

# Плазма в космосе

Лекция №9

Солнце, ч.1: внутренний состав

Анненков Владимир, с.н.с. лаб. 9-1

11 ноября 2021



## Содержание лекции

- 1 Общие сведения
  - Глобальные параметры
  - Химический состав
- 2 Ядро
- 3 Солнечные нейтрино
- 4 Гелиосейсмология

Общие сведения

## Литература

- ① Л.М. Зеленый, И.С. Веселовский  
«Плазменная гелиогеофизика» т-1
- ② Л.М. Зеленый, И.С. Веселовский  
«Плазменная гелиогеофизика» т-2
- ③ Э. Гибсон «Спокойное Солнце»
- ④ М. Aschwanden «Physics of the solar corona.  
An introduction with problems and solutions»



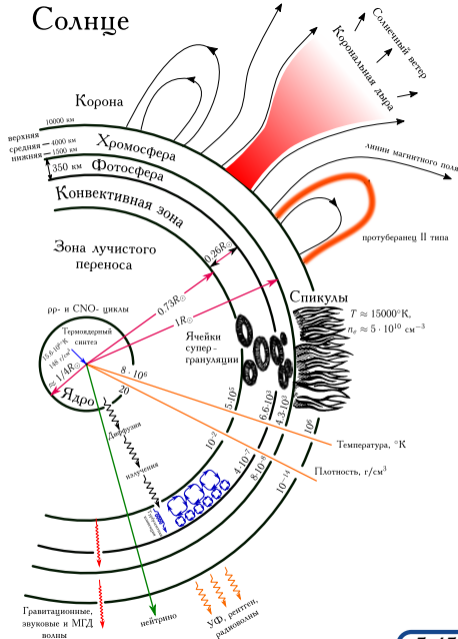


## Солнце

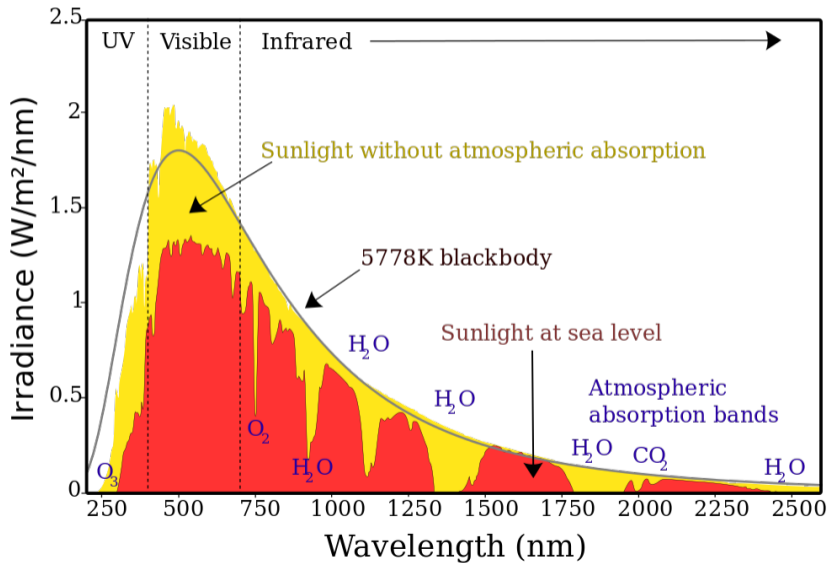
- Солнце – обычная звезда главной последовательности.
- Эффективная температура поверхности  $T_{\text{э}} = 5780$  °К.
- Относится к типу **G2V** (жёлтый карлик).
- Среднее расстояние от Земли:  $1.496 \cdot 10^8$  км (8.31 св. минут)
- Расстояние от центра Галактики: 26 000 св. лет.
- Масса:  $1.99 \cdot 10^{33}$  г (332940 масс Земли, 99.866% массы Солнечной системы)
- Радиус Солнца  $R_{\odot} = 6.96 \cdot 10^{10}$  см, т. е. в  $10^9$  раз больше радиуса Земли
- Средняя плотность солнечного вещества  $1.41$  г/см<sup>3</sup>, что составляет 0.256 средней плотности Земли.

# Глобальные параметры

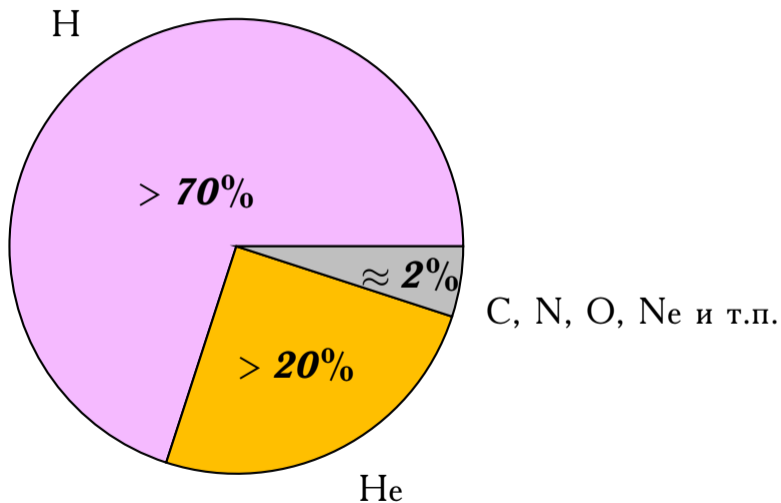
Масса	$1.99 \cdot 10^{33}$ г
Светимость	$3.86 \cdot 10^{33}$ эрг/с
Возраст	$\approx 4.55 \cdot 10^9$ лет
Видимая зв-я вел-а	$m_B = -26.3$
Аб-я зв-я вел-а	$M_B = +5.47$
Радиус	$6.96 \cdot 10^{10}$ см
Спектр-ый класс	<b>G2V</b>
Средняя маг-я инд-я	$\sim 1$ Гс
Эфф-я температура	$5800^\circ\text{K}$
pp-цикл	0.984
CNO-цикл	0.016
Средняя плотность	$1.4$ г/см <sup>3</sup>



# Спектр излучения



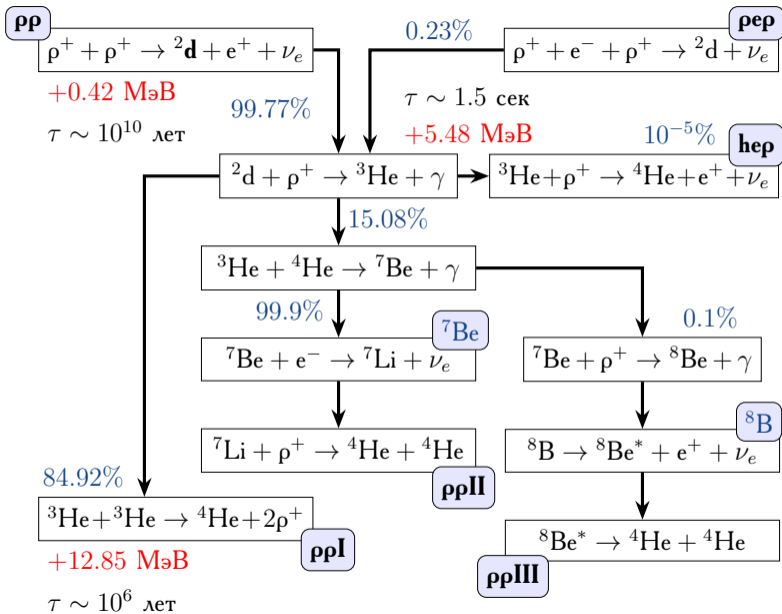
## Химический состав



Ядро

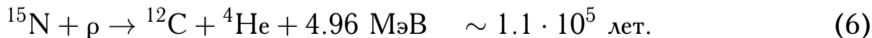
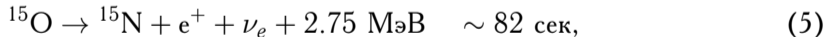
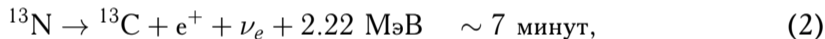
## Ядро

- Радиус ядра составляет четверть от радиуса Солнца.
- Под влиянием собственной гравитации вещество Солнца сжато в центре до столь большой плотности ( $148 \text{ г/см}^3$ ) и имеет настолько высокую температуру ( $15.6 \cdot 10^6 \text{ }^\circ\text{K}$ ), что там происходят ядерные реакции.
- Хотя ядра атомов упакованы там в 1000 раз плотнее, чем в металле, высокая температура поддерживает вещество в газообразном состоянии.
- Таким образом, кристаллической структуры, свойственной твердому телу, там нет. Электроны и «голые» ядра движутся, как свободные частицы.
- Ядерные реакции являются источником энергии, которая непрерывно излучается Солнцем в пространство и порождает солнечную активность.



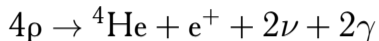
## CNO-цикл

- Доля энергии от составляет 98.4% энергии выделяется за счёт pp-цепочки. Оставшиеся 1.6% генерируются в CNO-цикл.
- В этой цепочке реакций ядро углерода выступает в роли катализатора, т. е., в конечном счете, в CNO-цикле, как и в pp-цикле  $4p \rightarrow {}^4\text{He}$ :



- Как и в pp-цикле, ключевыми реакциями, определяющими скорость всей цепочки, являются реакции 2 и 5, которые идут по каналу слабого взаимодействия с испусканием нейтрино.





- Фотоны испытывают сильное рассеяние в радиационной зоне Солнца, поэтому единственным агентом, выходящим из зоны энерговыделения, являются слабовзаимодействующие частицы – электронные нейтрино.
- Зная полную светимость Солнца, легко оценить ожидаемый интегральный поток солнечных нейтрино на орбите Земли.
- Измерение потока солнечных нейтрино является **единственной экспериментальной возможностью** проверить представления об источниках энергии звезд и правильность солнечных моделей.

# Солнечные нейтрино

## Солнечные нейтрино

- Одна из первых статей, посвященных стандартной модели (Sears, 1964), начиналась с удивительного признания, что теоретические модели внутреннего строения Солнца больше не находятся на переднем крае теории строения и эволюции звезд.
- Первый проведенный эксперимент по регистрации солнечных нейтрино опроверг это оптимистическое утверждение: поток солнечных нейтрино оказался меньше ожидаемого.
- Эта проблема, которая на долгие годы получила название «**загадка солнечных нейтрино**», могла иметь астрофизическое (ошибки стандартной модели) или ядернофизическое решение (незнание физики нейтрино).

## Солнечные нейтрино

- Нейтрино – частица, которая испытывает только слабое взаимодействие (характерные сечения в диапазоне спектра солнечных нейтрино  $\sigma = 10^{-42} \div 10^{-46} \text{ см}^2$ ).
- Поэтому ожидаемое количество взаимодействий на 1 атом мишени мало:  $\sigma = 10^{-32} \div 10^{-36} \text{ с}^{-1}$ .
- Поток солнечных нейтрино принято измерять в солнечных нейтринных единицах (Solar Neutrino Unit):  $1 \text{ SNU} = 10^{-36} \text{ с}^{-1}$  – количеству взаимодействий за **1** с на  **$10^{36}$**  атомов мишени.
- Для регистрации даже единичных нейтрино требуются уникальные технологии, гигантские мишени и длительные периоды наблюдений.

## Солнечные нейтрино

Существует два способа регистрации нейтрино:

- ① нейтрино может быть захвачено ядром мишени в реакции обратного К-захвата ( $n + \nu_e \rightarrow p + e^-$ );
- ② нейтрино может быть рассеяно электроном атома мишени ( $e + \nu_x \rightarrow e' + \nu'_x$ , аналог рассеяния Комптона) или ядром мишени с последующим его распадом (для дейтерия:  $d + \nu_x \rightarrow n + p + \nu_x$ ).

## Солнечные нейтрино

- Непосредственно регистрируются получившиеся радиоактивные ядра (**радиохимические детекторы**) или черенковский свет от вторичных заряженных частиц (**детекторы прямого счета**).
- В случае реакции обратного  $K$ -захвата или распада ядра энергетический порог детектора определяется разностью масс материнского и дочернего ядер, а при рассеянии на электроне только собственным шумом детектора.
- На электронах и ядрах могут рассеиваться нейтрино различных типов, хотя эффективные сечения рассеяния для неэлектронных нейтрино значительно меньше.
- Поэтому вторым способом регистрируются нейтрино всех типов, но с различной эффективностью, тогда как первым способом регистрация мюонных нейтрино с энергией меньше массы мюона запрещена законом сохранения энергии.

## Солнечные нейтрино

Наблюдения потока солнечных нейтрино были проведены на четырех различных мишенях:

Радиохимические детекторы:

- ①  $\text{Cl} \rightarrow \text{Ar}$  (порог 0.8 МэВ)
- ②  $\text{Ga} \rightarrow \text{Ge}$  (порог 233 МэВ)

Детекторы прямого счета:

- ③  $\text{H}_2\text{O}$  (порог  $\sim 5$  МэВ)
- ④  $\text{D}_2\text{O}$

## Баксанская нейтринная обсерватория



- Подземные сооружения обсерватории находятся в двух тоннелях длиной 3670 м под горой Андырчи, их эквивалентная глубина составляет от 100 до 4800 м водного эквивалента.
- Принадлежит Институту ядерных исследований РАН.
- Там находится галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) – радиохимический детектор солнечных нейтрино с мишенью из металлического галлия массой 60 т.

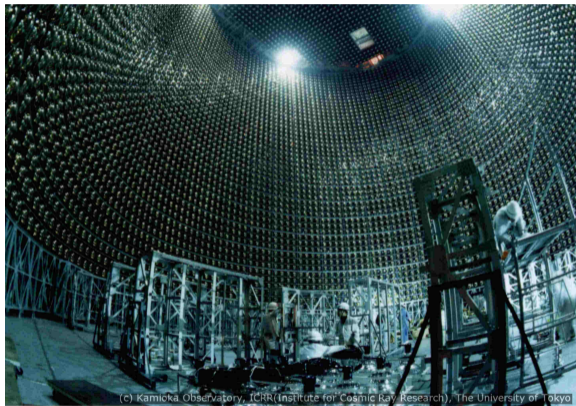
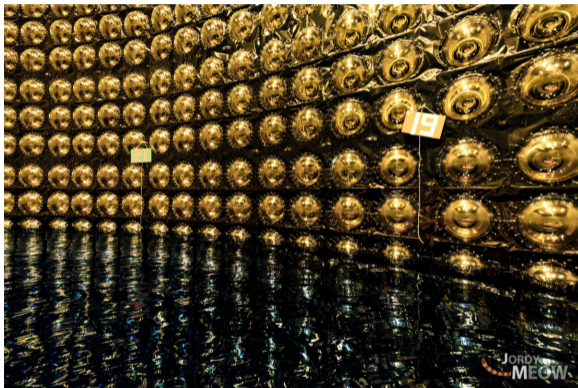


## Супер-Камиоканде

- Детектор размещён в японской лаборатории на глубине в 1 км в цинковой шахте Камиока, в 290 км к северу от Токио.
- Резервуар из нержавеющей стали в форме цилиндра высотой 41.4 м и диаметром основания 39.3 м, заполненный 50 тыс. тонн специально очищенной воды.
- На стенах резервуара размещены 11146 фотоумножителей (ФЭУ).



# Супер-Камиоканде



# Супер-Камиоканде

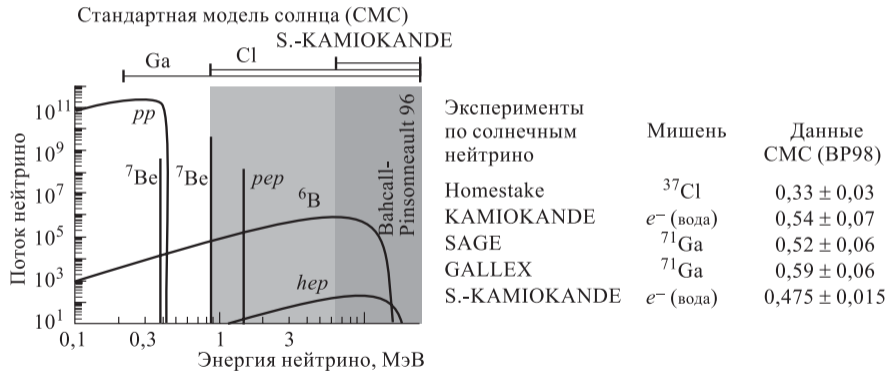


## Большая волна

- В ноябре 2001 года на Супер-Камиоканде произошла катастрофа, остановившая его работу на 5 лет.
- Поверхности фотоумножителей чистятся вручную, и для того, чтобы достать до самых нижних, инженерам приходилось полностью сливать воду и ходить по поверхности на специальных мягких подкладках, распределяющих вес.
- Во время такой плановой очистки, видимо, на одном из нижних фотоумножителей появилась незаметная микротрещина.
- Когда после окончания чистки начали заливать воду, в какой-то момент стекло не выдержало растущего давления и взорвалось.
- Ударная волна, распространяясь по воде, вызвала цепную реакцию, и почти 6600 фотоумножительных трубок (стоимостью \$3000 каждая) были уничтожены.
- [https://elementy.ru/kartinka\\_dnya/200/Neytrinnyy\\_teleoskop\\_Super\\_Kamiokande](https://elementy.ru/kartinka_dnya/200/Neytrinnyy_teleoskop_Super_Kamiokande)

# Солнечные нейтрино

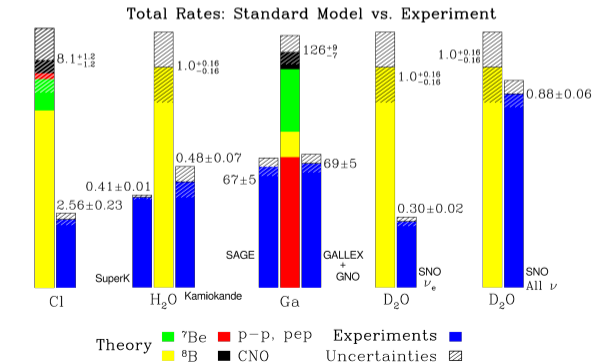
- Спектр солнечных нейтрино, которые возникают в результате ядерных реакций  $pp$ -цепочки, и области спектра, доступные тем или иным детекторам:



- Основную долю в спектре составляют  $pp$ -нейтрино.

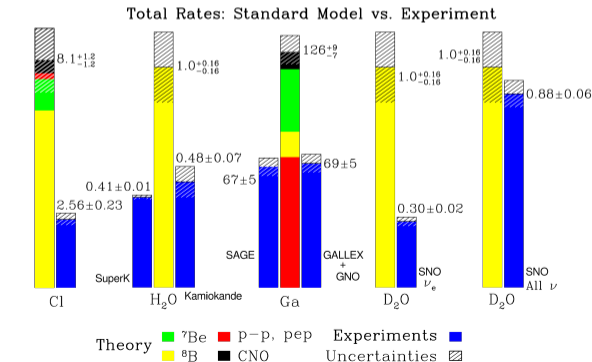
# Солнечные нейтрино

- Наблюдения Cl-Ar-детектором, проводившиеся с 1970 по 1995 гг. (Cleveland, 1995), показали существенный дефицит борных нейтрино по отношению к СМС.
- Этот дефицит мог быть результатом ошибок стандартной модели или незнания физики нейтрино (например, переходами между различными типами нейтрино  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ ).



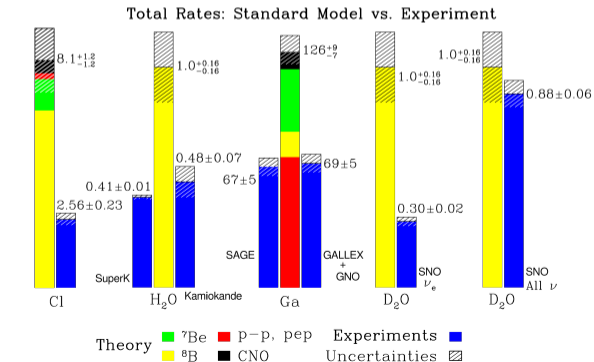
# Солнечные нейтрино

- В 1990 г. вступили в строй два Ga-Ge-детектора GALLEX (GALLEX Collaboration, 1995) и SAGE (SAGE Collaboration, 1994), которые различались процедурой экстракции и счета дочерних ядер Ge.
- Оба эксперимента показали дефицит теперь уже солнечных pp-нейтрино по сравнению с СМС.



# Солнечные нейтрино

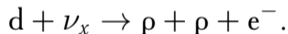
- Эксперимент KAMIOKANDE (с 1986 г., после 1996 г. Super-KAMIOKANDE) подтвердил наличие дефицита борных нейтрино, но уменьшив при этом расхождение с СМС.
- Также детектором KAMIOKANDE было впервые показано, что солнечные нейтрино из высокоэнергичной части спектра приходят непосредственно от Солнца



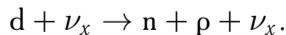


## Солнечные нейтрино

- Для проверки гипотезы нейтринных осцилляций, возможно, главной причины дефицита солнечных нейтрино, был задуман и проведен эксперимент «Sudbury Neutrino Observatory» (SNO).
- В водном черенковском детекторе SNO была использована тяжелая вода.
- Наличие у дейтерия лишнего нейтрона позволяет выделять события, вызванные только электронными нейтрино:

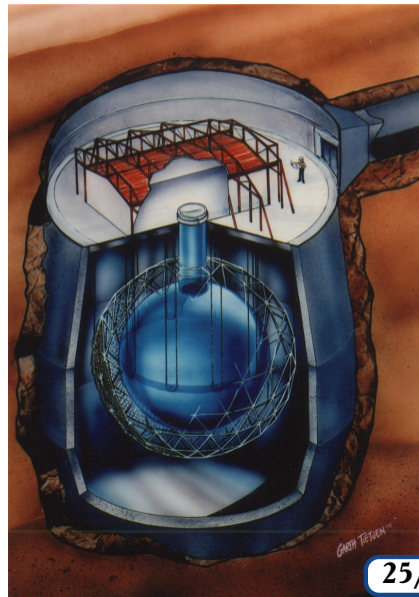


- Также с помощью детектора SNO было возможно проводить измерения суммарного потока нейтрино с помощью реакций

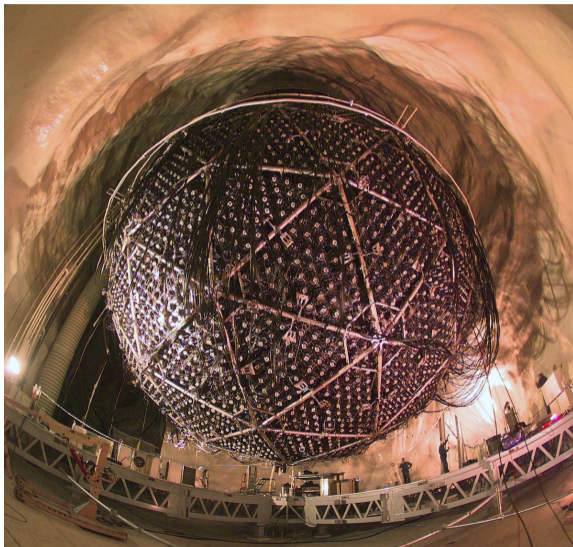


## Sudbury Neutrino Observatory

- Нейтринная обсерватория в Садбери (Канада), расположенная на глубине 2 км под землей в шахте Крейгтон.
- Детектор SNO состоит из 1000 тонн тяжелой воды  $D_2O$ , содержащейся в акриловой сфере с толщиной 5.5 см и диаметром 12 метров.
- Сфера окружена 9600 ФЭУ умножителями, которые покрывают 64% площади сферы.
- Снаружи детектор заполнен чистой водой, для защиты от результатов распада урана и тория, находящихся в горной породе.

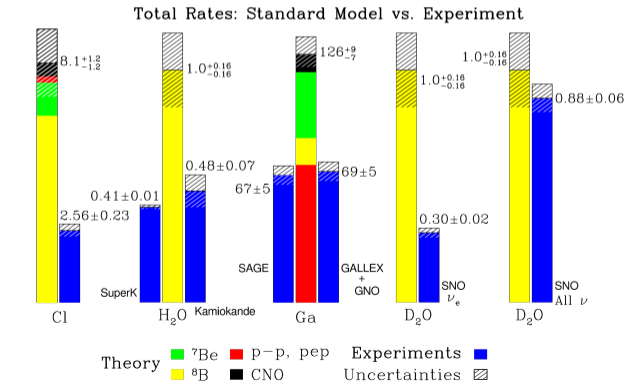


# *Sudbury Neutrino Observatory*



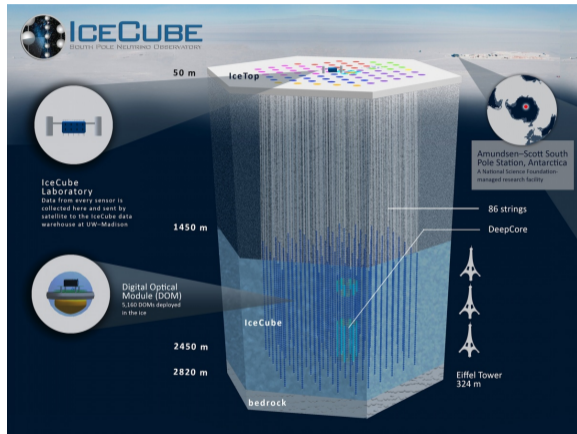
# Солнечные нейтрино

- Полученные результаты подтвердили дефицит солнечных электронных нейтрино, но показали согласие суммарного потока нейтрино с предсказаниями СМС, тем самым, подтвердив гипотезу об осцилляциях солнечных нейтрино



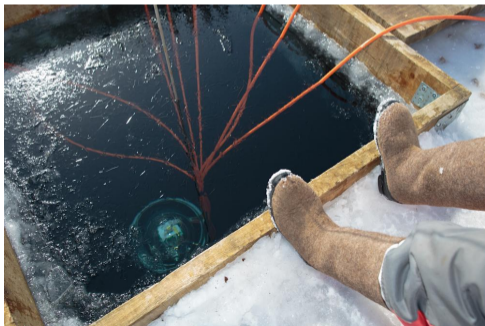
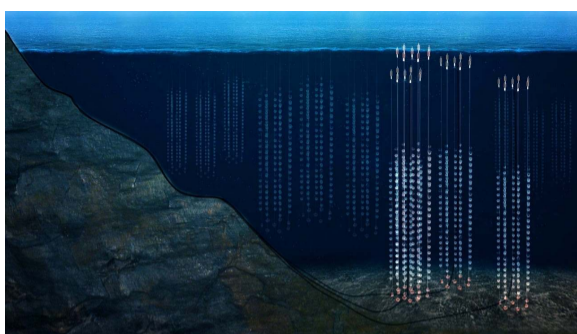
# IceCube

- Нейтринная обсерватория, построенная на антарктической станции Амундсен-Скотт.
- Оптическая система регистрирует черенковское излучение мюонов высокой энергии, движущихся в направлении вверх (то есть из-под земли).
- Эти мюоны могут рождаться только при взаимодействии мюонных нейтрино, прошедших сквозь Землю, с электронами и нуклонами льда (и слоя грунта подо льдом, толщиной порядка 1 км).



# Байкал

## ○ Байкальский нейтринный телескоп



*Хотите узнать больше?*

Больше интересных картинок и другие детекторы:



<https://www.messynessychic.com/2017/01/13/journey-to-the-centre-of-the-earth-in-a-rubber-dingy/>

# Гелиосейсмология



## Гелиосейсмология

- В 60-х гг. прошлого века были открыты пятиминутные колебания на Солнце.
- Это было важным достижением в физике Солнца, так как это были первые наблюдения гидродинамических волн в атмосфере Солнца.
- **Гелиосейсмология** исследует распространение **гидродинамических** волн на Солнце.
- Простейшей атмосферой, теория которой лежит в основе гелиосейсмологии, является так называемая изотермическая атмосфера – атмосфера с постоянной по высоте температурой.
- В ней скорость звука постоянна, а давление и плотность экспоненциально убывают с высотой.
- В результате задачу о волнах в такой атмосфере удастся свести к следующему дисперсионному уравнению:

$$\omega^4 - \omega^2 [\omega_a^2 + (k_x^2 + k_z^2) v_s^2] + \omega_g^2 k_x^2 v_s^2 = 0$$

$$\omega^4 - \omega^2 [\omega_a^2 + (k_x^2 + k_z^2) v_s^2] + \omega_g^2 k_x^2 v_s^2 = 0$$

- Кроме горизонтальной и вертикальной компонент волнового вектора,  $k_x$  и  $k_z$ , и скорости звука  $v_s$ , уравнение содержит две критических частоты.
- Частота  $\omega_a = v_s/2H$ , равная отношению скорости звука к шкале высот  $H = T/\langle m \rangle g = p_0/(\rho_0 g)$  в изотермической атмосфере, определяет наименьшую возможную частоту колебаний звукового типа, т. е. колебаний, для которых возвращающей силой является **сжимаемость**.
- Эта частота называется низкочастотной частотой отсечки.
- В пределе высоких частот эти волны превращаются в обыкновенные звуковые волны.

$$\omega^4 - \omega^2 [\omega_a^2 + (k_x^2 + k_z^2) v_s^2] + \omega_g^2 k_x^2 v_s^2 = 0$$

- Вторая ветвь возможных колебаний называется ветвью **гравитационных волн**.
- Происхождение названия этих волн связано с тем, что возвращающей силой для этих волн является сила тяжести.
- Частоты гравитационных волн ниже критической частоты Бранта—Вяйсяля (частота плавучести)  $\omega_g = (\gamma - 1)^{1/2} v_s / \gamma H$ , здесь  $\gamma$  – показатель адиабаты.
- Между этими двумя ветвями находятся **поверхностные волны**, которые в зарубежной литературе принято называть эванесцентными, что в переводе означает убывающими.
- Эти волны распространяются только в горизонтальном направлении, а их амплитуда экспоненциально меняется с высотой.

$$\omega^4 - \omega^2 [\omega_a^2 + (k_x^2 + k_z^2) v_s^2] + \omega_g^2 k_x^2 v_s^2 = 0$$

- Эванесцентные волны подобны экспоненциально убывающим волнам, которые возникают в более плотной среде при полном внутреннем отражении.
- Гравитационные волны подобны волнам в несжимаемой жидкости – сжимаемость не оказывает заметного влияния на их свойства.
- По мере уменьшения частоты их отличия от волн в несжимаемой жидкости вообще исчезают.

## Гелиосейсмология

- Оказалось, что пятиминутные колебания, наблюдаемые на Солнце, являются волнами звукового типа.
- Они получили название **p-мод** колебаний.
- Этим названием подчеркивается, что ключевую роль в поддержании этих волн играет давление (**pressure**).
- Частота отсечки для **p-мод** колебаний уменьшается по мере удаления от центра Солнца, так как она обратно пропорциональна скорости звука.
- Наименьшего значения она достигает в фотосфере или, точнее, в температурном минимуме.
- Эта частота отсечки соответствует периоду, примерно равному четырем минутам, т. е. колебания с периодом порядка пяти минут оказываются запертыми внутри Солнца.

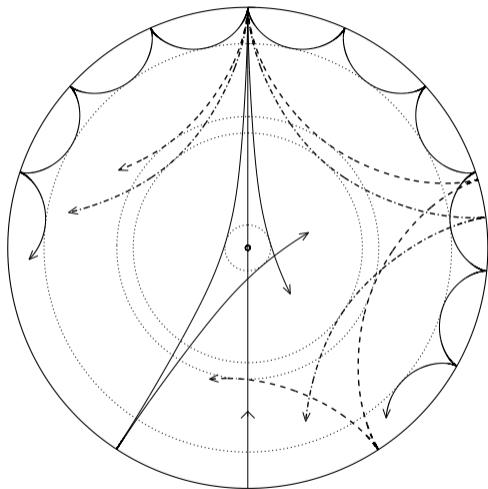
- Пятиминутные колебания наблюдаются в фотосфере и выше фотосферы, в хромосфере, т. е. выше того уровня, от которого они отражаются.
- Это означает, что наблюдаются, строго говоря, не  $p$ -моды колебаний, а эванесцентные колебания, возникающие в результате отражения  $p$ -мод от слоев, где их частота сравнивается с частотой отсечки на этом уровне.
- Таким образом, отражение волн разных частот происходит на разных глубинах.
- Отсюда можно сделать вывод, что спектр пятиминутных колебаний должен быть дискретным, так как должно укладываться целое число полуволн на глубине резонансной полости, которой является Солнце.

## Гелиосейсмология

- Для того чтобы разобраться с собственными колебаниями Солнца, необходимо знать, что происходит с  $p$ -модами по мере их распространения в недра Солнца.
- По мере удаления от поверхности Солнца частота отсечки увеличивается, а по мере уменьшения частоты волны по сравнению с частотой отсечки свойства волн все больше приближаются к свойствам обычных звуковых волн, т.е. волны не испытывают воздействия силы тяжести.
- Звуковые волны при распространении в среде с возрастающей скоростью звука испытывают рефракцию, которая, в конце концов, приводит к полному внутреннему отражению.
- Эффект полного внутреннего отражения зависит от частоты и угла, под которым волна распространяется по отношению к градиенту температуры.

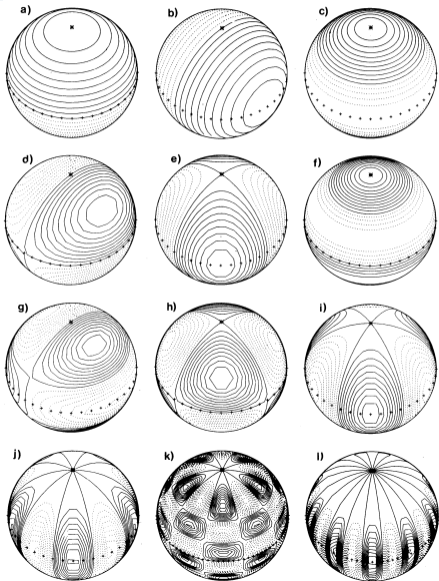
## Гелиосейсмология

- В плоской атмосфере этот угол фактически определяется отношением вертикальной и горизонтальной компонент волнового вектора.
- В случае Солнца, которое в первом приближении считается идеальной сферой, распределение узлов и пучностей по сфере определяется сферическими гармониками.
- Таким образом, набор собственных частот зависит от «квантовых» чисел  $l$ ,  $m$ ,  $n$ , аналогично тому, как это имеет место в квантовой механике при рассмотрении волновых функций, когда точно также вводятся сферические гармоники.





# Гелиосейсмология



- Контурные графики действительной части сферических гармоник  $Y_l^m$ ; (для простоты фазовый фактор  $(-1)^m$  был опущен).
- Положительные контуры обозначены сплошными линиями, а отрицательные – пунктирные линии. Ось = 0 наклонена на 45 к наблюдателю, и обозначена звездочкой.
- Экватор обозначен «++++». а)  $l = 1, m = 0$ ; б)  $l = 1, m = 1$ ; в)  $l = 2, m = 0$ ; д)  $l = 2, m = 1$ ; е)  $l = 2, m = 2$ ; ф)  $l = 3, m = 0$ ; г)  $l = 3, m = 1$ ; х)  $l = 3, m = 2$ ; и)  $l = 3, m = 3$ ; ж)  $l = 5, m = 5$ ; к)  $l = 10, m = 5$ ; л)  $l = 10, m = 10$ .

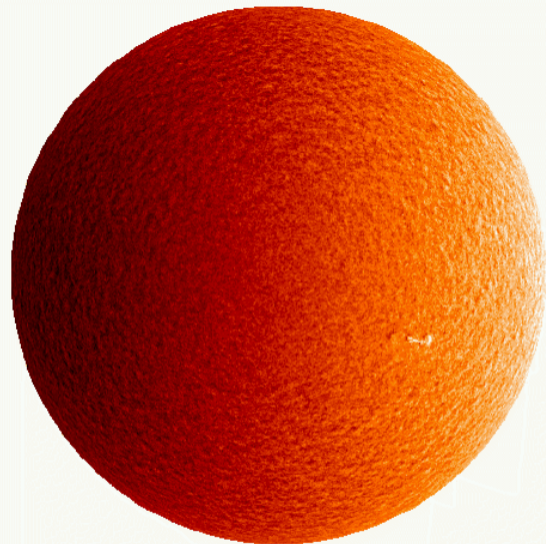
Из "Lecture Notes on Stellar Oscillations",  
Jørgen Christensen-Dalsgaard

## Гелиосейсмология

- Спектр собственных частот содержит огромную информацию о внутреннем устройстве Солнца.
- Существуют два метода наблюдений собственных колебаний:
  - ① Они наблюдаются посредством измерения **доплеровских смещений** линий в спектре Солнца. Как правило, для этого используются линии оптического диапазона.
  - ② Кроме того, собственные колебания наблюдаются по **флуктуациям яркости** Солнца в различных спектральных диапазонах. Это оказывается возможным, поскольку колебания звукового типа приводят не только к смещениям плазмы, но и к **флуктуациям температуры**.

## Гелиосейсмология

Сырая полнораспределенная солнечная доплеровская грамма от 9 июля 1996 года, 09.00. Цветовая карта показывает линейную скорость с точностью приблизительно 0.02 км/с. Рисунок с сайта Solar Oscillations Investigation (SOI), <http://soi.stanford.edu>.



-2      -1      0      1      2

Velocity (km/s)

- Для определения зависимости скорости звука от глубины по спектру р-мод колебаний были разработаны методы решения обратной задачи.
- Кроме того, спектр содержит информацию о дифференциальном вращении Солнца, так как вращение приводит к расщеплению линий в спектре Солнца.
- Для того чтобы информация, содержащаяся в спектре собственных колебаний, была как можно более точной, частоты должны быть определены с высокой точностью.
- Это сделать непросто, так как период колебаний достаточно большой, и необходимы наблюдения длительностью во много лет.

- Для решения этой проблемы были созданы сети специализированных станций, обеспечивающих круглосуточные наблюдения Солнца.
- Также используются космические аппараты, так как в этом случае исчезают проблемы, связанные с погодой.
- Наблюдения собственных колебаний проводятся на американской космической обсерватории SOHO и проводились на двух российских орбитальных обсерваториях КОРОНАС-И и КОРОНАС-Ф.

# *Solar and Heliospheric Observatory*

- Запуск: 2 декабря 1995 года
- Размеры (высота, ширина, ширина): 4.3 x 2.7 x 3.7 м
- Ширина с развернутой солнечной батареей: 9.5 м
- Общая масса на старте: 1850 кг
- Полезная нагрузка: 610 кг
- Телеметрия в режиме реального времени: 200 кбит/с
- Телеметрия в режиме хранения на борту: 40 Кбит/с
- Имеет на борту 12 инструментов, позволяющих получать изображения и/или измерять потоки излучения Солнца.



## *The SOHO Mission Interruption*

- 24 июня 1998 года команда SOHO проводила серию манёвров и калибровок гироскопа.
- В 23:16 UTC, SOHO утратил ориентацию на Солнце и перешёл в аварийный режим управления положением (Emergency Sun Reacquisition).
- 25 июня в 4:43 UTC связь с SOHO была потеряна.
- Эксперты ESA были немедленно отправлены из Европы в США.
- 3 июля Обсерватория Аресибо и Goldstone Solar System Radar объединились и смогли определить положение SOHO.
- SOHO был близок к своему прогнозируемому положению и вращался на один оборот каждые 53 секунды. Его передняя панель отражателя была ориентирована в противоположную от Солнца сторону.
- 3 августа был получен первый с 25 июня сигнал с SOHO. Начался процесс спасения: медленная зарядка батарей, нагрев конструкций, выравнивание ориентации в пространстве.
- Восстановление инструментов началось 5 октября и закончилось 24 октября 1998 года. Только один гироскоп оставался в рабочем состоянии после этого восстановления и 21 декабря он вышел из строя.
- Управление положением осуществлялось с помощью ручных подруливающих устройств, которые расходовали 7 кг топлива еженедельно, в то время как ЕКА разработало новый режим работы без гироскопа, который был успешно внедрён 1 февраля 1999 г.

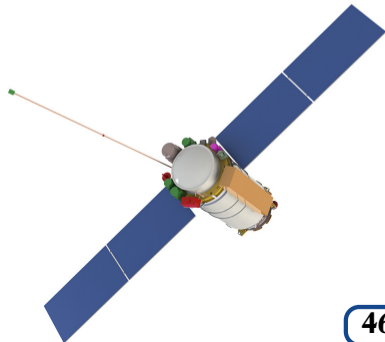
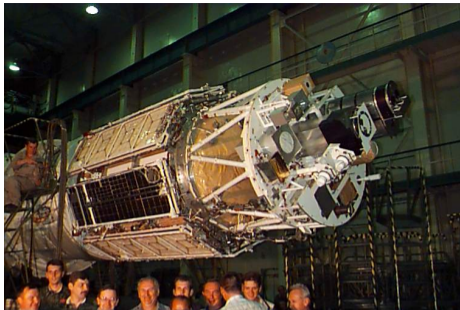
# КОРОНАС

КОРОНАС-И или Интеркосмос-26 (Комплексные Орбитальные Околосемные Наблюдения Активности Солнца)

- Запуск: 2 марта 1994 года.
- Сход с орбиты: 4 марта 2001 года.

КОРОНАС-Ф

- Запуск 30 января 2009.
- Менее чем через год, 1 декабря 2009 года, вся научная аппаратура на спутнике была выключена из-за неполадок с электропитанием.
- Причиной поломки спутника стали ошибки при расчётах системы электропитания.

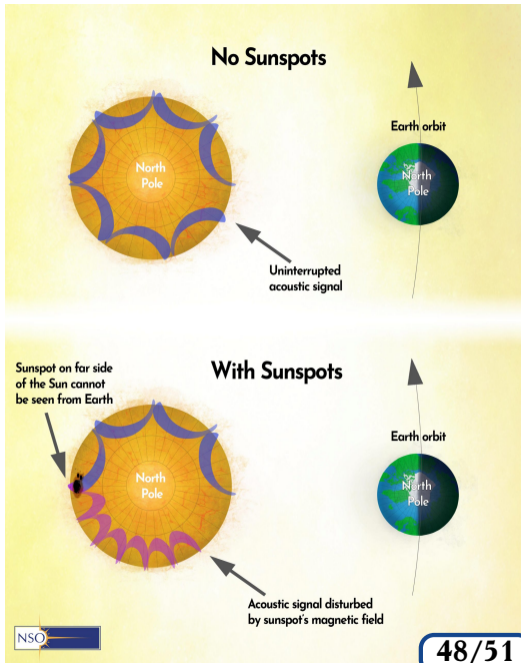
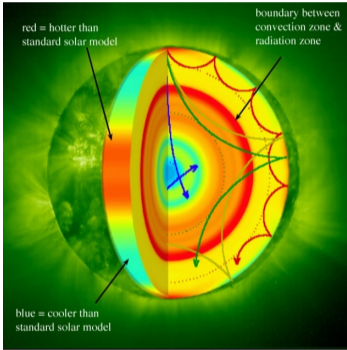


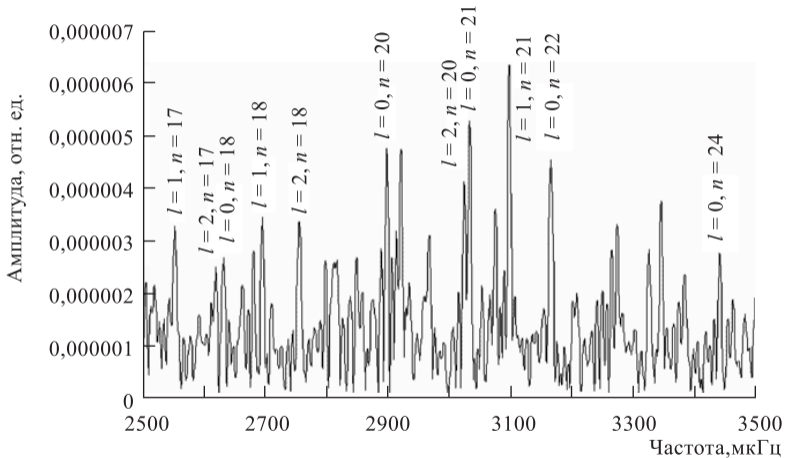


## Гелиосейсмология

- Различные моды колебаний относятся к различным слоям.
- Вращение приводит к снятию вырождения собственных мод колебаний и расщеплению линий.
- Иначе говоря, наряду с основной линией, не зависящей от вращения, появляются дополнительные линии, отстоящие от основной линии на некоторое расстояние, которое зависит от скорости вращения соответствующих слоёв.
- Это происходит аналогично появлению компонент (снятию вырождения некоторых линий) в спектре атома под влиянием магнитного поля.
- Тем самым удается с известной точностью найти полную картину внутреннего вращения Солнца.
- Знание внутреннего вращения представляет особенно большую ценность для динамо-теории генерации магнитных полей на Солнце.

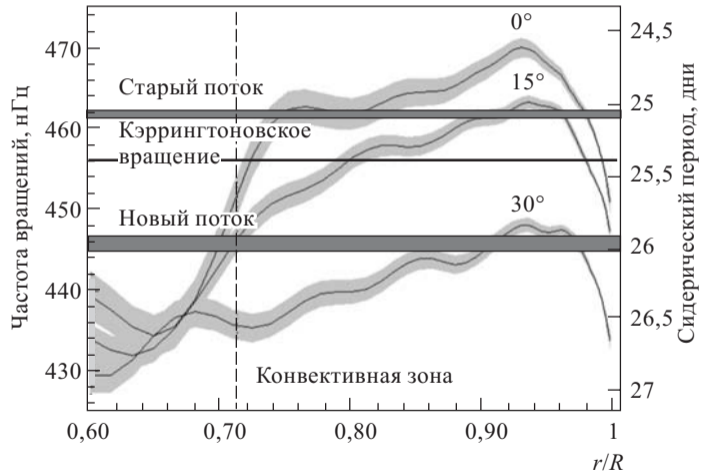
# Гелиосейсмология





Спектр собственных колебаний Солнца по наблюдениям с борта спутника КОРОНАС-Ф (эксперимент ДИФОС).

# Гелиосейсмология



Зависимость частоты вращения Солнца от расстояния от центра Солнца и широты. На левой оси указаны скорости вращения относительно звезд. Прямыми линиями указаны наблюдаемые значения скорости вращения магнитных полей, всплывающих в начале цикла, средние значения магнитных полей, существующих весь цикл, и старых магнитных полей в конце 11-летнего периода активности (SOHO/MDI).

## Гелиосейсмология

- Измерена толщина конвективной зоны Солнца, составляющая 29% солнечного радиуса, т. е. около 200 тыс. км. Ее не удалось надежно определить посредством расчетов из-за несовершенства полукачественной теории конвекции, в которой присутствовали достаточно произвольно задаваемые параметры.
- Восстановлена зависимость скорости звука от расстояния до центра Солнца на интервале от  $0.2$  до  $0.98R_{\odot}$ .
- Установлено, что конвективная зона сохраняет дифференциальный характер вращения. Глубже расположенная зона лучистого переноса энергии вращается со скоростью около  $2 \cdot 10^{-6}$  рад/с, не меняющейся с широтой и глубиной, т. е. ее вращение твердотельное.
- Выявлены погрешности стандартных моделей в лучистой зоне, вызванные неточным описанием переноса излучения. Гелиосейсмические данные позволили уточнить коэффициенты «непрозрачности» солнечной плазмы.