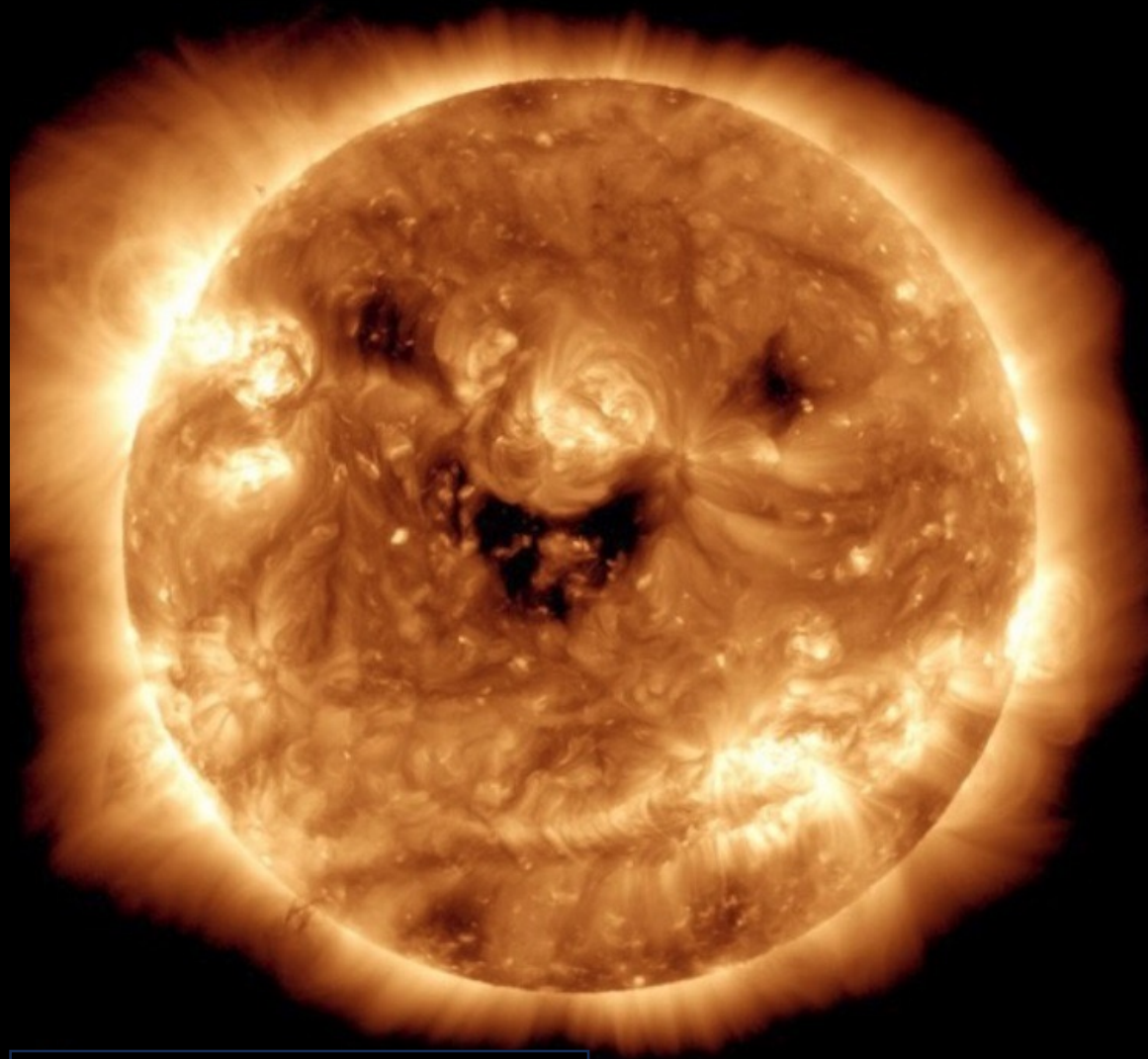


**СКАЗ О ТОМ,**



**КАК НЕЙТРИНО СОЛНЦЕ СПАСАЛИ**

# Солнце у древних славян



Древние славяне считали Солнце, Молнию и Огонь – два небесных Пламени и одно земное – родными братьями, сыновьями Неба и Земли.

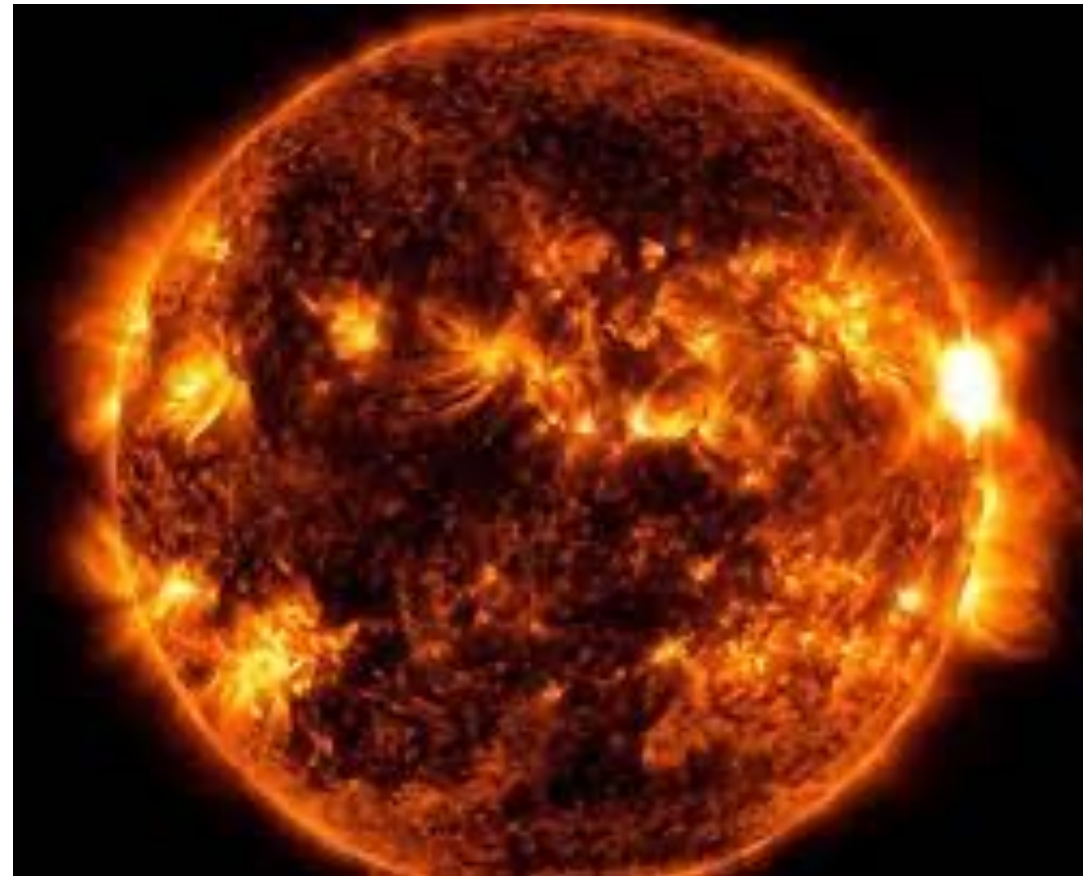
Бога Солнца называют Дажьбогом. Это не от слова «дождь», как иногда ошибочно думают, это значит – «дающий Бог», «податель всех благ». Славяне верили, что Дажьбог ездит по небу на чудесной колеснице, запряжённой четвёркой белых златогривых коней с золотыми крыльями. А солнечный свет происходит от огненного щита, который Дажьбог возит с собой. Ночью Дажьбог с запада на восток измеряет нижнее небо, светя Нижнему Миру. Дважды в сутки (утром и вечером) он пересекает Океан-море на лодье, запряжённой водоплавающими птицами – гусями, утками, лебедями (на Руси, в некоторых местах, народный обычай строго запрещал охоту на лебедей).

# Почему светит Солнце?



**Неистощимость Солнца всегда поражала человеческое воображение. Ведь наше светило излучает энергию миллиарды лет с поразительным постоянством. Ответ на вопрос: “Почему светит Солнце?” – простой: светит потому, что горячее.**

# Закон сохранения энергии



Истинная проблема состоит в том, что Солнце светит очень и очень долго. За это время оно успевают высветить действительно огромные количества энергии. Откуда же она черпается?

Вопрос был поставлен в 40-е годы XIX века, с открытием закона сохранения энергии. Сразу же стало ясно, что источником энергии в принципе может быть гравитация.

Так, Роберт Майер (1814-1878), один из отцов закона сохранения энергии, полагал, что Солнце светится за счет кинетической энергии выпадающего на него метеорного вещества. Любопытно, что в течение многих десятилетий гипотеза Майера считалась чуть ли не смехотворной и упоминалась лишь как исторический курьез. Однако теперь мы знаем, что модернизированный вариант механизма Майера – аккреция – играет в мире звезд важную роль.

# Гельмгольц, Кельвин и ... Дарвин



Г. Гельмгольц (1821-1894)

Другой пионер принципа сохранения энергии Герман Гельмгольц предположил, что свечение Солнца может поддерживаться его медленным вековым сжатием, что приводит, разумеется, к выделению гравитационной энергии. Вскоре вслед за Гельмгольцем Дж. Томсон (более известный нам как лорд Кельвин) уточнил его оценку времени такого сжатия, учтя неоднородность в распределении солнечного вещества вдоль радиуса. За счет такого, как мы теперь говорим, кельвиновского сжатия Солнце могло бы, заметно не меняясь, светить лишь десятки миллионов лет. Любопытно, что сам Кельвин, а вслед за ним и многие другие, рассматривали это как серьезный аргумент против правильности дарвиновских представлений о биологической эволюции, требовавшей по крайней мере на порядок больших времен. В конце XIX века вера в закон сохранения энергии была незыблема – а никакого другого источника энергии звезд, кроме самогравитации, видно не было. Правда, оценки возраста Земли, получавшиеся средствами геологии, давали по крайней мере сотни миллионов лет, что указывало на необходимость поиска какого-то дополнительного источника солнечной энергии.

# Источник энергии Солнца термояд?

## Нет не термояд!



А. Эддингтон (1882-1944)

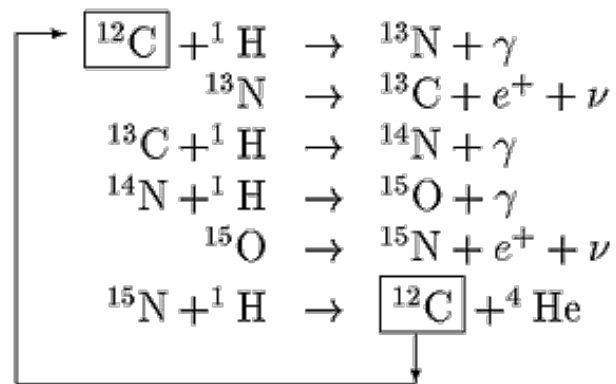
Ситуация резко обострилась, можно сказать стала катастрофической, вскоре после открытия радиоактивности. Первые же надежные определения возраста Земли показали, что он не менее 1.5 миллиарда лет (современная оценка – 4.6 миллиарда). Отыскание источника энергии Солнца и звезд стало одной из жгучих проблем естествознания.

К середине 20-х годов выяснилось, что таким источником в принципе могли бы служить ядерные реакции, ведущие к превращению водорода в гелий. Масса четырех протонов слегка превосходит массу ядра атома гелия – альфа-частицы, так что при таком процессе превращалось бы энегрию около 0.7% массы покоя. Горячим проповедником идеи термоядерного горения водорода в 20-е годы был фактический создатель теории внутреннего строения звезд А.Эддингтон. Однако поначалу эта идея встретила серьезные возражения Резерфорда и его коллег. Температура в центре Солнца, рассчитанная самим же Эддингтоном (20 млн кельвинов) и оказавшаяся, как мы теперь твердо знаем, близкой к действительной (15.5 млн кельвинов), явно недостаточна для того, чтобы за счет кинетической энергии своего теплового движения протоны могли преодолеть электростатическое кулоновское отталкивание и сблизиться настолько, чтобы вступили в игру ядерные силы. Расхождение было очень серьезным – на три порядка по температуре. "Пойдите поищите местечко погорячее" – вот что постоянно слышал Эддингтон от своих коллег-физиков...

# И все-таки, термояд!



Г. Бете (1906 – 2005)



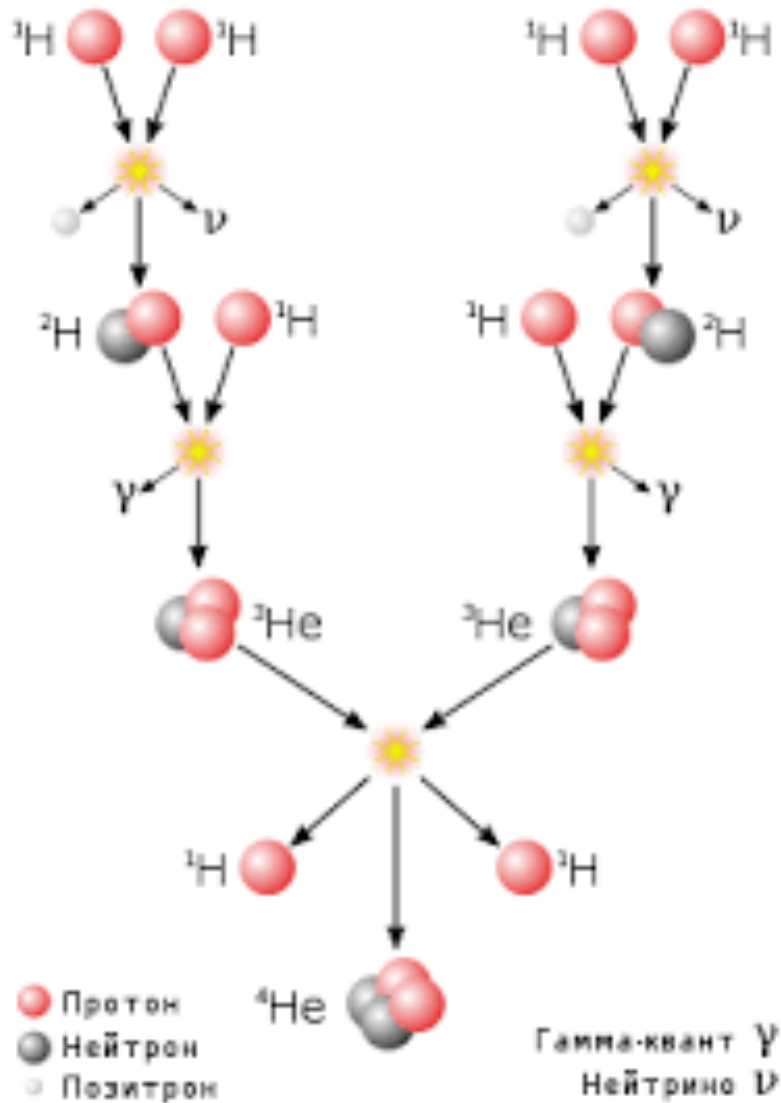
CN цикл Бете

Решение проблемы пришло с развитием квантовой механики. Согласно принципу неопределенности Гейзенберга, говорить о точном местоположении частицы не имеет смысла – она как бы размазана по некоторой области пространства и с разной вероятностью может быть обнаружена в разных местах. Это, в частности, делает возможным присутствие частицы и в тех областях пространства, где классические законы сохранения энергии и импульса это строго запрещают. В итоге непреодолимый для классической частицы кулоновский потенциальный барьер становится как бы "полупрозрачным" (так называемый туннельный эффект). Первыми на роль этого эффекта для решения загадки источников звездной энергии в 1929 г. указали Р.Аткинсон и Ф.Хаутерманс. Созданная в это же примерно время Г.А.Гамовым теория альфа-распада дала математический аппарат, положенный в конце тридцатых годов в основу количественной теории термоядерных реакций в недрах звезд. В 1937–1939 годах появляется, наконец, долгожданное окончательное решение давней загадки источника звездной энергии (Г.Бете и – независимо – К.Вейцзекер).

Итогом CN цикла является, очевидно, слияние четырех протонов в  $\alpha$ -частицу, а углерод, азот и кислород выступают лишь как катализаторы.

**Солнце светит и греет, превращая водород в своих недрах в гелий!**

# ПРОТОН-ПРОТОННЫЙ ЦИКЛ



Первоначально считалось, что наше Солнце вырабатывает свою энергию по первой схеме, т.е. за счет цикла Бете. В 50-е годы, однако, стало ясно, что это не так, и преобладающую роль играют *pp*-цепочки. Причина в том, что, как показал более внимательный анализ, центральная температура Солнца немного ниже, чем принималось ранее, а рост темпа выделения энергии с температурой у цикла Бете происходит существенно быстрее, чем для *pp*-цепочек. Однако в звездах с массами, превосходящими 1.2 массы Солнца, доминирует в выделении энергии CN-цикл.

Простой энергетический расчет показал, что в Солнце выгорание водорода в его центральной части займет около 10 млрд лет. Проблема источников энергии Солнца и подавляющего большинства звезд, в частности, всех звезд так называемой главной последовательности, была тем самым окончательно решена.



# Солнце – единственная звезда Солнечной Системы

## Основные характеристики Солнца



Характеристика	Значение
Наименьшее расстояние от Земли, км	146 100 000
Наибольшее расстояние от Земли, км	152 100 000
Радиус Солнца, км	696 000 ( $R_{\odot} = 6400$ )
Масса Солнца, кг	$2 \cdot 10^{30}$
Температура в центре, К	16 000 000
Температура поверхности, К	5 800
Температура в солнечных пятнах, К	4 500
Температура короны, К	1 000 000
Типичный размер солнечного пятна, км	2 000
Поток энергии, Дж/с	$4 \cdot 10^{26}$
Средняя плотность солнечного вещества, г/см <sup>2</sup>	1,4

# СТРОЕНИЕ СОЛНЦА



**Протуберанцы** - плотные конденсации относительно холодного (по сравнению с солнечной короной) вещества, которые поднимаются и удерживаются над поверхностью Солнца магнитным полем.

**Солнечные пятна** — тёмные области на Солнце, температура которых понижена примерно на 1500 К по сравнению с окружающими участками фотосферы.

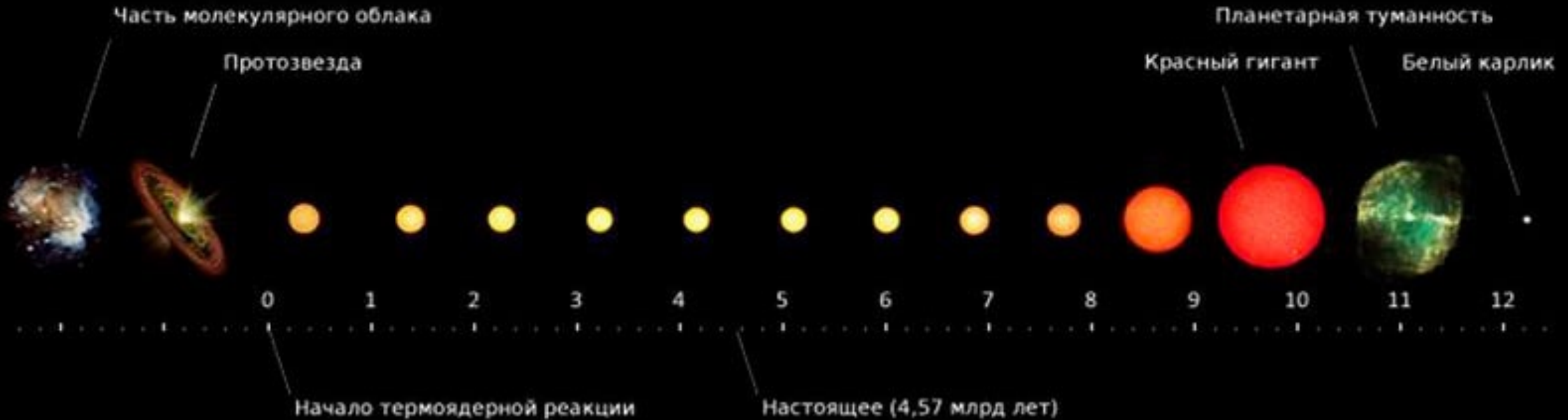
Радиоактивная зона около  $\frac{2}{3}$  внутреннего диаметра Солнца, а радиус составляет около 140 тыс.км. Удаляясь от центра, фотоны теряют свою энергию под влиянием столкновения.

Тонкий слой (400 км) — фотосфера Солнца, находится прямо за конвективной зоной и представляет собой видимую с Земли «настоящую солнечную поверхность». Хромосфера Солнца (цветная сфера) – плотный слой (10 000 км) солнечной атмосферы, который находится прямо за фотосферой. Хромосферу наблюдать достаточно проблематично, за счет ее близкого расположения к фотосфере. Лучше всего ее видно, когда Луна закрывает фотосферу, т.е. во время солнечных затмений.

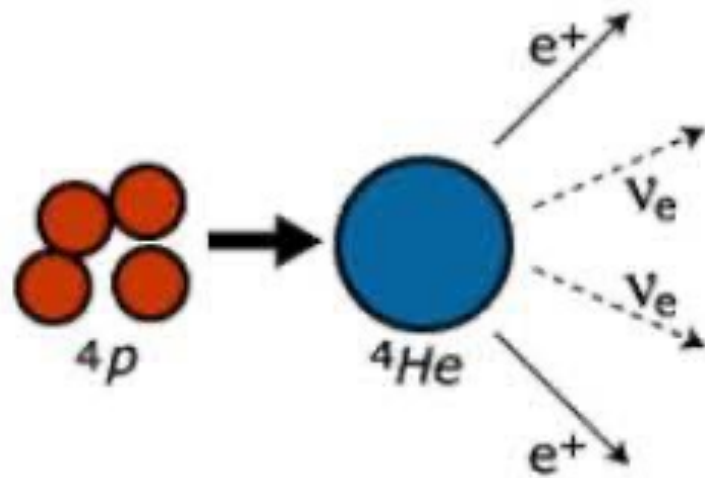
Солнечная корона – внешние и протяженные слои атмосферы Солнца, берущие начало над хромосферой. Длина солнечной короны является очень продолжительной и достигает значений в несколько диаметров Солнца. На вопрос где именно она заканчивается, ученые пока не получили однозначного ответа.

# Эволюция Солнца

Текущий возраст Солнца (точнее — время его существования на главной последовательности), оценённый с помощью компьютерных моделей звёздной эволюции, равен приблизительно 4,57 млрд лет.

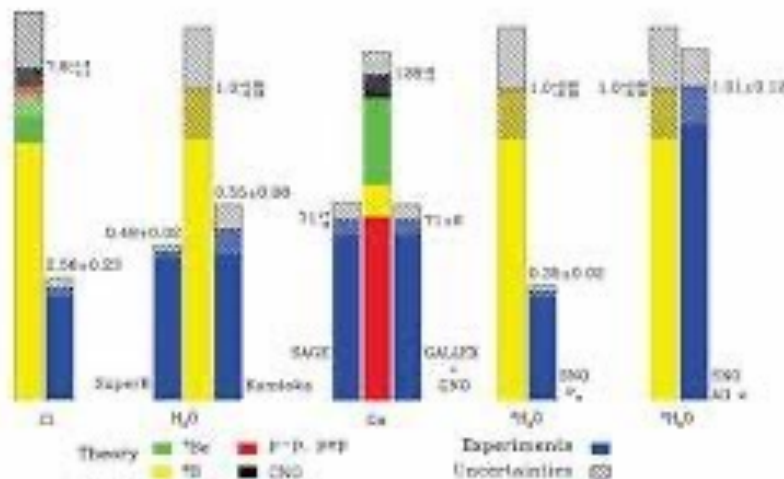


# Проблема солнечных нейтрино



Регистрация на Земле четырьмя независимыми установками потока солнечных нейтрино, несомненно, подтвердила термоядерное происхождение солнечной энергии. Но результаты этих экспериментов поставили перед физикой новые проблемы. Число реакций, вызываемых солнечными нейтрино, оказалось в два-три раза меньше, чем следовало из расчетов, основанных на теоретических моделях Солнца и данных о вероятностях тех или иных каналов ядерных реакций. Какова же природа этих расхождений? Когда в распоряжении физиков были только данные хлор-аргонного эксперимента, большинство склонялись к мысли, что расхождение можно устранить подавив в несколько раз реакции, ведущие к испусканию борных нейтрино. Теоретически это можно сделать, например, уменьшив температуру в центре Солнца всего на 10%. Такое уменьшение температуры, согласно модели Солнца, могло быть связано с небольшим изменением концентрации тяжелых ядер (в основном углерода), влияющим на процессы переноса тепла из центральных областей Солнца.

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



# Нейтринные осцилляции

$<2,2 \text{ эВ}$	$<0,17 \text{ МэВ}$	$<15,5 \text{ МэВ}$
$0$	$0$	$0$
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
электронное нейтрино	мюонное нейтрино	тау нейтрино



В Природе существуют три типа нейтрино, и, если у нейтрино нет массы покоя (а так долгое время считалось), то тип нейтрино сохраняется на протяжении всей жизни частицы.

Поэтому в первых экспериментах по подсчету потока нейтрино от Солнца, регистрировался только один из типов нейтрино - электронное. И наблюдалось, что этот поток меньше, чем должен быть, если в ядре Солнца идут термоядерные реакции протон-протонного цикла.

Однако, в экспериментах, проведенных группами физиков под руководством Такааки Кадзита и Артура Брюса МакДональда, у нейтрино была обнаружена масса покоя.

Это в свою очередь означало, что тип нейтрино мог волнообразно меняться в процессе жизни частицы (то есть существуют так называемые осцилляции нейтрино).

Открытие осцилляций решило проблему нехватки солнечных нейтрино и было отмечено Нобелевской Премией по физике за 2015 год.

# Современные исследования Солнца



12 августа 2018 года США произвели запуск с базы ВВС на мысе Канаверал (шт. Флорида) ракеты-носителя Delta IV. В космос выведен космический аппарат PSP (Parker Solar Probe, с англ. "Солнечный зонд Паркер"). По расчетам, в декабре 2024 года зонд приблизится к Солнцу на рекордно близкое расстояние (6,16 млн км) и впервые войдет в верхние слои атмосферы светила - так называемую солнечную корону, где температура достигает свыше 1,3 тыс. градусов Цельсия. К настоящему моменту ближе всех из космических аппаратов к нашей звезде подходил немецко-американский зонд Helios-2 - 43,4 млн км в 1976 году.