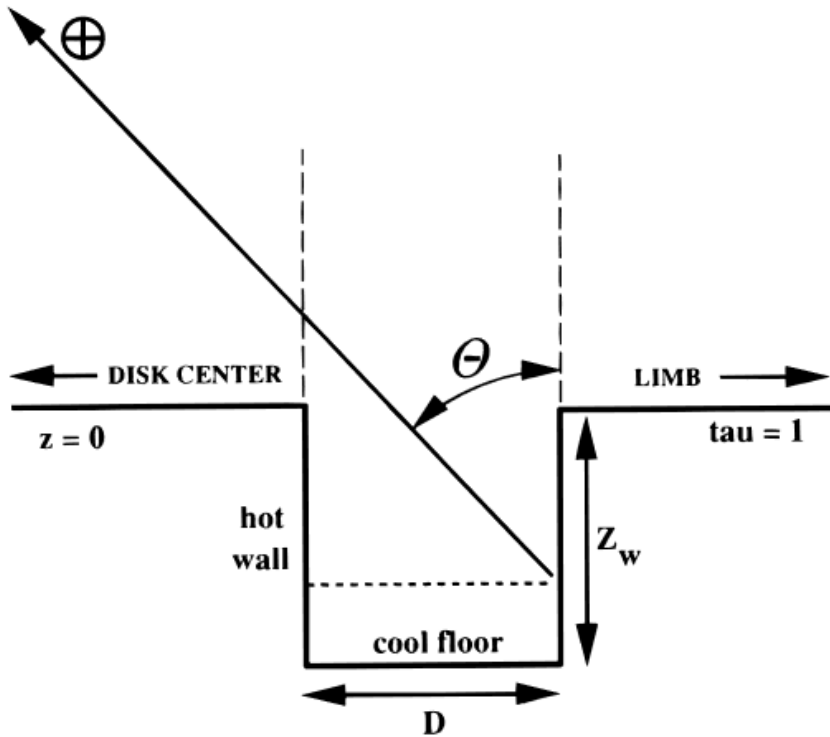
Факельные поля



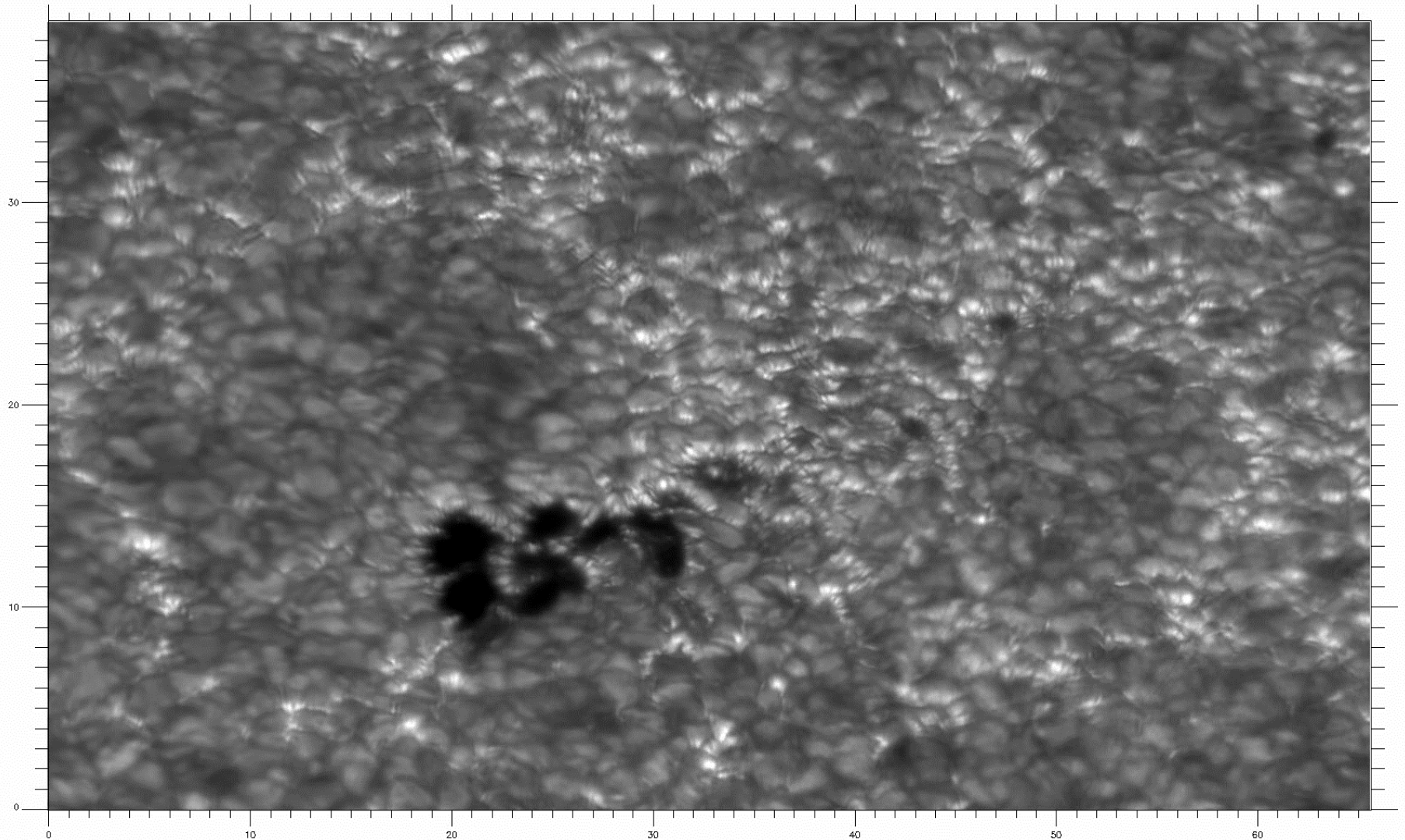
Сильное магнитное поле уменьшает плотность газа в области между гранулами, что приводит к повышению прозрачности и позволяет видеть более глубокие и горячие слои.



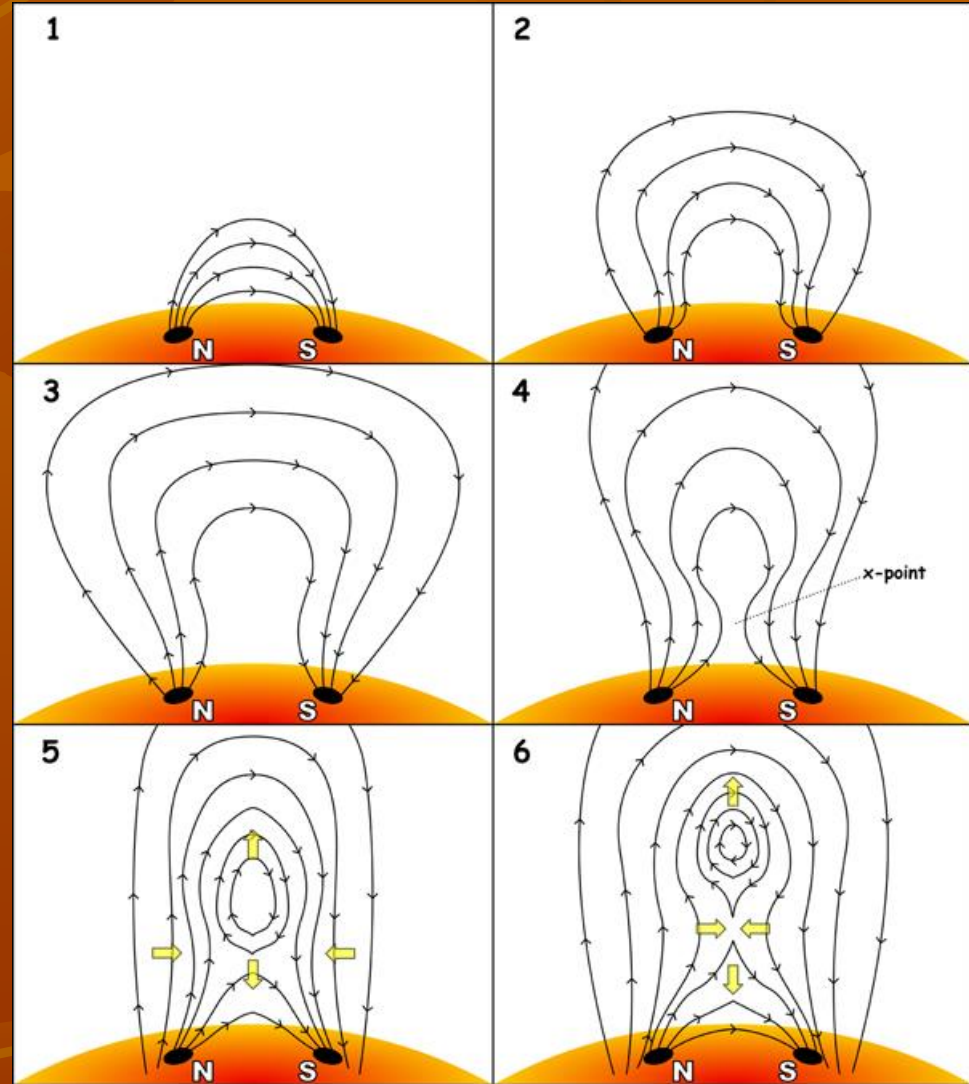
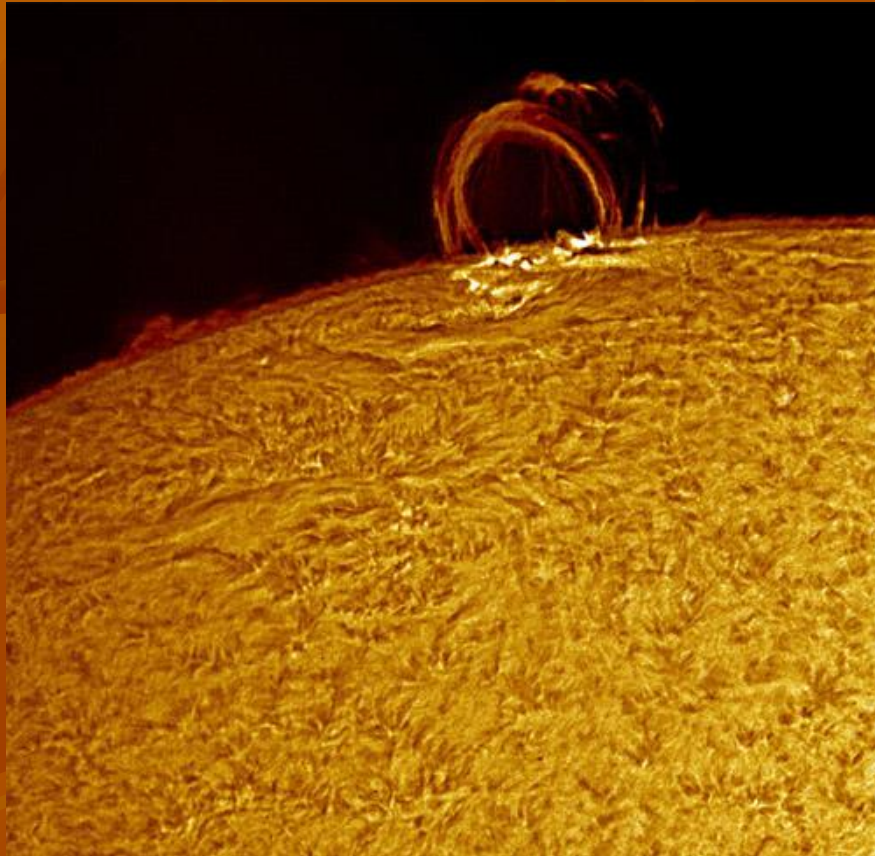
Модель факельных полей



Солнечные факелы

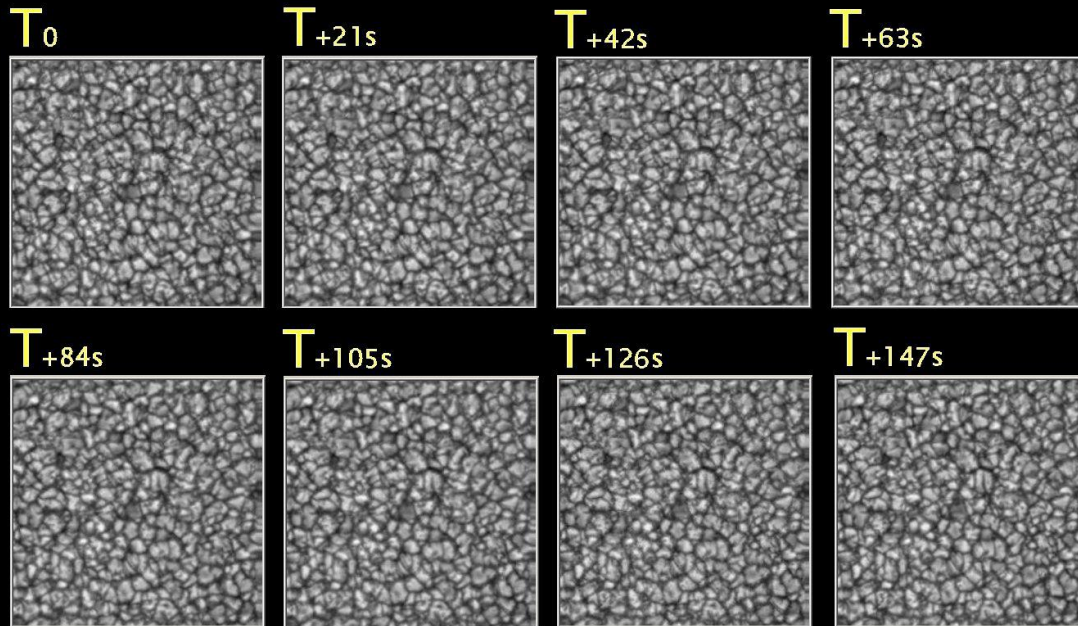


Протуберанцы

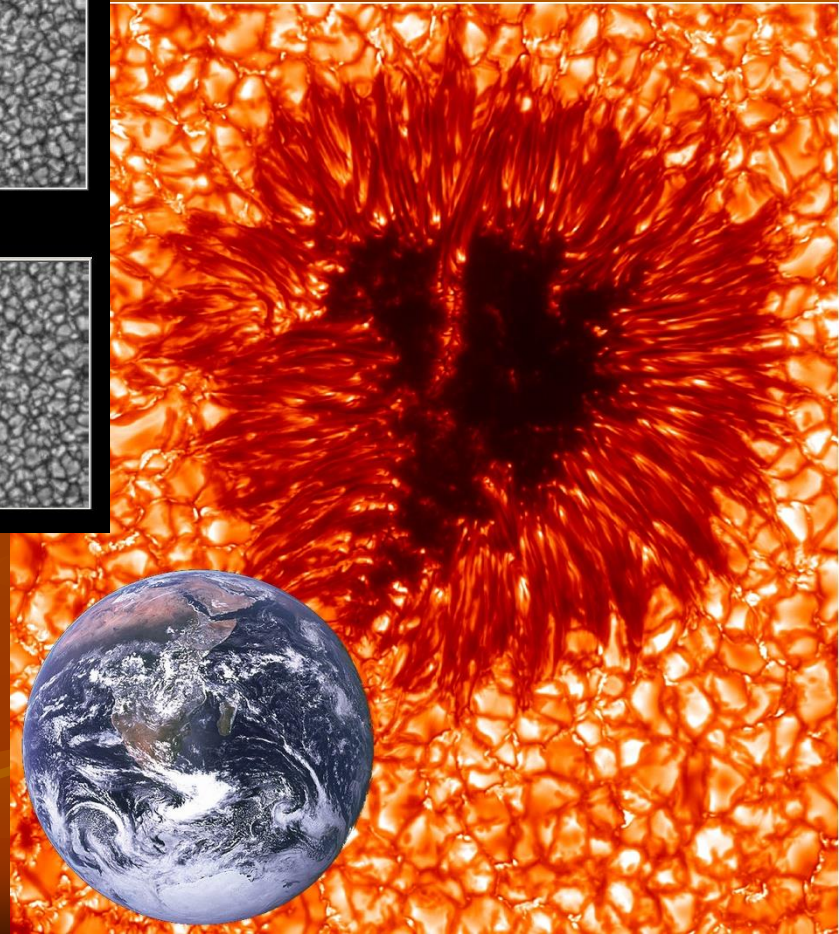


Солнечная грануляция

Solar Granulation (from SVST, La Palma)



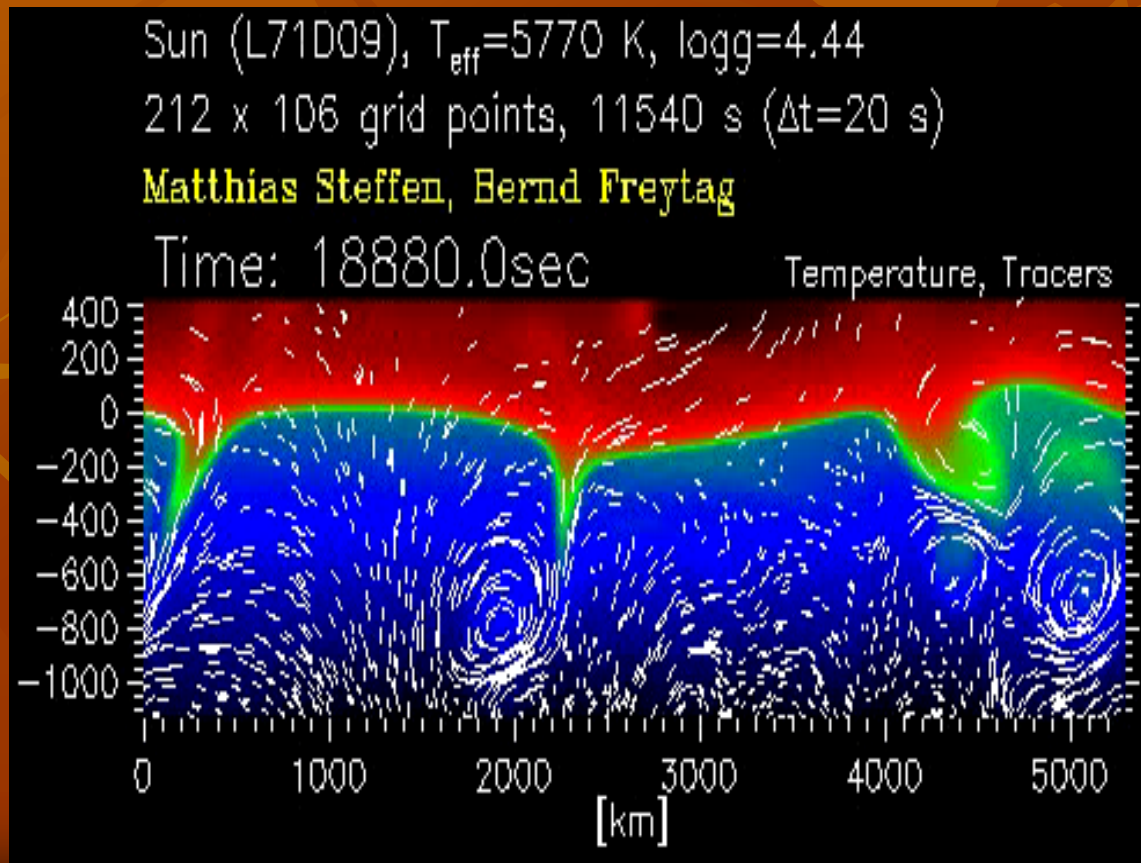
Гранулы имеют размеры порядка 700 км и живут несколько минут.



Моделирование Солнца

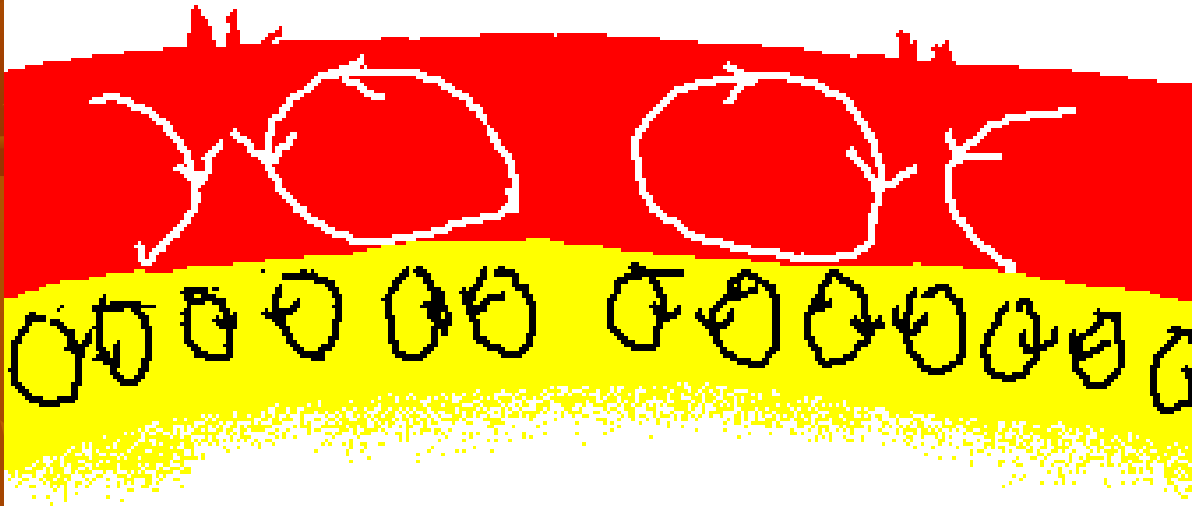
Основные проявления солнечной активности связаны с магнитными полями.
Сами поля во многом связаны с динамикой внешних слоев Солнца.

Внешняя часть Солнца конвективна.

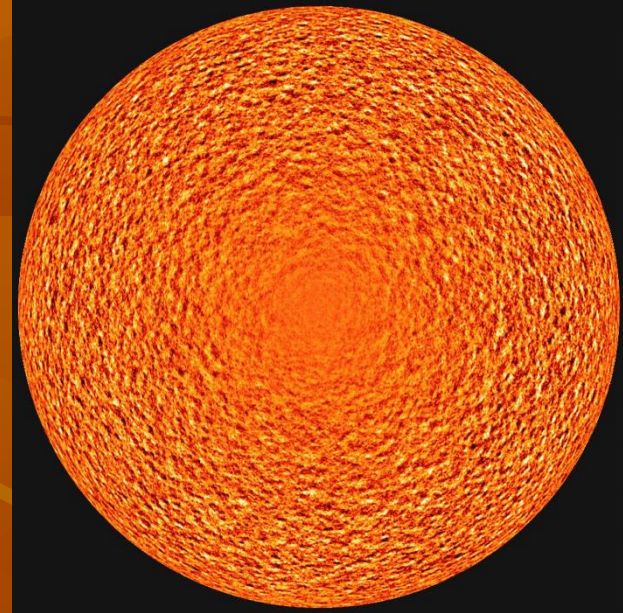


Супергрануляция в хромосфере

supergranulation in chromosphere



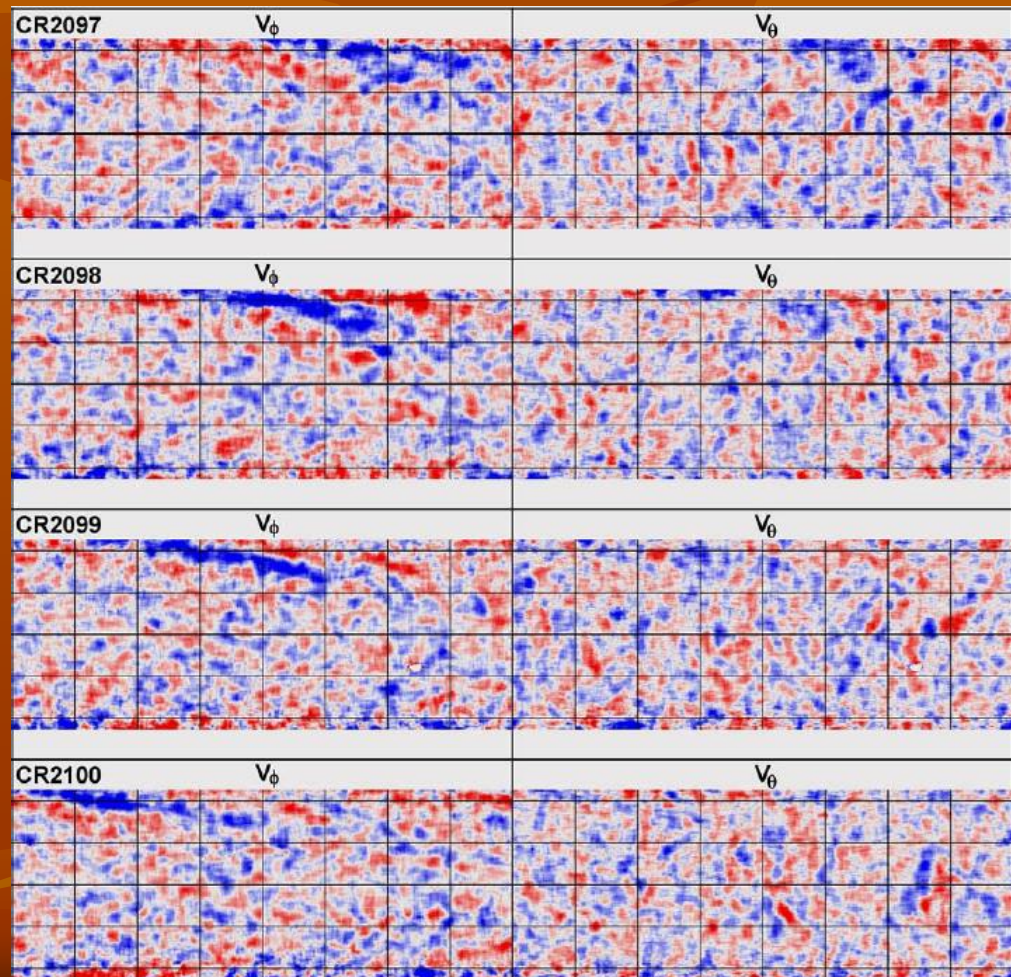
granulation in photosphere



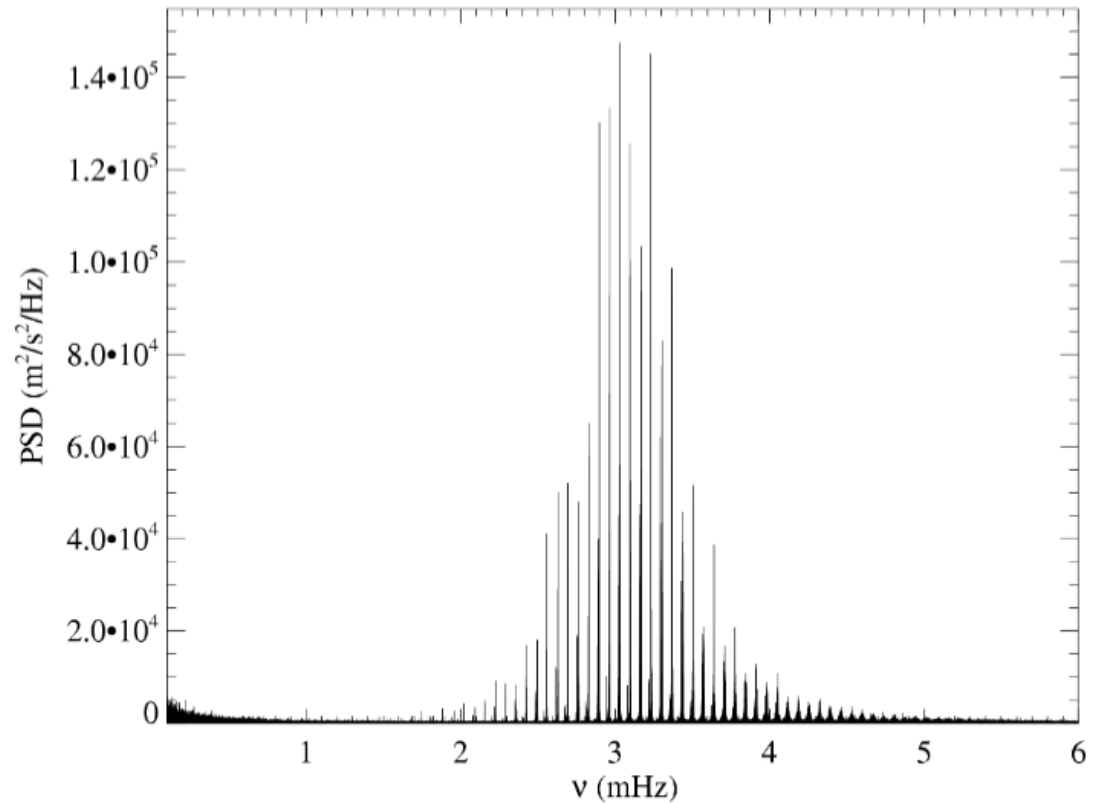
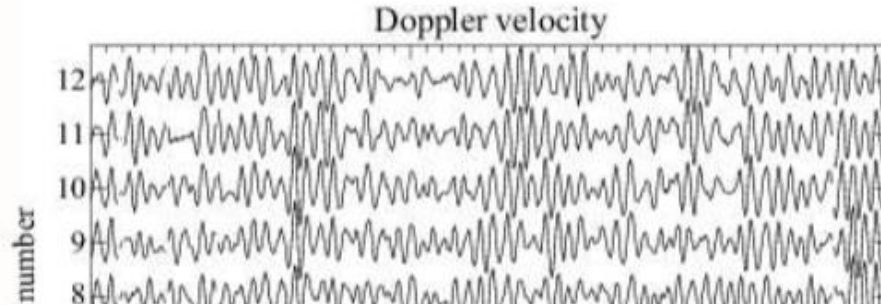
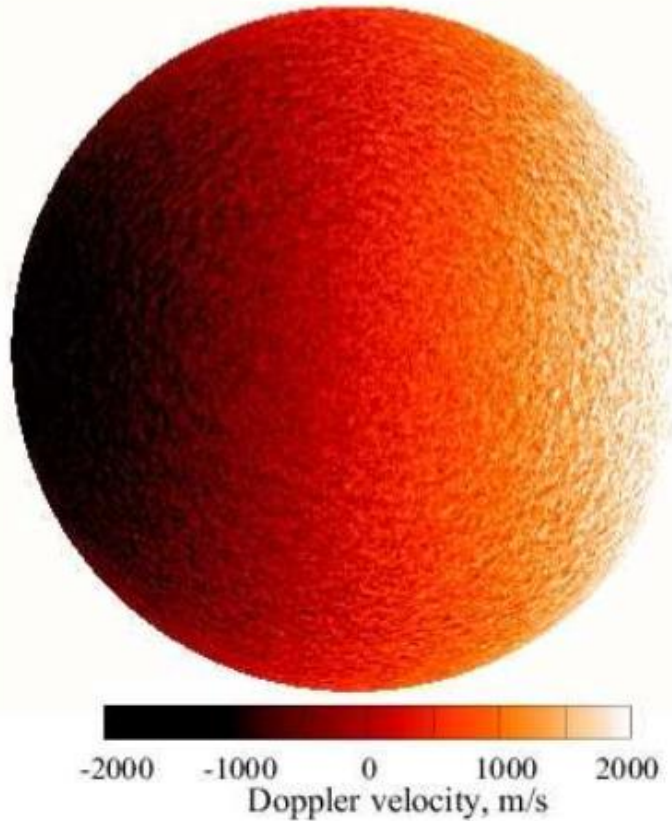
Супергранулы хорошо видны на хромосферных изображениях. Их размеры в десятки раз больше, чем у гранул в фотосфере. Существуют порядка одного дня.

Гигантские конвективные ячейки

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

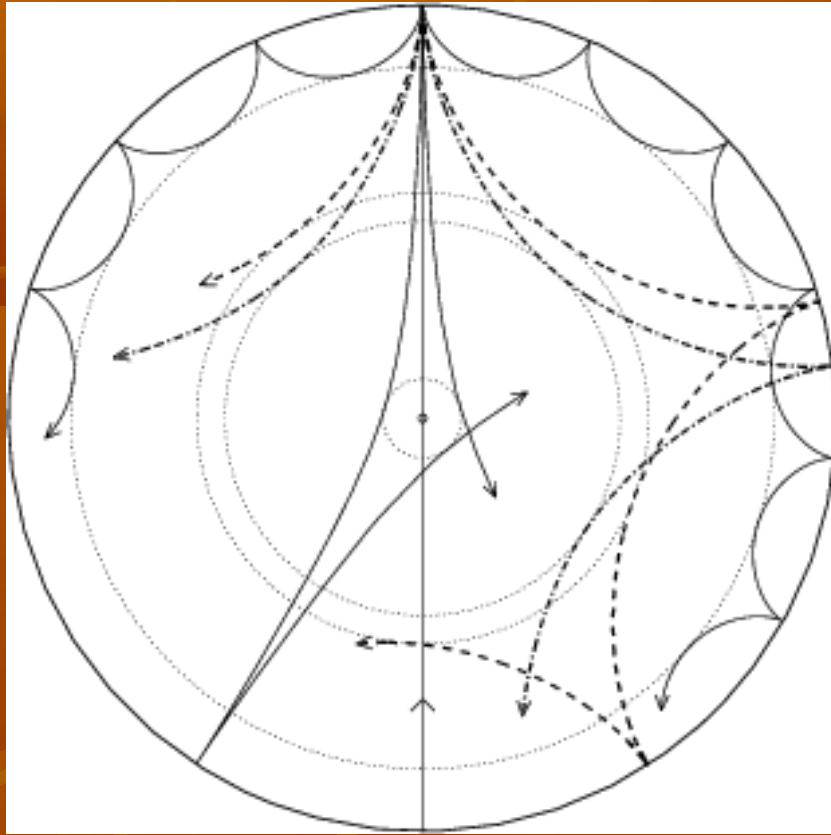


Гелиосейсмология



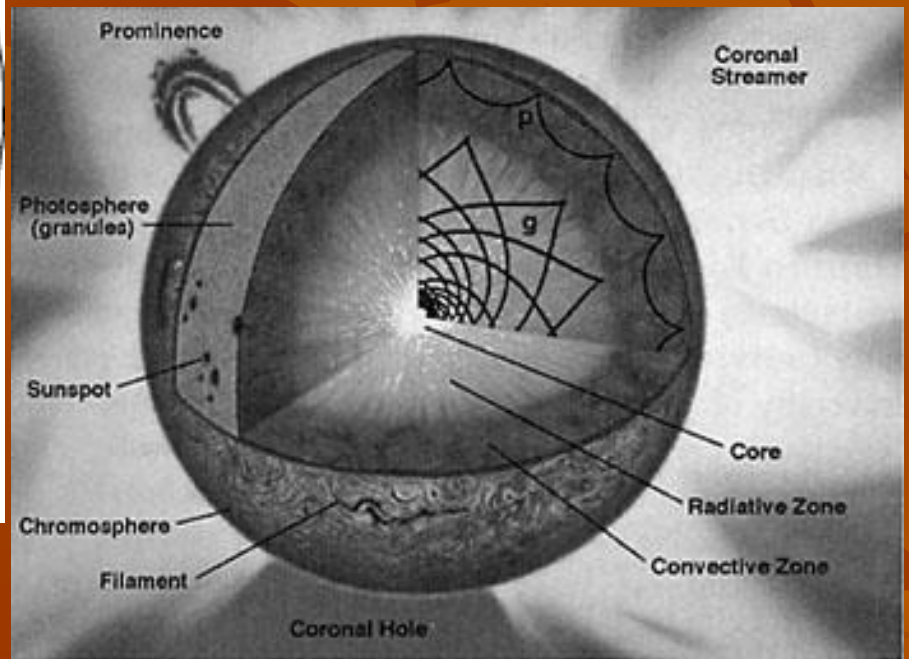
Поверхность Солнца постоянно «дышит». Это солнечные осцилляции. На больших масштабах они имеют характерные периоды около сотен секунд.

Возбуждение колебаний



g-моды колебаний в основном заперты в недрах Солнца.

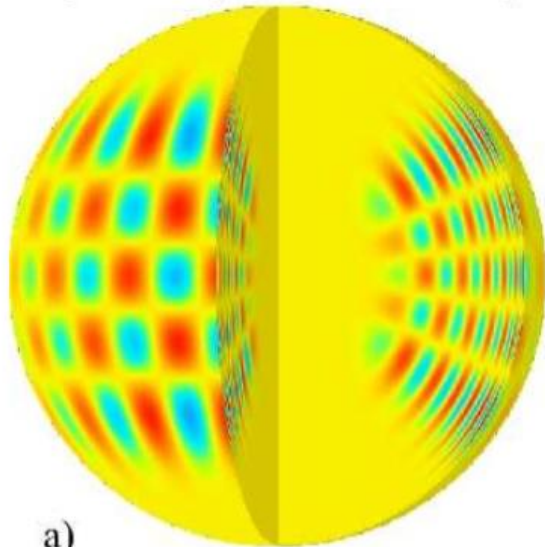
Колебания возбуждаются во внешних слоях из-за конвекции и распространяются внутрь. Скорость звука растет по мере продвижения. В какой-то момент колебания отражаются.



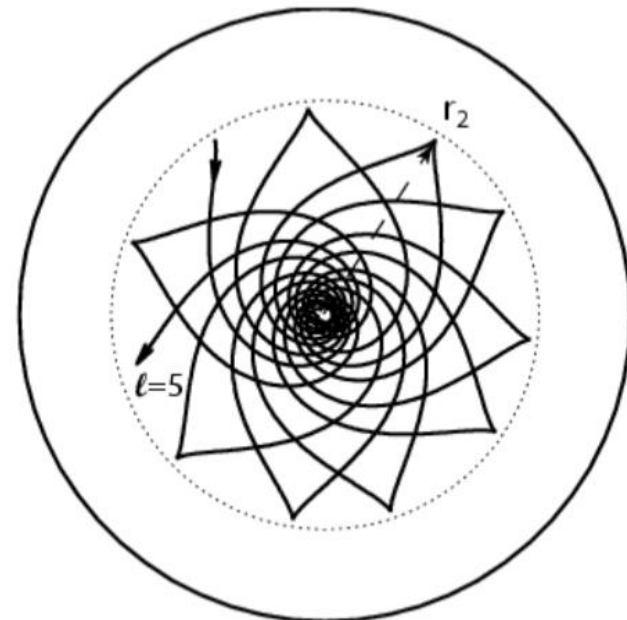
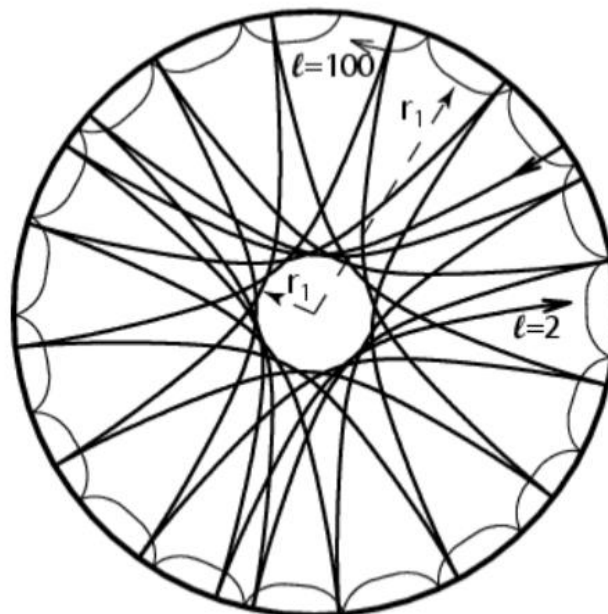
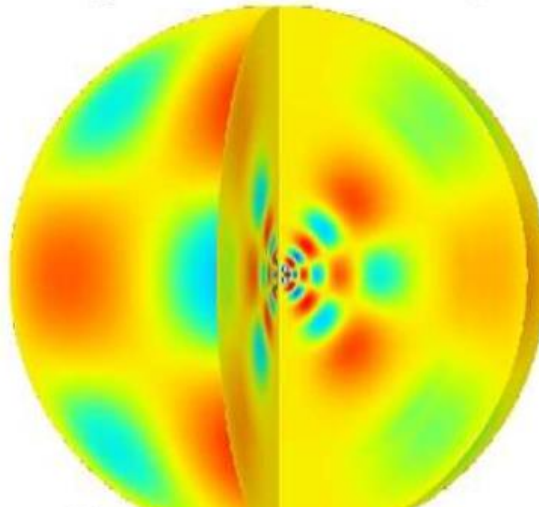
A cut-away diagram of major features of the sun. Courtesy of the SOHO/MDI consortium. SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA.

Глобальные колебания

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



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

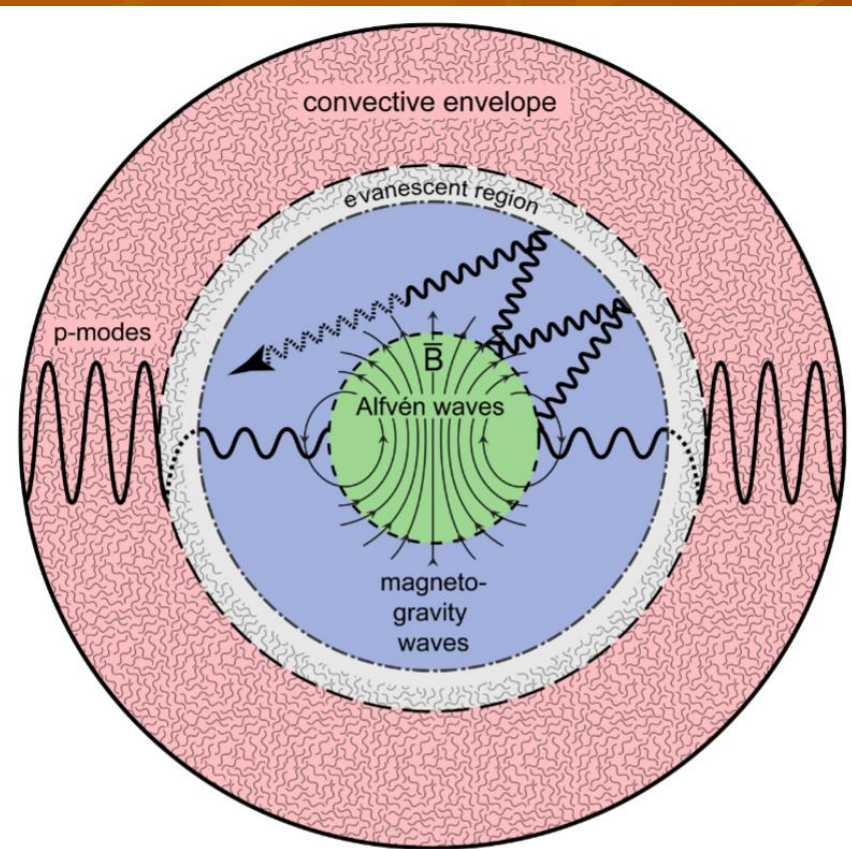


Магнитные поля в недрах красных гигантов

Астросейсмология помогла измерить магнитное поле в недрах красных гигантов.

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

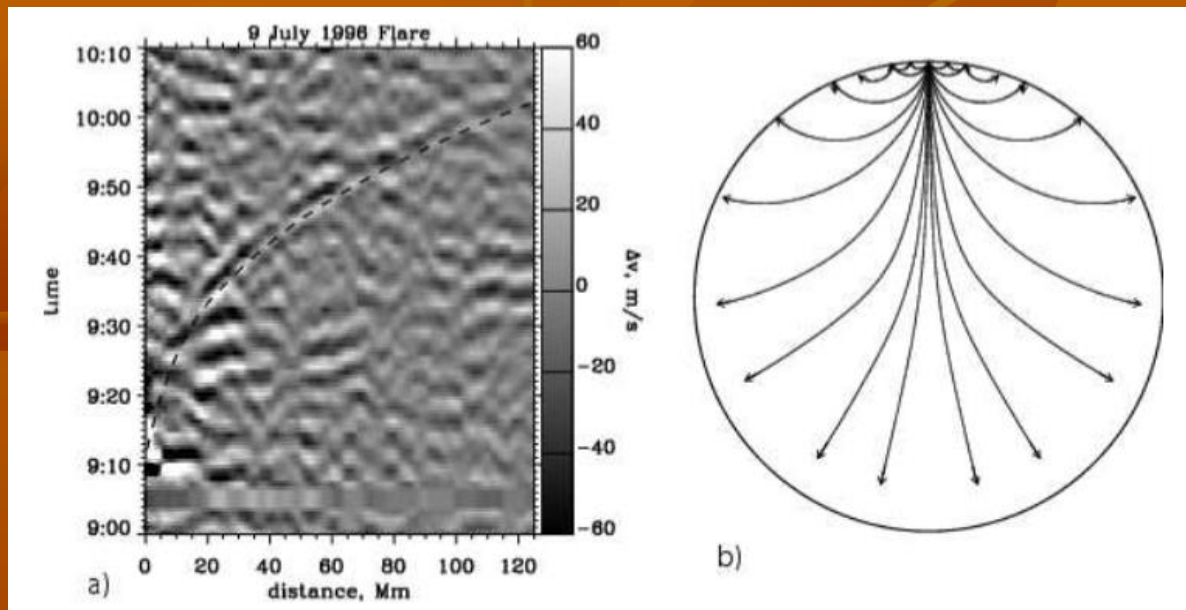
Волны бывают разные. Очень удобно разложить их на гармоники: монополь, диполь, квадруполь и т.д. Так вот, есть красные гиганты, у которых монополярная (сферически-симметричная) составляющая сильна, а дипольная сильно подавлена. Хорошего объяснения этой особенности до недавнего времени не было.



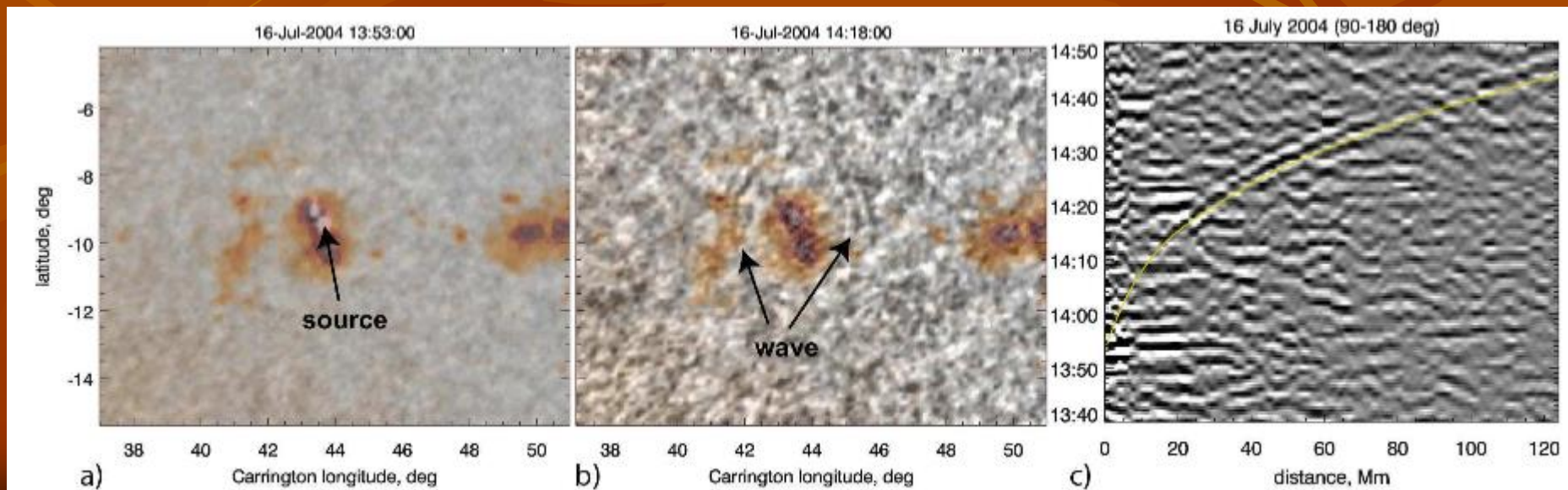
Волны возбуждаются на поверхности и идут внутрь. Там они частично отражаются и выходят обратно во внешние слои. Идея авторов состоит в том, что волны взаимодействуют с магнитным полем внутри звезды. Это приводит к их превращению в другой тип волн, которые уже не могут выйти наружу.

Вспышки и осцилляции

1103.1707

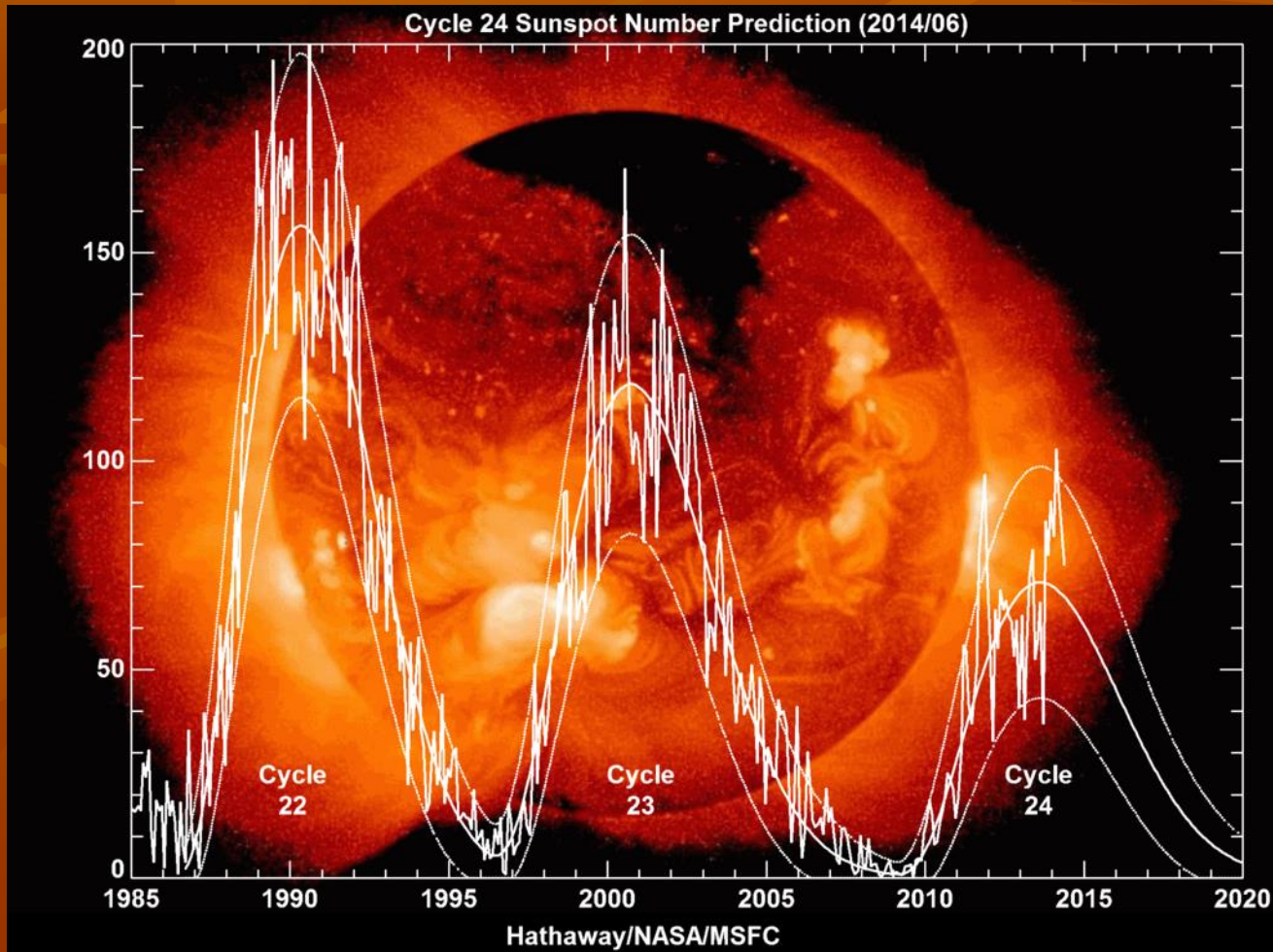


Мощные вспышки на Солнце порождают волны во внешних слоях и осцилляции.



Солнечный цикл

11-летний цикл солнечной активности

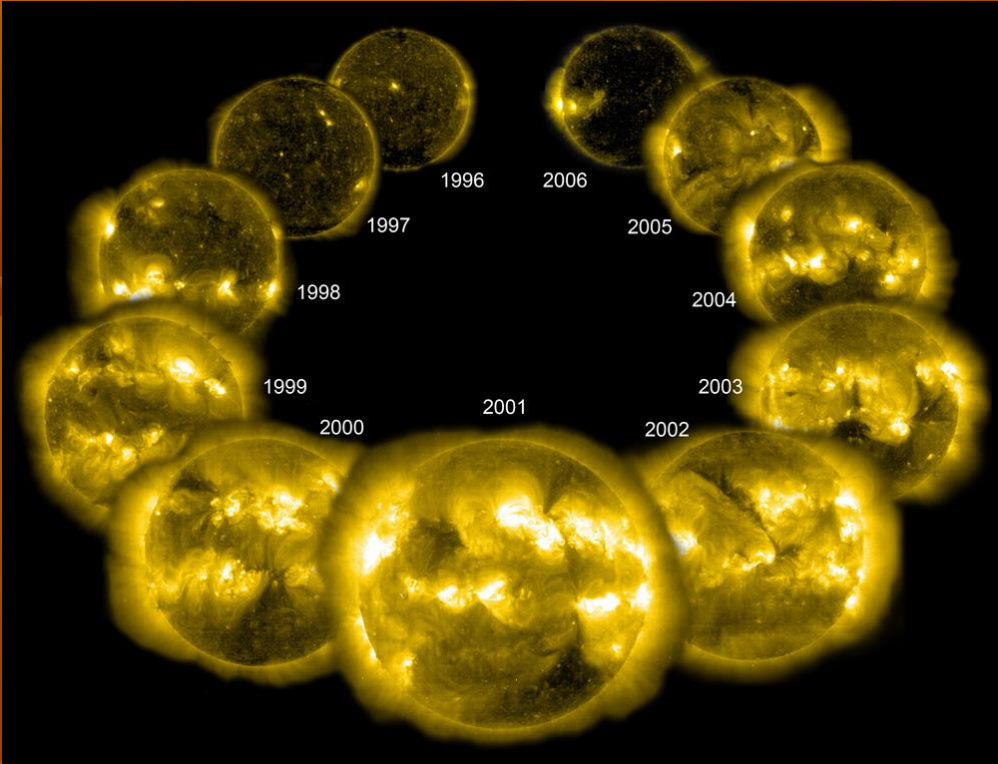


Количество пятен, а также другая солнечная активность меняются с периодом примерно 11 лет

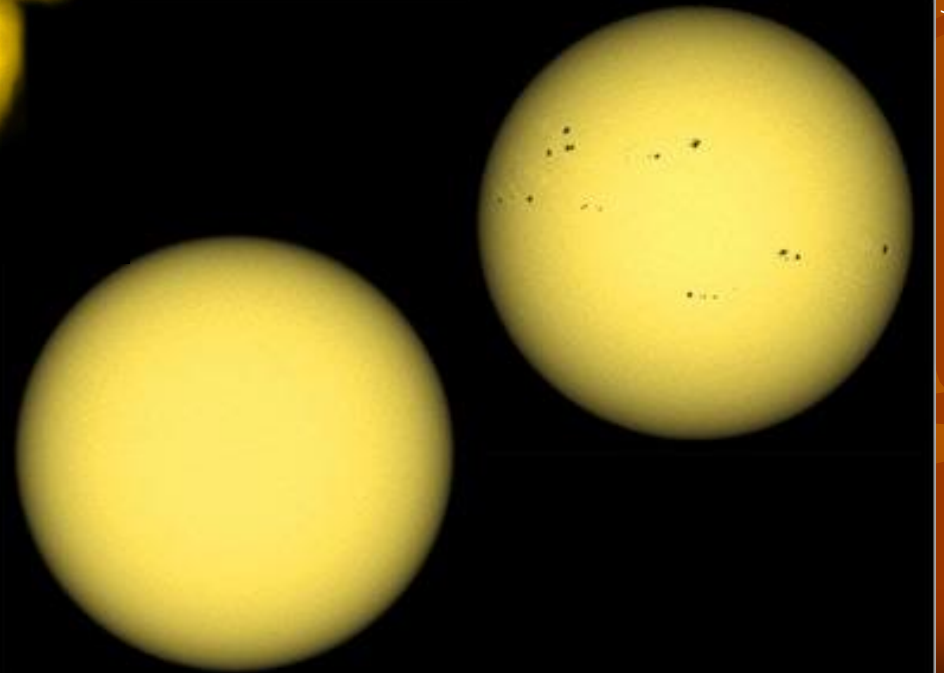
Открыт Швабе в 1843 г.

Солнечный цикл связан с поведением глобального магнитного поля Солнца.

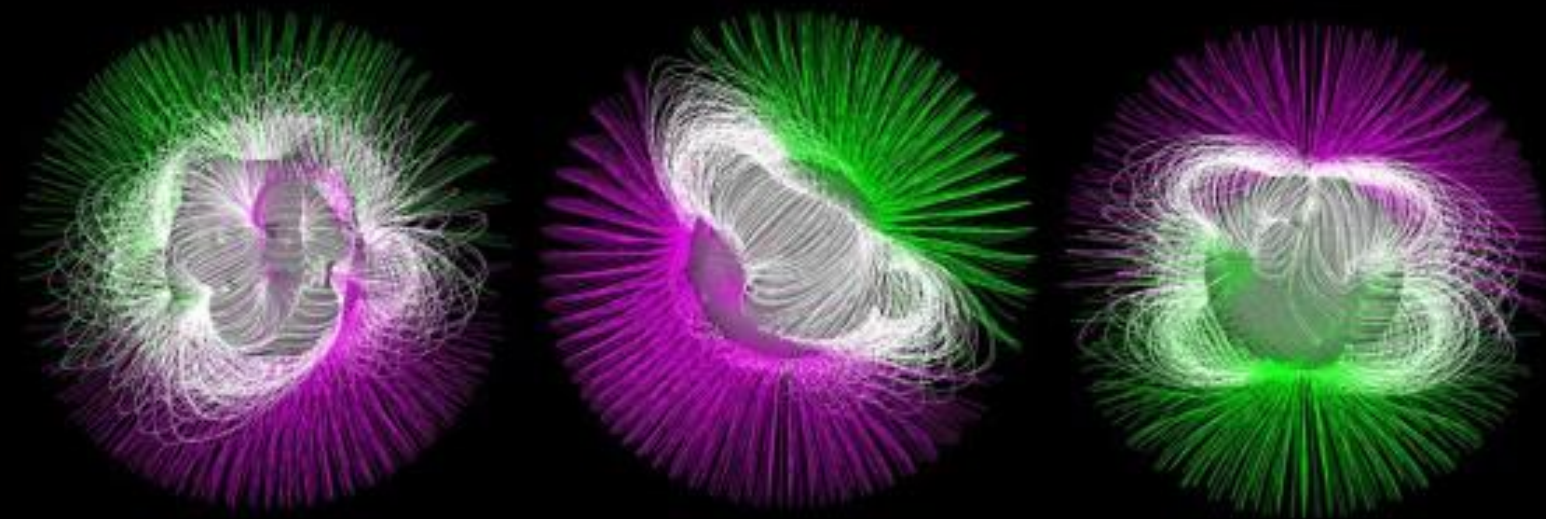
Активность Солнца



Изображения получены спутником SOHO в ультрафиолетовых лучах.



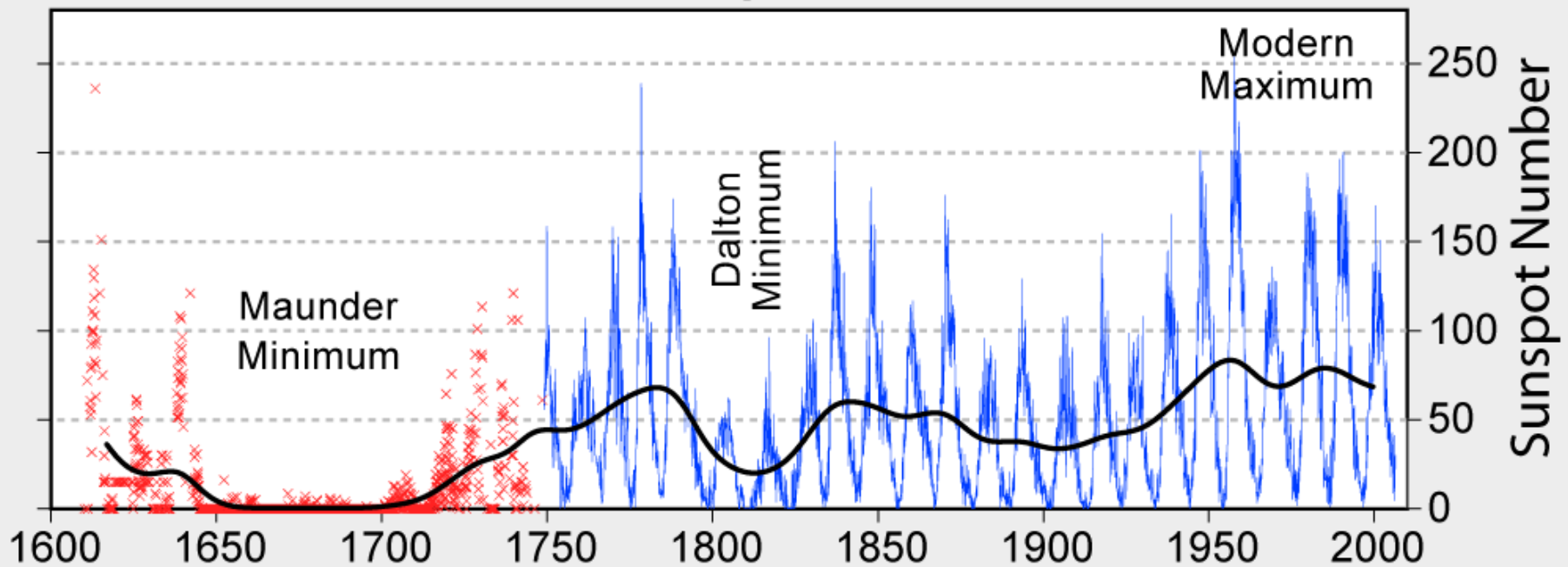
Переворачивание магнитного поля



Маундеровский минимум

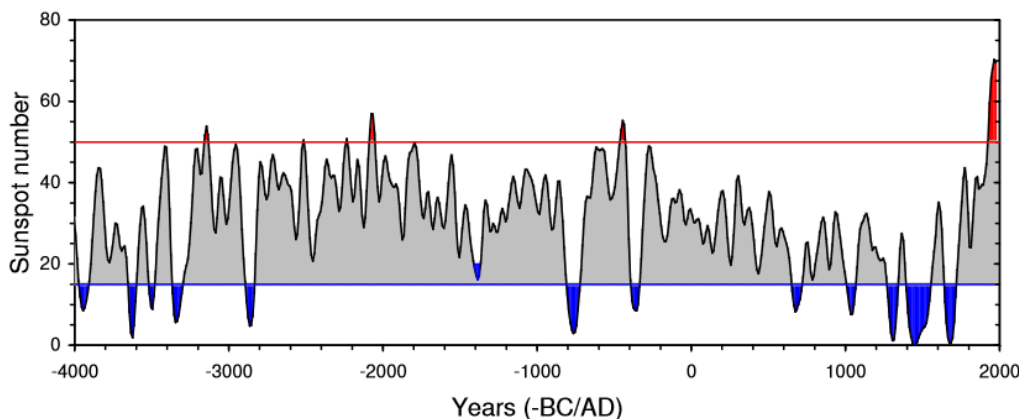
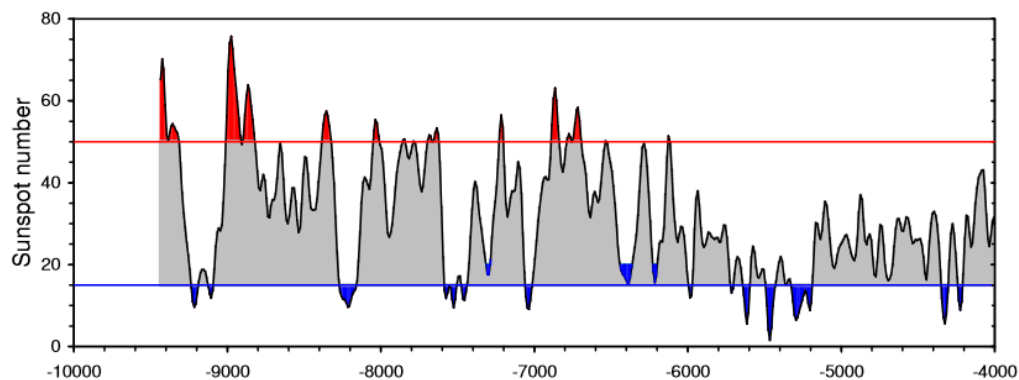
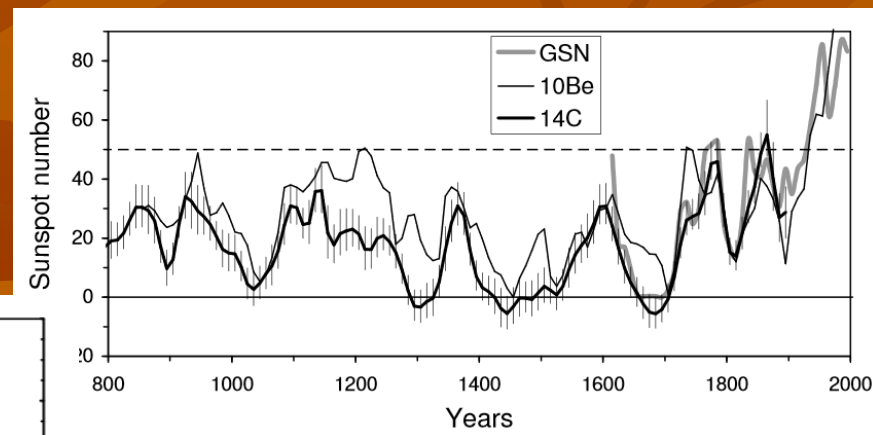
Иногда ровный ход 11-летний циклов нарушается. Наблюдалось несколько минимумов активности, самый заметный из которых – маундеровский.

400 Years of Sunspot Observations



Реконструкция на большом масштабе времени

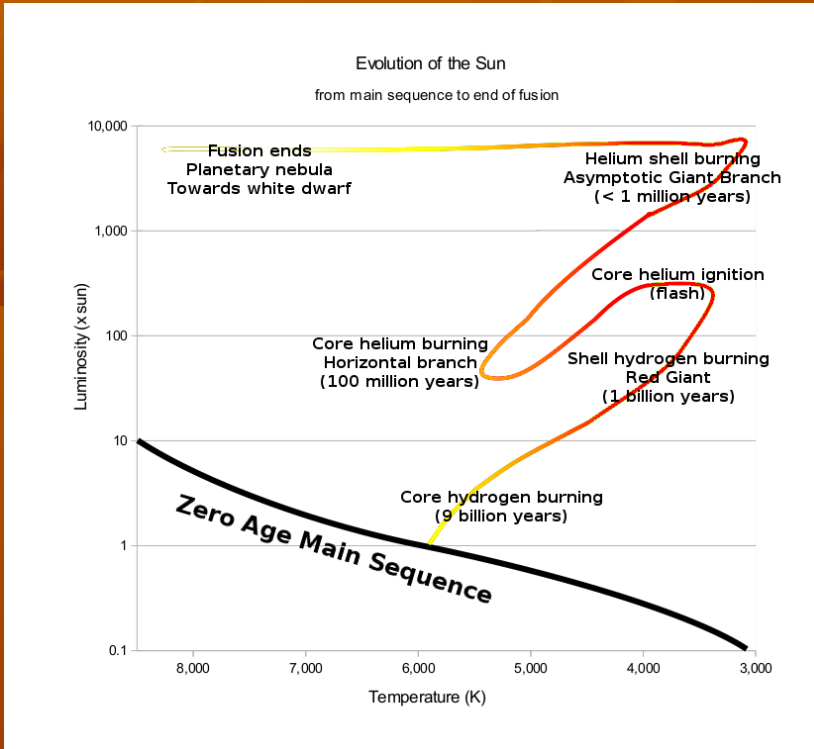
Ученые пытаются восстановить солнечную активность на временах порядка тысяч лет.



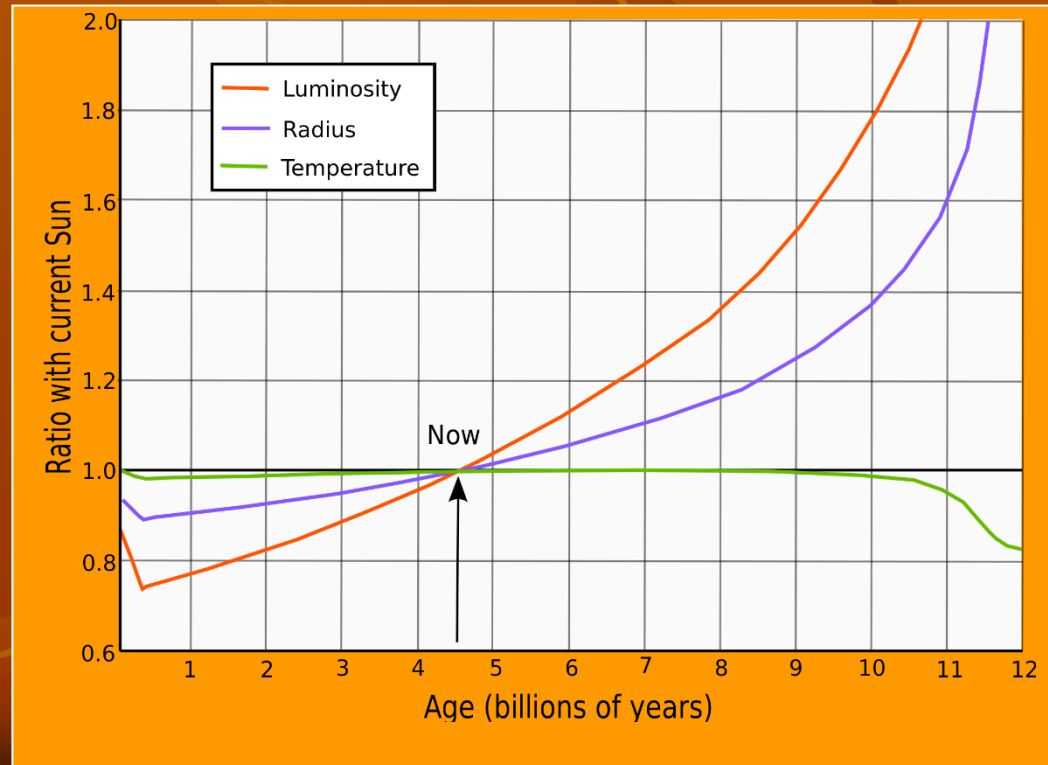
Используются данные по годовичным кольцам деревьев и по ледяным кернам.

Содержание беррилия-10 и углерода-14.

Эволюция Солнца

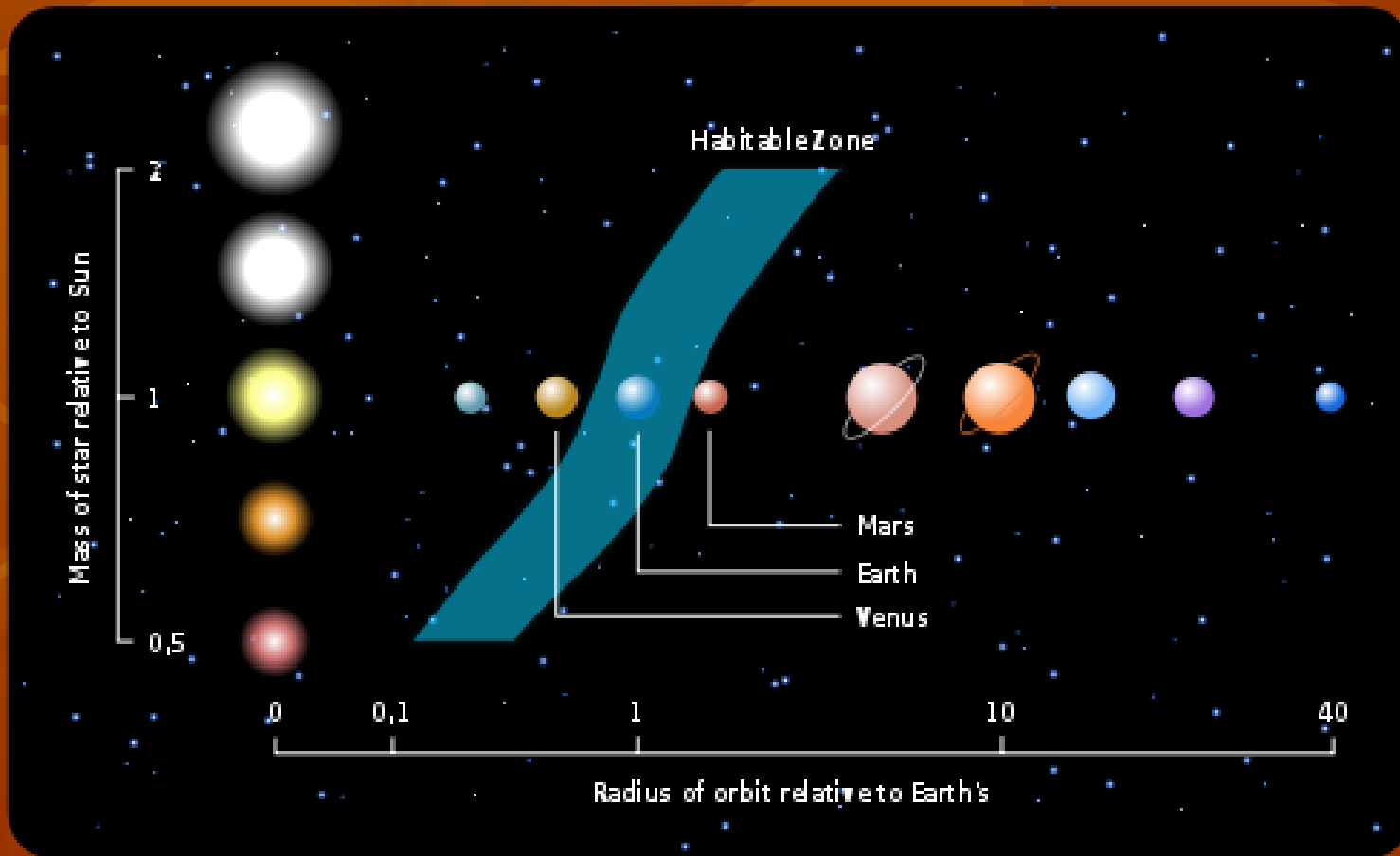


Сейчас Солнце пережигает водород в своих недрах, Очень медленно Солнце становится больше и ярче.



Зона обитаемости

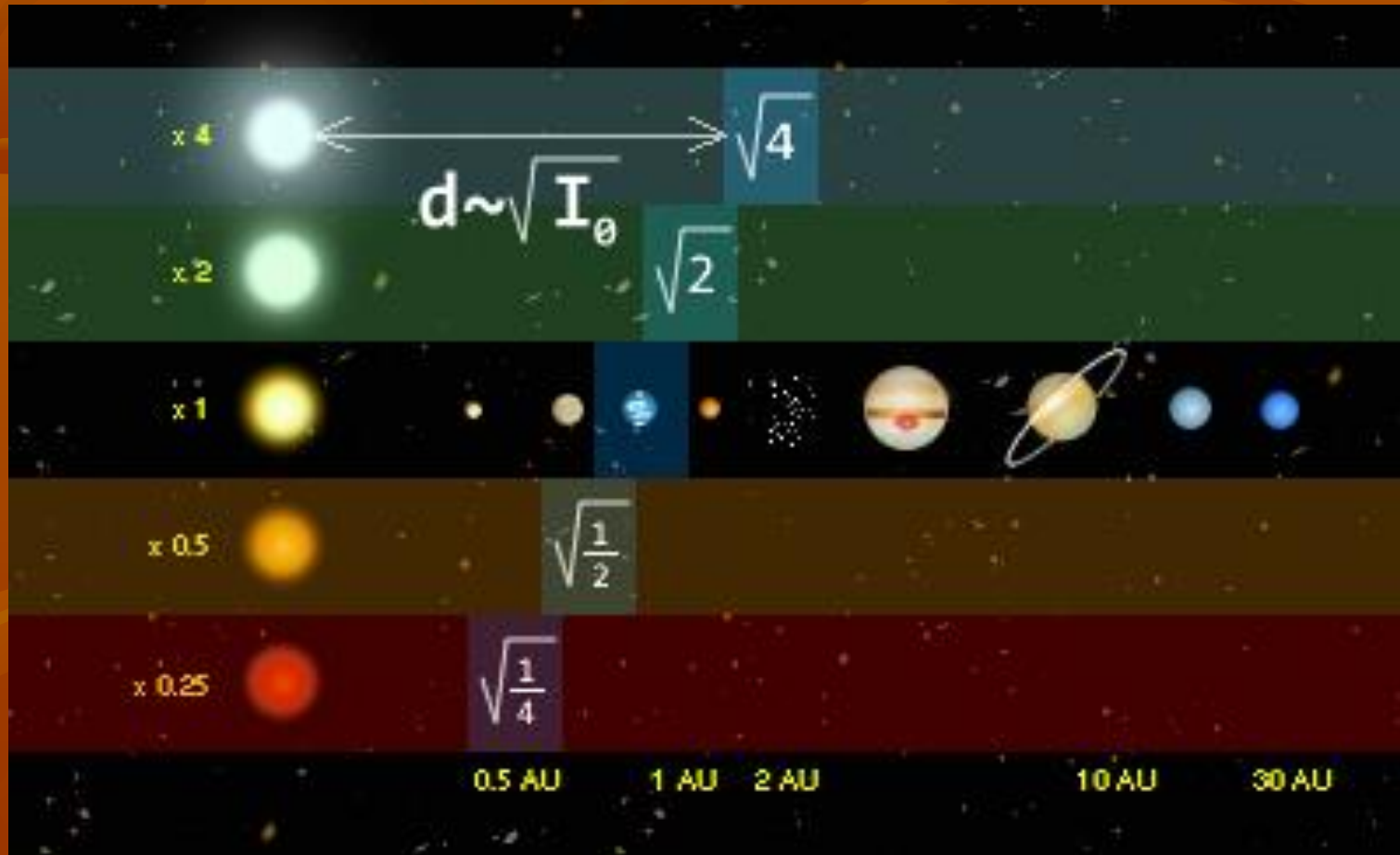
Возможность существования жидкой воды (не холодно, не жарко)



Обсуждение этой идеи началось в 1950-е гг.

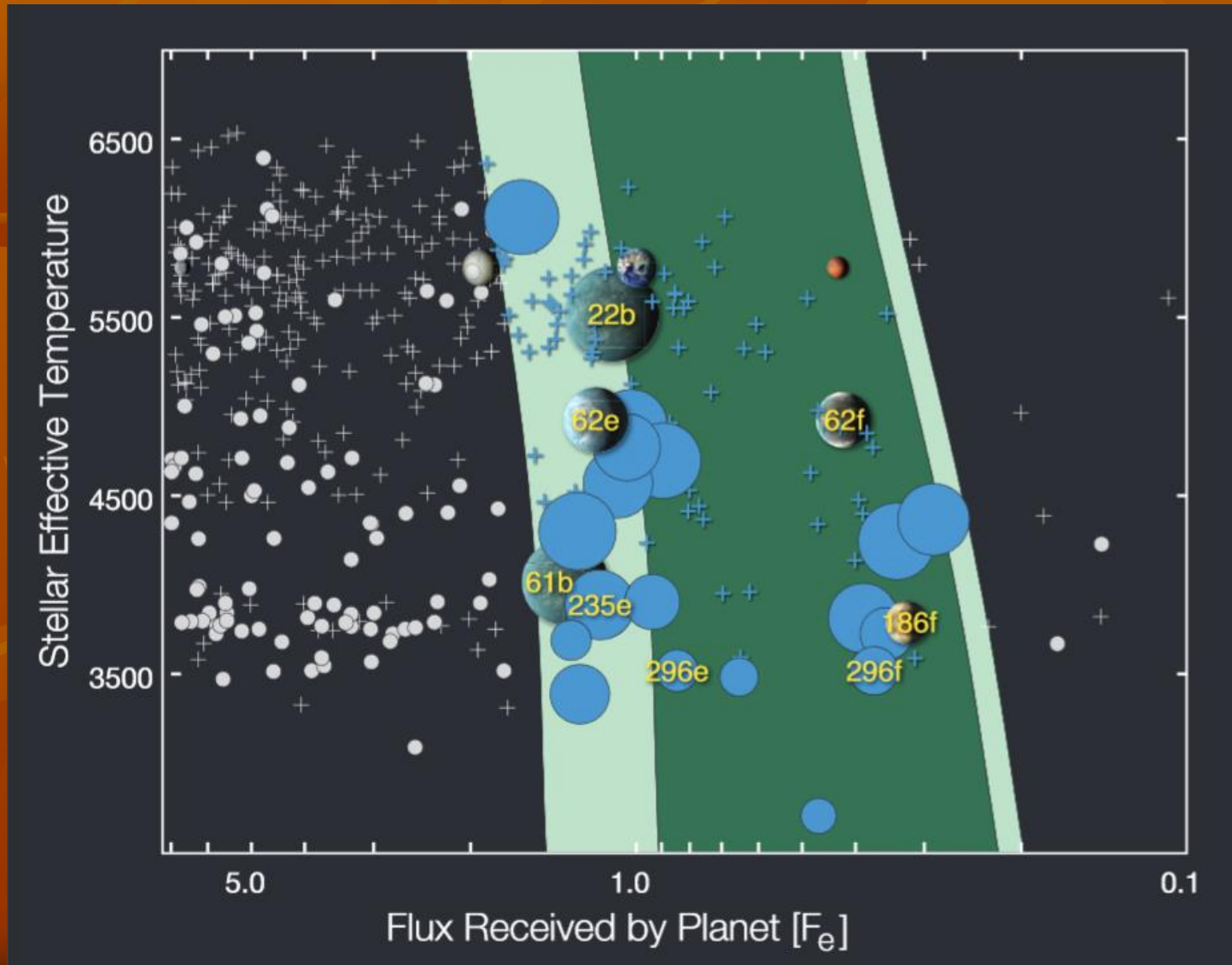
Зависимость от светимости

Параметры зоны обитаемости зависят от светимости звезды

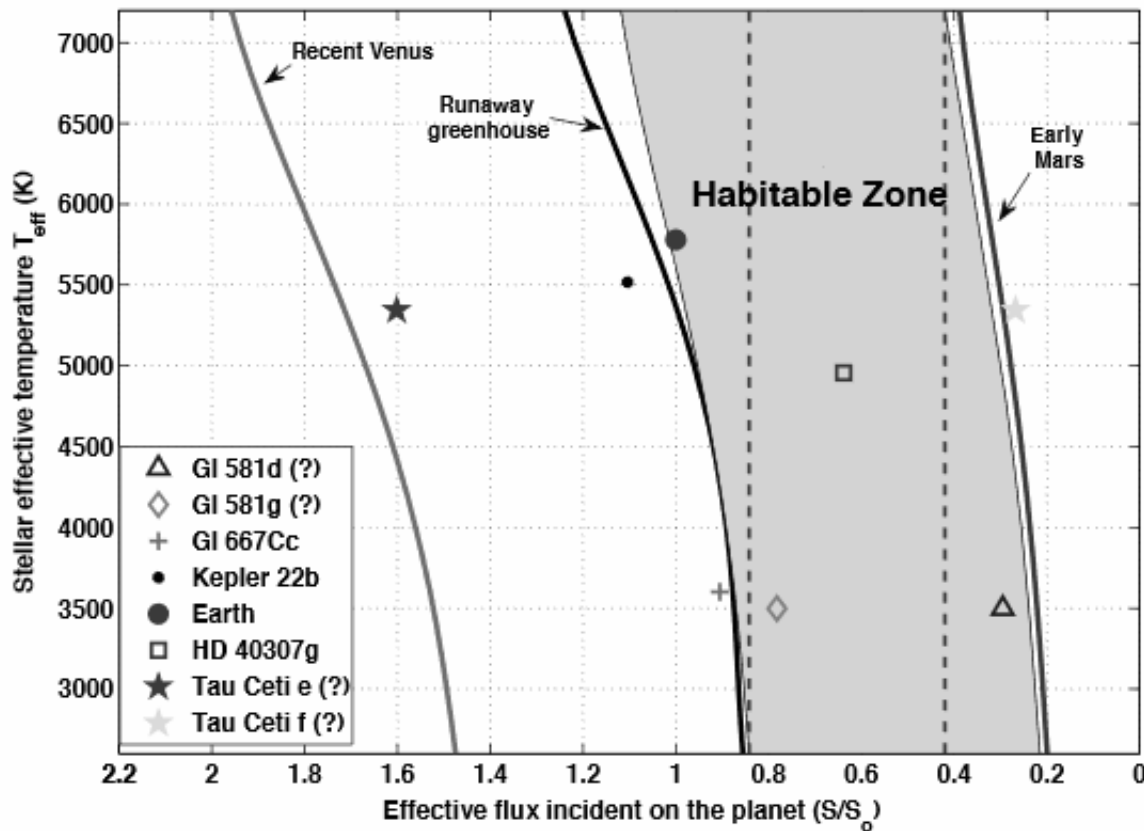


$$F = \left(R_* / R_{\odot} \right)^2 \left(T_* / T_{\odot} \right)^4 \left(a_{\oplus} / a_p \right)^2$$

1409.1904



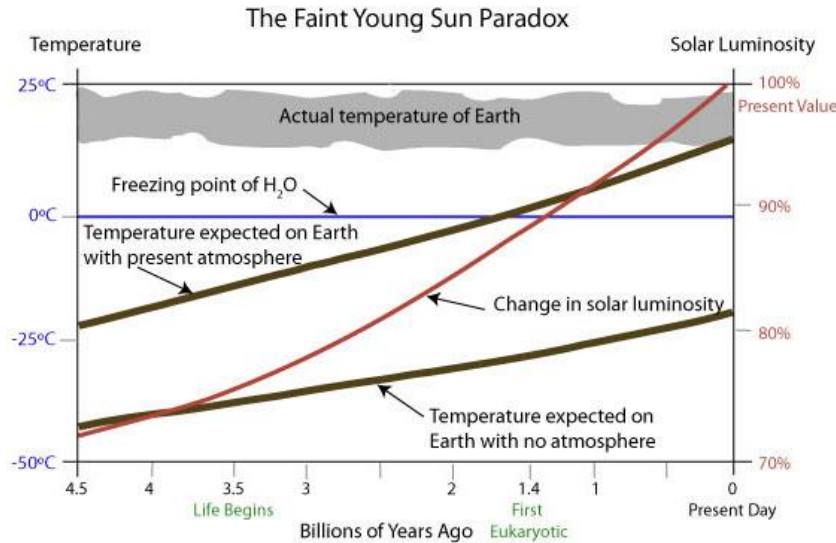
Детальные расчеты



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

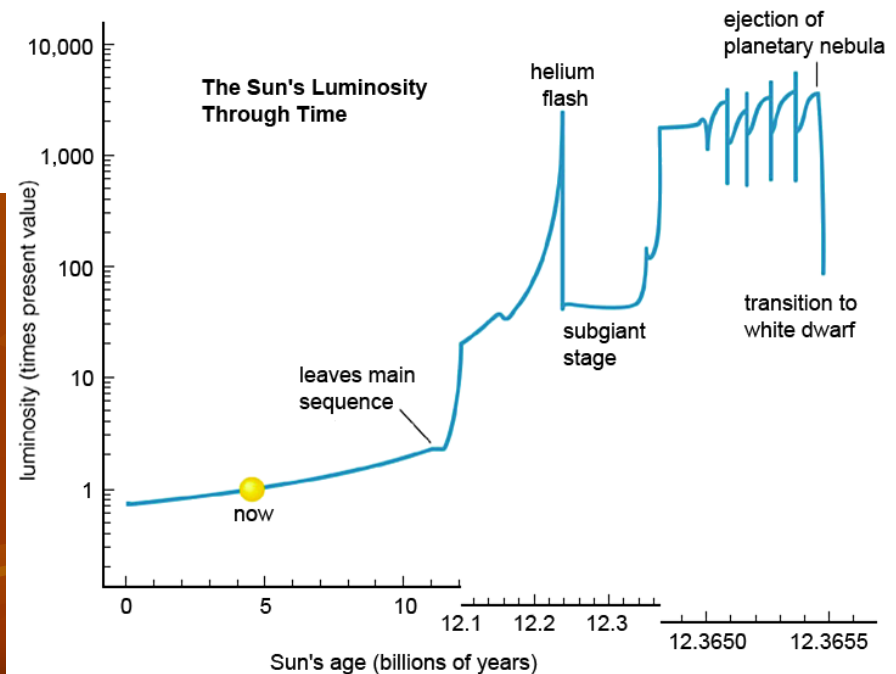
Парадокс тусклого Солнца

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

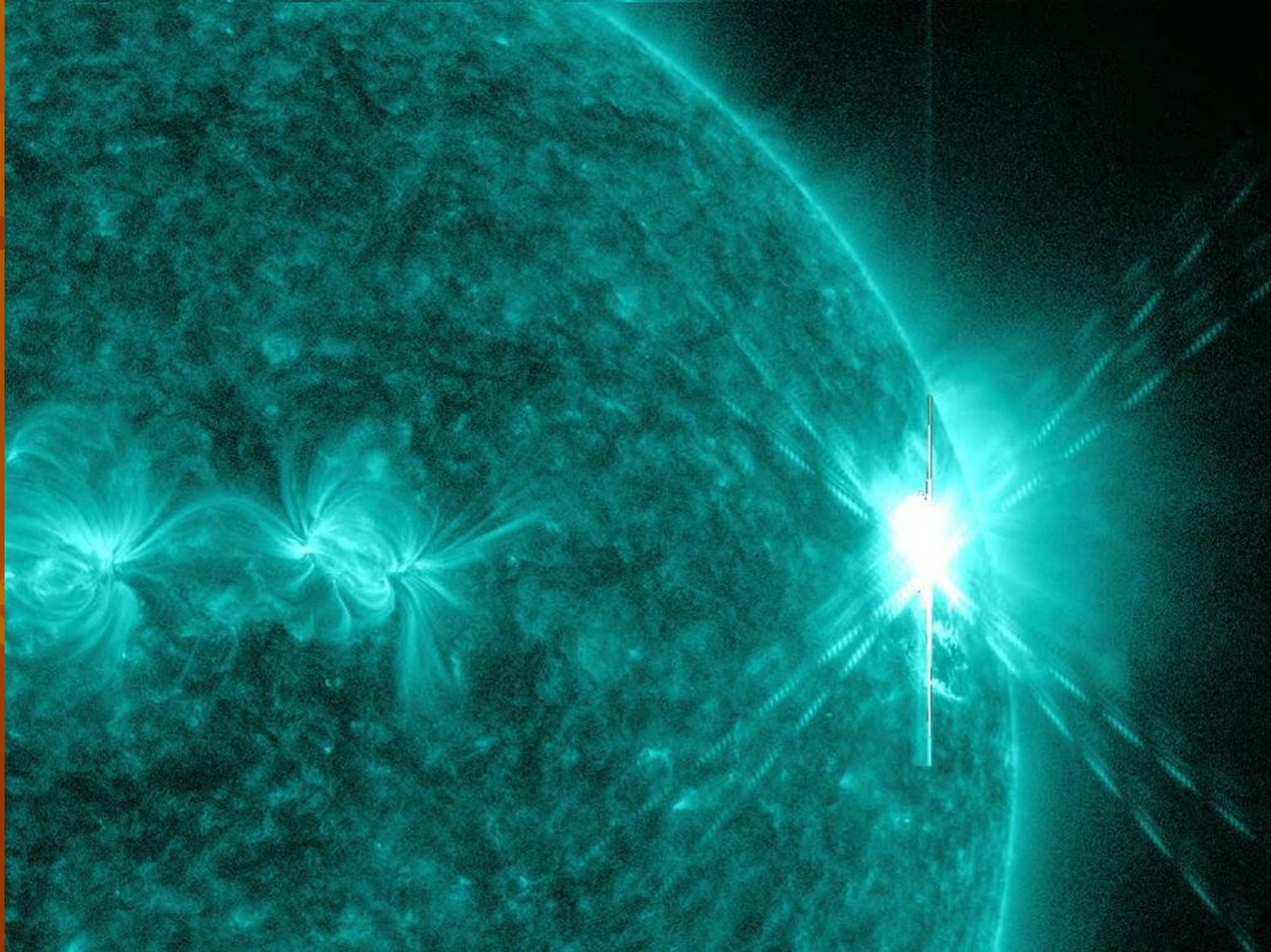


Even though the Sun was about 30% dimmer than it is now, the temperature on Earth has been more or less stable.

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

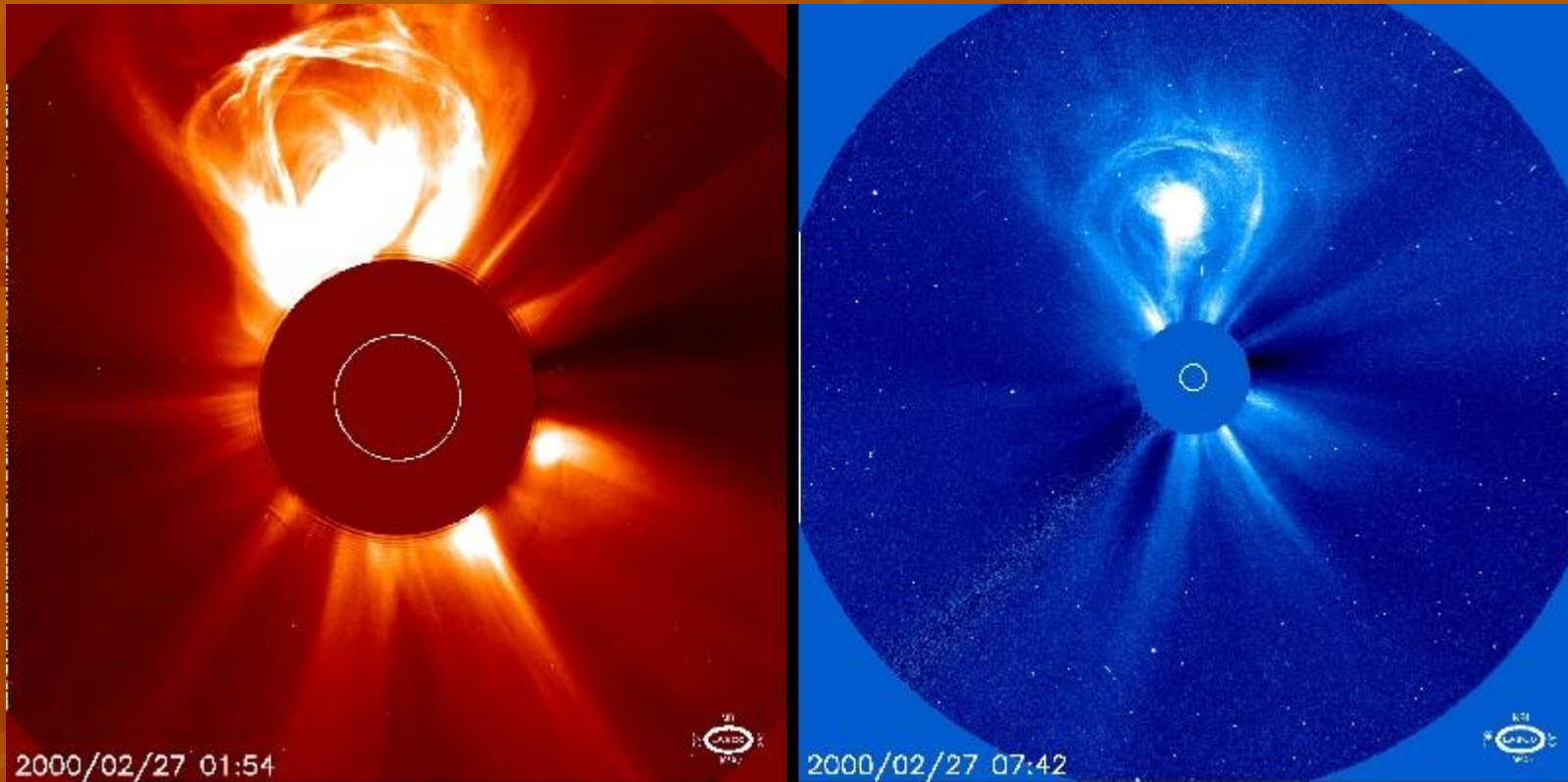


Вспышки на Солнце



Ультрафиолетовое изображение, SDO, NASA

Корональные выбросы

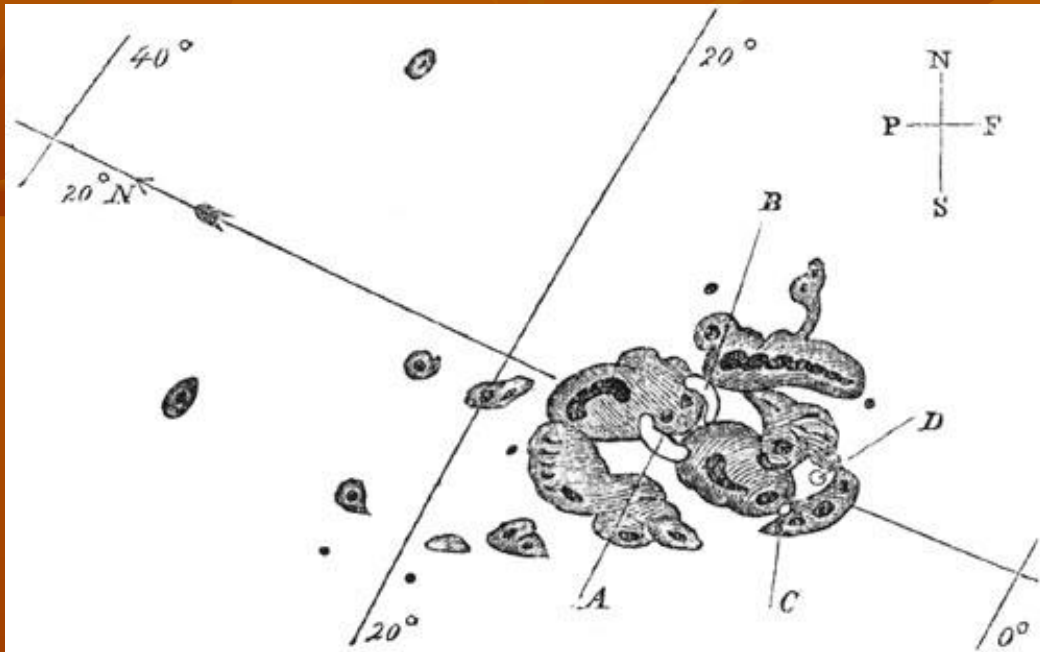


Частота таких событий от нескольких в день во время максимума активности, до раз в несколько дней – во время минимума активности.

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.

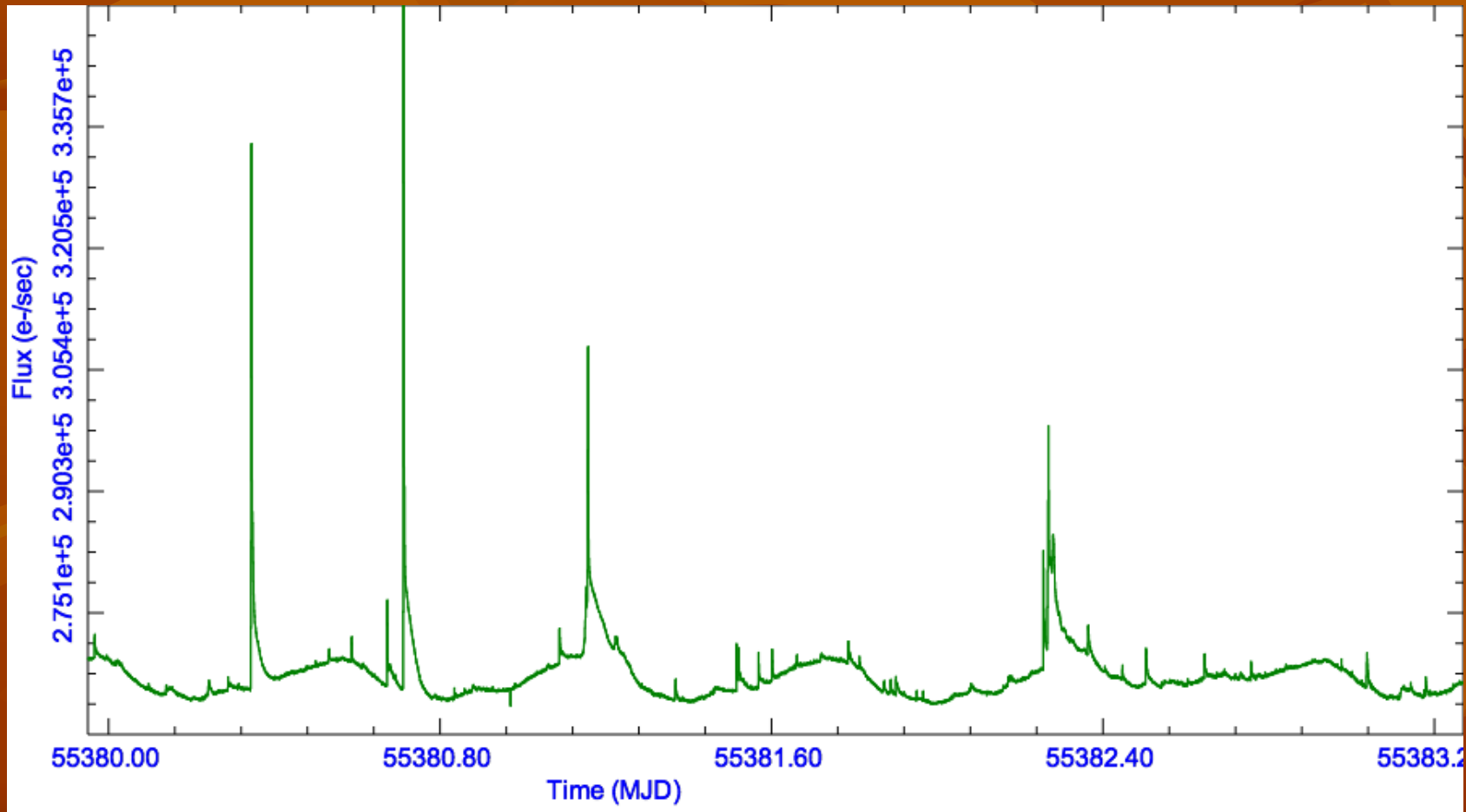
«Встали» телеграфные линии.

Мощнейшие полярные сияния.

Гигантские вспышки

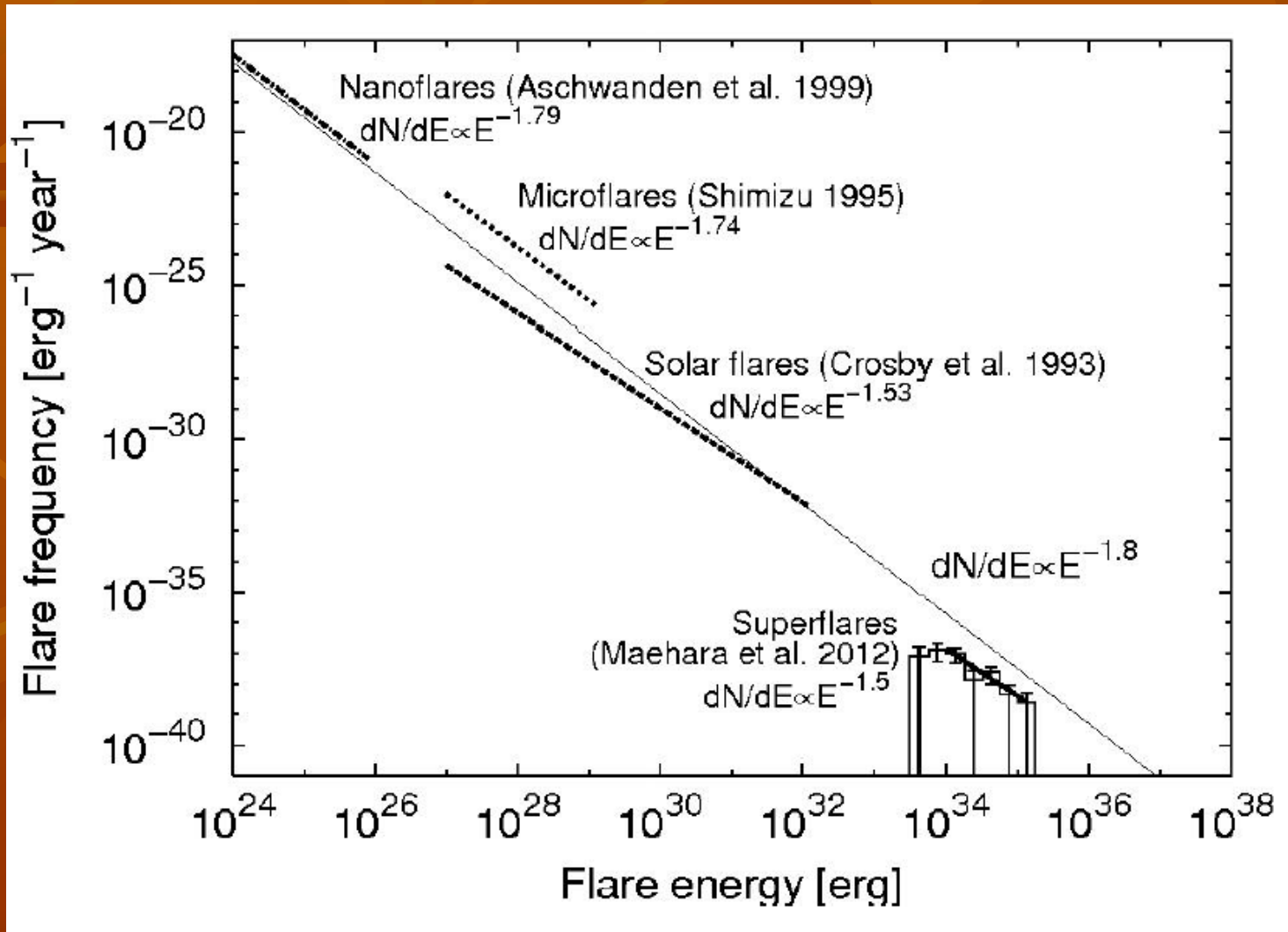
Вспышки происходят и на других звездах.

Как правило, чем легче звезда – тем она активнее.

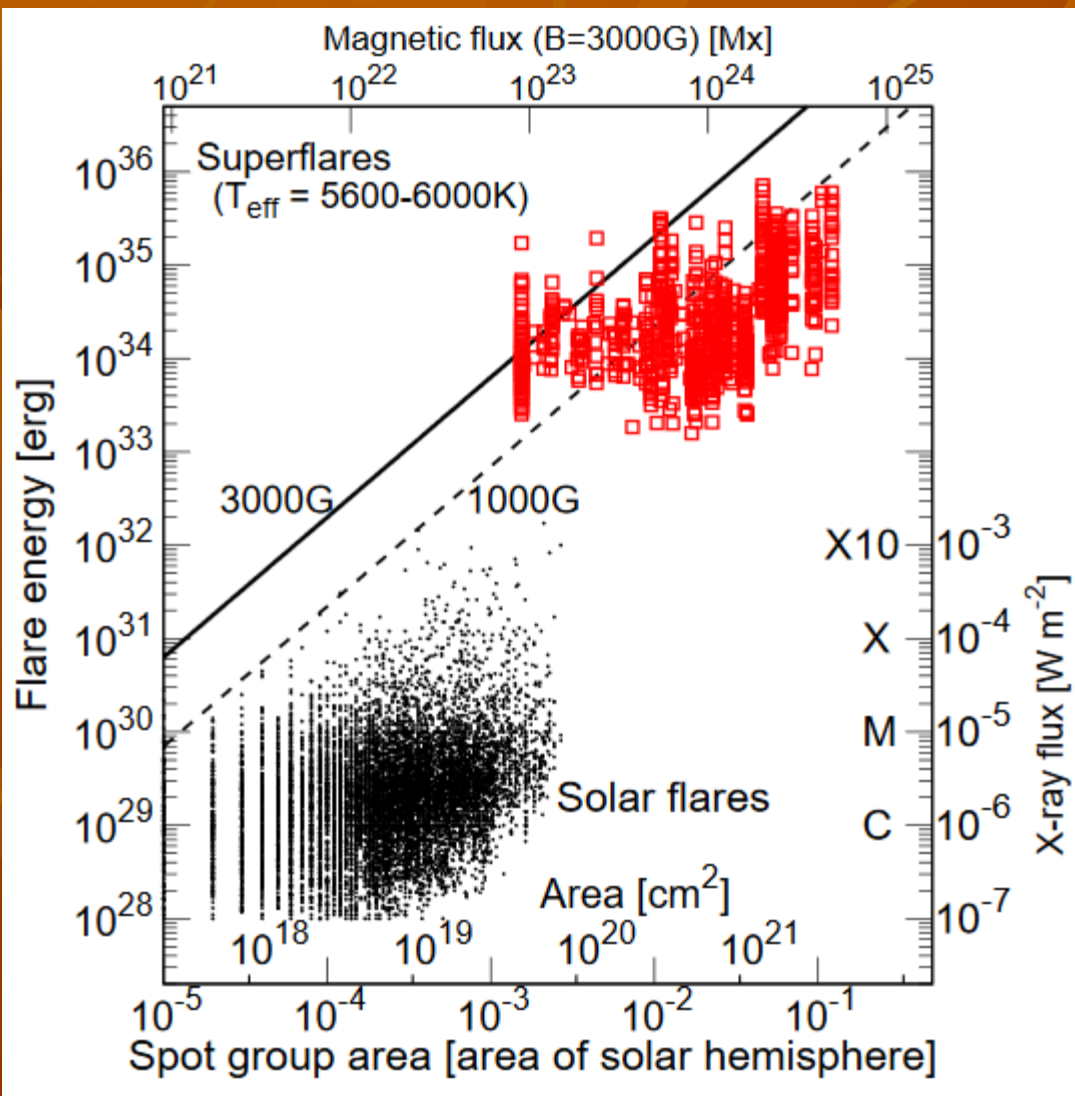


Данные спутника «Кеплер»

Частота вспышек



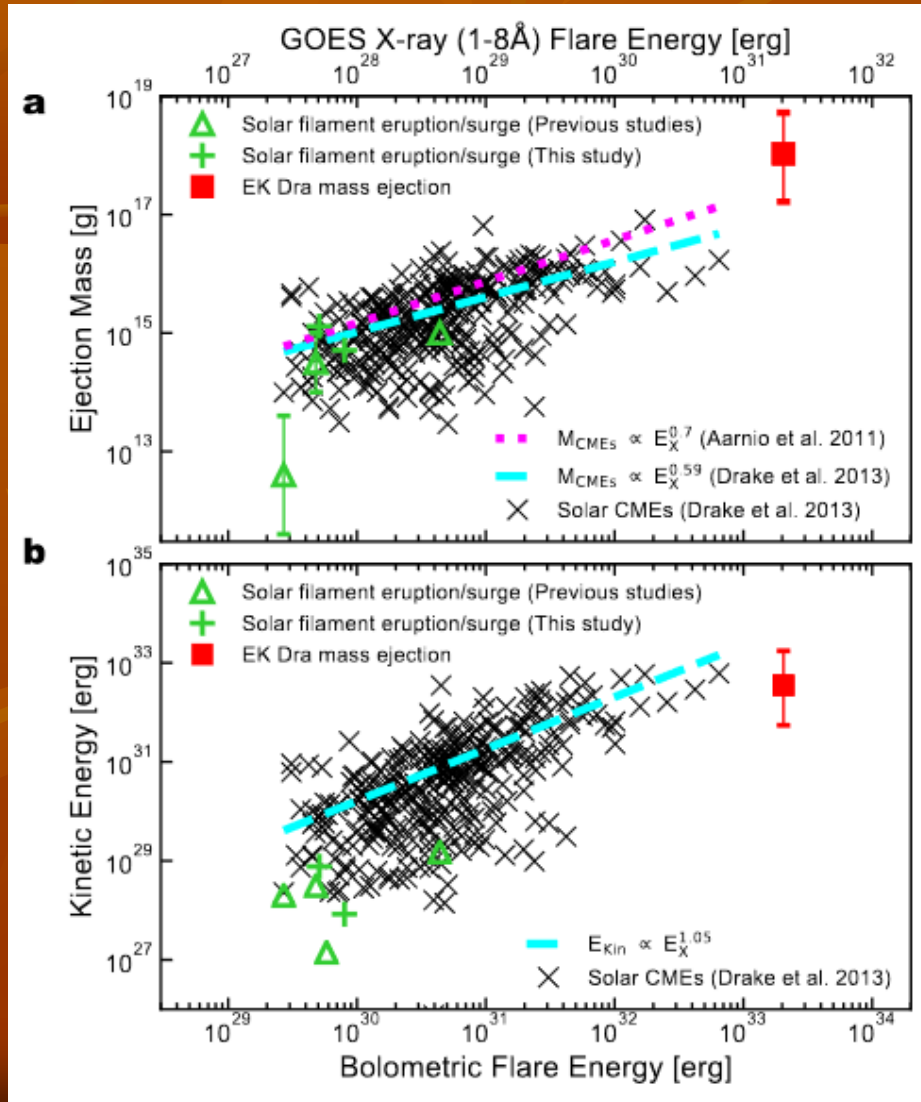
Вспышки и пятна



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.

Супервспышка с корональным выбросом на звезде типа Солнца



EK Dra

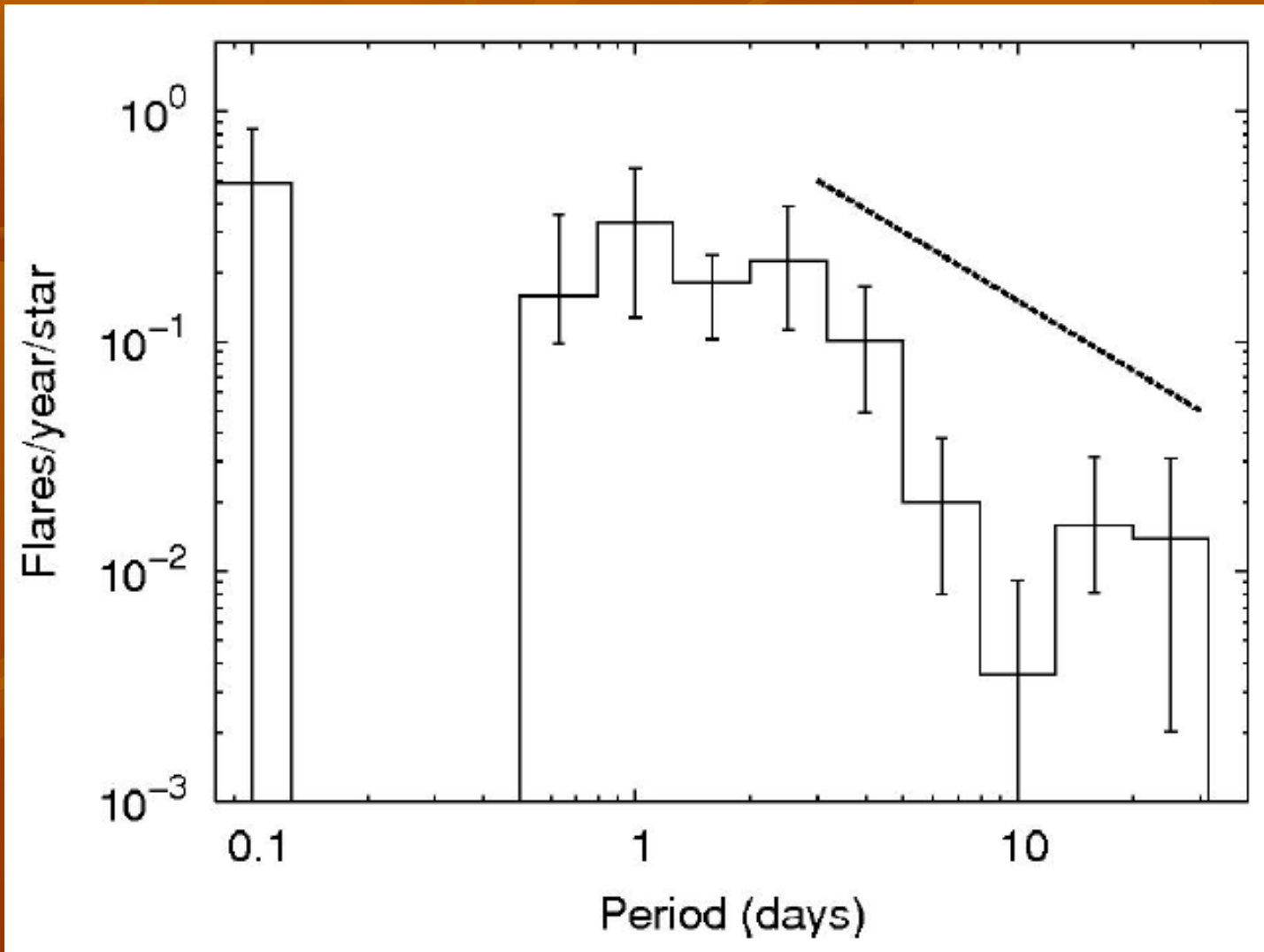
Вспышку наблюдали на TESS.

Спектры получили на двух наземных телескопах.

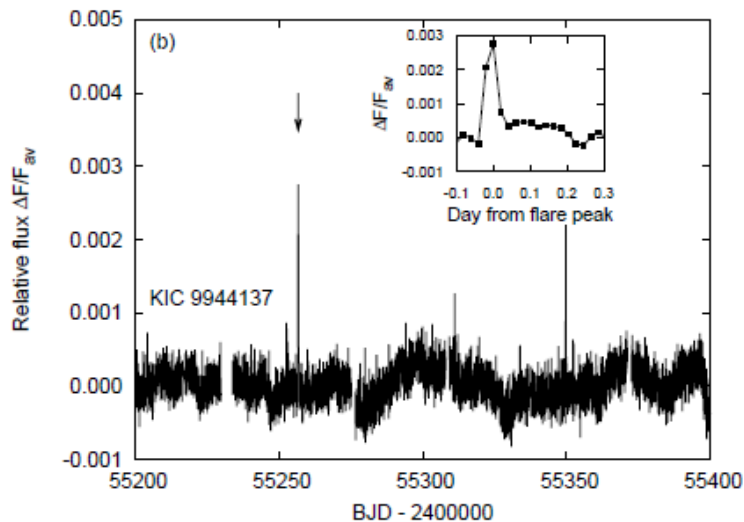
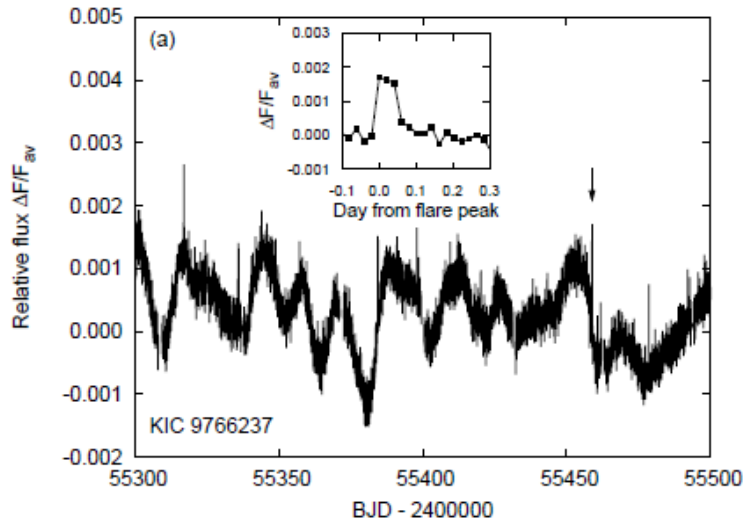
В спектре видна водородная линия, сдвинутая в синюю сторону.

Лучевая скорость выброса 510 км/с.
Масса $\sim 10^{18}$ грамм.

Вращение и вспышки

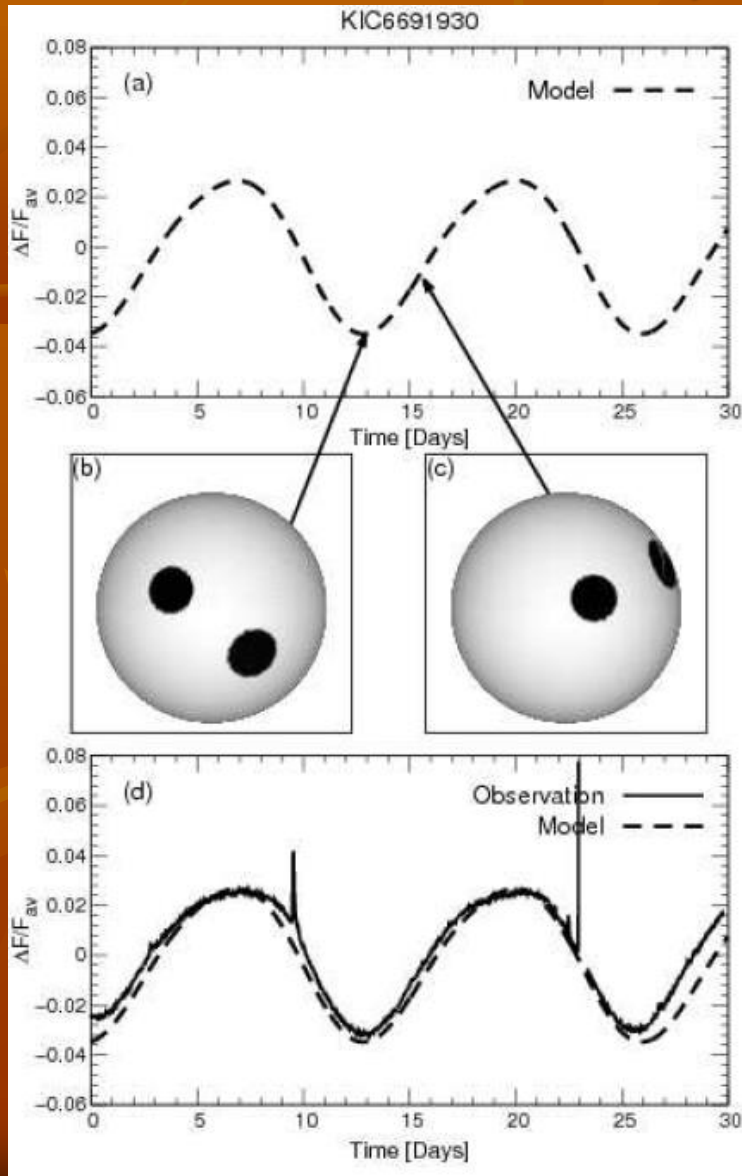


Вспышки на звездах с вращением, как у Солнца



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

Вспышки, пятна, вращение

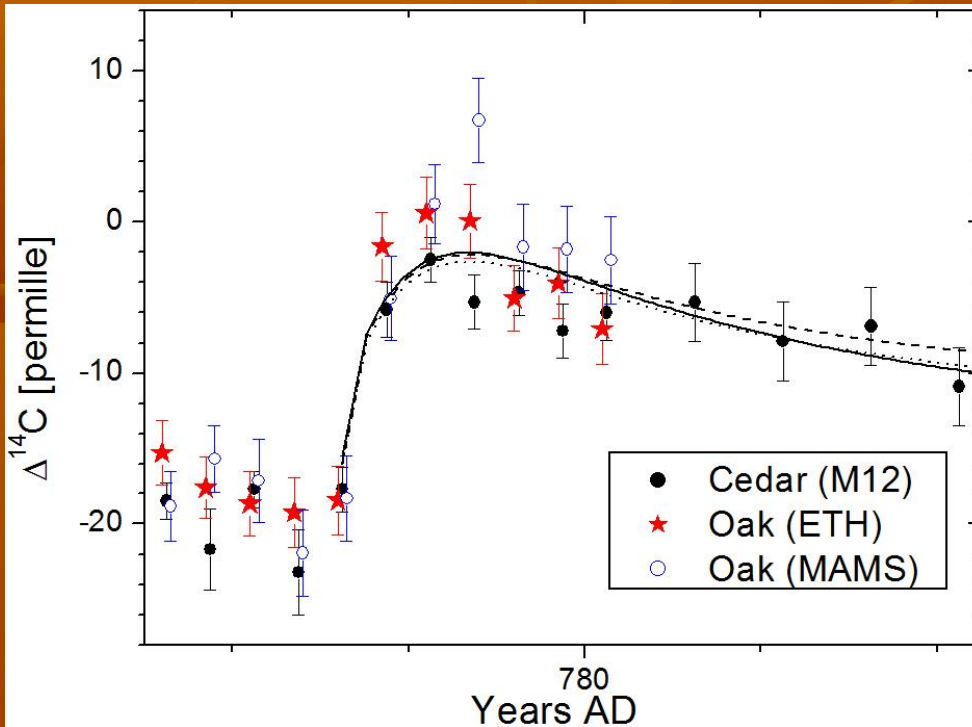


Данные по вспышкам на звездах позволяют строить модели.

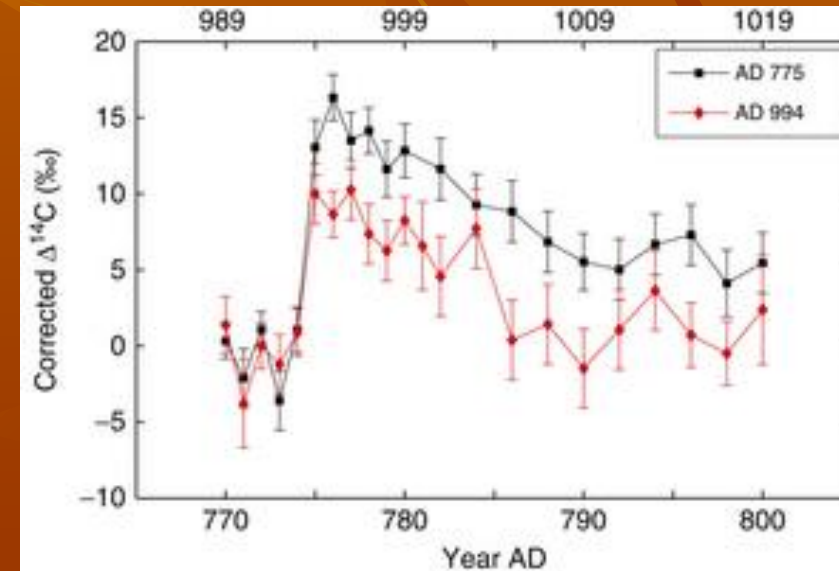
Мощные вспышки могут происходить на Солнце раз в 1000 – 10000 лет.

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

Вспышка в 8 веке?



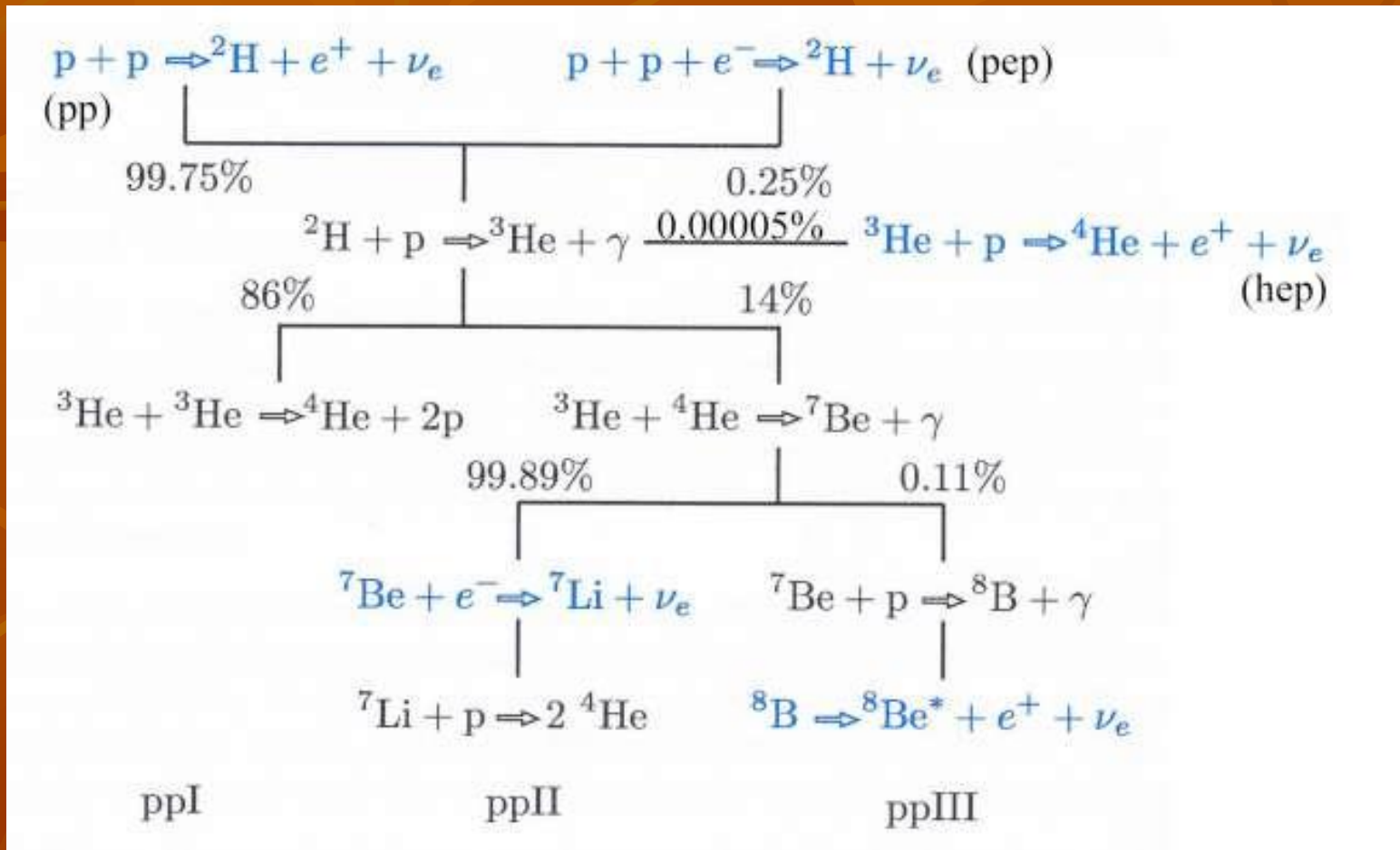
Анализ содержаний углерода-14 показывает, что в 774-775 гг. Была аномалия, которую можно связать с мощной солнечной вспышкой.



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.).

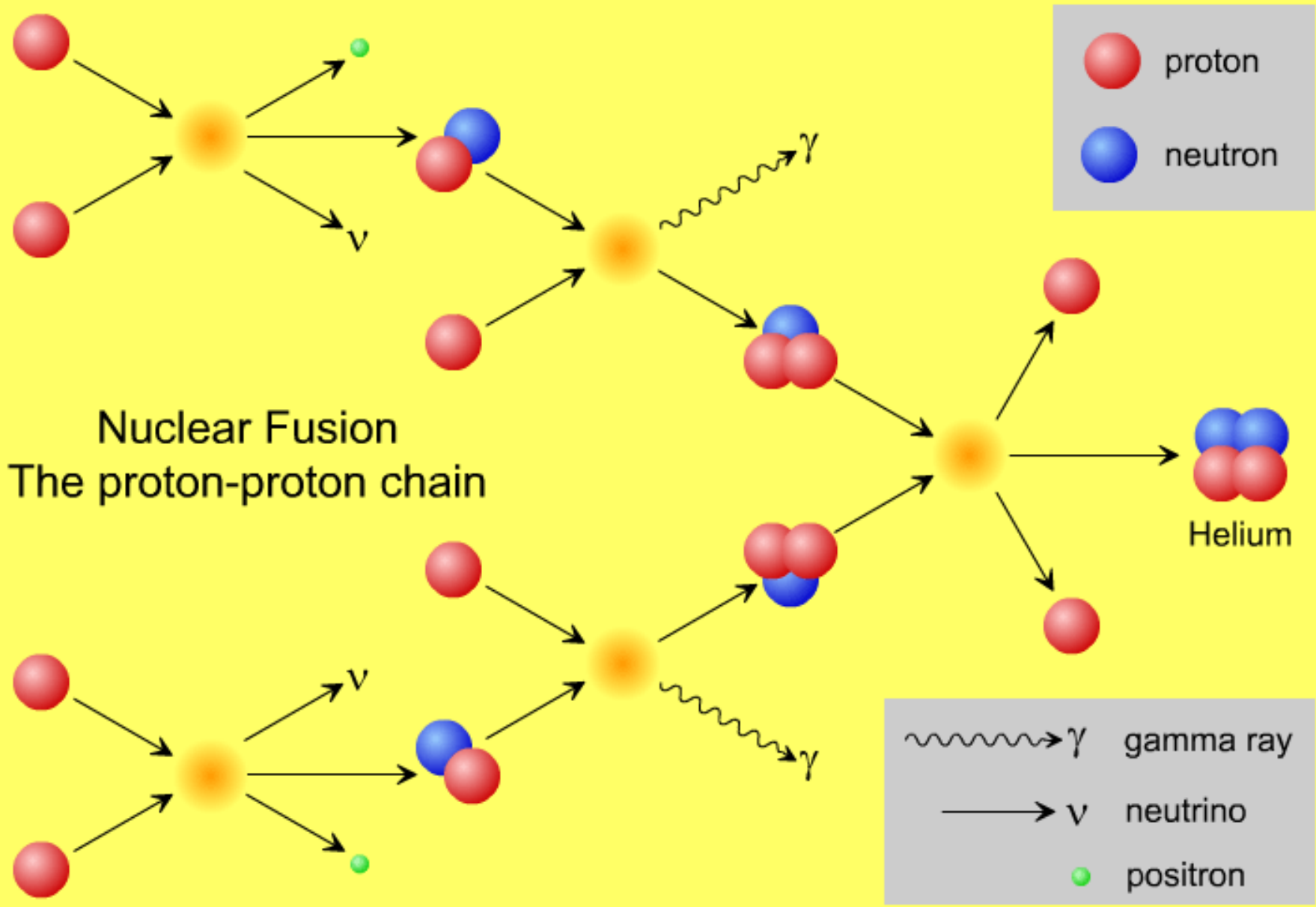
Солнечные нейтрино



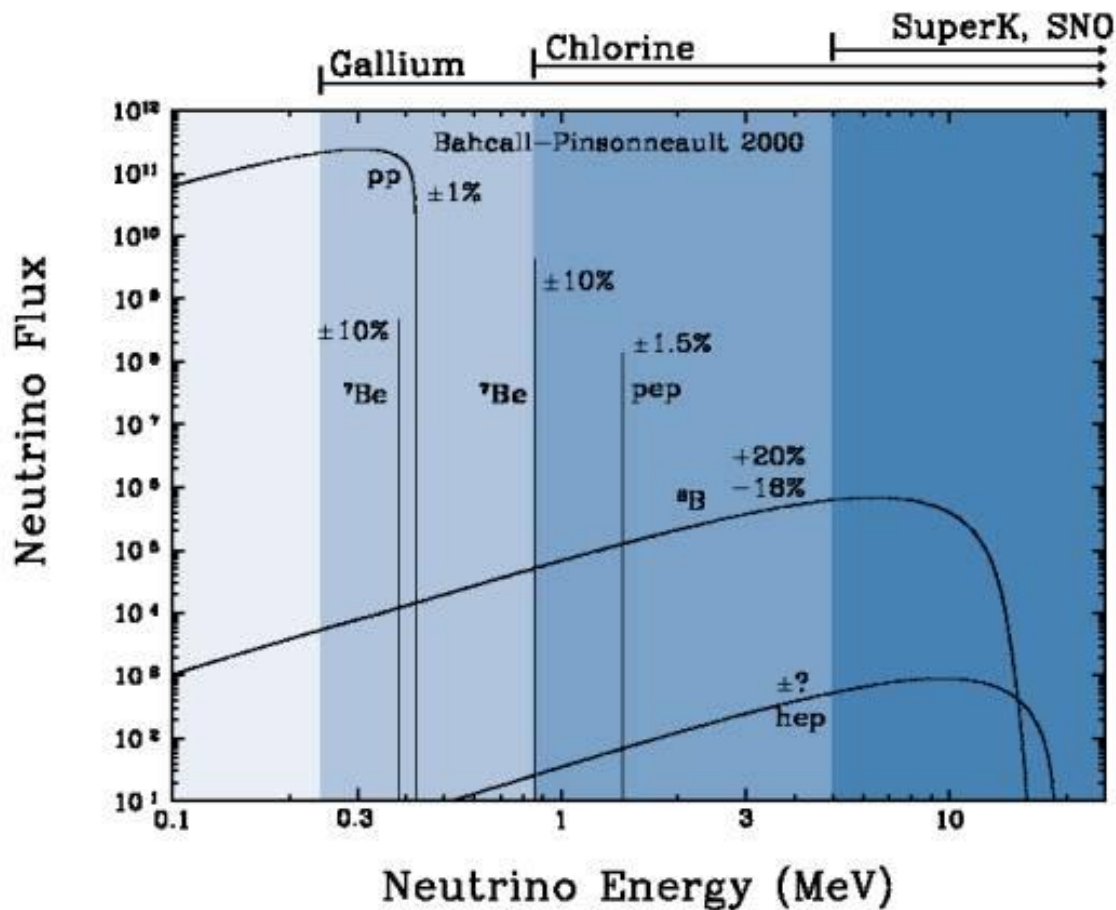
В ряде термоядерных реакций часть энергии уносится нейтрино.

Важно, что эти частицы свободно покидают Солнце.

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



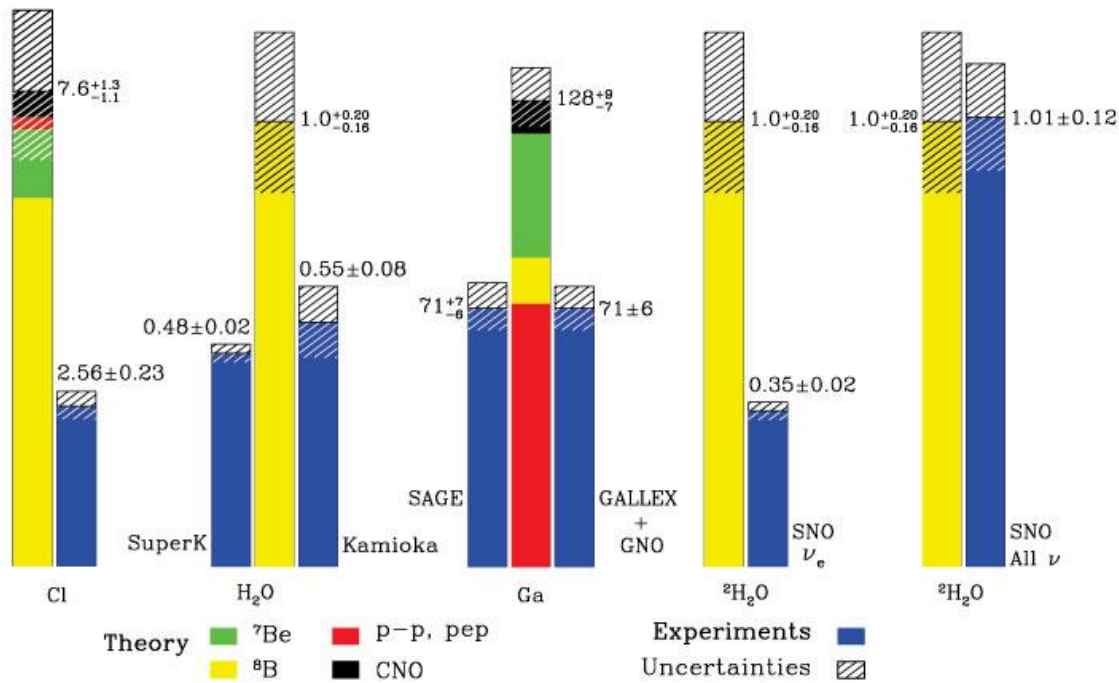
Регистрация нейтрино



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.

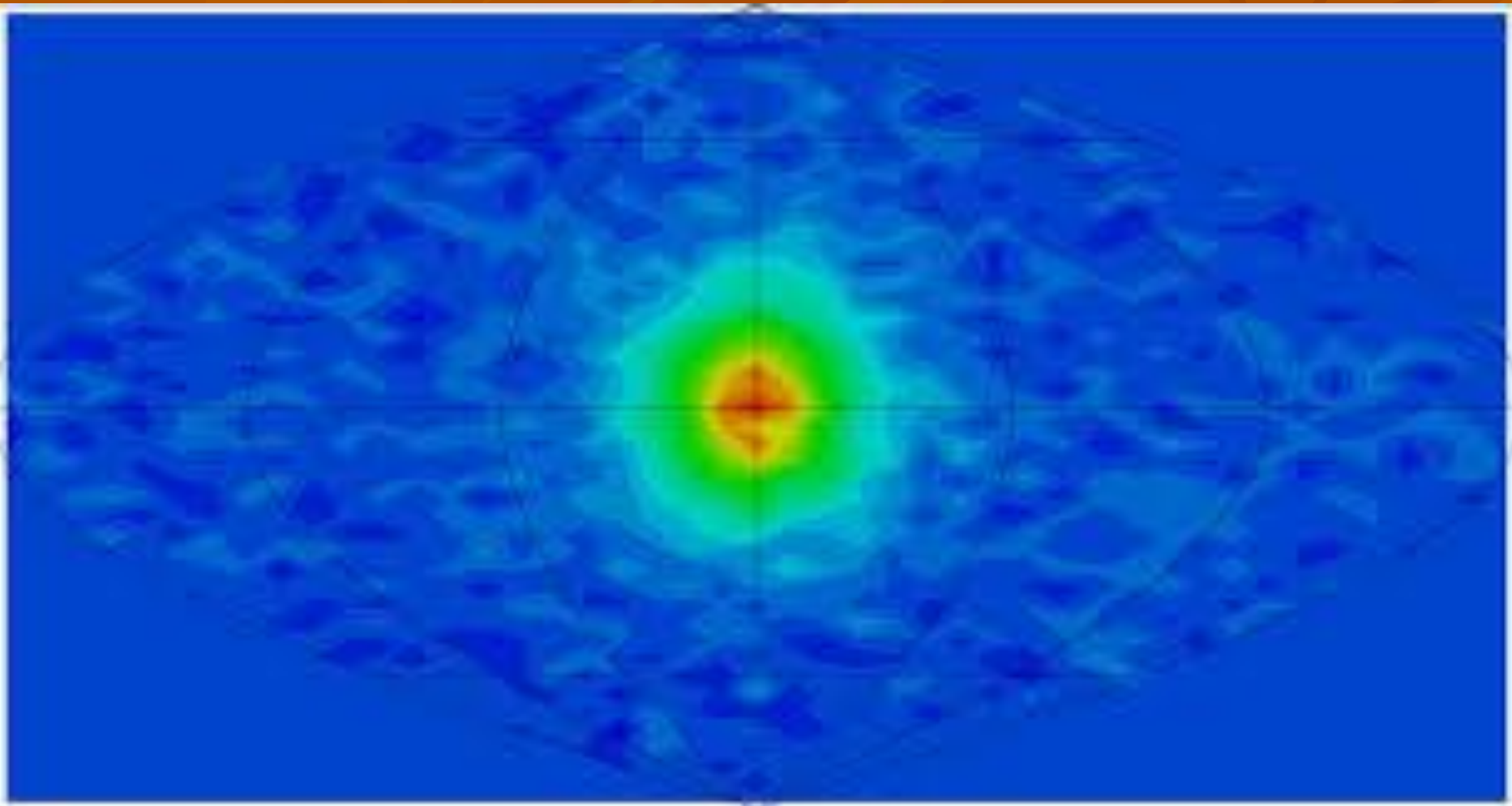
На пути к нам нейтрино разных типов могут превращаться друг в друга.

Это означает, что нейтрино имеют массу.

Нобелевская премия 2015 года!

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

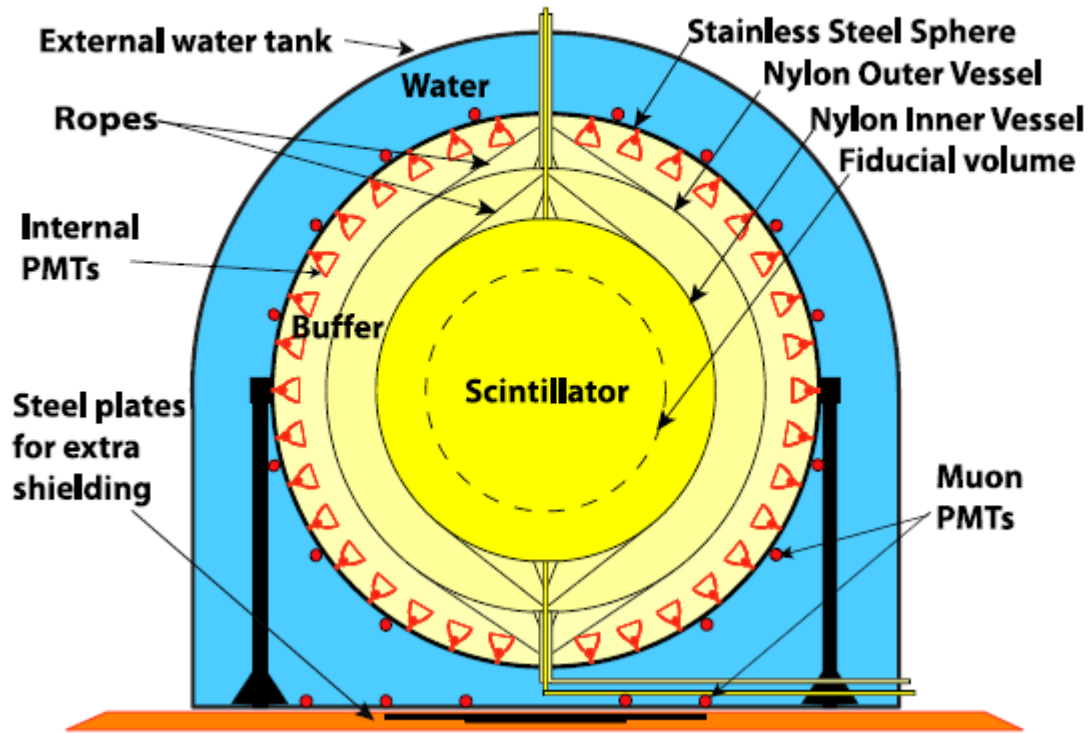
Нейтринное изображение Солнца



Super-Kamiokande

Борексино

Borexino Detector



Gran Sasso National Laboratories

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

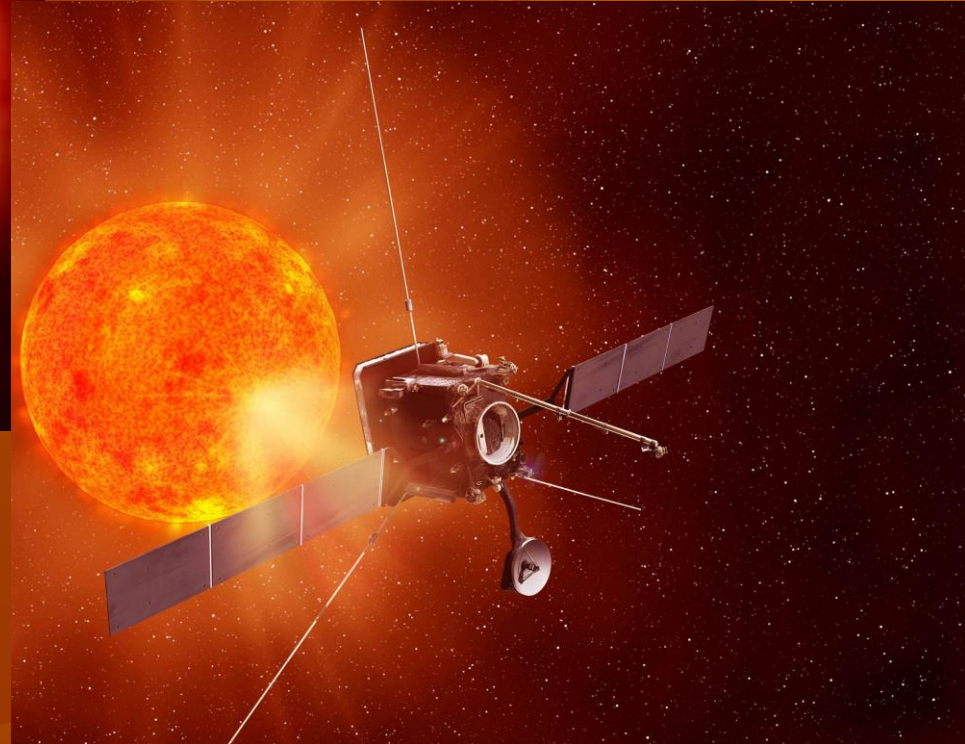
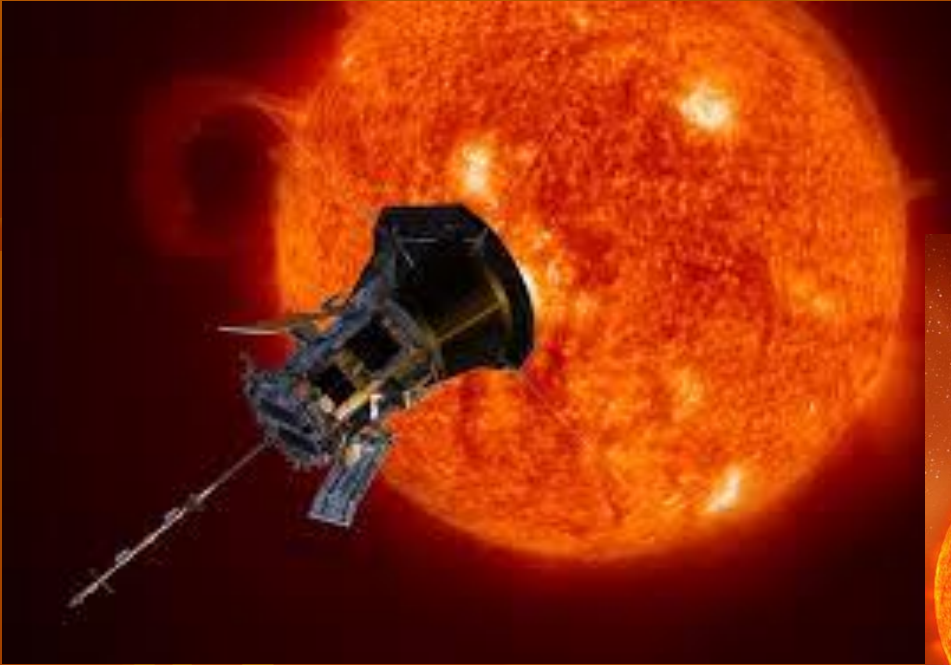
В 2020 г. появилась статья о регистрации нейтрино от реакций от CNO-цикла.
[arXiv:2006.15115](https://arxiv.org/abs/2006.15115)

1410.0779

В 2021 г. проект Борексино был закрыт.

Новые спутники

Parker Solar Probe (2018-...)



Solar Orbiter (2020-...)

