

Э. Кэбин

Физический факультет МГУ  
НИИ Ядерной Физики МГУ



# Физика нейтрино

*С тех пор как Паули в 1933 г. постулировал существование нейтрино, оно остается одной из наиболее интересных частиц ядерной физики*

**Дж. Аллен.**

*"...В микромире должно быть много неожиданностей. Но, без сомнения, удивительнейшая из всех элементарных частиц - это нейтрино..."*

**Бруно Понтекорво.**

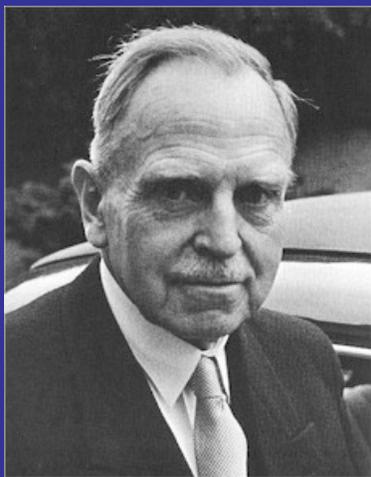
# Бета-распад



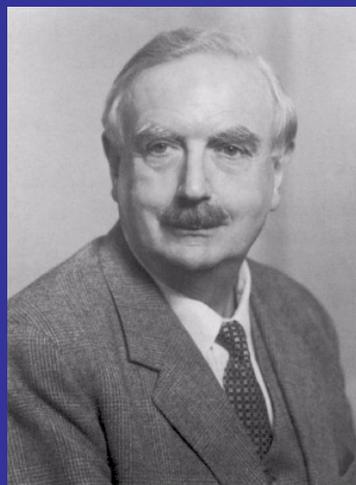
Еще в 1911 году у Л. Мейтнер и О. Гана возникло подозрение, что спектр бета-частиц скорее непрерывный, чем дискретный. Позднее (1920-27 гг) в работах Ч. Эллиса, Дж. Чедвика непрерывный характер спектра бета-частиц был установлен окончательно.



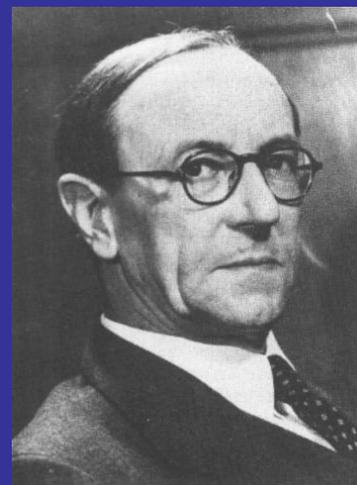
Лиза Мейтнер



Отто Ган

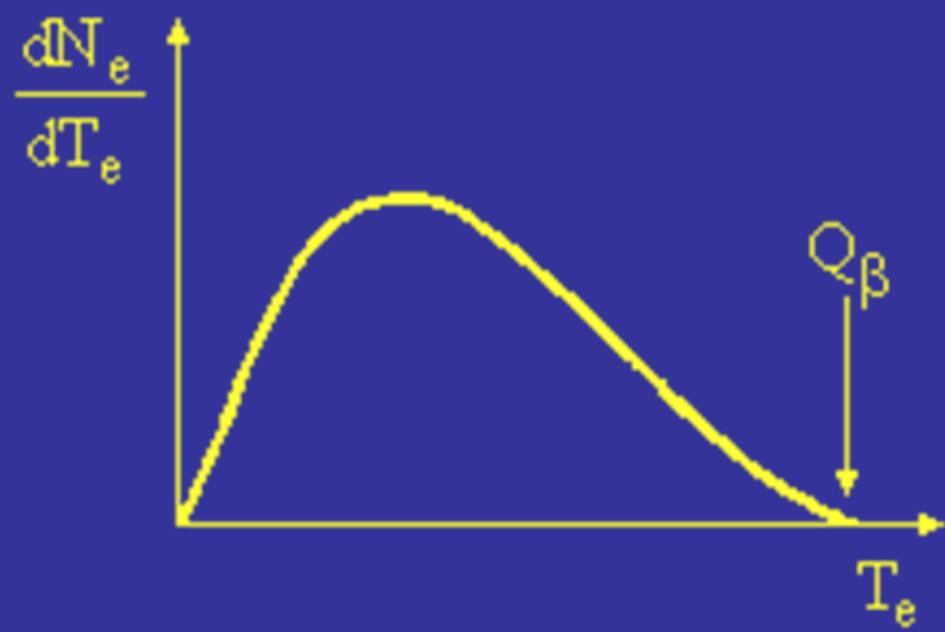


Чарльз Эллис



Джеймс Чедвик

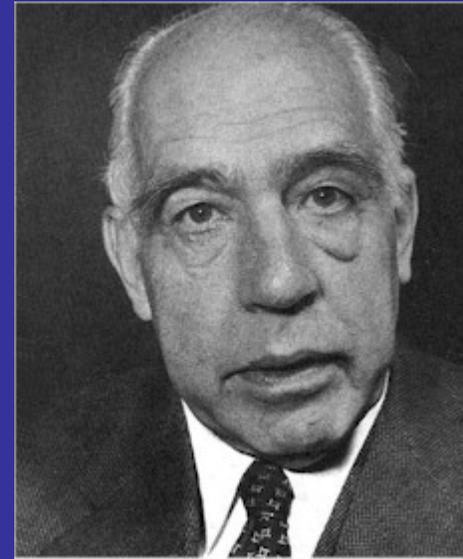




# Закон сохранения энергии выполняется не всегда!!!???



Лев Ландау



Нильс Бор

Лучше вообще об этом не думать, как и о новых налогах.

П. Дебай



# 4 декабря 1930 года

«Я допускаю, что мой прием может на первый взгляд показаться довольно невероятным, потому что, если бы нейтрон существовал, он был бы давно открыт. Тем не менее, кто не рискует, тот не выигрывает. Поэтому мы должны серьезным образом обсуждать любой путь к спасению».

*M. Pauli. Philosophen uf 24. 0393*  
Abschrift/15.12.30 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der  
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift  
Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Des. 1930  
Uraniastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst  
ansuhören bitte, Ihnen das näherem auseinandersetzen wird, bin ich  
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie  
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg  
verfallen um den "Wechsel Satz" (1) der Statistik und den Energienatz  
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale  
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,  
welche den Spin 1/2 haben und das Anschlussprinzip befolgen und  
~~sich~~ von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie  
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen  
müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und  
jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche  
beta-Spektrum wäre dann verständiglich unter der Annahme, dass beim  
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert  
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron  
konstant ist.



Вольфганг Паули

Частица, которую мы называем нейтроном, была открыта в 1932 г.

Несмотря на то, что письмо «радиоактивным дамам и господам» в Тюбинген Паули отправил, он считал что идея слишком незрелая, чтобы ее публиковать.

"Я сделал сегодня что-то ужасное. Физику-теоретика никогда не следует делать такого. Я предположил нечто, что никогда нельзя будет проверить экспериментально."



Вальтер Бааде

Лишь в октябре 1933 на 7-м Сольвеевского конференции в Брюсселе, Паули осмелился представить свою гипотезу.



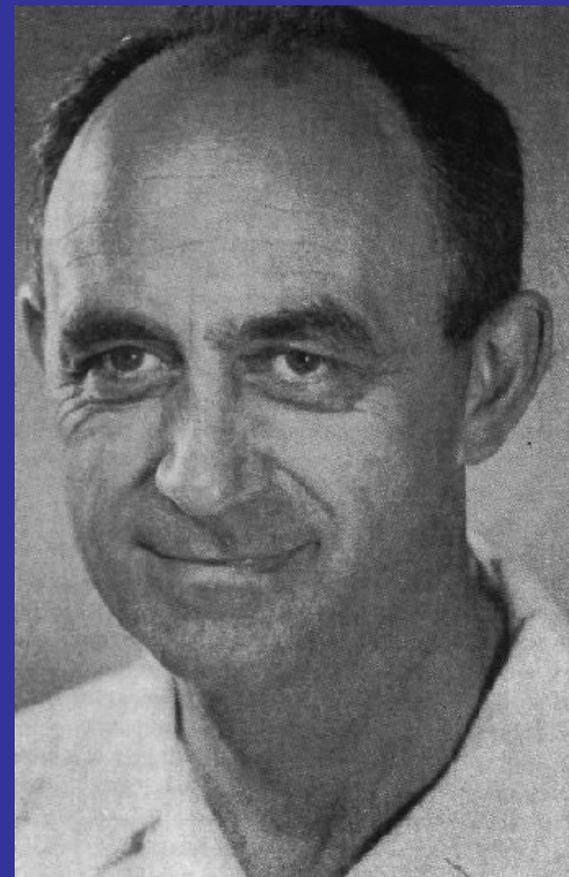
Прошло еще 23 года, прежде чем было получено экспериментальное доказательство существования нейтрино.

В 1933 г. Э. Ферми, использовал гипотезу нейтрино и создал теорию бета-распада.

В рамках этой теории удалось объяснить все основные черты бета-распада.

Была рассчитана форма спектра бета-частиц.

Оказалось, что она вблизи верхней границы энергии очень чувствительна к массе нейтрино, что масса нейтрино много меньше массы электрона и, возможно, равна нулю.



Энрико Ферми

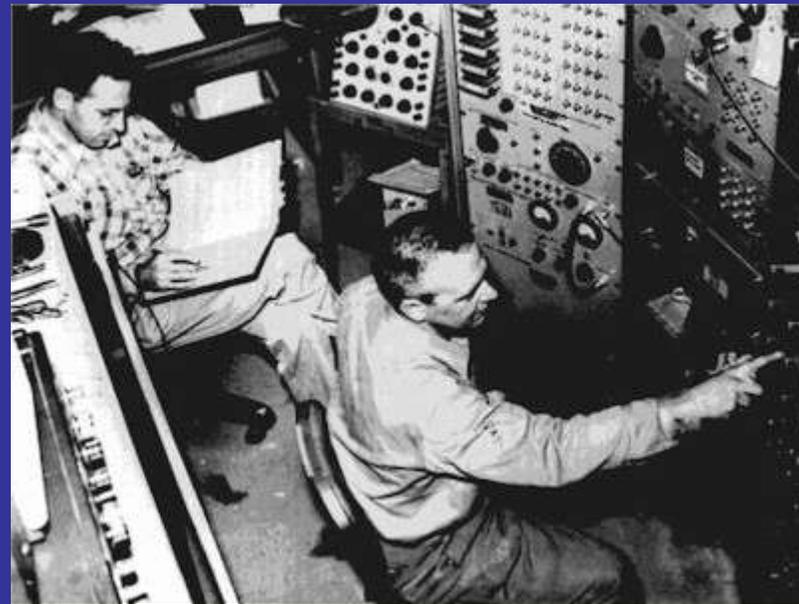


Фред Райнес  
Нобелевская премия  
в 1995 г.



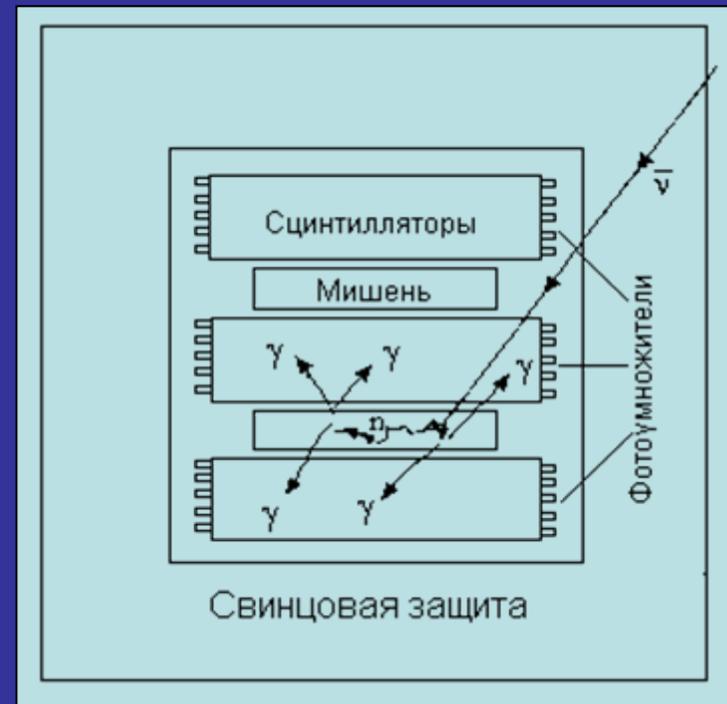
Клайд Коуэн

"Клайд, давай работать над проблемой нейтрино". Его мгновенный ответ был: "Замечательная идея!" Он знал о нейтрино так же мало, как и я, но он был хорошим экспериментатором и отчаянно храбрым человеком. Поэтому мы ударили по рукам и приступили к работе над нейтрино"



Фред Райнес и Клайд Коуэн в центре управления хэнфордского эксперимента "Project Poltergeist" (1953)

Эксперименты продлились три года, с 1953 по 1956 год. Окончательный эксперимент был проделан вблизи реактора в Саванна Ривере. Детектор состоял из двух баков, в которых было по 200 литров воды, в воде было растворено 40 кг хлорида кадмия. Каждый из баков был окружен емкостями со сцинтилирующей жидкостью, каждая из трех емкостей содержала по 110 пятидюймовых фотоумножителей. Детектор был помещен на глубину 12 метров в 11 метрах от реактора. Детектор регистрировал примерно 3 антинейтрино в час.



**Существование нейтрино было доказано!**

Сечение  $\sim 10^{-43}$  см<sup>2</sup>



<b>URGENT SERVICE</b>		<b>WESTERN UNION</b>		<b>DEFERENTIAL SERVICE</b>	
Check the class of service desired. Indicate this message will be sent as a full-rate telegram.		NO. 100		Check the class of service desired. Indicate the message will be sent as follows:	
PULL RATE TELEGRAM		PULL RATE		LETTER TELEGRAM	
DAY LETTER				DAY MESSAGE	
NIGHT LETTER					
NO. WHEN C. O. OF NO.	TO OR FROM	DATE	MESSAGE TO THE ACCOUNT OF	TIME FILED	

To Professor W. Pauli 14 June 1936  
 Street and No. Zurich University  
 Care of or Apt. No. Basel Switzerland

We are happy to inform you that we have definitely detected neutrinos from your fragment by observing inverse beta decay of protons. Observed cross section agrees well with expected value. You may wish to refer to square centimeters.

Yours letter  
 Frederick Reines, Los Alamos, New Mexico  
 Box 1663  
 Sender's name and address (For reference) Sender's telephone number

14 июня 1956 г.

Мы рады сообщить вам, что мы определенно обнаружили нейтрино от фрагментов деления наблюдая обратный бета распад протонов...

Frederick REINES and Clyde COWAN  
 Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico

Спасибо за сообщение. Все приходит к тому, кто умеет ждать.

В. Паули

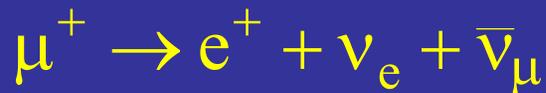
Thanks for message. Everything comes to him who knows how to wait.

Pauli

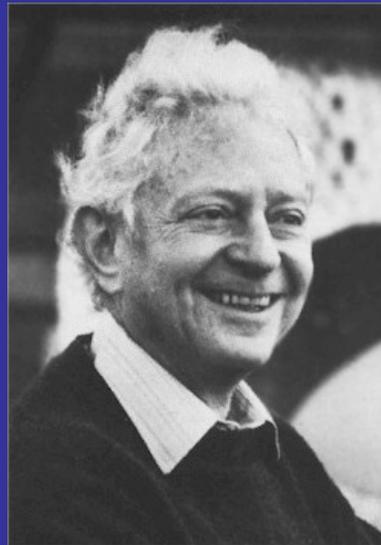
Оказалось, что есть нейтрино и анинейтрино.

# Мюонное нейтрино

При распаде  $\pi$ - и  $K$ -мезонов образуются мюоны и нейтрино. При взаимодействии этих нейтрино с протонами и нейтронами образуются только мюоны и совсем не образуются электроны и позитроны.



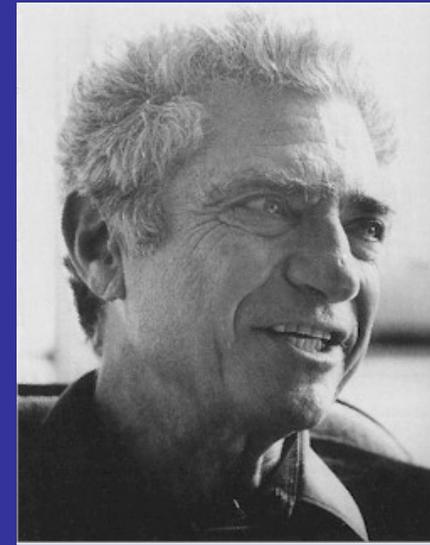
Нобелевская премия  
в 1988 г.



Леон Ледерман



Мелвин Шварц



Джек Стейнбергер

# Лептонные числа

	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$
$e^-, \nu_e$	+1	0	0
$\mu^-, \nu_\mu$	0	+1	0
$\tau^-, \nu_\tau$	0	0	+1

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^- \not\rightarrow e^- + \gamma$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$$

$$\nu_\mu + n \not\rightarrow e^- + p$$

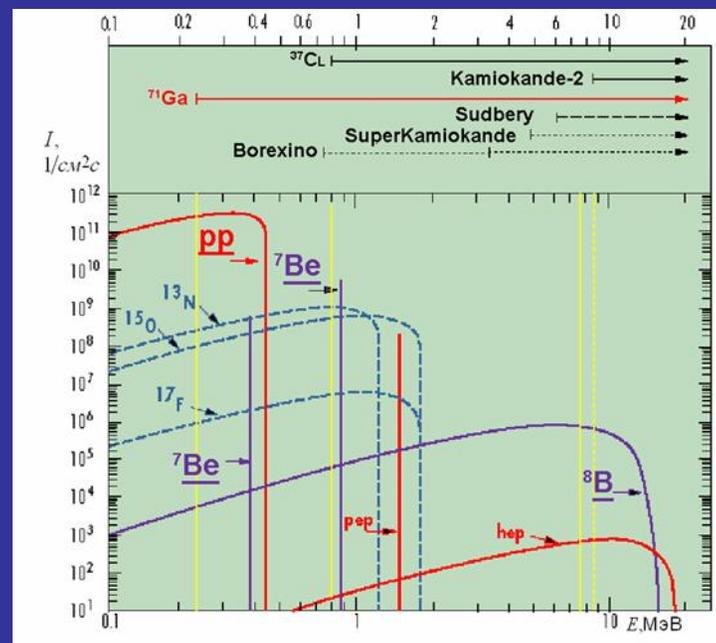
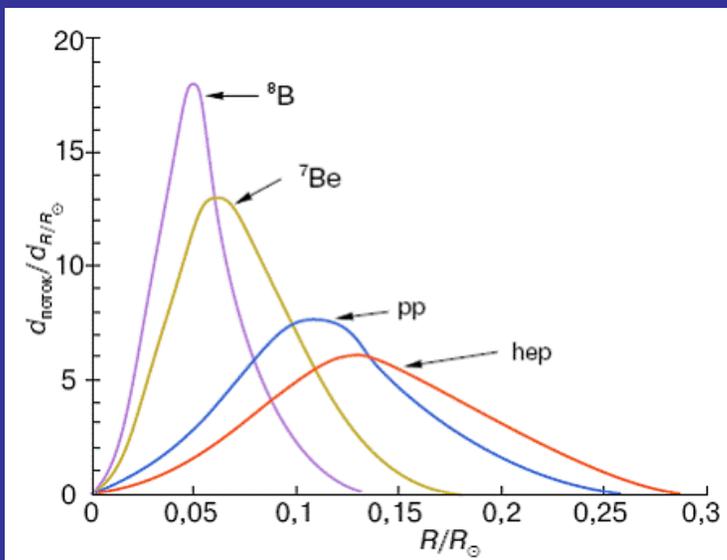
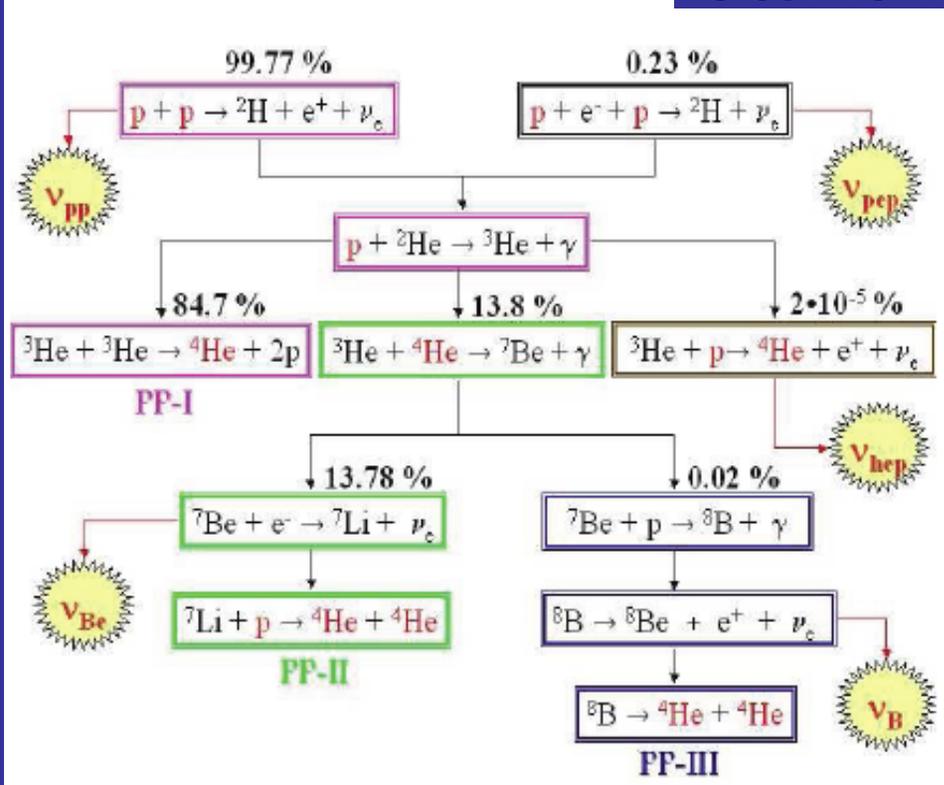
# Проблема солнечных нейтрино

pp - цикл

# Солнечные нейтрино



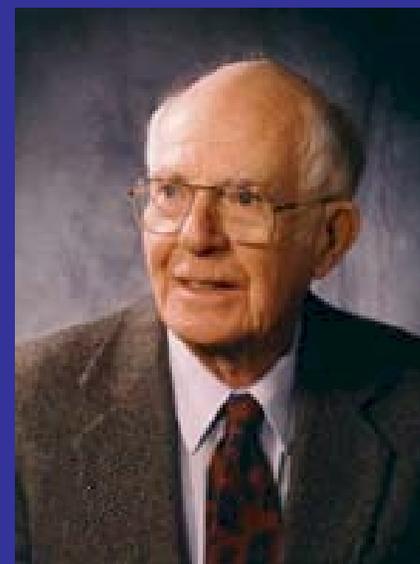
Джон Бакал



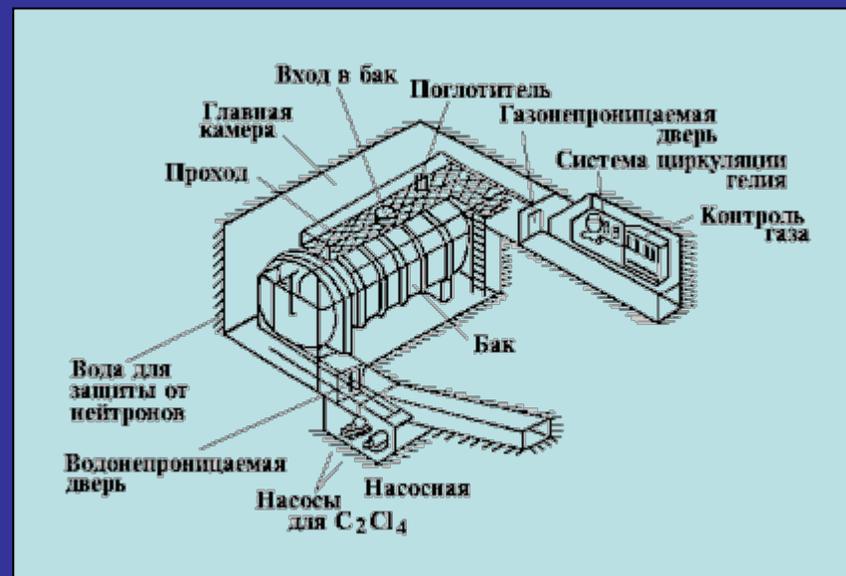
# Солнечные нейтрино

Детектор объемом 380 000 литров на глубине 1455 м в золотоносной шахте Хоумстейк-Голд-Майн (штат Южная Дакота, США).

За 125 000 долларов летом 1965 года в скальных породах была сделана полость, представлявшая собой подземный зал площадью 9x18 м и высотой 10 м. Были изготовлены и доставлены в этот зал части огромного резервуара и насосной системы, которые к лету 1966 года были собраны под землей и проверены на герметичность. К стволу шахты были доставлены 10 железнодорожных цистерн, наполненных перхлорэтиленом. Пять недель ушло только на то, чтобы заполнить резервуар.



Раймонд Дэвис



«Эксперимент в Хоумстейке начался в 1967 г. Уже в после первой экспозиции стало ясно, что поток нейтрино от Солнца был ниже предсказанного.»

За 25 лет радиохимическим методом было извлечено и измерено 2200 атомов  $^{37}\text{Ar}$ .

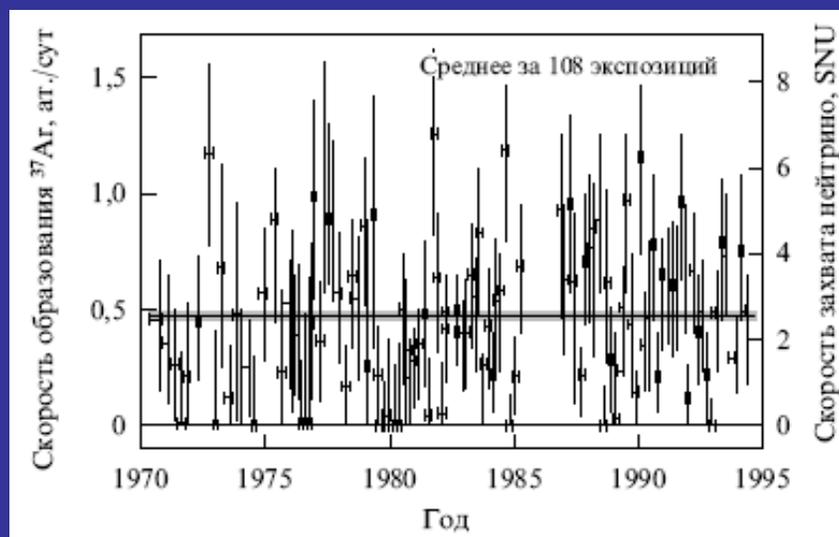
Получено значение потока солнечных нейтрино

$2.56 \pm 0.16$  (статистическая ошибка)  $\pm 0.16$  (систематическая ошибка) SNU

Стандартная солнечная модель дает

$7.6^{+1.3}_{-1.1}$  SNU

SNU (единица солнечных нейтрино) -  $10^{-36}$  захватов нейтрино на атом мишени в секунду.



# Кто виноват? Что делать?

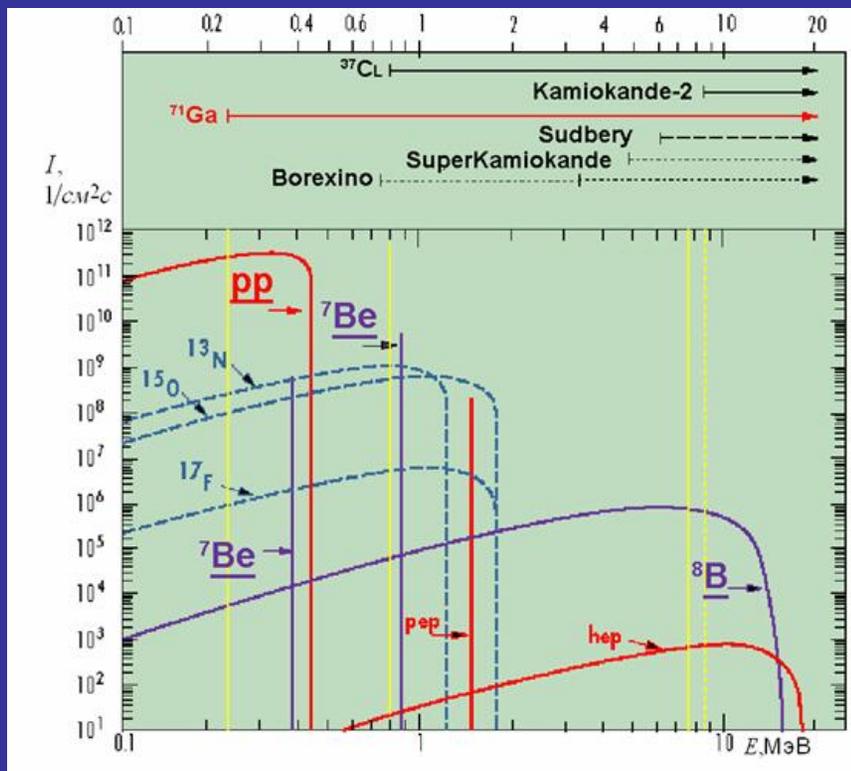
«Результаты эксперимента в Хоумстейке вызвали огромную активность теоретиков.»

Два класса возможных причин.

- Стандартная Модель Солнца
- Стандартная Модель физики частиц

**Необходимы новые эксперименты, новые установки.**

Пороговая энергия хлор-аргонного метода довольно высока и составляет  $\sim 0.8$  МэВ. Это позволяет детектировать только так называемые «борные» и «бериллиевые» нейтрино, потоки которых невелики.

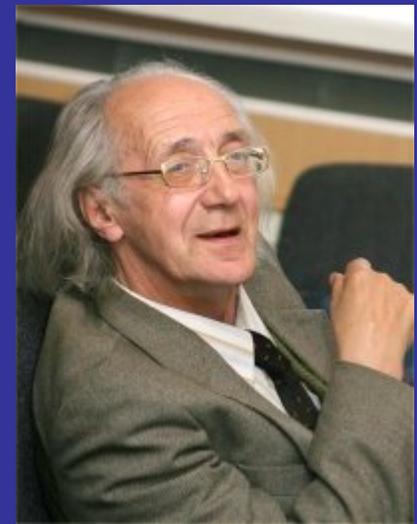


# Галлий-германиевые детекторы

Для регистрации нейтрино в этом детекторе используется реакция

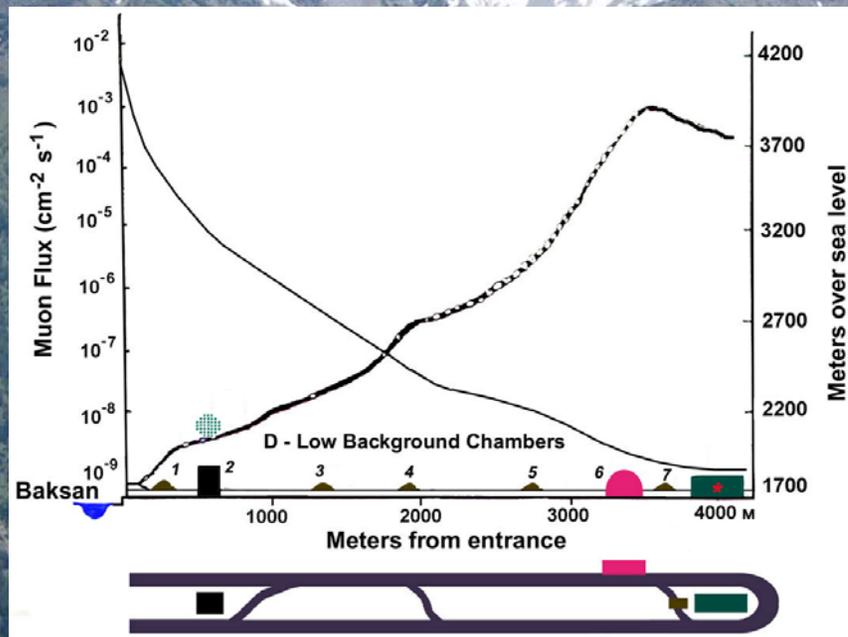


Поглощение нейтрино приводит к образованию радиоактивного изотопа  ${}^{71}\text{Ge}$  ( $T_{1/2} = 11.4$  дн). Галлиевый детектор имеет очень низкий порог регистрации нейтрино (233 кэВ) и поэтому он чувствителен к основному потоку солнечных нейтрино из реакции



Вадим Кузьмин

# Baksan Neutrino Observatory



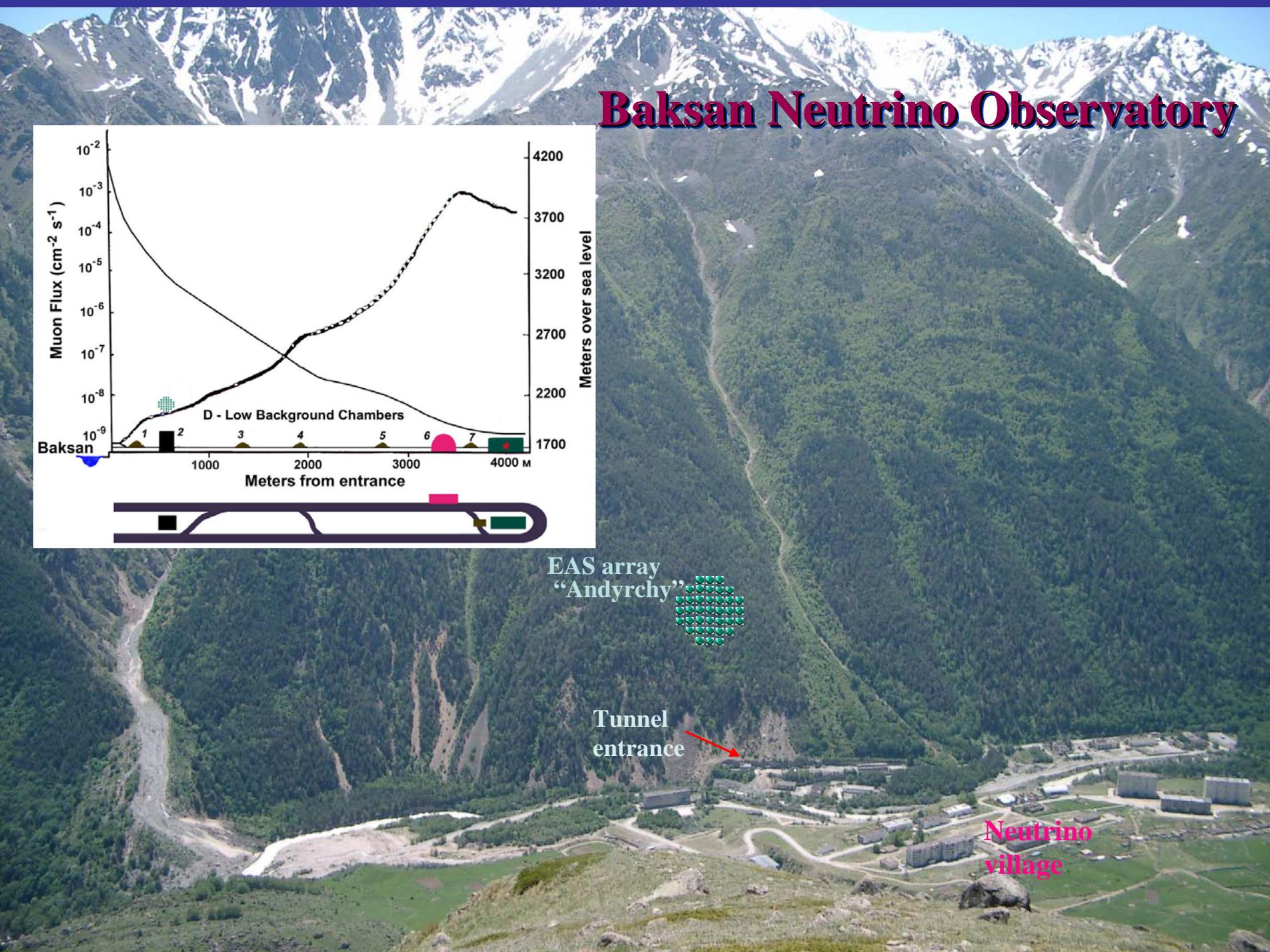
EAS array  
"Andyrchy"



Tunnel  
entrance



Neutrino  
village



Галлий-германиевый нейтринный телескоп размещен в специально построенной подземной лаборатории в Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований Российской академии наук. Горные породы над лабораторией создают защиту от мюонов космических лучей, соответствующую 4700 м водного эквивалента, и дают ослабление потока мюонов в  $10^7$  раз. В телескопе в качестве мишени используется около 50 тонн расплавленного металлического галлия, который находится в 7 химических реакторах. При ожидаемом потоке нейтрино от Солнца в 50 тоннах металлического галлия образуется в течение месяца около 25 атомов  $^{71}\text{Ge}$ . Для извлечения единичных атомов  $^{71}\text{Ge}$  из 50 тонн металлического галлия была разработана уникальная технология

С 1986 года на Галлий-германиевом нейтринном телескопе БНО ИЯИ РАН проводятся исследования в рамках Российско-Американского эксперимента SAGE.

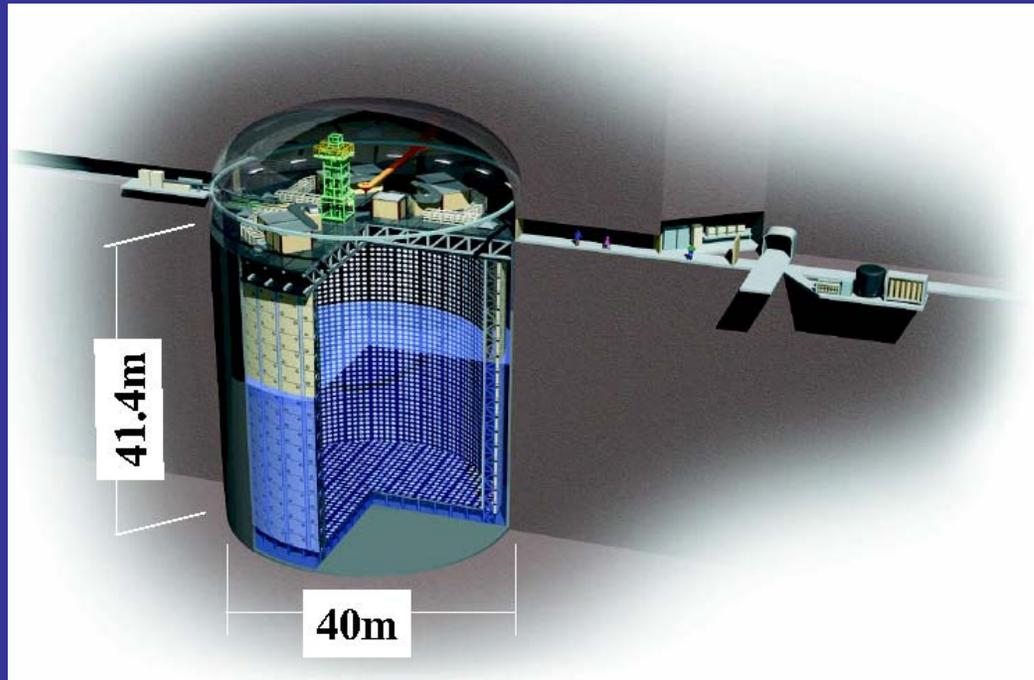
За 13 лет измерений потока солнечных нейтрино составили 53% от величины, предсказанной по Стандартной Солнечной Модели.

Похожие результаты были получены на галлий-германиевых установках GALLEX/GNO в Гран-Сассо (Италия).

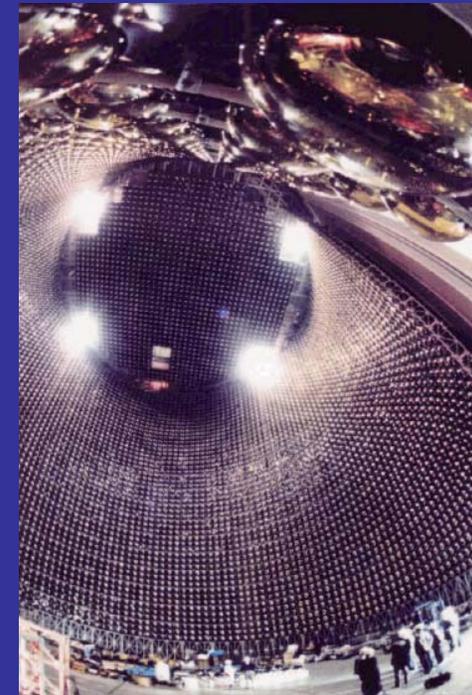


# Детектор SuperKamiokande

Это водный черенковский детектор. Он размещен в на глубине в 1.6 км (2.7 км w.e.) в шахте Камиока. Детектор представляет собой резервуар из нержавеющей стали высотой 42 м и диаметром 40 м, заполненный 50 тыс. тоннами специально очищенной воды. На стенах резервуара размещены 11146 ФЭУ (внутренний детектор + 1885 8" ФЭУ (внешний детектор).

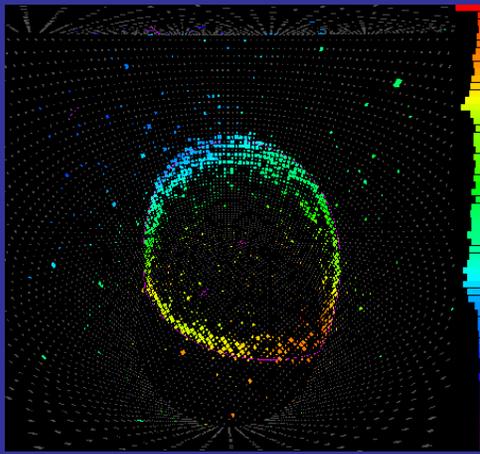


Масатоши Кошиба

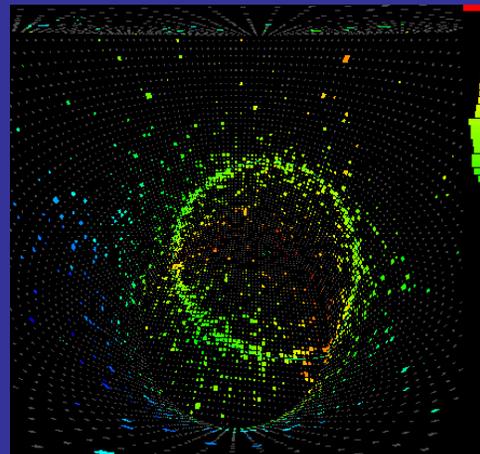


В течение 30 лет нейтринные детекторы регистрировали заметно меньше нейтрино, чем предсказывали модели Солнца.

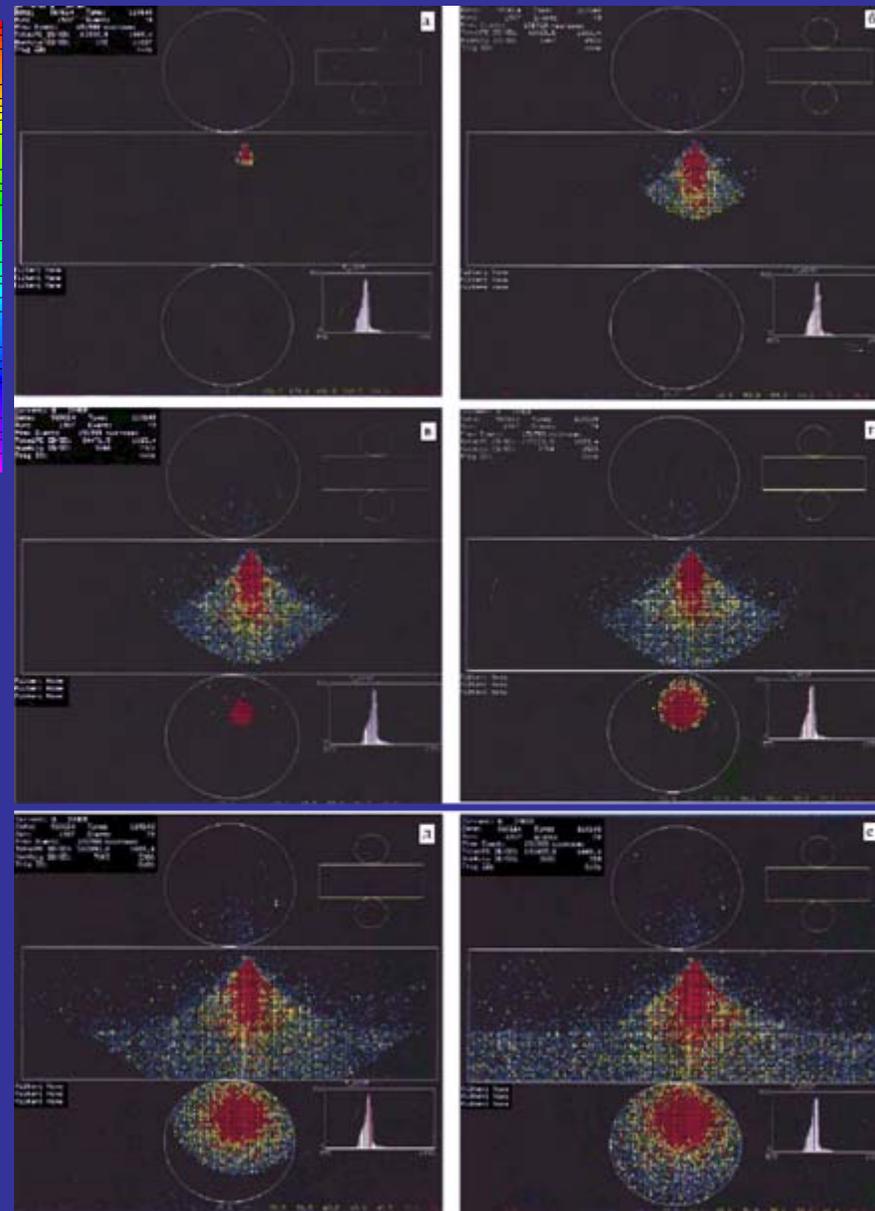
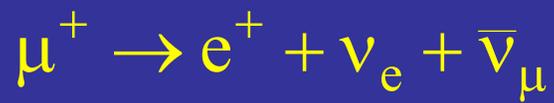
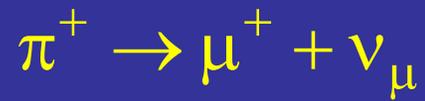
Детектор	Мишень	Данные/СМС
Хоумстейк	$^{37}\text{Cl}$	$0.33 \pm 0.03$
SAGE	$^{71}\text{Ga}$	$0.52 \pm 0.06$
GALLEX	$^{71}\text{Ga}$	$0.59 \pm 0.06$
SuperKamioKande	$e^-$ (вода)	$0.475 \pm 0.015$



мюон

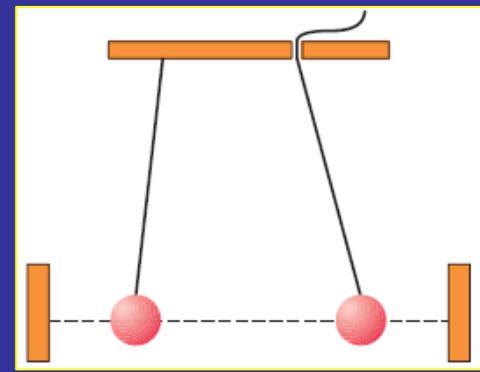


электрон



# Нейтринные осцилляции

Нейтрино с определенными лептонными зарядами не являются стационарными состояниями с определенной массой, а представляют из себя суперпозиции волновых функций частиц с определенными массами.



$$\begin{aligned} \nu_e(t) &= \nu_1(t) \cos \theta + \nu_2(t) \sin \theta & \text{или} & & \nu_1(t) &= \nu_e(t) \cos \theta - \nu_\mu(t) \sin \theta \\ \nu_\mu(t) &= \nu_2(t) \cos \theta - \nu_1(t) \sin \theta & & & \nu_2(t) &= \nu_e(t) \sin \theta + \nu_\mu(t) \cos \theta \end{aligned}$$

$\nu_1$  и  $\nu_2$  имеют определенные массы  $m_1$  и  $m_2$ ,  $\theta$  - угол смешивания. При малом угле смешивания  $\nu_1$  практически чистое электронное нейтрино.

При  $\theta = \pm\pi/2$  - мюонное.

Вероятность появления мюонных нейтрино

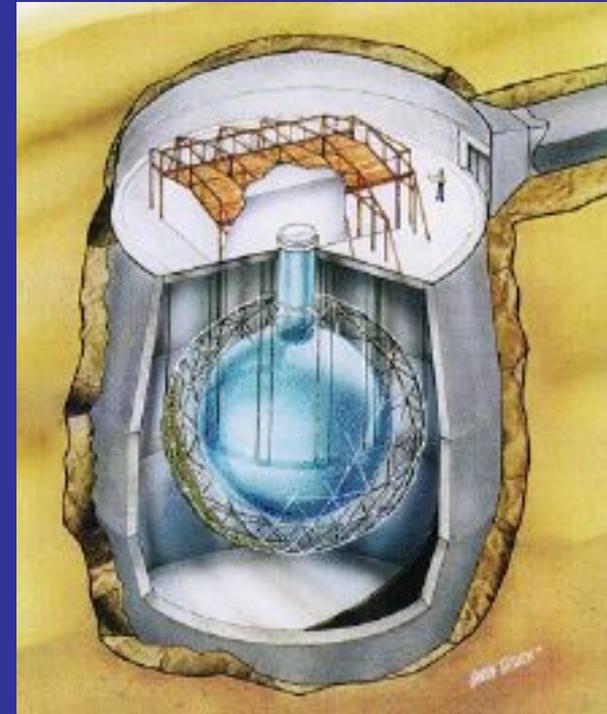
$$W = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{эВ}^2] L [\text{м}]}{E [\text{МэВ}]} \right)$$

Расстояние, на котором восстановится первоначальное соотношение компонент (длина осцилляций)

$$L^{\text{осц}} [\text{м}] = 2.5 \frac{E [\text{МэВ}]}{\Delta m^2 [\text{эВ}^2]}$$

# Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

Нейтринная обсерватория в Садбери (Канада) была построена в шахте на глубине 2070 м SNO - черенковский детектор на тяжелой воде. 1000 тонн сверхчистой тяжелой воды ( $D_2O$ ) залито в акриловый сосуд диаметром 12 метров. Черенковское излучение регистрировалось 9600 фотоумножителями, установленными на геодезической сфере диаметром 17 метров, окружающей сосуд с тяжелой водой. Детектор был погружен в сверхчистую обычную воду, которая находилась в бочкообразной полости диаметром 22 метра и высотой 34 метра, выкопанной в скале. За сутки детектор регистрировал около 10 нейтринных событий.



В SNO потоки "борных" нейтрино детектировались с помощью реакций:



Первая реакция (CC), протекающая с участием заряженных токов, чувствительна только к электронным нейтрино ( $\nu_e$ ), Вторая (NC), протекающая с участием нейтральных токов чувствительна ко всем нейтрино ( $x = e, \mu, \tau$ ).

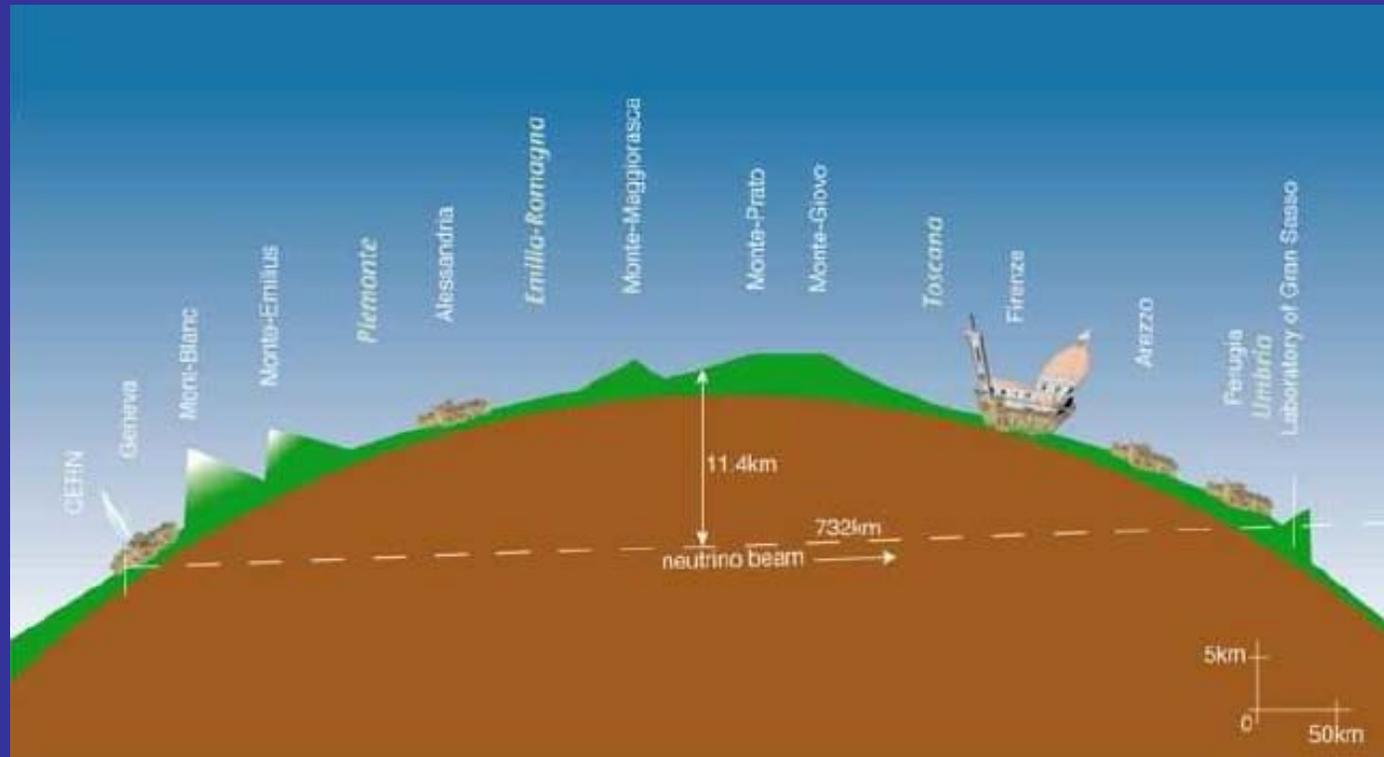
	стат.погр.	сист.погр.
$F^{\text{CC}}(\nu_e) = 1.76$	+0.06	+0.09
	-0.05	-0.09
$F^{\text{ES}}(\nu_x) = 2.39$	+0.24	+0.12
	-0.23	-0.12
$F^{\text{NC}}(\nu_x) = 5.09$	+0.44	+0.46
	-0.43	-0.43

Оценка полного потока борных солнечных нейтрино находится в хорошем согласии со стандартной моделью Солнца.

$$F_{\text{СМС}}(\nu) = 5.05 \quad \begin{matrix} +1.01 \\ -0.81 \end{matrix}$$

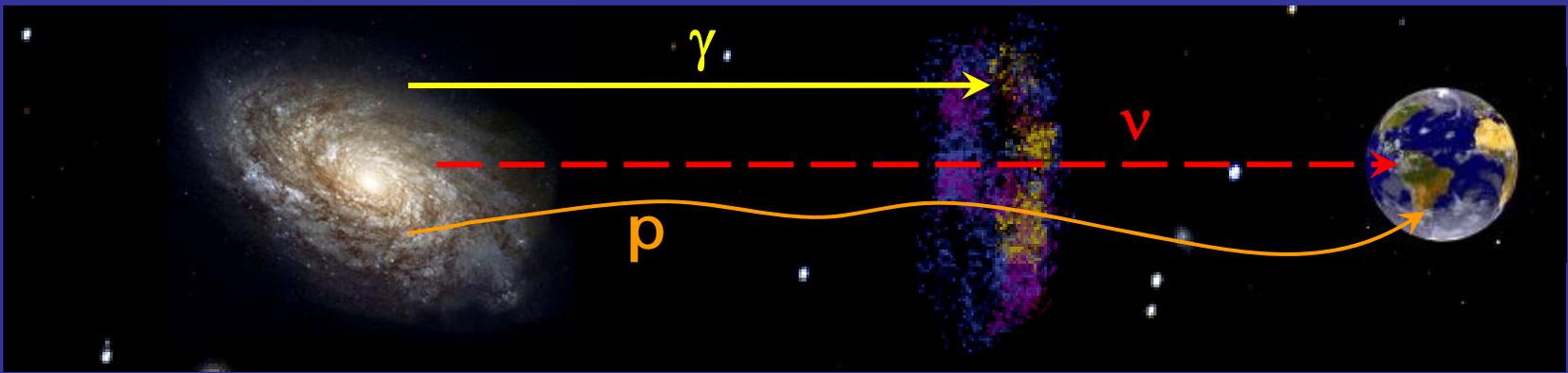
# Эксперименты с ускорительными нейтрино

- MINOS
- K2K
- CNGS



- Возможность формирования потока нейтрино определенного сорта с хорошо известным (расчетным и непосредственно измеренным) спектром как основного пучка, так и примесей.
- Обеспечение контроля интенсивности, временной структуры, направления и профиля пучка.

# Нейтрино в исследованиях Земли и космоса



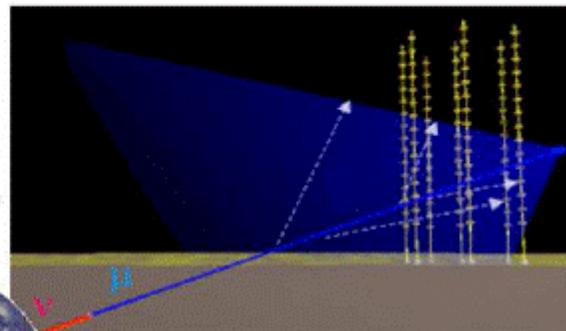
На ранних стадиях горячей Вселенной, в течение приблизительно 1 с после начала её расширения, нейтрино находились в тепловом равновесии с веществом. От этой эпохи нам остался сильно остывший с тех пор газ космологических нейтрино (реликтовые нейтрино).

Потоки нейтрино, генерируемые при гравитационных коллапсах звезд, отличаются от солнечных нейтрино, во-первых, большими энергиями (средняя энергия 10-15 МэВ) и, во-вторых, наличием антинейтрино. Суммарная энергия, уносимая нейтрино, составляет около 15% всей массы звезды. Весь нейтринный импульс длится 10-20 с.

Нейтринное излучение высокой энергии (50-1000 ГэВ) генерируется в космических объектах и результате столкновений ускоренных частиц с атомными ядрами или с низкоэнергетическими фотонами. К наиболее интересным галактическим источникам нейтрино относятся молодые (до 1 года) оболочки сверхновых и "скрытые источники" - пульсары или чёрные дыры, окружённые большой толщей вещества.

11  
12  
13

**регистрация  
черенковского света**



**нейтрино проходит  
сквозь Землю**



**взаимодействие нейтрино  
в земной коре**

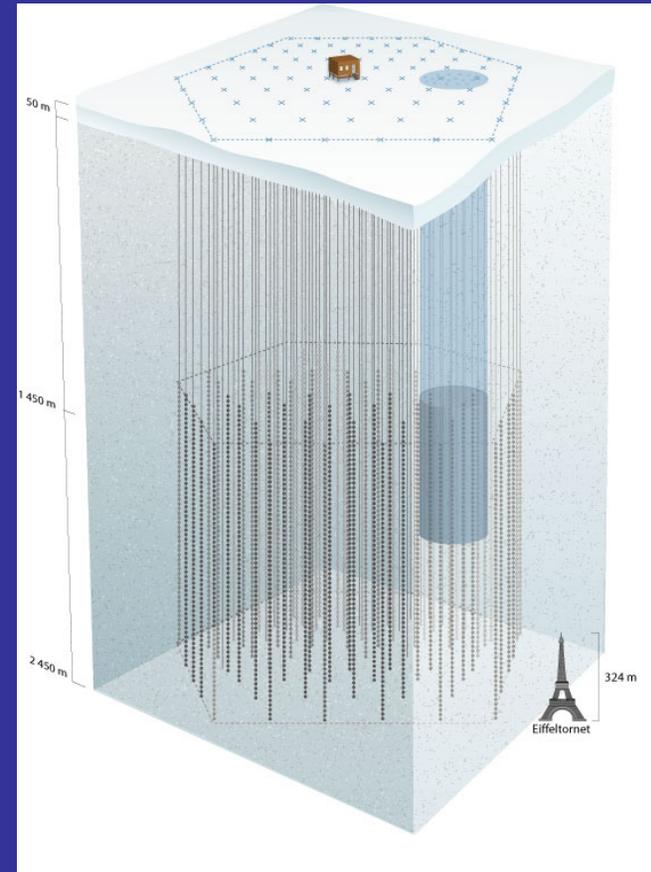


**источник  
высокоэнергетических  
нейтрино**

14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100

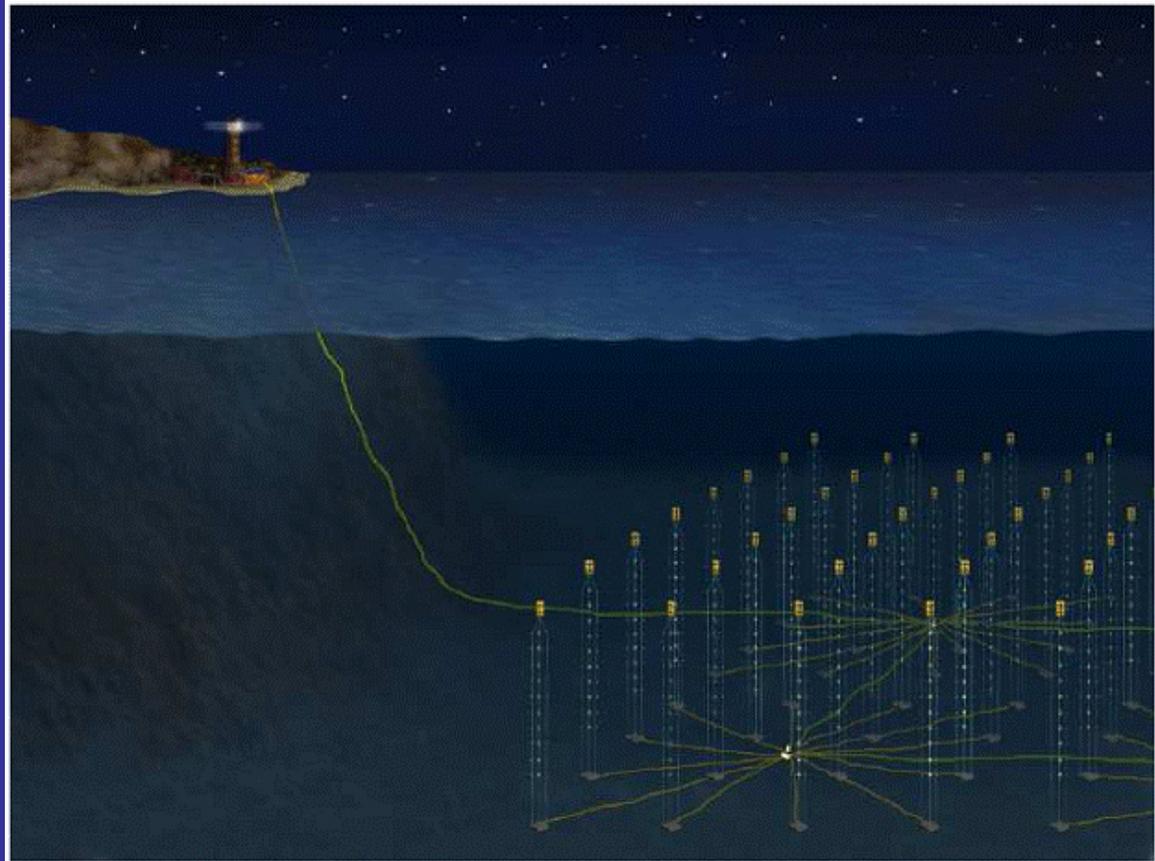
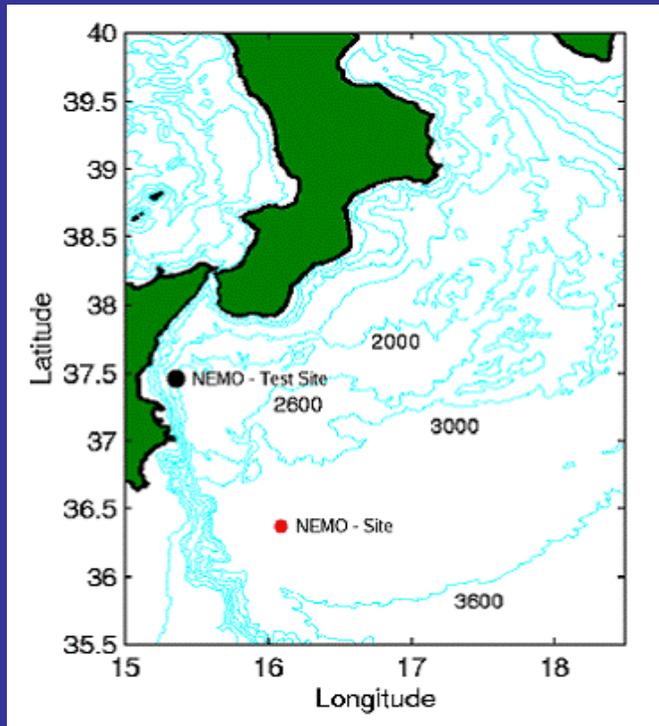
# Ice Cube

80 струн фотоумножителей, каждая из которых содержит 60 ЦОМ. Струны образуют на поверхности шестиугольную сетку со стороной в 125 м. ЦОМы помещены в струны с интервалом 17 метров, между 1450 и 2450 метрами ниже поверхности.



# Детектор NEMO

81 струны. На каждой струне 64 ФЭУ. Планируемый объем детектора 0,88 км<sup>3</sup>.



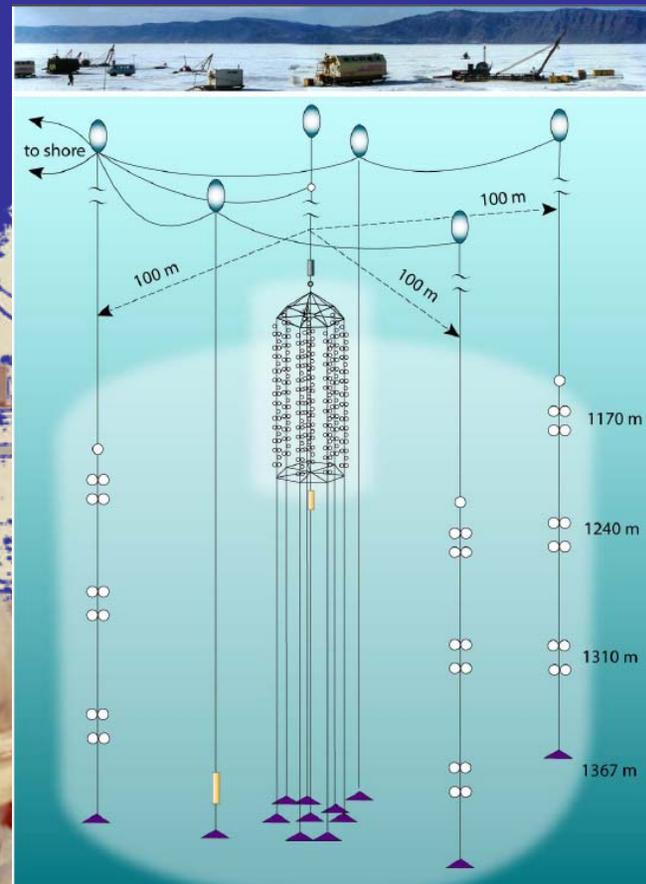
# Байкальская нейтринная обсерватория



2012 г. - первая очередь (0.1-0.3) км<sup>3</sup>  
2014 г. - вторая очередь (0.3-0.6) км<sup>3</sup>  
2016 г. - вторая очередь (0.6-0.9) км<sup>3</sup>



Григорий Домогацкий и  
Георгий Зацепин

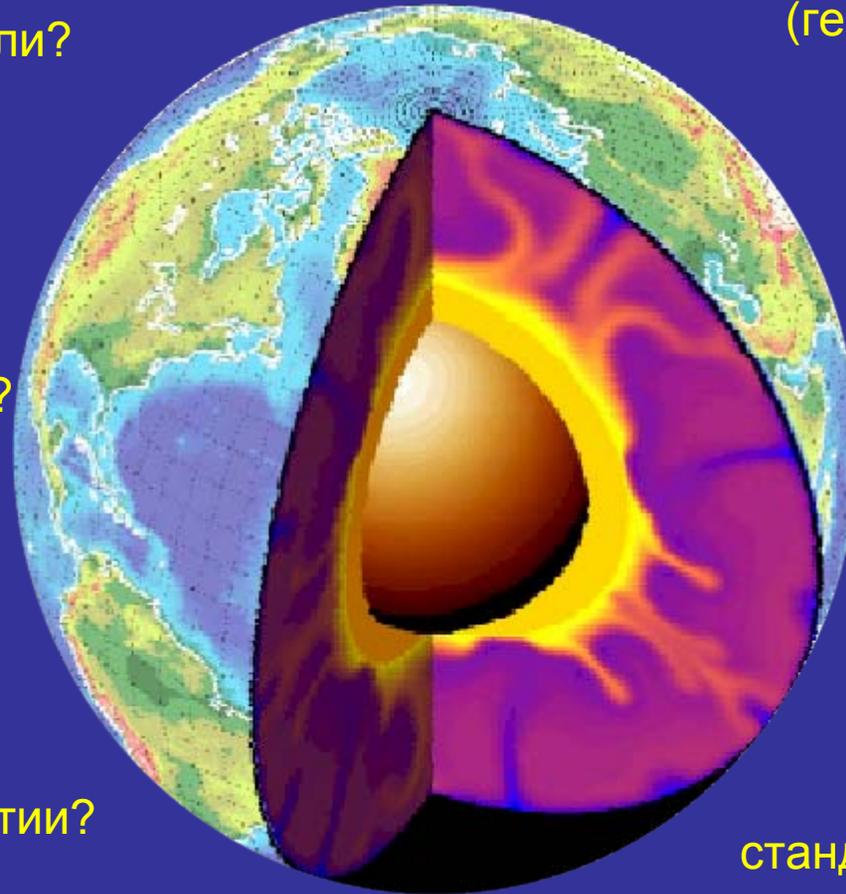


# Открытые вопросы естественной радиоактивности Земли

Каков радиогенный вклад  
в тепло Земли?

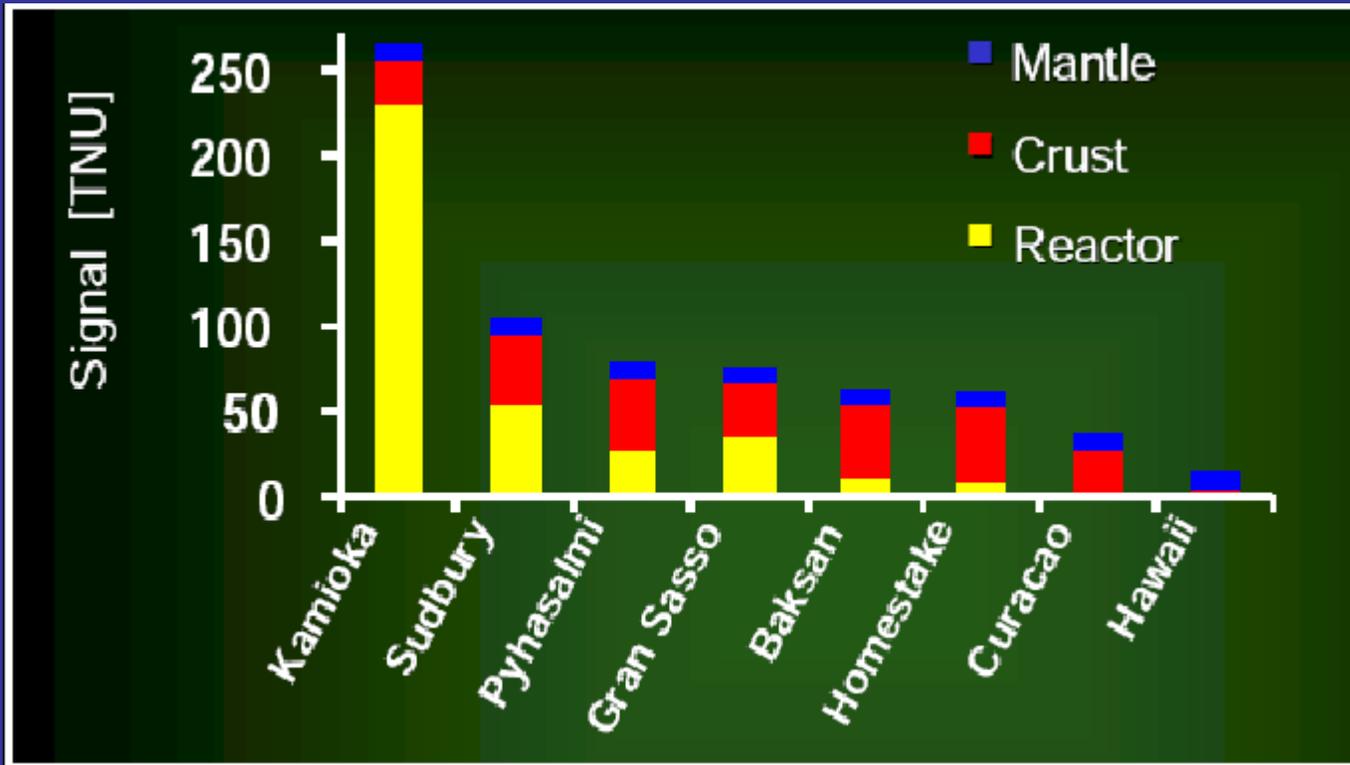
Что скрыто в земном ядре?  
(геореактор,  $^{40}\text{K}$ , ...)

Сколько U и Th в коре?

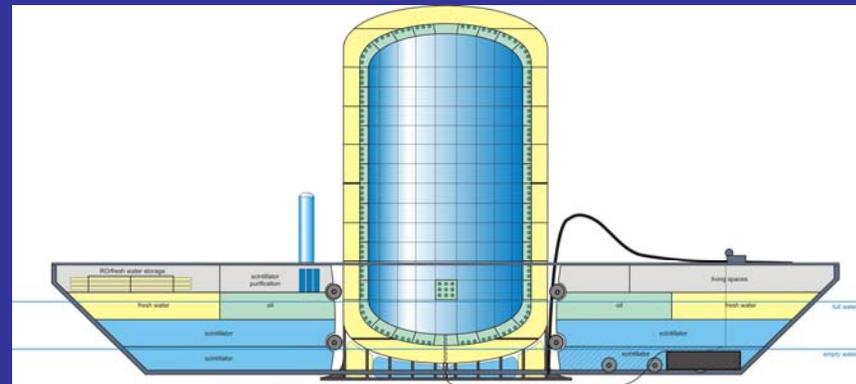


Сколько U и Th в мантии?

Согласуется ли  
стандартная геохимическая  
модель с данными о  
геонейтринно?



НАНОХАНО (10 кт жидкого сцинтиллятора)



**Спасибо за внимание!**

