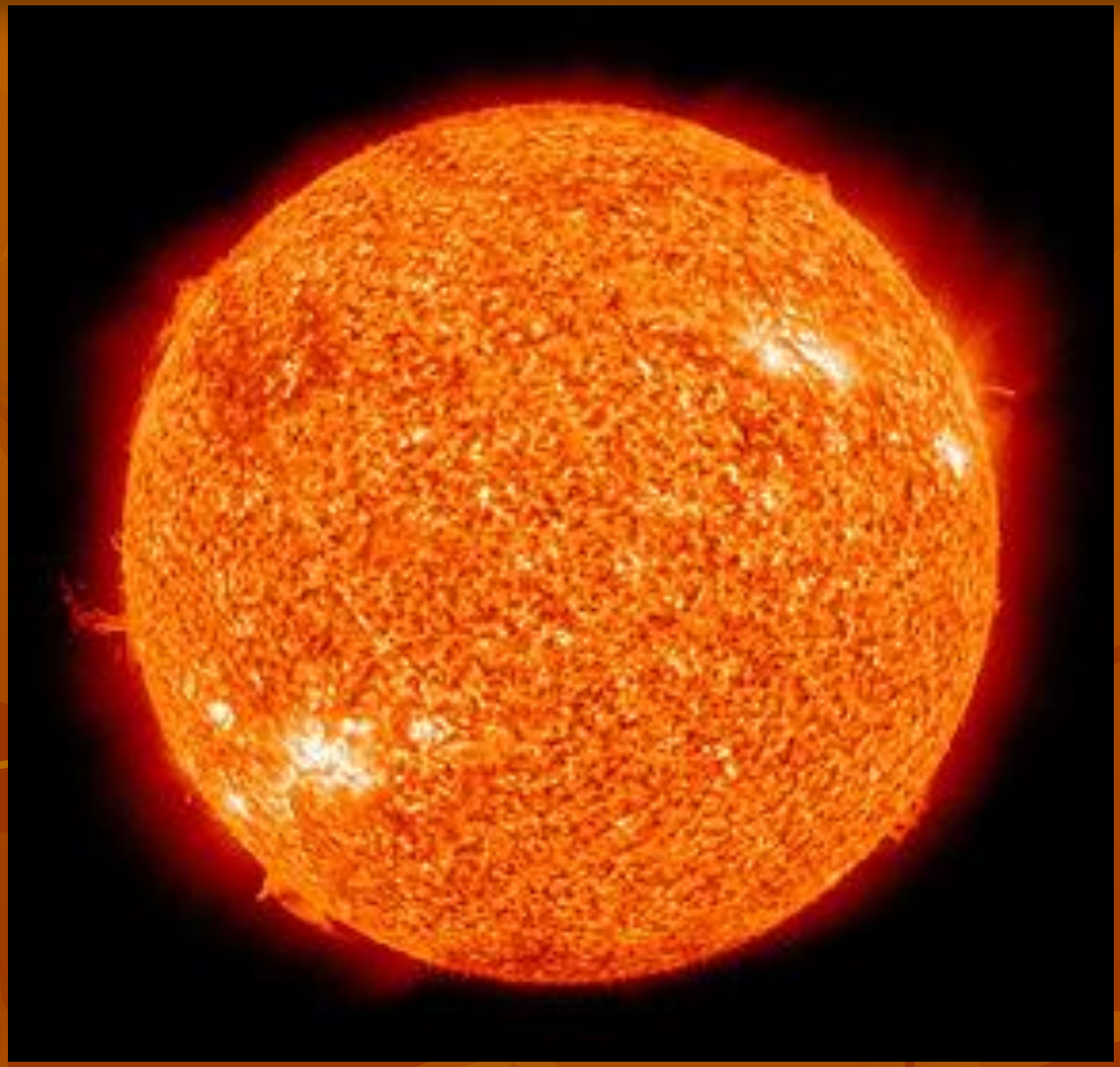
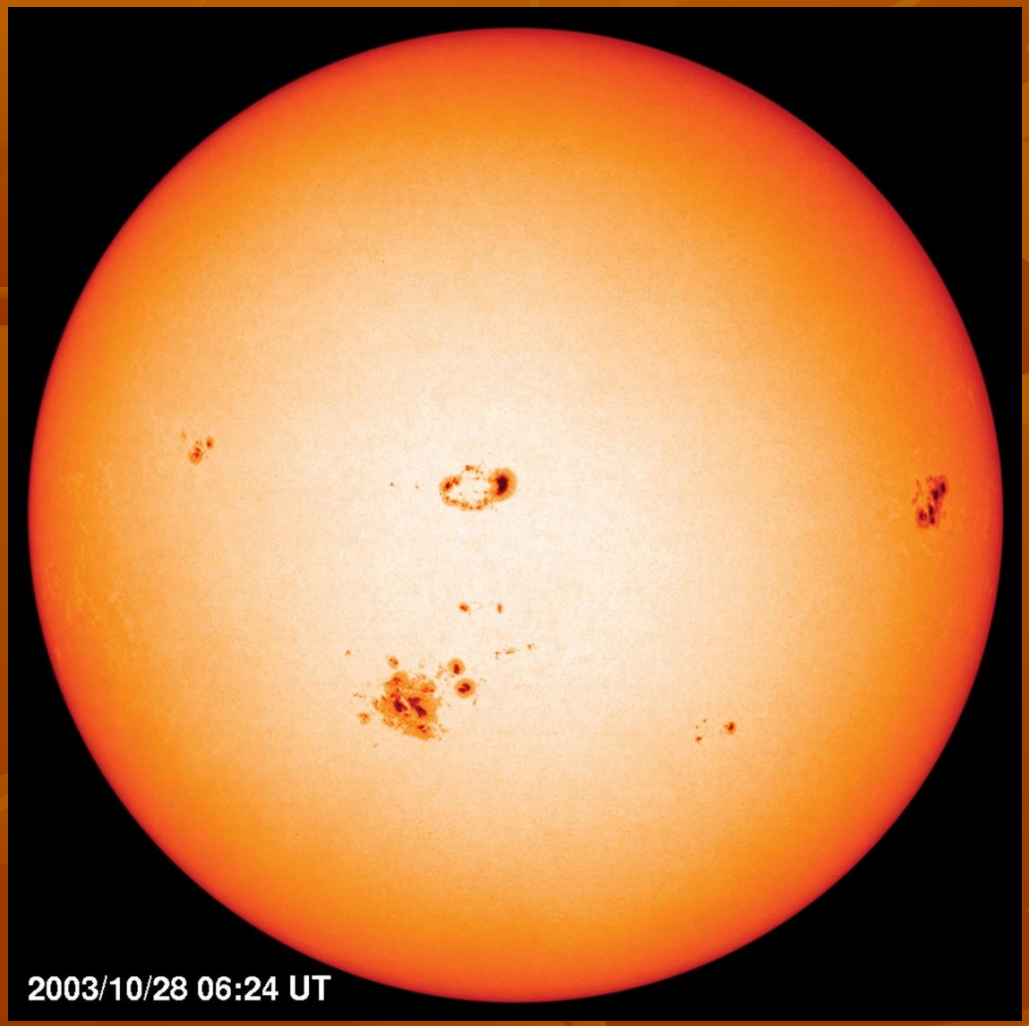
Солнце

Сергей Попов
(ГАИШ МГУ)

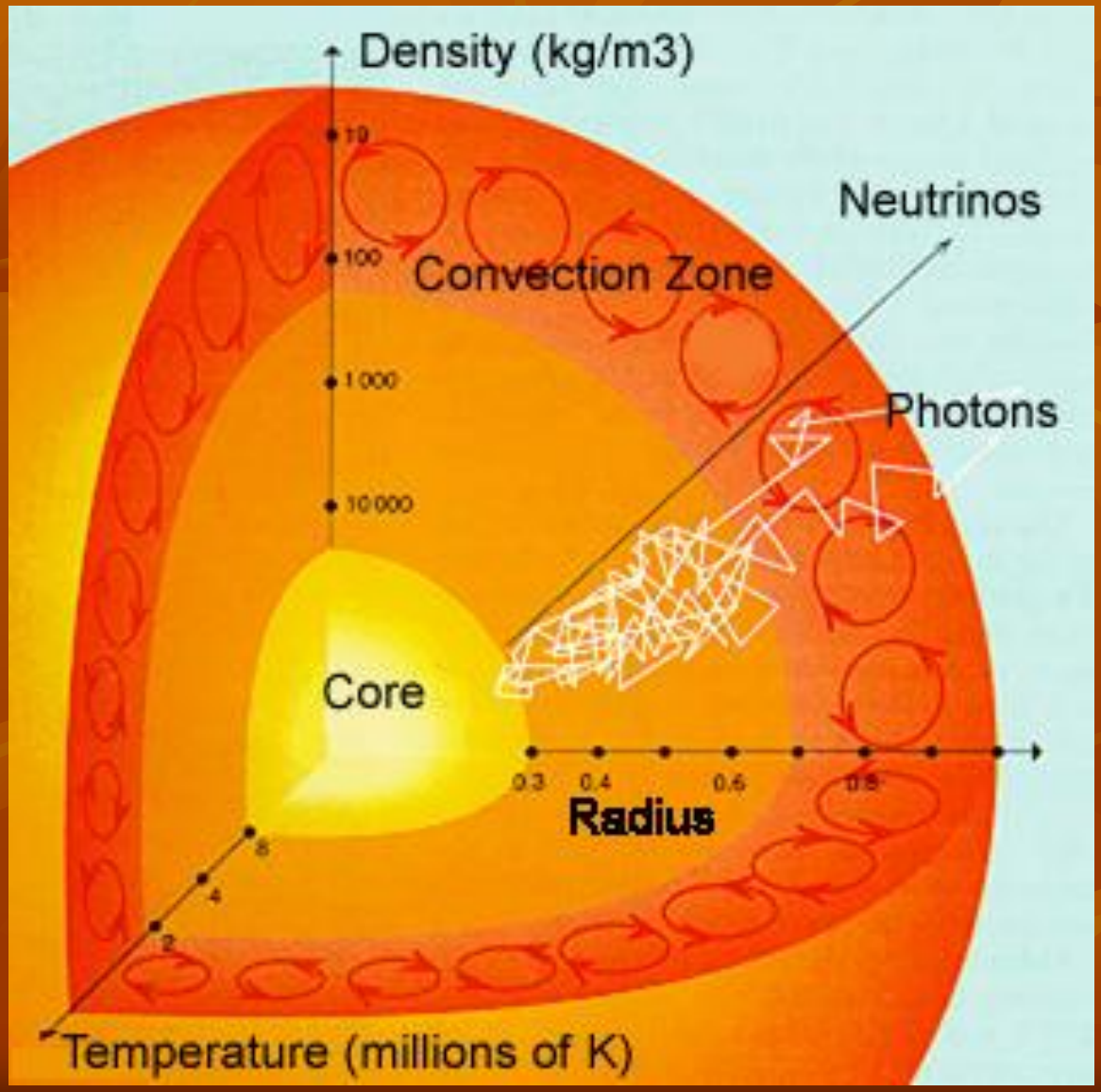


Основные параметры



Масса	$1.99\ 10^{33}$ г
Светимость	$3.86\ 10^{33}$ 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	$5\ 10^9$ лет
Время жизни	~10^{10} лет

Строение Солнца

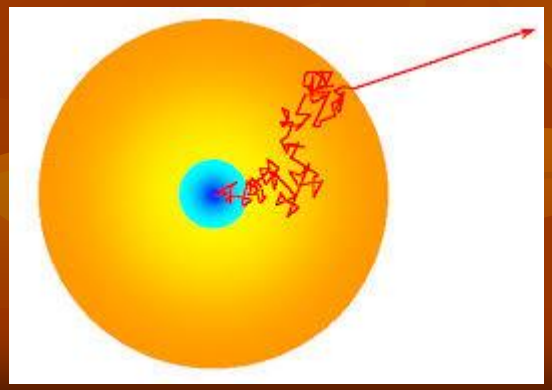


Ядро – термоядерное горение.

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!

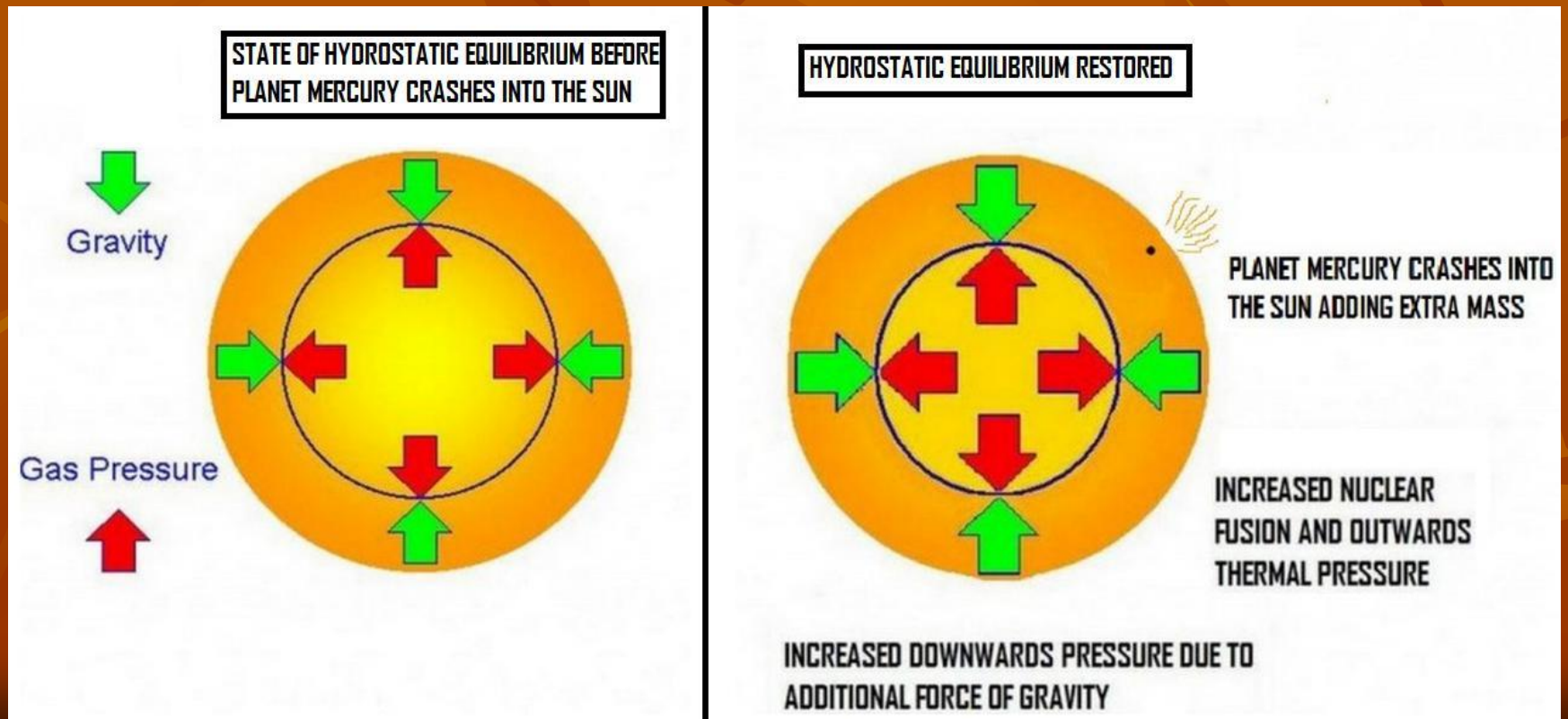


Устойчивость Солнца

Солнце находится в состоянии гидростатическиого 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.



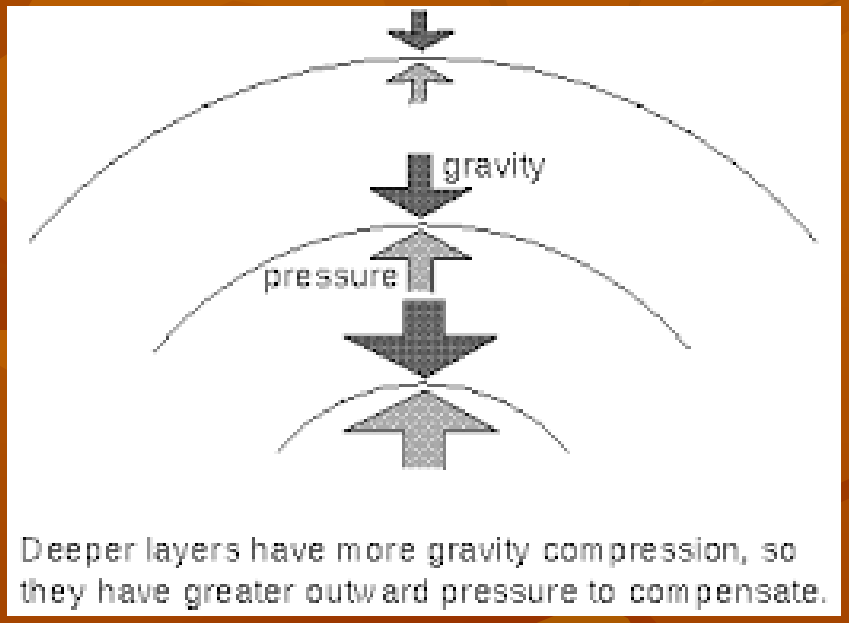
http://www.newtonsapple.org.uk/the-sun-and-nuclear-fusion/

Гидростатическое равновесие

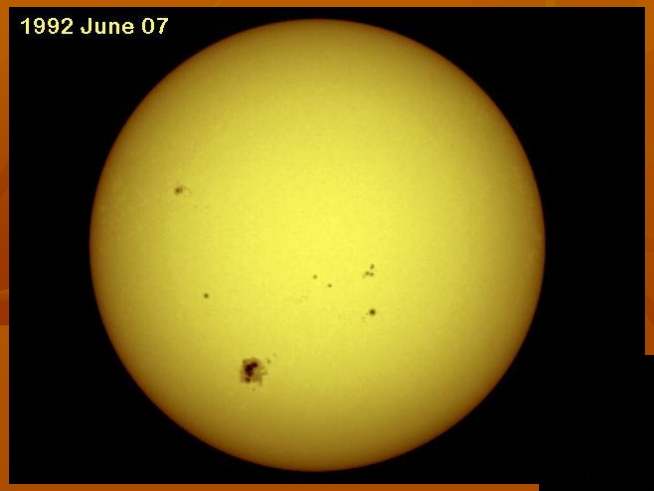
$$\frac{dP}{dr} = -\rho(r)g(r)$$

or,

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



Внешняя структура Солнца

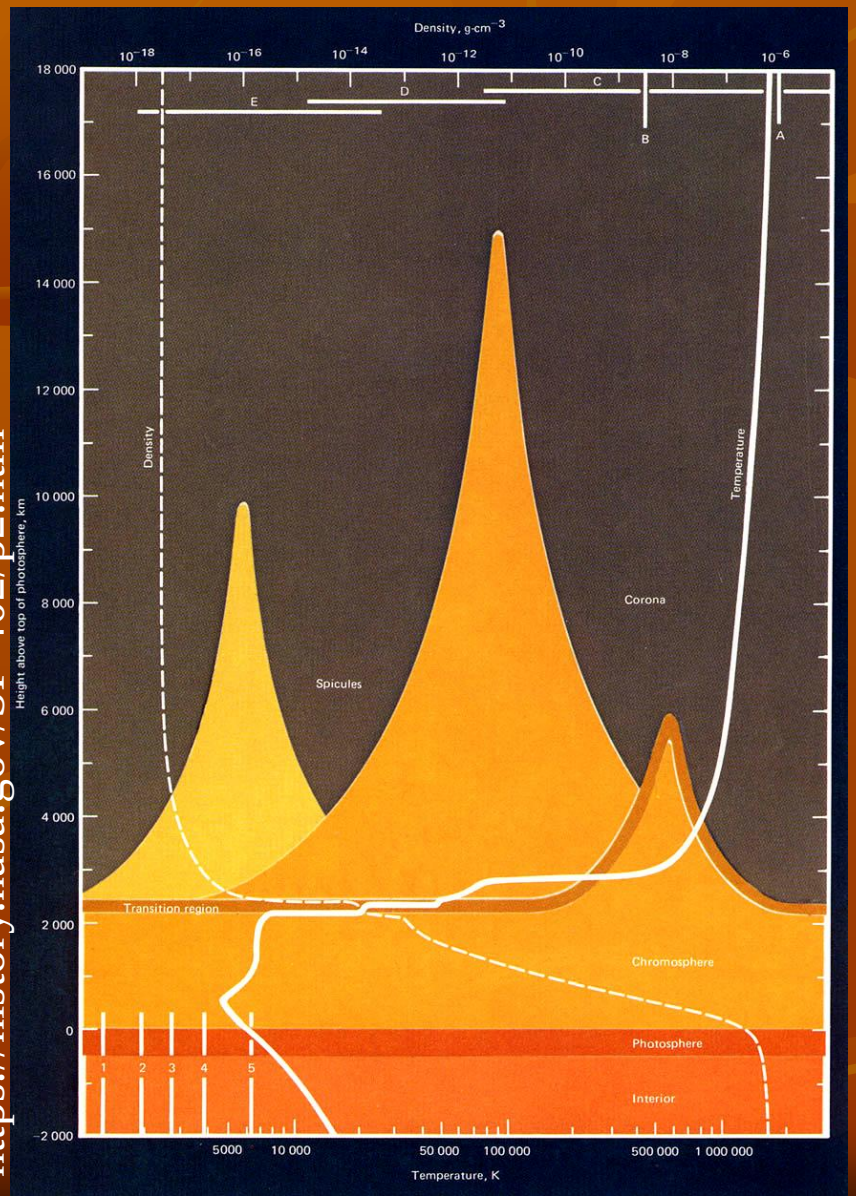


Фотосфера
Это, собственно, видимый диск

Хромосфера
0.0001 плотности фотосферы

Корона
Разреженная, но
очень горячая.
Видна по время затмений.

Внешние слои: свойства



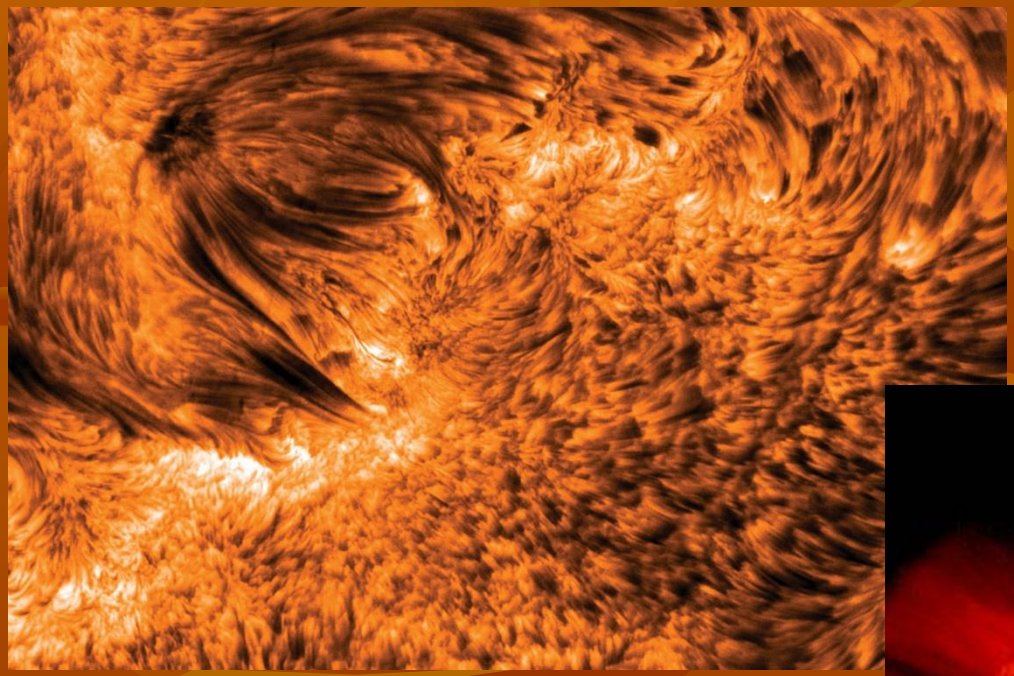
https://history.nasa.gov/SP-402/p2.htm

Фотосфера имеет толщину около 400 км.

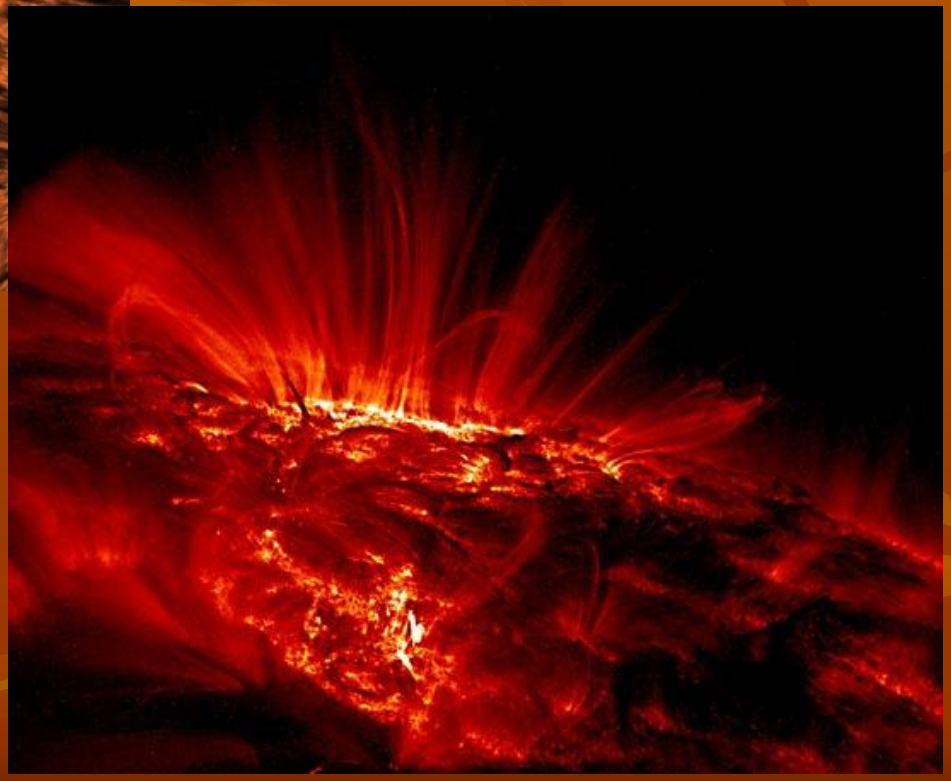
Хромосфера простирается на 10000 км.
В ней температура в начале падает до <4000К, но потом вырастает до 35000-50000К.

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

Солнечные пятна

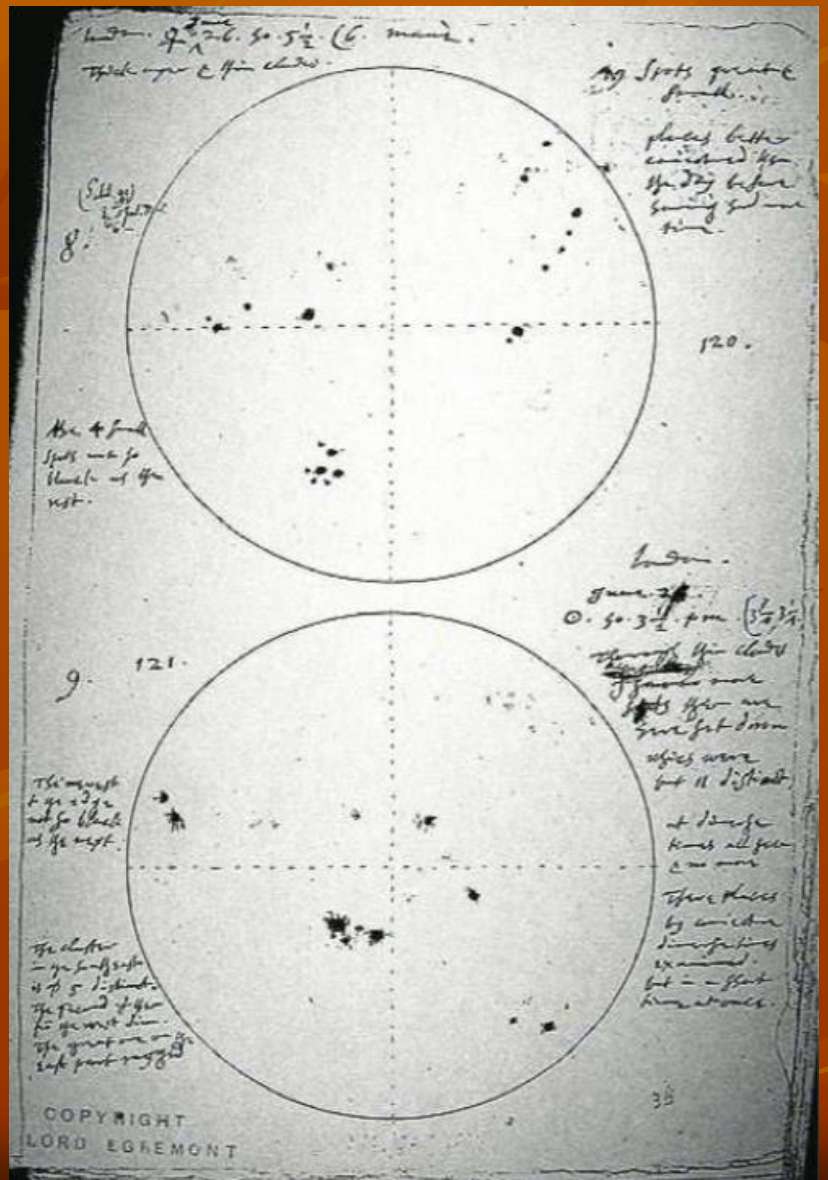


В области пятен подавлен подвод тепла. Это связано с более сильным магнитным полем.

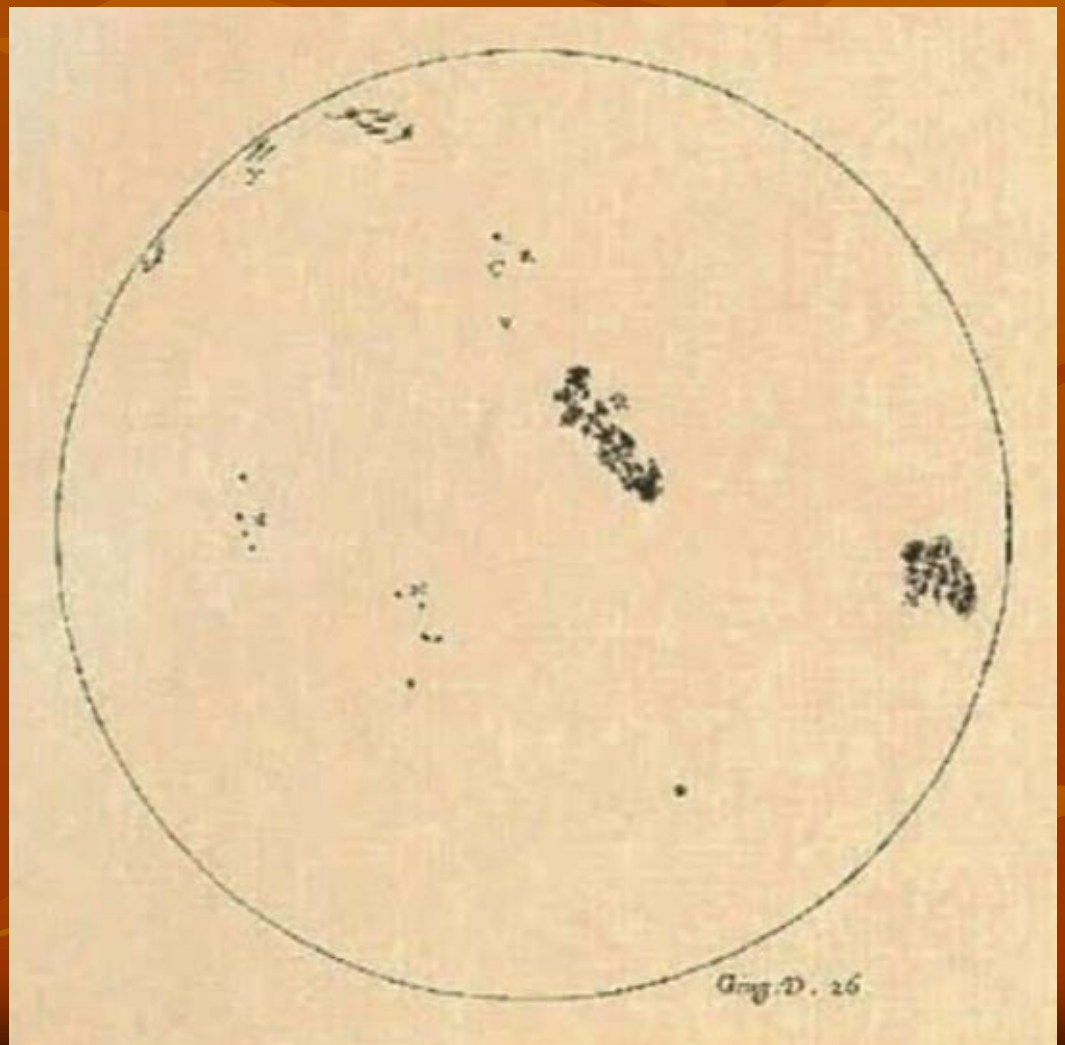


Температура пятен ниже – 4500К, поэтому они кажутся темнее.

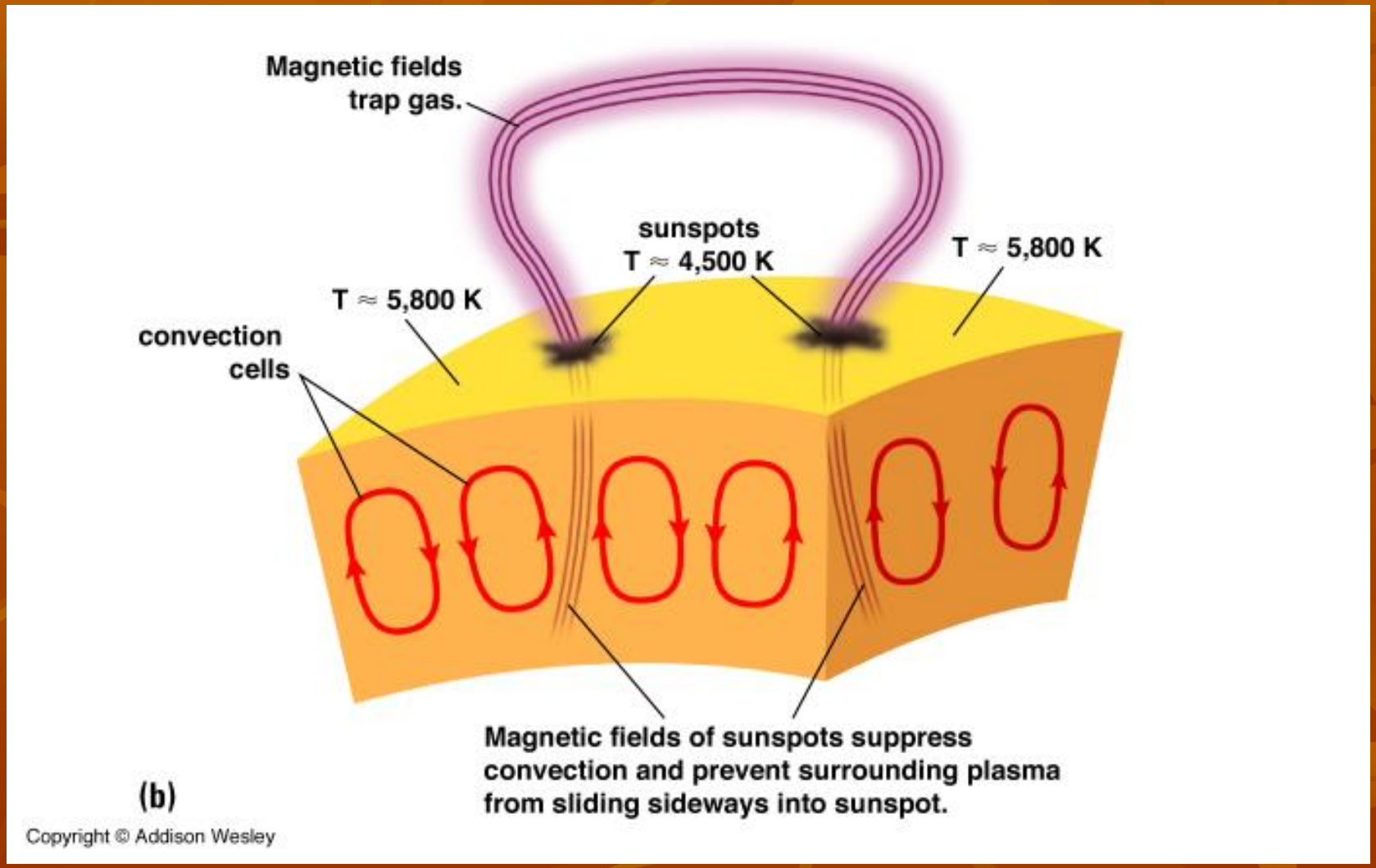
Открытие пятен



Томас Гарриот и Галилео Галилей в 1610 году

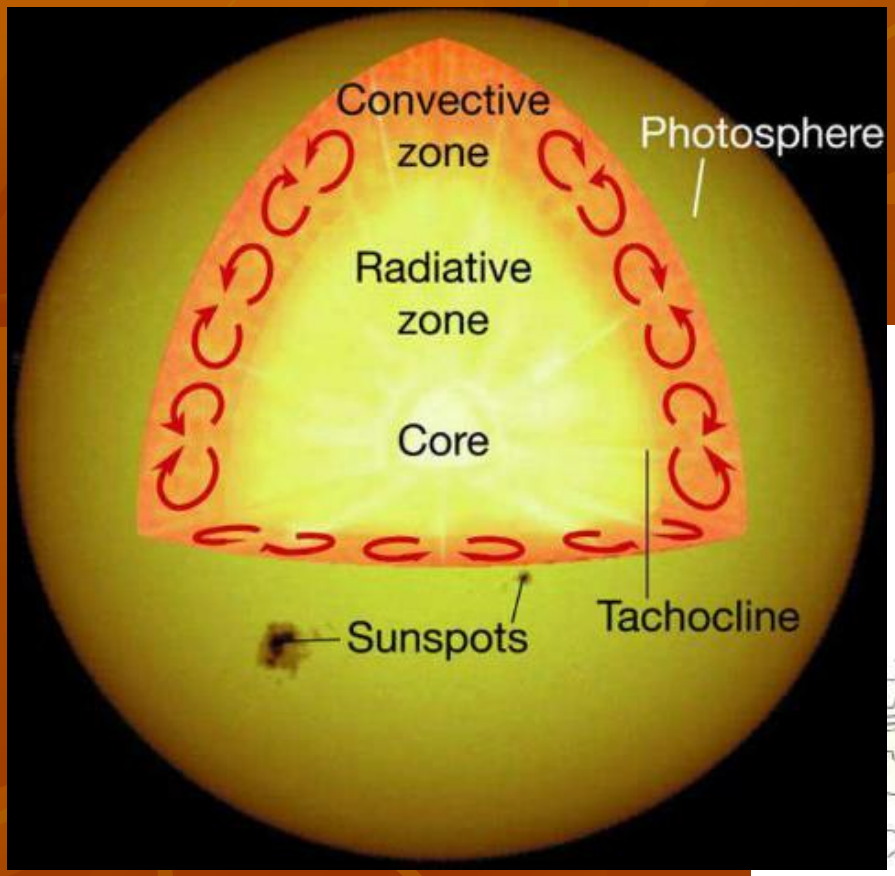


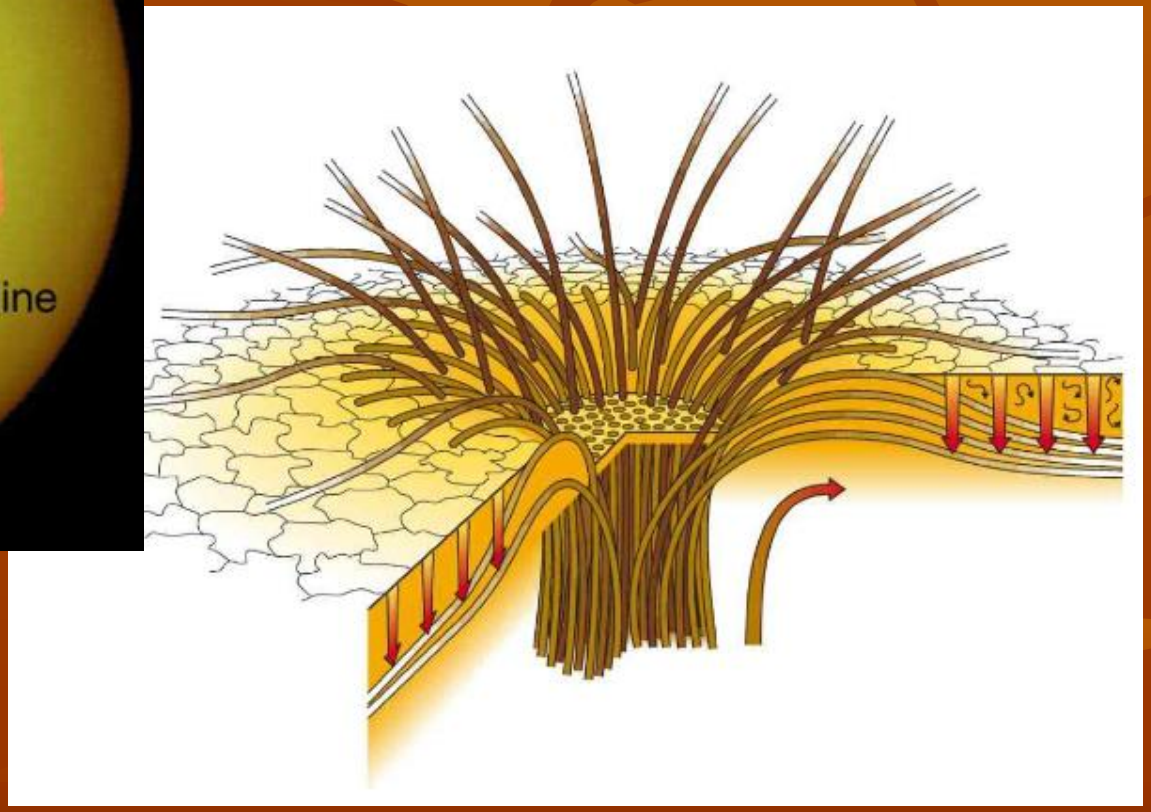
Пятна и магнитные поля



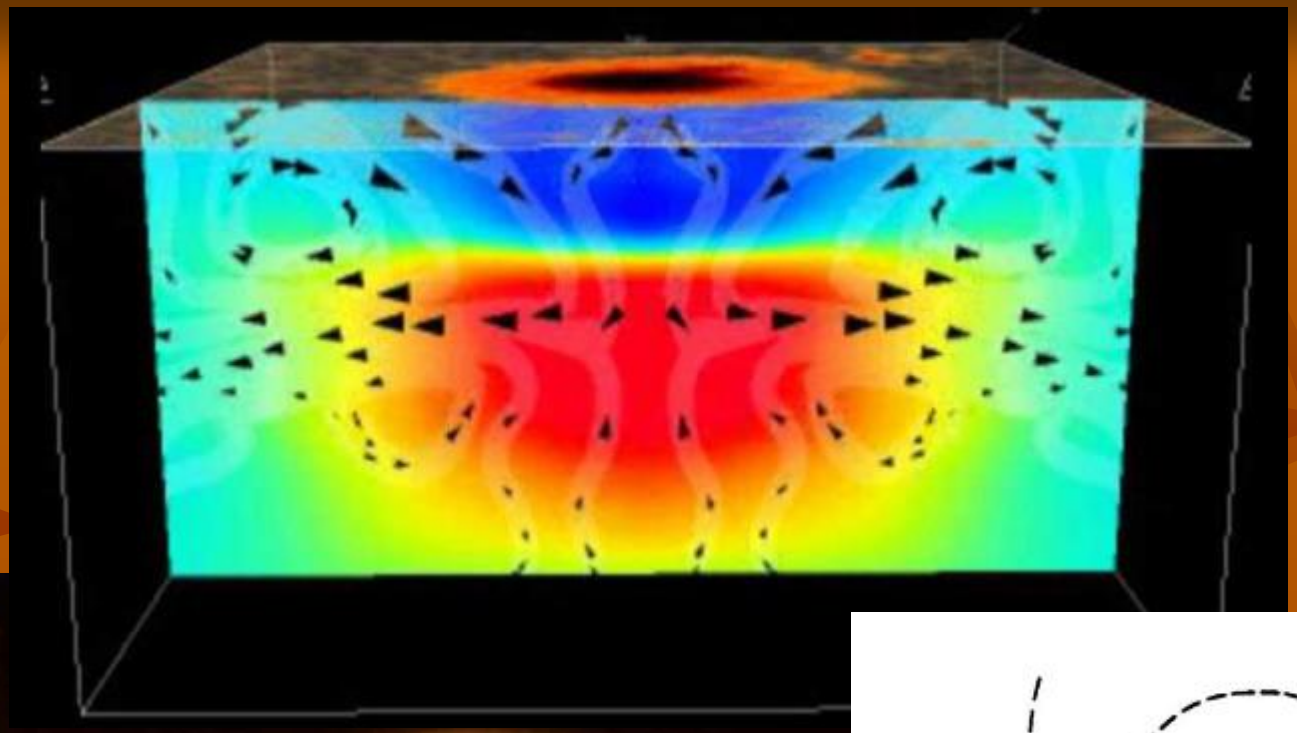
Сильные магнитные поля подавляют конвективный подвод тепла в области пятен.

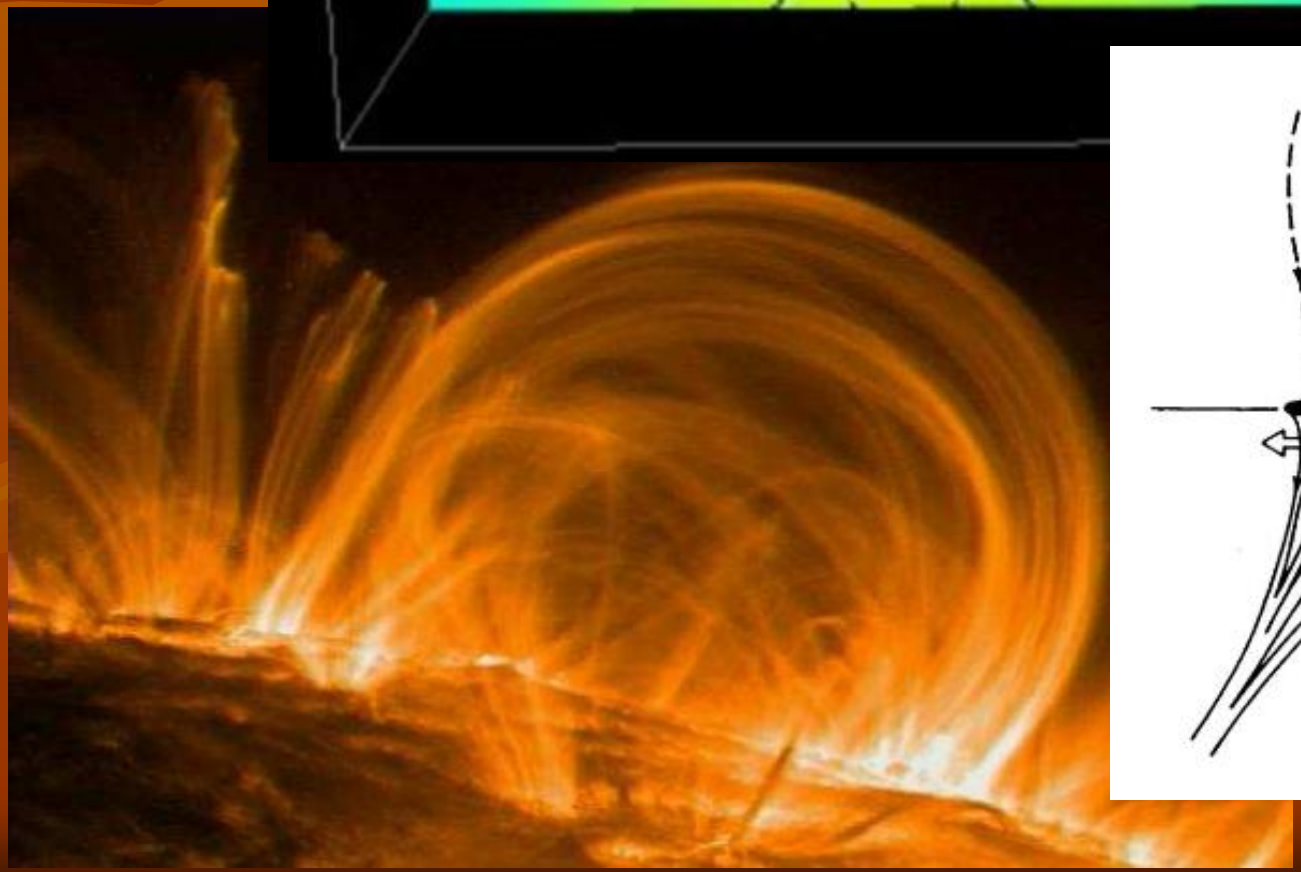
Роль магнитных полей

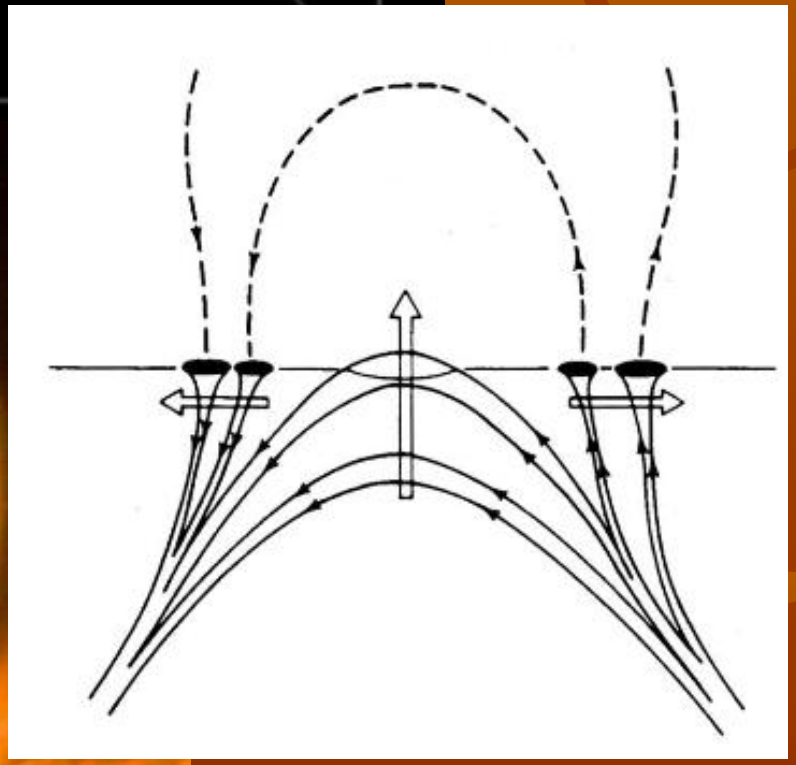




0909.5338

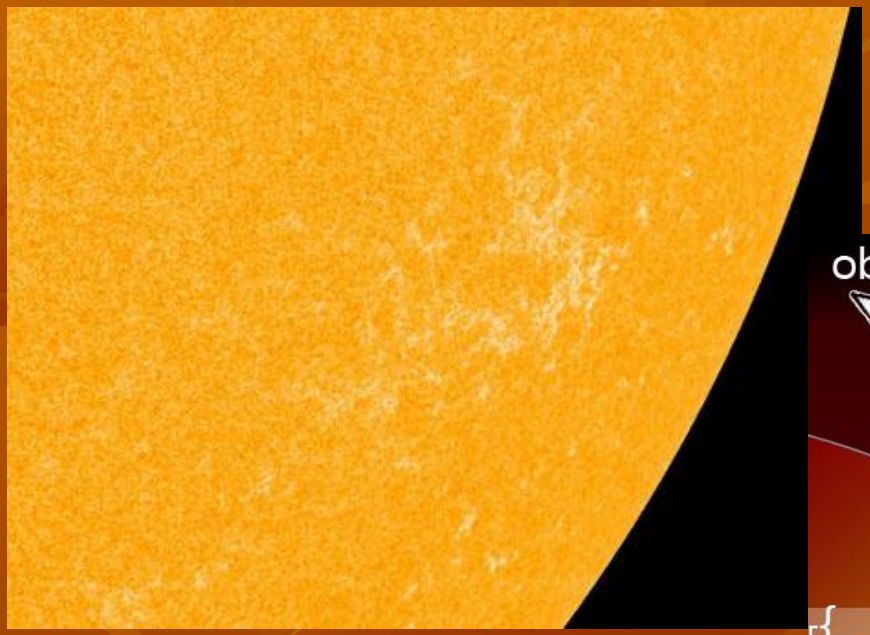


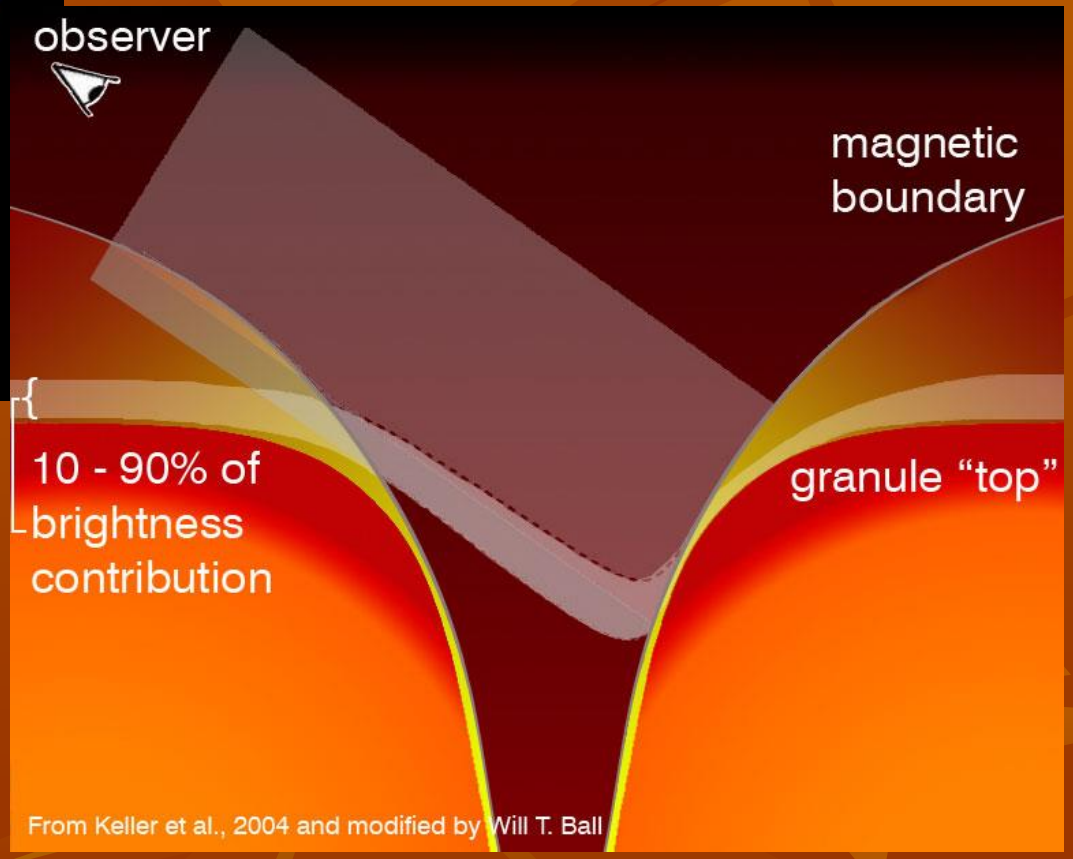




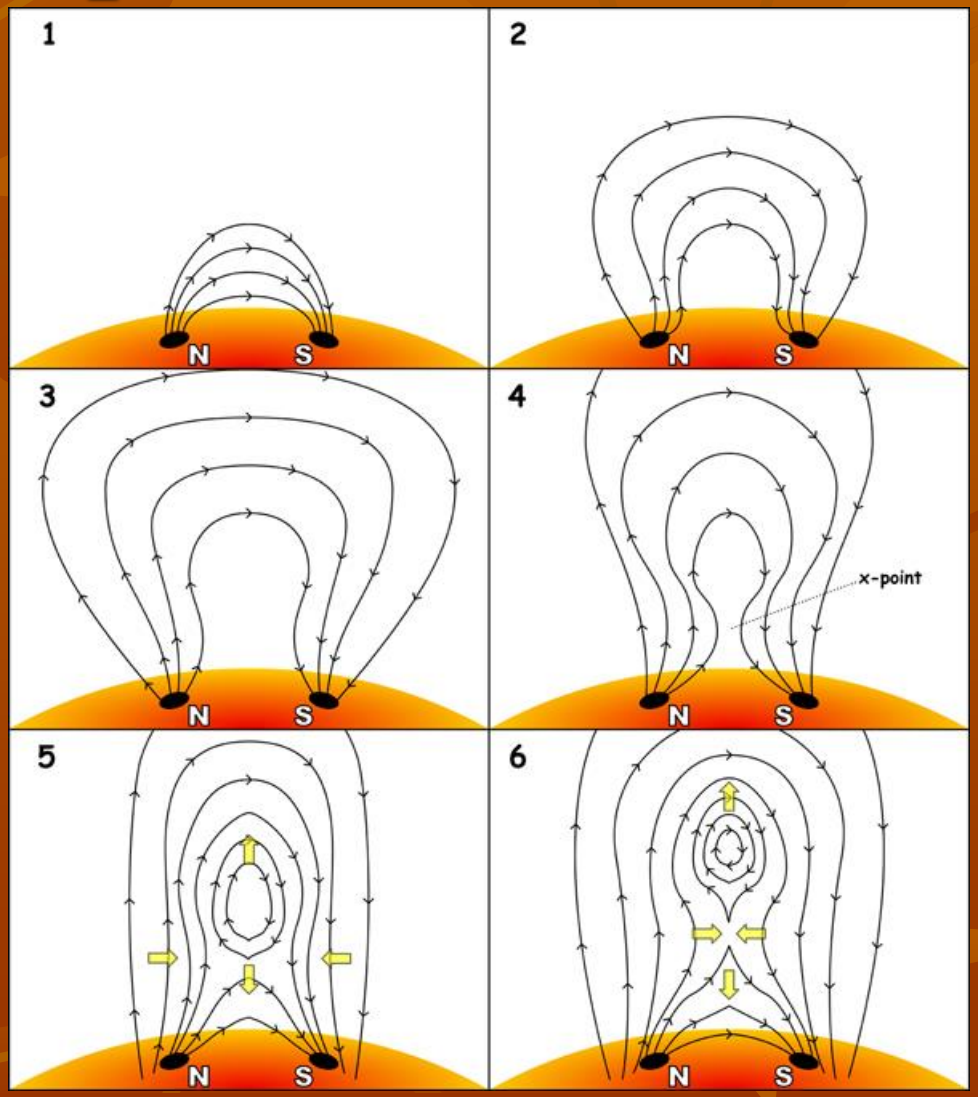
0909.5338

Факельные поля

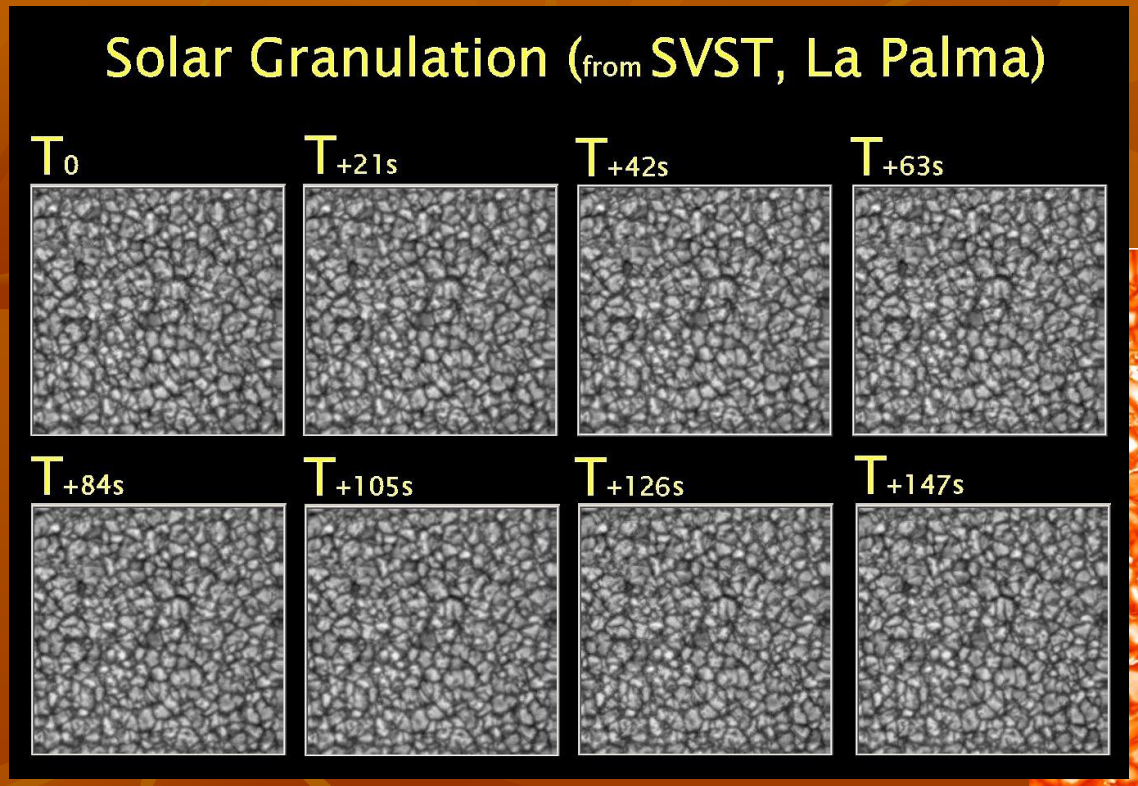




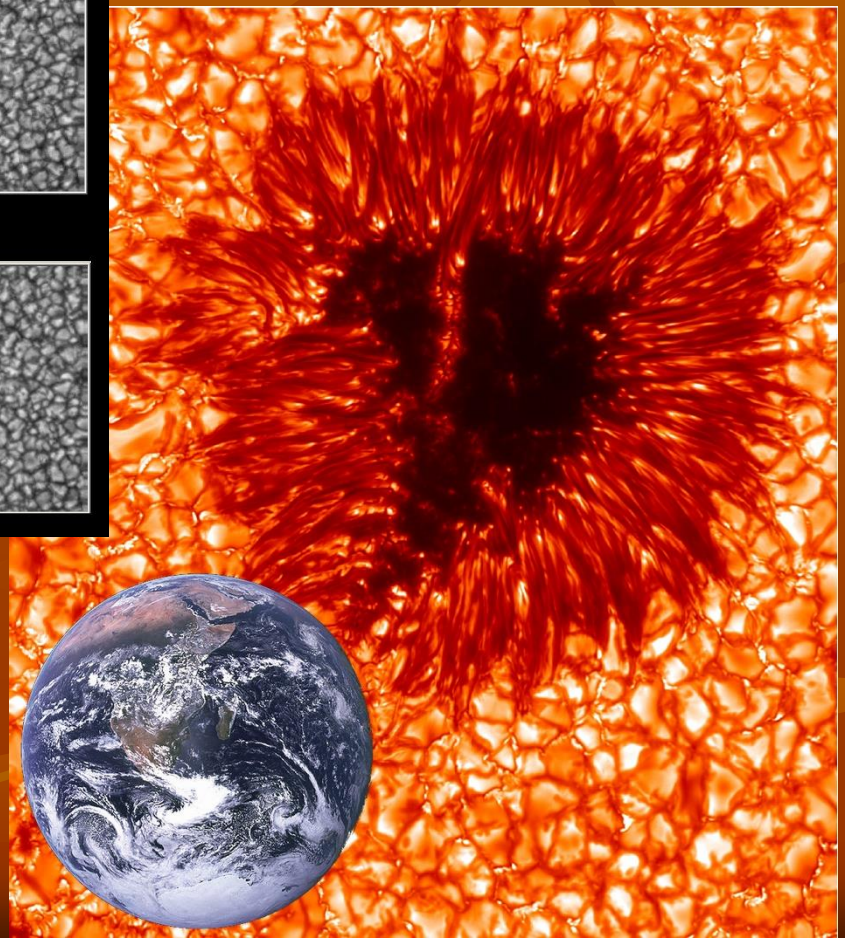
Протуберанцы



Солнечная грануляция



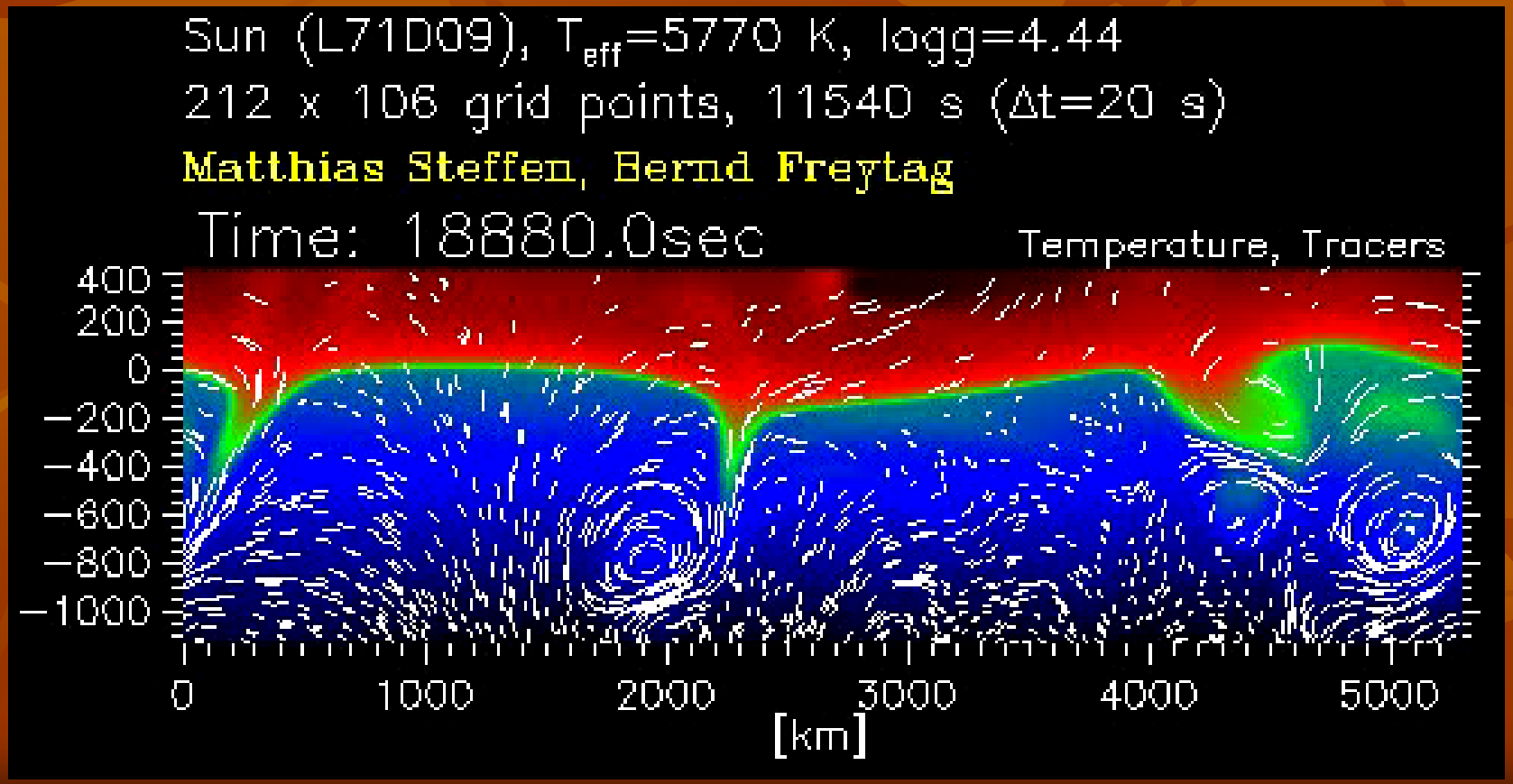
Гранулы имеют размеры порядка 700 км
и живут несколько минут.



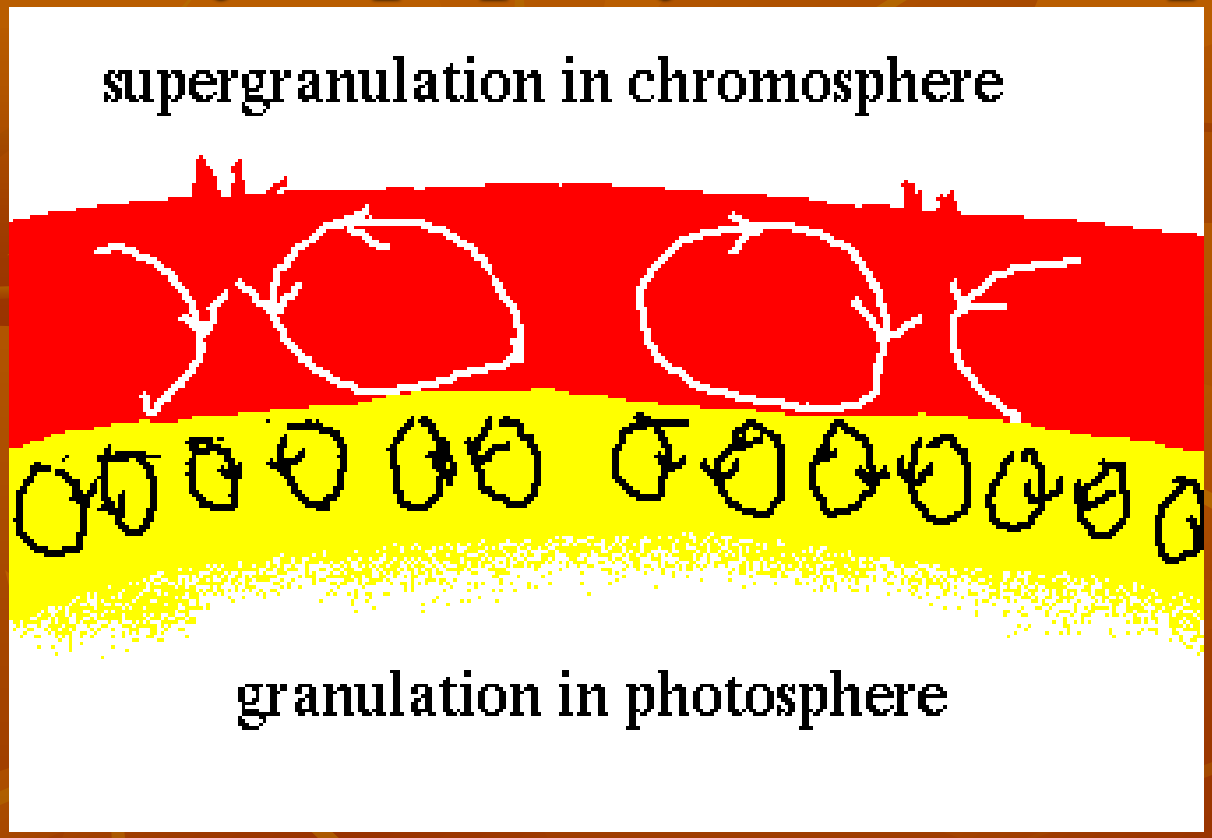
Моделирование Солнца

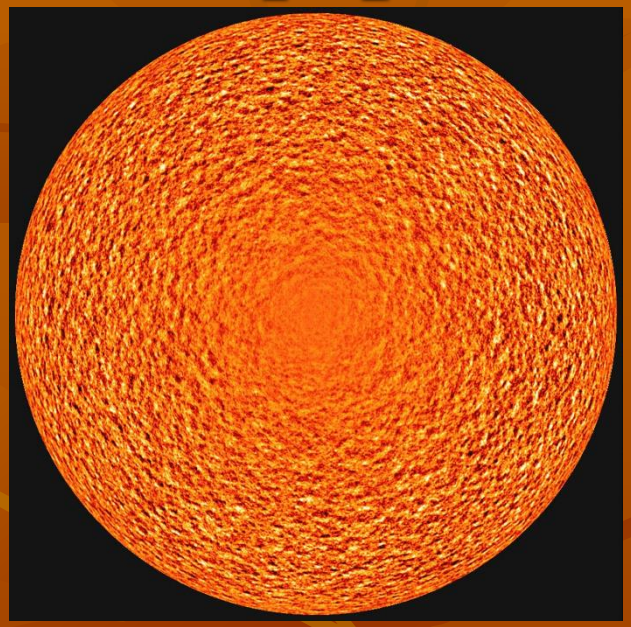
Основные проявления солнечной активности связаны с магнитными полями. Сами поля во многом связаны с динамикой внешних слоев Солнца.

Внешняя часть Солнца конвективна.



Супергрануляция в хромосфере

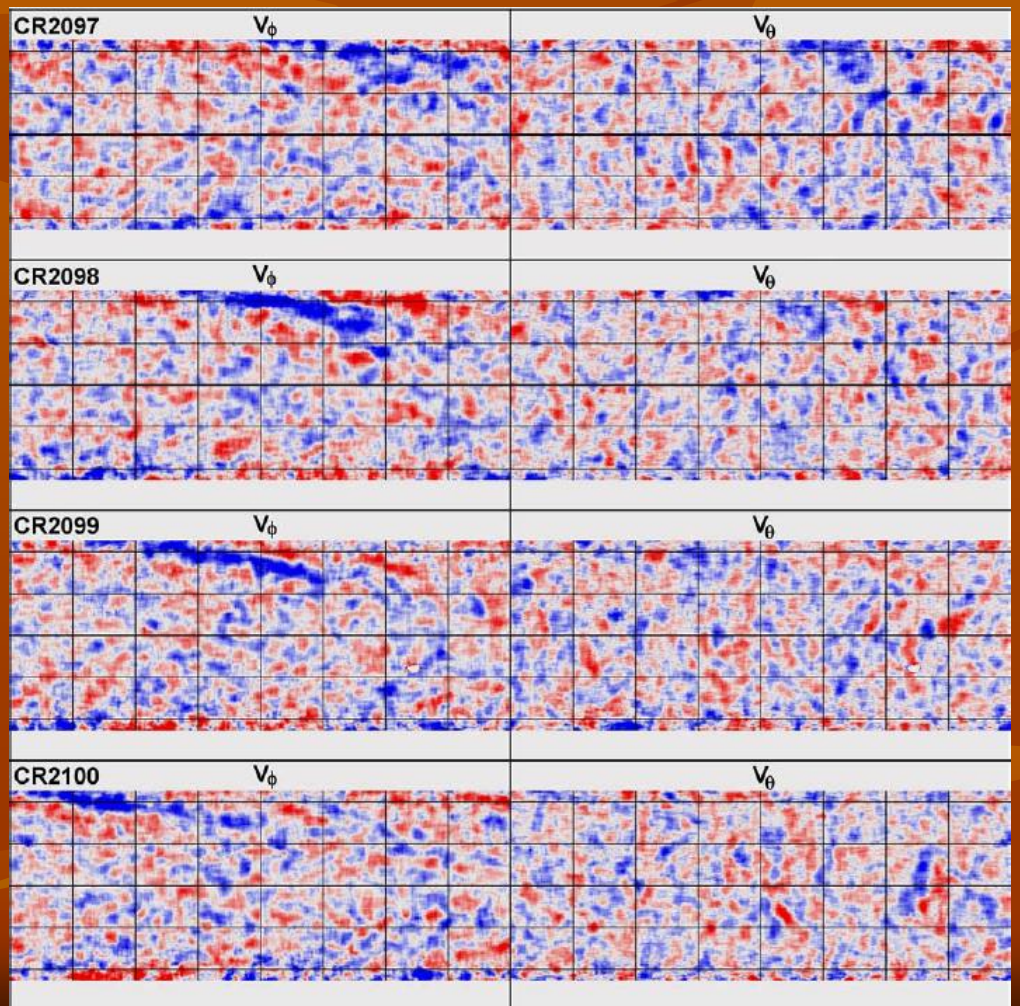




Супергранулы хорошо видны
на хромосферных изображениях.
Их размеры в десятки раз больше,
чем у гранул в фотосфере.
Существуют порядка одного дня.

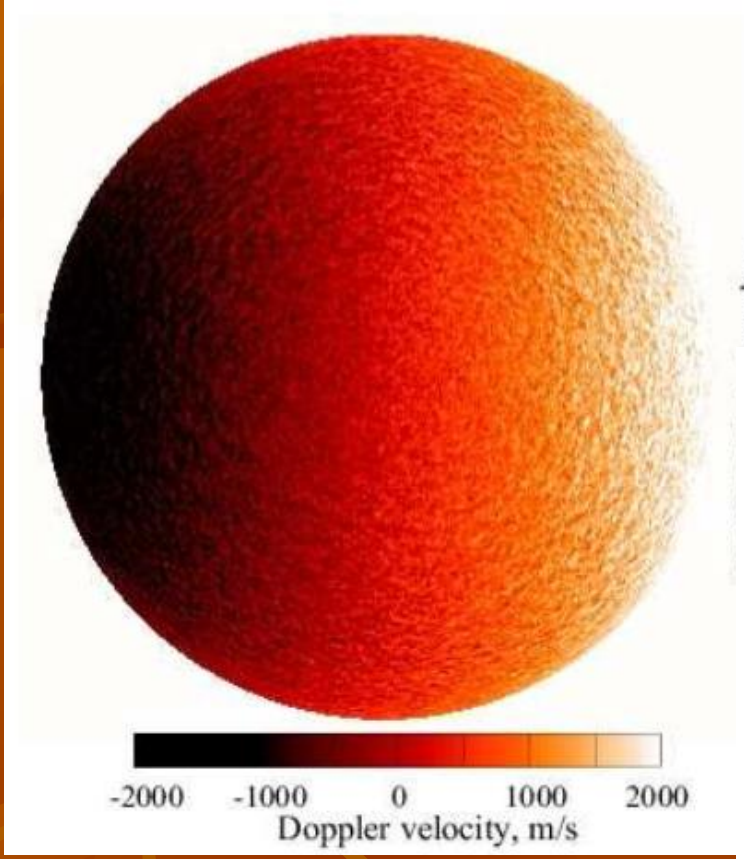
Гигантские конвективные ячейки

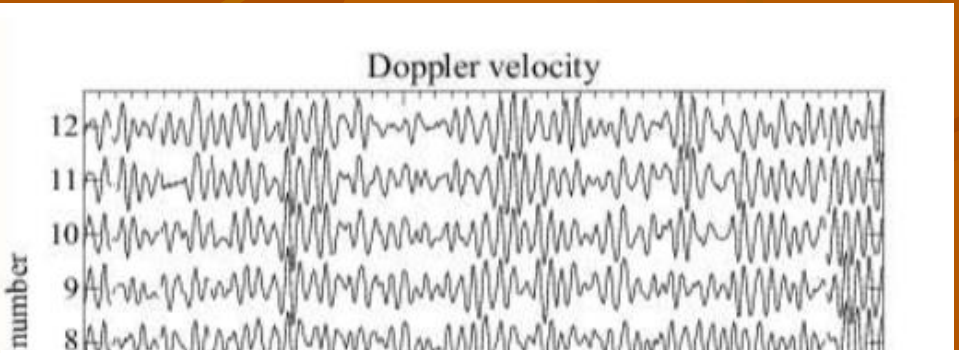
Такие структуры предказывались:
размеры ~200 000 км; глубоко в конвективной зоне;
время жизни порядка месяца.



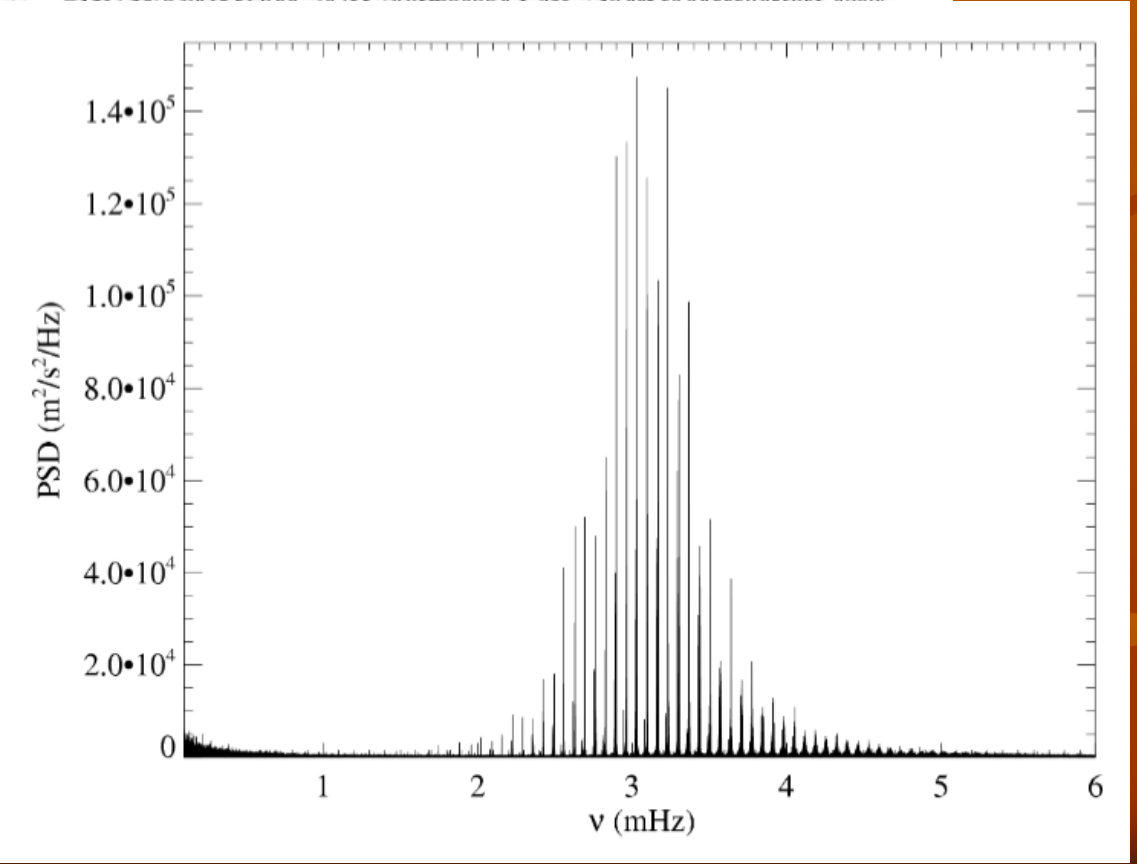
1401.0551

Гелиосейсмология





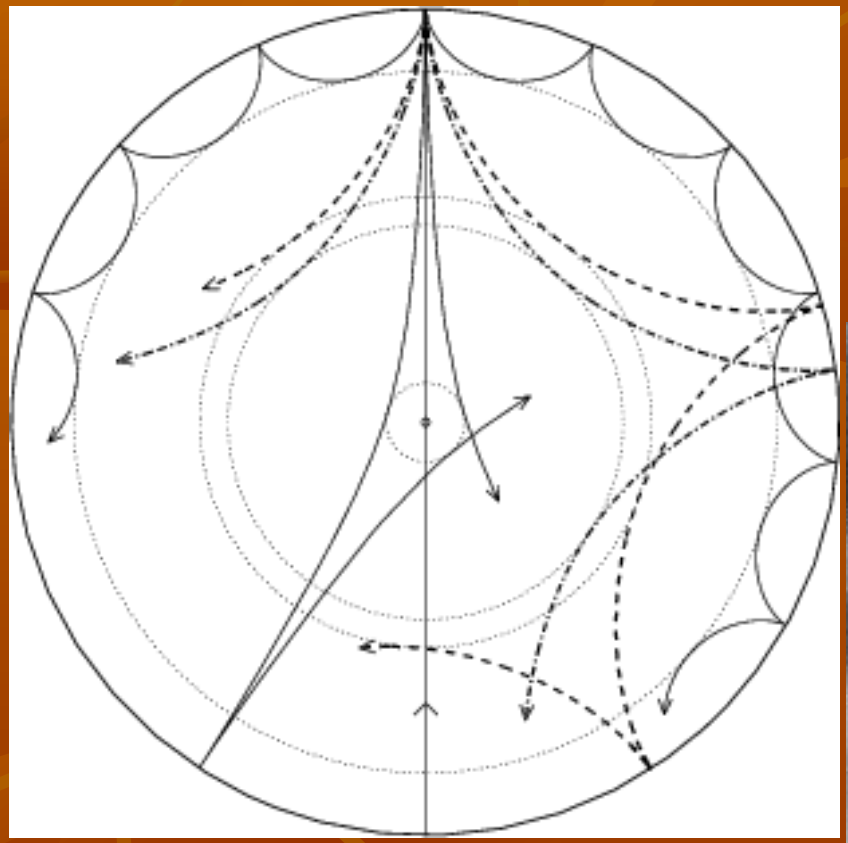
1103.1707



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

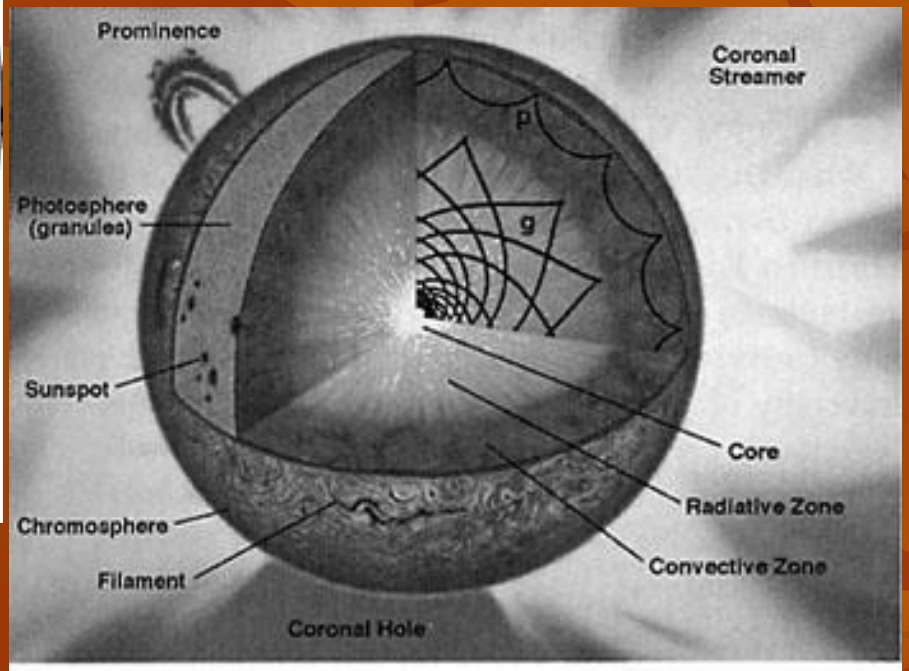
Возбуждение колебаний

https://inspirehep.net/record/1083878/plots



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

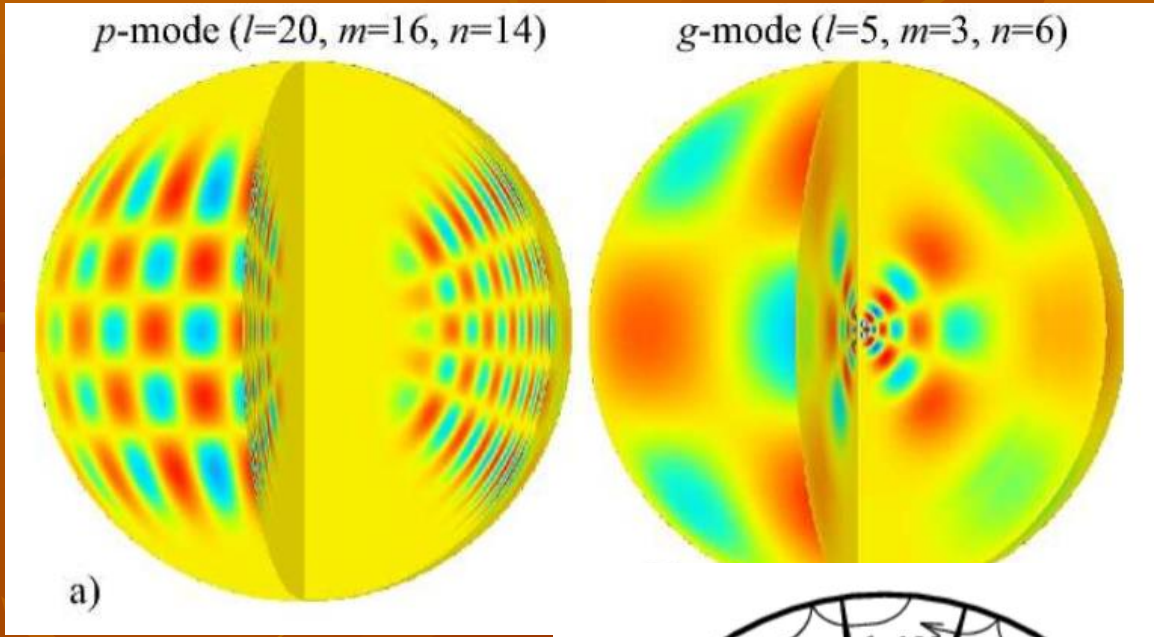
g-моды колебаний в основном заперты в недрах Солнца.



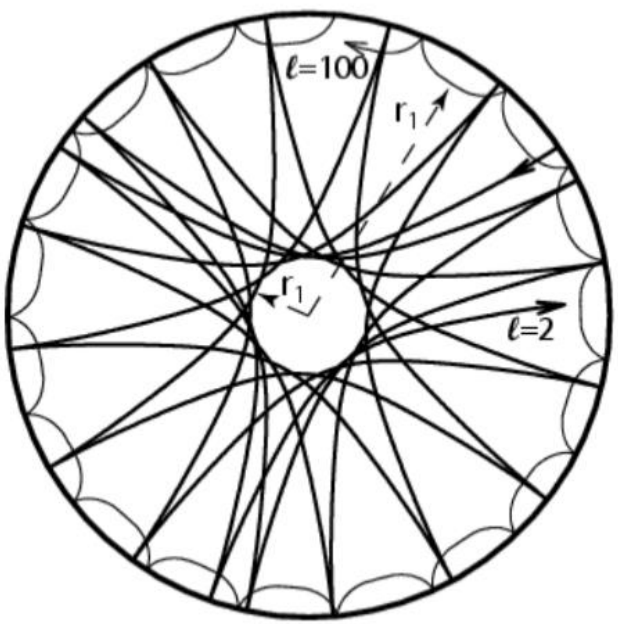
A cut-away diagram of major features of the sun. Courtesy of the SOHO/MDI consortium. SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA.

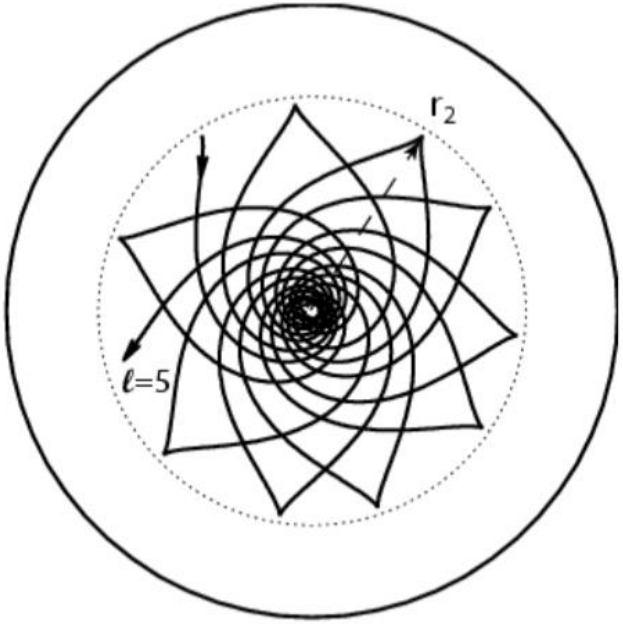
https://ncse.com/rncse/18/5/long-term-solar-oscillations-age-sun

Глобальные колебания

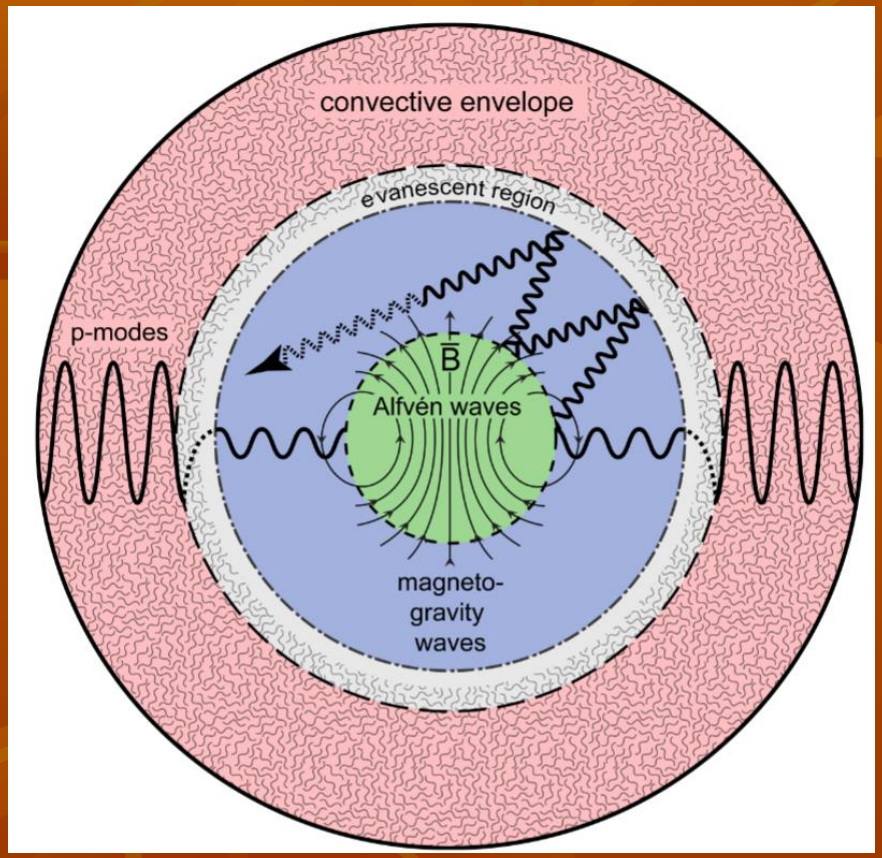


1103.1707





Магнитные поля в недрах красных гигантов



1510.06960

Астросейсмология помогла измерить магнитное поле в недрах красных гигантов.

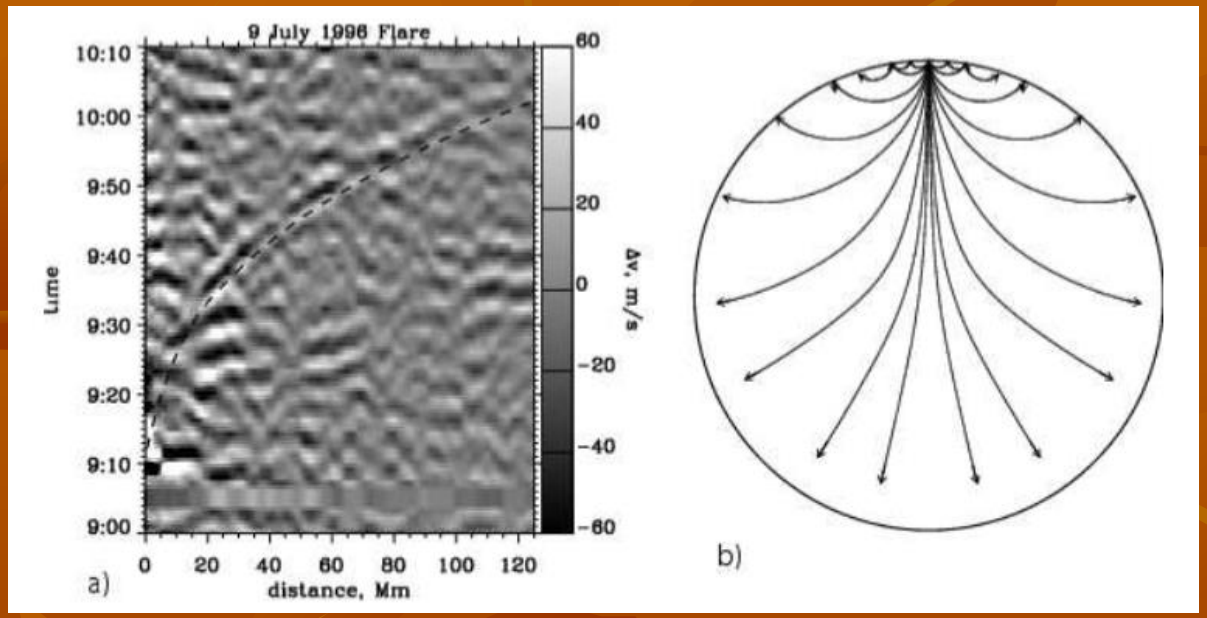
В звездах «гуляют» волны, проявления которых мы можем наблюдать, изучая кривые блеска.

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

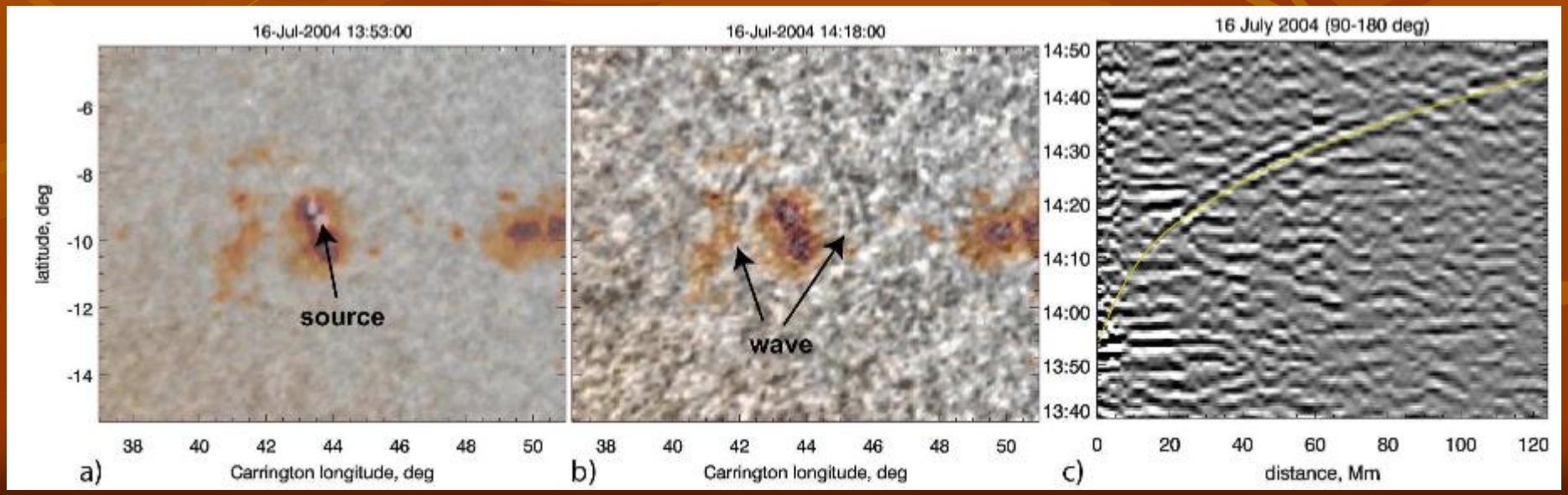
Волны возбуждаются на поверхности и идут внутрь. Там они частично отражаются и выходят обратно во внешние слои. Идея авторов состоит в том, что волны взаимодействуют с магнитным полем внутри звезды. Это приводит к их превращению в другой тип волн, которые уже не могут выйти наружу.

Вспышки и осцилляции

1103.1707

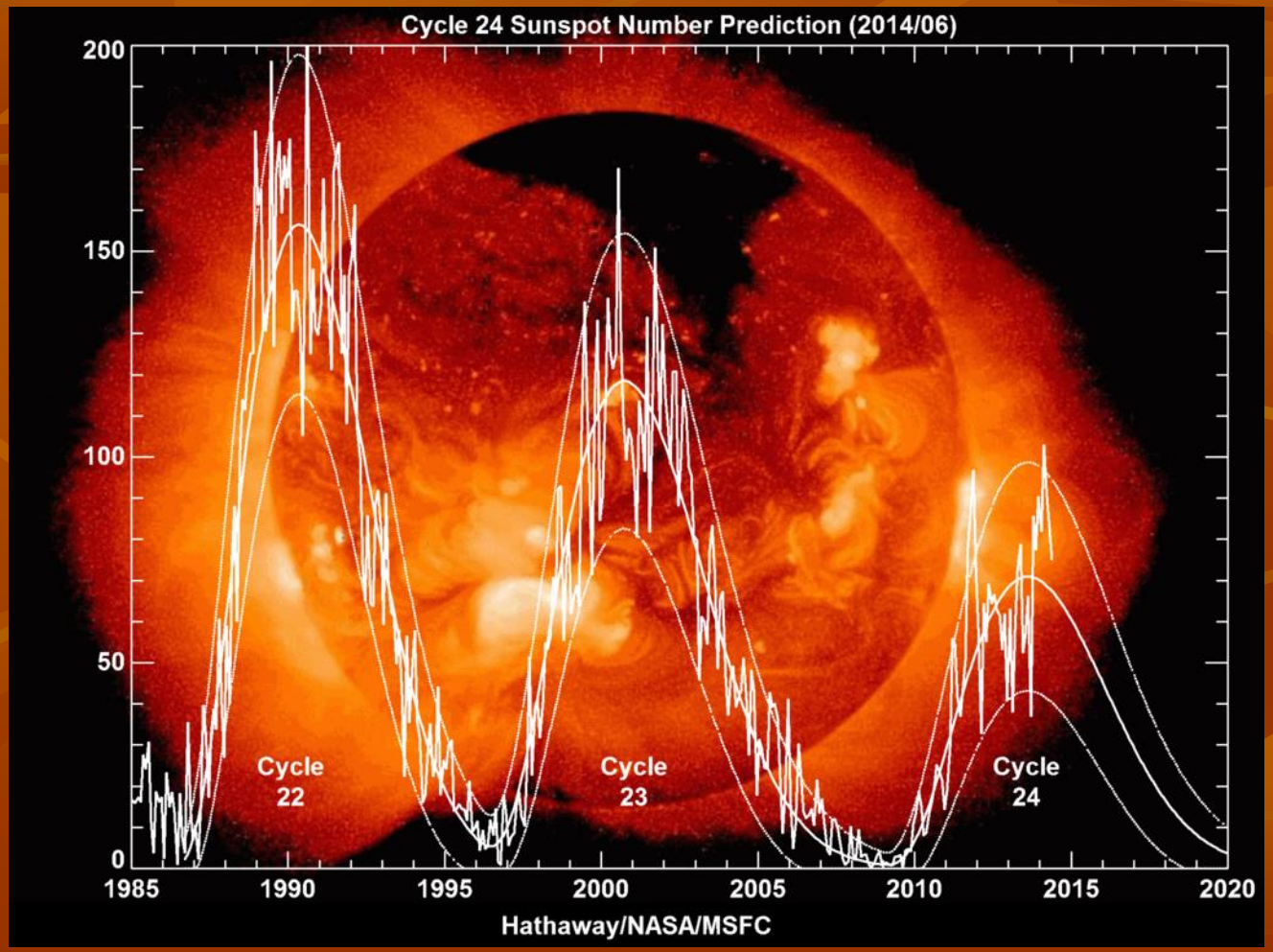


Мощные вспышки на Солнце порождают волны во внешних слоях и осцилляции.



Солнечный цикл

11-летний цикл солнечной активности



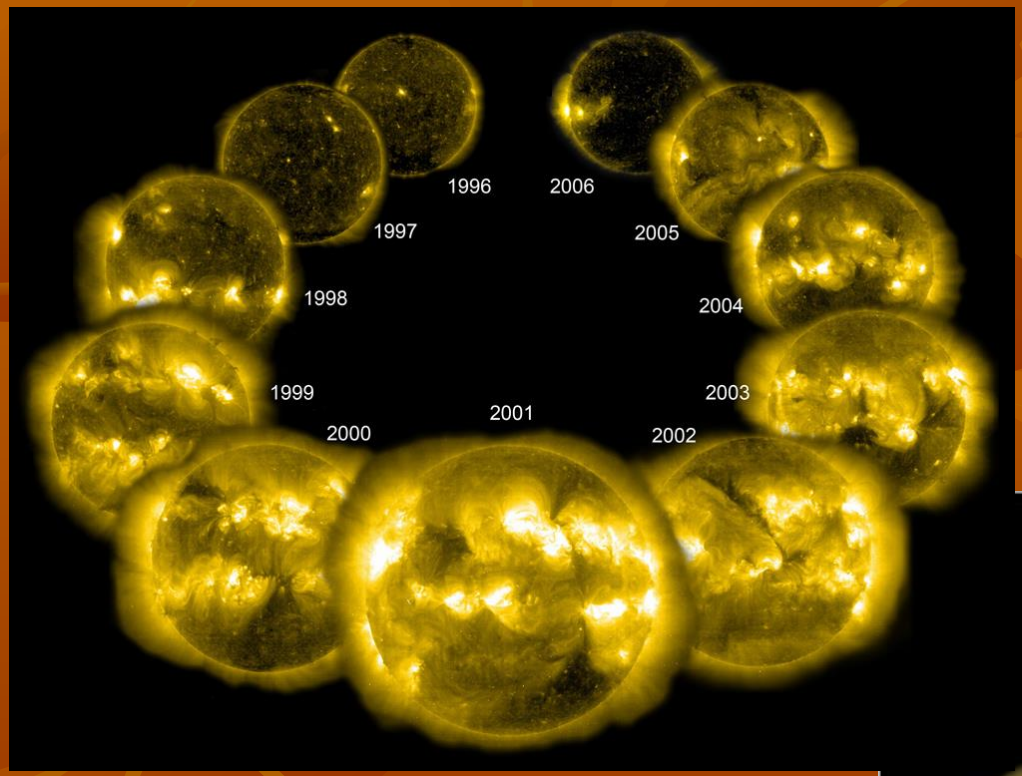
wikipedia.org

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

Открыт Швабе в 1843 г.

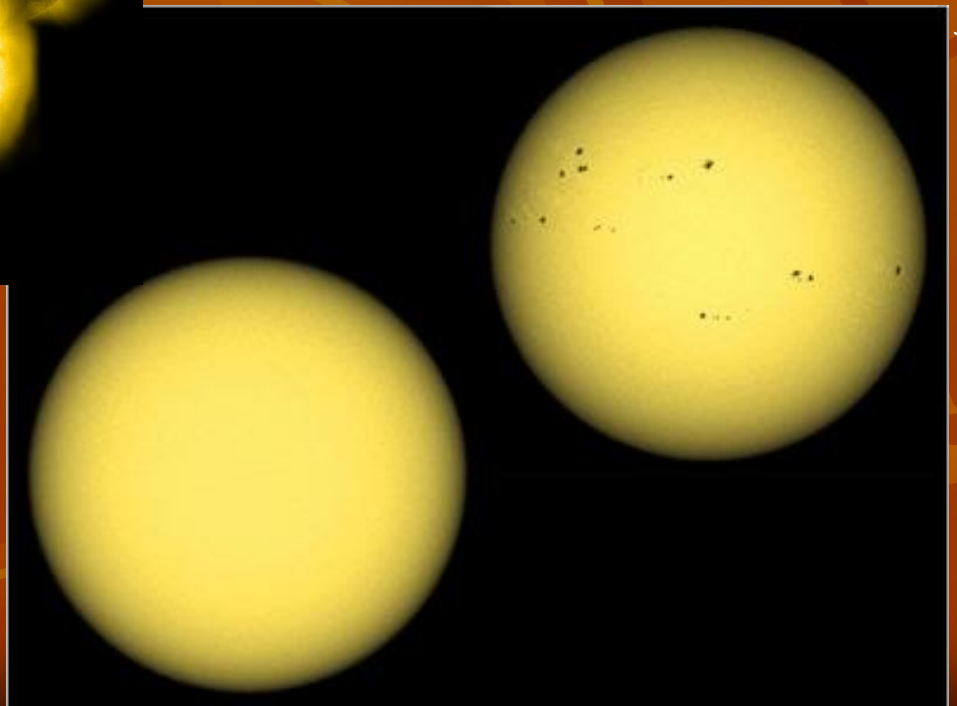
Солнечный цикл связан с поведением глобального магнитного поля Солнца.

Активность Солнца



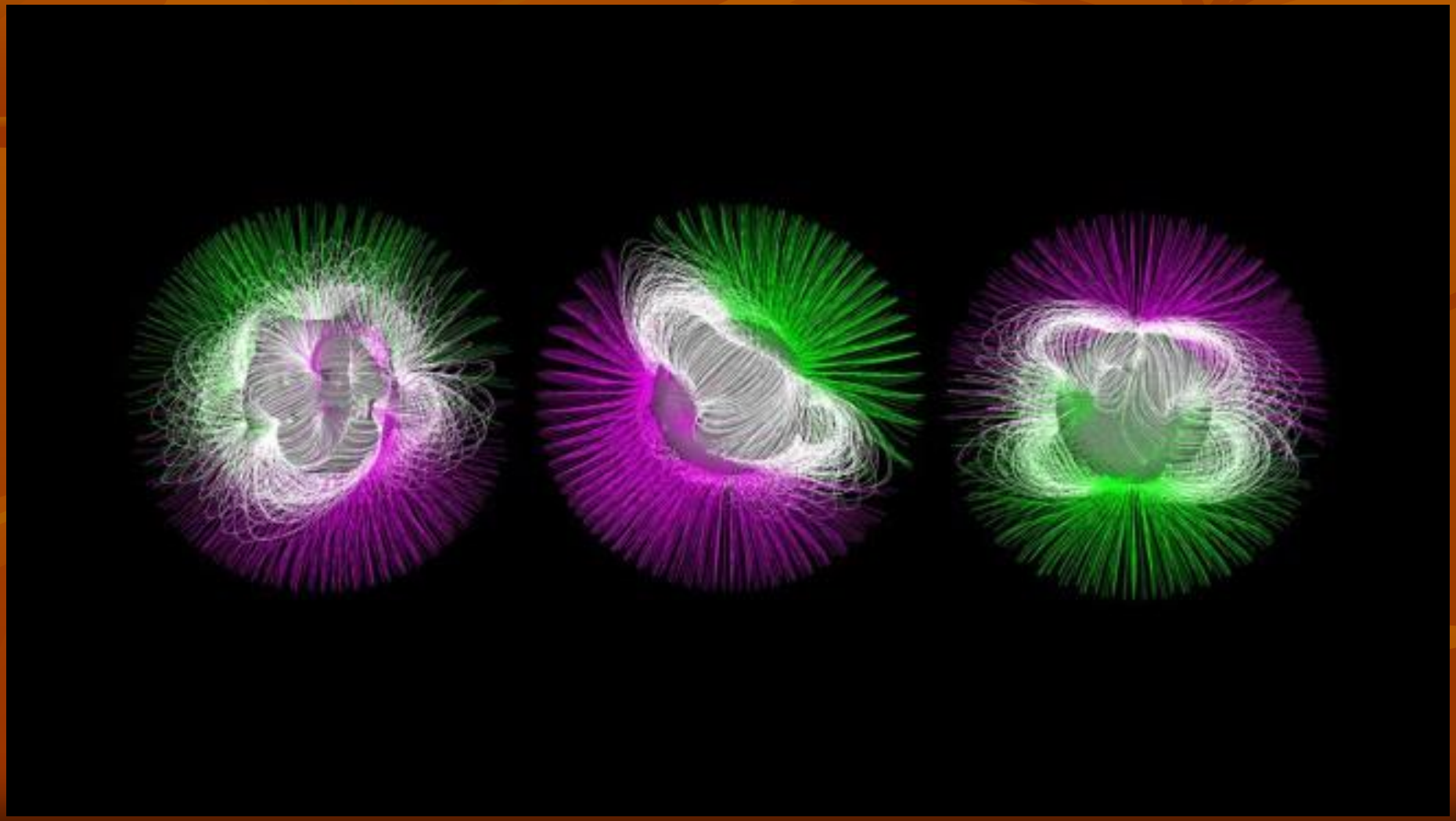
http://apod.nasa.gov/apod/ap071203.html

Изображения получены спутником SOHO в ультрафиолетовых лучах.



http://www.astronomynow.com/news/n1106/15solar/

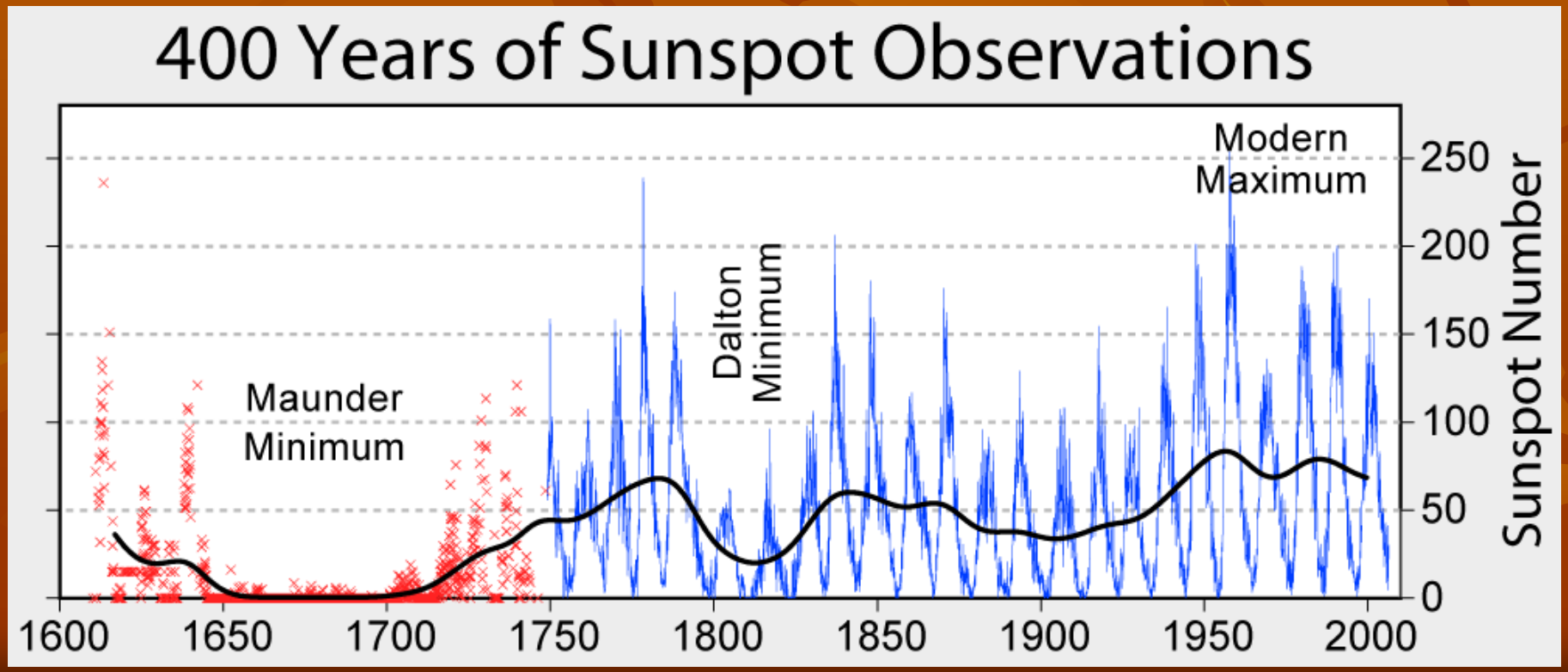
Переворачивание магнитного поля



http://www.thesuntoday.org/solar-facts/suns-magnetic-poles-flipped-solar-max-is-here/

Маундеровский минимум

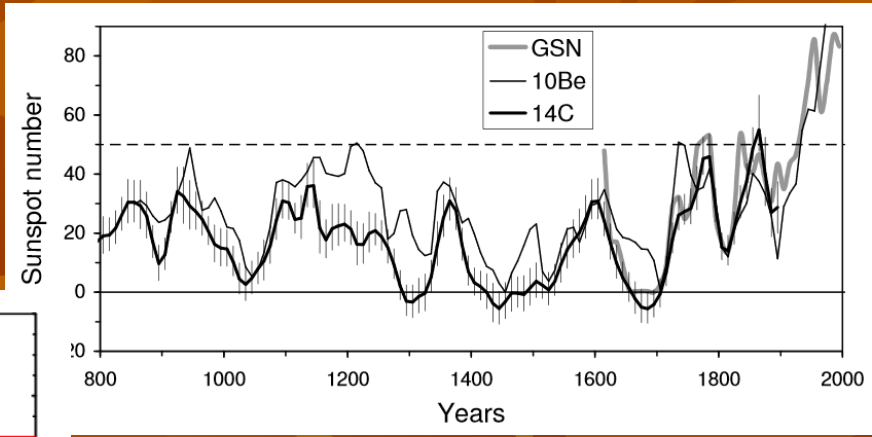
Иногда ровный ход 11-летний циклов нарушается. Наблюдалось несколько минимумов активности, самый заметный из которых – маундеровский.

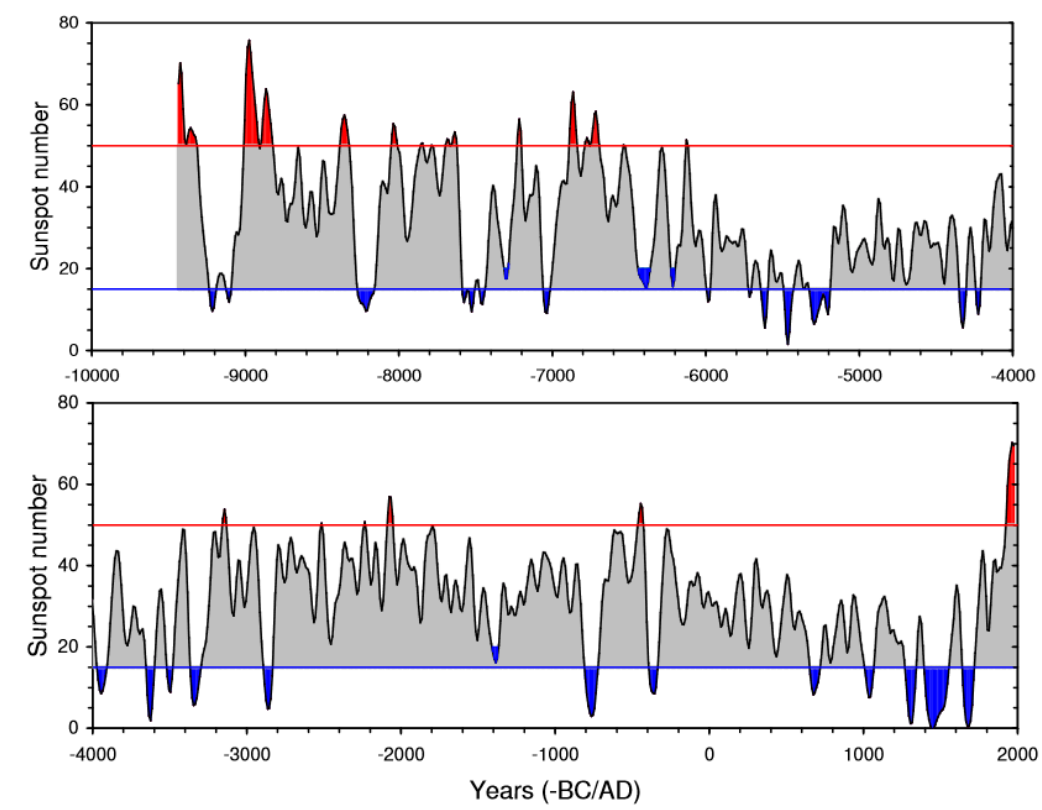


Wikipedia

Реконструкция на большом масштабе времени

Ученые пытаются восстановить солнечную активность на временах порядка тысяч лет.



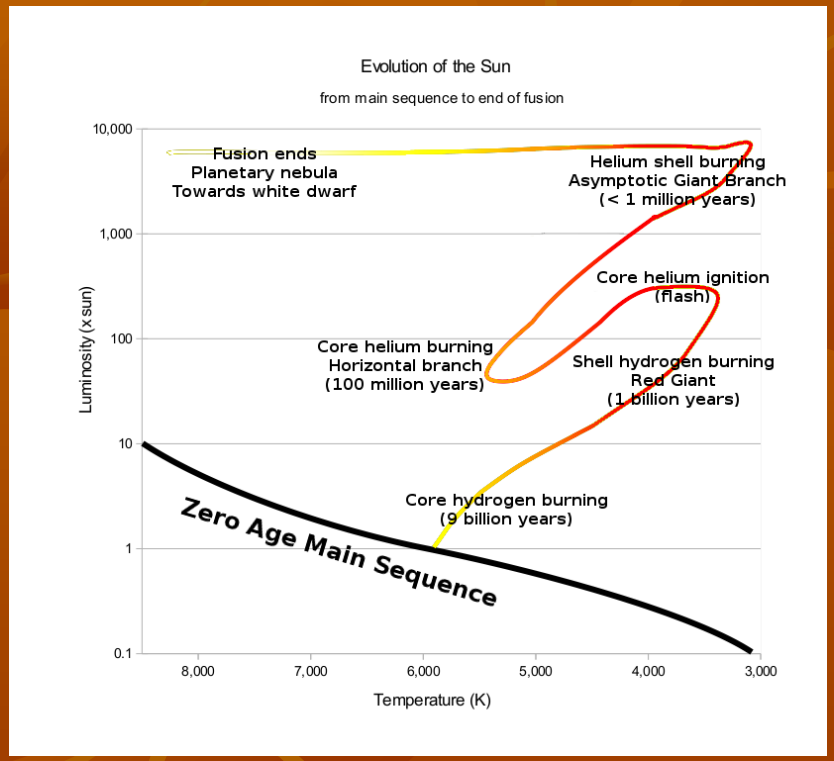


Используются данные по годичным кольцам деревьев и по ледяным кернам.

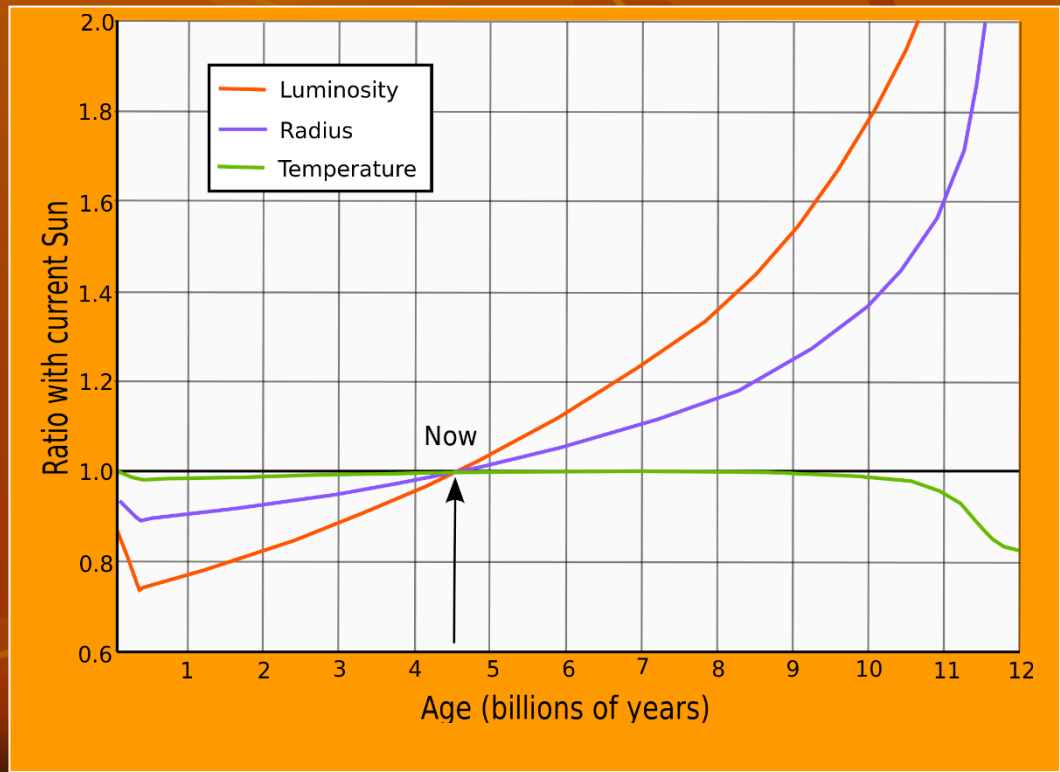
Содержание беррилия-10 и углерода-14.

0810.3972

Эволюция Солнца

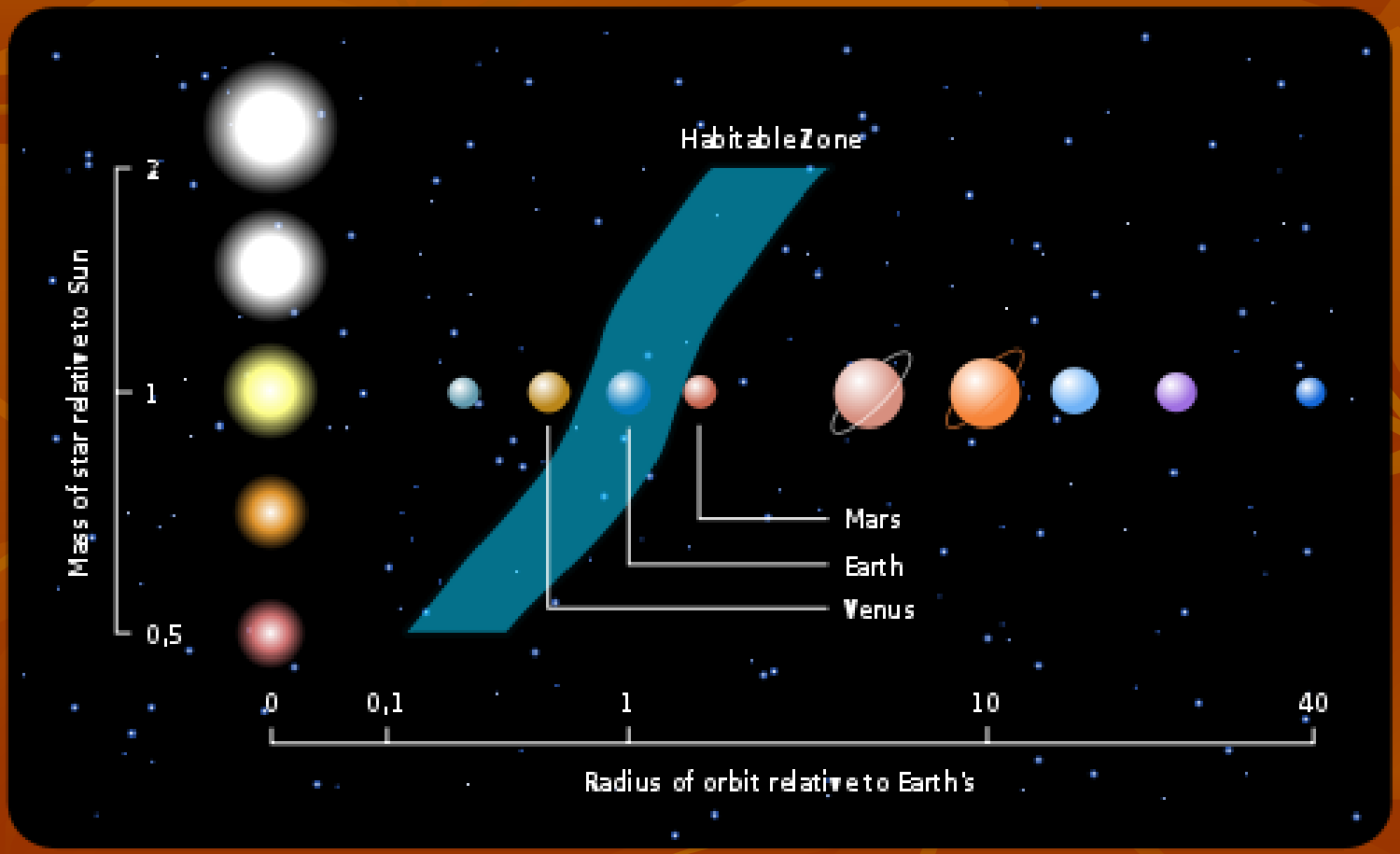


Сейчас Солнце пережигает водород в своих недрах, Очень медленно Солнце становится больше и ярче.



Зона обитаемости

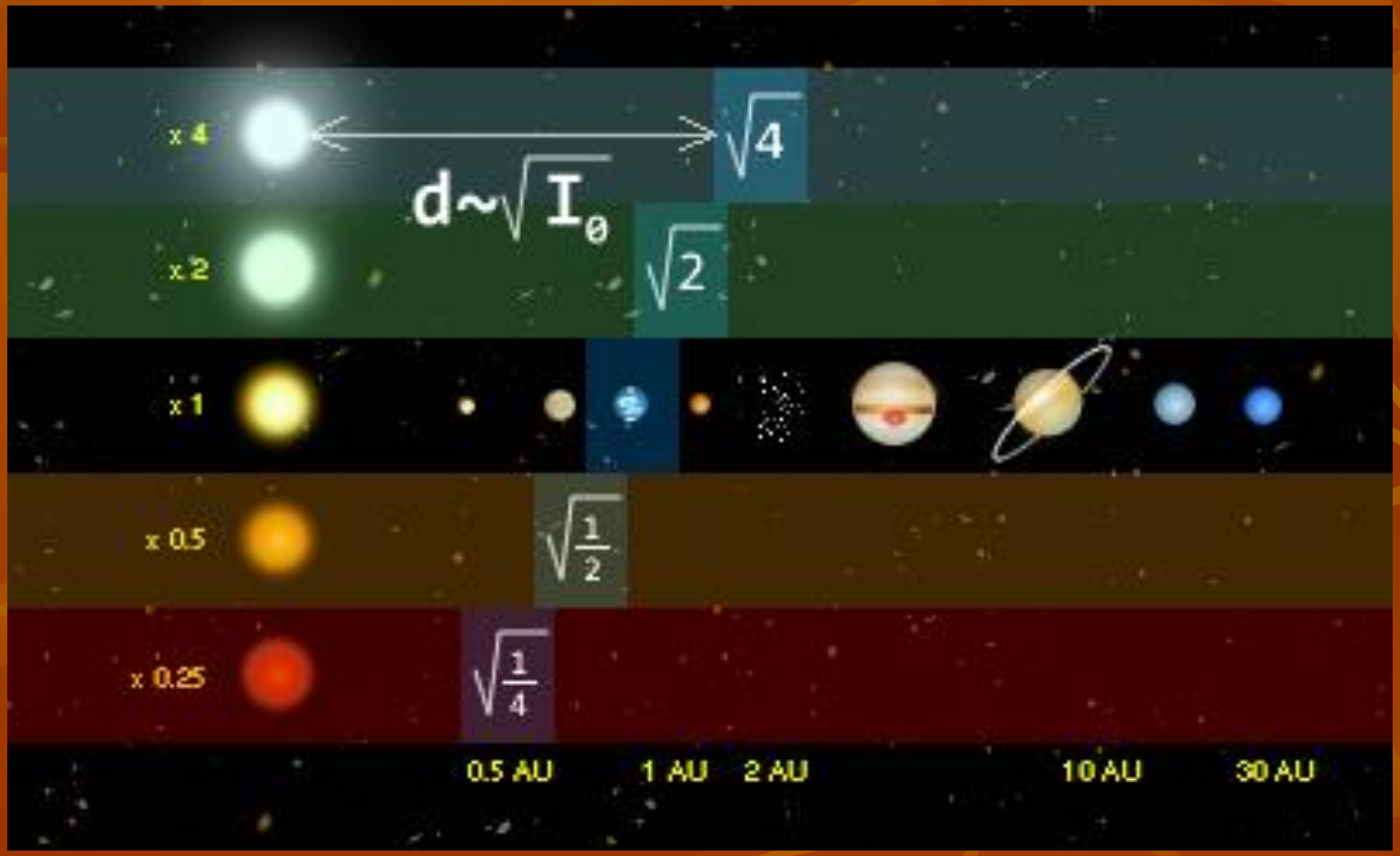
Возможность существования жидкой воды (не холодно, не жарко)



Обсуждение этой идеи началось в 1950-е гг.

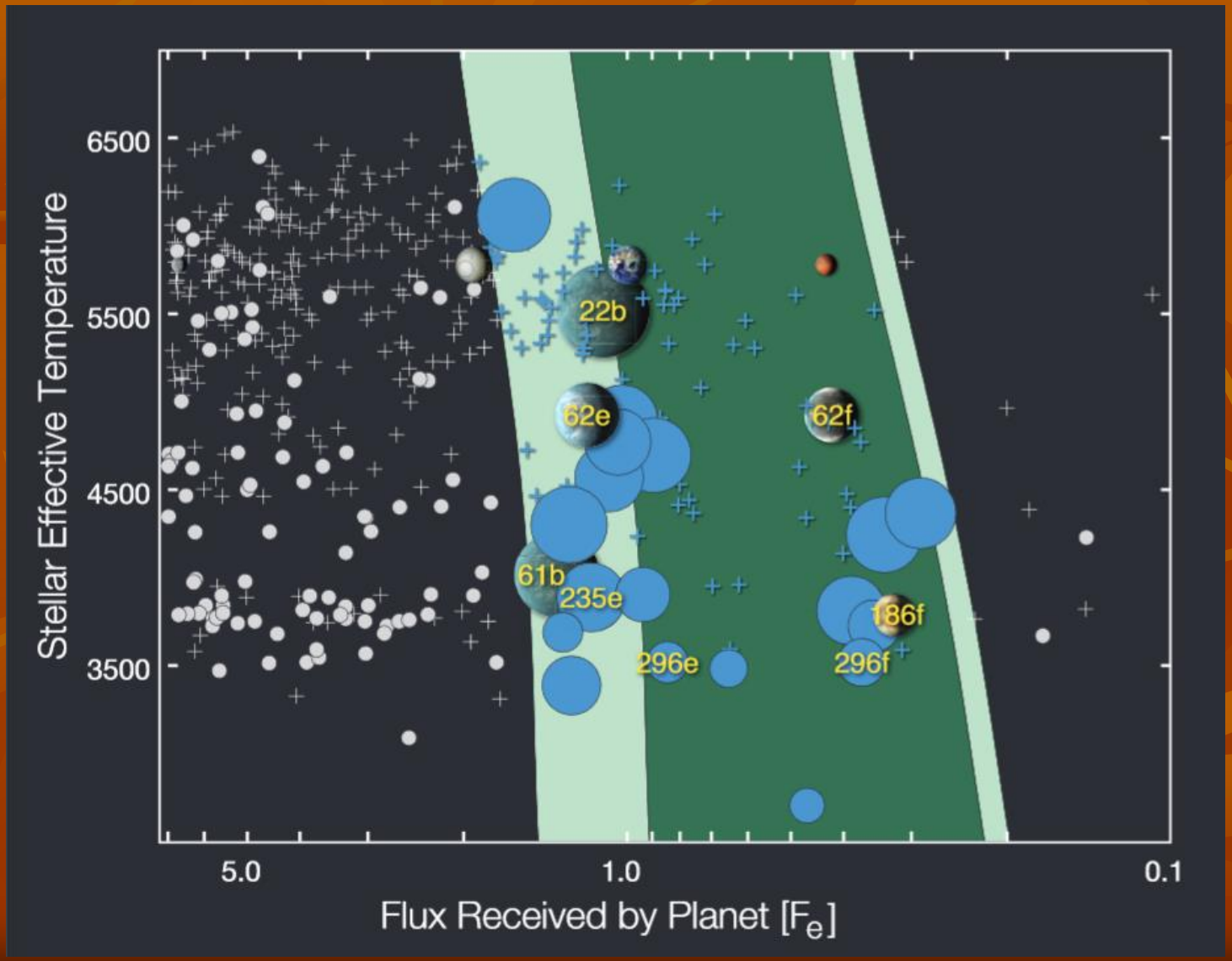
Зависимость от светимости

Параметры зоны обитаемости зависят от светимости звезды



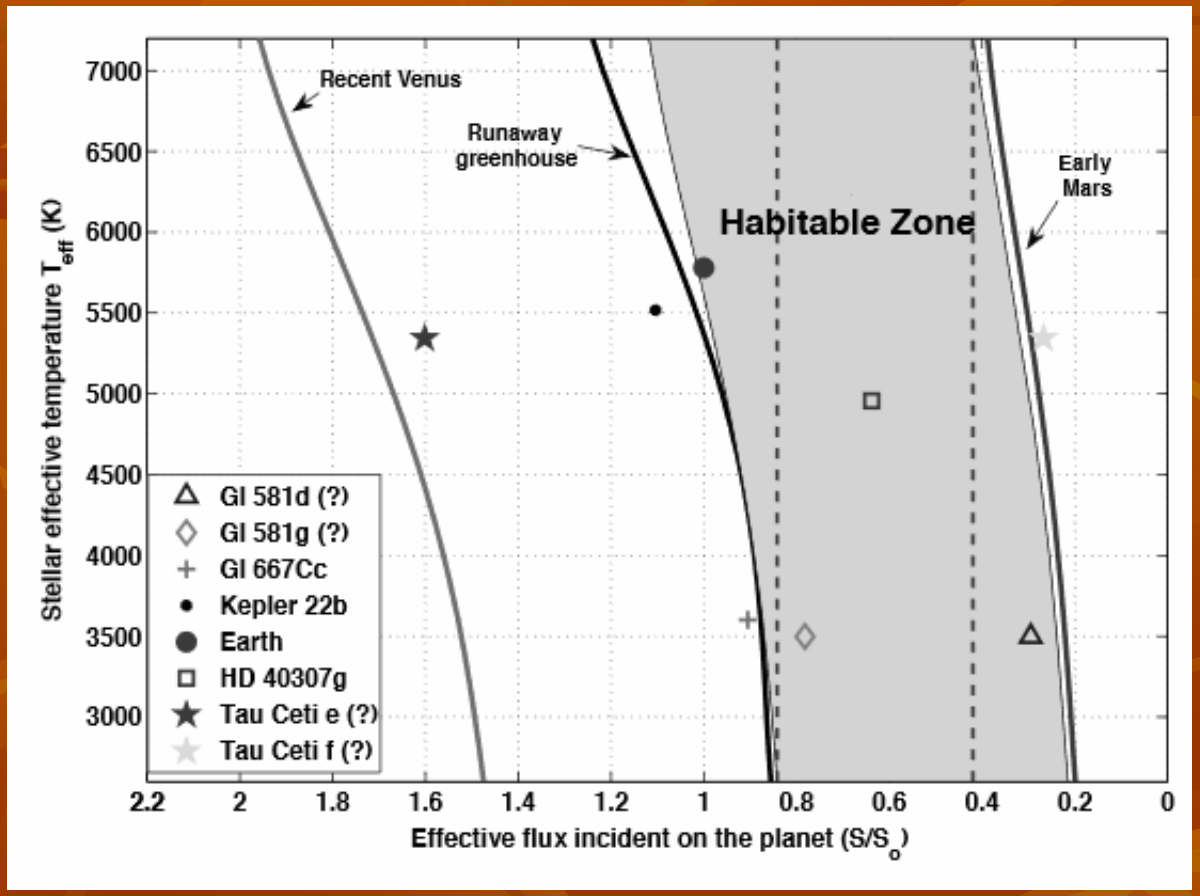
$$F = \left({}^{R_*}/_{R_\odot}\right)^2 \left({}^{T_*}/_{T_\odot}\right)^4 \left({}^{a_\oplus}/_{a_p}\right)^2$$

1409.1904



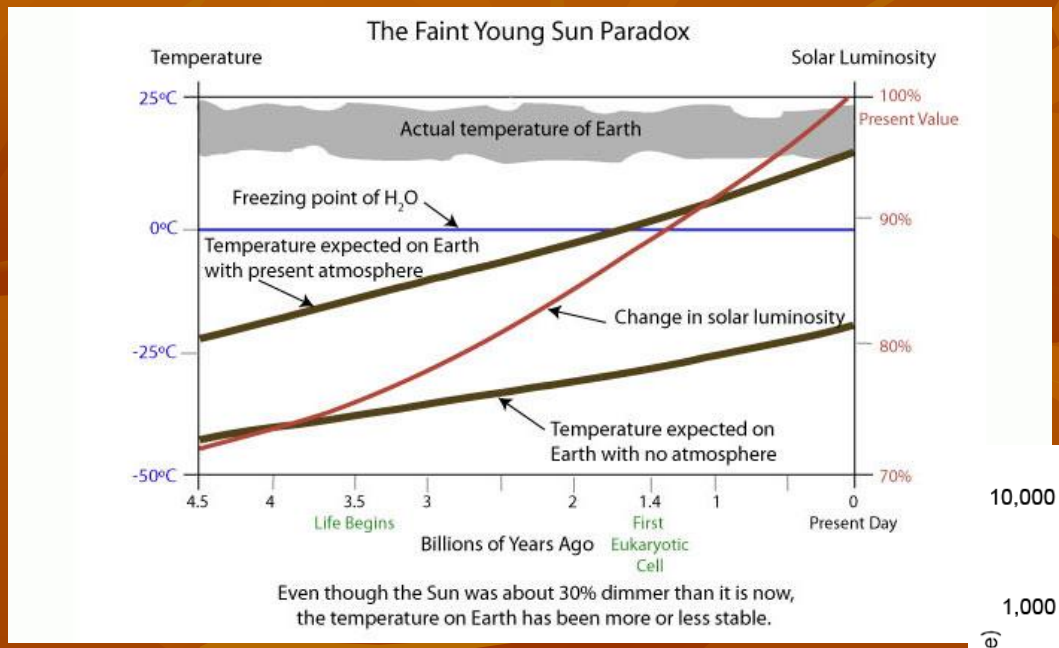
Детальные расчеты

1407.8174

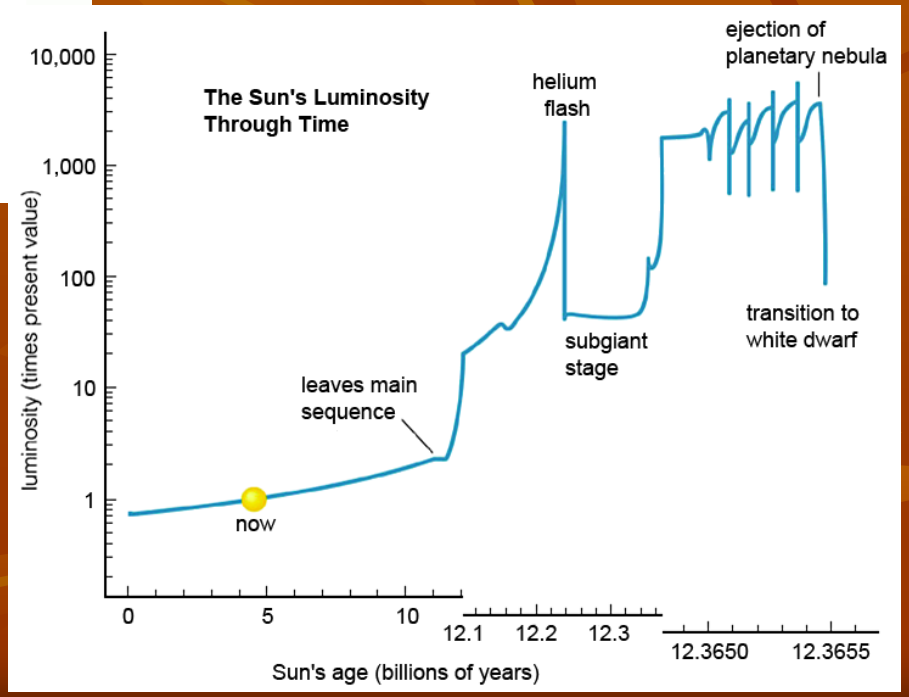


Существуют разные расчеты размера зон обитаемости, т.к. в основном они завязаны на климат (парниковый эффект), а не просто на равновесную температуру.

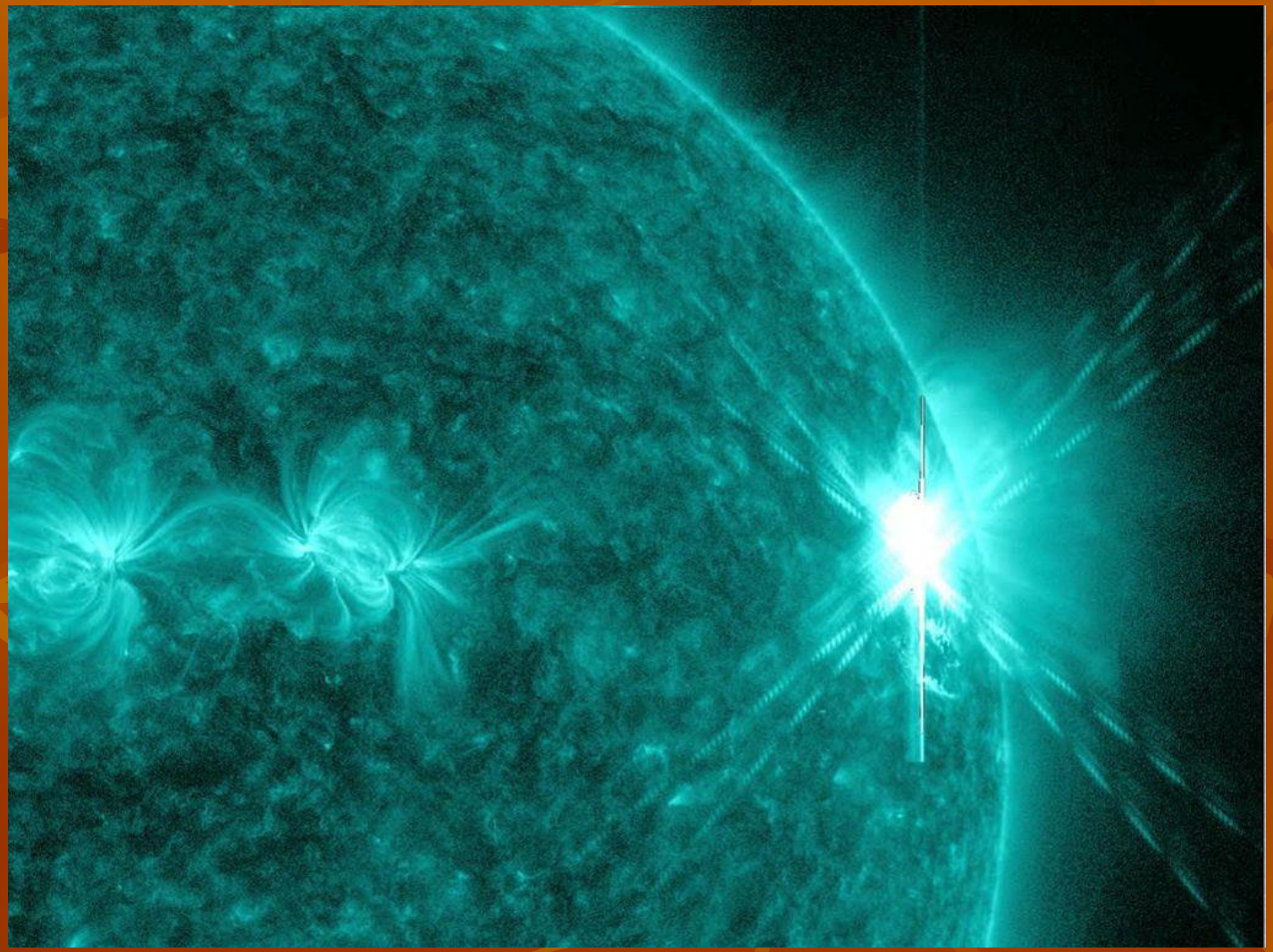
Парадокс тусклого Солнца



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

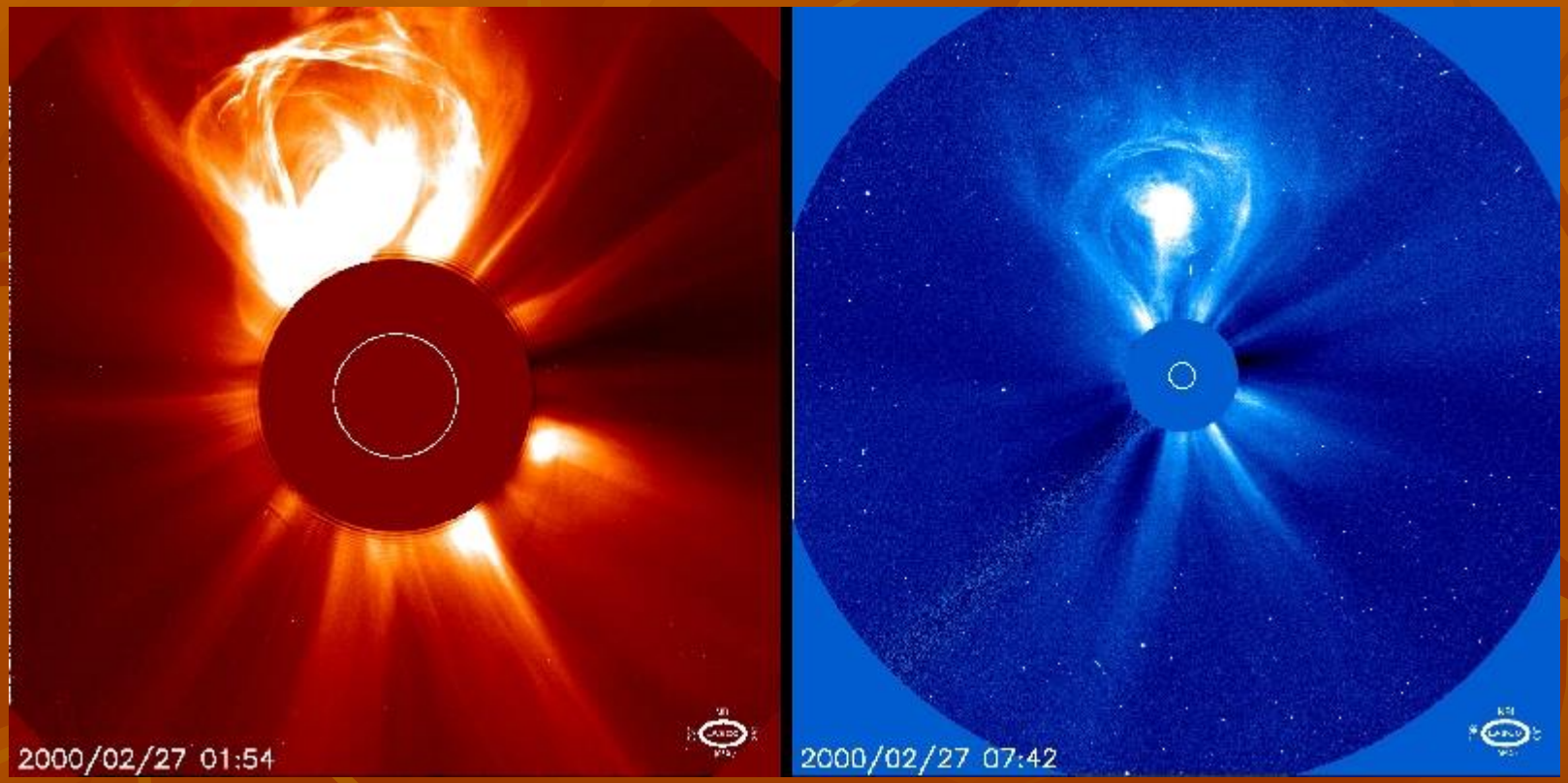


Вспышки на Солнце



Ультрафиолетовое изображение, SDO, NASA

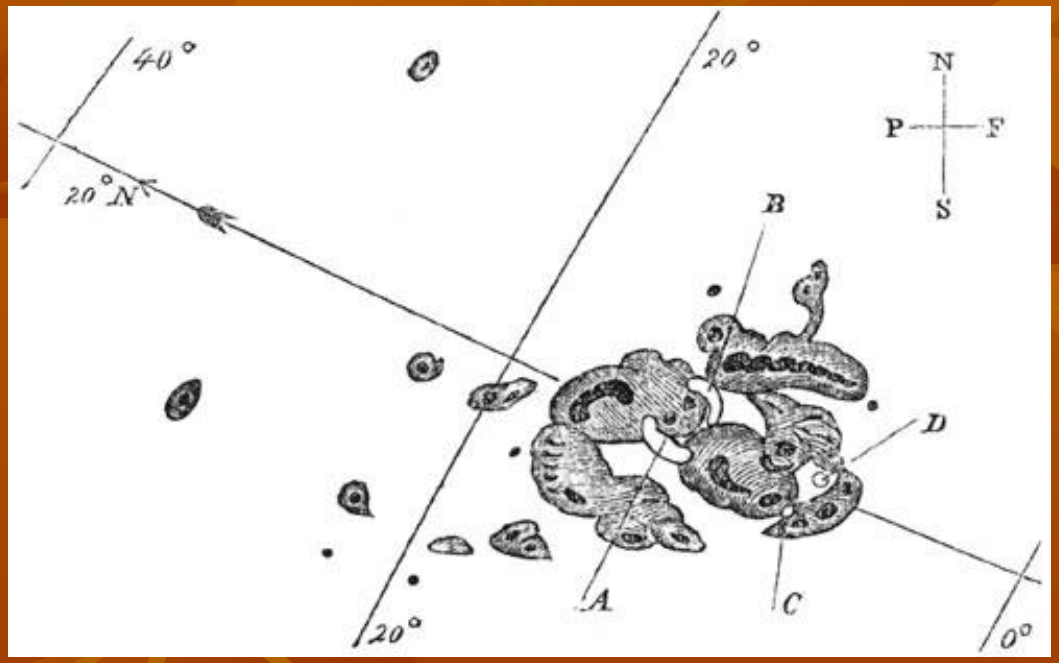
Корональные выбросы



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.



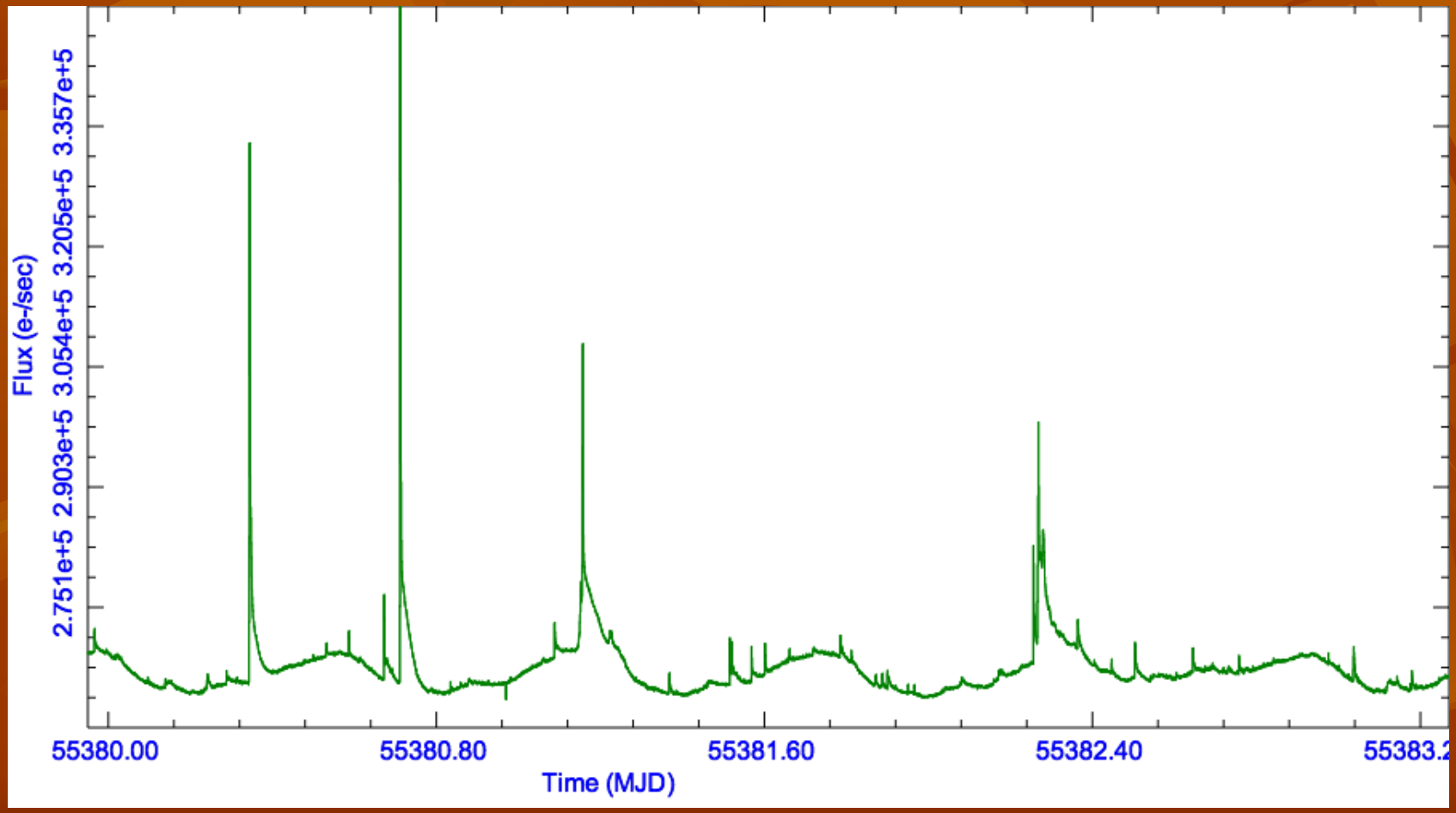
Визуальные наблюдения вспышки астрономами-любителями, плюс данные по геомагинтному шторму.

«Встали» телеграфные линии.

Мощнейшие полярные сияния.

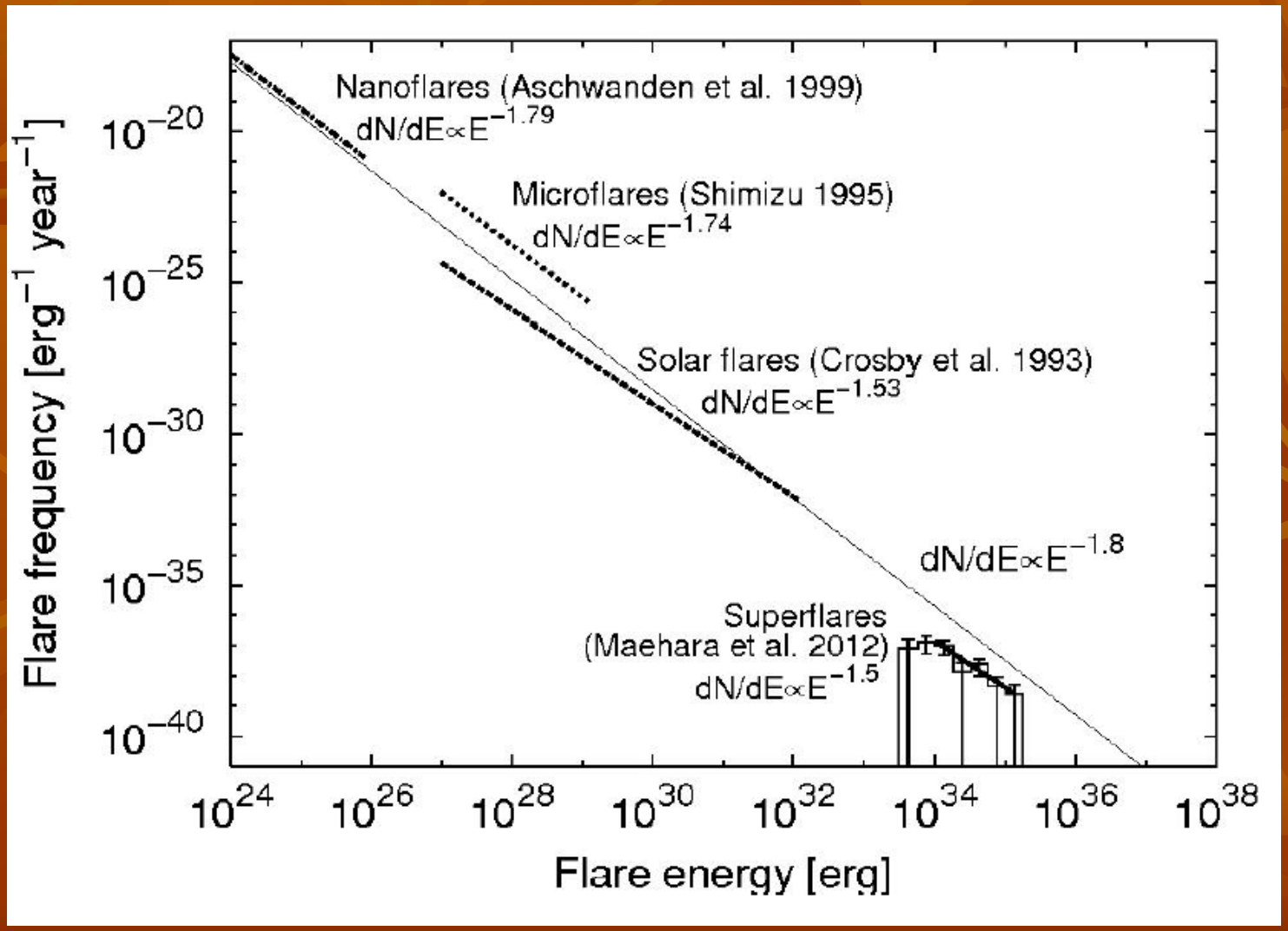
Гигантские вспышки

Вспышки происходят и на других звездах.
Как правило, чем легче звезда – тем она активнее.



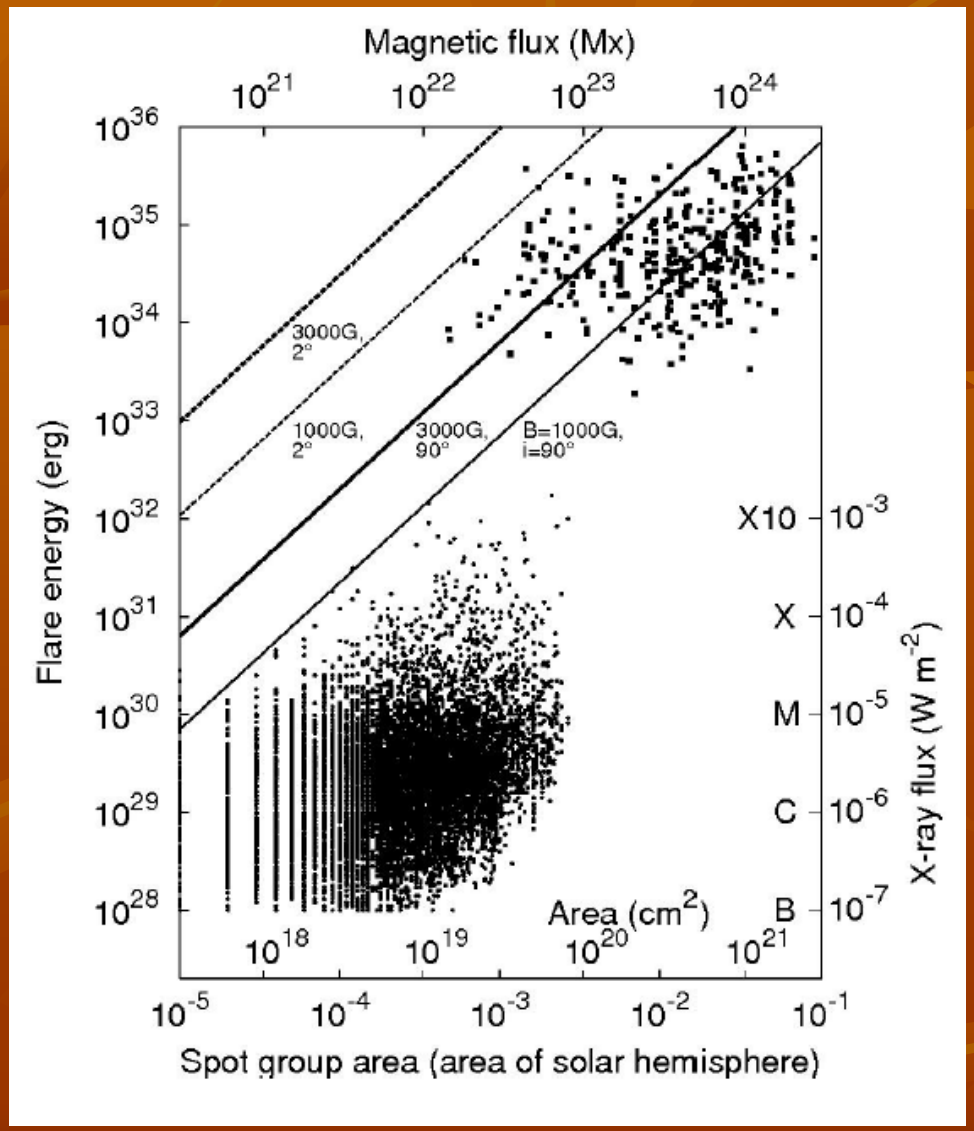
Данные спутника «Кеплер»

Частота вспышек



1212.1361

Вспышки и пятна

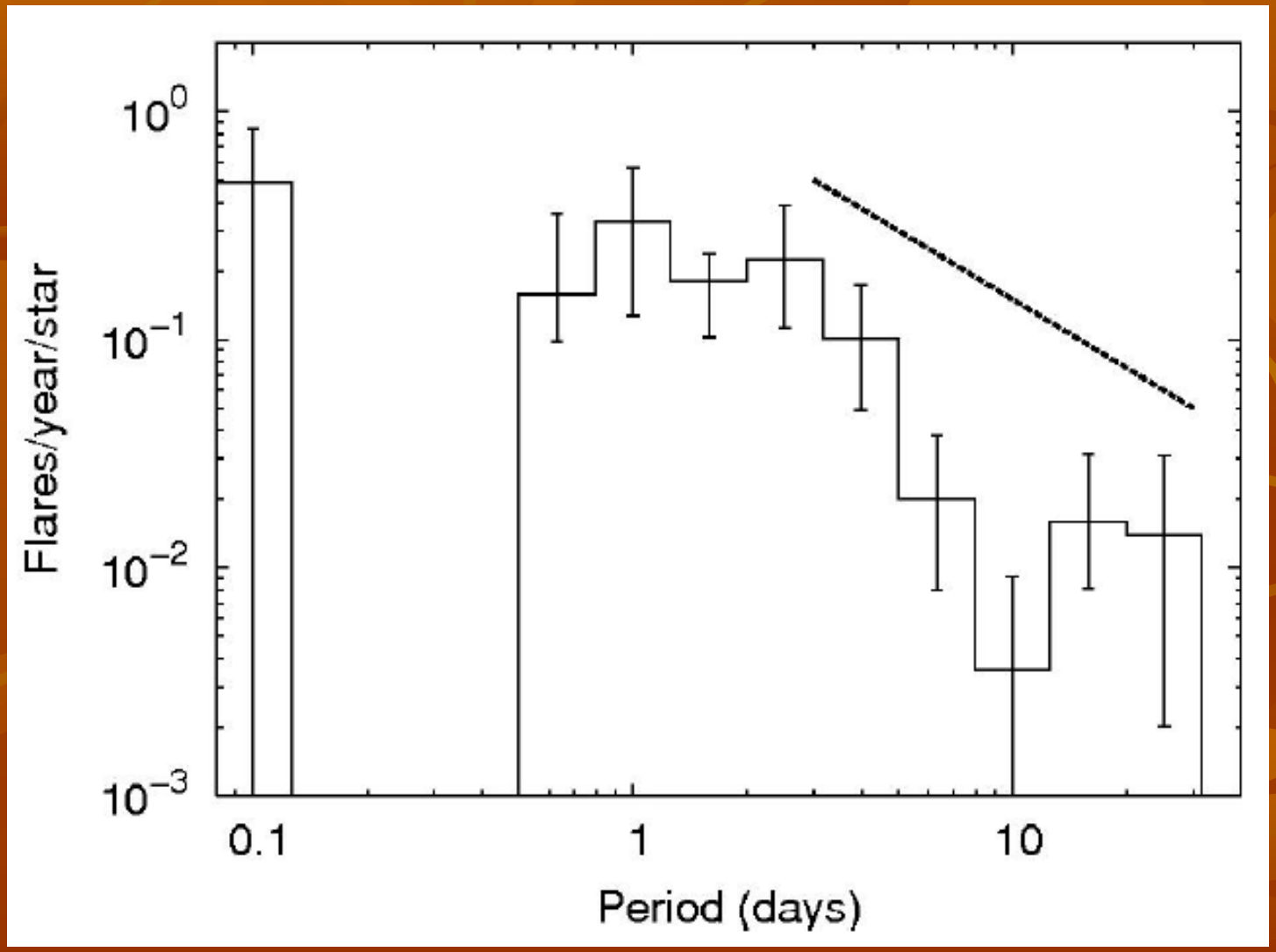


Верхняя группа – вспышки на звездах.
Нижняя – на Солнце.

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.

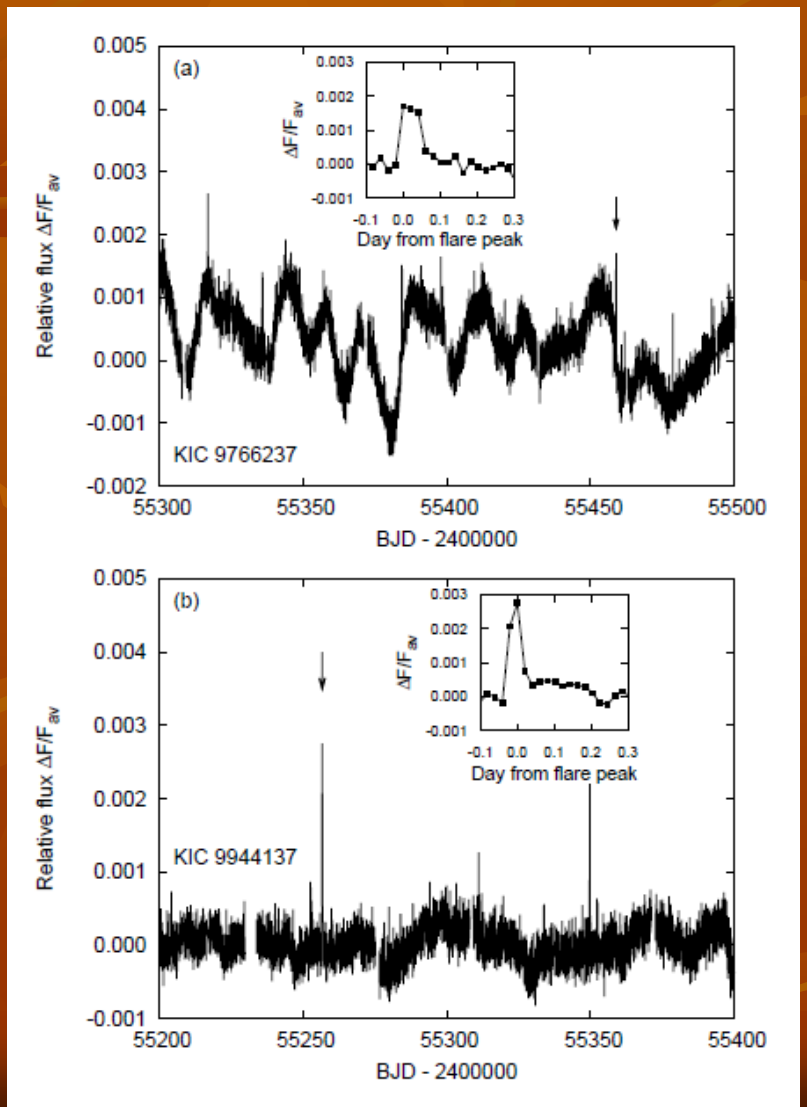
1212.1361

Вращение и вспышки



1212.1361

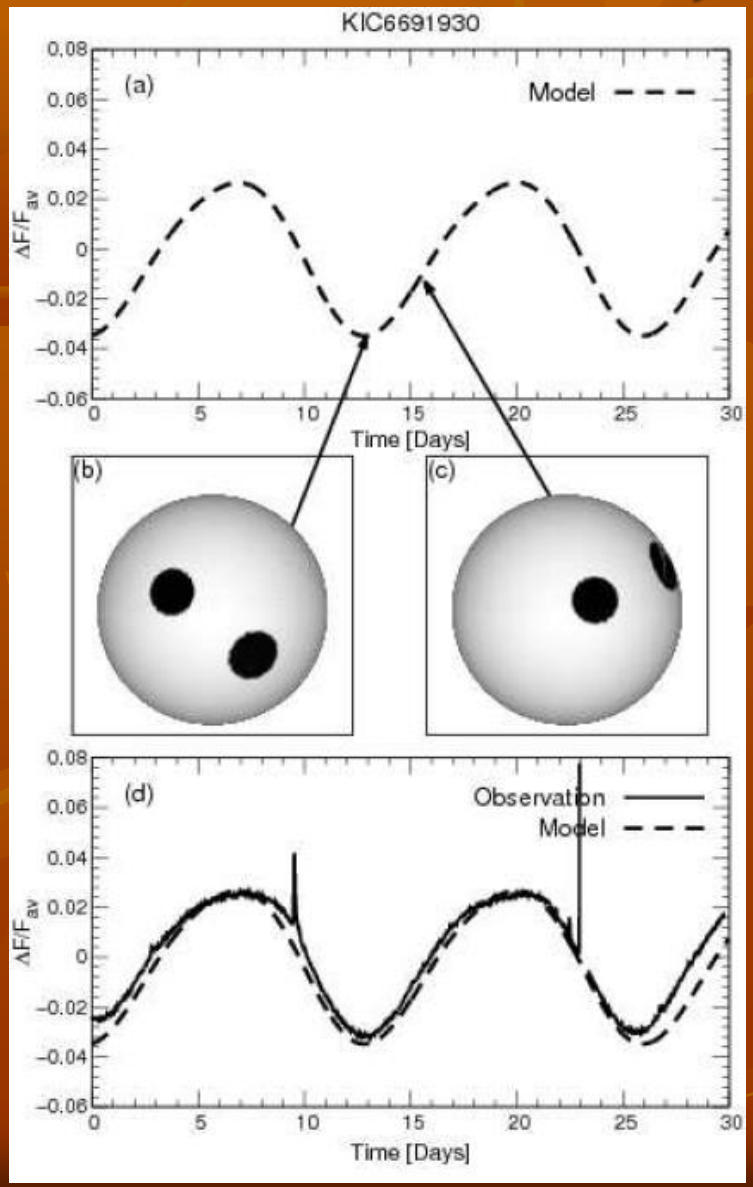
Вспышки на звездах с вращением, как у Солнца



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

1402.3772

Вспышки, пятна, вращение



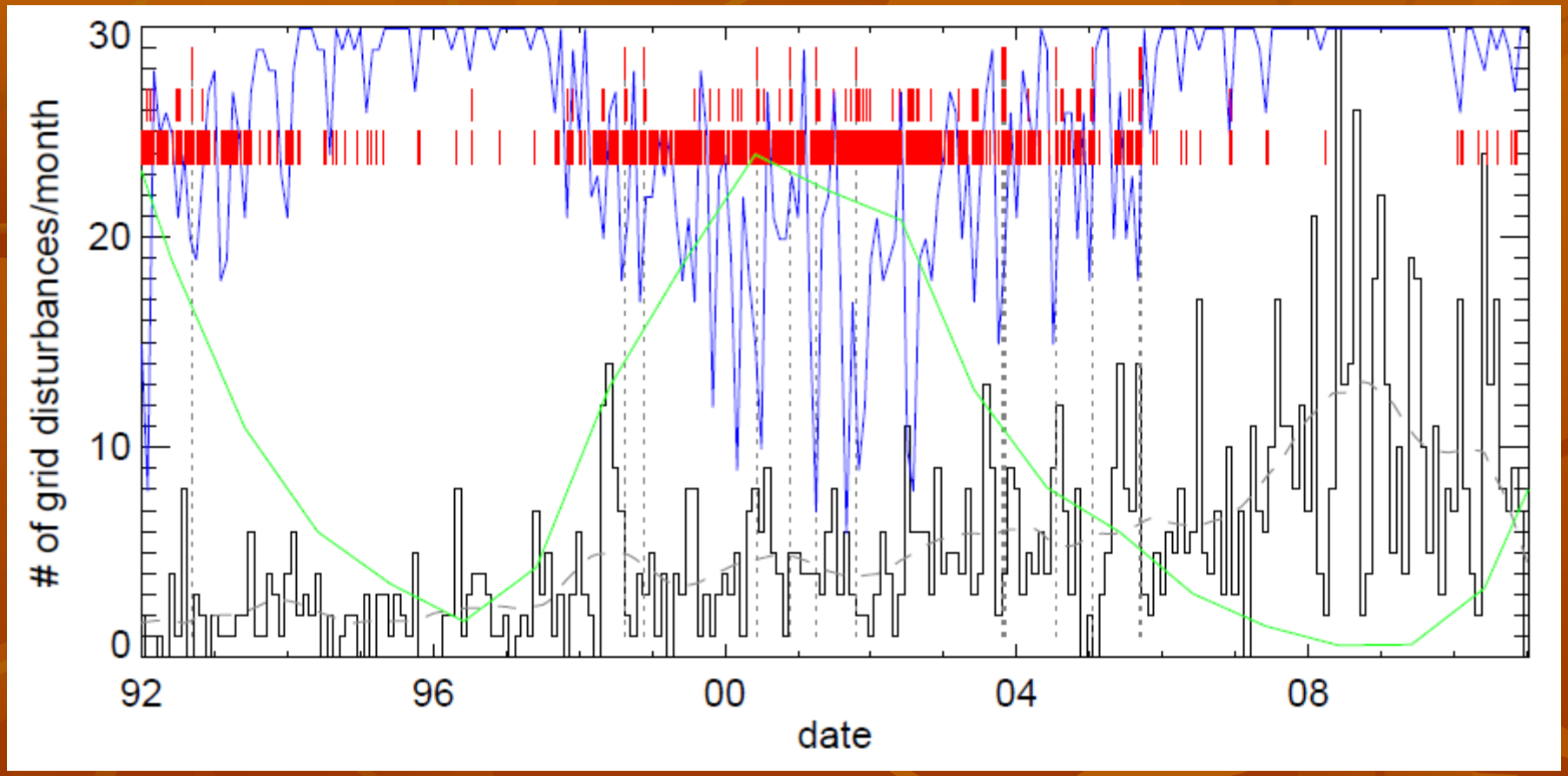
Данные по вспышкам на звездах позволяют строить модели.

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.

1304.7361

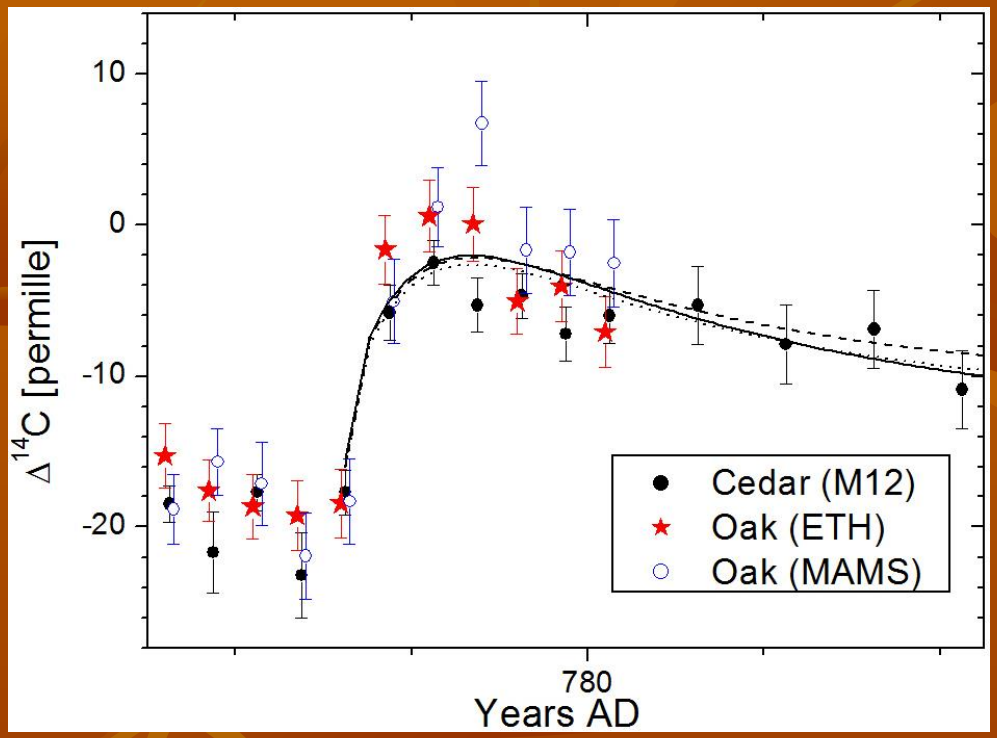
Воздействие на технику



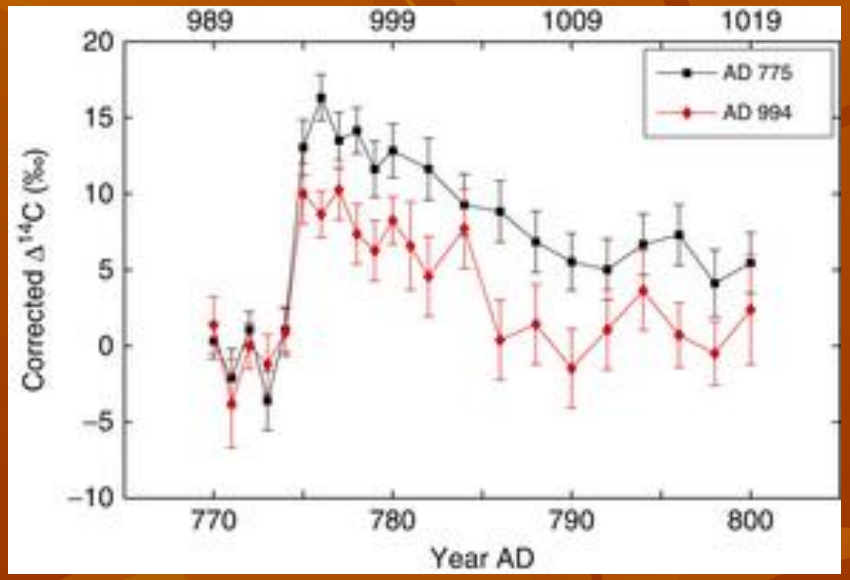
1304.5489

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

Вспышка в 8 веке?



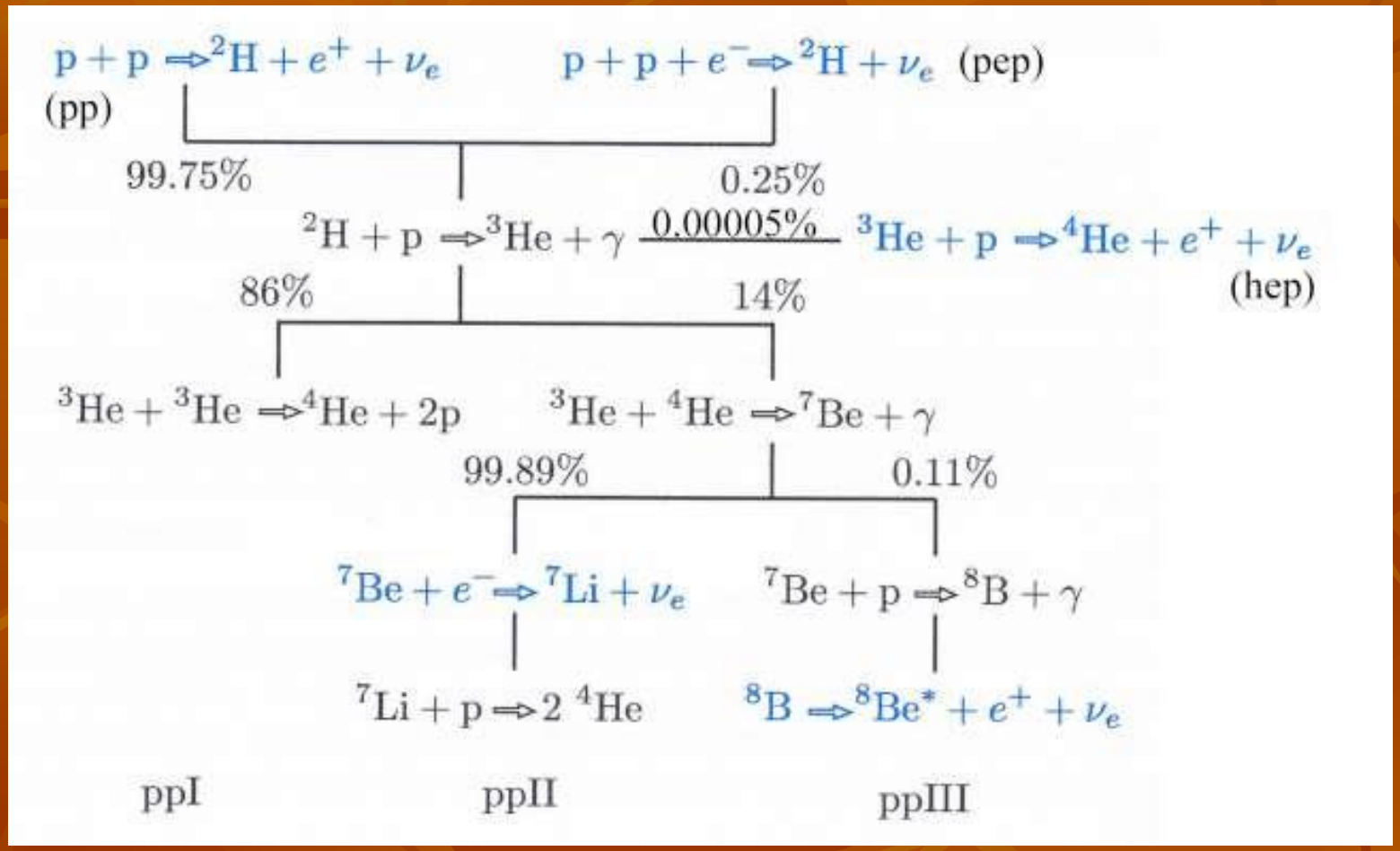
Анализ содержаний углерода-14 показывает, что в 774-775 гг. Была аномалия, которую можно связать с мощной солнечной вспышкой.



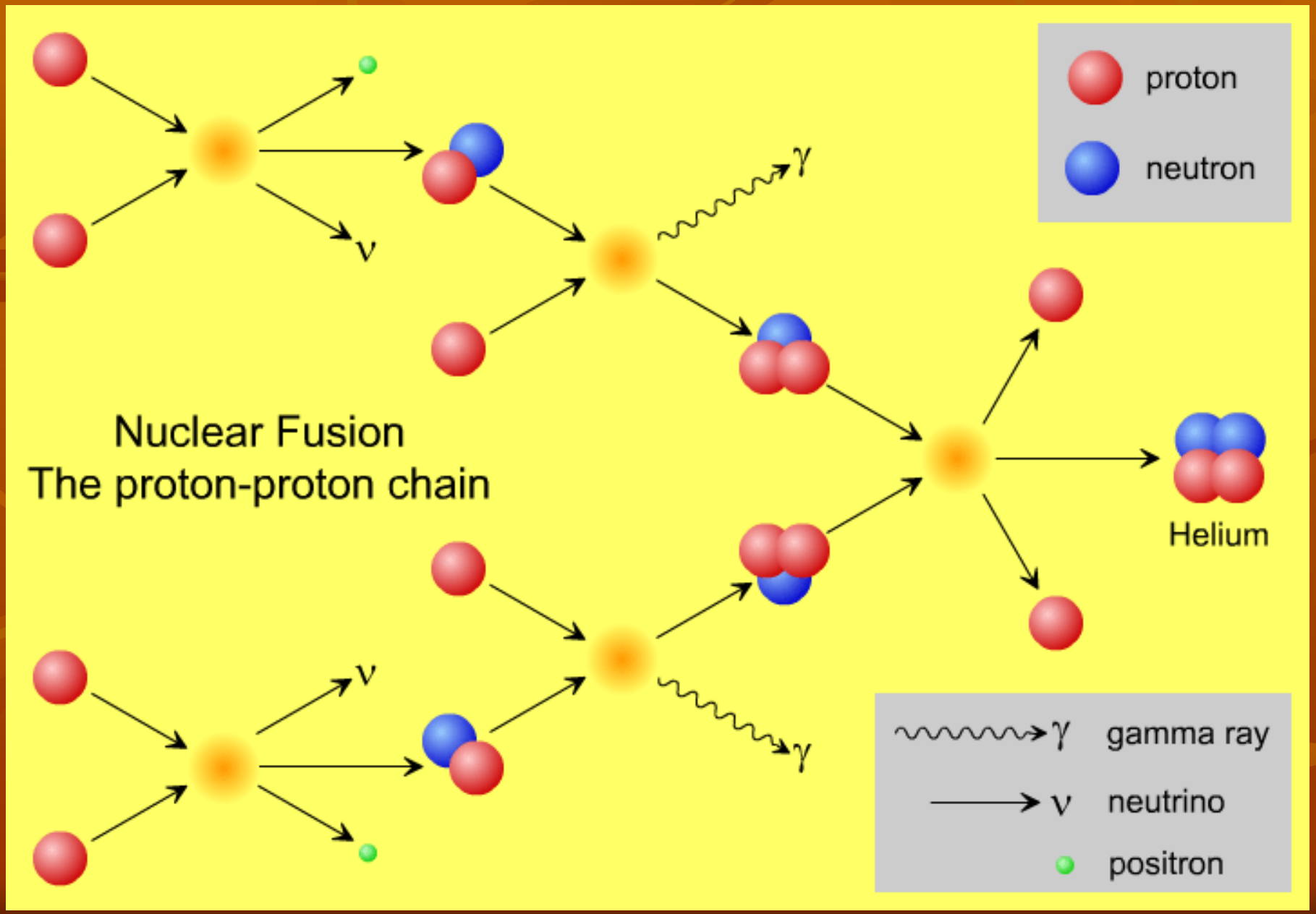
О механизме проивзодства 14C и его связи с солнечными вспышками см. 1408.2934 и http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon-14

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

Солнечные нейтрино

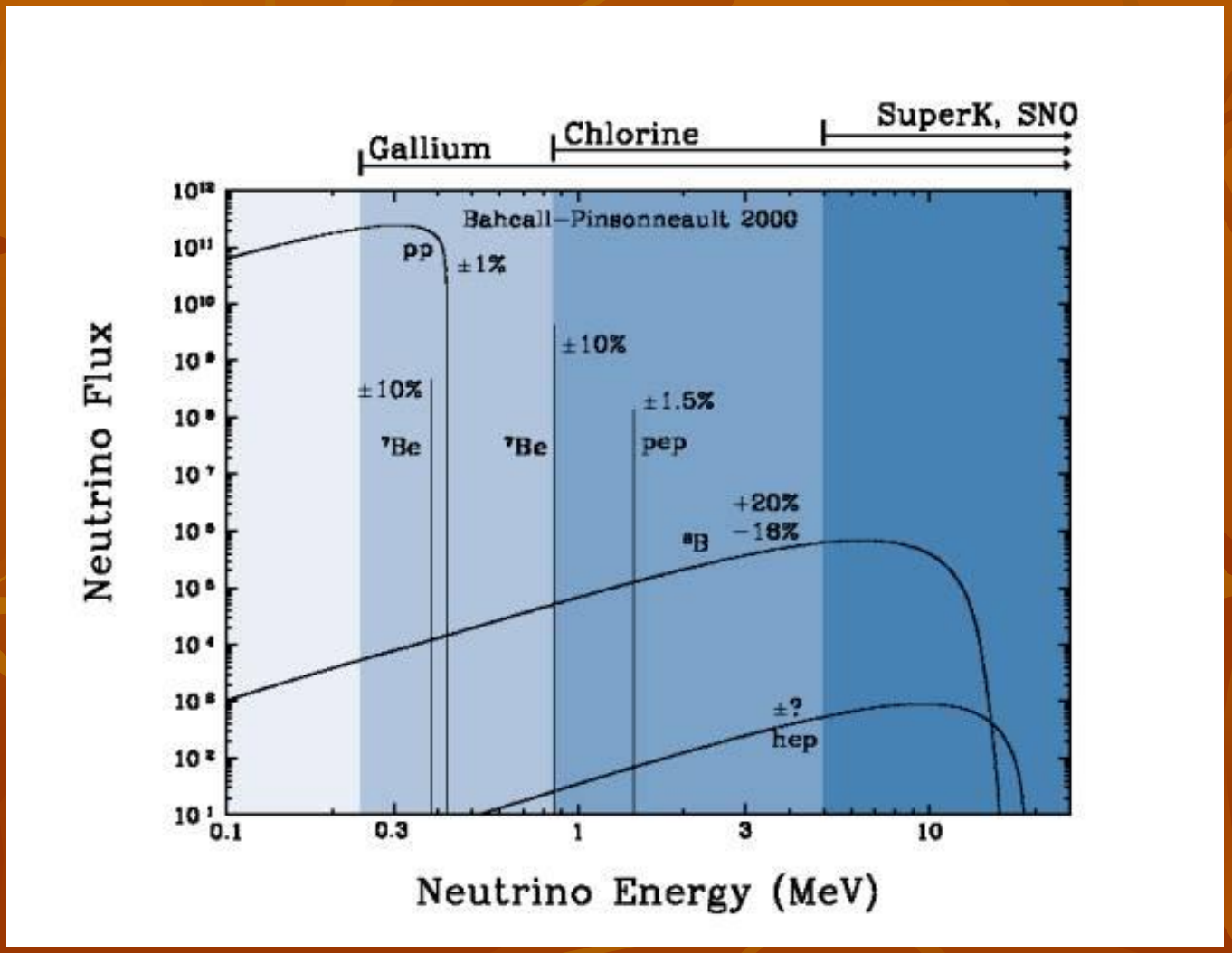


В ряде термоядерных реакций часть энергии уносится нейтрино.
Важно, что эти частицы свободно покидают Солнце.
Т.е., они несут информацию об условиях в солнечных недрах «сейчас».



http://www.windows2universe.org/sun/Solar_interior/solar_furnace.html

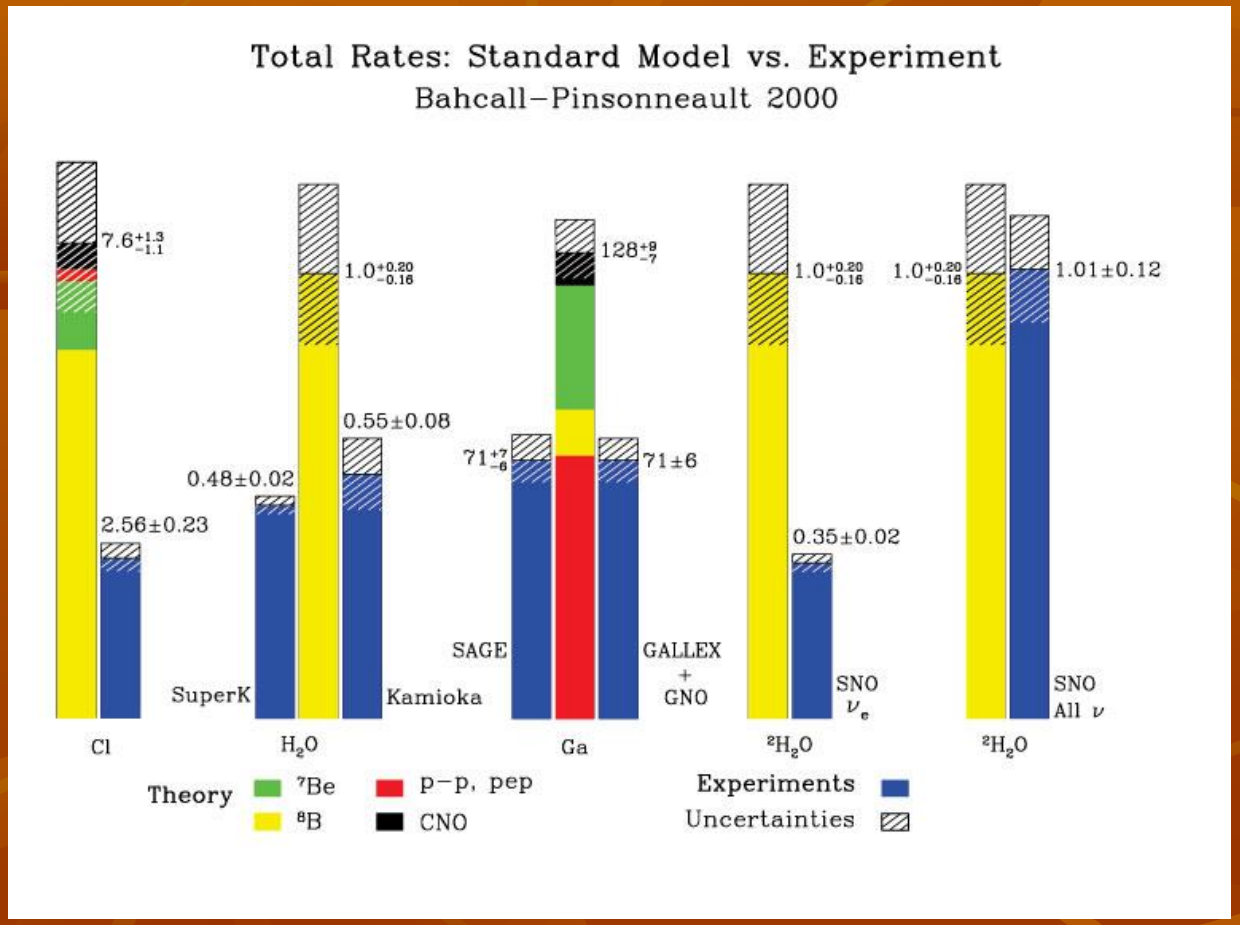
Регистрация нейтрино



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

Проблема солнечных нейтрино

http://www.tim-thompson.com/fusion.html



В течение ряда лет эксперименты показывали дефицит нейтрино.

Решение проблемы оказалось связано с нейтринными осцилляциями.

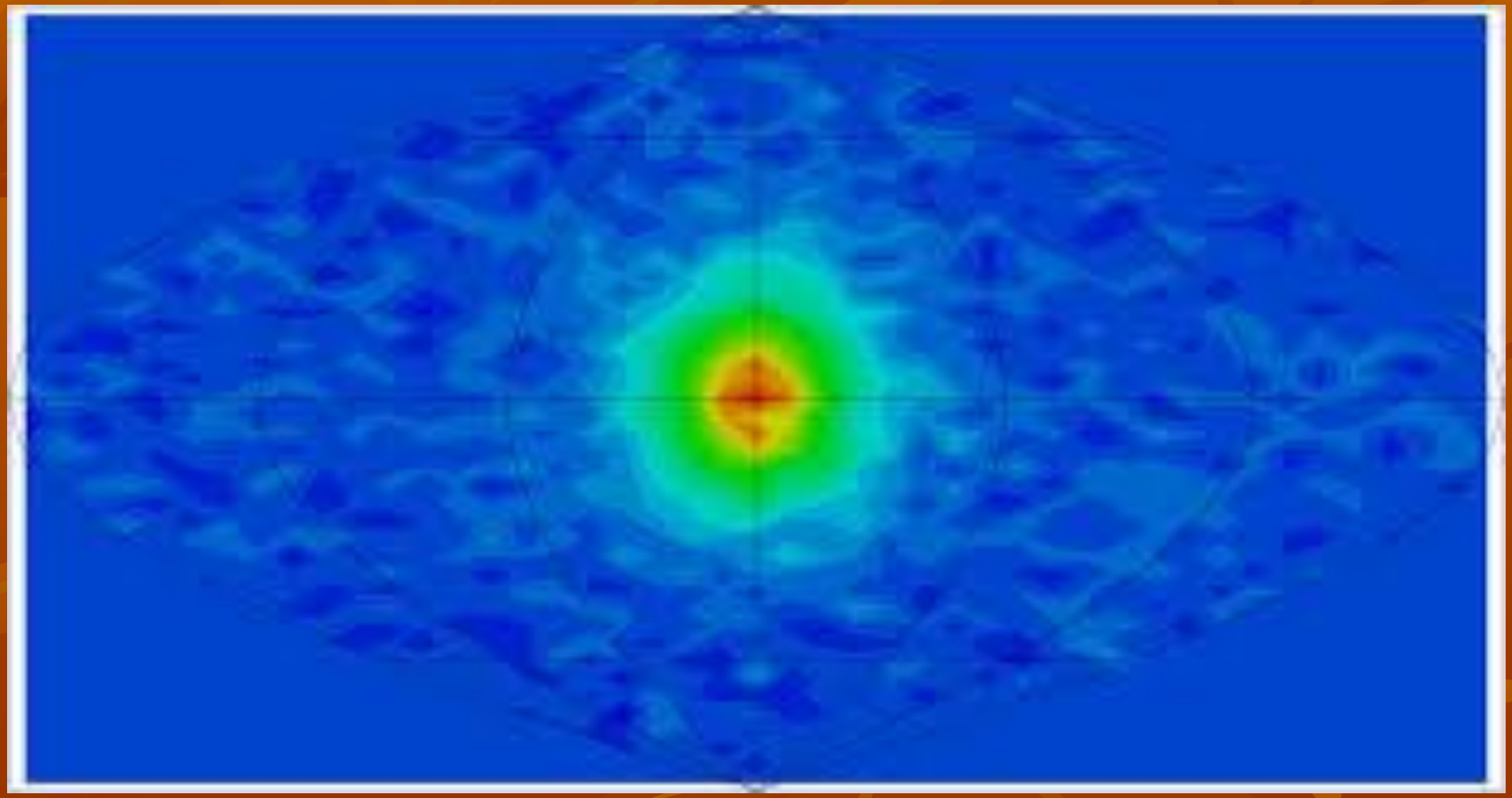
На пути к нам нейтрино разных типов могут превращаться друг в друга.

Это означает, что нейтрино имеют массу.

Нобелевская премия 2015 года!

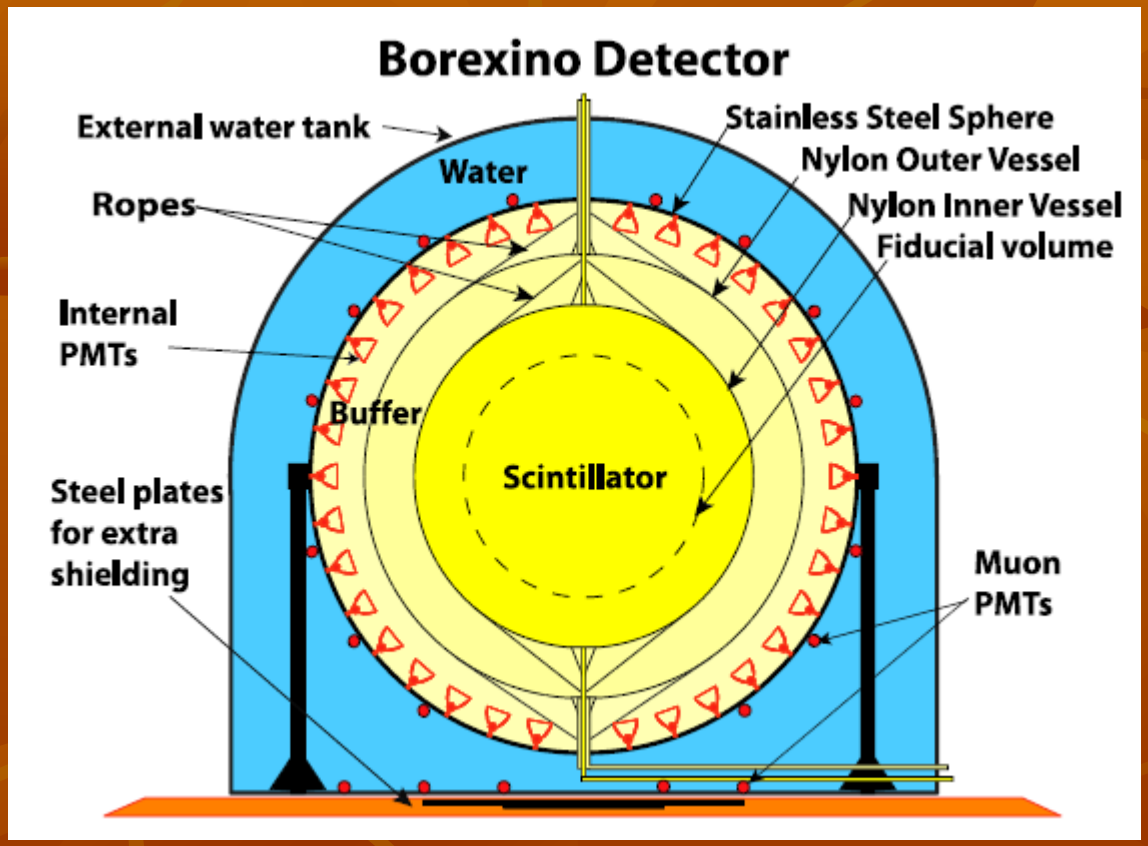
Превращения (E>5 МэВ) в основном происходят в недрах Солнца за счет эффекта MSW.

Нейтринное изображение Солнца



Super-Kamiokande

Борексино



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

1410.0779

ТОЛЬКО СОЛНЦЕ
В МОЕЙ ГОЛОВЕ