

Event : 147960211  
Event time : 16:55:04.906560  
TRG Type(s) : LE HE SLE OD SHE  
TotalPE ID/OD : 6313.4 786.2  
NumHits ID/OD : 1405 72  
Time Diff : 3645.461426 us

<- Rotate -> : -6 PI / 10

# Вводный курс по физике нейтрино

*Сергеева В.С.*  
*viktoriya\_srgyv@hotmail.com*

Time Window (ns): [ -300.0, 1000.0 ]

LAPP/IN2P3  
25/04/2018



# Содержание

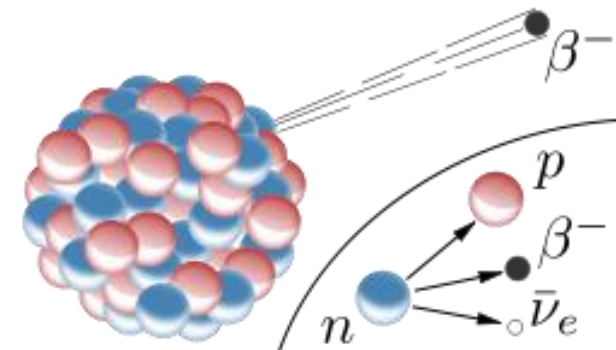
- Стандартная Модель

- Радиоактивность

Гипотеза о существовании нейтрино

- Экспериментальное открытие нейтрино и его свойства
  - Источники нейтрино
  - Феномен осцилляции нейтрино
  - Нейтринные детекторы
  - Современные эксперименты

1968: SLAC <b>u</b> up quark	1974: Brookhaven & SLAC <b>c</b> charm quark	1995: Fermilab <b>t</b> top quark	1979: DESY <b>g</b> gluon
1968: SLAC <b>d</b> down quark	1947: Manchester Univ.. <b>s</b> strange quark	1977: Fermilab <b>b</b> bottom quark	1923: Washington Univ. <b><math>\gamma</math></b> photon
1956: Savannah River Plant <b><math>\nu</math></b> electron	1982: Brookhaven <b><math>\nu</math></b> muon	2000: Fermilab <b><math>\nu</math></b> tau neutrino	1983: CERN <b>W</b> W boson
1897: Cavendish Laboratory <b>e</b> electron	1937: Caltech & Harvard <b><math>\mu</math></b> muon	1976: SLAC <b><math>\tau</math></b> tau	1983: CERN <b>Z</b> Z boson
			2012: CERN <b>H</b> Higgs boson



# Стандартная Модель

## Стандартная модель (СМ)

- Теоретическое «сооружение» физики
- Описание ЭМ, слабое и сильное взаимодействие всех элементарных частиц.
- Не включает ВСЮ физику (гравитация, тёмная материя/энергия).

Составные части атома  
(и электрон)

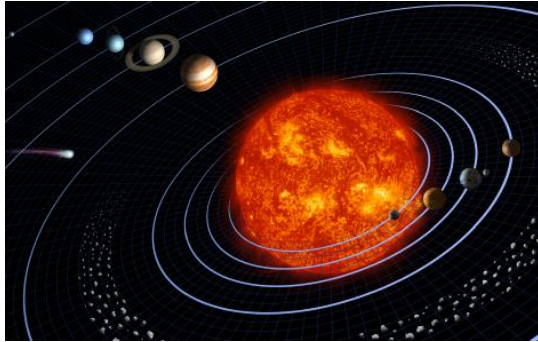
## Какова роль нейтрино?

- В СМ масса нейтрино = 0

Сегодня - нейтрино существует и имеет массу.

1968: SLAC <b><i>u</i></b> up quark	1974: Brookhaven & SLAC <b><i>c</i></b> charm quark	1995: Fermilab <b><i>t</i></b> top quark	1979: DESY <b><i>g</i></b> gluon
1968: SLAC <b><i>d</i></b> down quark	1947: Manchester Univ.. <b><i>s</i></b> strange quark	1977: Fermilab <b><i>b</i></b> bottom quark	1923: Washington Univ. <b><math>\gamma</math></b> photon
1956: Savannah River Plant <b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	1982: Brookhaven <b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	2000: Fermilab <b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	1983: CERN <b><i>W</i></b> W boson
1897: Cavendish Laboratory <b><i>e</i></b> electron	1937: Caltech & Harvard <b><math>\mu</math></b> muon	1976: SLAC <b><math>\tau</math></b> tau	1983: CERN <b><i>Z</i></b> Z boson
			2012: CERN <b><i>H</i></b> Higgs boson

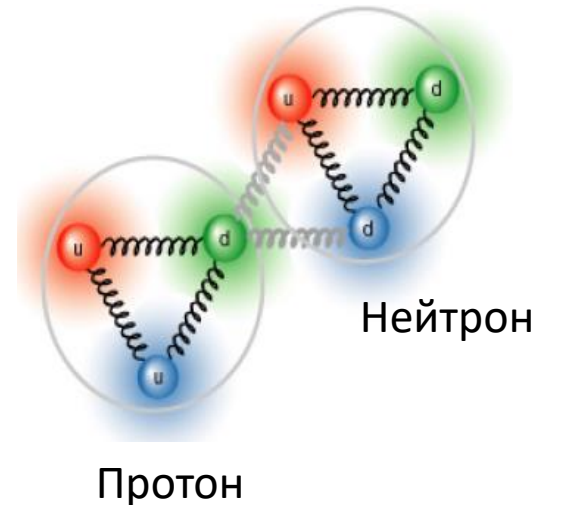
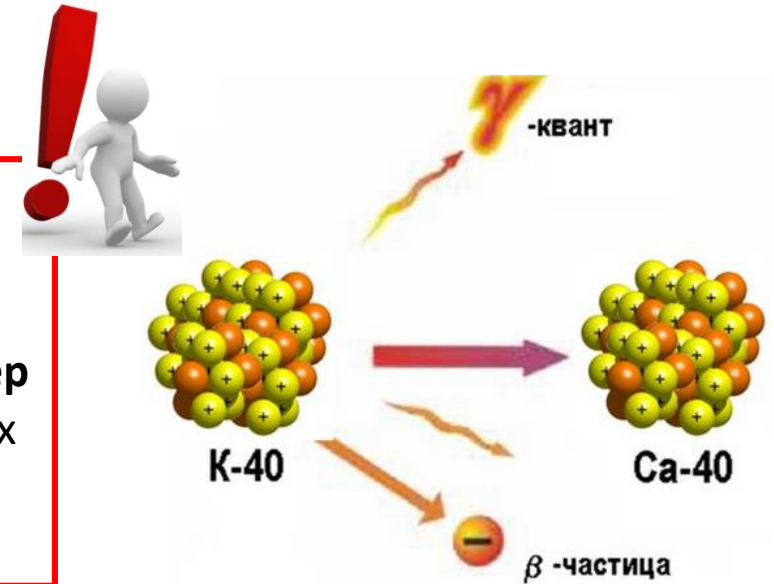
# Элементарные частицы: что заставляет их держаться вместе?



В Природе существует 4 типа взаимодействий: гравитация, электромагнитное (ЭМ) взаимодействие, слабое взаимодействие и сильное взаимодействие.

Слабое взаимодействие  
**Бета-распад радиоактивных ядер**  
один из 3 основных типов радиоактивности.

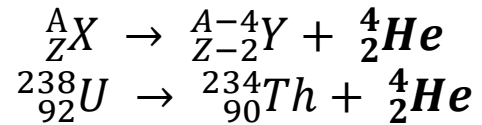
Сильное взаимодействие  
- Связь между кварками в протонах и нейтронах.  
- Притяжение между протонами и нейтронами в ядрах.



# Радиоактивность

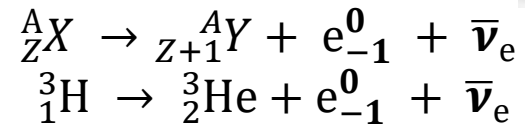
- **Радиоактивность** - распад атомных ядер на элементарные частицы /  $\gamma$ -кванты / ядерные фрагменты.
- Существует 3 вида распада атомных ядер.

## 1. $\alpha$ -распад



→ **Сильное взаимодействие**

## 2. $\beta$ -распад



→ **Слабое взаимодействие**



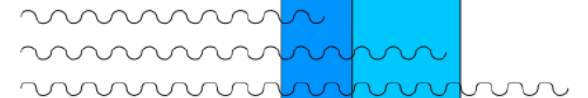
$\alpha$



$\beta$

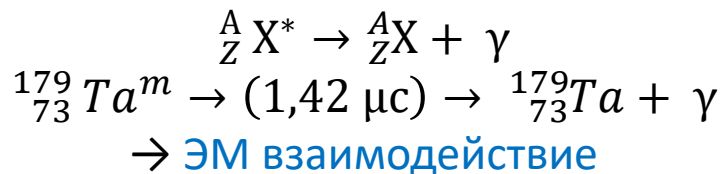


$\gamma$



## 3. $\gamma$ -распад

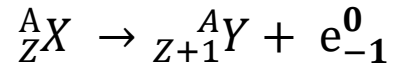
Переход ядра из возбужденного состояния в основное состояние.  
Излучение  $\gamma$ -квантов.



**Вспомните о силах  
Природы!!!**

# Гипотеза о существовании нейтрино

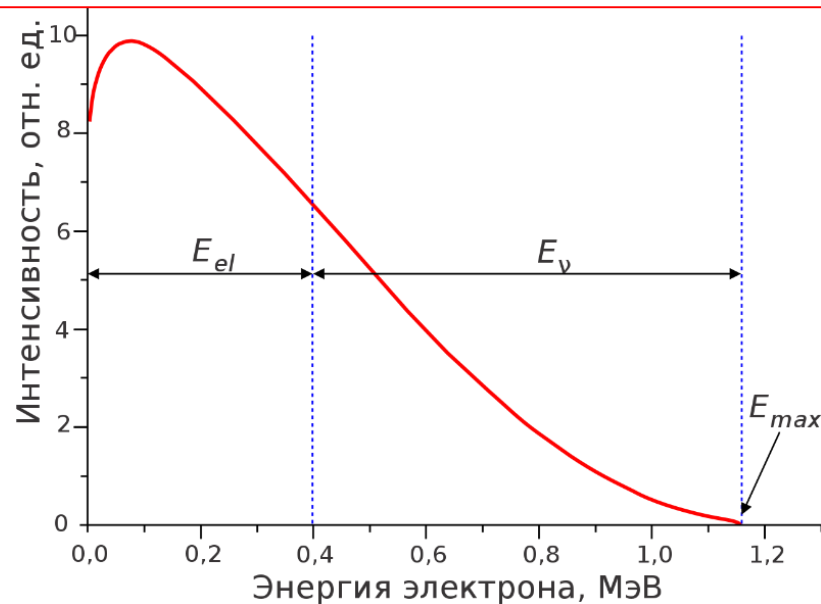
**$\beta$ -распад до 1911 г.**



Теория: энергия  $e^-$  дискретная

**1911-1914:** Эксперименты показали непрерывный спектр энергии испускаемых  $e^-$ .

Противоречие закону сохранения энергии  $\rightarrow$  часть энергии теряется.



Как объяснить это разногласие?

1930 г.  $\rightarrow$  Паули предлагает дополнительную частицу о которой мы не знаем.

# Гипотеза о существовании нейтрино: письмо Паули

**1930 г.** Оглашение письма Паули на конференции физиков.

Письмо адресовано Гансу Гейгеру и Лизе Мейтнер, но предназначено для всех участников.

**Экспериментальное доказательство существования этой частицы было невозможно.**

Гипотеза Паули была «отчаянной попыткой» спасти законы сохранения энергии и импульса.

Паули: "Я сделал сегодня что-то ужасное. Физику-теоретику никогда не следует делать ничего подобного. Я предложил нечто, что никогда не будет проверено экспериментально".

*Дорогие радиоактивные дамы и господа. Я прошу Вас выслушать со вниманием посланца, доставившего это письмо. Он расскажет Вам, что я нашел отличное средство для закона сохранения и правильной статистики. Оно заключается в возможности существования электрически нейтральных частиц... **Непрерывность  $\beta$ -спектра станет понятной, если предположить, что при  $\beta$ -распаде вместе с каждым электроном испускается такой "нейтрон", причем сумма энергий "нейтрона" и электрона постоянна...** ... Не рисковать - не победить. Тяжесть положения при рассмотрении непрерывного  $\beta$ -спектра становится особенно яркой после слов проф. Дебая, сказанных мне с сожалением: "Ох, лучше не думать обо всем этом... как о новых налогах". Следовательно, необходимо серьезно обсудить каждый путь к спасению. Итак, уважаемый радиоактивный народ, подвергните это испытанию и судите.*



The Desperate Remedy

4 December 1930  
Gloriastr.  
Zürich

Physical Institute of the  
Federal Institute of Technology (ETH)  
Zürich

Dear radioactive ladies and gentlemen,  
As the bearer of these lines, to whom I ask you to listen graciously, will explain more exactly, considering the 'false' statistics of N-14 and Li-6 nuclei, as well as the continuous  $\beta$ -spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" of statistics and the energy theorem. Namely [there is] the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles that I wish to call neutrons,\*\* which have spin 1/2 and obey the exclusion principle, and additionally differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light: the mass of the neutron must be of the same order of magnitude as the electron mass and, in any case, not larger than 0.01 proton mass. The continuous  $\beta$ -spectrum would then become understandable by the assumption that in  $\beta$  decay a neutron is emitted together with the electron, in such a way that the sum of the energies of neutron and electron is constant.

# Гипотеза о существовании нейтрино



**β-распад до 1911 г.**  

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e_{-1}^0$$
  
 Теория: энергия  $e^-$  дискретная

До 1911 г.

Эксперименты показали, что энергии испускаемых  $e^-$  имеют непрерывный спектр. Противоречие закону сохранения энергии.

1911-1914 г.



Паули предполагает, что существует дополнительная частица ( $q=0$ ).  
 Сольвеевский конгресс → реферат Паули о механизме β-распада + лёгкая нейтральная частица.  
 Первое официальное выступление, посвящённое нейтрино.

1930-1933 г.



Эксперимент Д. Чэдвика открыл настоящий нейтрон. 1932 г.

После 1930 г. β-распад  

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e_{-1}^0 + \bar{\nu}_e$$

Э. Ферми построил теорию β-распада и предложил называть частицу Паули уменьшительно от "нейтрон" - "**нейтрино**" (итал.)

1934 г.



Эксперимент подтверждающий существование нейтрино - Ф. Райнс (F. Reines) и К. Коуэн (C. L. Cowan).

1956 г.



1995 г.

← 26 лет от теории до практики!!! →

← Время →





# Экспериментальное открытие нейтрино

→ Как «поймать» нейтрино?

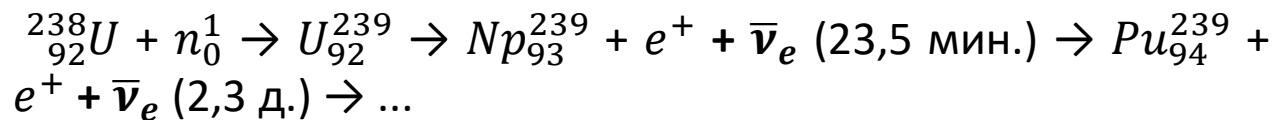
→ С помощью интенсивных источников нейтрино и массивных детекторов!

1934 г. → 1956 г.

Что произошло за эти годы, что позволило нам «поймать» нейтрино?

- 1942 г.

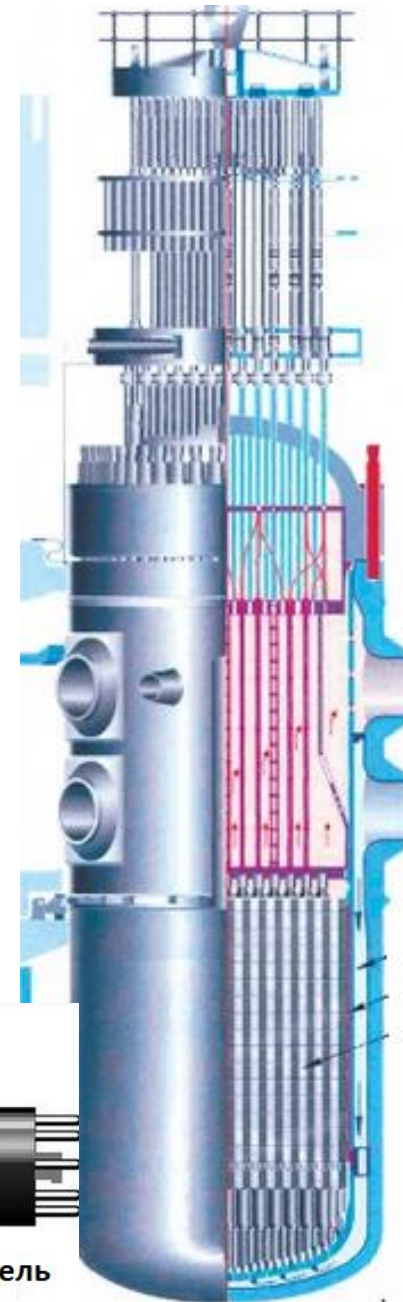
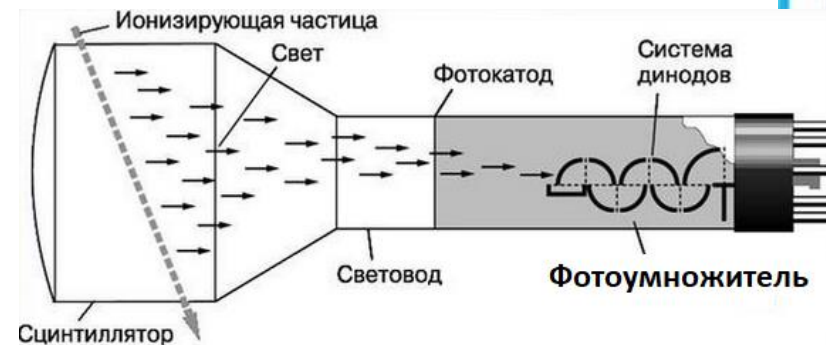
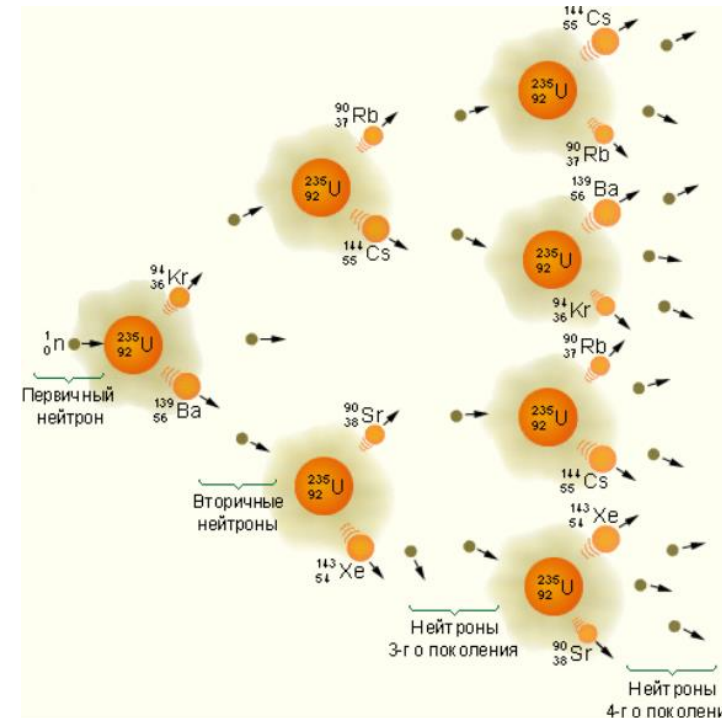
Создание ядерных реакторов



- 1949 г.

Открытие **сцинтилляции** в органических жидкостях.

Способность излучать свет при поглощении ионизирующего излучения ( $\gamma$ ,  $e^-$ ,  $\alpha$ , ...).



# Экспериментальное открытие нейтрино

Реактор

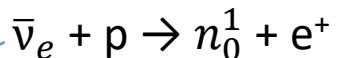
Эксперимент Райнеса и Коэна

Реакция взаимодействия антинейтрино с протоном (1956 г).



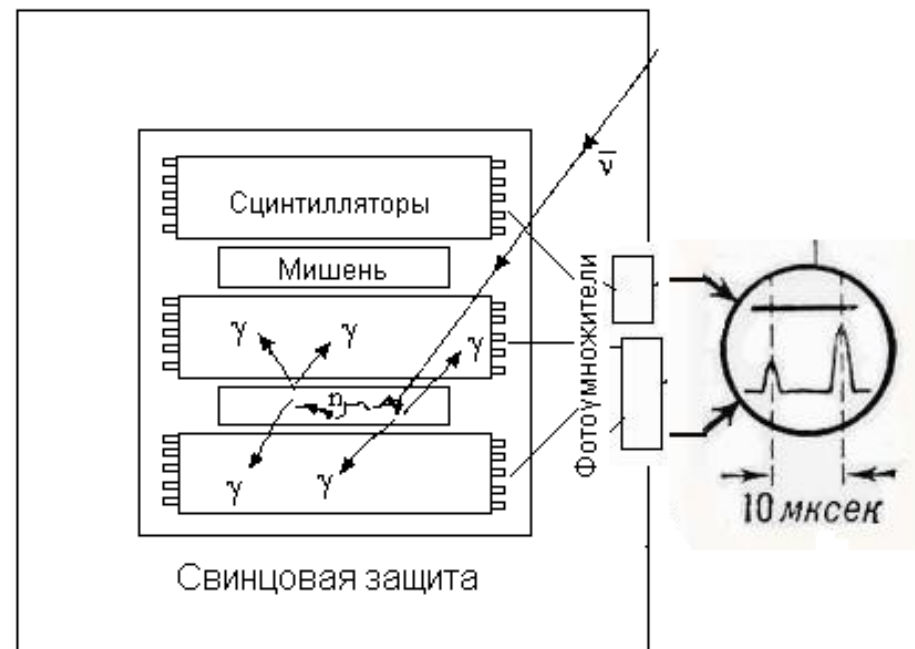
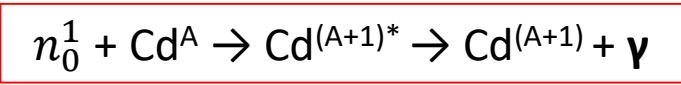
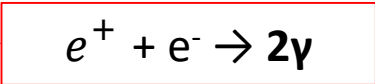
1995 г.

Обратный  $\beta$ -распад (Inverse Beta Decay, IBD)



Ядерный реактор  
 $\approx 10^{13} \frac{\nu}{\text{см}^2 \text{сек}}$

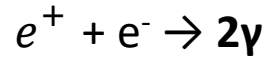
Водород  
 Сцинтиллятор +  $\text{C}_3\text{H}_5\text{CdO}_2$   
 $\approx 3 \cdot 1200 \text{ л} + 2 \cdot 200 \text{ л}$



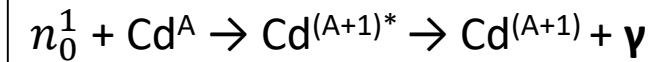
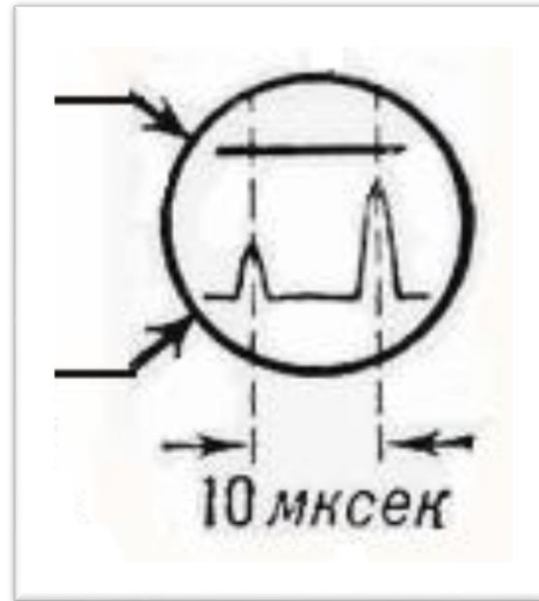
**Метод запаздывающих совпадений**

\* Расстояние Реактор – Детектор  $\approx 10 \text{ м}$ .

# Экспериментальное открытие нейтрино: Метод запаздывающих совпадений



Аннигиляционные  $\gamma$ -кванты дают первый сигнал (prompt signal).



Кадмий, при поглощении нейтрона, переходит в возбужденное состояние, что снова вызывает гамма-излучение. Эта реакция даёт второй сигнал (delayed signal).

Сцинтиллятор + фотоумножители  $\rightarrow$  обе вспышки можно зафиксировать  $\rightarrow$  регистрация антинейтрино  $\bar{\nu}_e$ .

Сегодня - методы детектирования нейтрино изменились. Радиохимический принцип все еще актуален.

**Обратный  $\beta$ -распад** - самый распространенный метод в экспериментах с  $\nu$  от реактора.

Выбор способа детектирования  $\nu$   $\rightarrow$  энергия и происхождение  $\nu$   $\rightarrow$  **знать откуда приходят к нам  $\nu$ !**

# Источники нейтрино

1. Искусственные источники
2. Природные источники

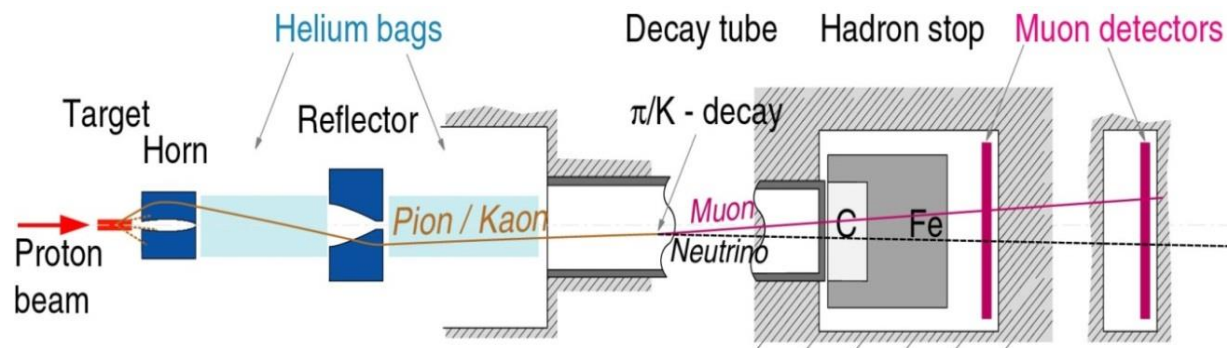
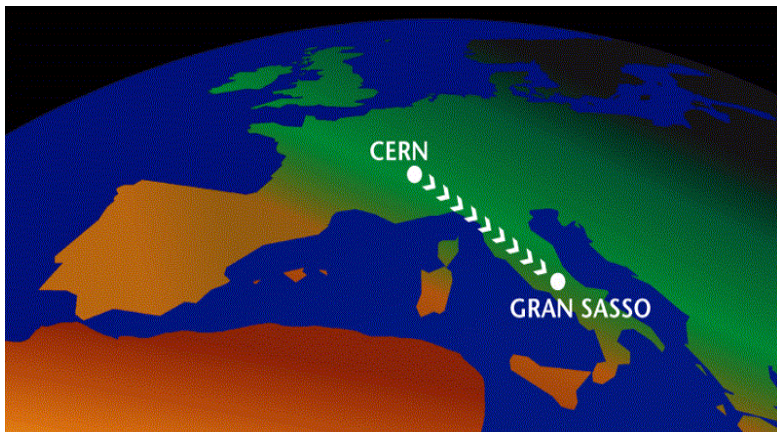


**Ядерные реакторы**  
 $\approx 10^{19} \bar{\nu}_e / \text{сек}$

Важные эксперименты: Double Chooz, Daya Bay, NEOS, DANSS, **STEREO**, SoLid, Prospect, ...

**Ускорители** → пучок ускорительных нейтрино  
ЦЕРН, Фермилаб, ...

Важные эксперименты: **OPERA**, **DUNE**



# Источники нейтрино

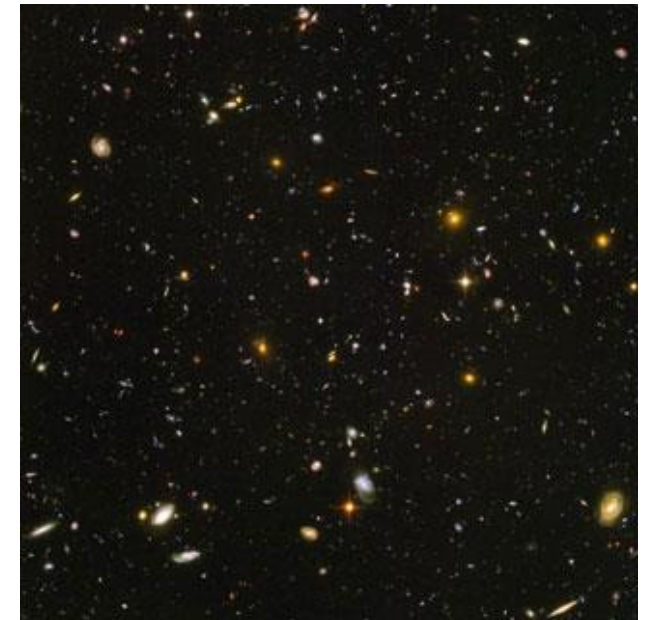
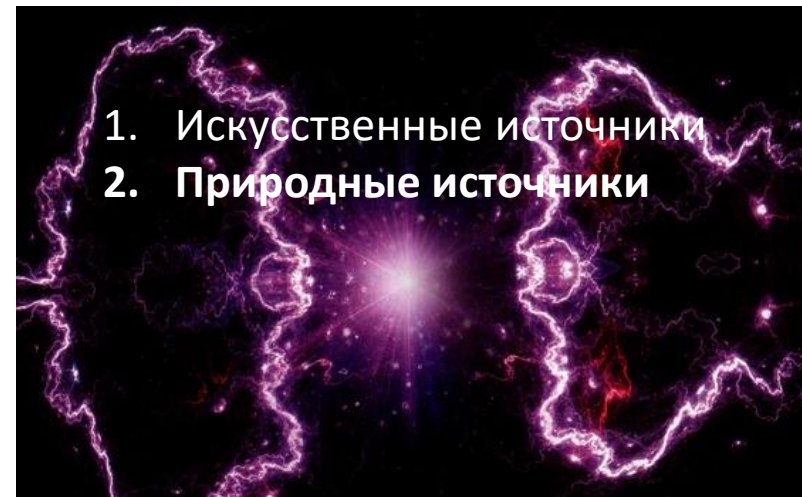
**Реликтовые нейтрино - частица-реликвия, то есть самые «старые».**

- Самые многочисленные нейтрино + очень малая энергия
- Весь поток  $\approx 300$  нейтрино /  $\text{см}^3$  остается незамеченным

1 секунда с момента Большого взрыва  $\rightarrow$

- Расширение + остывание, Вселенная стала прозрачной для нейтрино. Горячий нейтринный газ, расширяясь вместе с Вселенной, стал остывать как независимый компонент.
- Реликтовые нейтрино связаны с космологической моделью эволюции Вселенной.
- Их регистрация и определение кинетической энергии  $\rightarrow$  проверка модели Вселенной.
- Детектирование реликтовых нейтрино  $\rightarrow$  масса  $\nu$ , которая пока неизвестна с точностью. *Далёкое будущее?*

[http://web.mit.edu/physics/news/physicsatmit/physicsatmit\\_16\\_formaggio.pdf](http://web.mit.edu/physics/news/physicsatmit/physicsatmit_16_formaggio.pdf) (Project 8 / CosmoNeut)  
[https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/431136/Bolshaya\\_okhota\\_za\\_reliktovyimi\\_neytrino](https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431136/Bolshaya_okhota_za_reliktovyimi_neytrino)



# Источники нейтрино

1. Искусственные источники
2. **Природные источники**

**Геонейтрино** – нейтрино от Земли, созданное при распаде радиоактивных элементов присутствующих в земной коре.

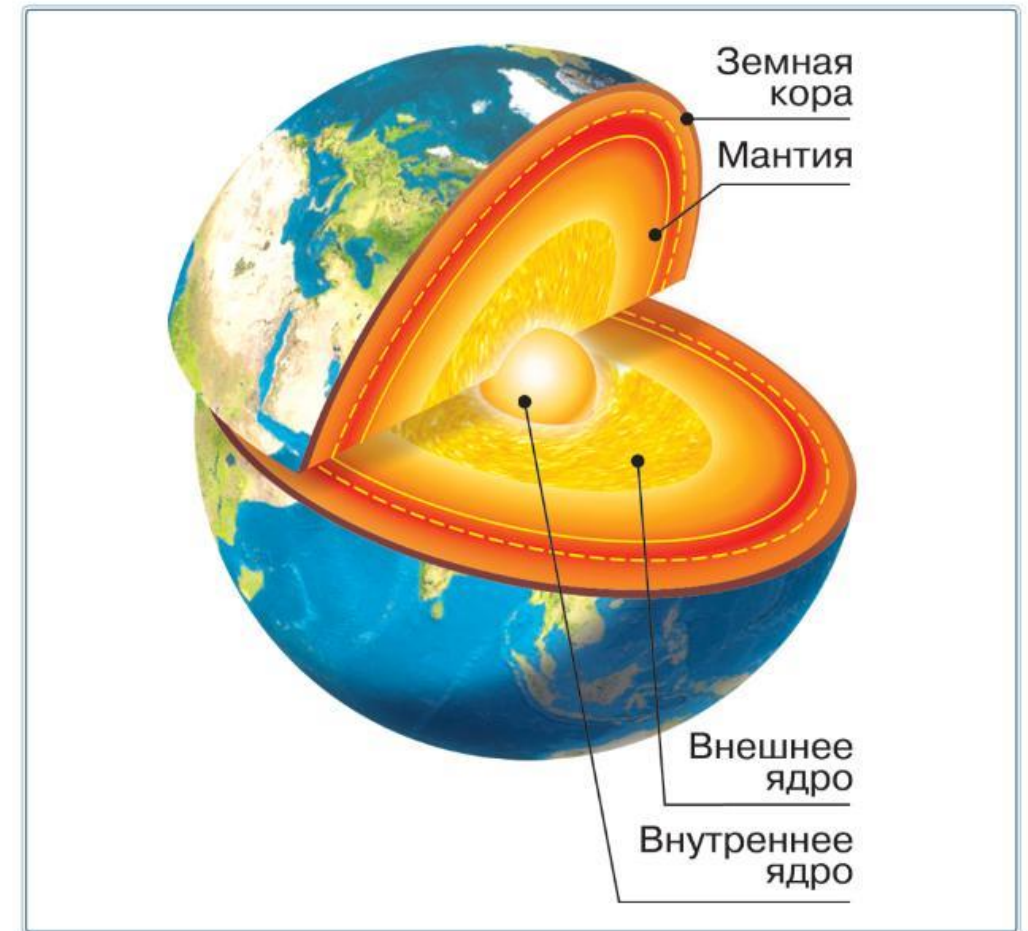
$\beta^-$  - распад  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  → эксперименты JUNO, China Jinping Underground Laboratory, KamLAND, ...

IBD + сцинтилятор

Изучение состава элементов Земли + производство тепла в мантии и внешнем ядре  $\approx 10$  тераВатт - 30 тераВатт ( $10^{12}$  Вт)

**Мы пытаемся понять Вселенную, но ещё до сих пор с точностью не знаем о внутренней природе Земли!**  
***Для любопытных: Preliminary reference Earth model = Попередня еталонна модель Землі.***

## Внутреннее строение Земли

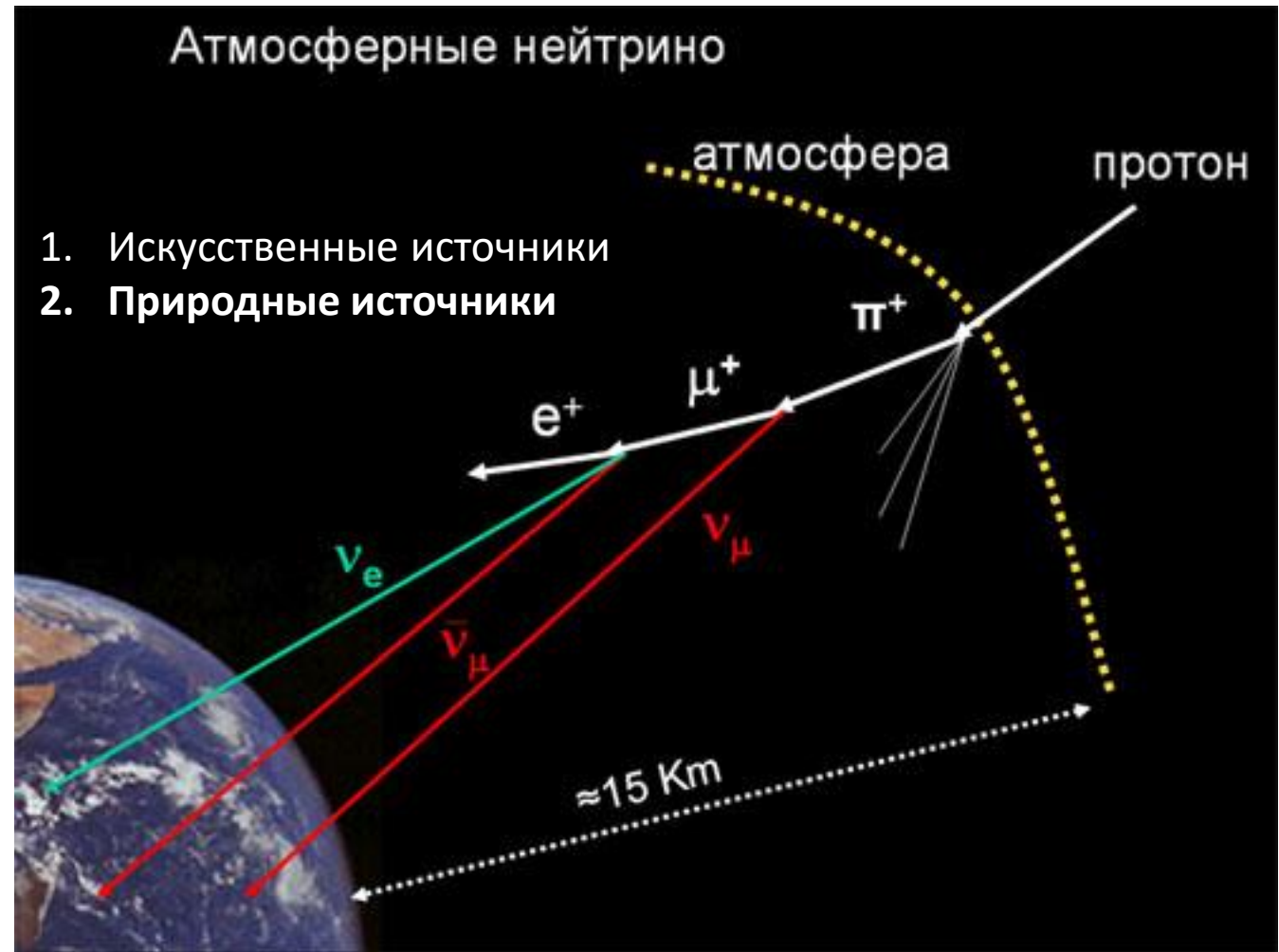


# Источники нейтрино

Атмосферные нейтрино - результат взаимодействия космических протонов с атмосферой.

**Осцилляция нейтрино** была открыта при изучении атмосферных нейтрино.

Важное открытие в физике элементарных частиц и первое указание о существовании новой физики за границами Стандартной Модели.



1 / см<sup>2</sup> / сек

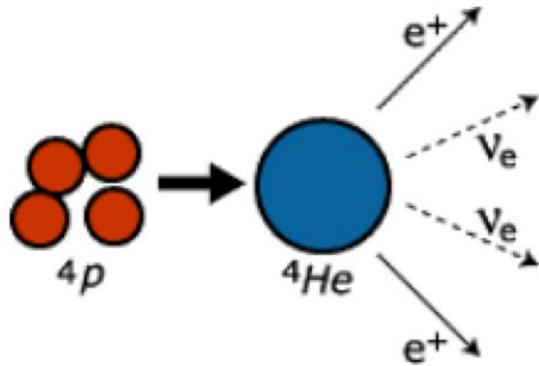
Важные эксперименты: Супер Камиоканде, MACRO



# Источники нейтрино

1. Искусственные источники
2. Природные источники

Солнечные нейтрино - результат термоядерной реакции горения Водорода с образованием  ${}^4\text{He}$  на Солнце.



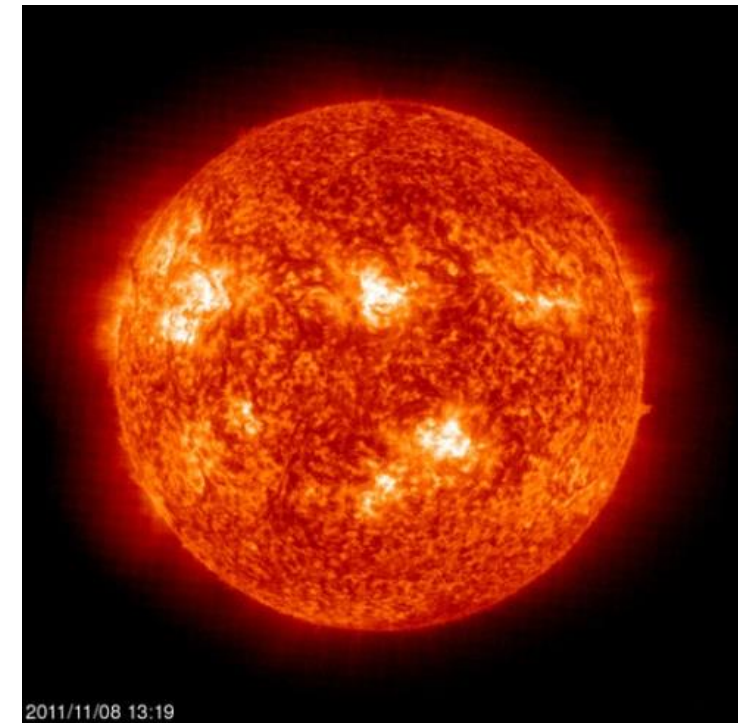
Превращение водорода в гелий на Солнце - источник солнечной энергии?

1964 г. Эксперимент Рэймонда Дэвиса и Джона Бакалла → **Homestake**

Поиск солнечного нейтрино

Модель Солнца - Стандартная Солнечная Модель Бакалла, описание ядерного синтеза в солнечном ядре.

Важные эксперименты: **SNO, Borexino**



$65 \times 10^9 / \text{cm}^2 / \text{сек}$

*Площадь вашего ногтя  $\approx 1 \text{ cm}^2$*

*60 миллиардов нейтрино  
проходят сквозь ваш ноготь  
каждую секунду!*

# Источники нейтрино: солнечные $\nu$

Дэвис и Бакалл, 1964 г. - эксперимент Homestake

Ядерная реакция поглощения нейтрино ядром хлора



1946 г. - Бруно Понтекорво уже рассмотрел эту реакцию для детектирования нейтрино.

≈25-м. бассейн + жидкость для химической чистки одежды содержащей хлор.

Но! Космические лучи, попадая в детектор, дают появление аргона.

Решение: бассейн поместили в старой шахте, пробитой в скале, на глубине ≈1,5 км.

Дэвису удалось поймать **солнечные  $\nu$ !**

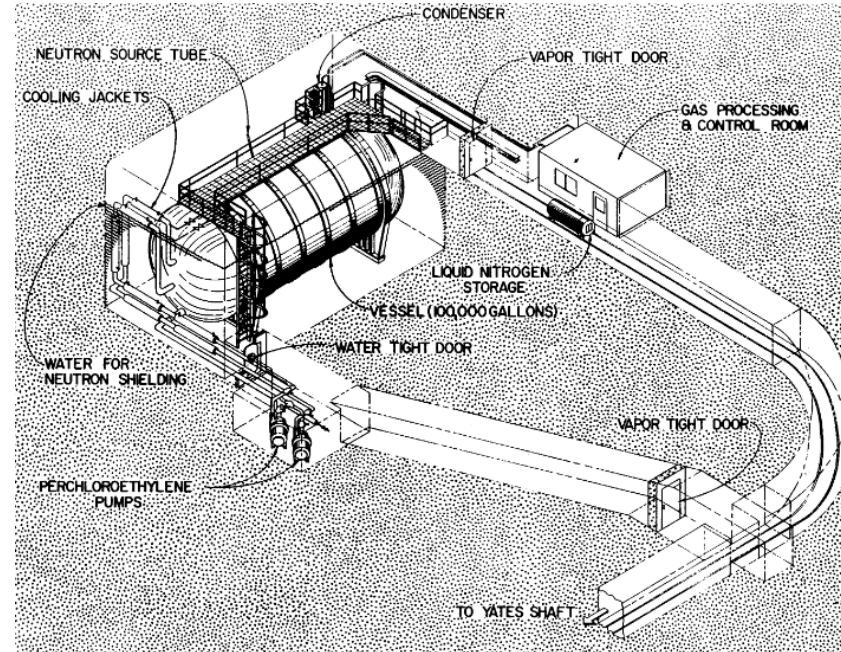
**Их количество было намного меньше, чем предсказывали теоретические расчеты.**

**Почему?**

Эксперимент 2.56 SNU  
Теория 9.31 & 6.36 & 7.64 SNU

<http://iopscience.iop.org/article/10.1086/305343/pdf>

MEASUREMENT OF THE SOLAR ELECTRON NEUTRINO FLUX WITH THE HOMESTAKE CHLORINE DETECTOR



MEASUREMENT OF THE S

o Flux

duction rate in the  
s  $0.478 \pm 0.030$

Since the detector  
gives a neutrino

capture rate of  $2.56 \pm 0.16$  (statistical)  $\pm 0.16$  (systematic)  $\times 10^{-36}$  per target atom  $s^{-1}$  or  $2.56 \pm 0.16$  (statistical)  $\pm 0.16$  (systematic) SNU. This measurement is to be compared with the solar model predictions for the chlorine detector of  $9.3 \pm 1.3$  SNU (Bahcall & Pinsonneault 1995), 6.36 SNU (Turck-Chièze & Lopes 1993), and 7.64 SNU (Sackman, Boothroyd, & Fowler 1990). Clearly, the observed flux is much lower than that predicted. This discrepancy between observation and prediction has existed since the early 1970s when the observations of the Homestake detector were first reported.

Early comparisons of the Homestake chlorine detector

# Источники нейтрино: солнечные $\nu$

**1968 г.** Обнаружены **первые солнечные нейтрино**. Но! Нейтрино в практике  $\approx$  в три раза меньше, чем в теории.

Три возможные причины:

1. Неверная теория  $\rightarrow$  количество нейтрино в Солнце предсказано неверно и модель Солнца надо менять? Хлор иначе взаимодействует с нейтрино?

2. Неверность эксперимента.

3. Иное поведение нейтрино при путешествии от Солнца к Земле  $\rightarrow$  **отклонение от Стандартной Модели.**

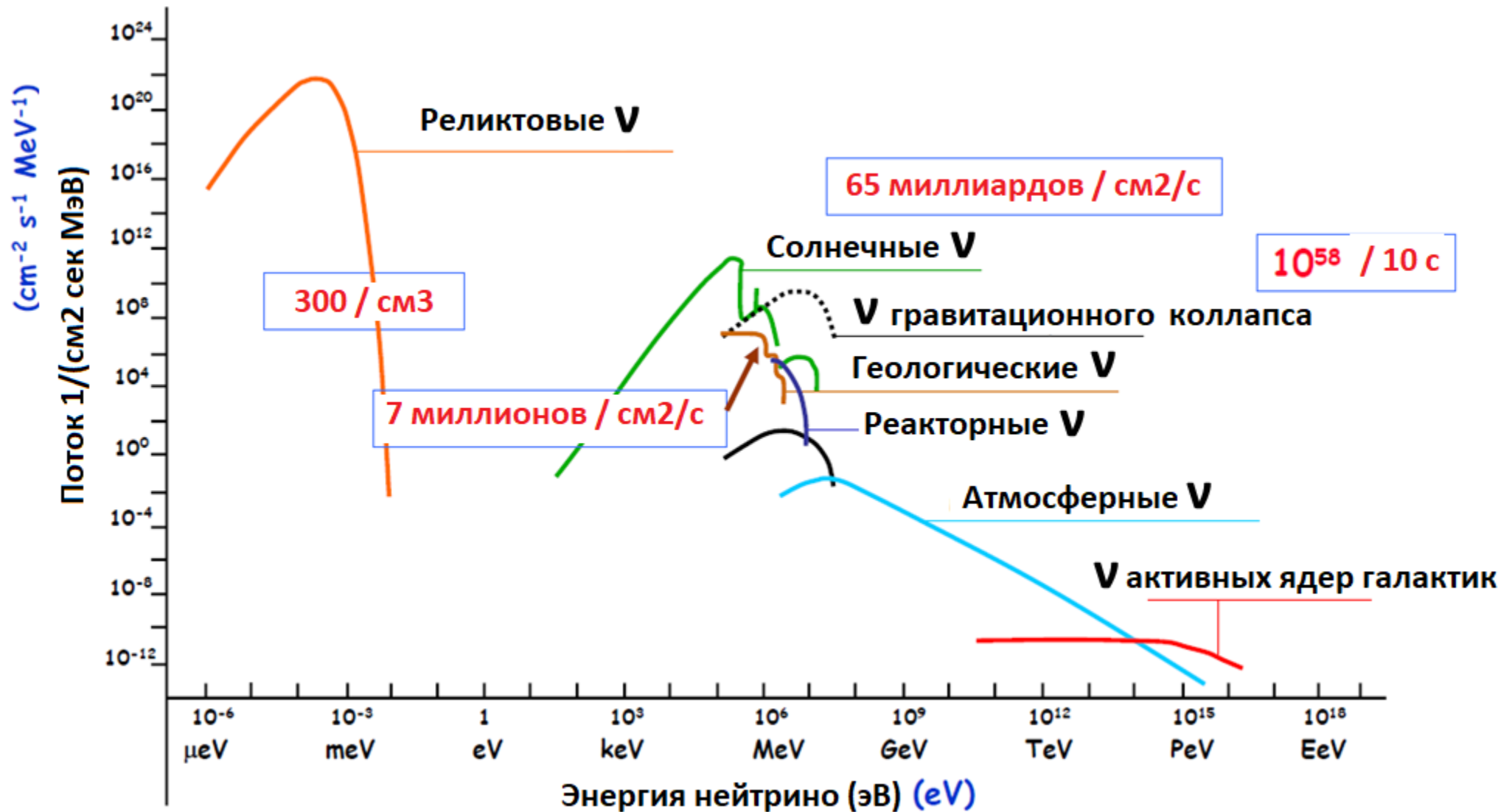
$\rightarrow$  Модель Солнца + вычисления с хлором пересмотрены и ошибок нет. Без ошибок в эксперименте.

**1969 г.** - **Бруно Понтекорво и Владимир Грибов, гипотеза о новом поведении нейтрино феномен осцилляции нейтрино**



**2002 г.**  
**Raymond Davis Jr. & Masatoshi Koshiba "за обнаружение космических нейтрино"**

# Источники нейтрино



# Феномен осцилляции нейтрино

Механизм квантовой механики, переход нейтрино из одного состояния ( $\mu$ ) в другое ( $\tau$ ). В промежутке 2 разных состояний, нейтрино является «смесью» между  $\mu$  и  $\tau$ . Осцилляция происходит во время полёта нейтрино между точкой его рождения и точкой его поглощения.

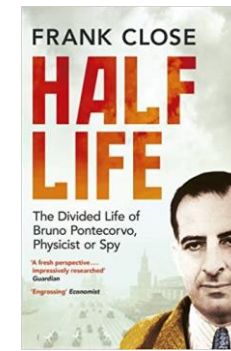
**1957 г.** Дубна - первая идея осцилляции нейтрино, Б. Понтекорво. **(Теория!)**

**1962 г.** - Маки, Накагава и Саката (Maki, Nakagawa, Sakata) ввели смешивание 2-ух нейтрино. **(Теория!)**

**1967 г.** - развитие работы над осцилляцией + существование «стерильных» нейтрино, Б. Понтекорво. **(Теория!)**

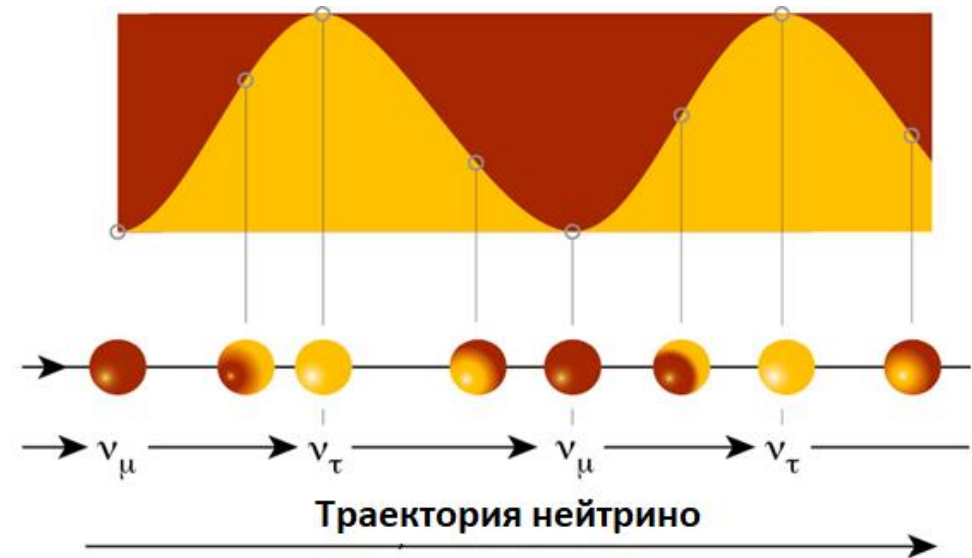
Осцилляция нейтрино на больших расстояниях (от Солнца и до нас) объясняет недостаток солнечных нейтрино который увидел эксперимент Дэвиса и Бакалла.

**Сколько-же разных «видов» нейтрино существует?**



Бруно Понтекорво

«Half-Life: The Divided Life of Bruno Pontecorvo, Physicist or Spy» Frank Close

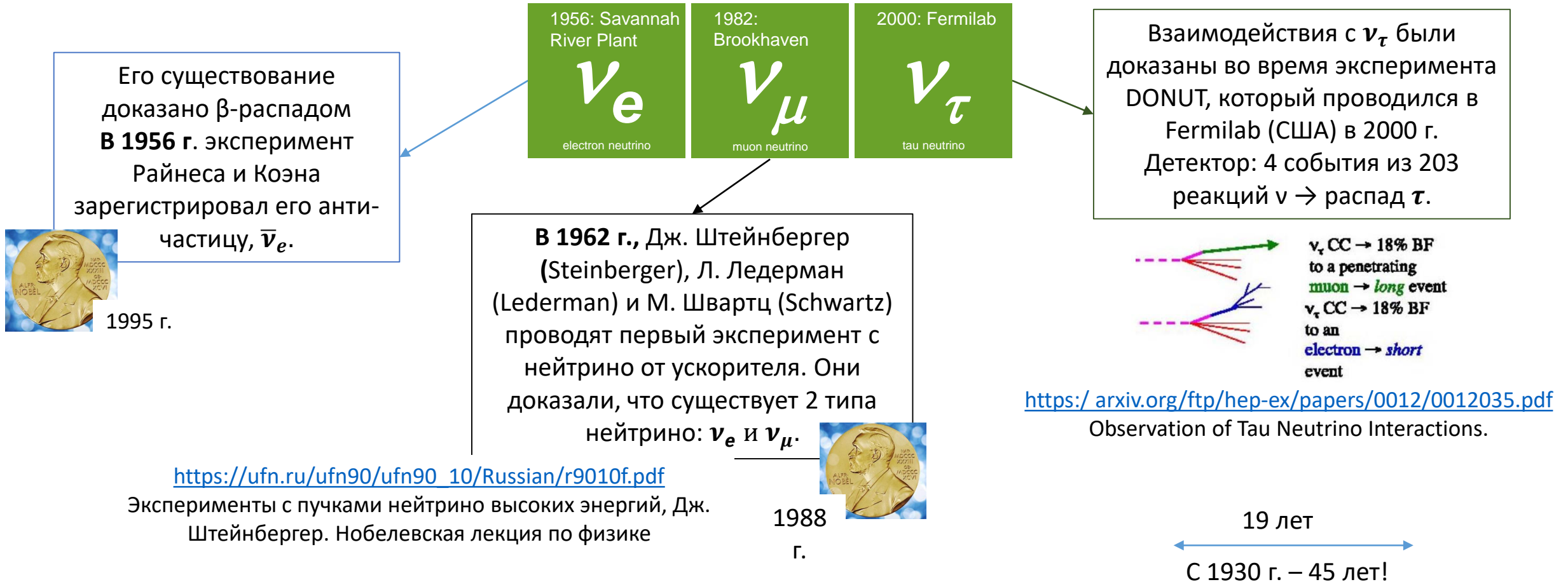


Для любопытных: <https://arxiv.org/pdf/hep-ph/9908335.pdf> « Ранние годы феномена осцилляции нейтрино » & <https://arxiv.org/pdf/hep-ph/0410090.pdf#cite.Pont1> « История осцилляции нейтрино». [http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e\\_026\\_05\\_0984.pdf](http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_026_05_0984.pdf) - упоминается проблема солнечных нейтрино.

# Феномен осцилляции нейтрино

## Экспериментальные открытия разных нейтрино

Три *состояния* нейтрино, которые всегда рождаются вместе с электроном ( $e^-$ ), мюоном ( $\mu$ ) и тау-лептоном ( $\tau$ ).



# Феномен осцилляции нейтрино

PMNS – матрица = матрица Понтекорво - Маки - Накагавы - Сакаты, матрица смешивания  $\nu$ .  
2000 г. – 3 состояния нейтрино → смесь 3-х состояний

Поля нейтрино  
3 состояния  
Ароматы

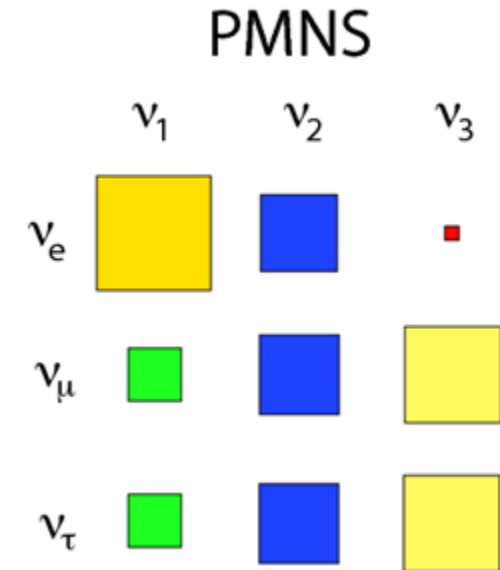
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

3 массовых  
состояния

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{-i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$\Delta m_{31}^2$ 
 $\Delta m_{31}^2$ 
 $\Delta m_{21}^2$

atmos+LBL(dis)
Chooz+LBL(app)
solar+KamLAND



U - описание вероятности перехода данного аромата в массовое собственное состояние «i».

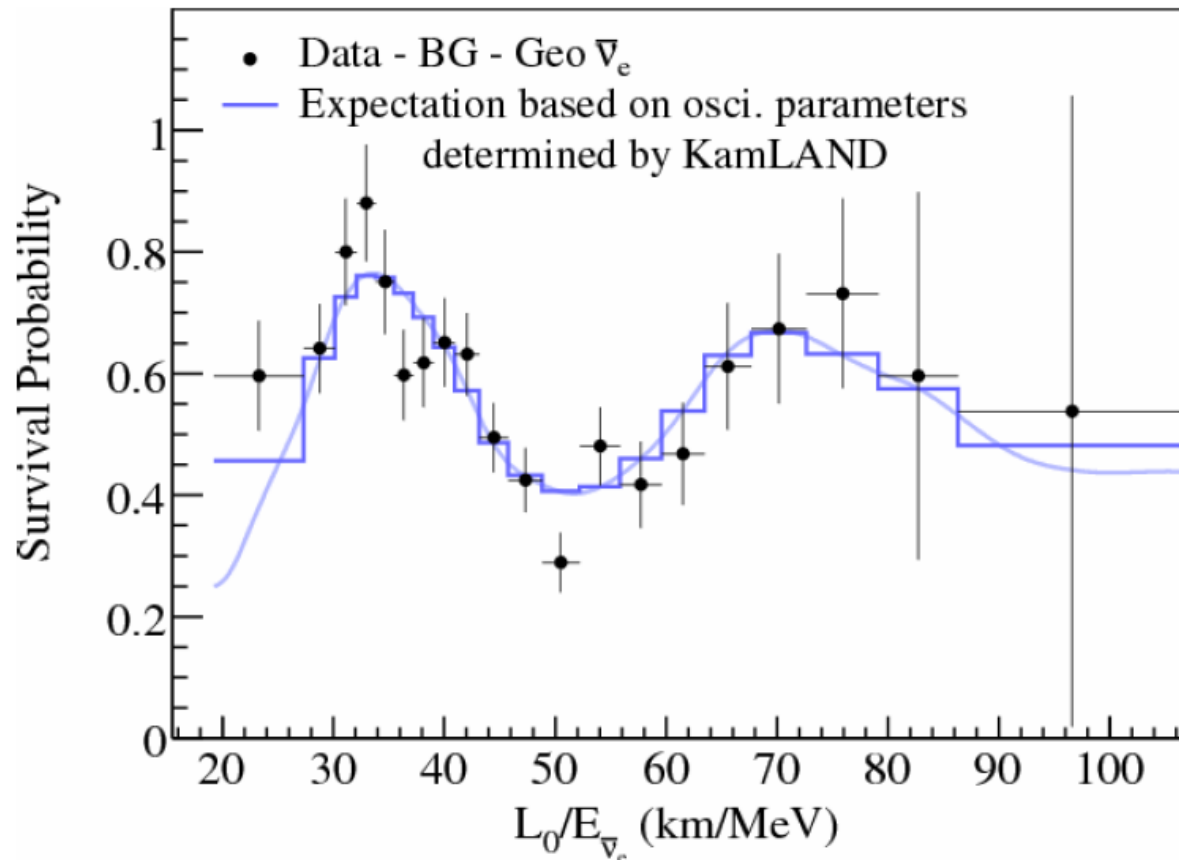
$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$  и  $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$  - 3 угла смешивания  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{13}$  и  $\theta_{23}$  (от 0 до  $\pi/2$ ) → смешивание между тремя массовыми компонентами нейтрино.

- $\cos \theta_{ij}$ ,  $\sin \theta_{ij}$  и  $\Delta m_{ij}^2$  измеряются в экспериментах!

# Феномен осцилляции нейтрино

Вероятность осцилляции нейтрино

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \sum_{ij} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha i}^* U_{\beta i} e^{-i \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}} \approx \sin^2 2\theta_{ij} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right)$$



$L$  – расстояние от источника нейтрино до детектора.

$E$  – энергия нейтрино.

Эксперимент KamLAND зафиксировал исчезновение реакторных  $\bar{\nu}_e$  на расстоянии 180 км между детектором и реактором.

*S. Abe et al. Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND. Phys. Rev. Lett., 100:221803, 2008.*



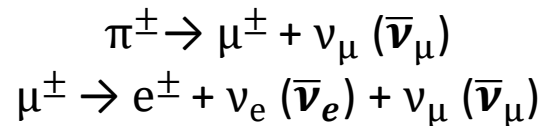
# Феномен осцилляции нейтрино

Коэффициенты  $\cos \theta_{ij}$ ,  $\sin \theta_{ij}$  и  $\Delta m_{ij}^2$  измеряются в экспериментах.

Эксперименты можно разделить на 3 вида

- Солнечные  $\theta_{12}, \Delta m_{21}^2$   
Homestake, SNO, KamLAND

- Атмосферные  $\theta_{23}, \Delta m_{31}^2$   
(Super)KamioKande, MINOS, T2K, OPERA



- Реакторные  $(\bar{\nu}_e)$  + ускорители  $\theta_{13}$   
KamLAND, Double Chooz, Daya Bay, RENO

$$\begin{aligned}\sin^2 \vartheta_{12} &= 0,304_{-0,016}^{+0,022} \\ \Delta m_{21}^2 &= 7,58_{-0,26}^{+0,22} * 10^{-5} \text{ eV}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sin^2 \vartheta_{23} &= 0,567_{-0,128}^{+0,032} \\ \Delta m_{31}^2 &= 2,48_{-0,07}^{+0,05} * 10^{-3} \text{ eV}^2\end{aligned}$$

$$\sin^2 \vartheta_{13} = 0,0214_{-0,001}^{+0,001}$$

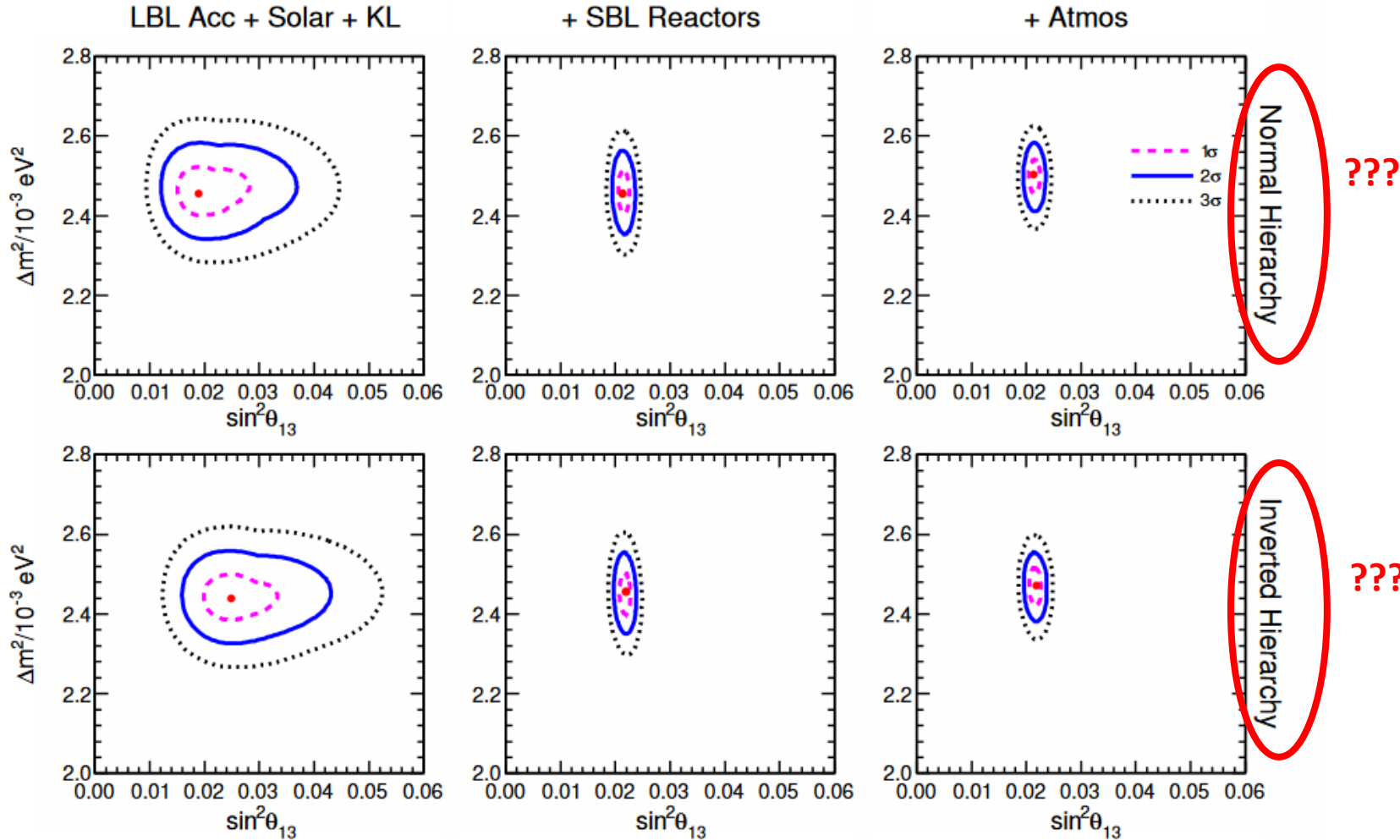
$$\Delta m_{32}^2 = ? \text{ Это нам ещё не известно!}$$

[https://porthos.tecnico.ulisboa.pt/fct/PDF/2008/New\\_Journal\\_Physics\\_10\\_2008\\_113011.pdf](https://porthos.tecnico.ulisboa.pt/fct/PDF/2008/New_Journal_Physics_10_2008_113011.pdf)

<https://arxiv.org/pdf/1405.7540.pdf>

<https://arxiv.org/abs/1601.07777>

# Феномен осцилляции нейтрино



$$\Delta m_{31}^2 = 2,48_{-0,07}^{+0,05} * 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 \vartheta_{13} = 0,0214_{-0,001}^{+0,001}$$

$$\Delta m_{32}^2 = ?$$

*Это нам ещё не известно!*

*Проблема иерархии масс  $\nu$*

<https://arxiv.org/pdf/1601.07777.pdf>

# Феномен осцилляции нейтрино

Проблема иерархии масс  $\nu$

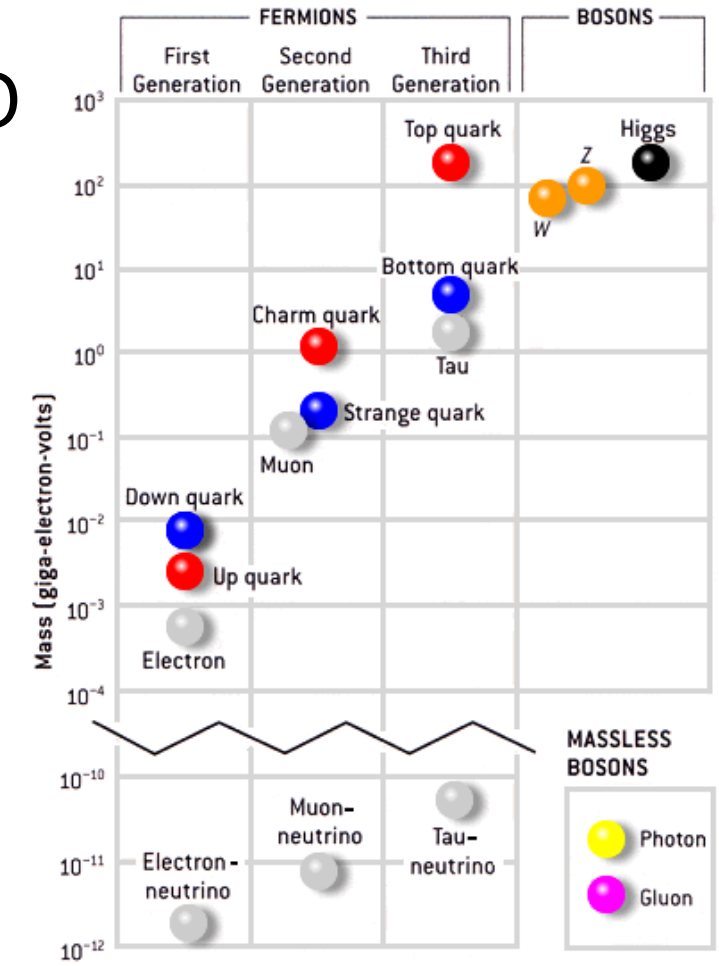
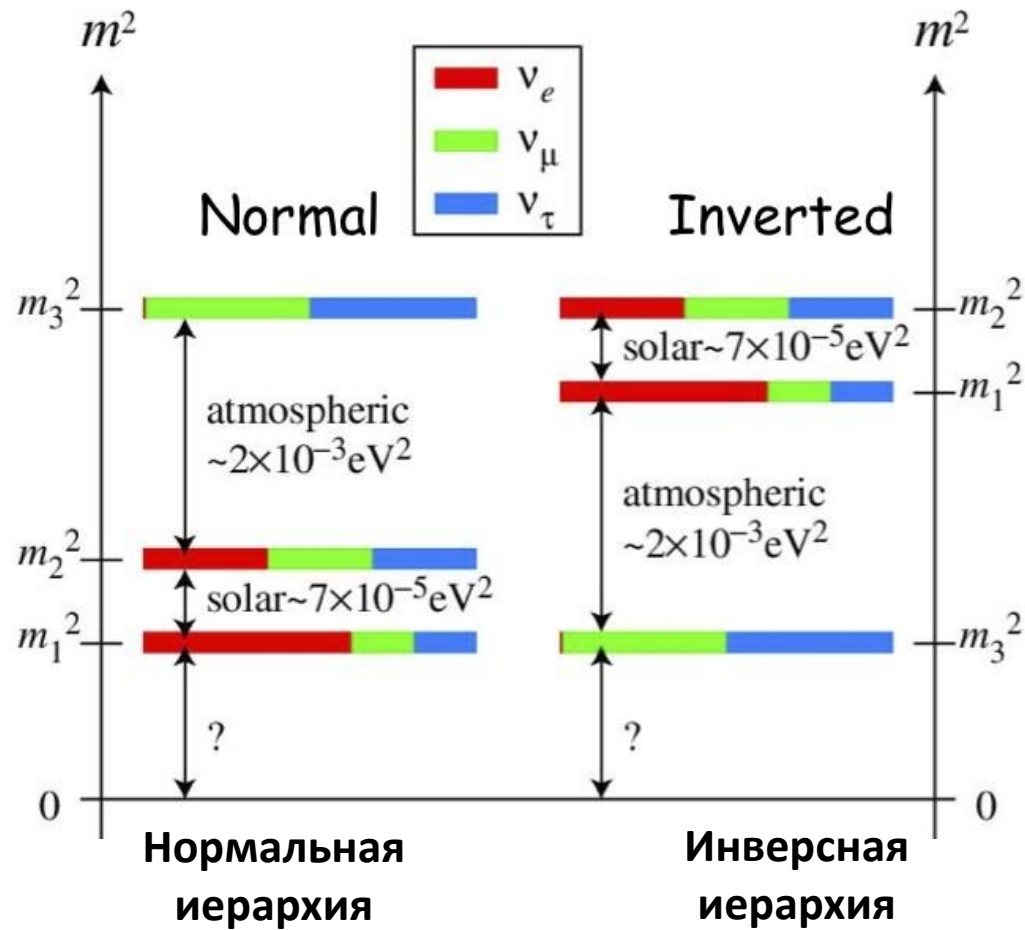
$m_2^2 > m_1^2$

Но!

$m_3^2 ? m_1^2$

$m_3^2 ? m_2^2$

Какая масса самая лёгкая?



<https://arxiv.org/pdf/1301.1340.pdf>  
<https://arxiv.org/pdf/1509.08747.pdf>

# Феномен осцилляции нейтрино

**1998 – 2006 г.** Эксперименты Супер-Камиоканде (Япония) и SNO (нейтринная обсерватория в Садбери, Канада).  
Подтверждение превращения нейтрино ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  или  $\nu_\tau$ ) в нейтрино другого вида или в анти-нейтрино.

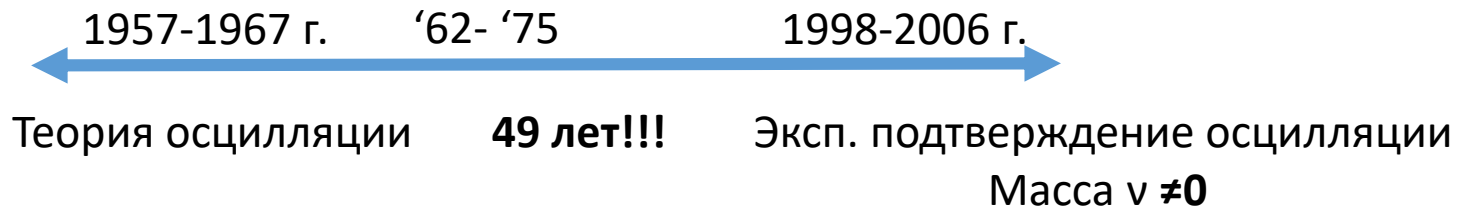
**В 2015 г.**, Такааки Кадзита (Камиоканде, Супер-Кк) и Артур Макдональд (SNO), Нобелевская премия по физике за экспериментальное подтверждение нейтринных осцилляций.

**Осцилляция → нейтрино имеют массу  $\neq 0$ ! Порядок масс ещё не известен.**



2015 г.

Осцилляция нейтрино - закон периодического изменения вероятности обнаружения нейтрино определённого сорта в зависимости от момента создания этого нейтрино.



2 метода детекции нейтрино  
Реакторные нейтрино + обратный  $\beta$ -распад + сцинтиллятор  
Солнечные нейтрино + ядерная реакция поглощения нейтрино ядром хлора  $^{37}\text{Cl} + \nu \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$   
**Разные источники нейтрино → разные виды детекторов!**

# Часть II

## Детекторы нейтрино

### Современные эксперименты

# Нейтринные детекторы

Общие черты детекторов:

- Детектирование одного типа нейтрино
- Под Землей ( $\approx 1$  км) или под водой для **защиты от фонового излучения**. «Бронь» необходима от источников нейтрино на Земле и от естественного радиационного фона Земли.
- Большой размер. **Набор достаточного количества желаемых событий ограничен малым сечением взаимодействия нейтрино**. Число регистрируемых событий  $\approx 100 - 1000$  / год.



*Установка внутренней сферы Борексино. Гран-Сассо, средняя глубина  $\approx 1,4$  км.*

- «Бронь»
1. Защита от атмосферных мюонов
  2. Радиационная чистота используемых материалов

# Нейтринные детекторы

## Способы детектирования

### 1. Радиохимический

- Хлорный, **Cl**, детектор (эксперимент *Homestake*)
- Галлиевый, **Ga**, детектор (эксп. *SAGE, GALLEX*)

### 2. Рассеяние нейтрино на электронах

- Черенковские (эксп. *Kamiokande-II, SuperKamiokande, SNO, BAIKAL, ANTARES, AMANDA*)
  - Сцинтилляционные (эксп. *Borexino*)
- На основе время-проекционной камеры (эксп. *ICARUS*)

### 3. Поглощение нейтрино (эксп. *SNO, ICARUS*)

# Нейтринные детекторы

## 1. Радиохимический Галлиевый детектор

- Низкоэнергетичные нейтрино
- Поглощение нейтрино изотопом галлия  $^{71}\text{Ga}$ . Порог энергии = 0,233 МэВ.  
$$^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow ^{71}\text{Ge} + e^-$$
$$T_{1/2} (^{71}\text{Ge}) = 11,4 \text{ дней} \rightarrow \text{химическая обработка} \rightarrow \text{GeH}_4 + \text{измеряется кол-во атомов Ge.}$$
- Метод чувствителен ко всем типам солнечных нейтрино, низкий порог реакции.

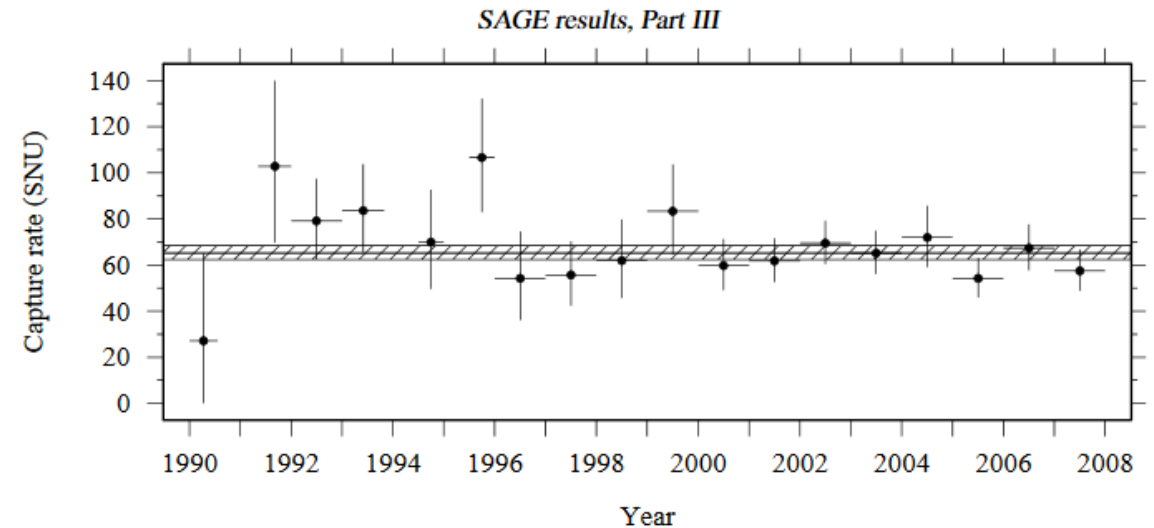


Баксанская нейтринная обсерватория (Кавказский горный хребет), глубина  $\approx 2,1$  км.

SAGE (Soviet–American Gallium Experiment)  
1989-2010 г.

<https://arxiv.org/pdf/0901.2200.pdf>

Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal.  
III: Results for the 2002–2007 data-taking period.



Combined SAGE results for each year. Shaded band is the combined best fit and its uncertainty for all years. Vertical error bars are statistical with 68% confidence.

$\approx 65,4^{+3,1}_{-3,0}$  (стат.)  $^{+2,6}_{-2,8}$  (сист.) Солнечных нейтринных единиц (SNU)

Это представляет 56-60% событий предсказанных моделью Солнца (138 SNU).

Дефицит объяснён осцилляцией нейтрино.



# Нейтринные детекторы

## 2. Рассеяние нейтрино на электронах

Черенковский детектор (= детектор черенковского излучения)

- Рассеяние нейтрино на электронах воды.

*Столкновения нейтрино с атомами воды «вырывают» электроны из атомов. «Вырванные» электроны путешествуют в воде со скоростью > скорость света в воде → черенковское свечение темно-голубого цвета.*

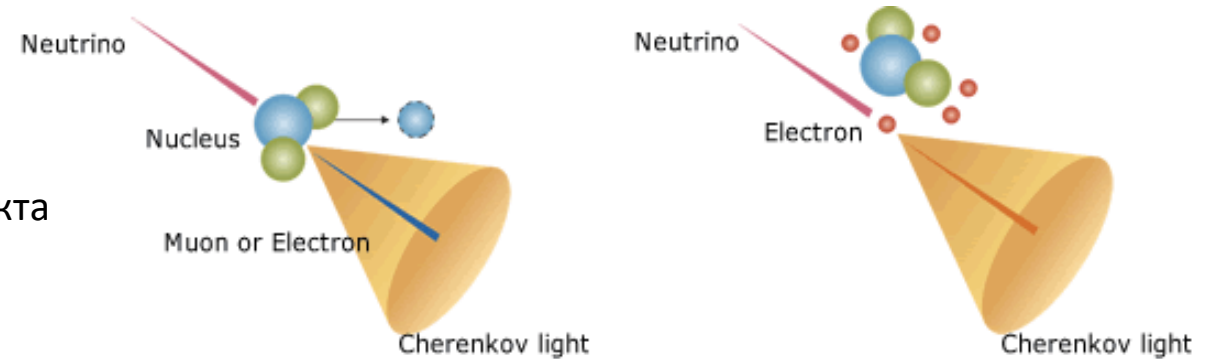
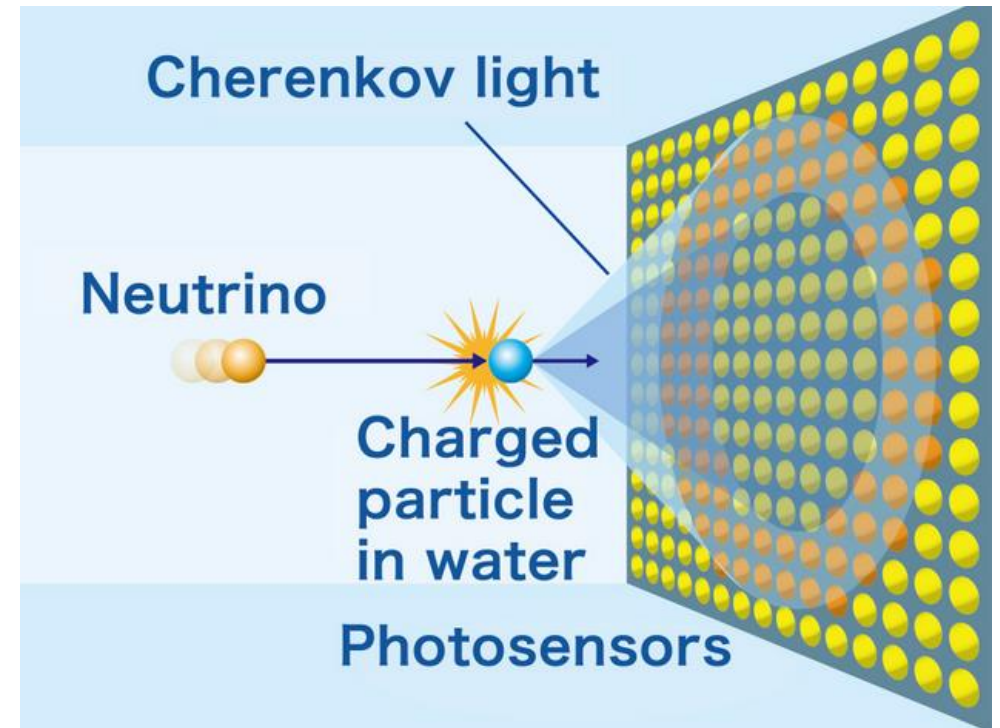
Открытие - 1934 г. Павел Черенков

Теоретическое объяснение - И. Тамм, И. Франк, 1937 г.

Нобелевская премия по физике «за открытие и истолкование эффекта Черенкова» - 1958 г.



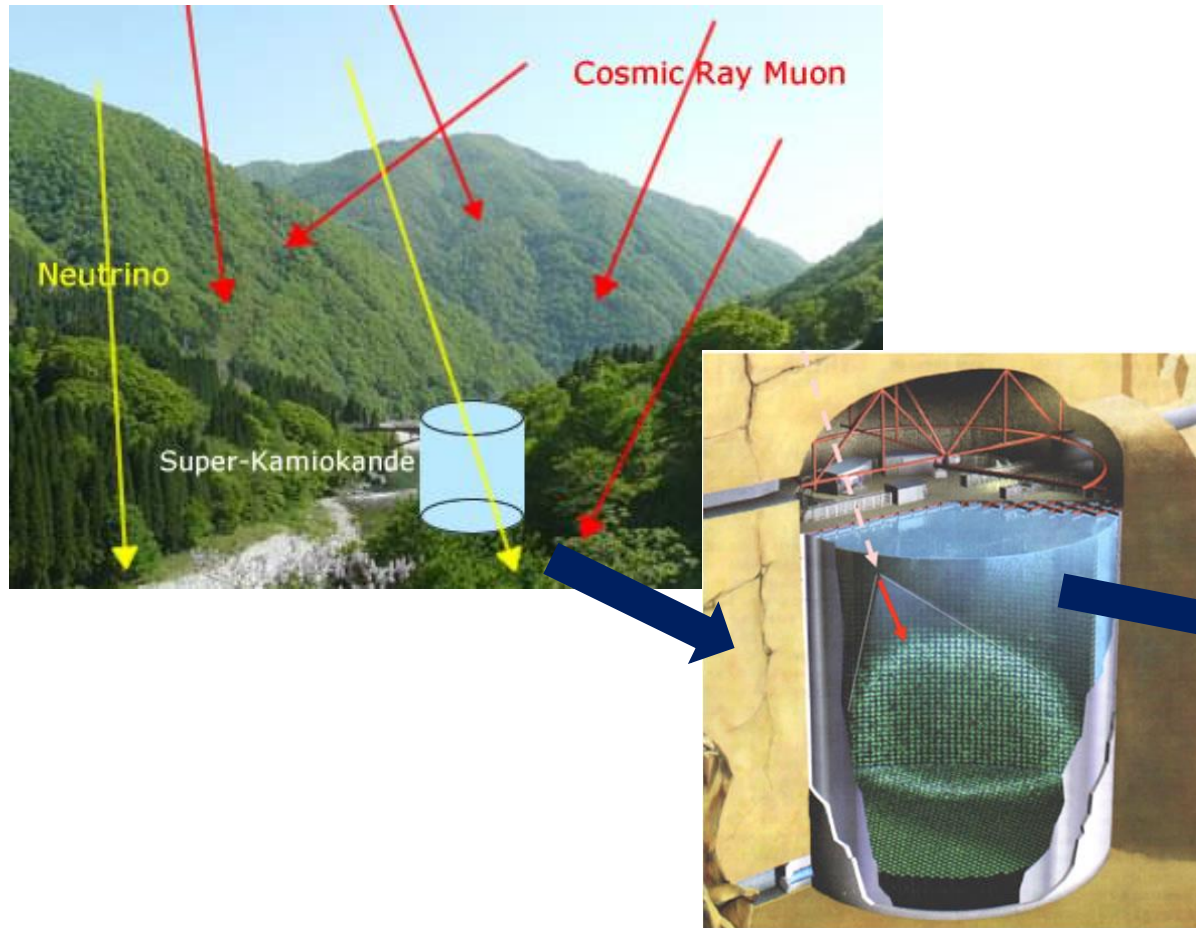
1958 г.



*Частица с  $q \neq 0$ ,  $v_{\text{частица}} > V_{\text{свет}}$  в воде → черенковское излучение*

# Нейтринные детекторы

## 2. Рассеяние нейтрино на электронах Черенковский детектор



- Регистрация  $\gamma$  → информация о нейтринном событии  
Прямой способ детектирования + регистрация всех ароматов  
( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )

Максимальная чувствительность к  $\nu_e$

- Определение прибытия нейтрино. Вылетевший  $e^-$  сохраняет направление движения нейтрино
  - Вода → низкий фон + «дешёвый» материал
  - Недостаток – сложно определить чем вызвано свечение: нейтрино или другой нейтральной частицей?



# Нейтринные детекторы : Супер-Камиоканде

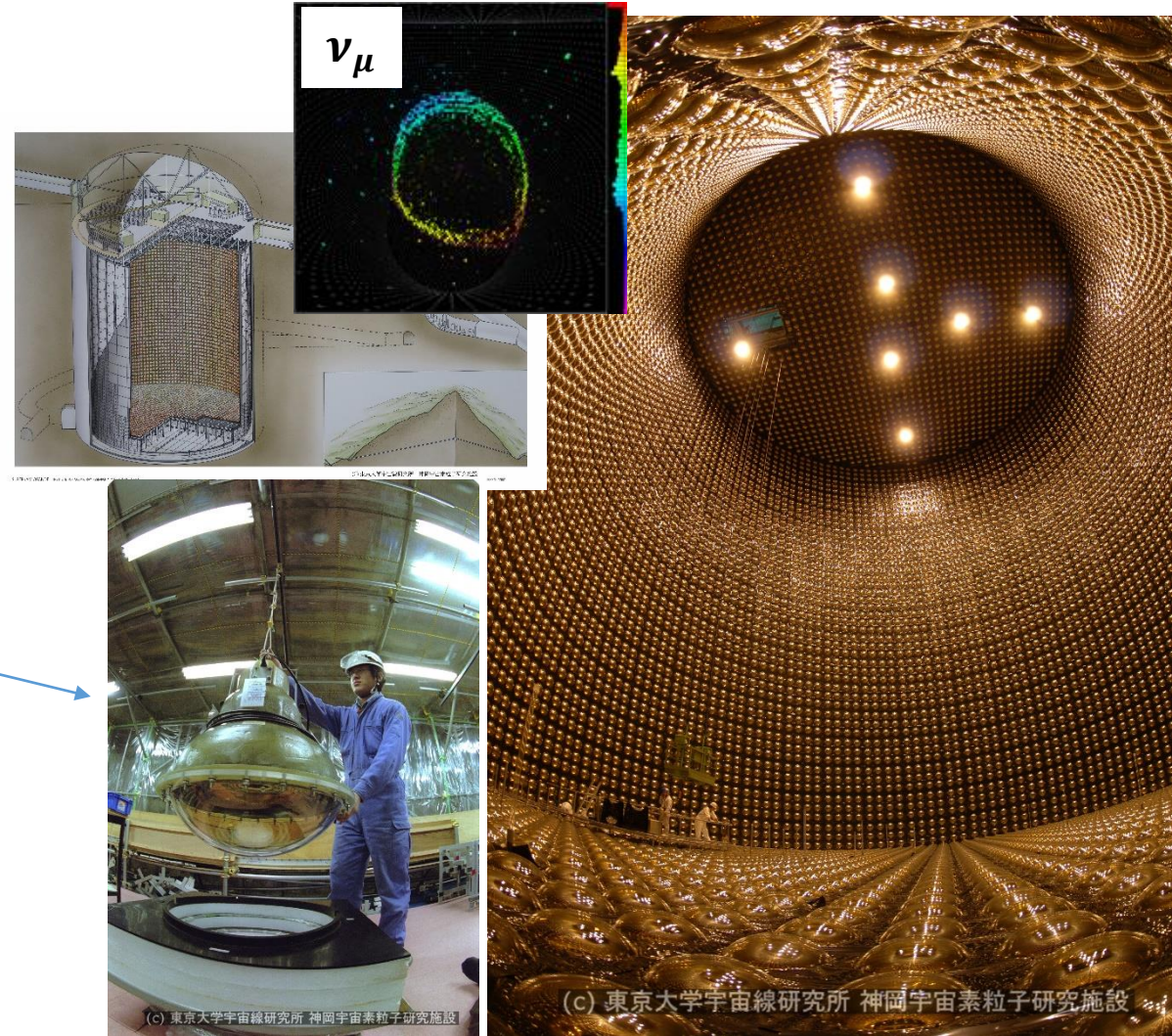
Супер-К – самый большой подземный черенковский детектор нейтрино.

1991 г. – Строительство в шахте Камиока (Япония) глубиной 1 км.  
1996 г. – Первые данные.

Детектор – цилиндр (нержавеющая сталь),  
высота 41.4 м + диаметр 39.3 м. + 50000 т. очищенной воды.  
≈ 13000 фотоумножителей на стенах резервуара.

Супер-К изучает

- Солнечные нейтрино
- Атмосферные нейтрино
  - Распад протона - ?
- Нейтрино из вспышек сверхновой (*явление при котором звезда резко увеличивает свою яркость и медленно затухает после. Процесс в конце эволюции некоторых звёзд + выделение огромной энергии*).
  - Реликтовые нейтрино - ?

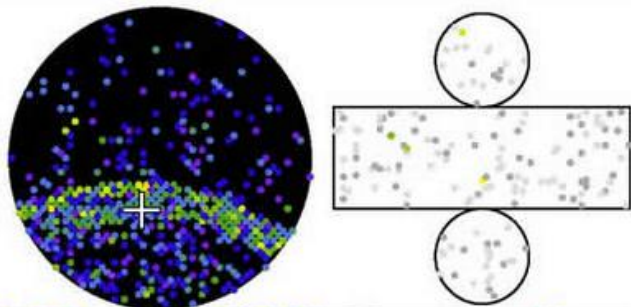


<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>

# Нейтринные детекторы: Супер-Камиоканде

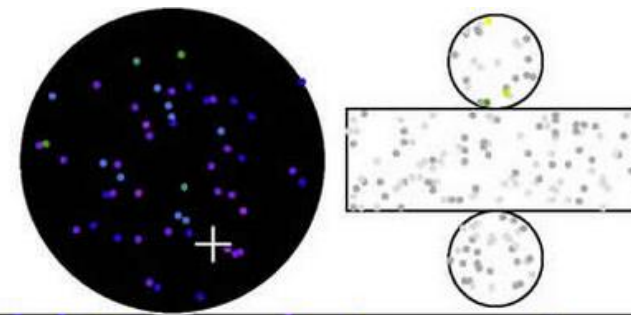
## Super-Kamiokande I

Run 1728 Sub 4 Ev 25171  
 96-05-29:08:01:53  
 Inner: 2294 hits, 7095 pE  
 Outer: 4 hits, 32 pE (in-time)  
 Trigger ID: 0x03  
 D wall: 592.8 cm  
 FC mu-like, p = 1012.9 MeV/c



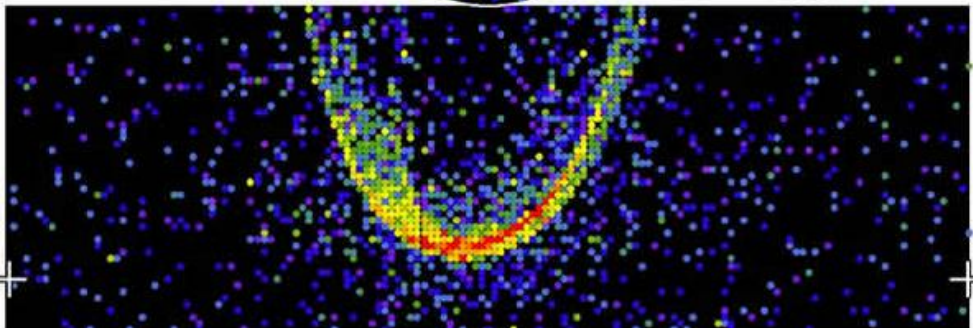
## Super-Kamiokande I

Run 1757 Sub 4 Ev 25716  
 96-06-03:07:51:37  
 Inner: 1948 hits, 5243 pE  
 Outer: 4 hits, 30 pE (in-time)  
 Trigger ID: 0x03  
 D wall: 671.6 cm  
 FC e-like, p = 618.1 MeV/c



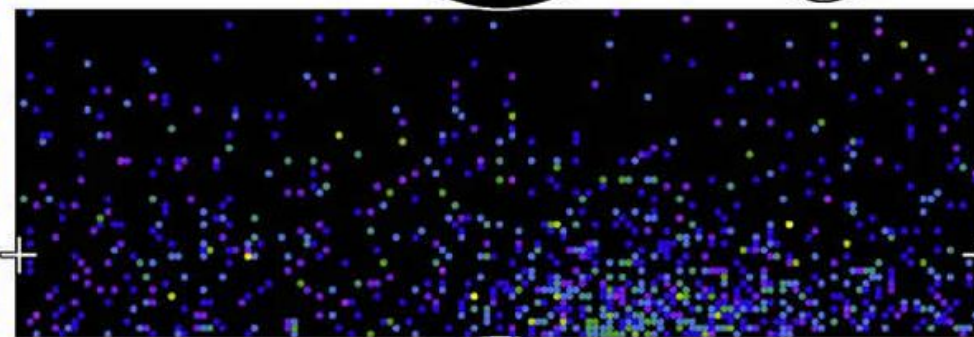
## Charge (pe)

- >26.7
- 23.3-26.7
- 20.2-23.3
- 17.3-20.2
- 14.7-17.3
- 12.3-14.7
- 10.0-12.3
- 8.0-10.0
- 6.2-8.0
- 4.7-6.2
- 3.3-4.7
- 2.2-3.3
- 1.3-2.2
- 0.7-1.3
- 0.2-0.7
- < 0.2

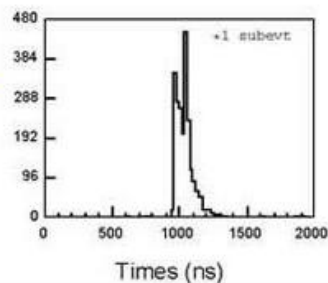
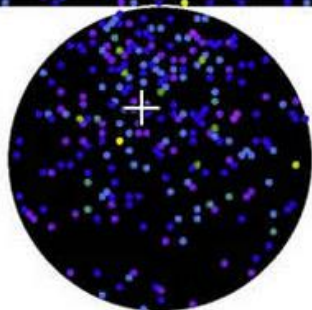


## Charge (pe)

- >26.7
- 23.3-26.7
- 20.2-23.3
- 17.3-20.2
- 14.7-17.3
- 12.3-14.7
- 10.0-12.3
- 8.0-10.0
- 6.2-8.0
- 4.7-6.2
- 3.3-4.7
- 2.2-3.3
- 1.3-2.2
- 0.7-1.3
- 0.2-0.7
- < 0.2

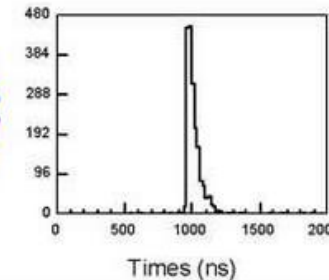
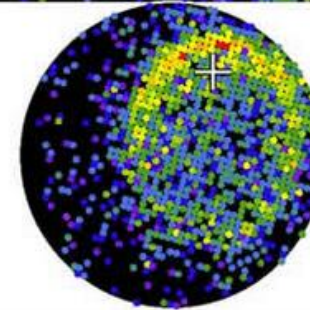


$\nu_{\mu}$



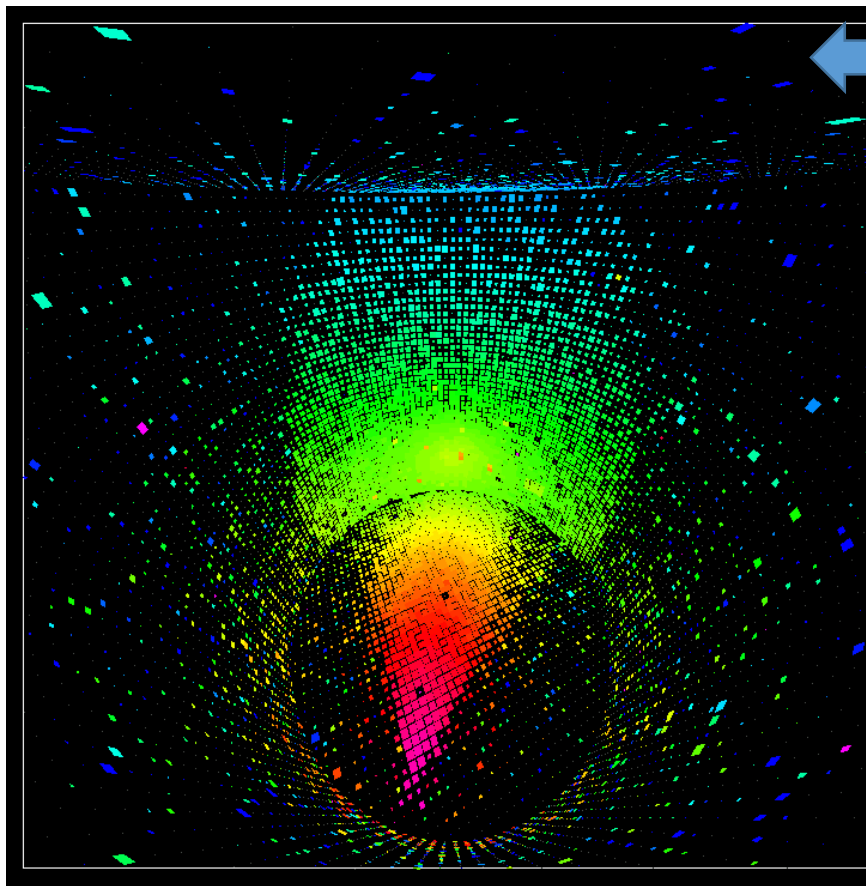
$\nu_e$

*Кольцо, образованное при свечении черенкова*



<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html> - официальный сайт Супер-К, где в реальное время возможно увидеть события фиксируемые детектором! « event display »

# Нейтринные детекторы: Супер-Камиоканде



Реконструкция события в 3D  
Мюон ( $q = -1$ ) входит в детектор с нижней части и выходит через боковую поверхность цилиндра.  
Зарегистрирован 1996-05-30, 17:12:56

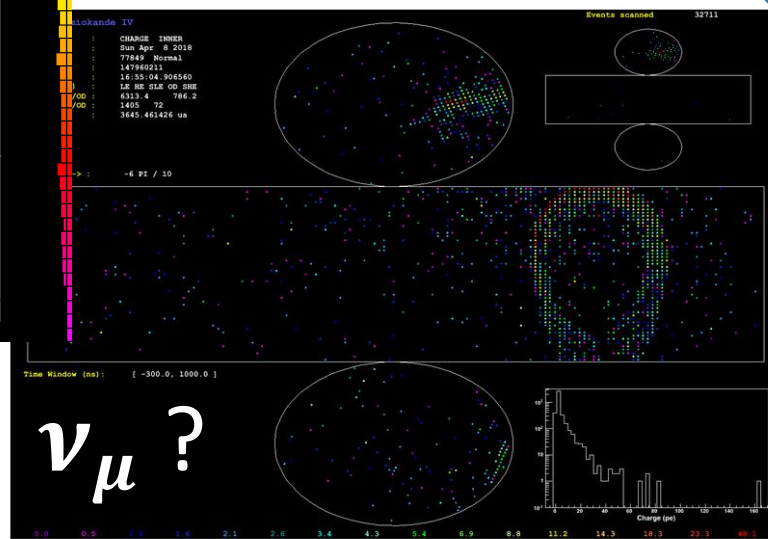


<http://www.ps.uci.edu/~tomba/sk/tscan/pictures.html>

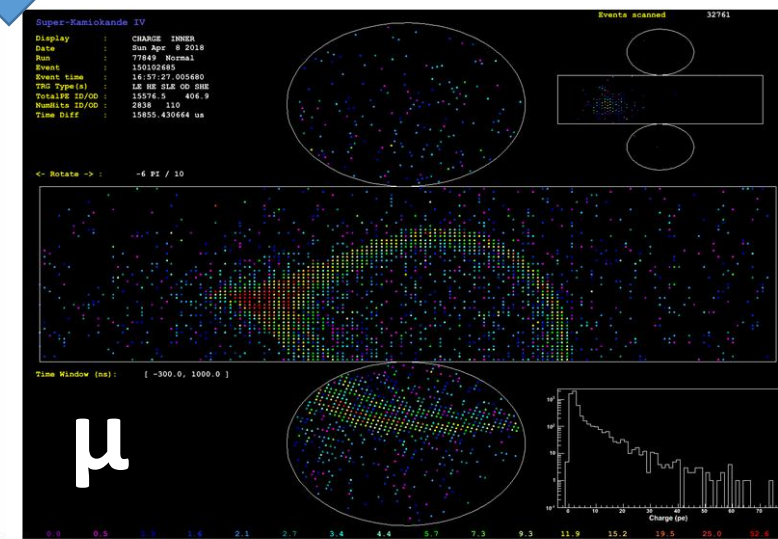
Другие события, 08 апреля 2018 г., прямой «event display»

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/realtime-monitor/>

Super-Kamiokande Realtime Monitor



Super-Kamiokande Realtime Monitor



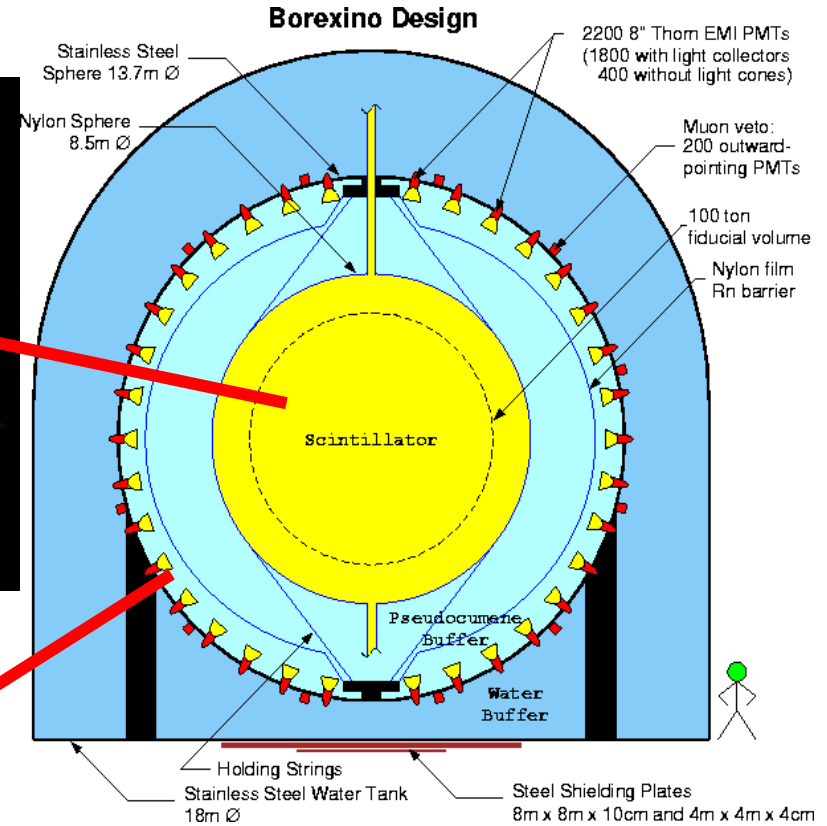
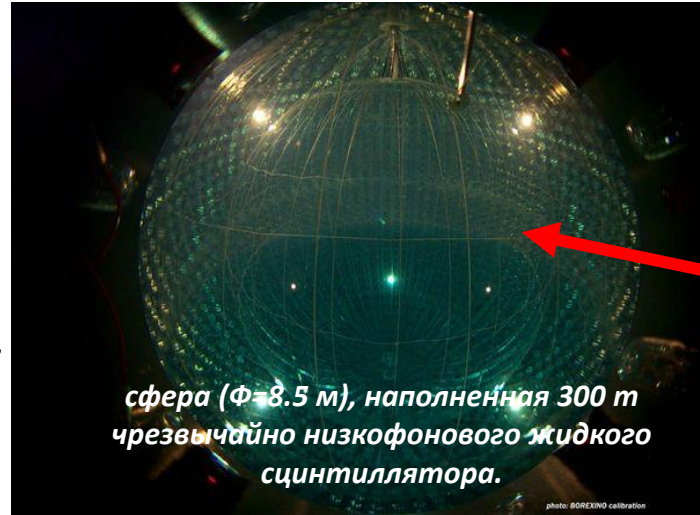
# Нейтринные детекторы

## 2. Рассеяние нейтрино на электронах

### Сцинтиляционный детектор

Вместо воды используется ультрачистая сцинтиляционная жидкость. Электрон рассеяния вызывает вспышки в сцинтиляторе. Светимость > в  $\approx 50$  раз светимость черенковского излучения.

- Сцинтиляционный энергетический порог детектора < черенковского.
- Недостаток - невозможно определить направление исходного нейтрино по направлению образовавшихся  $\gamma$ .
- + Высокая стоимость сцинтиляционной жидкости.



**Борексино** — эксперимент для изучения низкоэнергетических ( $\sim 860$  кэВ) солнечных нейтрино (реакция на Солнце)  ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$ . Эксперимент позволяет понять процессы в ядре Солнца и определить параметры нейтринных осцилляций.

# Нейтринные детекторы

## 2. Рассеяние нейтрино на электронах

Детектор на основе время-проекционной камеры  
(Liquid Argon Time Projection Chambers - LAr-TPC)



Используется жидкий аргон

- **Результат – 3D электронное изображение трека = след за частицей.**

- Дрейфовый объём (drift in) = газ + электроды  
Создание равномерного электрического поля  $\vec{E}$  между двумя вертикальными плоскостями

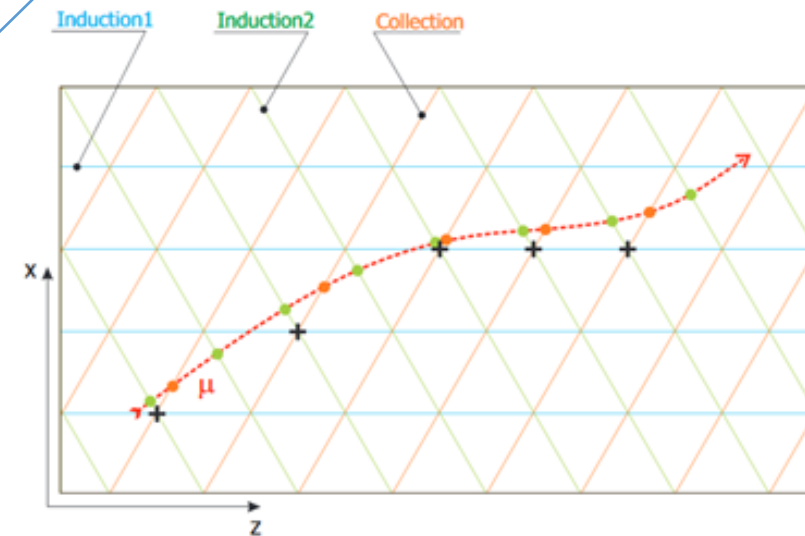
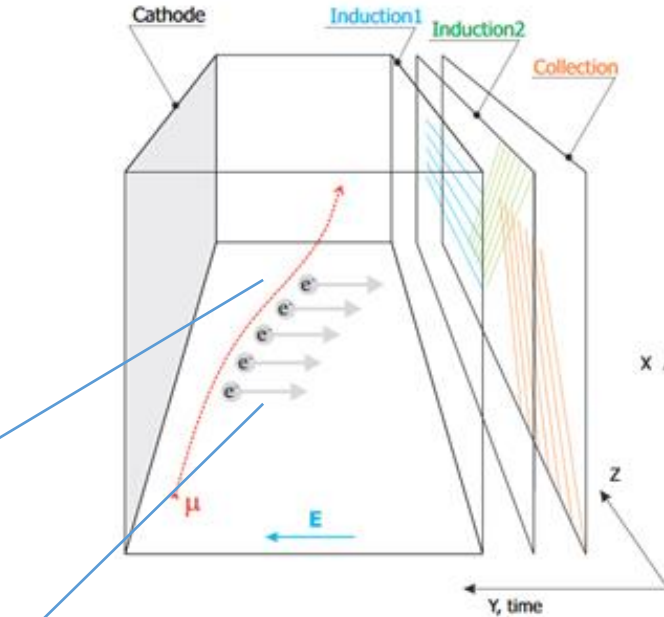
- **Трек заряженной частицы пересекающей камеру - цепочка ионизационных кластеров.**

**Кластер –  $e^-$  первой ионизации и несколько  $e^-$  второй ионизации.**

Кластеры  $e^-$  дрейфуют к стенке камеры где многопроволочная пропорциональная камера.

- **Пропорциональная камера → (X, Y) кластеров.**

Z измеряется по времени дрейфа кластера  $e^-$  от точки образования до анодной проволоки (сигнал окончания дрейфа).



ICARUS  
WA105 (CERN)  
DUNE

<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1210/1210.5089.pdf>

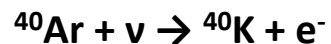
Precise 3D track reconstruction algorithm for the ICARUS T600 liquid argon time projection chamber detector.

# Нейтринные детекторы

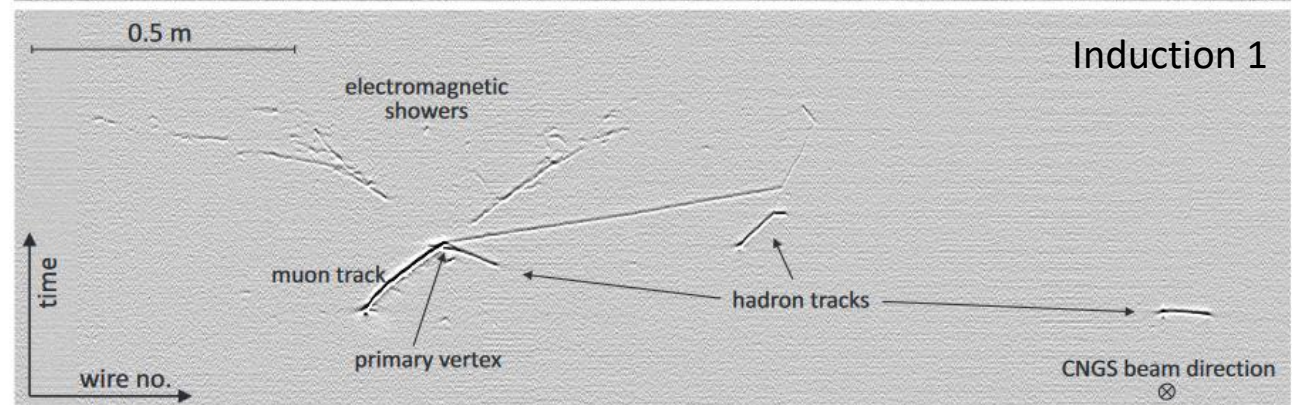
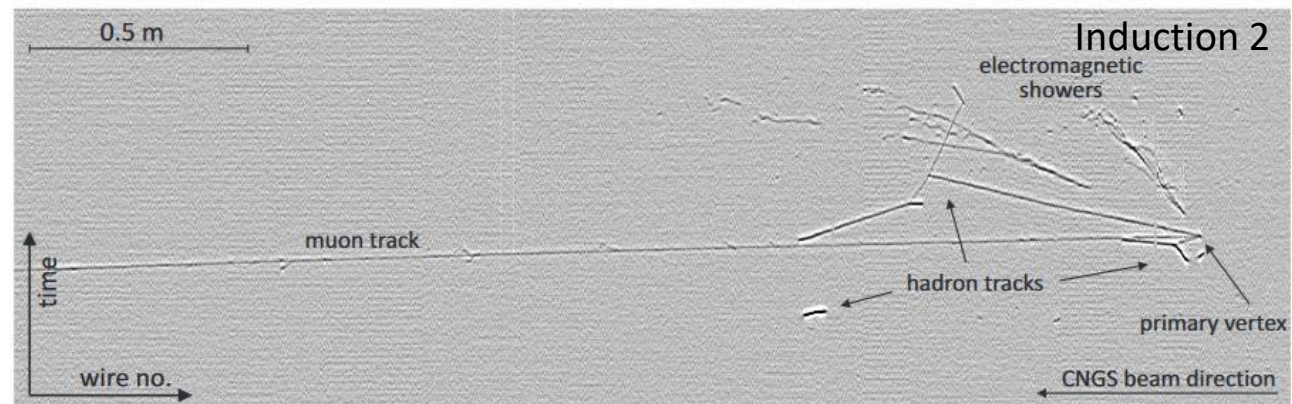
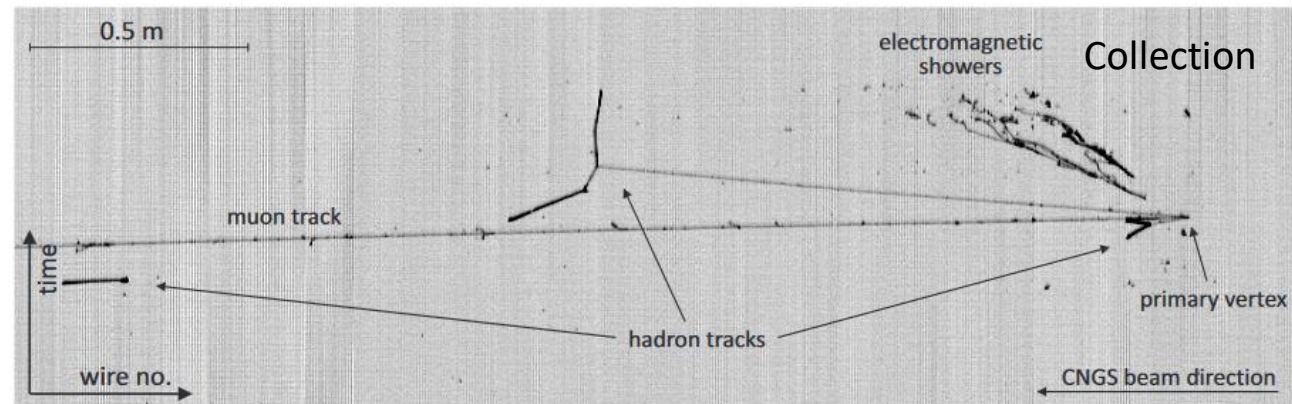
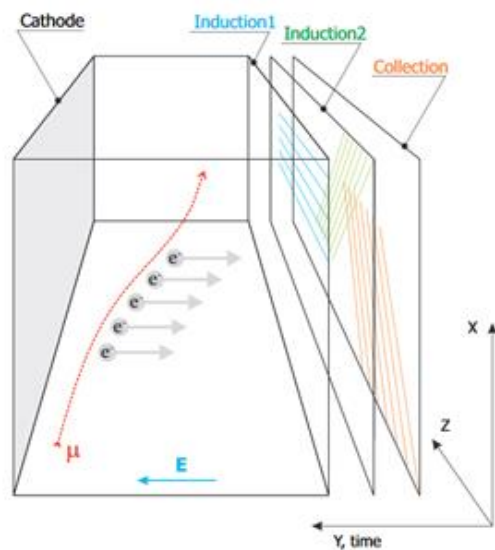
## Детектор на основе время-проекционной камеры

### ICARUS

(Liquid Argon Time Projection Chambers - LAr-TPC)



Пример взаимодействия нейтрино в детекторе ИКАРУС.



<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1210/1210.5089.pdf>

Precise 3D track reconstruction algorithm for the ICARUS T600 liquid argon time projection chamber detector.



# Вопросы новой физики



## Что мы знаем сегодня о нейтринно?

1. Нейтринно существует!  $\beta$  – распад 1930 & 1956

$$2. q_\nu = 0$$

$m_\nu \neq 0$ , но очень  $\ll\ll$

малое сечение взаимодействия

3. Существует 3 аромата  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$   
+ 3 массовых состояния  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ .

1962 - 1975

4. Смешивание между  $\nu$  - осцилляция.  $\sim 1960$  &  $\sim 2006$

Параметры смешивания измеряются в экспериментах

$\cos \theta_{ij}, \sin \theta_{ij}$  и  $\Delta m_{ij}^2$

Солнечные  $\nu$

Атмосферные  $\nu$

Реакторные (+ ускорители)  $\nu$



Б.руччо Понтекорво

$$\sin^2 \vartheta_{12} = 0,304_{-0,016}^{+0,022}$$

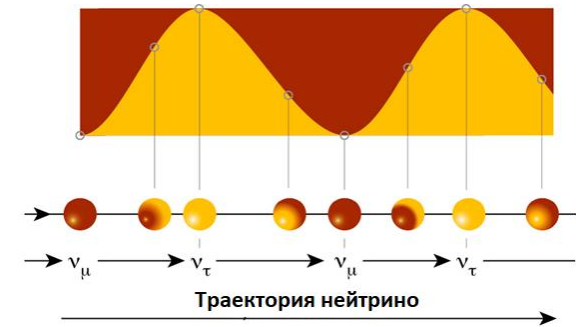
$$\Delta m_{21}^2 = 7,58_{-0,26}^{+0,22} * 10^{-5} eV^2$$

$$\sin^2 \vartheta_{23} = 0,567_{-0,128}^{+0,032}$$

$$\Delta m_{31}^2 = 2,48_{-0,07}^{+0,05} * 10^{-3} eV^2$$

$$\sin^2 \vartheta_{13} = 0,0214_{-0,001}^{+0,001}$$

$$\Delta m_{32}^2 = ? \text{ Это нам ещё не известно!}$$



И сегодня!

PMNS

	$\nu_1$	$\nu_2$	$\nu_3$
$\nu_e$	Yellow square	Blue square	Small red square
$\nu_\mu$	Small green square	Blue square	Yellow square
$\nu_\tau$	Small green square	Blue square	Yellow square

# Вопросы *новой* физики

## Что нам еще не известно?

- Фермион Майораны или Дирака?

$$\nu = \bar{\nu}?$$

$$\nu \neq \bar{\nu}?$$

Античастица «зеркальное отражение»  
частицы

$\nu \rightarrow \bar{\nu} = 0$ , что «отражается» для  $\nu$ ?

*фермион Майораны — фермион, который является своей собственной античастицей.*



Частица  $\leftrightarrow$  Античастица  
Частицы – *двойники*

$$\text{Масса}_\nu = \text{Масса}_{\text{анти}\nu}$$

$$\text{Спин}_\nu = \text{Спин}_{\text{анти}\nu}$$

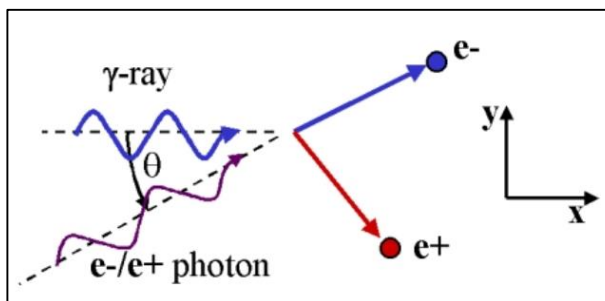
Заряд  $\neq$

$$B \neq$$

$$L \neq$$

(барионное и лептонное число)

П. Дирак, 1928 г.  
Эксп. открытие позитрона  
в 1932 г.



Формирование пар  
Обратный процесс - аннигиляция

Спиральность

$p \ \& \ s$



*Правая поляризация*



$p \ \& \ s$



*Левая поляризация*

Безнейтринный двойной  
 $\beta$ -распад  
 **$0\nu 2\nu$ -распад**

\*фермион — частица с полуцелым значением спина

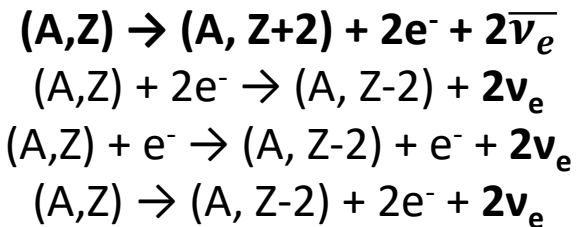
бозон — целый спин

# Вопросы *новой* физики

Безнейтринный двойной  $\beta$ -распад  
(*Neutrinoless double beta decay*)  
 **$0\nu 2\beta$ -распад**

Почему нам интересна именно эта реакция?

Двойной  $\beta$ -распад  $2\nu 2\beta$



Если эта реакция подтвердится экспериментально  $\rightarrow$   
нейтрино, фермион Майораны!

**Самый редкий из всех видов  
распада!**

11 нуклидов +  $T_{1/2} > 7 \cdot 10^{18}$  лет!  
 $T_{1/2} (^{128}\text{Te}) = 3,5 \cdot 10^{24}$  лет

Необходима высокая  
ядерная чистота  
используемых  
источников.  
Минимальный фон!

Isotope	$\beta\beta(0\nu)$ Half-life limit (years)	Natural Abundance [%]
$^{48}\text{Ca}$	$> 1.4 \times 10^{22}$	0.187
$^{76}\text{Ge}$	$> 3.0 \times 10^{25}$	7.8
$^{82}\text{Se}$	$> 1.0 \times 10^{23}$	9.2
$^{100}\text{Mo}$	$> 1.1 \times 10^{24}$	9.6
$^{130}\text{Te}$	$> 4.0 \times 10^{24}$	34.5
$^{136}\text{Xe}$	$> 1.1 \times 10^{25}$	8.9
$^{150}\text{Nd}$	$> 1.8 \times 10^{22}$	5.6

<https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.48.512>

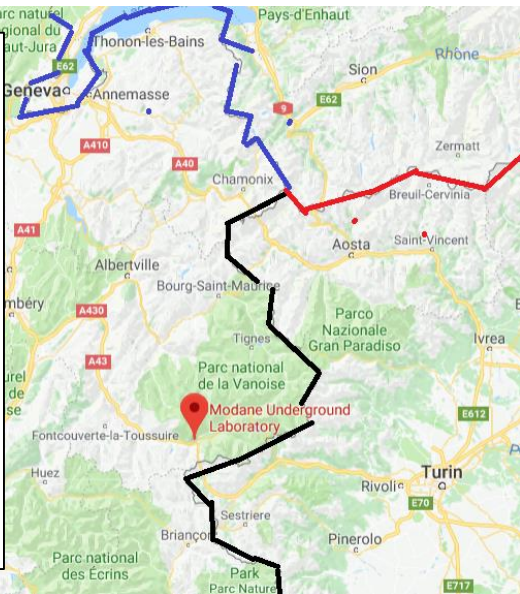
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405428316000034>

# Вопросы новой физики

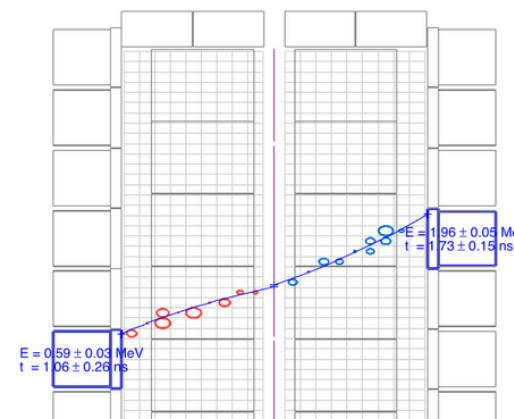
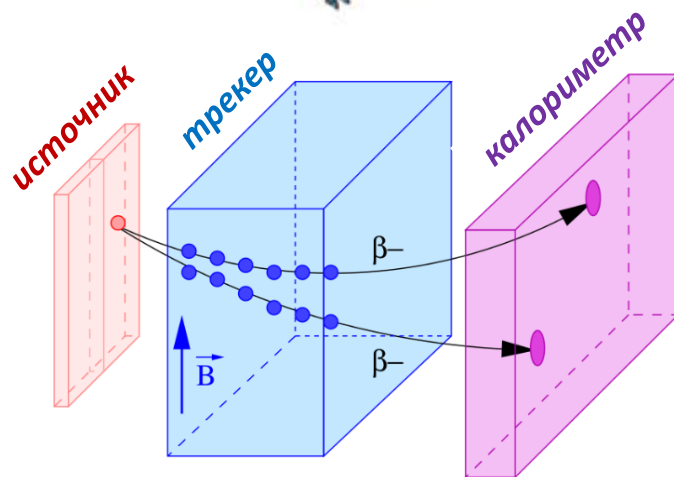
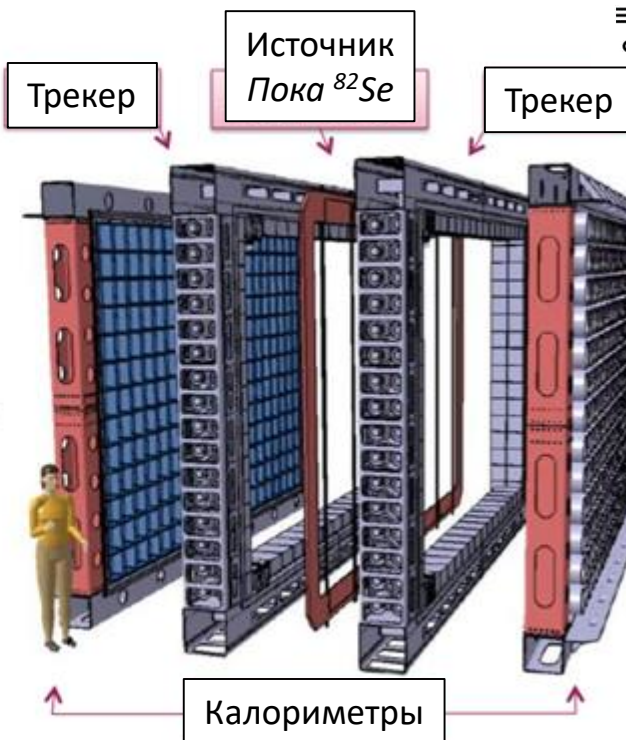
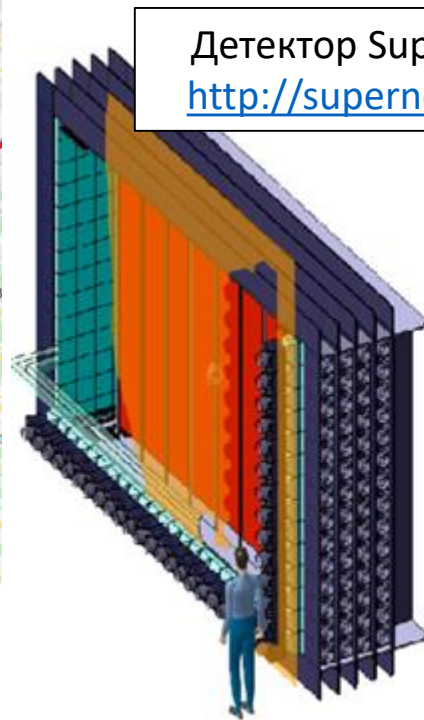
Эксперимент  
SuperNEMO  
0ν2β-распад

$(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^-$  ?

Подземная  
лаборатория Modane  
Тунель Fréjus в Альпах  
Франции



Детектор SuperNEMO  
<http://supernemo.org/>



# Вопросы *новой* физики

Эксперимент до SuperNEMO → NEMO-3  
Также в поисках безнейтринного  $\beta\beta$ -распада.

Данные с 2003 по 2011 г.  
Modane  
7 нуклидов ( $\beta\beta$ )

$^{100}\text{Mo}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{116}\text{Cd}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{48}\text{Ca}$

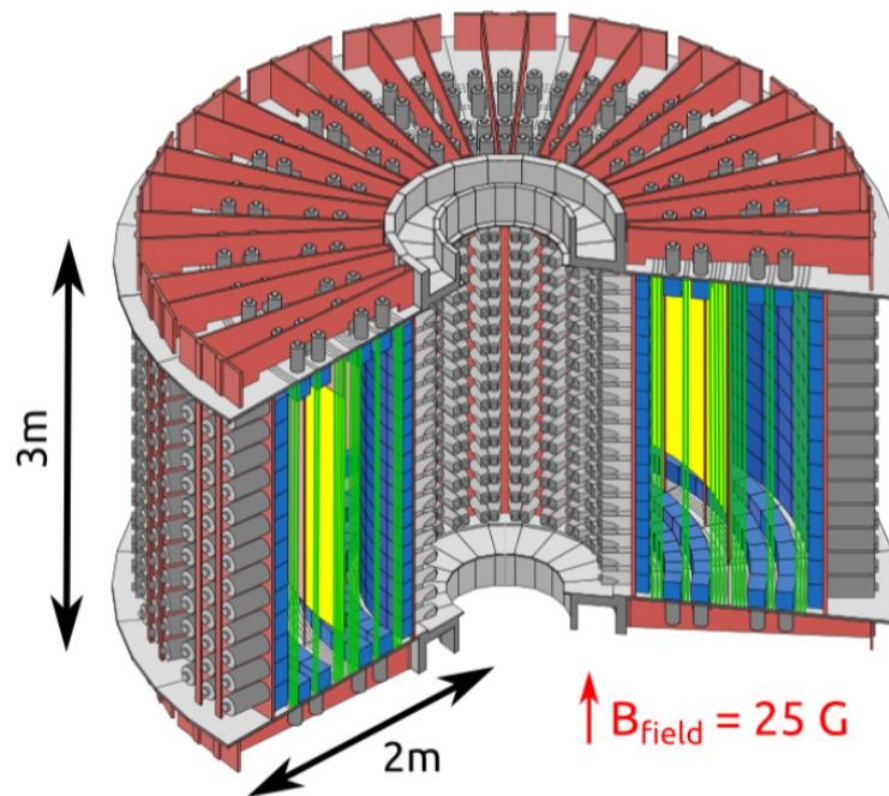
Шум →  $2\nu 2\beta$  от  $^{208}\text{Tl}$  ( $^{232}\text{Th}$ ) и от  $^{214}\text{Bi}$  ( $^{238}\text{U}$ ), ядра  
нечистот в пластине источника  
+ нечистоты в детекторе  
+ Rn

→ Измерения  $T_{1/2}^{2\nu}$  распадов

→ Ограничения величины  $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}$

$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}$  ( $^{150}\text{Nd}$ ) >  $2,0 \cdot 10^{22}$  лет →  $\langle m_\nu \rangle < 1,6 - 5,3$  эВ

$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}$  ( $^{116}\text{Cd}$ ) >  $1,0 \cdot 10^{23}$  лет →  $\langle m_\nu \rangle < 1,4 - 2,5$  эВ



	Half-Life ( $10^{25}$ yr)	$\langle m_\nu \rangle$ (eV)
$^{100}\text{Mo}$ [This Work]	0.11	0.33–0.62
$^{130}\text{Te}$ [32, 33]	0.28	0.3–0.71
$^{136}\text{Xe}$ [34, 35]	1.9	0.14–0.34
$^{76}\text{Ge}$ [36]	2.1	0.2–0.4
$^{76}\text{Ge}$ [37, 38]	1.9	0.35

<https://arxiv.org/pdf/1506.05825.pdf>

<https://indico.cern.ch/event/606690/contributions/2591399/attachments/1497377/2330598/NEMO-TAUP2017-talk.pdf>

# Вопросы *новой* физики



## Что нам еще не известно?

- Существуют ли другие виды нейтрино?  
Стерильные нейтрино?  
 $\nu_{Sterile}$  ?



- Эксперимент **STEREO**

Компактный научный ядерный реактор  
 $\varnothing 40 \text{ см} \times 80 \text{ см}$   
 $^{235}\text{U} \approx 93\%$   
Мощность 58.3 МВт

- Реактор даёт поток анти-нейтрино  $\bar{\nu}_e$
- Принцип детектирования = при открытии нейтрино в эксперименте Райнеса и Коэна, 1956 г. (ст. 11 & 12)

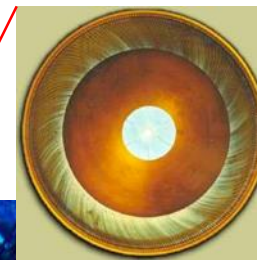
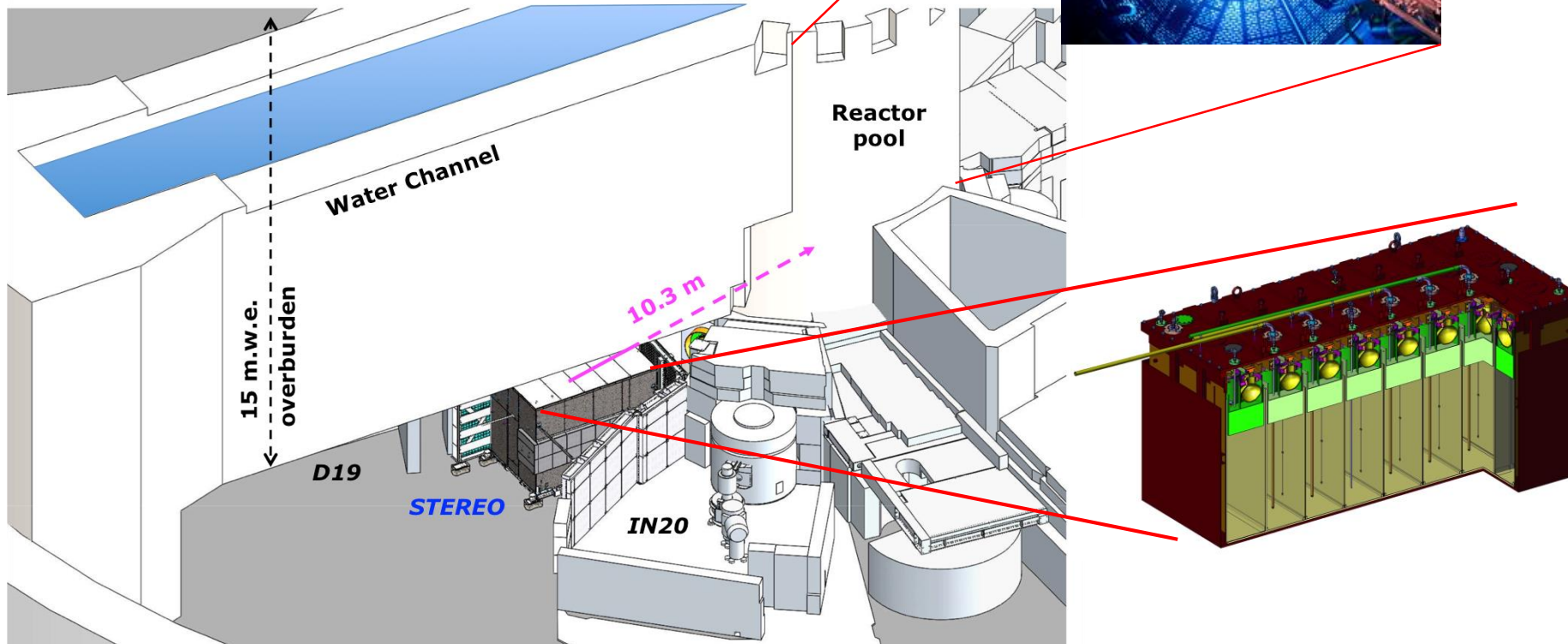


[https://indico.in2p3.fr/event/16579/contributions/60857/attachments/47355/59539/01\\_Lhuillier\\_Moriond2018\\_.pdf](https://indico.in2p3.fr/event/16579/contributions/60857/attachments/47355/59539/01_Lhuillier_Moriond2018_.pdf)

# Вопросы *новой* физики



Расстояние реактор ↔ детектор  $\approx 10$  м.



# Вопросы *новой* физики



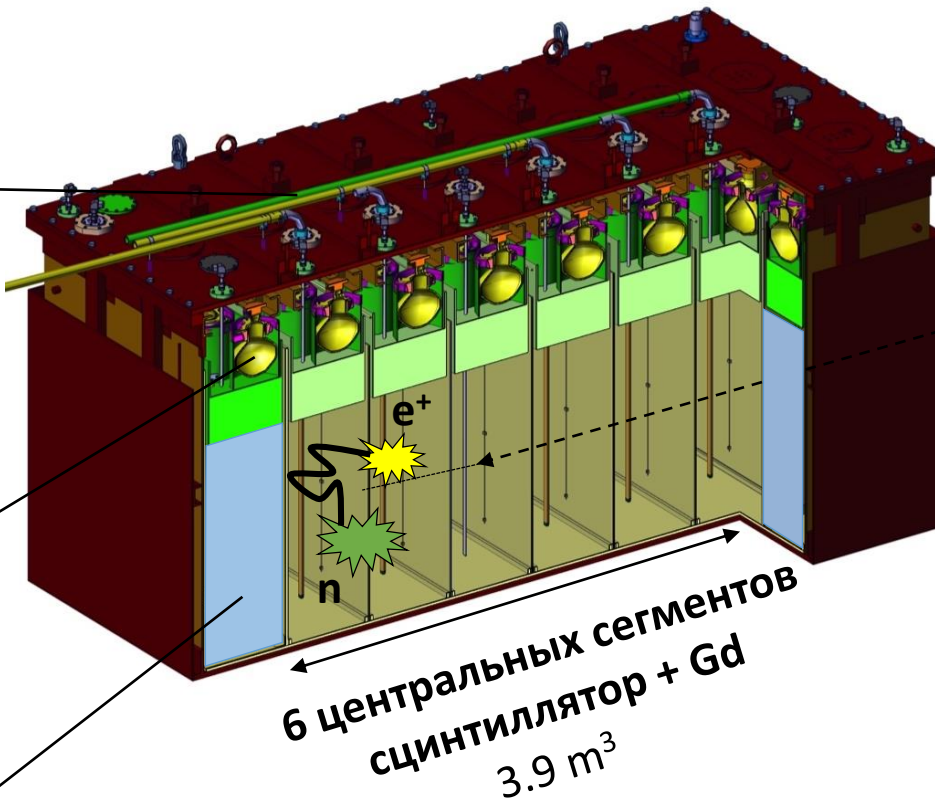
Детектор: 3 x 1,5 x 1 м<sup>3</sup>

Доступ для калибровки  
с помощью  
радиоактивных  
источников

*Ge, Cs, Mn, Zn, Co, <sup>24</sup>Na, AmBe, Cf* – калибровка  
энергии

Фотоумножители

Внешняя корона,  
без Gd



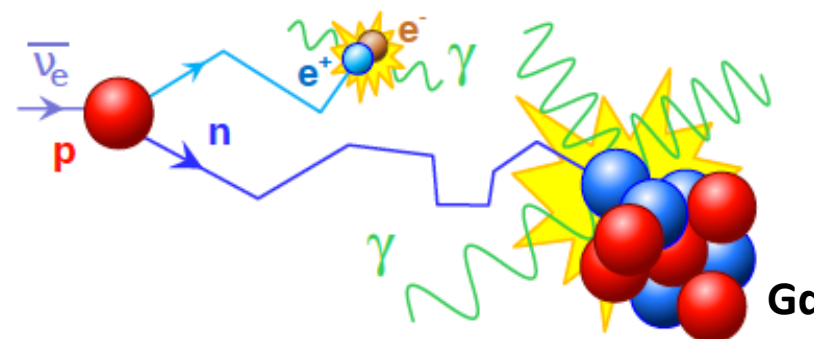
6 центральных сегментов  
сцинтиллятор + Gd  
3.9 м<sup>3</sup>

~ 300 v / день

$\bar{\nu}_e$

Энергия дектированного нейтрино  
от 1.8 до 8 МэВ.

Обратный  $\beta$ -распад (IBD)

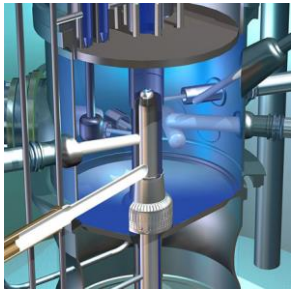
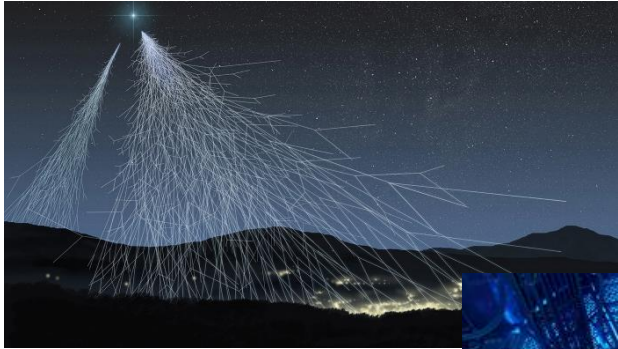




# Вопросы *новой* физики



Космические лучи ( в основном мюоны)

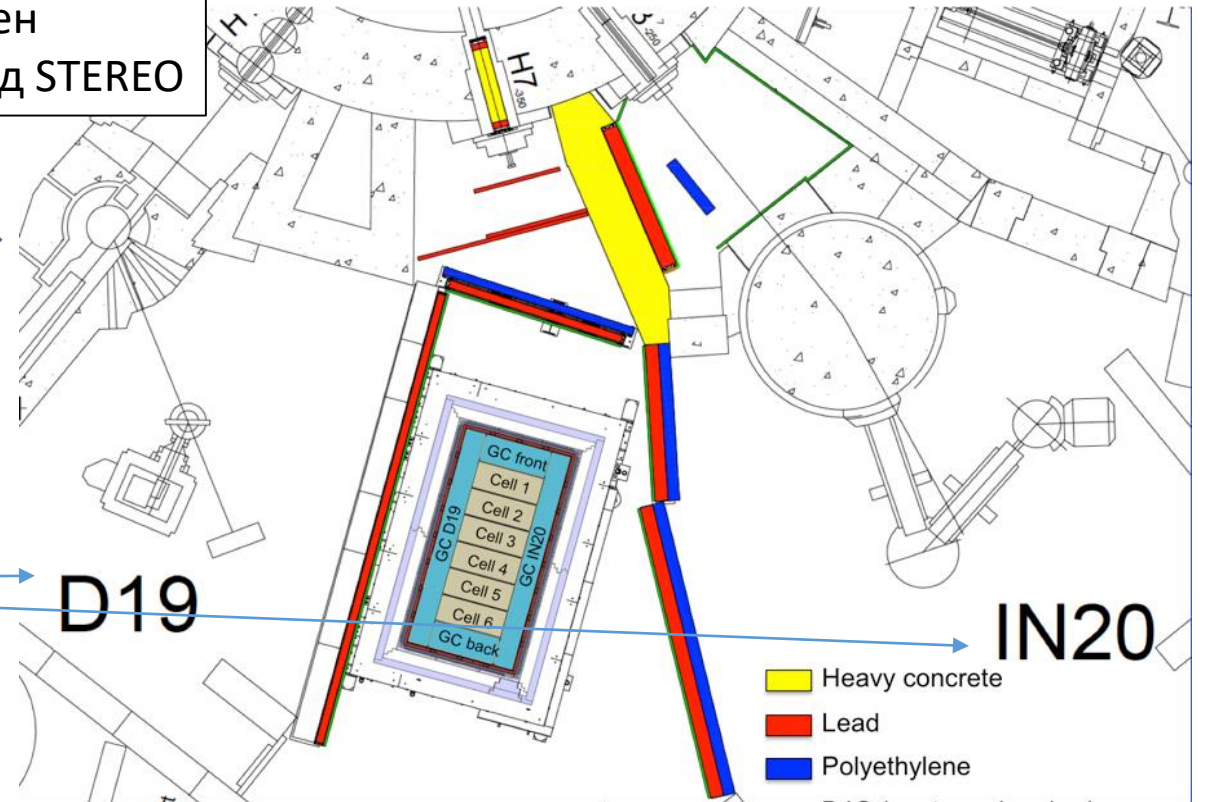


Нейтроны от реактора

Излучения соседних экспериментов

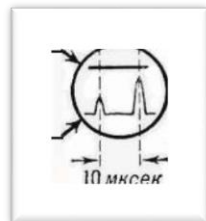
Защитные экраны  
Pb + B<sub>4</sub>C + бетон  
полиэтилен  
канал с водой над STEREO

Общий вес детектор + экраны = 93 т!



©Yves Gibert

Фоновый шум, который может имитировать сигнал нейтрино



# Вопросы *новой* физики



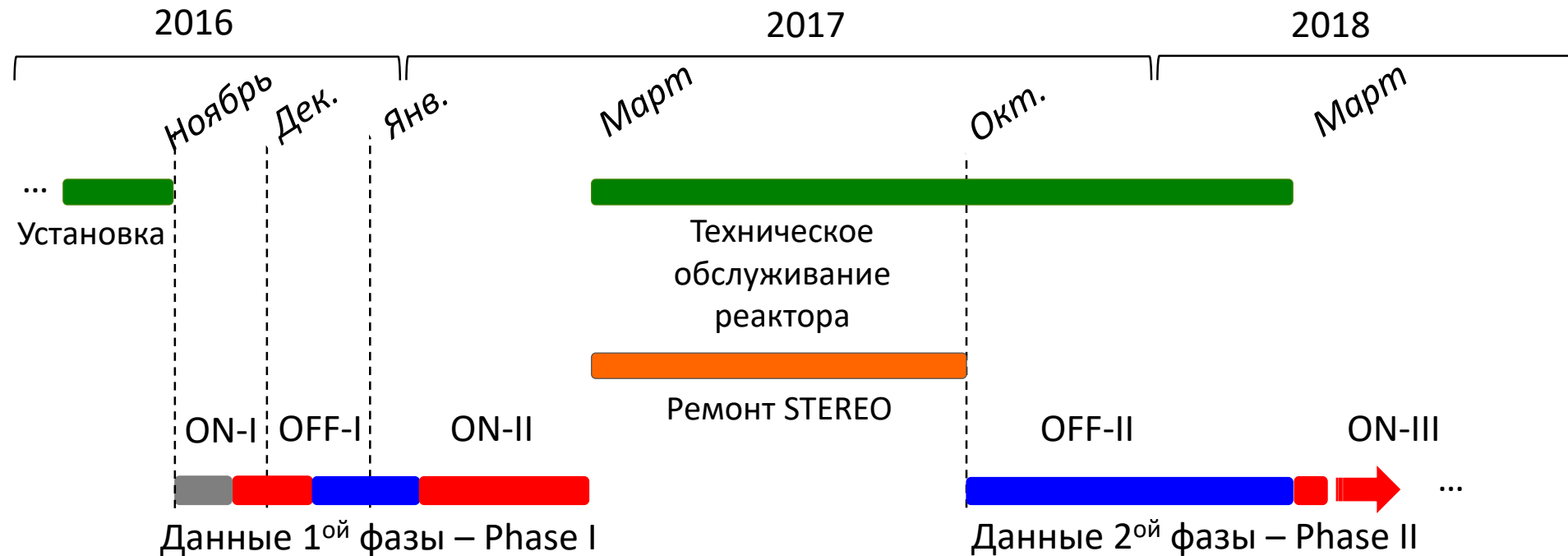
## Регистрация данных STEREO

65,8 дней - реактор **ON**

138,2 дней – реактор **OFF**

Детекция  $396 \nu$  / день  $\rightarrow \sim 26000 \nu$

Эксперимент будет работать до лета 2019 г.  
+ анализ данных



Уже были представлены публично

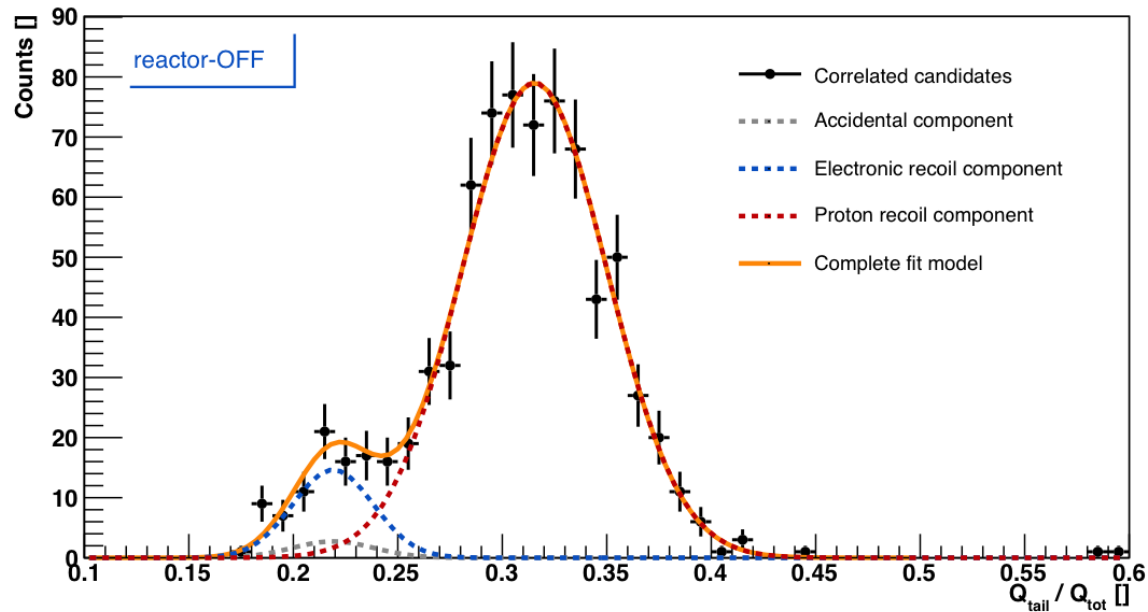
[https://indico.in2p3.fr/event/16579/contributions/60857/attachments/47355/59539/01\\_Lhuillier\\_Moriond2018 .pdf](https://indico.in2p3.fr/event/16579/contributions/60857/attachments/47355/59539/01_Lhuillier_Moriond2018.pdf)

# Вопросы *новой* физики

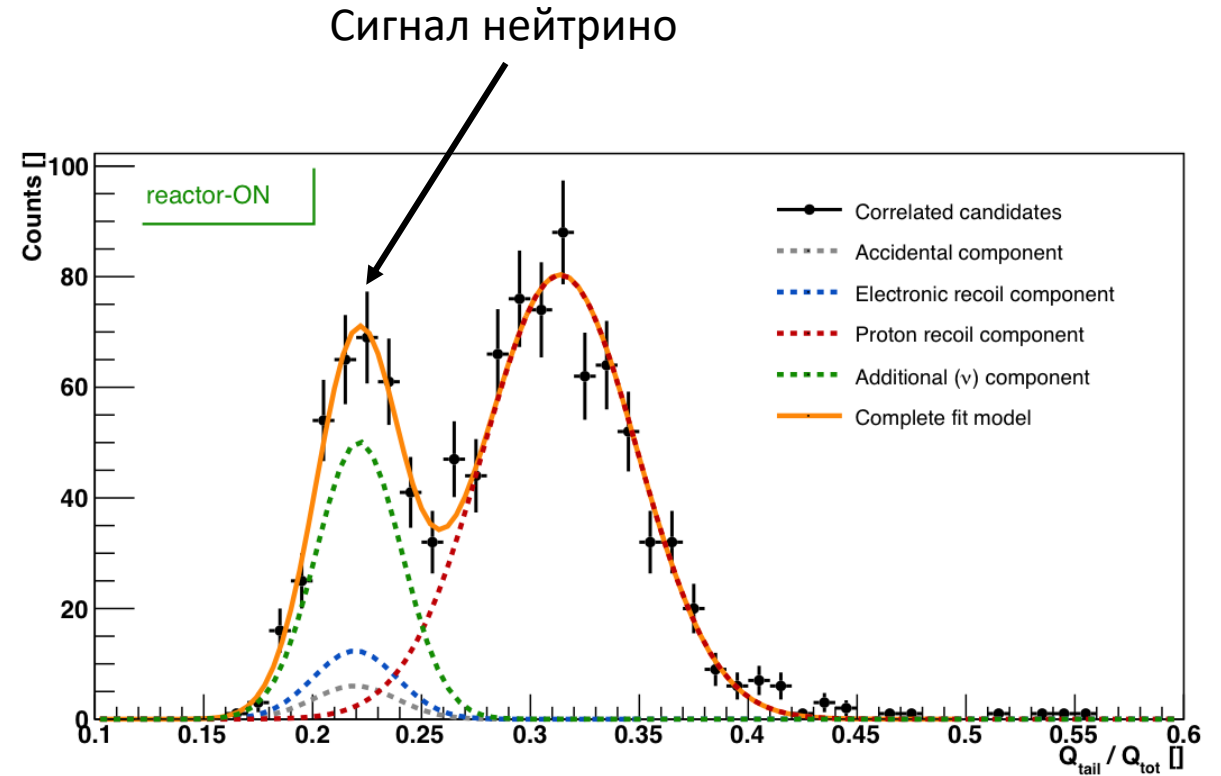


Что видит детектор и как извлечь то, что нас интересует? → **Анализ данных**

Для этого необходима хорошая характеристика фонового шума.



**OFF** – когда реактор не работает, «нужных» нейтрино нет.



**ON** – когда реактор работает, сигнал нейтрино чёткий.

# Вопросы *новой* физики



Почему мы ищем существует ли стерильный нейтрино?  
 Всему виной очередной дефицит между экспериментом и теорией!  
**Реакторная аномалия** = Reactor Antineutrino Anomaly (RAA)

Вероятность исчезновения электронных антинейтрино

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E}\right)$$



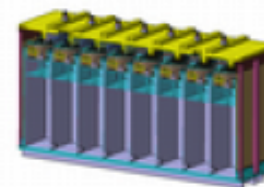
Производство  
(ароматы)

$\nu_e$

$\nu_{m1} \nu_{m2} \nu_{m3}$

Пропагация (распространение)  
(массы)

$\nu_e?$   
 $\nu_\mu?$   
 $\nu_\tau?$

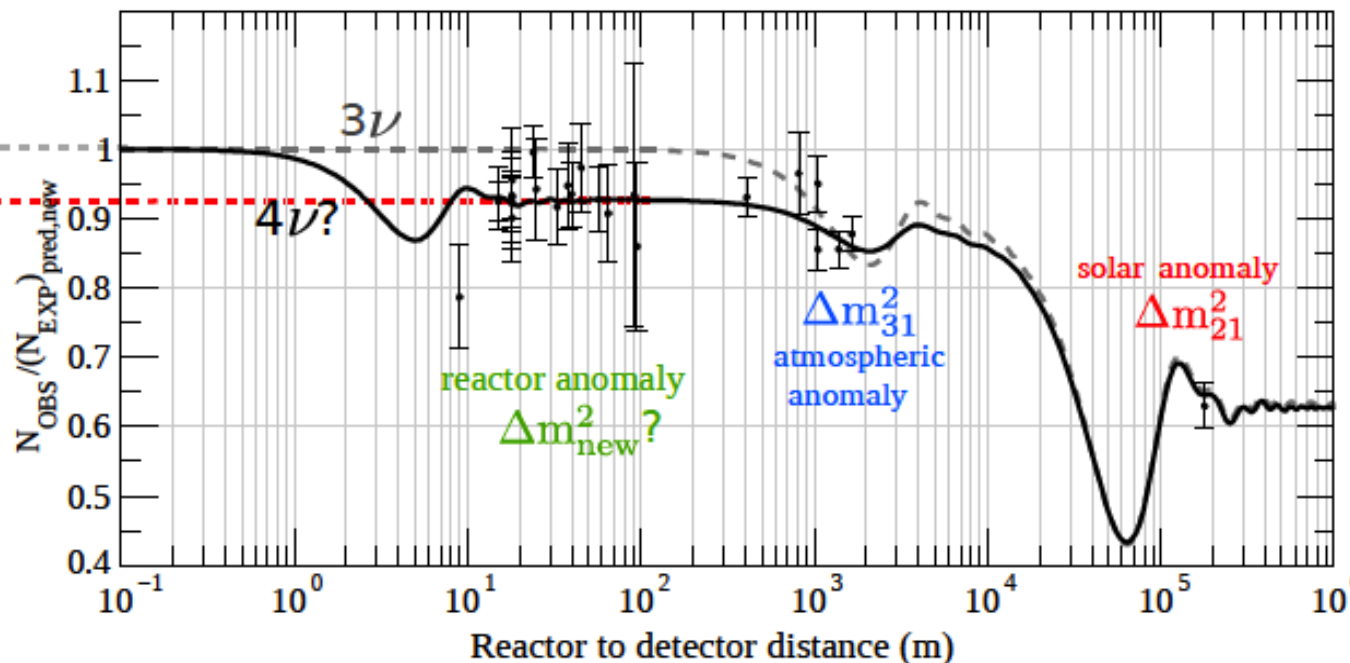


Детекция (ароматы)

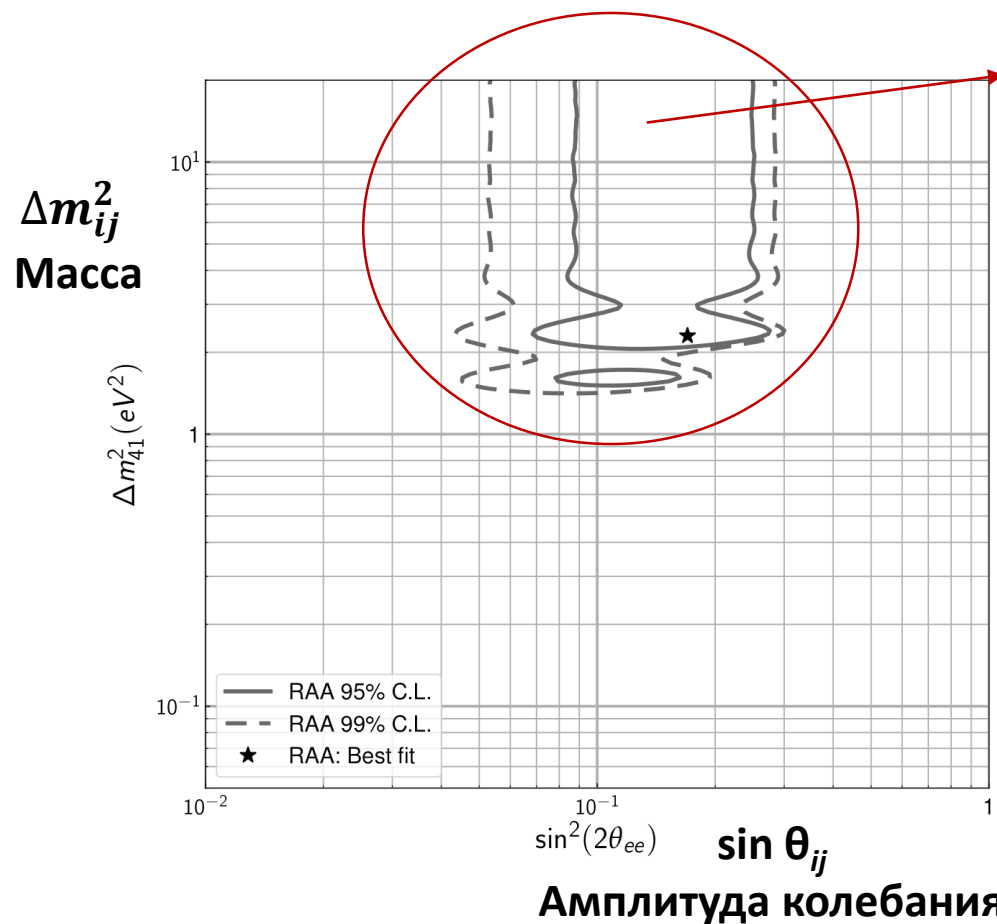
≈ 6 % дефицит

Стерильный нейтрино?  
или...  
Неверное предсказание  
спектра реакторных  
нейтрино?

$\Delta m^2 \approx 1 \text{ эВ}$

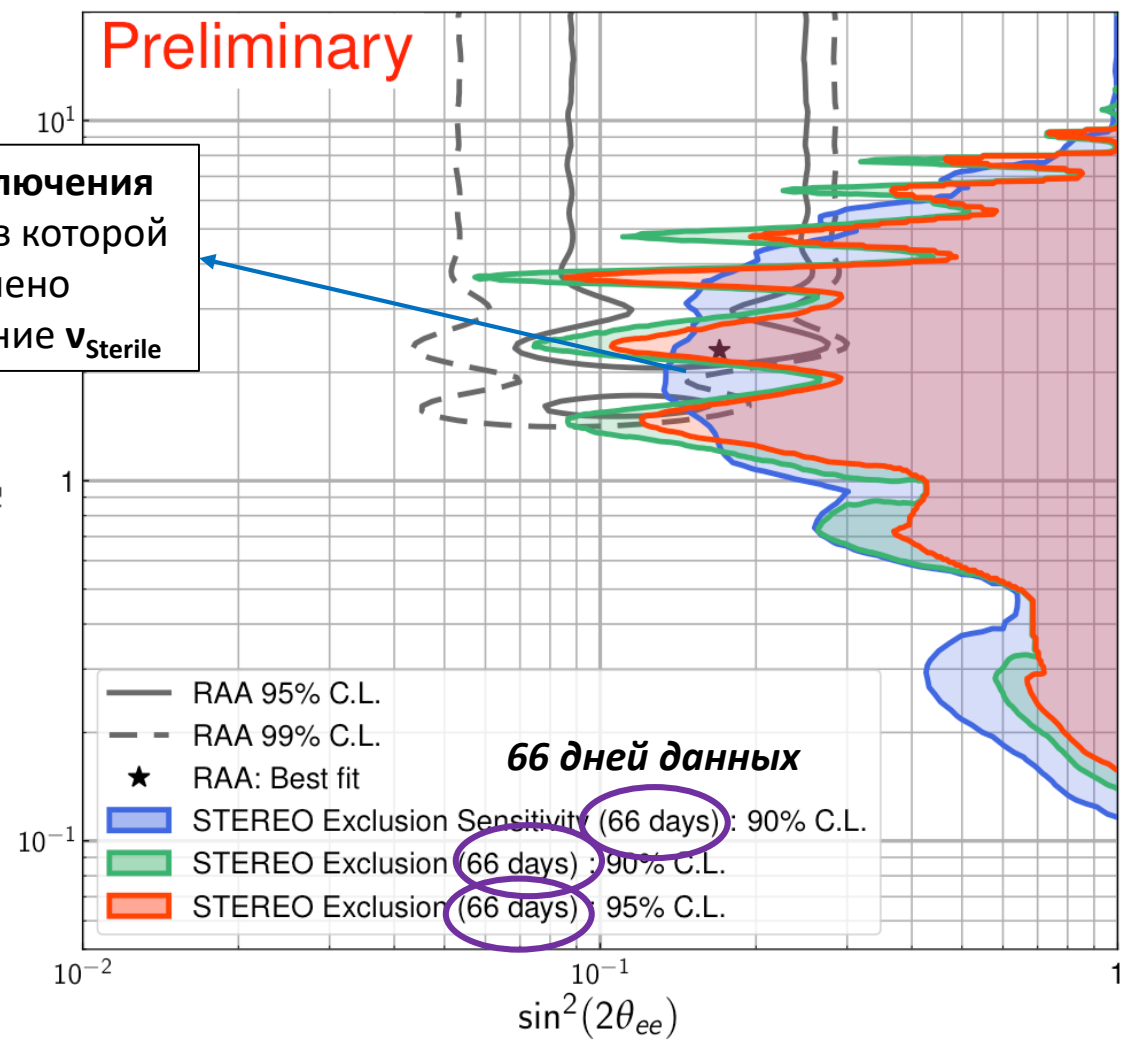


# Вопросы *новой* физики



Область возможного существования  $\nu_{Sterile}$

Контур исключения т.е. область в которой исключено существование  $\nu_{Sterile}$



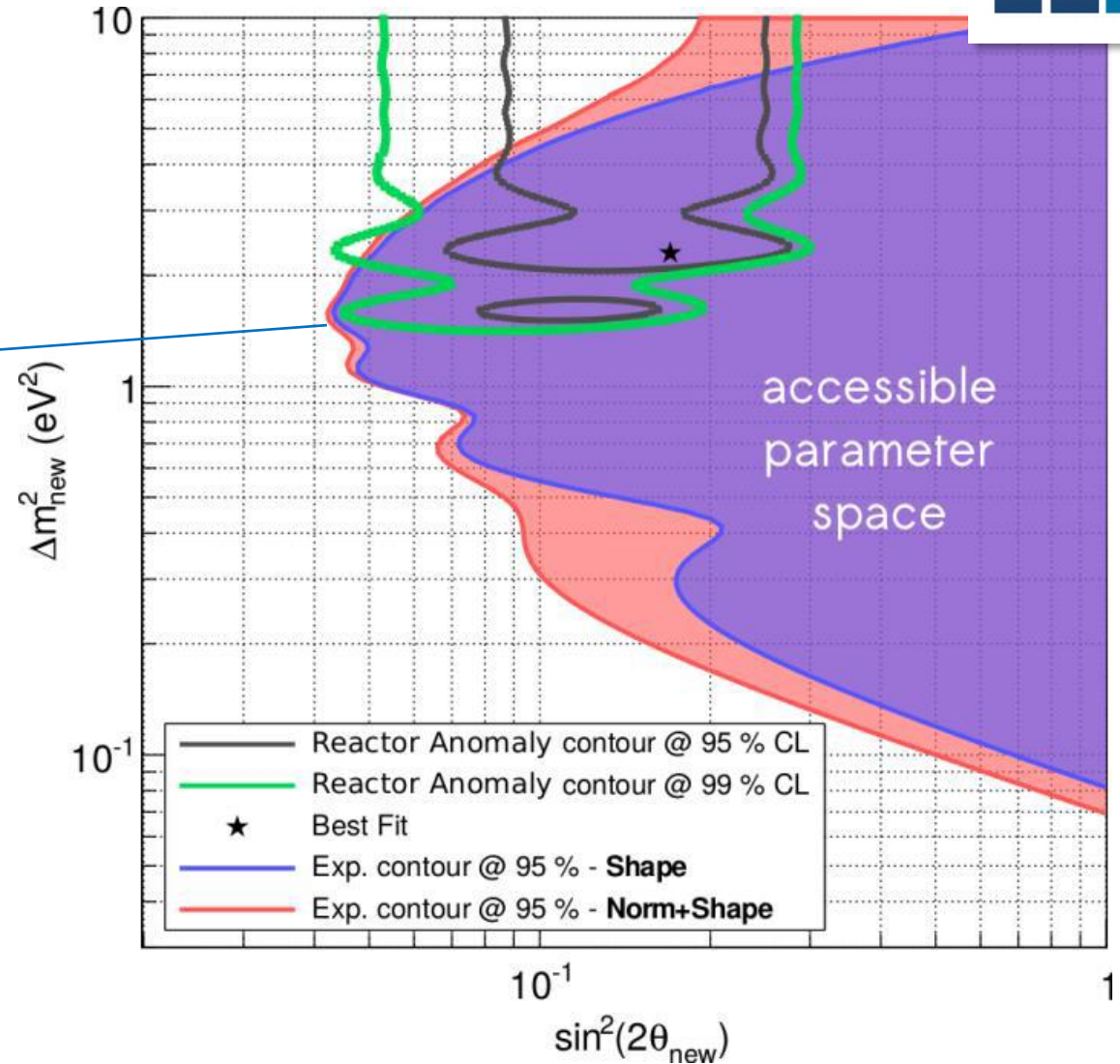
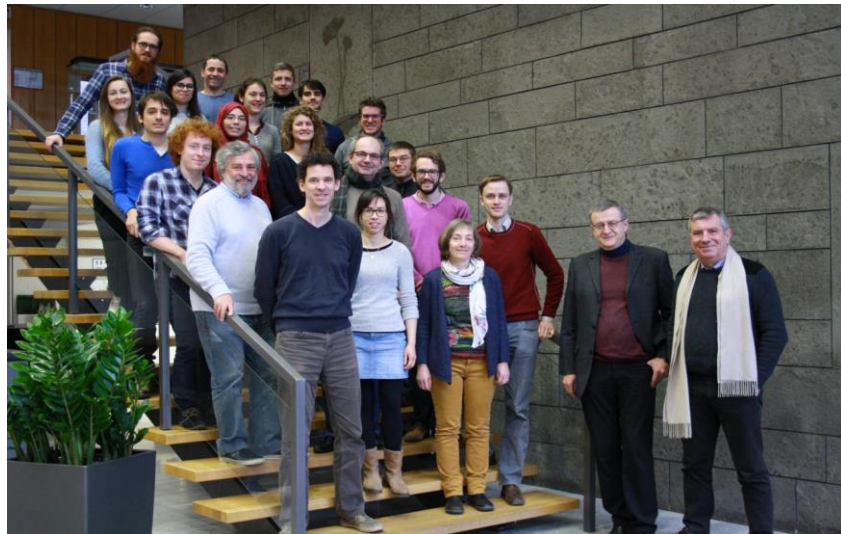
Очень часто «поиски» частиц представлены в плоскости, определённой характерными параметрами частицы.

# Вопросы *новой* физики



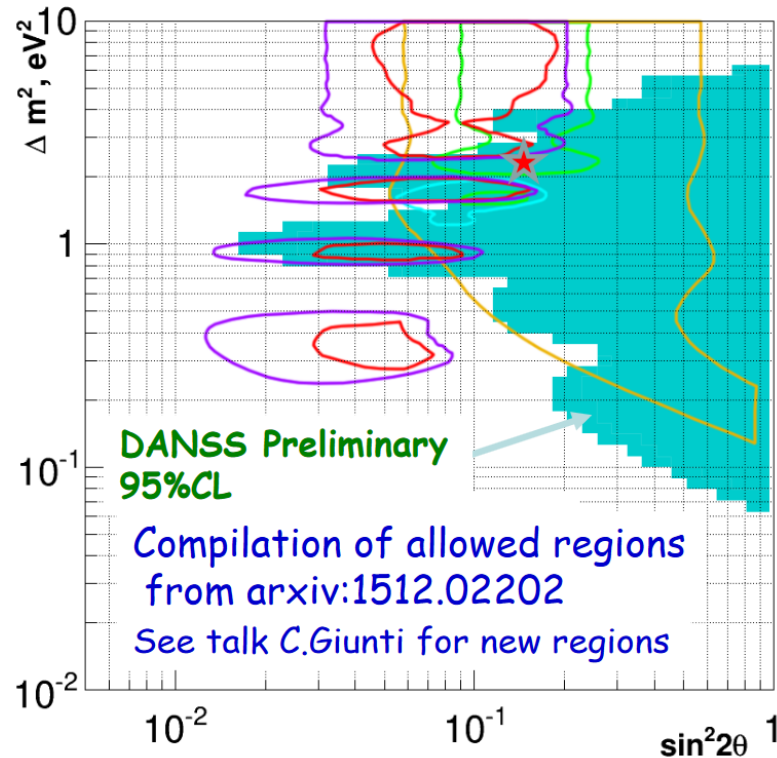
Когда количество данных будет больше → статистика выше → контур исключения ограничит более широкую область существования  $\nu_{\text{Sterile}}$ .

Предсказанный/ожидаемый контур исключения для  $\approx 300$  дней данных.



# Вопросы *новой* физики

Эксперименты поиска стерильных нейтрино также проводятся в других странах.



Контур исключения эксперимента DANSS (\*)


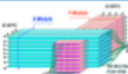




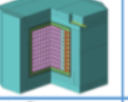
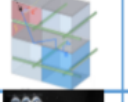

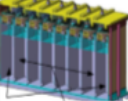
Experiment	Reactor Power/Fuel	Overburden (mwe)	Detection Material	Segmentation	Optical Readout	Particle ID Capability
DANSS (Russia) 	3000 MW LEU fuel 	~50	Inhomogeneous PS & Gd sheets	2D, ~5mm	WLS fibers.	Topology only
NEOS (South Korea) 	2800 MW LEU fuel	~20	Homogeneous Gd-doped LS	none	Direct double ended PMT	recoil PSD only
nuLat (USA) 	40 MW <sup>235</sup> U fuel	few	Homogeneous <sup>6</sup> Li doped PS	Quasi-3D, 5cm, 3-axis Opt. Latt	Direct PMT	Topology, recoil & capture PSD
Neutrino4 (Russia) 	100 MW <sup>235</sup> U fuel 	~10	Homogeneous Gd-doped LS	2D, ~10cm	Direct single ended PMT	Topology only
PROSPECT (USA) 	85 MW <sup>235</sup> U fuel	few	Homogeneous <sup>6</sup> Li-doped LS	2D, 15cm	Direct double ended PMT	Topology, recoil & capture PSD
SoLid (UK Fr Bel US) 	72 MW <sup>235</sup> U fuel	~10	Inhomogeneous <sup>6</sup> LiZnS & PS	Quasi-3D, 5cm multiplex	WLS fibers	topology, capture PSD
Chandler (USA) 	72 MW <sup>235</sup> U fuel	~10	Inhomogeneous <sup>6</sup> LiZnS & PS	Quasi-3D, 5cm, 2-axis Opt. Latt	Direct PMT/ WLS Scint.	topology, capture PSD
Stereo (France) 	57 MW <sup>235</sup> U fuel	~15	Homogeneous Gd-doped LS	1D, 25cm	Direct single ended PMT	recoil PSD



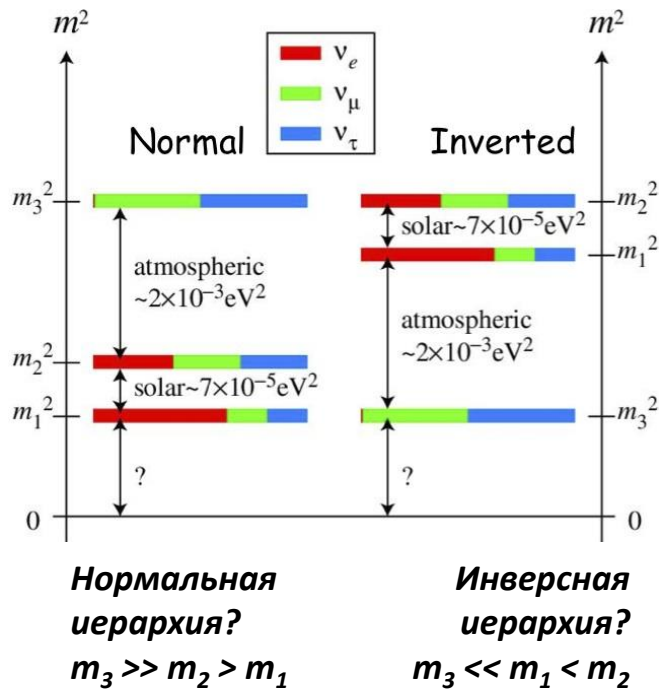
Table from N.Bowden at Neutrino 2016

(\*) [https://indico.in2p3.fr/event/13763/contributions/15214/attachments/12731/15629/Danilov\\_Moriond\\_v2.pdf](https://indico.in2p3.fr/event/13763/contributions/15214/attachments/12731/15629/Danilov_Moriond_v2.pdf)  
<http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/44141> Сергеева В.С. / Вводный курс по физике нейтрино

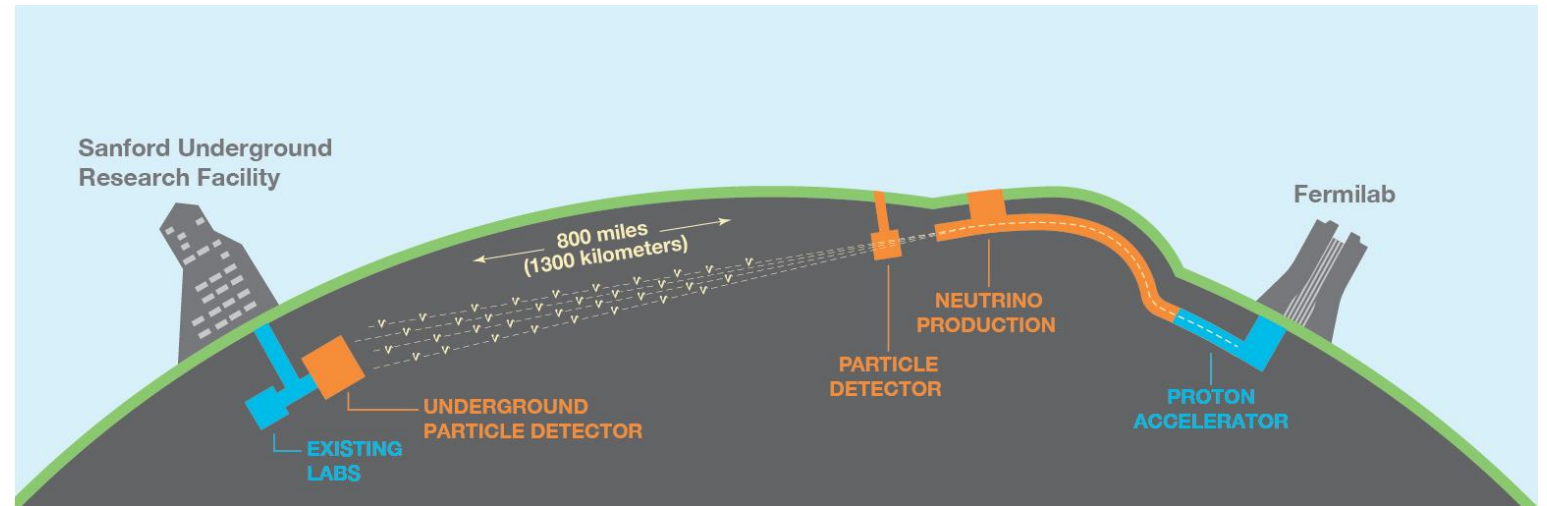
# Вопросы новой физики

Что нам еще не известно?

- Масса нейтрино?  
 $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$   
 $m_1, m_2, m_3$  ?



США, луч 1300 км!  
**DEEP UNDERGROUND NEUTRINO EXPERIMENT**



Одна из главных задач DUNE

- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  &  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$   
 $m_3^2 > m_1^2$  ?  
 $m_3^2 < m_1^2$  ?  
 Знак  $\pm \Delta m_{31}^2$

<http://docs.dunescience.org/cgi-bin/RetrieveFile?docid=597&filename=LBNF-and-DUNE-projects-14Oct2015.pdf&version=1>



# Вопросы *новой* физики

## Что нам еще не известно?

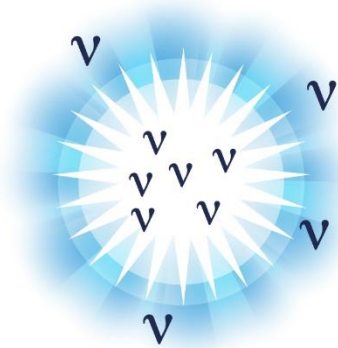
- Асимметрия между материей и антиматерией

Почему во Вселенной материи  $\gg$  антиматерии?

Почему кол-во материи  $\neq$  кол-во антиматерии?

1967 г. А. Сахаров, 3 необходимых условия для создания дисбаланса из начального баланса материя-антиматерия.

Одно из условий - **CP-нарушение!**



[https://www.youtube.com/watch?v=AYtKcZMJ\\_4c](https://www.youtube.com/watch?v=AYtKcZMJ_4c)



Нарушение инвариантности **CP** в первые секунды после Большого взрыва может объяснить это явление.

**CP** – Нарушение инвариантности?  
 $c = \text{charge}, p = \text{parity}$

$$A_{CP} = \frac{P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e)}{P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e)} \sim \frac{\sin \delta}{\sin \theta_{13}}$$

Если асимметрия существует  $\rightarrow$   
 $A_{CP} \neq 0$

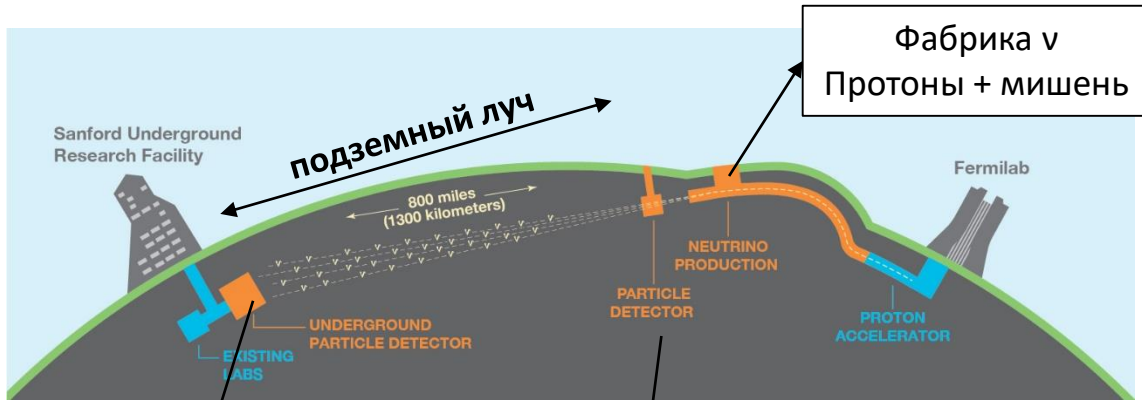
DUNE: ближний и дальний детектор

*\*Барионная асимметрия Вселенной - не объясняется ни Стандартной Моделью ни общей теорией относительности. Важная проблема в космологии.*

*\*CP — произведение 2 симметрий. C, зарядовое сопряжение, превращает частицу в её античастицу. P, чётность, создает зеркальное изображение системы.*

# Вопросы *новой* физики

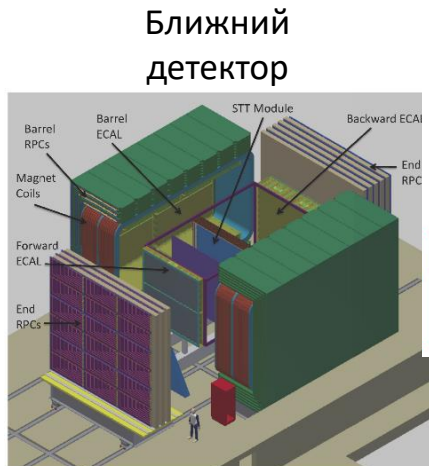
# WA105



DUNE – эксперимент очень большого формата!  
 $4 \cdot 10^4$  тонн = 4 модуля /  $10^4$  тонн  
 (~60x15x15 m<sup>3</sup>)

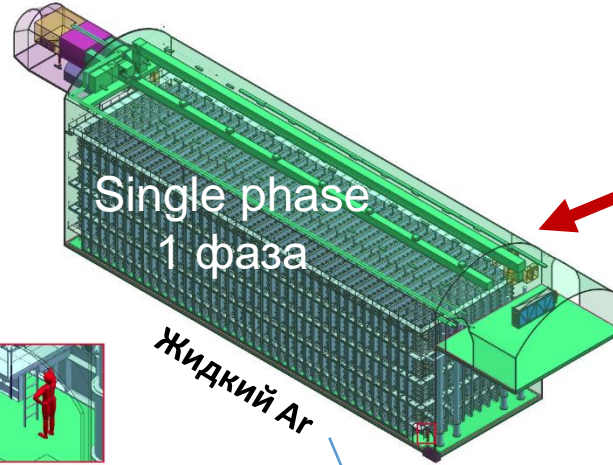
Для начала строим прототип → WA105 → прототип  
 дальнего детектора, 2 фазы.

Дальний детектор  
 Детектор на основе  
 время-проекционной  
 камеры  
 (Liquid Argon Time  
 Projection Chambers)

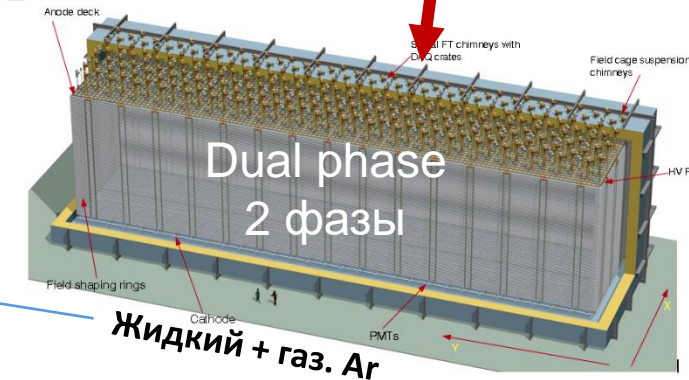
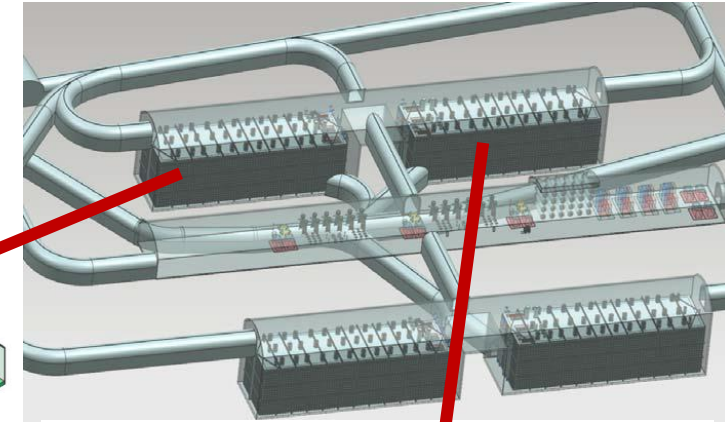


$10^{21}$  протонов/мишень/год

Ближний  
 детектор

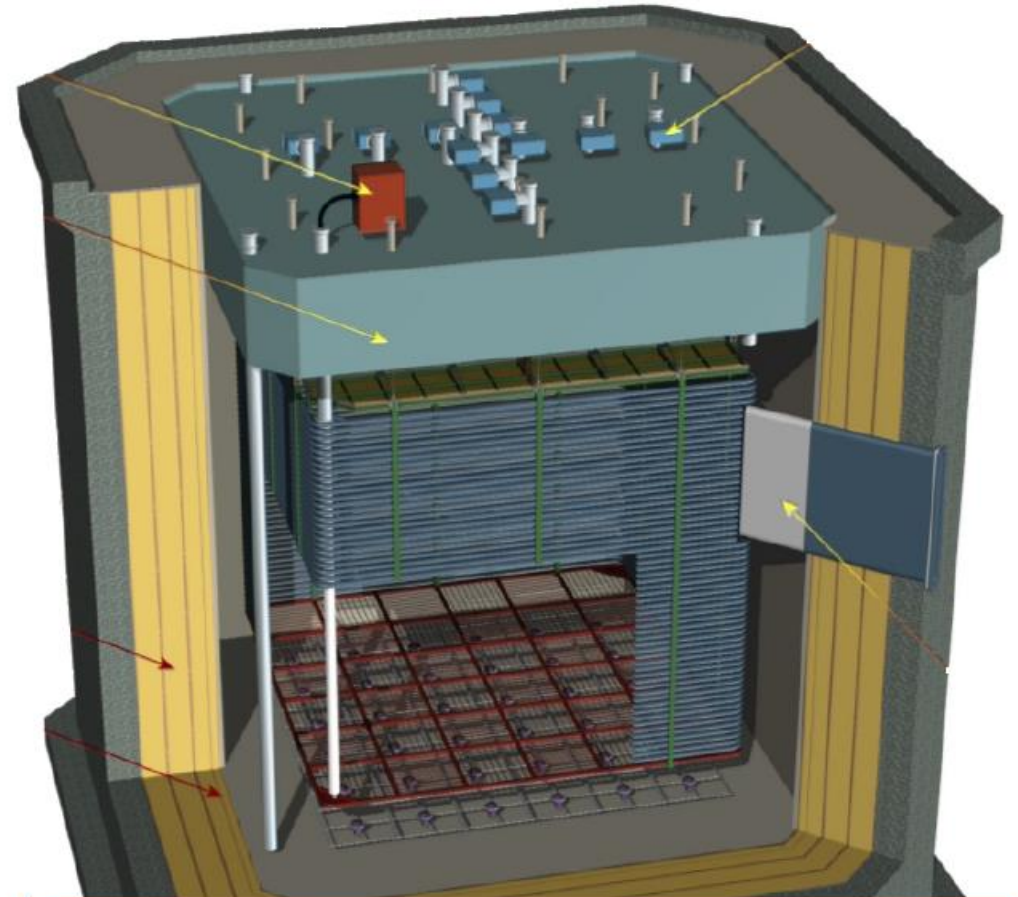
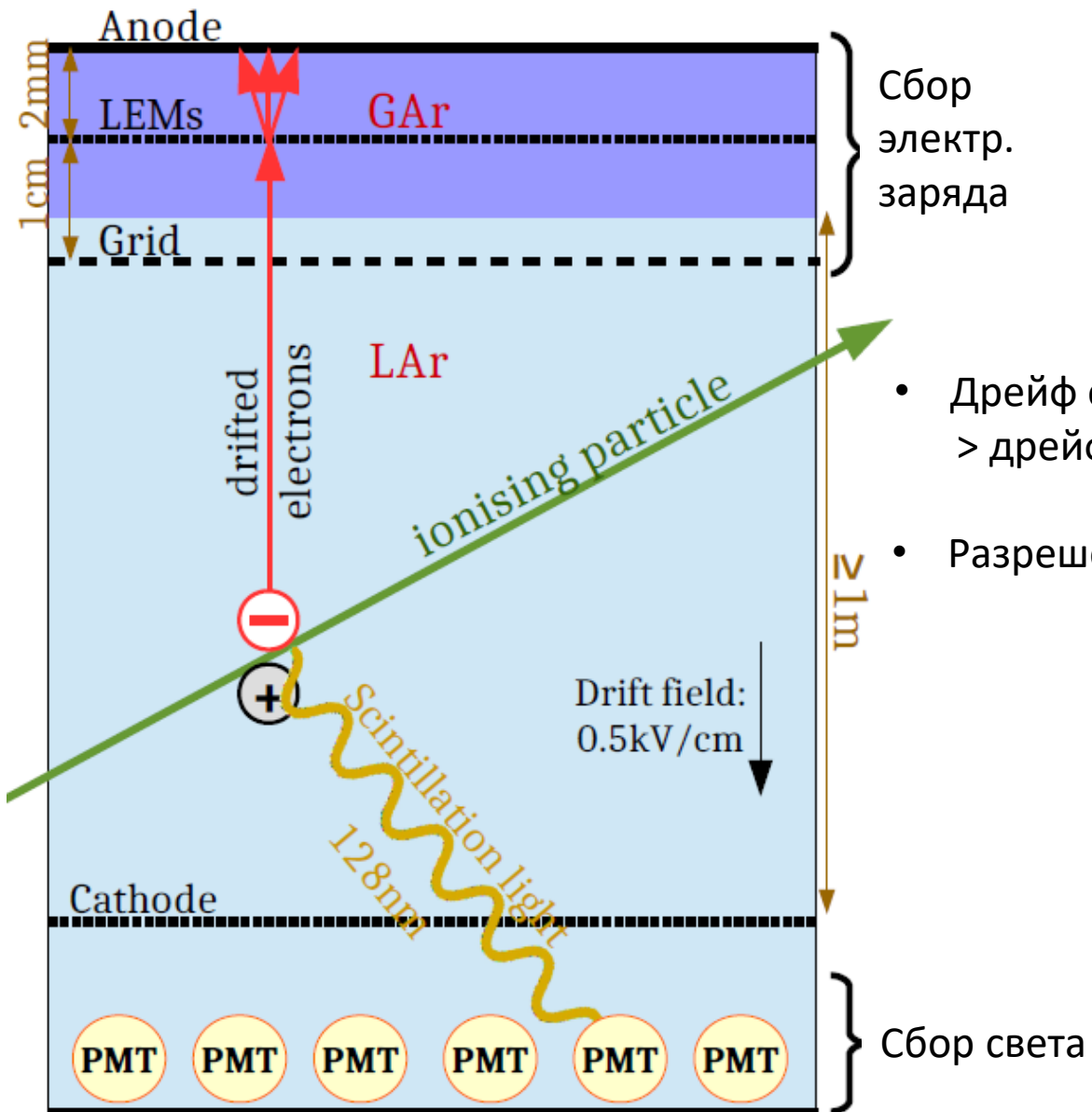


CERN!



# Вопросы *новой* физики

# WA105



ProtoDUNE-DP (WA105)

6x6x6 м<sup>3</sup>

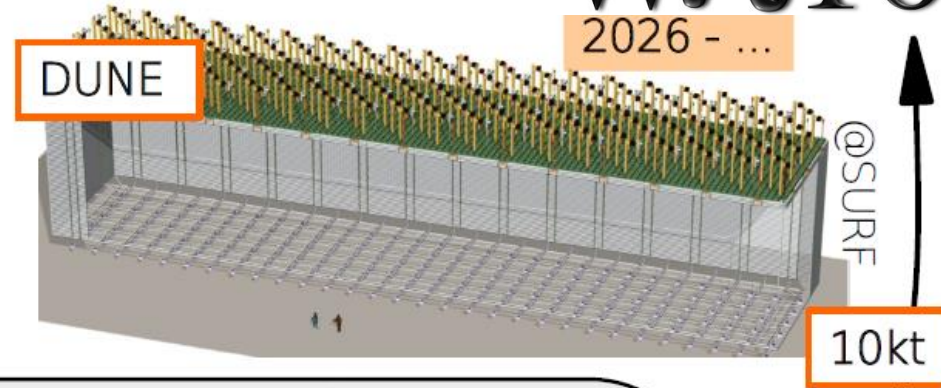
2 фазы, Ar жидкий + газ.

# Вопросы *новой* физики

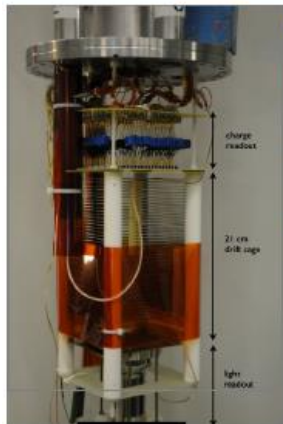
# WA105

**Goal:** demonstrate the capabilities of the **dual phase technology** for a large-scale detector

✓ A first step has been achieved with the **3x1x1 operation!**

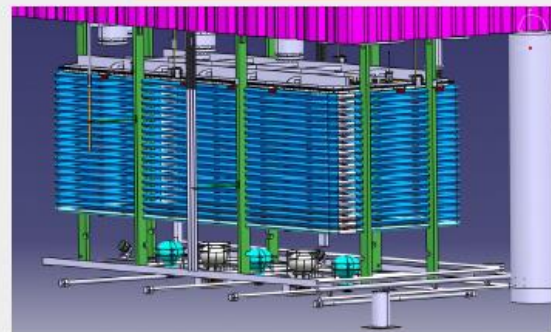


2010 - 2014



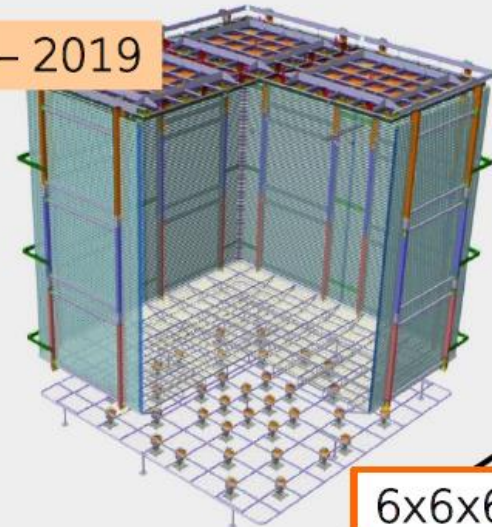
3L

2014 - 2017



3x1x1 m<sup>3</sup>

2016 - 2019



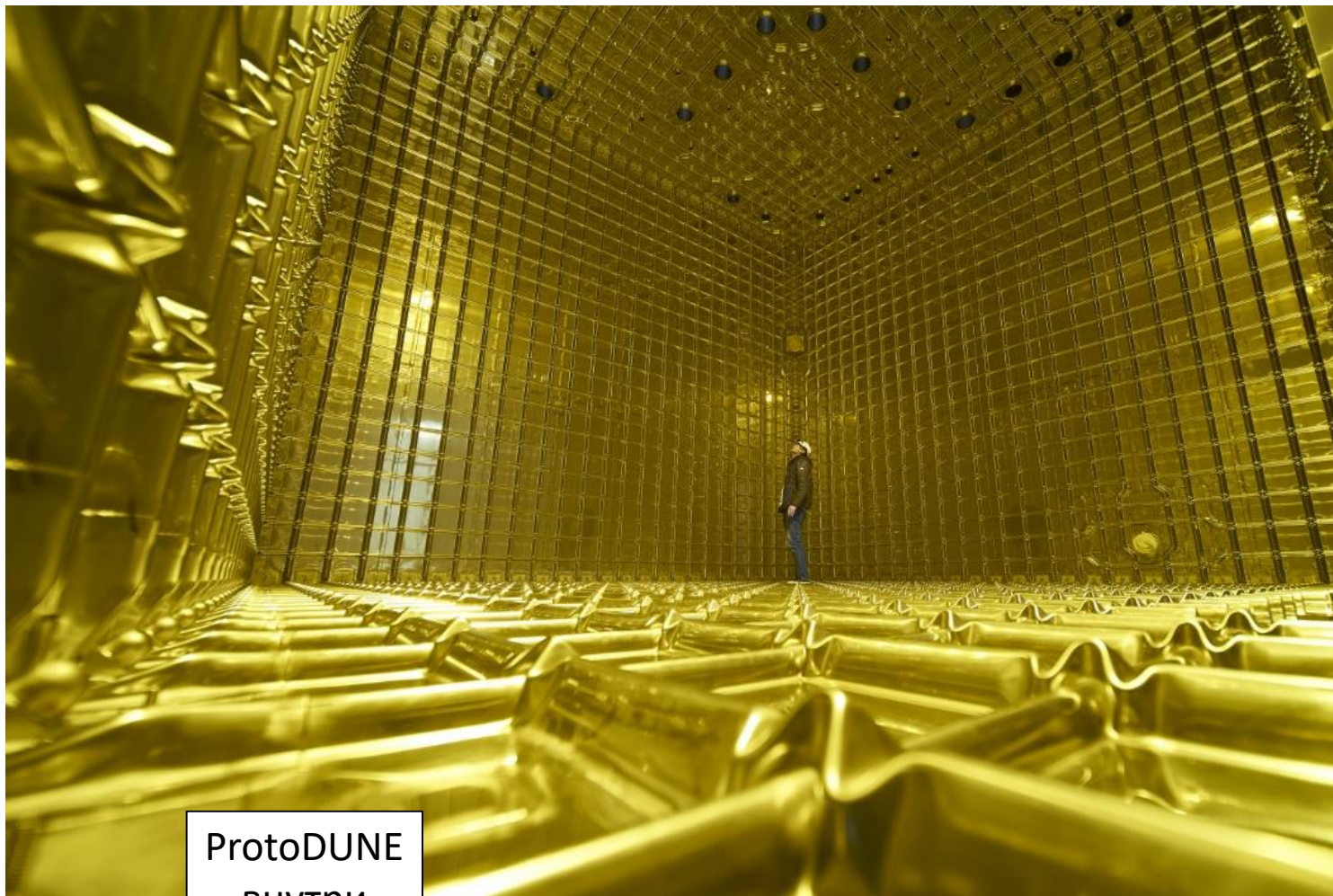
6x6x6 m<sup>3</sup>

Today

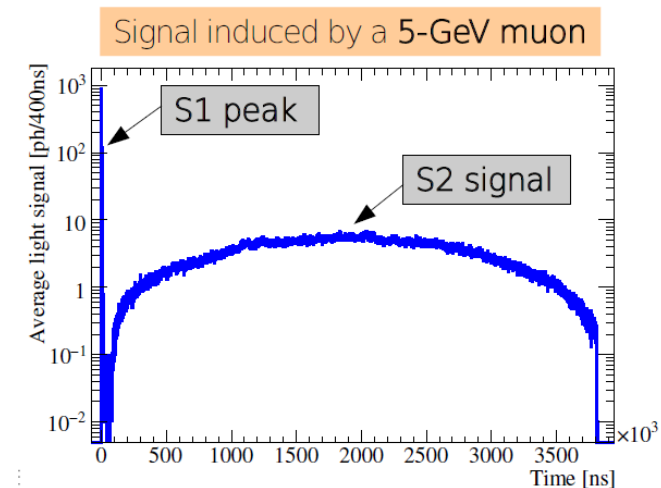
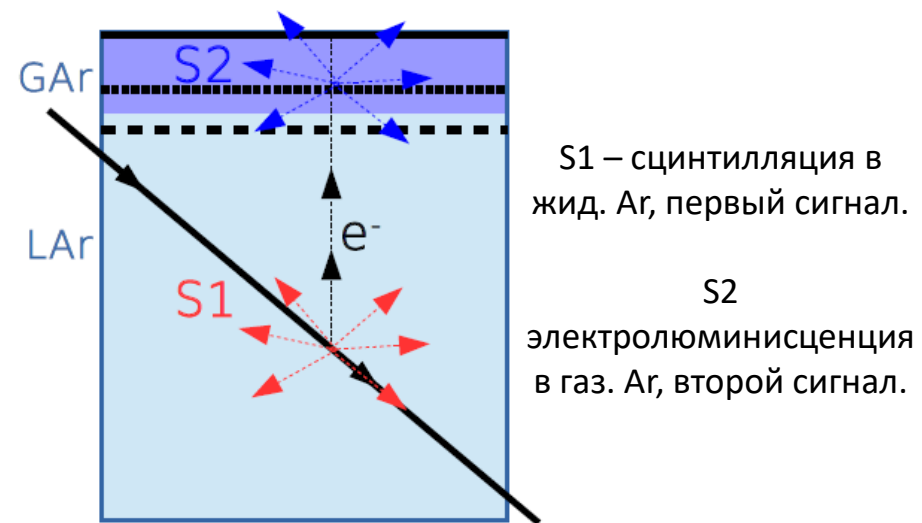
ProtoDUNE-DP collaboration

# Вопросы *новой* физики

# WA105



ProtoDUNE  
внутри

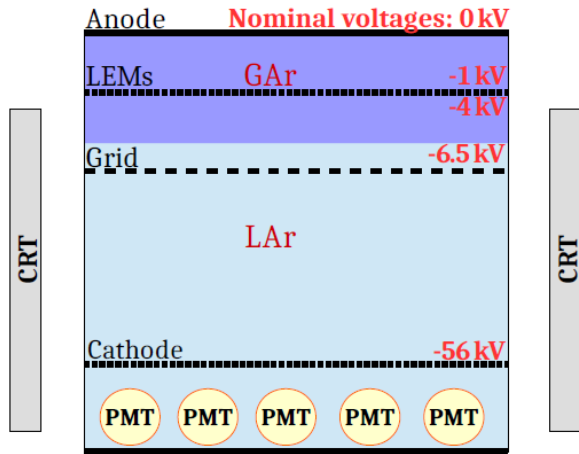


\*Anne Chappuis, (LAPP – CNRS/IN2P3), ENIGMASS General Meeting. Grenoble, December 7th 2017

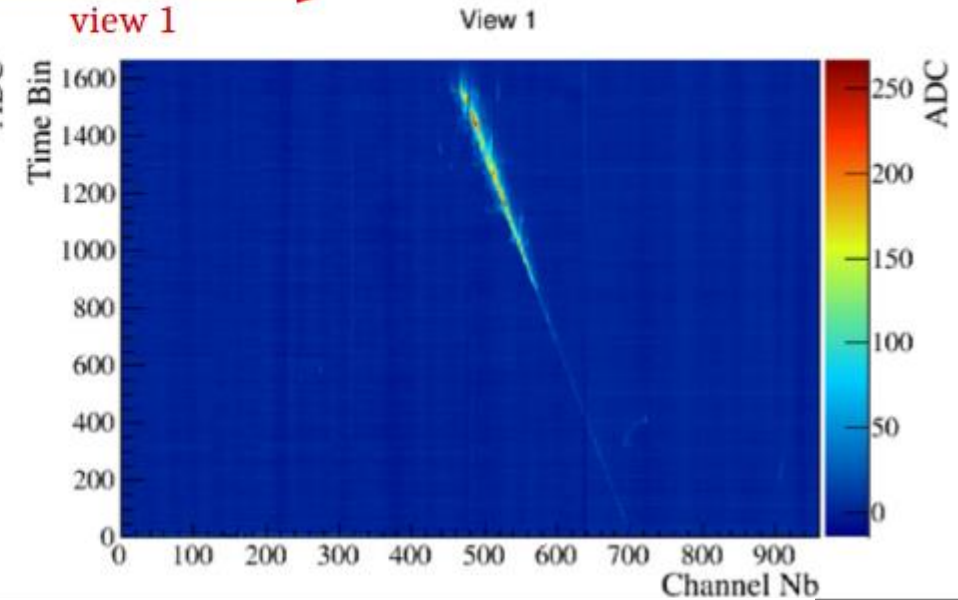
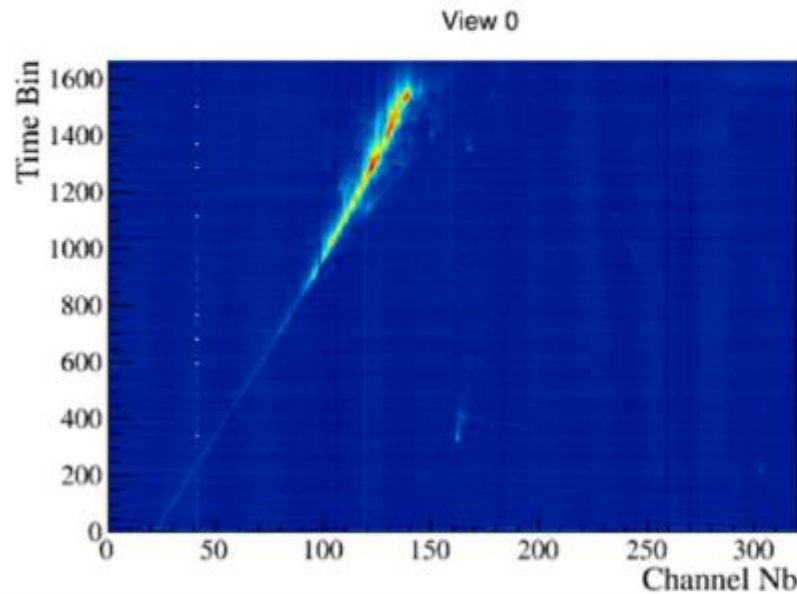
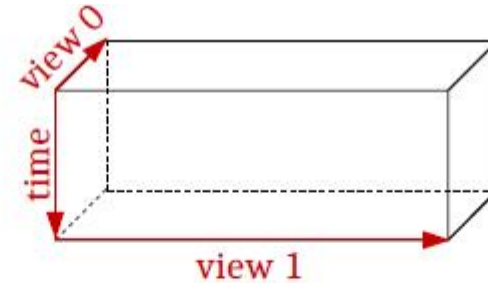
<https://cds.cern.ch/record/2288139>

# Вопросы *новой* физики

Что видит детектор? Данные?



Пример события

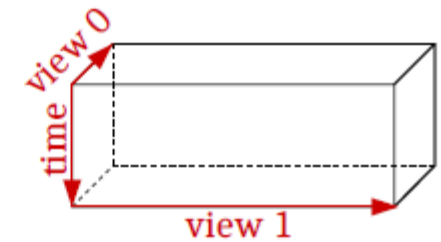
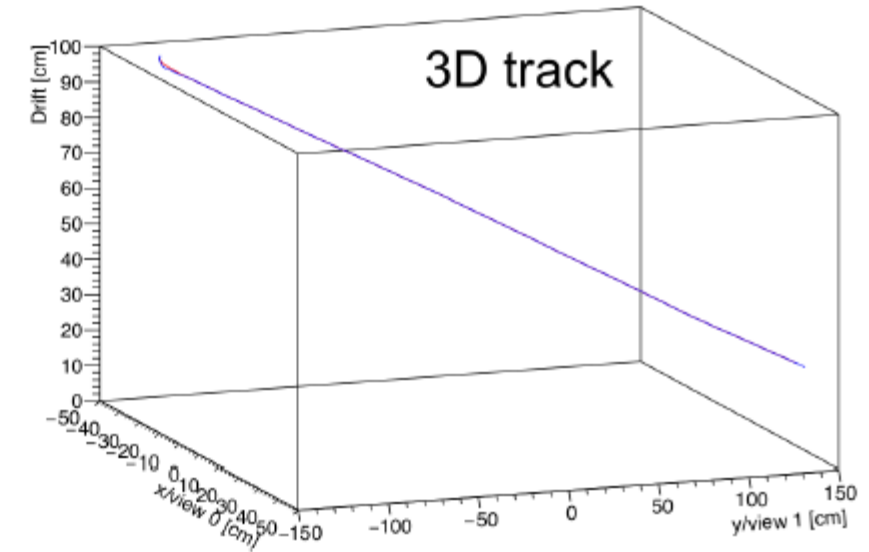
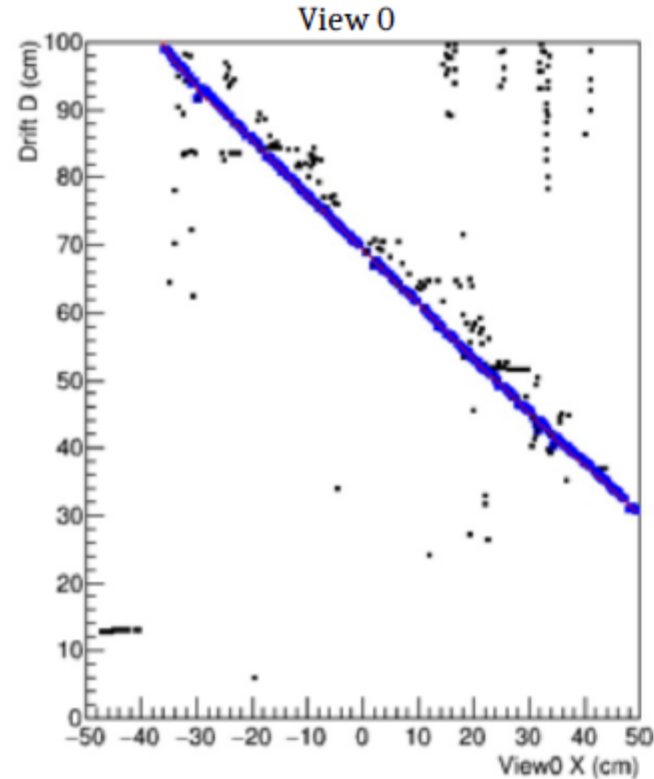
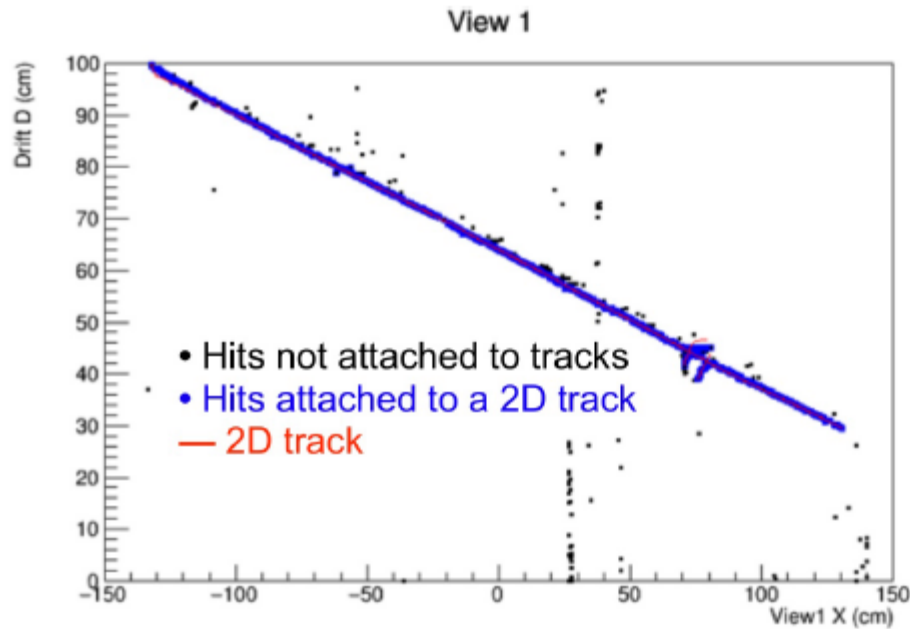


\*Anne Chappuis, (LAPP – CNRS/IN2P3), ENIGMASS General Meeting. Grenoble, December 7th 2017

# Вопросы *новой* физики

# WA105

## Реконструкция данных. Заряд.



\*Anne Chappuis, (LAPP – CNRS/IN2P3), ENIGMASS General Meeting. Grenoble, December 7th 2017

3x1x1 м<sup>3</sup> прототип прекратил операцию, анализ данных (2018 г.)

6x6x6 м<sup>3</sup> прототип – строение должно завершиться в 2018 г.

1 из модулей DUNE – 2-ух фазовый LArTPC

# Заключение

*Мы многое узнали о нейтринно*

$\beta$  – распад,  $q_\nu = 0$ ,  $m_\nu \neq 0$ , малое сечение взаимодействия

3 аромата  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

+ 3 массовых состояния  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$

Смешивание между  $\nu$  - осцилляция

$\cos \theta_{ij}, \sin \theta_{ij}$  и  $\Delta m_{ij}^2$

...

**Чем больше узнаём, тем больше нового не понимаем**

-  $\nu$  частица Майораны или Дирака?

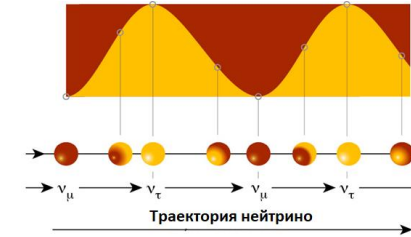
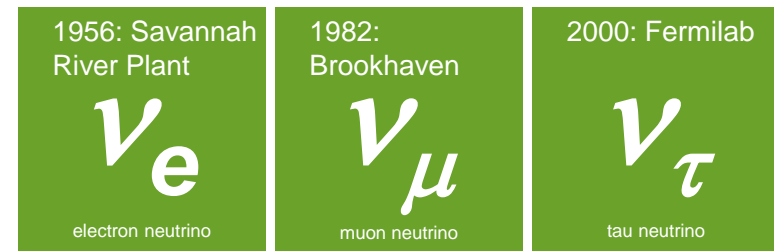
- Нормальная или инверсная иерархия масс  $\nu$ ?

- Стерильные нейтринно?

- CP-нарушение?

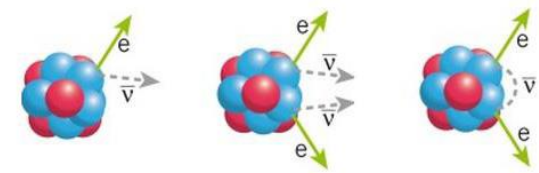
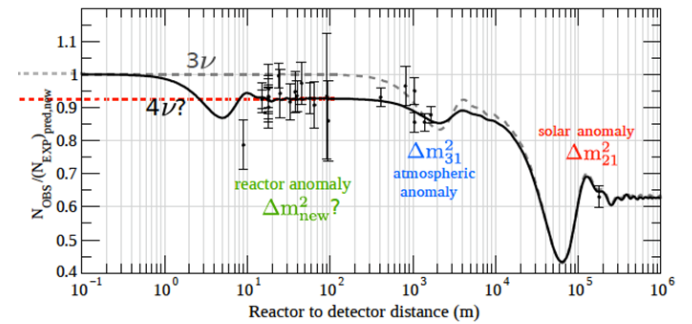
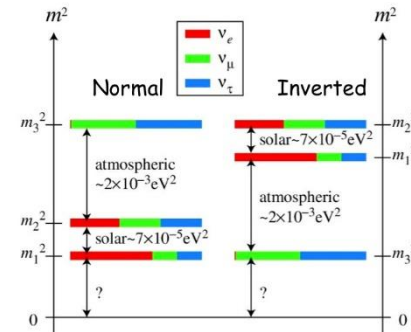
→ Новые эксперименты ищут ответы на эти вопросы

*STEREO, SuperNEMO, DUNE, SuperKamiokande, и многие многие другие!*



PMNS

	$\nu_1$	$\nu_2$	$\nu_3$
$\nu_e$	Yellow	Blue	Red
$\nu_\mu$	Green	Blue	Yellow
$\nu_\tau$	Green	Blue	Yellow

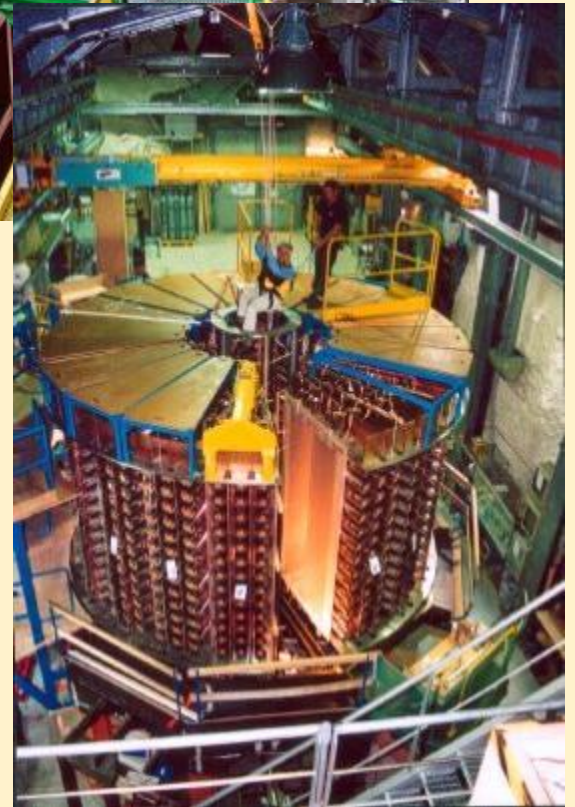
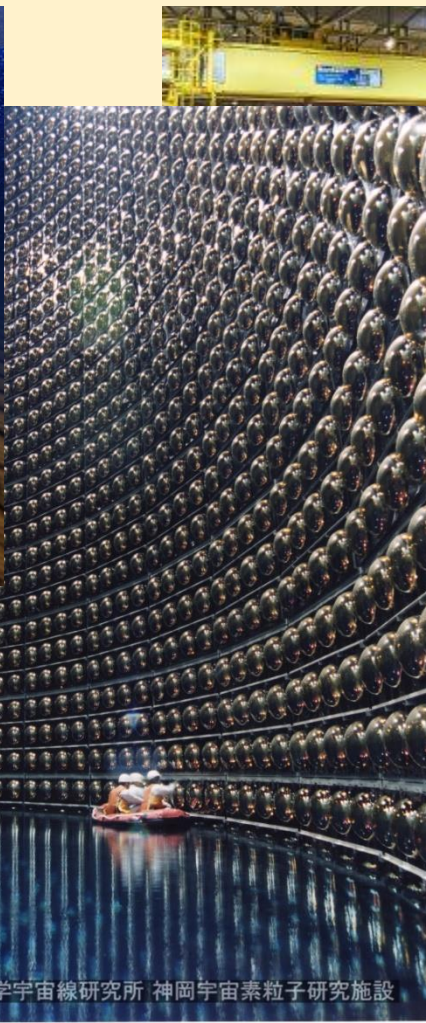
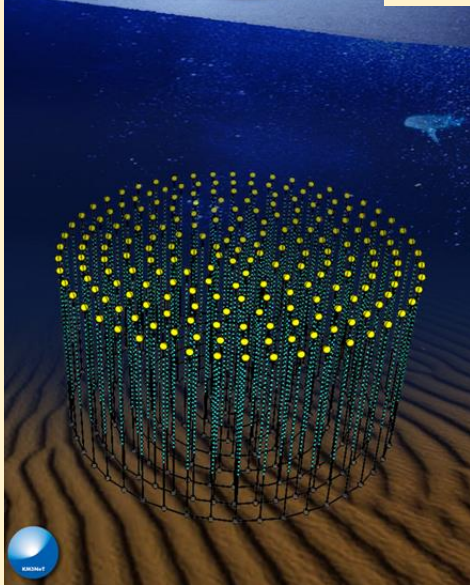


Standard  $\beta$  decay    Double- $\beta$  decay    Neutrino-less double- $\beta$  decay

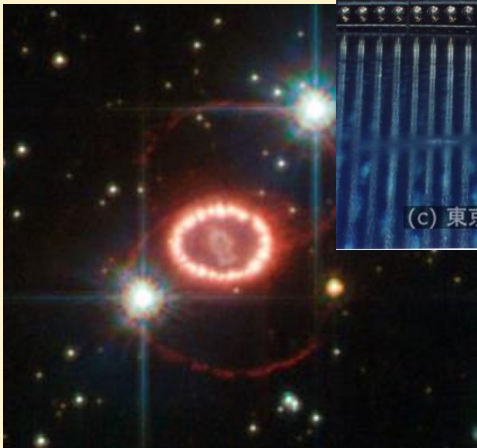
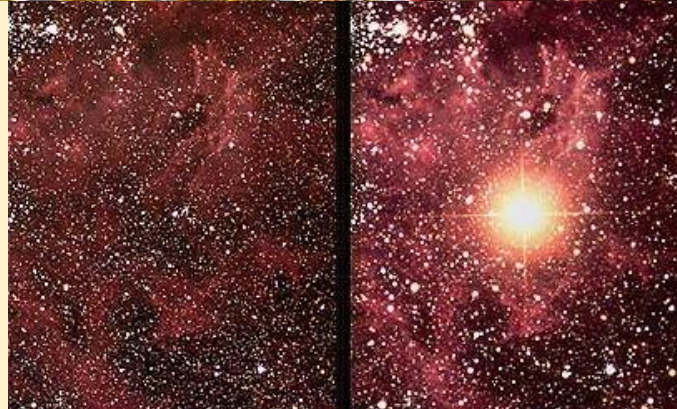




# СПАСИБО ЗА ВАШЕ ВНИМАНИЕ!



(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設



Сергеева В.С. / Вводный курс по физике нейтрино  
viktoriya\_srgyv@hotmail.com